



MÉMOIRE

Présenté à

L'Université Hadj Lakhdar Batna

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

EN ELECTROTECHNIQUE

Présenté par

BENDJEDDOU YACINE

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique - Université de Batna

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PERFORMANCES D'UN GENERATEUR ASYNCHRONE

Thèse soutenue le :.....2013 devant le jury :

| | | | |
|--------------------|------------|-----------------------|-------------|
| Fatima Zohra KADID | President | Professeur | Univ. Batna |
| Rachid ABDESSEMED | Rapporteur | Professeur | Univ. Batna |
| Sebti BELKACEM | Examineur | Maître de conférences | Univ. Batna |
| Azeddine CHAIBA | Examineur | Maître de conférences | Univ. Sétif |
| Youcef HARBOUCHE | Examineur | Maître de conférences | Univ. Batna |

Remerciements

Au nom d'ALLAH, le Tout - Miséricordieux, le Très - Miséricordieux.

Je tiens tout particulièrement, à remercier Monsieur Rachid ABDESSEMED, Professeur à l'université de Batna et directeur du laboratoire de recherche d'Électrotechnique (LEB), promoteur de ce Mémoire de Magister en cotutelle et dont les idées, les conseils, les critiques, mais aussi les encouragements, m'ont été d'une aide précieuse. Il a fait beaucoup plus que son devoir comme directeur de Mémoire et c'est pourquoi il a ma reconnaissance la plus profonde.

Je remercie Monsieur MERABET Elkhier, Maître assistant à l'université de Batna, pour son aide, ses conseils et ses encouragements pour mener ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres de jury: Pr. Fatima Zohra KADID, Dr. Azeddine CHAIBA, Dr. Sebti BELKACEM et Dr. Youcef HARBOUCHE pour avoir acceptés d'évaluer mon travail.

Mes remerciements vont également à mes amis.

A ma **Grand-Mère**,
à mes chers **Parents**,
à ma chère **Sœur**, à mes chers **Frères**,
à mes **Amis**,
je dédie ce Mémoire.

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Table des matières | i |
| Symboles & Abréviations | iii |
| Introduction Générale | 1 |
| 1 Etat de l'Art | 3 |
| 1.1 Introduction | 3 |
| 1.2 Contexte historique | 3 |
| 1.3 Génératrice asynchrone à cage | 4 |
| 1.4 Techniques de commande | 5 |
| 1.4.1 Générateur couplé au réseau | 5 |
| 1.4.2 Générateurs en fonctionnement autonome | 8 |
| 1.5 Conclusion | 13 |
| 2 Etude et analyse de la GAS et GASDE | 14 |
| 2.1 Introduction | 14 |
| 2.2 Principe de fonction | 14 |
| 2.3 Phénomène d'Auto-amorçage | 16 |
| 2.4 Description du dispositif | 18 |
| 2.4.1 Génératrice asynchrone à cage (GAS) | 19 |
| 2.4.2 Génératrice asynchrone à cage double étoile (GASDE) | 19 |
| 2.5 Modèles de la GAS et de la GASDE | 20 |
| 2.5.1 Présentation de la GAS | 20 |
| 2.5.2 Présentation de la GASDE | 22 |
| 2.5.3 Modélisation de l'auto-amorçage | 25 |
| 2.6 Résultat de la simulation | 27 |
| 2.6.1 Génératrice asynchrone à cage GAS | 27 |
| 2.6.2 Effet de la capacité | 30 |
| 2.6.3 Effet de la vitesse d'entraînement | 31 |
| 2.6.4 Fonctionnement en charge | 31 |
| 2.6.5 Génératrice asynchrone à cage double étoile <i>GASDE</i> | 35 |
| 2.6.6 Effet de la capacité | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.6.7 | Influence de la vitesse d'entraînement | 38 |
| 2.6.8 | Simulation de la <i>GASDE</i> connectée à une charge R purement résistive | 39 |
| 2.6.9 | Simulation de la <i>GASDE</i> connectée à une charge RL inductive | 41 |
| 2.7 | Conclusion | 44 |
| 3 | Commande Vectorielle de la génératrice asynchrone à cage <i>GAS</i> | 45 |
| 3.1 | Introduction | 45 |
| 3.2 | Modélisation du redresseur triphasé à MLI | 45 |
| 3.2.1 | Représentation fonctionnelle du redresseur à MLI dans le référentiel triphasé | 46 |
| 3.2.2 | Représentation du redresseur MLI dans le référentiel tournant (dq) | 48 |
| 3.3 | Commande vectorielle | 48 |
| 3.3.1 | Orientation du flux rotorique | 49 |
| 3.3.2 | Algorithme de commande | 51 |
| 3.4 | Interprétation des résultats | 52 |
| 3.4.1 | Essai sans variation de la vitesse ou de la charge | 52 |
| 3.4.2 | Essai avec variation de la vitesse d'entraînement | 53 |
| 3.4.3 | Essai avec variation de la charge | 55 |
| 3.4.4 | Essai avec une charge RL | 57 |
| 3.4.5 | Essai avec variation de la vitesse et de la charge | 58 |
| 3.5 | Conclusion | 60 |
| 4 | Commande Vectorielle de la génératrice asynchrone à cage double étoile <i>GASDE</i> | 61 |
| 4.1 | Introduction | 61 |
| 4.2 | Commande Vectorielle à orientation du flux rotorique | 61 |
| 4.2.1 | Algorithme de commande | 62 |
| 4.2.2 | Essai sans variation de la vitesse ou de la charge | 64 |
| 4.2.3 | Essai avec variation de la vitesse d'entraînement | 66 |
| 4.2.4 | Essai avec variation de la charge | 69 |
| 4.2.5 | Essai avec une résistance intermédiaire | 71 |
| 4.2.6 | Commande de la <i>GASDE</i> avec un bus continu à la sortie des deux redresseurs | 75 |
| 4.3 | Conclusion | 79 |
| | Conclusion Générale | 80 |
| A | Paramètres de la Génératrice Asynchrone à Cage | 81 |
| B | Paramètres de la Génératrice Asynchrone Double Etoile | 82 |
| | Bibliographie | 83 |

Symboles & Abréviations

| | |
|-----------------------|--|
| GAS | Génératrice Asynchrone à cage. |
| GASDE | Génératrice Asynchrone Double Etoile. |
| nph | Nombres de phases. |
| i | Le courant. |
| v | La tension. |
| $s1, s2, r$ | Les indices correspondants à l'étoile 1, étoile 2 et au rotor. |
| $as1, bs1, cs1$ | Les indices correspondants au trois phases du 1 stator. |
| $as2, bs2, cs2$ | Les indices correspondants au trois phases du 2 stator. |
| ar, br, cr | Les indices correspondants au trois phases du rotor. |
| R_{s1}, R_{s2}, R_r | La résistances statoriques et rotorique. |
| L_{s1}, L_{s2}, L_r | L'inductance propre du stator et du rotor. |
| L_{ms} | L'inductance mutuelle entre phases statoriques. |
| L_{mr} | L'inductance mutuelle entre phases rotoriques. |
| M_{sr} | L'inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques. |
| C_{em} | Le couple électromagnétique. |
| C | Condensateur. |
| K_f | Le coefficient de frottement. |
| J | Le moment d'inertie. |
| MLI | La modulation de la largeur d'impulsion. |
| d, q | Les axes direct et quadrature du repère de PARK. |
| ω_r | La pulsation électrique rotorique. |
| ω_s | La pulsation électrique statorique. |
| ω_{coord} | La vitesse angulaire des axes (d, q). |
| ω_{gl} | La pulsation électrique de glissement. |
| PI | Le régulateur proportionnel intégral. |
| V_{DC} | La tension de bus continu. |
| ϕ_r | Le flux rotorique. |
| x^* | Grandeur de référence (flux, tension, courant ...etc.). |
| S | L'opérateur de Laplace. |

Introduction Générale

Chacun le sait, la disponibilité d'une énergie suffisamment abondante, aisément mobilisable et compétitive conditionne le développement économique et social d'un pays. Malgré les efforts de sobriété et l'amélioration de l'efficacité énergétique qu'il fera, le monde va devoir faire face à des besoins grandissants d'énergie, puisque d'ici 2050 la population de la planète devrait augmenter de plus de 30% et que plus d'un milliard de personnes aspirent légitimement dès maintenant à voir leur consommation croître fortement pour leur permettre d'atteindre un niveau de vie satisfaisant. Le champ de contraintes est très fort, étant donné que plus de 80% de la consommation primaire mondiale d'énergie repose actuellement sur les énergies fossiles, alors que leur épuisement est inéluctable et que leur consommation massive augmente les risques sanitaires, environnementaux et de changement climatique.

L'accident de la centrale nucléaire Fukushima survenu au Japon a fait resurgir le nombre de craintes relatives au nucléaire. Alors que certains pays, comme l'Allemagne et l'Italie, ont annoncé leur sortie du nucléaire et que le Japon, dont la quasi-totalité des réacteurs sont aujourd'hui à l'arrêt.

A cause de la demande croissante de l'énergie, et les inconvénients et les risques que représentent l'utilisation des matières fossiles et du nucléaire, les chercheurs ne cessent de s'appliquer pour trouver et améliorer d'autres sources pour la génération de l'énergie renouvelable, plus propres pour la nature (vertes), et moins coûteuses.

Pour l'énergie solaire, il s'agit d'améliorer le rendement des cellules photovoltaïques, de diminuer leur coût et de développer les perspectives ouvertes par le solaire à concentration thermodynamique pour l'industrie. Pour la biomasse, un premier défi est porté par les démonstrateurs BiotFuel et Syndièse, avec le développement de procédés de 2^{ème} génération capables de convertir en diesel et kérosène des matières végétales sans usages, éventuellement additionnées de résidus pétroliers.

Pour l'énergie éolienne, la prolifération des centrales éoliennes sur le réseau électrique posera des problèmes. Ils vont concerner la structure de la centrale éolienne (commande, configuration) mais également d'ici quelques années la gestion, voire la structure des réseaux d'énergie. Le problème majeur associé aux centrales éoliennes est qu'elles ne participent pas aux services système (régulation de la tension, de la fréquence, possibilité de fonctionner en îlotage); face à ce problème là, l'utilisation des éoliennes dans des sites isolés, à proximité du consommateur représente des avantages considérables et un essor pour ce type de génération d'énergie basé par la conversion du vent (mécanique) en énergie électrique.

Des génératrices asynchrones à cage d'écureuil raccordées à une éolienne représente une solution techno-économique pour la génération d'électricité dans les sites isolés à cause de la constitution d'un rotor à cage d'écureuil, qui lui assure une robustesse et une grande fiabilité.

Le défi majeur est de contrôler la tension à la sortie de la génératrice transmise aux consommateurs, quelques soient les variations du vent et de la charge. Une commande vectorielle à orientation de flux rotorique est appliquée. La génératrice asynchrone à cage est connectée à un redresseur et un onduleur MLI, puis à la charge. L'onduleur et les charges sont présentés comme une seule charge à la sortie du bus continu du redresseur pour simplifier l'étude.

Depuis la première machine inventé par Tesla, les chercheurs ne cessent d'avancer dans ce domaine. A l'apparition des machines polyphasées, plus fiable, robuste, et donne la possibilité de segmentation de la puissance, on propose une étude analytique et commande vectorielle de l'un de ses modèle type génératrice asynchrone à cage double étoile.

Pour ce faire, le travail est scindé en quatre chapitres.

Le premier chapitre est un état de l'art des différents types de commande de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil. Après un historique sur l'évolution des éoliennes, une présentation des éoliennes raccordées au réseau, et exploitées dans des sites isolés est donnée, tout en indiquant leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude et l'analyse des génératrices asynchrones à cage simple et double étoile pour les différents cas de fonctionnement, à vide, en charge, et à vitesse variable.

Le troisième chapitre est l'objet d'une commande vectorielle à orientation du flux rotorique de la génératrice asynchrone à cage. Une représentation d'un modèle topologique du redresseur MLI est réalisée.

Le quatrième chapitre présente la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à cage double étoile. Elle est testée pour différents algorithmes de commande et conditions de fonctionnement.

Chapitre

1

Etat de l'Art

1.1 Introduction

Cet état de l'art a pour objectif de décrire les diverses technologies et les principales caractéristiques des générateurs asynchrones à cages pour la génération de l'électricité en précisant les avantages et les inconvénients des différents types de commandes actuellement utilisés.

1.2 Contexte historique

Très tôt, dans l'histoire des techniques, le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique: pour la propulsion des navires dès l'antiquité (3000 ansAv.JC), pour les moulins (à céréales, olives...), le pompage ou, au moyen age, pour l'industrie (forages...). La conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique est en effet relativement aisée, il faut seulement disposer d'un potentiel satisfaisant et résister aux caprices des vents excessifs. A part dans les régions plates, l'énergie hydraulique s'est ainsi souvent révélée plus intéressante, ce qui explique la situation actuelle où l'hydroélectricité est dominante parmi les sources renouvelables. En outre l'eau s'accumule facilement dans les réservoirs et permet de stocker de l'énergie. Vers le milieu du XIX^{eme} siècle, il y avait environ 200 000 moulins à vent en Europe [Hau], c'est principalement l'arrivée des machines à vapeur industrielles qui a initié leur déclin.

Ce n'est qu'à la fin du XIX^{eme} siècle, lorsque l'électricité pris son essor, que l'aérogénération électrique fit ses premiers pas. Au Danemark, Poul La Cour fut, sans doute, le pionnier, il a associé une turbine éolienne à une dynamo en 1891. En France [Arg], contrairement à ce que la situation actuelle pourrait laisser penser, les recherches allèrent bon train dans les années 1920 (éolienne bipale de 20m de diamètre, compagnie CEM) puis dans les années 1950-60 (tripale de 30 m et génératrice synchrone de 800 KW à Nogent le Roi, bipale de 35m et génératrice asynchrone de 1 MW à Saint Rémy des Landes). En 1941, une éolienne bipale de 1250 KW (machine synchrone) était expérimentée aux USA dans le Vermont. En 1978, les Danois, aujourd'hui leaders dans le domaine, réalisèrent une machine tripale de 54m pour une puissance de 2MW. Les nombreuses réalisations expérimentales (notamment en Californie) et leurs avatars permirent de perfectionner les

turbines, les systèmes de freinage d'urgence, les pilones et les divers dispositifs de contrôles et d'obtenir des aérogénérateurs viables et compétitifs à la fin du XX^{eme} siècle. Diverses solutions de turbines furent explorées, notamment celle à axe vertical connue sous le nom de Darrieus (leur inventeur), mais ne subsistent aujourd'hui pratiquement plus que des machines à axe horizontal à 2 ou 3 pales.

C'est principalement la crise pétrolière de 1970 qui relança les études et les expériences, cette fois à plus grande échelle : l'expérience californienne a été la première à grande échelle (le "Wind-rush") au début des années 80, notamment avec des turbines de moyenne puissance (55 KW) et grâce à une incitation fiscale très volontariste. On passa ainsi de 144 machines (pour un total de 7MW) en 1981, à 4687 machines (386MW) en 1985. mais c'est vers la fin des années 1980 que le marché des systèmes raccordés au réseau a réellement décollé en Europe, dans le reste des USA et également en Asie et en Afrique du Nord. En Europe, les leaders furent les Danois, principalement à cause de leurs faibles ressources énergétiques classiques, aujourd'hui, ils conservent une très large avance au niveau mondial (plus de la moitié des systèmes éoliens vendus) [Ber].

Dans les sites isolés, la rentabilité étant plus facile à obtenir, des petites éoliennes dans la gamme de quelques 100W à quelques 10KW sont commercialisées depuis longtemps. La baisse des coûts des cellules photovoltaïques permet aujourd'hui de construire des systèmes hybrides éoliens et photovoltaïques qui profitent de la fréquente complémentarité vent-soleil (réduction des coûts des batteries de stockage nécessaires en site isolé).

Après ce court histoire sur les éoliennes et leur évolution, on entamera l'étude de l'une des génératrices les plus répandues dans ces systèmes: la génératrice asynchrone à cage.

1.3 Génératrice asynchrone à cage

Une génératrice asynchrone à cage est une machine dont le rotor est entraîné à une vitesse supérieure à celle de synchronisme. En raison de la consommation de puissance réactive, ce type de générateur ne peut pas fonctionner indépendamment d'un réseau qui doit lui fournir la puissance réactive nécessaire.

Ainsi, dans le cas où la génératrice est couplée au réseau, ce dernier fournit la puissance réactive. Par contre, dans le cas d'un site isolé, on doit utiliser des batteries de condensateurs ou des compensateurs actifs pour produire la puissance réactive demandée.

Toujours dans le cas d'un site isolé, en raison de la puissance réactive absorbée par la charge, une puissance réactive supérieure à celle de la machine seule doit être fournie. Afin de pouvoir assurer l'amorçage, la charge doit être appliquée après l'établissement de la tension [Mur] [Mul].

Les génératrices asynchrones à cage d'écureuil destinées à la conversion de l'énergie éolienne sont dimensionnées pour fonctionner avec une source de puissance qui fournit une puissance mécanique très fluctuante.

Elles peuvent être alimentées à fréquence constante (vitesse sensiblement constante) directement par le réseau ou à la fréquence statorique variable (vitesse variable) par un convertisseur électronique.

Les génératrices fonctionnant à vitesse du rotor et fréquence constantes sont celles qui ont été d'abord utilisées pour les installations interconnectées. Ces installations sont plutôt adaptées aux sites pour lesquels les vents sont réguliers et où une variation de vitesse serait

plus difficile à rentabiliser.

Le principal avantage de cette solution est que la vitesse de rotation varie légèrement (au glissement près de quelques %) en fonction des variations du couple. Cette caractéristique permet simplement de réduire l'usure du multiplicateur ce qui représente un des avantages important par rapport à des machines synchrones qui seraient également directement couplées au réseau. En outre, cette légère variation de la vitesse de rotation offre une modeste augmentation de l'énergie captée en rapport avec une faible variation de vitesse du vent [Pap].

Pour augmenter la plage d'utilisation des éoliennes à vitesse fixe et afin d'assurer un bon rendement, on peut bobiner le stator du générateur à cage d'écureuil de telle sorte qu'il comporte deux polarités, par exemple 4 et 6 pôles. On obtient ainsi, à fréquence du réseau constante, deux vitesses de rotation. L'inconvénient de cette technique est qu'un seul enroulement est en service à la fois, de sorte que seulement une partie du cuivre dans les encoches est utilisée, le rendement est sensiblement moins bon à masse donnée. Dans certains cas, on peut utiliser deux générateurs permettant de fonctionner à deux vitesses différentes [Jac].

Pour les sites isolés, où la génératrice asynchrone fonctionne sur un réseau autonome, il faut prévoir un banc de condensateurs fournissant le courant nécessaire pour la magnétisation.

Ceci est également pratiqué en site non isolé pour compenser la puissance réactive.

1.4 Techniques de commande

1.4.1 Générateur couplé au réseau

Le contrôle au niveau de la génératrice permet d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens. La génératrice peut être liée directement ou indirectement au réseau.

Pour l'excitation de la génératrice il faut une puissance réactive fournie par le réseau à l'enroulement du générateur. Dans la plupart des cas, cela n'est pas souhaitable, notamment pour les grandes turbines. La consommation de la puissance réactive du générateur à induction est presque toujours compensée par une batterie de condensateurs pour obtenir un facteur de puissance proche de 1 [Cam] [Lou] [Sey].

Vitesse fixe

Dans le premier cas, le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine asynchrone. Deux génératrices asynchrones sont souvent utilisées dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour de faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevées. Le problème majeur de cette solution est la complexité du montage qui augmente la masse embraquée. Une autre solution consiste à utiliser un câblage du stator qui peut être modifié afin de faire varier le nombre de pôles. Cette disposition permet également de proposer deux régimes de rotation l'un rapide en journée et l'autre plus lent la nuit permettant de diminuer le bruit FIG. 1.1.

Pour le générateur asynchrone à cage double étoile *GASDE*, comme pour la *GAS*, il faut lui fournir de l'énergie réactive nécessaire à son excitation représenté par une double tri-capacité branchée aux bornes des étoiles. Un transformateur placé entre la *GASDE* et le réseau électrique permet d'adapter les tensions des deux étoiles aux tensions du réseau [Mer] [Sin02].

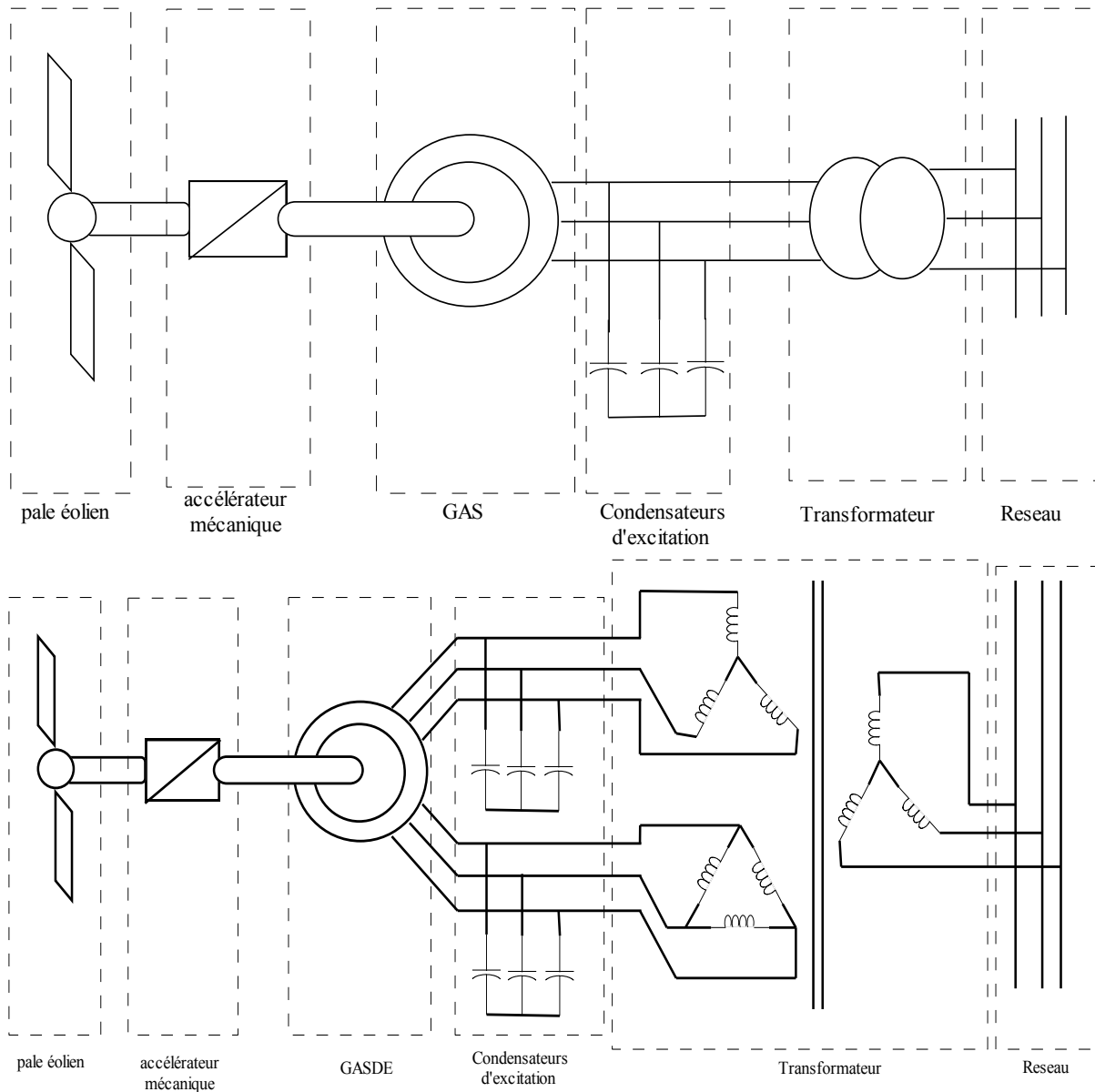


FIG. 1.1 – Générateur couplé au réseau à Vitesse fixe.

Avantages

- Simplicité du système électrique;
- Plus grande fiabilité;
- Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne;

- Moins cher.

Inconvénients

- Une puissance extraite non optimale: Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée;
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone: la connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau [Cam].

Générateur couplé au réseau à vitesse variable

La génératrice asynchrone à cage peut fonctionner à vitesse variable grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance, et peut générer une production de puissance électrique sur une vaste gamme de vitesse de vent.

L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par la création d'un bus continu intermédiaire. Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage de faisabilité FIG. 1.2 [Abd01].

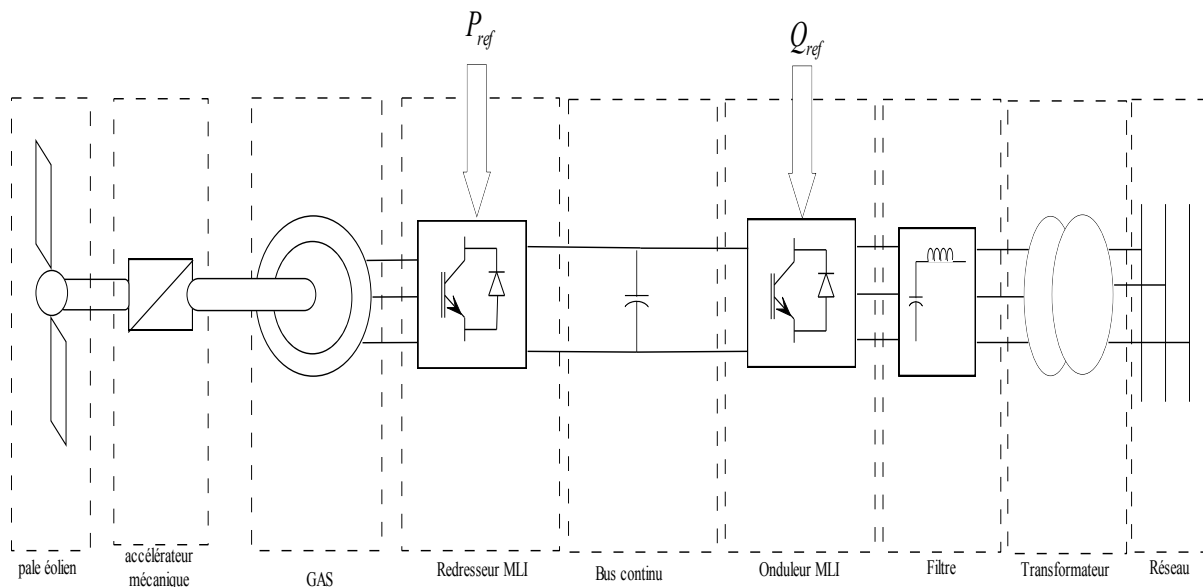


FIG. 1.2 – Générateur GAS couplé au réseau à Vitesse variable.

Un système connecté au réseau se compose d'un aérogénérateur basé sur la machine asynchrone double étoile, de trois convertisseurs de puissance (deux redresseurs et un onduleur de tension qui sont à deux niveaux et contrôlés en MLI), du bus continu, du filtre d'entrée et du transformateur. Le schéma global du système est représenté par la FIG. 1.3 [Ami] [Ami01].

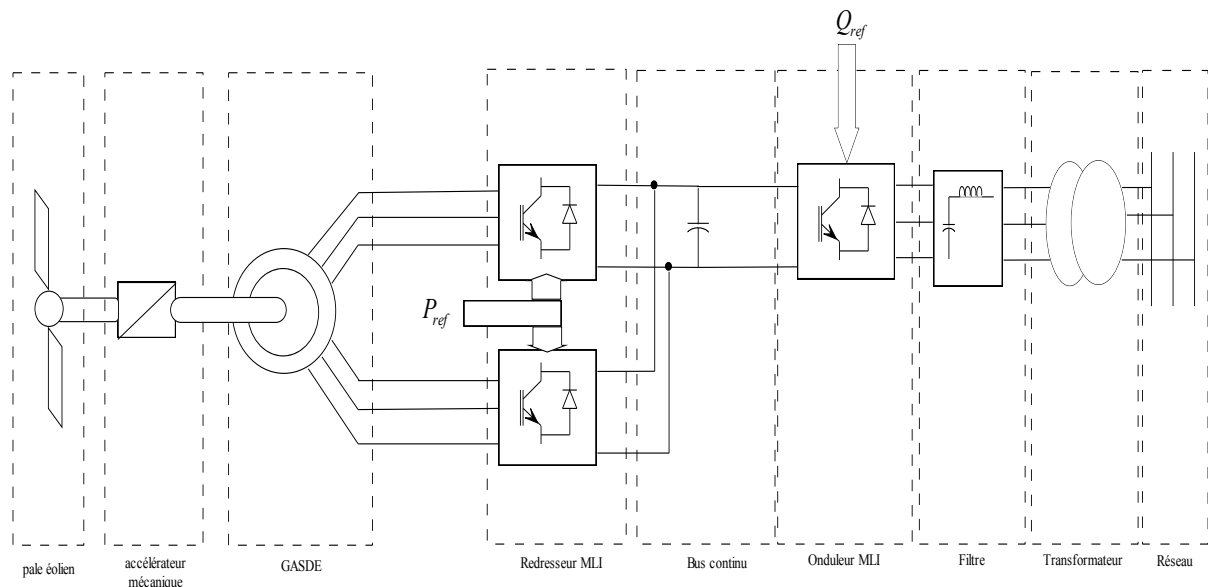


FIG. 1.3 – Générateur GASDE couplé au réseau à Vitesse variable.

Avantages

- Augmentation du rendement énergétique;
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance;
- Réduction des efforts subis par le train de puissance;
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

inconvénient

- Utilisation de convertisseurs de puissance complexes;
- Elle est globalement coûteuse.

Le dimensionnement du variateur de fréquence doit être à 100% de la puissance nominale du stator de la machine électrique. Pour ces raisons, cette configuration est rarement exploitée, et elle n'est pas concurrentielle avec les autres types de machines et notamment la machine asynchrone à double alimentation.

1.4.2 Générateurs en fonctionnement autonome

Le fonctionnement en autonome de la génératrice asynchrone à cage est très sensible aux variations de la vitesse et de la charge. Par ailleurs, comme il a été précisé précédemment, la génératrice asynchrone fournit de la puissance active mais absorbe de la puissance réactive nécessaire à sa magnétisation son principal inconvénient.

Dans ce qui suit on représente quelques techniques de commande les plus étudiées ces dernières années:

Générateur connecté à un convertisseur unidirectionnel (redresseur à diodes ou mixte)

Le système est composé d'un redresseur à diode, un filtre, et un hacheur de type survolteur/dévolteur. Pour maintenir la tension à une valeur constante à la sortie de l'hacheur, on agit sur le rapport cyclique de ce dernier FIG.1.4 [Elh].

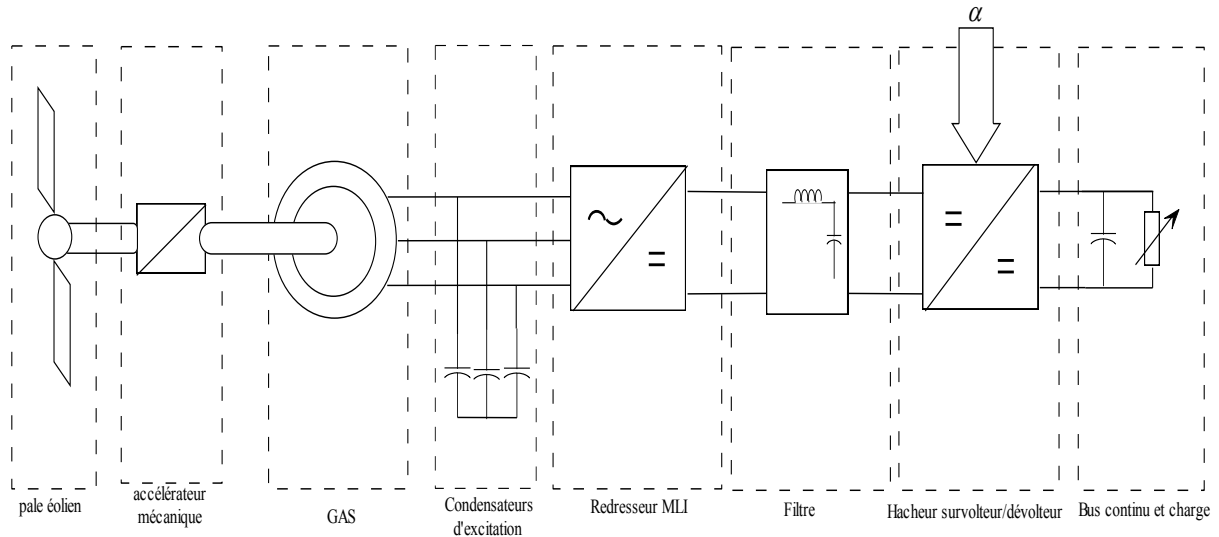


FIG. 1.4 – Générateur (GAS) connecté à un convertisseur unidirectionnel.

Pour la génératrice asynchrone à cage double étoile (GASDE), on peut introduire deux hacheurs alimentant deux charges, ou d'introduire un seul hacheur alimentant une charge. Dans ce cas là, les deux étoiles de la machine sont connectées à deux redresseurs. Ces derniers sont connectés à un filtre puis à un hacheur commandé par son rapport cyclique FIG. 1.5.

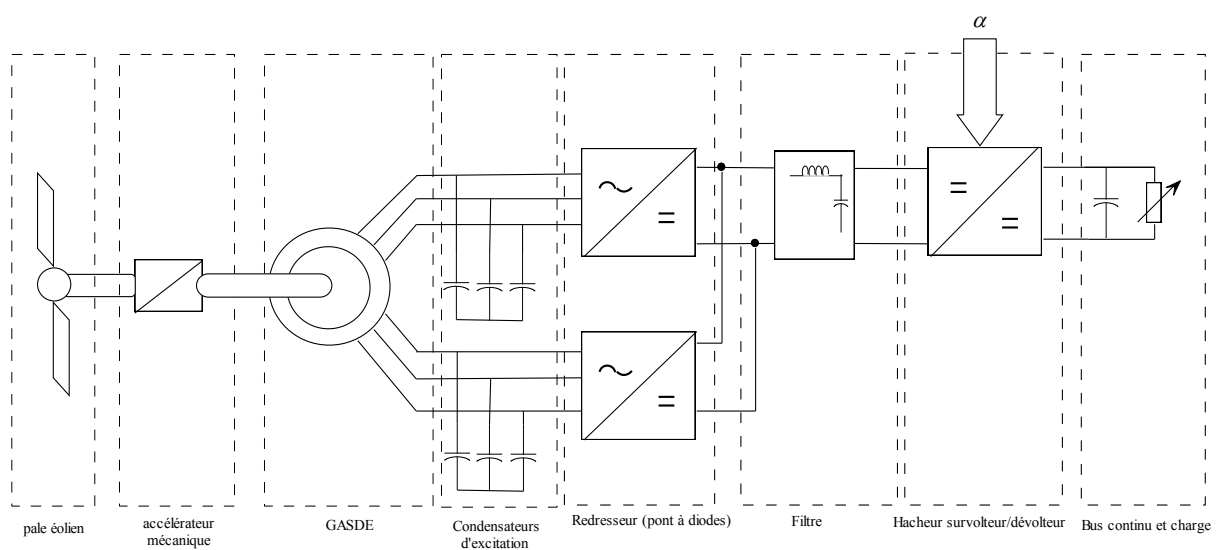


FIG. 1.5 – Générateur (GASDE) connecté à un convertisseur unidirectionnel.

Avantages

- Simplicité de réalisation;
- Faible coût.

inconvénients

- Il ne permet de contrôler la magnétisation de la machine.

Système d'excitation active STATCOM

Le compensateur synchrone statique 'STATCOM' est un onduleur de tension à deux niveaux avec une batterie de stockage reliée sur son bus continu et un transformateur abaisseur du côté alternatif FIG. 1.6. L'onduleur génère une tension alternative contrôlable d'amplitude et de phase, en fonction de la valeur de la tension de l'angle de charge [Ben] [Yog] [Bhi].

Le STATCOM fournit ou absorbe de la puissance réactive en contrôlant l'amplitude de la tension. Si la puissance active demandée est supérieure à l'offre, le STATCOM en fournit à la charge, dans le cas contraire, il en absorbe.

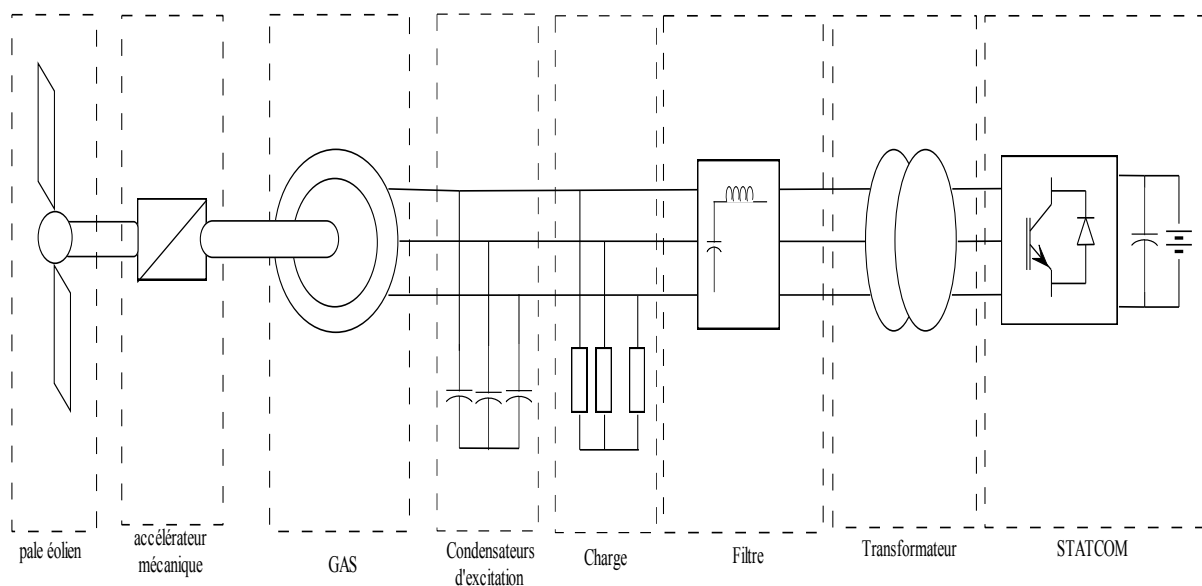


FIG. 1.6 – Génératrice asynchrone à cage reliée à un STATCOM.

Avantages

- Une solution plus efficace;
- Le quasi découplage des grandeurs de contrôle.

inconvénients

- L'intervention du STATCOM est limité par les puissances maximales de celui-ci;
- Un système de contrôle très compliqué pour la mise en oeuvre;
- Coût élevé.

Générateur connecté à un convertisseur bidirectionnels (convertisseur à MLI)

Le système composé d'un générateur asynchrone à cage connecté à un redresseur et un onduleur à MLI alimentant des charges. Cette structure permet d'effectuer une commande adaptée de la tension à la sortie de la génératrice quelque que soient les variations de la vitesse ou de la charge dans une large plage de faisabilité FIG. 1.7 [Idj] [Sey01] [Lou] [Sam] [Jyo]. Pour la génératrice asynchrone à cage double étoile, deux architectures sont utilisées,

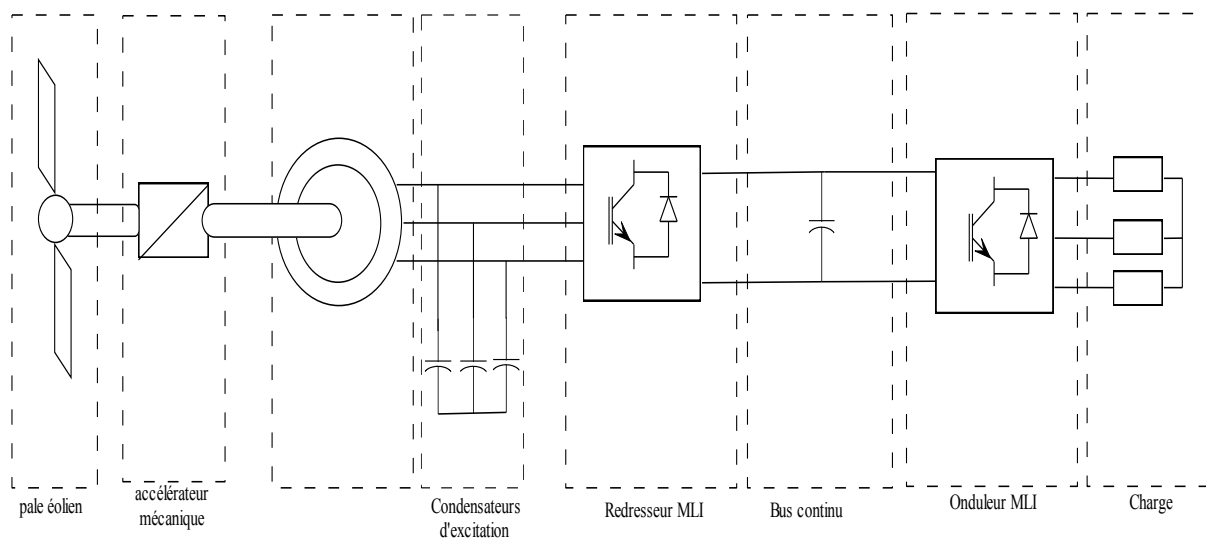


FIG. 1.7 – GAS connecté à un redresseur et onduleur de tension à MLI.

soit d'utiliser deux redresseurs connectés à un bus continu et un onduleur FIG. 1.8, soit d'utiliser deux redresseurs, deux bus continus et deux onduleurs FIG. 1.9 [Zhi] [Zhi01].

Avantages

- Un fonctionnement à des vitesses plus basses;
- Une diminution du bruit acoustique;
- Une optimisation du transfert de l'énergie;
- Une bonne gestion des transitoires vis-à-vis de la charge.

inconvénients

- Complexité de la commande;
- Coût élevé.

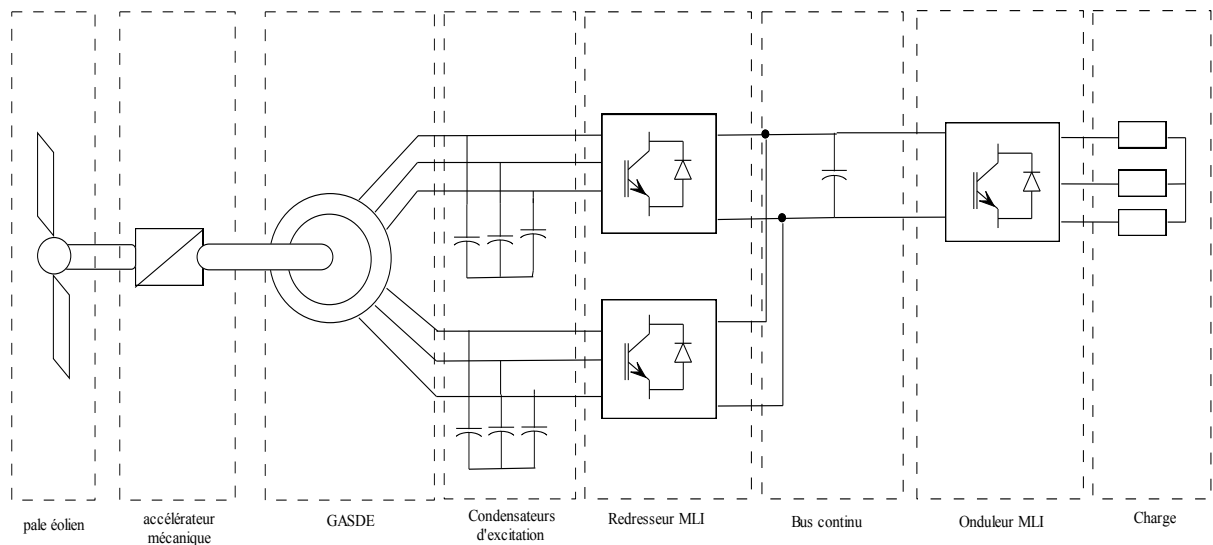


FIG. 1.8 – GASDE connecté à deux redresseurs et un onduleur de tension à MLI.

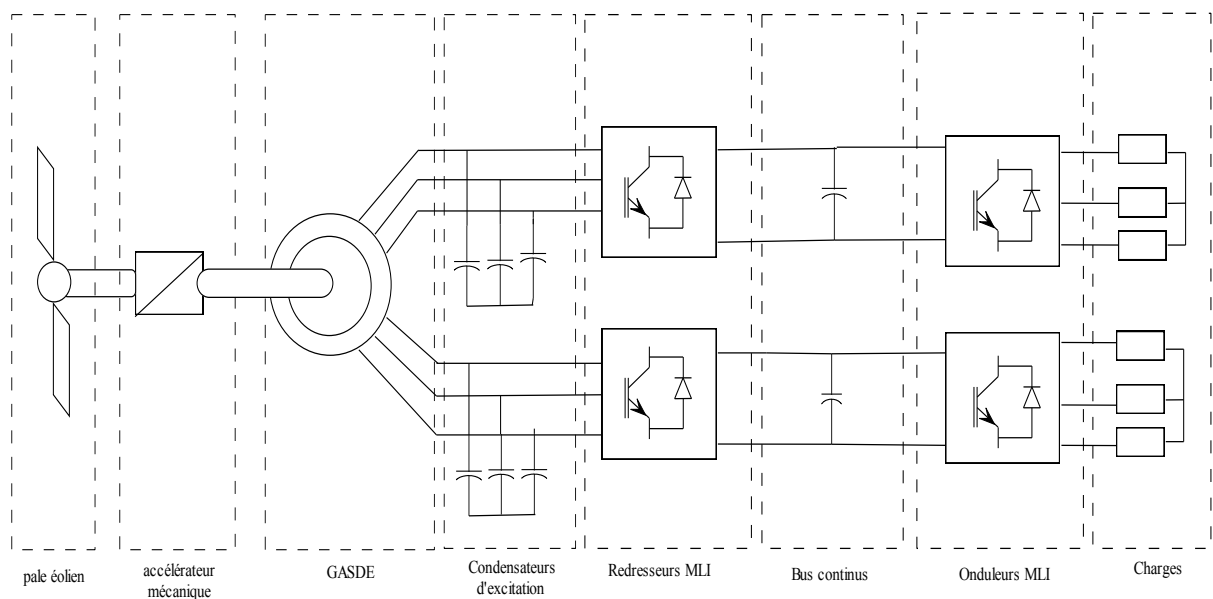


FIG. 1.9 – GASDE connecté à deux redresseurs et deux onduleurs de tension à MLI.

Une autre technique de commande étudiée pour la génératrice asynchrone à cage double étoile. Elle consiste à connecter une étoile à un onduleur; ce dernier connecté à un condensateur et l'autre étoile connectée à un redresseur à pont de diodes alimentant une charge, FIG. 1.10 [Wan].

L'objectif de cette architecture est de contrôler la tension d'une étoile à partir des condensateurs d'excitation de l'autre étoile, comme il a été indiqué dans le chapitre I, il existe une relation et une influence de la valeur des condensateurs d'excitation de la première étoile sur la deuxième.

La technique consiste à trouver une relation entre les deux systèmes d'excitation des deux étoiles. Pour l'exploiter, on commande la tension de l'une des deux étoiles.

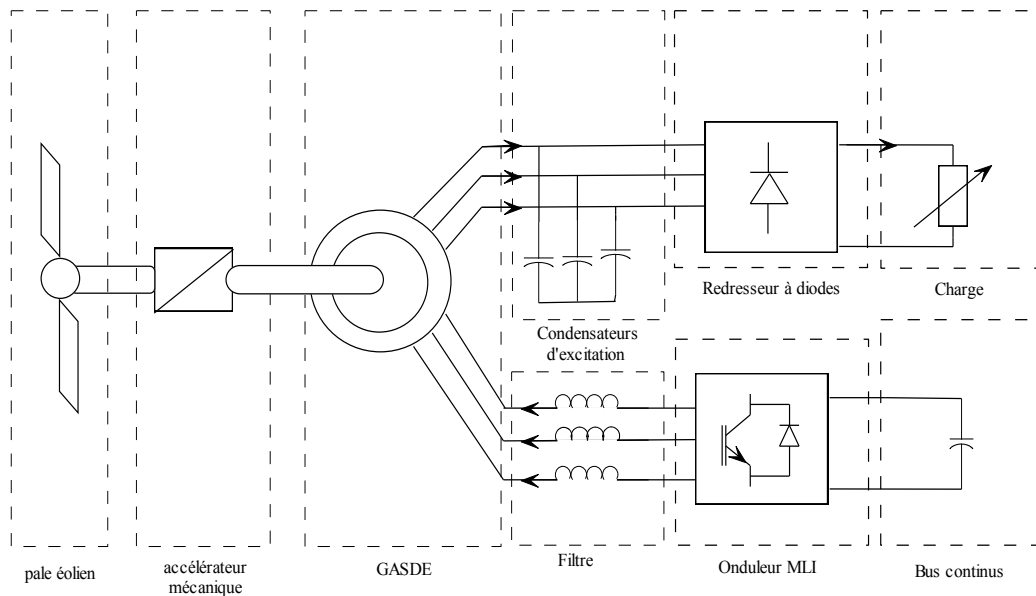


FIG. 1.10 – *GASDE* connecté à un redresseur et un onduleur MLI.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté un bref historique des éoliennes; on a donné quelques architectures de commande pour les génératrices asynchrones à cage simple et double étoile, pour des applications reliées aux réseaux ou dans les sites isolés.

Une étude comparative des techniques de commande présentée, nous conduisent à conclure que la génératrice asynchrone à cage est peu concurrentielle à la génératrice double alimentée en cas de raccordement au réseau; par contre, elle présente des avantages considérables en cas de fonctionnement autonome (dans des sites isolés).

Une commande vectorielle adoptée à la génératrice asynchrone à cage reliée à un redresseur MLI et un onduleur MLI fait l'objet de notre travail dans les chapitres suivant.

Chapitre 2

Etude et analyse de la GAS et GASDE

2.1 Introduction

La génératrice asynchrone à cage est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans la production d'énergie éolienne à vitesse fixe [Lou]. L'absence de balais dans sa construction est le principal avantage lui assure une robustesse et une facilité à construire.

La génératrice asynchrone à cage peut fonctionner à la production autonome de la puissance électrique sur une vaste gamme de vitesse de vent [Aim].

Parmi les problèmes rencontrés dans l'étude de la génératrice asynchrone auto excitée est le choix adéquat des capacités d'auto amorçage. Beaucoup de recherches ont été faites pour déterminer les capacités minimum et maximum d'auto amorçage par l'analyse du circuit équivalent de la génératrice en régime permanent [Gra][Ahm].

L'intérêt technoeconomique des systèmes multi-phases (supérieur à 3 phases) dans la production de l'énergie telle que la segmentation de la puissance, nous conduise à l'étude de l'un de leur modèle type telle que la génératrice asynchrone à cage double étoile (GASDE) [Had] [Ami] [Mer].

Un bilan de performances de ces deux types de génératrice sera présenté, en utilisant l'environnement Matlab-simulink.

2.2 Principe de fonction

La génératrice asynchrone n'engendre pas sa propre énergie d'excitation contrairement à l'alternateur. Pour cette raison, il faut lui apporter cette énergie et stabiliser sa tension de sortie et sa fréquence.

Comme dans toutes les machines électriques tournantes, la production d'un couple est la

conséquence de l'interaction entre deux forces électromotrices l'une produite par le stator et l'autre par le rotor. Dans une machine à courant continu ou synchrone, ces deux forces électromotrices peuvent être indépendantes et réglables sans trop d'effort mais la machine asynchrone à cage d'écurie possède une force électromotrice au rotor qui dépend de celle au stator (phénomène d'induction) et d'une grandeur qui exprime la vitesse relative du rotor ω_r par rapport à la vitesse du champ tournant ω_s dite glissement g ($g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$):

- Si le rotor de cette machine tournait à la vitesse du champ magnétique, il n'y aurait plus de courant induit donc plus de couple.
- Si l'on freine le rotor (couple résistant de la charge), le système est un moteur asynchrone.
- Si l'on augmente la vitesse, le système est une génératrice asynchrone (fonctionnement hypersynchrone): pour avoir un générateur, il faut que le rotor tourne plus vite que le champ magnétique FIG. 2.1.

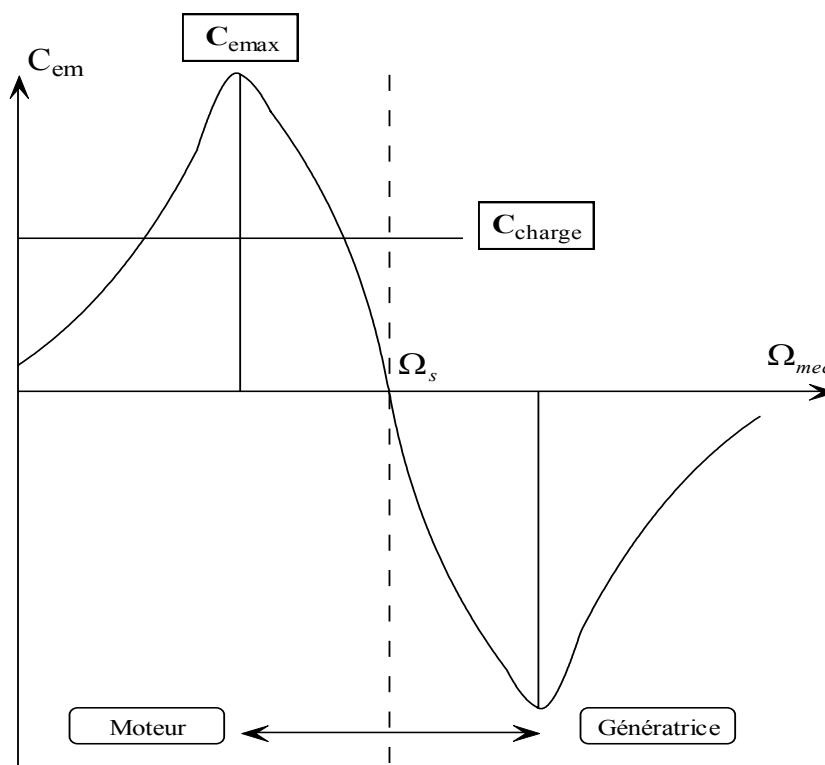


FIG. 2.1 – Zones de fonctionnement de la MAS et MASDE.

2.3 Phénomène d'Auto-amorçage

L'auto-amorçage par des condensateurs forme avec la génératrice un système oscillant (circuit RLC). La FIG. 2.2 présente le schéma équivalent ramené au stator d'une phase de la GAS et de la GASDE, où R_s la résistance du stator, L_s l'inductance de fuite totale de stator, L_m l'inductance de magnétisation, $L'_{\sigma r}$ l'inductance de fuite totale de rotor ramenée au stator, R'_r la résistance rotorique ramenée au stator et g le glissement.

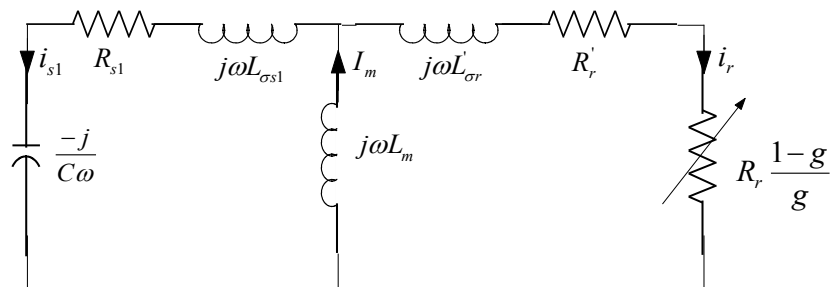


FIG. 2.2 – Schéma équivalent de l'auto-amorçage.

On peut réduire la FIG. 2.2 à une figure contenant deux impédances, Z_G de génératrice débitant sur une impédance de condensateur Z_C , FIG. 2.3.

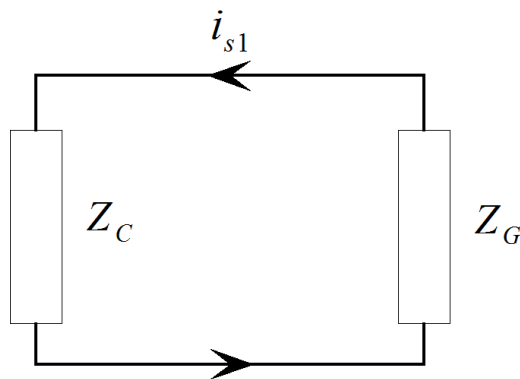


FIG. 2.3 – Schéma équivalent réduit de l'auto-amorçage.

- Z_G : l'impédance équivalente de la génératrice;
- Z_C : l'impédance du condensateur.

A partir de la FIG. 2.3, on écrit l'équation en tensions suivante:

$$Z_G i_{s1} + Z_C i_{s1} = 0 \quad (2.1)$$

Alors, il faut que:

$$Z_G + Z_C = Z_{eq} = 0 \quad (2.2)$$

D'après la FIG. 2.2, l'impédance de la génératrice est:

$$Z_G = R_{s1} + j\omega L_{\sigma s1} + \frac{j\omega L_m \left(\frac{R'_r}{g} + j\omega L'_{\sigma r} \right)}{\frac{R'_r}{g} + j\omega (L_m + L'_{\sigma r})} \quad (2.3)$$

$$Z_C = -\frac{j}{C\omega} \quad (2.4)$$

on a:

$$L_{\sigma s1} = L_{s1} - L_m L_{\sigma s1} = L'_r - L_m \quad (2.5)$$

On remplace les équations (2.5), (2.4) et (2.3) dans l'équation (2.2), on aura:

$$Z_{eq} = Z_R + jZ_I \quad (2.6)$$

d'où:

$$Z_R = R_{s1} + \frac{\omega^2 L_{s1} L'_r \frac{R'_r}{g} (1 - \varrho)}{\left(\frac{R'_r}{g} \right)^2 + \omega^2 L_r'^2} \quad (2.7)$$

$$Z_I = \frac{-1}{C} + \frac{\omega^2 L_{s1} \left[\left(\frac{R'_r}{g} \right)^2 + \varrho \omega^2 L_r'^2 \right]}{\left(\frac{R'_r}{g} \right)^2 + \omega^2 L_r'^2} \quad (2.8)$$

avec: $\varrho = 1 - \frac{L_m^2}{L_{s1} L_r}$: coefficient de dispersion.

De l'équation 2.7, on détermine deux valeurs de glissements g_1 et g_2 , pour la vitesse de rotation ω proche de vitesse de synchronisme et inversement respectivement [Abd].

$$g_1 \simeq -\frac{R_{s1} R'_r}{\omega^2 L_{s1} L'_r (1 - \varrho)} \quad (2.9)$$

$$g_2 \simeq -\frac{R'_{s1} L_{s1} (1 - \varrho)}{R_{s1} L'_r} \quad (2.10)$$

La condition d'amorçage s'exprime par conséquent par: $g_2 < g < g_1$. Les équations 2.9 et 2.10 donnent les glissements limites. A partir de ces valeurs de glissements, on déduit les valeurs critiques des capacités C pour que l'amorçage puisse avoir lieu.

A l'aide de $Z_I = 0$, g_1 et g_2 , on trouve les deux valeurs de capacités suivantes:

Pour $g = g_1 = 0$, $\omega = \omega_r$

$$C_1 \simeq \frac{1}{\omega_r^2 L_{s1}} \quad (2.11)$$

$$C_2 \simeq \frac{1}{\omega_r^2 L_{s1} \varrho} \quad (2.12)$$

La capacité C_1 correspond à la résonance avec l'inductance propre de la machine L_{s1} . La capacité C_2 correspond à la résonance avec l'inductance $L_{s1}\rho$ qui n'est autre que l'inductance de court-circuit de la machine.

Donc on a :

$$C_2 > \frac{1}{\omega_r^2 L_{s1}} \quad (2.13)$$

Le phénomène d'auto-amorçage de la génératrice schématisé par FIG. 2.4. Il commence par le flux de rémanent avec la rotation du rotor, donne une petite tention/courant, et à travers le condensateur, ce dernier va augmenter la tension/courant par sa nature, puis il renvoie une tension/courant de valeur supérieure qui a été envoyé 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).

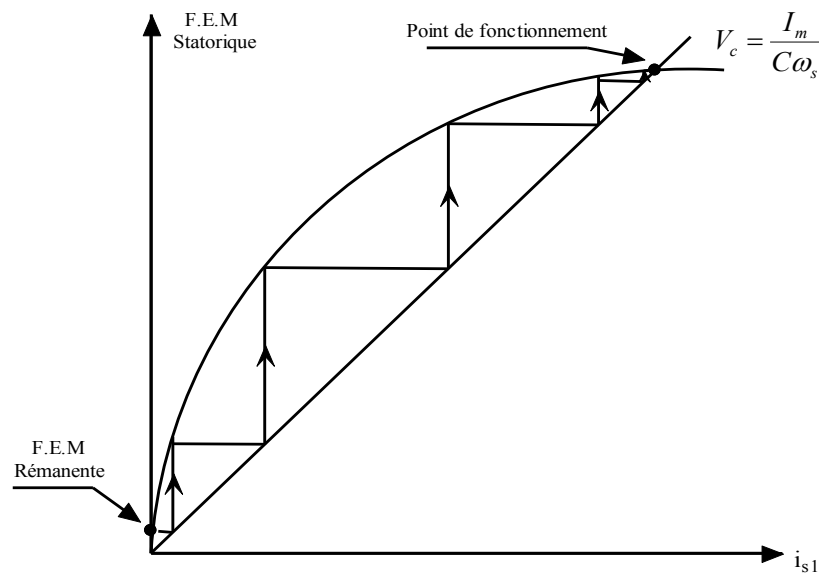


FIG. 2.4 – Schéma équivalent de l'auto-amorçage.

2.4 Description du dispositif

La connexion des batteries de condensateurs aux bornes statoriques, la vitesse rotorique et la présence du flux magnétique rémanent dans le fer rotorique, sont les conditions nécessaires pour l'auto-amorçage de la génératrice [Abd].

2.4.1 Génératrice asynchrone à cage (GAS)

Le dispositif de base qu'on va étudier est celui de la FIG. 2.5. Ce dispositif est constitué d'une machine asynchrone auto-excitée et d'un banc de capacités directement connecté sur une charge permettant d'obtenir un fonctionnement purement autonome.

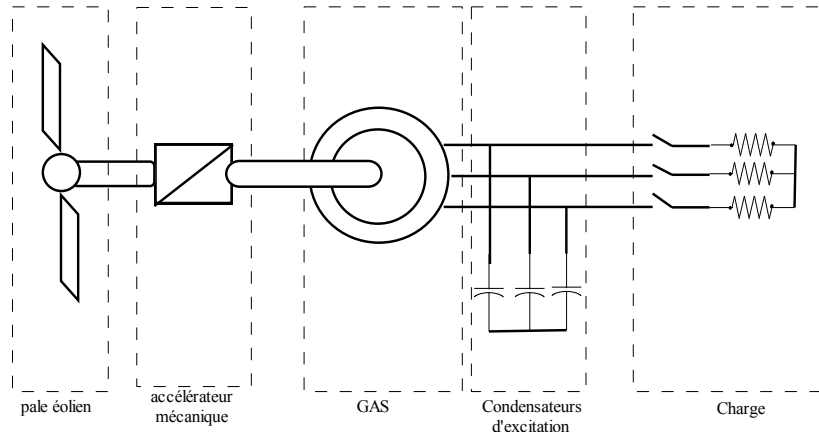


FIG. 2.5 – *Système de conversion éolien basé sur la GAS.*

2.4.2 Génératrice asynchrone à cage double étoile (GASDE)

Le même dispositif peut être appliqué à la GASDE, sauf que celle-ci est constituée d'un stator portant deux enroulements triphasés identiques et décalés d'un angle électrique $\alpha = 30^\circ$. Une représentation schématique est donnée FIG. 2.6.

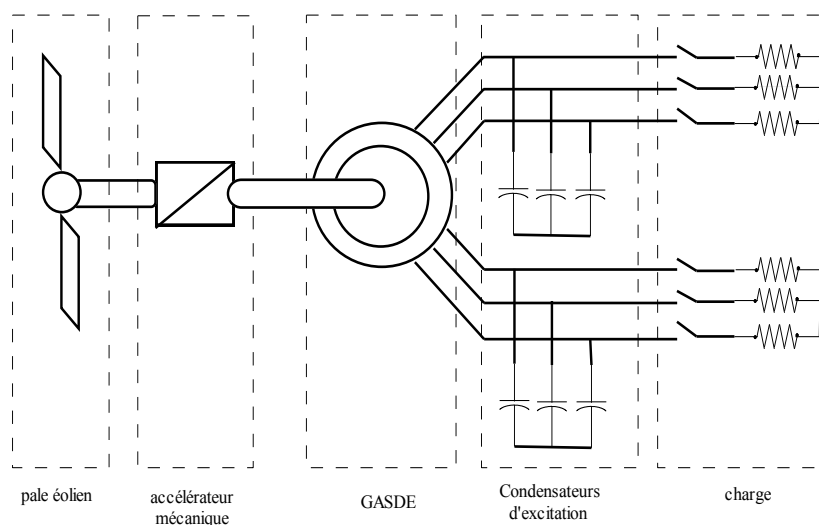


FIG. 2.6 – *Système de conversion éolien basé sur la GASDE.*

2.5 Modèles de la GAS et de la GASDE

Les modèles de la GAS et de la GASDE sont semblables à ceux du moteur asynchrone à cage et double étoile respectivement. On différencie entre les deux types de fonctionnement en mettant devant chaque courant statorique soit l'axe d ou l'axe q un signe moins. On tient compte des hypothèses simplificatrices sauf que dans ce cas, la saturation du circuit magnétique est pas négligeable, car 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 [Sey].

Les représentations des enroulements de la GAS et de la GASDE dans le référentiel de Park sont montrés par la FIG. 2.7.

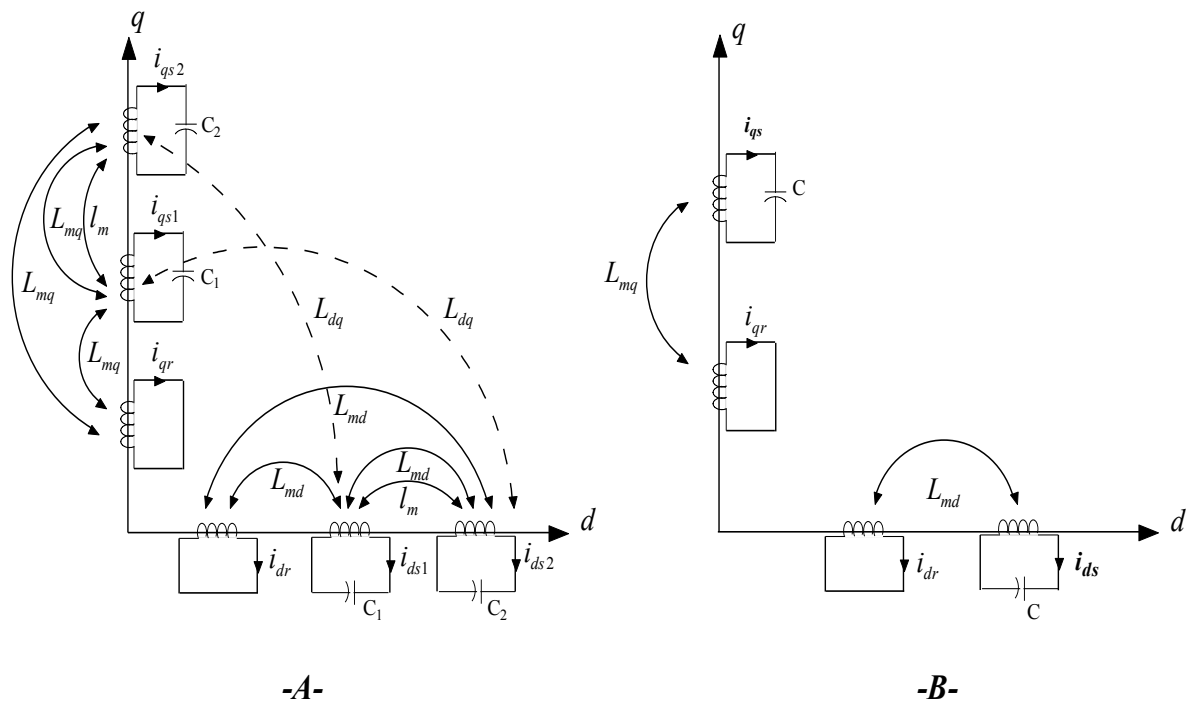


FIG. 2.7 – Représentation des enroulements selon les axes d, q . A- Génératrice asynchrone à cage double étoile (GASDE) B- Génératrice asynchrone à cage (GAS)

2.5.1 Présentation de la GAS

Le modèle équivalent de la GAS à vide dans le repère (d, q) conduit au schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone FIG. 2.8 où L_s et L_r sont les inductance propres d'une phase statorique et rotorique respectivement, L_m L'inductance magnétisante, R_r la résistance rotorique et R_s la résistance statorique [Sey01].

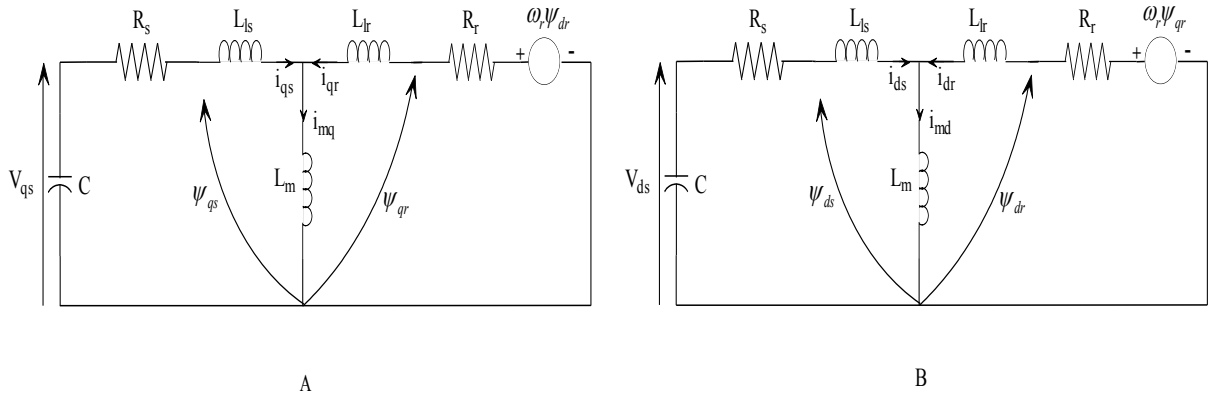


FIG. 2.8 – Modèle de la GAS dans le repère d, q à vide. A- Axe q B- Axe d

Les tensions des condensateurs dans les figures précédentes peuvent être représentées par les équations 2.14 et 2.15:

$$V_{sq} = \frac{1}{C} \int i_{qs} dt + V_{sq0} \quad (2.14)$$

$$V_{sd} = \frac{1}{C} \int i_{ds} dt + V_{sd0} \quad (2.15)$$

où $V_{sq} = V_{sq}|_{t=0}$ et $V_{sd} = V_{sd}|_{t=0}$: Les tensions initiales;

$L_s = L_{ls} + L_m$ et $L_r = L_{lr} + L_m$: Les flux rotoriques selon les axes d, q sont donnés par:

$$\psi_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} + \psi_{qr0} \quad (2.16)$$

$$\psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} + \psi_{dr0} \quad (2.17)$$

Où $\psi_{qr0} = \psi_{qr}|_{t=0}$ et $\psi_{dr0} = \psi_{dr}|_{t=0}$: Les flux rémanants selon les axes d, q .

En choisissant le référentiel (d, q) lié au stator ($\omega_s = 0$), ($\omega = -\omega_r$), on aura le système d'équations suivant:

$$\begin{aligned} L_s \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \frac{di_{dr}}{dt} &= -R_s i_{ds} - V_{ds} \\ L_s \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \frac{di_{qr}}{dt} &= -R_s i_{qs} - V_{qs} \\ L_m \frac{di_{ds}}{dt} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} &= -\omega L_m i_{qs} - R_r i_{dr} - \omega L_r i_{qr} \\ L_m \frac{di_{qs}}{dt} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} &= \omega L_m i_{ds} + \omega L_r i_{dr} - R_r i_{qr} \end{aligned} \quad (2.18)$$

L'écriture sous forme matricielle de ce système est:

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{dr}}{dt} \\ \frac{di_{qr}}{dt} \\ \frac{dV_{ds}}{dt} \\ \frac{dV_{qs}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -\omega L_m & -R_r & -\omega L_r & 0 & 0 \\ \omega L_m & 0 & \omega L_r & -R_r & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Nous avons modélisé la GAS sous forme d'état, soit un système de six équations où on a choisi le vecteur d'état de la façon suivante:

$$[X] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}; [L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -\omega L_m & -R_r & -\omega L_r & 0 & 0 \\ \omega L_m & 0 & \omega L_r & -R_r & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Ce modèle s'écrit de la façon suivante:

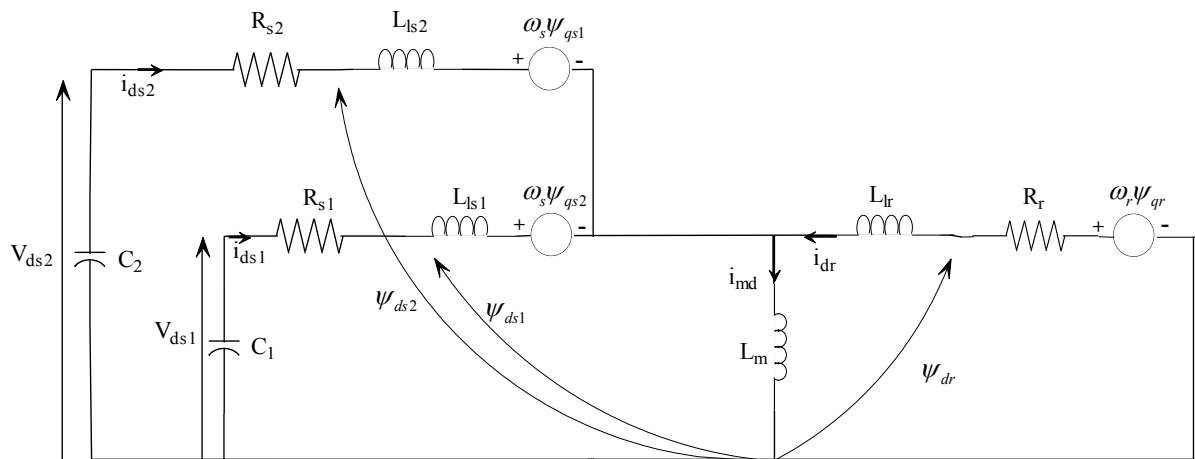
$$[\dot{X}] = [A][B][X] \quad (2.21)$$

Où: $[\dot{X}] = \frac{d}{dt}[X] = SX$, et $[A] = [L]^{-1}$.

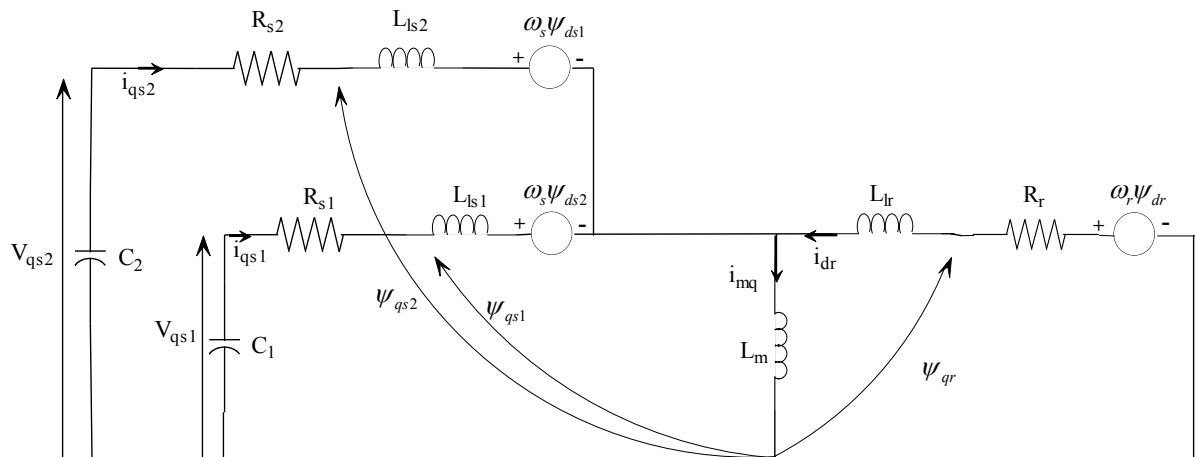
- $[L]$: matrice d'inductance;
- s : opérateur de *Laplace*.

2.5.2 Présentation de la GASDE

Le modèle équivalent de la GASDE à vide dans le repère (d,q) conduit au schéma équivalent monophasé de la machine asynchrone double étoile FIG. 2.9



- A -



- B -

FIG. 2.9 – Modèle de la GASDE dans le repère d, q à vide. A- Axe q B- Axe d

Equations des tensions

$$\begin{aligned}
 v_{ds1} &= -R_{s1}i_{ds1} + \frac{d}{dt}\phi_{ds1} - \omega_s\phi_{qs1} \\
 v_{qs1} &= -R_{s1}i_{qs1} + \frac{d}{dt}\phi_{qs1} + \omega_s\phi_{ds1} \\
 v_{ds2} &= -R_{s2}i_{ds2} + \frac{d}{dt}\phi_{ds2} - \omega_s\phi_{qs2} \\
 v_{qs2} &= -R_{s2}i_{qs2} + \frac{d}{dt}\phi_{qs2} + \omega_s\phi_{ds2} \\
 0 &= R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}\phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r)\phi_{qr} \\
 0 &= R_r i_{qr} + \frac{d}{dt}\phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r)\phi_{dr}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

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 (étoile 1 et 2) et du rotor.

Equations des flux

Les expressions des flux statoriques et rotoriques en fonction des courants sont définies par le système d'équation suivant:

$$\begin{aligned}
 \phi_{ds1} &= -l_{s1}i_{ds1} - l_m(i_{ds1} + i_{ds2}) + L_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) - L_{dq}i_{qs2} \\
 \phi_{qs1} &= -l_{s1}i_{qs1} - l_m(i_{qs1} + i_{qs2}) + L_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}) + L_{dq}i_{ds2} \\
 \phi_{ds2} &= -l_{s2}i_{ds2} - l_m(i_{ds1} + i_{ds2}) + L_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) + L_{dq}i_{qs1} \\
 \phi_{qs2} &= -l_{s2}i_{qs2} - l_m(i_{qs1} + i_{qs2}) + L_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}) - L_{dq}i_{ds1} \\
 \phi_{dr} &= l_r i_{dr} + L_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) \\
 \phi_{qr} &= l_r i_{qr} + L_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr})
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

où

l_{s1} , l_{s2} , l_r : les inductances de fuite statoriques (étoile 1 et 2) et rotoriques respectivement ;

l_m : l'inductance de fuite mutuelle commune aux deux étoiles ;

L_{dq} : l'inductance cyclique d'intersaturation donnée par [Hal] [Abd] [Sin] :

$$L_{dq} = \frac{I_{md}I_{mq}}{|I_m|} \left[\frac{dL_m}{d|I_m|} \right] \tag{2.24}$$

avec : I_{md} , I_{mq} , les courants de magnétisation direct et en quadrature;

L_m : l'inductance de magnétisation; elle est obtenue par la caractéristique de magnétisation de la machine.

$$L_m = \frac{|\overline{\phi_m}|}{|I_m|} \tag{2.25}$$

ϕ_m , I_m : les modules du flux et du courant de magnétisation respectivement.

L'expression du courant de magnétisation en fonction des courants statoriques et rotoriques est définie par :

$$I_m = \sqrt{(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr})^2 + (-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr})^2} \tag{2.26}$$

Comme dans plusieurs articles, l'expression de L_m est donnée par une expression non linéaire. Pour la génératrice asynchrone double étoile, on a l'expression suivante [Sin01]:

$$L_m = b_1 + b_2 I_m + b_3 I_m^2 + b_4 I_m^3 \tag{2.27}$$

où b_1, b_2, b_3, b_4 sont des constantes, (Annexe B).

Les inductances de magnétisation directe et en quadrature sont [Sin02] :

$$L_{md} = L_m + \left[\frac{I_{md}}{I_{mq}} \right] L_{dq} \quad (2.28)$$

$$L_{mq} = L_m + \left[\frac{I_{mq}}{I_{md}} \right] L_{dq} \quad (2.29)$$

avec :

$$I_{md} = -i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr} \quad (2.30)$$

$$I_{mq} = -i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}$$

L'expression du couple électromagnétique de la génératrice est de forme :

$$C_{emGe} = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{p}{2}\right)\left(\frac{L_m}{L_{dr}}\right) [(i_{qs1} + i_{qs2})\phi_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})\phi_{qr}] \quad (2.31)$$

2.5.3 Modélisation de l'auto-amorçage

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 comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} v_{ds1} &= \frac{1}{C_1} i_{dc1} + \omega_s v_{qs1} \\ \frac{d}{dt} v_{qs1} &= \frac{1}{C_1} i_{qc1} - \omega_s v_{ds1} \\ \frac{d}{dt} v_{ds2} &= \frac{1}{C_2} i_{dc2} + \omega_s v_{qs2} \\ \frac{d}{dt} v_{qs2} &= \frac{1}{C_2} i_{qc2} - \omega_s v_{ds2} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Où $i_{dc1}, i_{qc1}, i_{dc2}, i_{qc2}$ représentent les courants d'excitation selon les axes d et q , étoile 1, 2; C_1, C_2 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 :

$$\begin{aligned} i_{ds1} &= i_{dc1} \\ i_{qs1} &= i_{qc1} \\ i_{ds2} &= i_{dc2} \\ i_{qs2} &= i_{qc2} \end{aligned} \quad (2.33)$$

L'écriture sous forme matricielle de ce système est:

$$[Z] = [L][X] \quad (2.34)$$

où :

$$[Z] = [\phi_{ds1} \ \phi_{qs1} \ \phi_{ds2} \ \phi_{qs2} \ \phi_{dr} \ \phi_{qr} \ v_{ds1} \ v_{qs1} \ v_{ds2} \ v_{qs2}]^T$$

$$[X] = [i_{ds1} \ i_{qs1} \ i_{ds2} \ i_{qs2} \ i_{dr} \ i_{qr} \ v_{ds1} \ v_{qs1} \ v_{ds2} \ v_{qs2}]^T$$

$$[L] = \begin{bmatrix} -L_{ds1} & 0 & -L_{md} - l_m & -L_{dq} & L_{md} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_{qs1} & L_{dq} & -L_{mq} - l_m & 0 & L_{mq} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -L_{md} - l_m & L_{dq} & -L_{ds2} & 0 & L_{md} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -L_{dq} & -L_{mq} - l_m & 0 & -L_{qs2} & 0 & L_{mq} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -L_{md} & 0 & -L_{md} & 0 & L_{dr} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_{mq} & 0 & -L_{mq} & 0 & L_{qr} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

avec :

$$L_{ds1} = l_{s1} + L_{md} + l_m \quad L_{qs1} = l_{s1} + L_{mq} + l_m$$

$$L_{ds2} = l_{s2} + L_{md} + l_m \quad L_{qs2} = l_{s2} + L_{mq} + l_m$$

$$L_{dr} = l_r + L_{md} \quad L_{qr} = l_r + L_{mq}$$

D'après le système d'équations précédent on aura :

$$[\dot{X}] = [A][X] \tag{2.35}$$

où, $[A] = [L]^{-1}[B|C]$.

$$[B] = \begin{bmatrix} R_{s1} & -\omega_s L_{qs1} & \omega_s L_{dq} & -\omega_s(L_{mq} + l_m) & 0 & \omega_s L_{mq} \\ \omega_s L_{ds1} & R_{s1} & \omega_s(L_{md} + l_m) & \omega_s L_{dq} & -\omega_s L_{md} & 0 \\ -\omega_s L_{dq} & -\omega_s(L_{mq} + l_m) & R_{s2} & -\omega_s L_{qs2} & 0 & \omega_s L_{mq} \\ \omega_s(L_{md} + l_m) & -\omega_s L_{dq} & \omega_s L_{ds2} & R_{s2} & -\omega_s L_{md} & 0 \\ 0 & -\omega_{gl} L_{mq} & 0 & -\omega_{gl} L_{mq} & R_r & \omega_{gl} L_{qr} \\ \omega_{gl} L_{md} & 0 & \omega_{gl} L_{md} & 0 & -\omega_{gl} L_{dr} & R_r \\ 1/C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/C_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_s & 0 & 0 \\ -\omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_s \\ 0 & 0 & -\omega_s & 0 \end{bmatrix}$$

2.6 Résultat de la simulation

2.6.1 Génératrice asynchrone à cage GAS

La courbe de magnétisation est approximée par un polynôme d'interpolation. La FIG. 2.10 représente les variations de l'inductance de magnétisation L_m en fonction du module de la tension V_s .

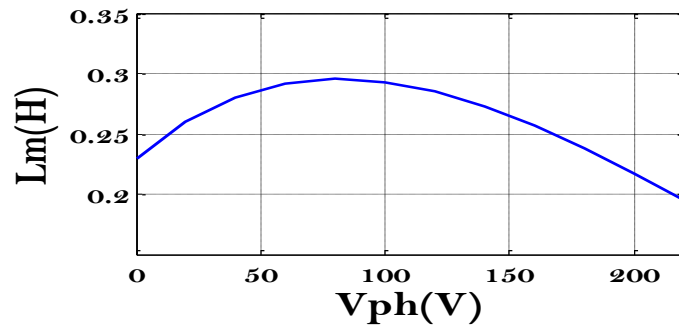


FIG. 2.10 – Variation de l'inductance de magnétisation L_m

Les résultats de simulation numérique pour le fonctionnement à vide avec $C = 60\mu f$.

La tension croit de façon exponentielle et se stabilise à une valeur fixe; cette dernière est due essentiellement au choix des condensateurs d'excitation et de la vitesse.

La tension dans son évolution suit la courbe d'aimantation, et d'allure du courant de ligne est semblable à celle de la tension FIG. 2.11.

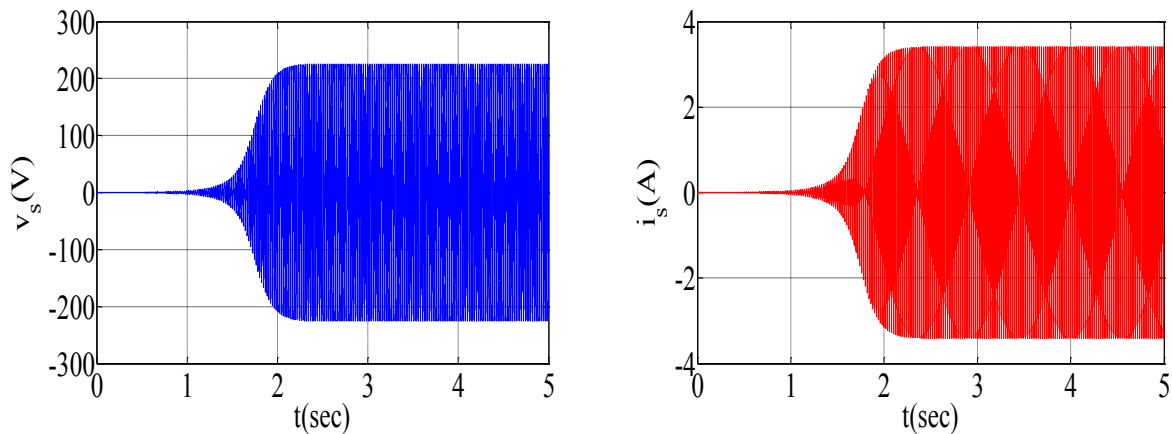


FIG. 2.11 – Evolution de v_s et i_s

La tension et le courant de ligne sont de forme sinusoïdale à une fréquence de $50hz$ avec un déphasage de 90° l'un de l'autre FIG. 2.12 et d'une amplitude de $225.2V$ et $3.4A$ pour la tension et le courant respectivement FIG. 2.13.

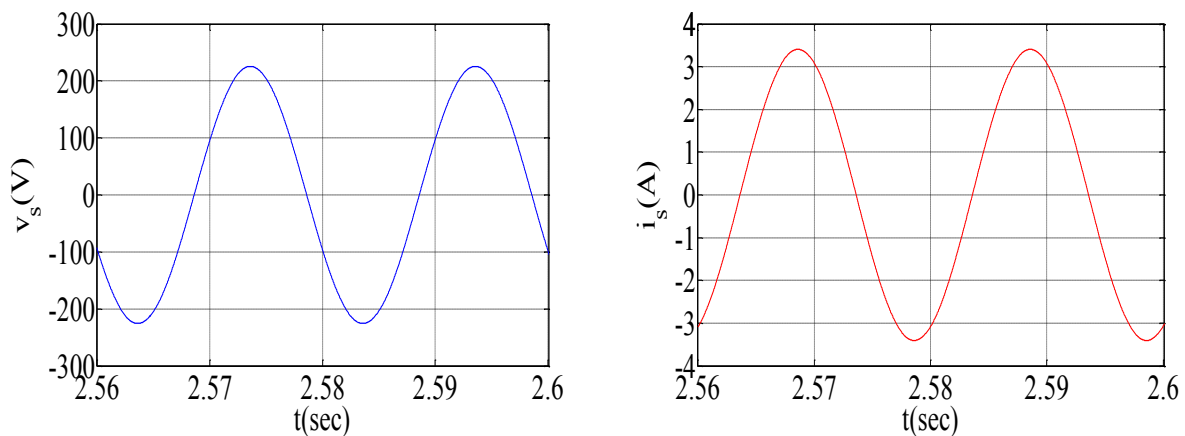
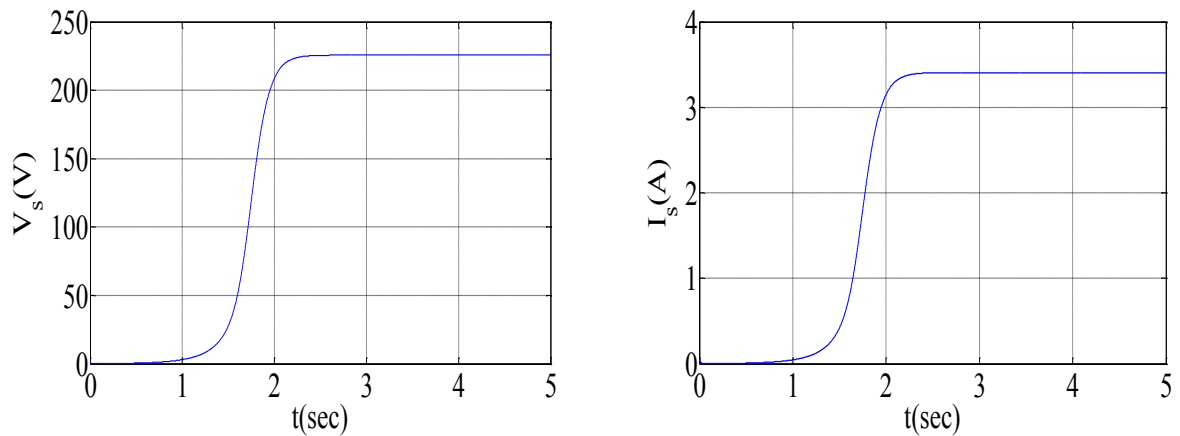


FIG. 2.12 – Zoom v_s et i_s

L'allure du courant rotorique FIG. 2.14 montre que celui-ci est 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 *GAS* à la charge.

FIG. 2.13 – Amplitudes v_s et i_s

La valeur maximale du courant statorique est légèrement inférieure à la valeur du courant de magnétisation FIG. 2.13 car le courant rotorique à vide est négligeable. Le couple électromagnétique de la *GAS* a une valeur très faible à vide $-0.18(N.m)$ FIG. 2.14.

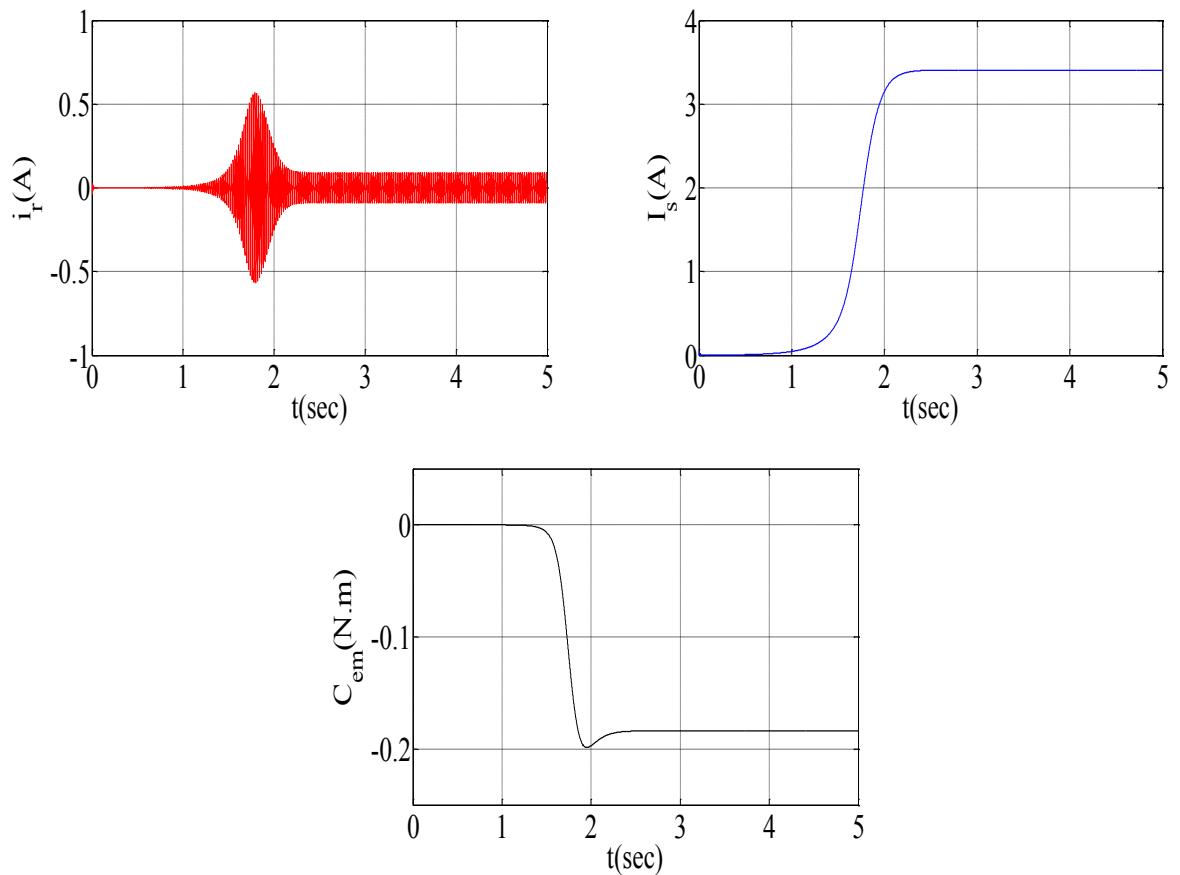


FIG. 2.14 – Courant rotorique, courant de magnétisation et couple électromagnétique.

2.6.2 Effet de la capacité

Pour une capacité en-dessous de la valeur critique ($C < C_{critique}$) le courant et la tension après tentative à l'oscillation décroissent rapidement puis s'annulent, donc il n'y a pas d'amorçage FIG. 2.15. Pour mieux analyser l'influence des capacités sur la tension

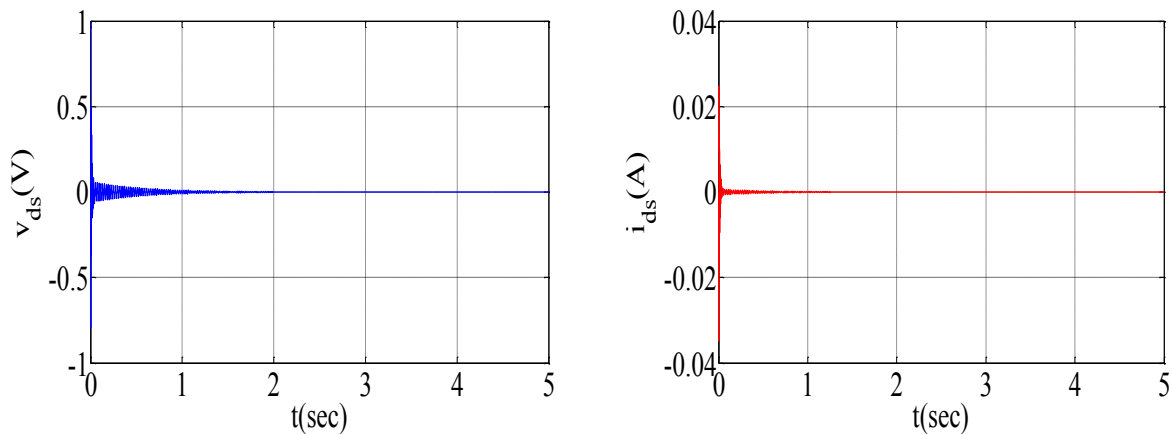


FIG. 2.15 – Effet de $C < C_{critique}$ sur la tension et le courant générée par GAS.

de la GAS pour une vitesse de rotation synchrone, on ne représente que les enveloppes de tension FIG. 2.16; l'analyse de cette figure montre que la capacité influe sur le régime transitoire et aussi sur la valeur finale de la tension à cause de la non linéarité de la courbe d'aimantation, comme il existe une valeur de capacité C_{max} au delà de laquelle la tension n'augmente plus à cause de saturation de circuit magnétique [Lou].

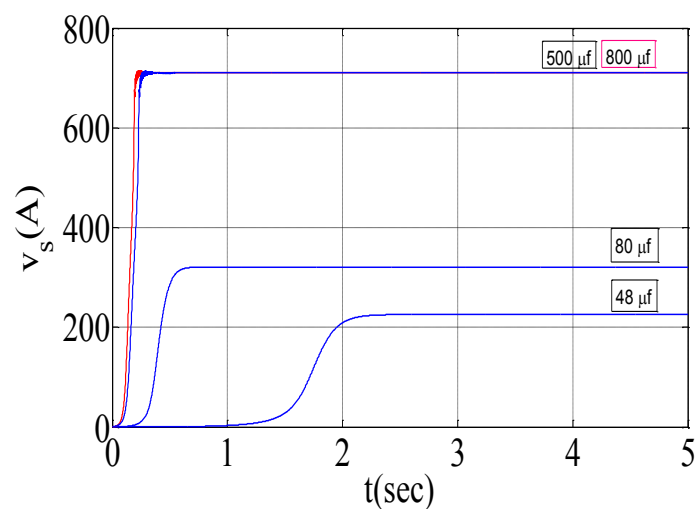


FIG. 2.16 – Influence de la capacité sur la tension.

2.6.3 Effet de la vitesse d'entraînement

La vitesse de rotation a une influence directe sur la tension: lorsque la vitesse augmente, la tension augmente et vis-versa FIG. 2.17. Il existe aussi une vitesse critique où il n'y a pas d'auto-amorçage.

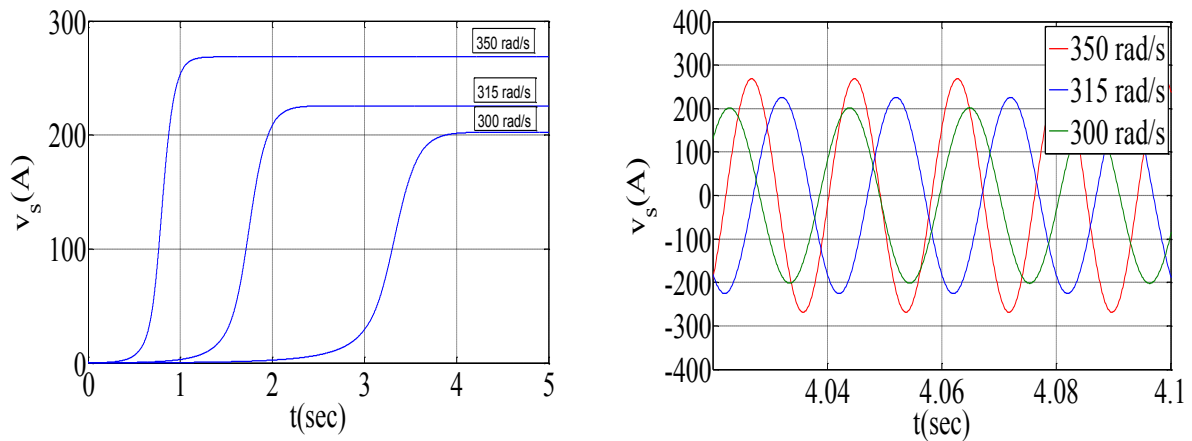


FIG. 2.17 – Influence de la vitesse d'entraînement sur la tension et la fréquence.

2.6.4 Fonctionnement en charge

Charge R:

La charge résistive est représentée par trois résistances identiques connectées en étoile et branchées en parallèle avec le banc de condensateurs. Le schéma simplifié de connexion selon l'axe d et q , FIG. 2.18.

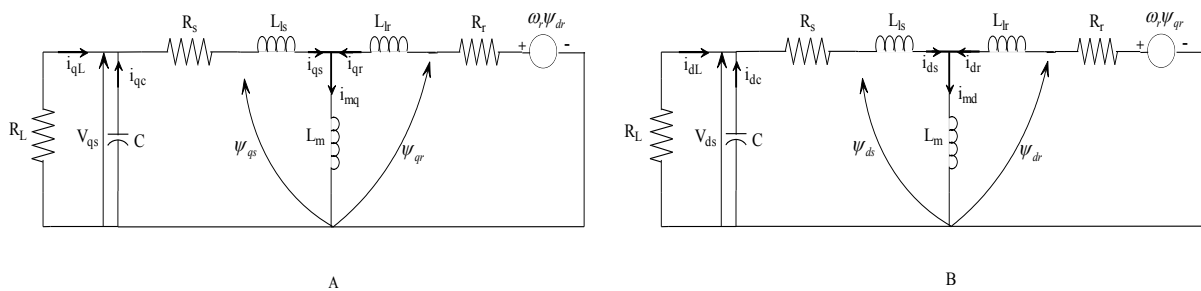


FIG. 2.18 – Modèle de la GAS dans le repère d, q en charge R , A- Axe q , B- Axe d .

D'après les schémas ci-dessus, on aura le système d'équation qui définit le modèle de la GAS en charge R .

$$i_{qL} = \frac{V_{qc}}{R_L} \quad (2.36)$$

$$i_{dL} = \frac{V_{dc}}{R_L} \quad (2.37)$$

$$i_{qc} = i_{qs} - i_{qL} \quad (2.38)$$

$$i_{dc} = i_{ds} - i_{dL} \quad (2.39)$$

$$pV_{qc} = \frac{i_{qc}}{C} \quad (2.40)$$

$$pV_{dc} = \frac{i_{dc}}{C} \quad (2.41)$$

Le modèle de la *GAS* sous forme d'espace d'état est:

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{dr}}{dt} \\ \frac{di_{qr}}{dt} \\ \frac{dV_{ds}}{dt} \\ \frac{dV_{qs}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -\omega L_m & -R_r & -\omega L_r & 0 & 0 \\ \omega L_m & 0 & \omega L_r & -R_r & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RC} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

A l'instant 2.5sec on insere une charge de 50Ohm, on constate une diminution de la tension FIG. 2.19, et une augmentation du courant de ligne pour fournir le courant de charge FIG. 2.19.

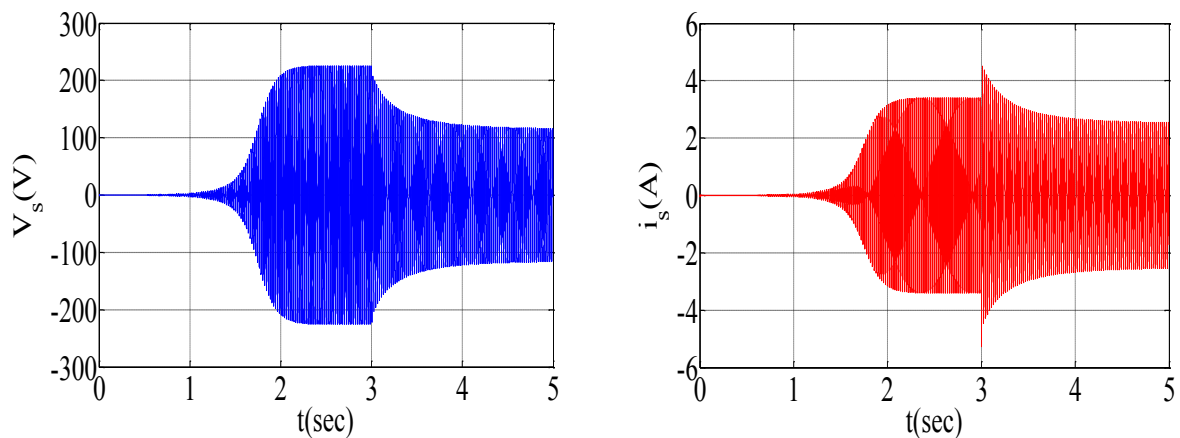


FIG. 2.19 – Evolution de la tension et du courant de ligne.

Le couple électromagnétique augmente avec l'augmentation du courant et se stabilise à une valeur de $-2.4N.m$, on constate une augmentation importante du courant rotorique à cause de la puissance active fournie par la génératrice à la charge FIG. 2.20.

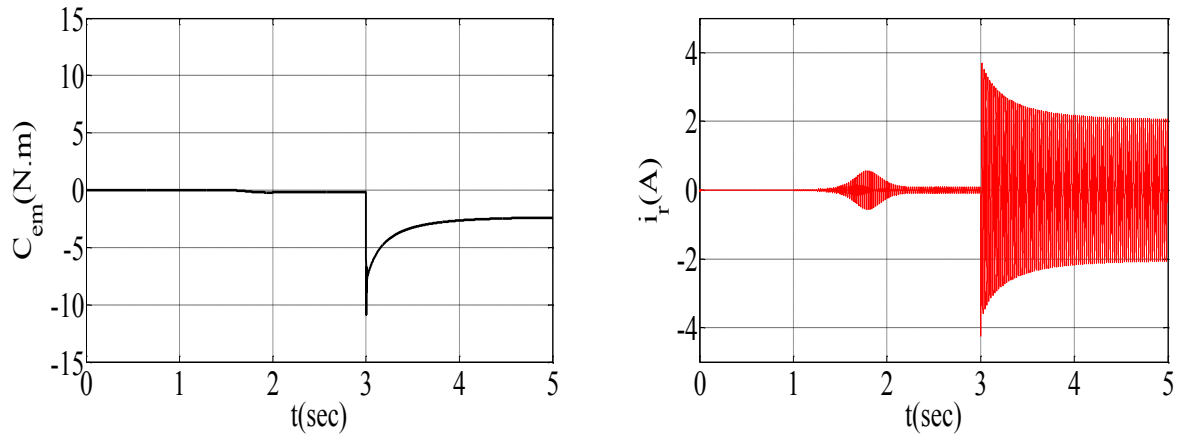
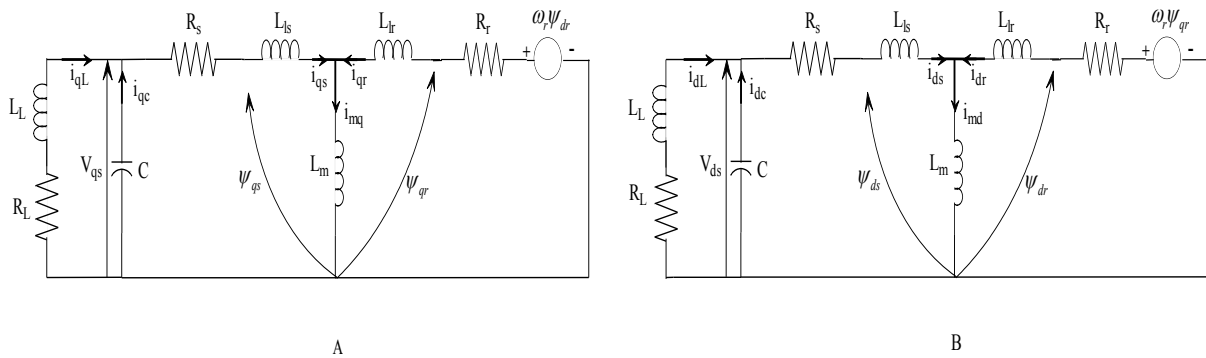


FIG. 2.20 – Evolution du couple électromagnétique et du courant rotorique.

Charge RL

La charge RL est représentée par trois résistances et inductances en série identiques connectées en étoile et branchées en parallèle avec le banc de condensateurs. Le schéma simplifié de connexion selon l'axe d et q est représenté sur la figure FIG. 2.21.

FIG. 2.21 – Modèle de la GAS dans le repère d, q en charge RL , A- Axe q , B- Axe d .

D'après le schéma ci-dessus on aura le système d'équations qui définit le modèle de la GAS en charge RL .

$$\frac{di_{qL}}{dt} = \frac{1}{L}V_{qs} - \frac{R}{L}i_{qL} \quad (2.43)$$

$$\frac{di_{dL}}{dt} = \frac{1}{L}V_{ds} - \frac{R}{L}i_{dL} \quad (2.44)$$

$$i_{qc} = i_{qs} - i_{qL} \quad (2.45)$$

$$i_{dc} = i_{ds} - i_{dL} \quad (2.46)$$

$$pV_{qc} = \frac{1}{C}(i_{qs} - i_{qL}) \quad (2.47)$$

$$pV_{dc} = \frac{1}{C}(i_{ds} - i_{dL}) \quad (2.48)$$

Le modèle de la GAS sous forme d'espace d'état est:

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & L_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{dr}}{dt} \\ \frac{di_{qr}}{dt} \\ \frac{dV_{ds}}{dt} \\ \frac{dV_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{dL}}{dt} \\ \frac{di_{qL}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega L_m & -R_r & -\omega L_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega L_m & 0 & \omega L_r & -R_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ V_{ds} \\ V_{qs} \\ i_{dL} \\ i_{qL} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

A l'instant 3 sec, on insère une charge RL de valeur (50 ohm, 1 mH) respectivement, on constate une diminution de la tension jusqu'à ce que la génératrice démagnétise; c'est le même cas pour le courant qui après un régime transitoire pour fournir de la puissance à la charge, s'annule FIG. 2.22. C'est le même cas pour le courant rotorique qui est l'image de la puissance active fournie par la génératrice à sa charge FIG. 2.23.

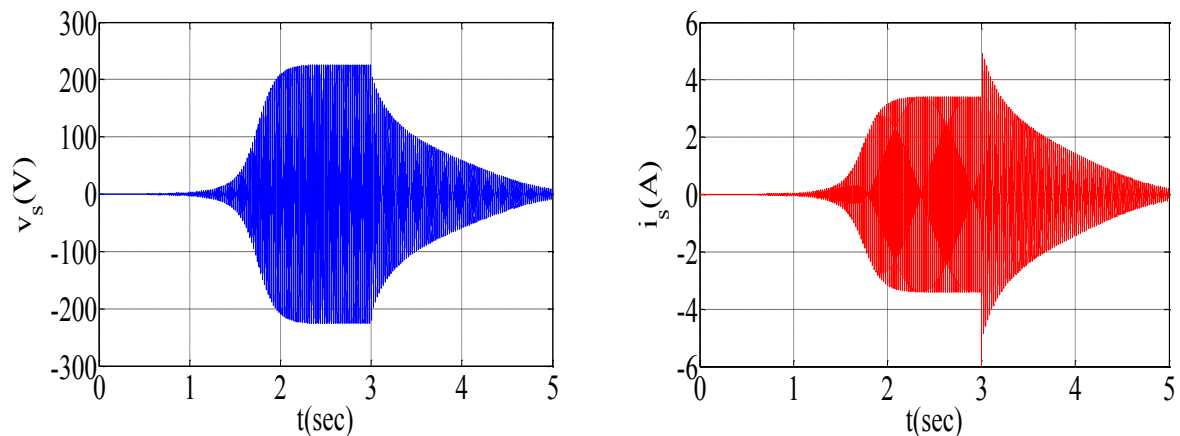


FIG. 2.22 – Evolutions de la tension et du courant dans le cas d'une RL.

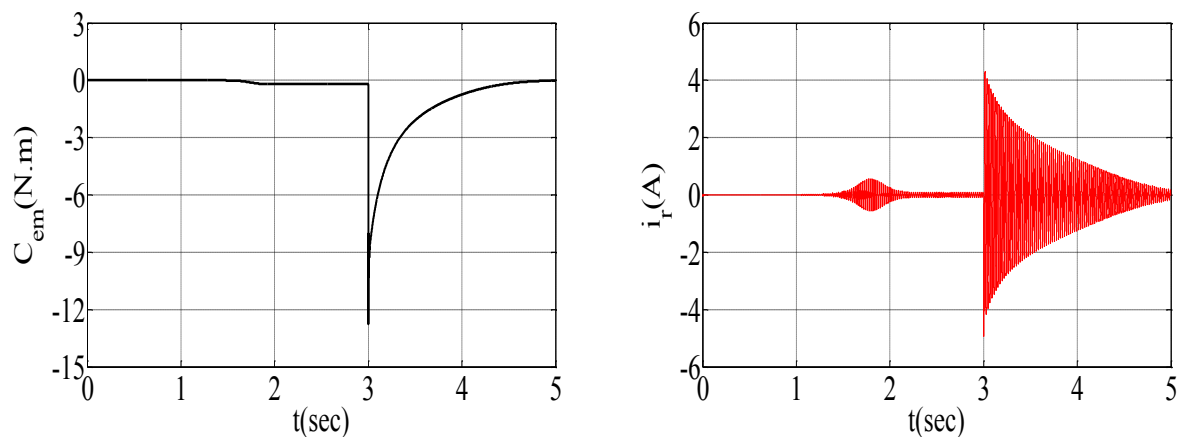


FIG. 2.23 – Evolutions du couple électromagnétique et du courant rotorique dans le cas d'une charge RL.

2.6.5 Génératrice asynchrone à cage double étoile GASDE

Les résultats de simulation numérique pour le fonctionnement à vide de la GASDE avec $C_1=C_2=40 \mu f$. Les tensions v_{as1} et v_{as2} aux bornes des phases α de l'étoile 1 et 2, ainsi que les courants i_{as1} et i_{as2} croient de manière exponentielle (régime transitoire) puis se stabilisent respectivement à 226 V et 3.4 A FIG. 2.24.

La FIG. 2.25 ci-dessous indique que la forme des courants statoriques est identique à celle des tensions statoriques (mêmes fréquences) mais avec un déphasage de 90° .

L'allure du courant rotorique FIG. 2.26 montre que celui-ci est 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 à sa charge.

le couple électromagnétique de la GASDE a une valeur faible de $t = 0 \text{ sec}$ à $t = 1 \text{ sec}$

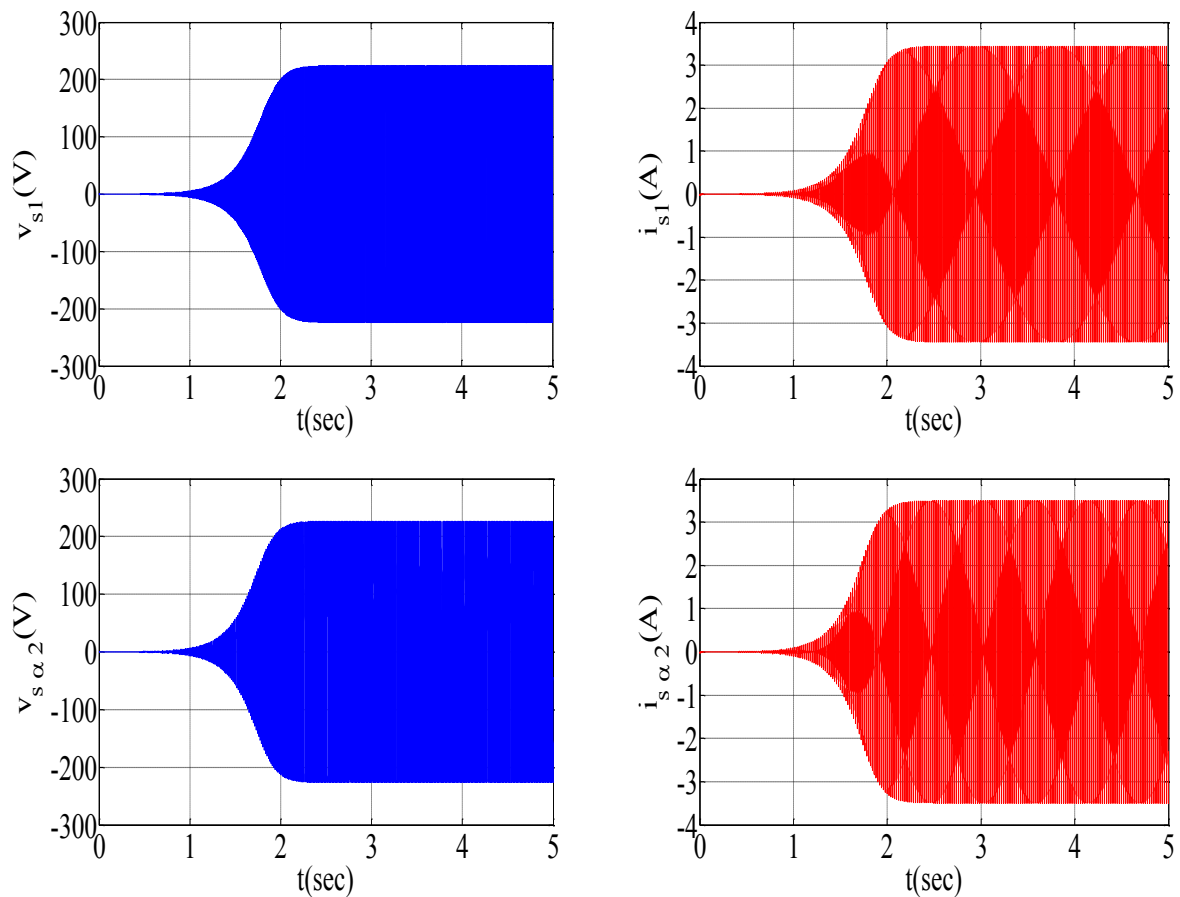


FIG. 2.24 – Evolutions de la tension et du courant pour les 2 étoiles.

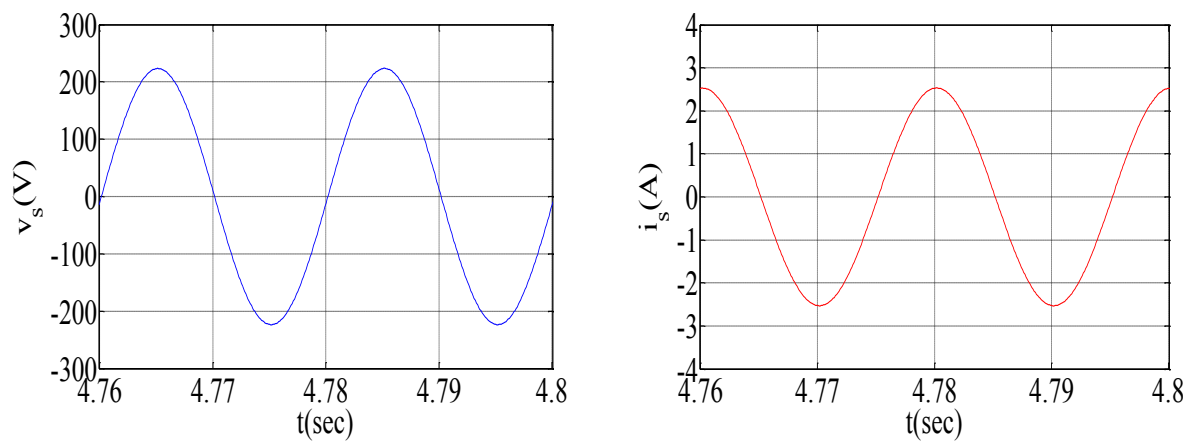


FIG. 2.25 – Evolutions de la tension et du courant pour les 2 étoiles.

puisque les courants sont faibles. Dans l'intervalle $t = 1 \text{ sec}$ à $t = 2.22 \text{ sec}$, il subit un régime transitoire. En régime établi le couple électromagnétique a une valeur constante égale à 0.2 N.m , FIG. 2.26.

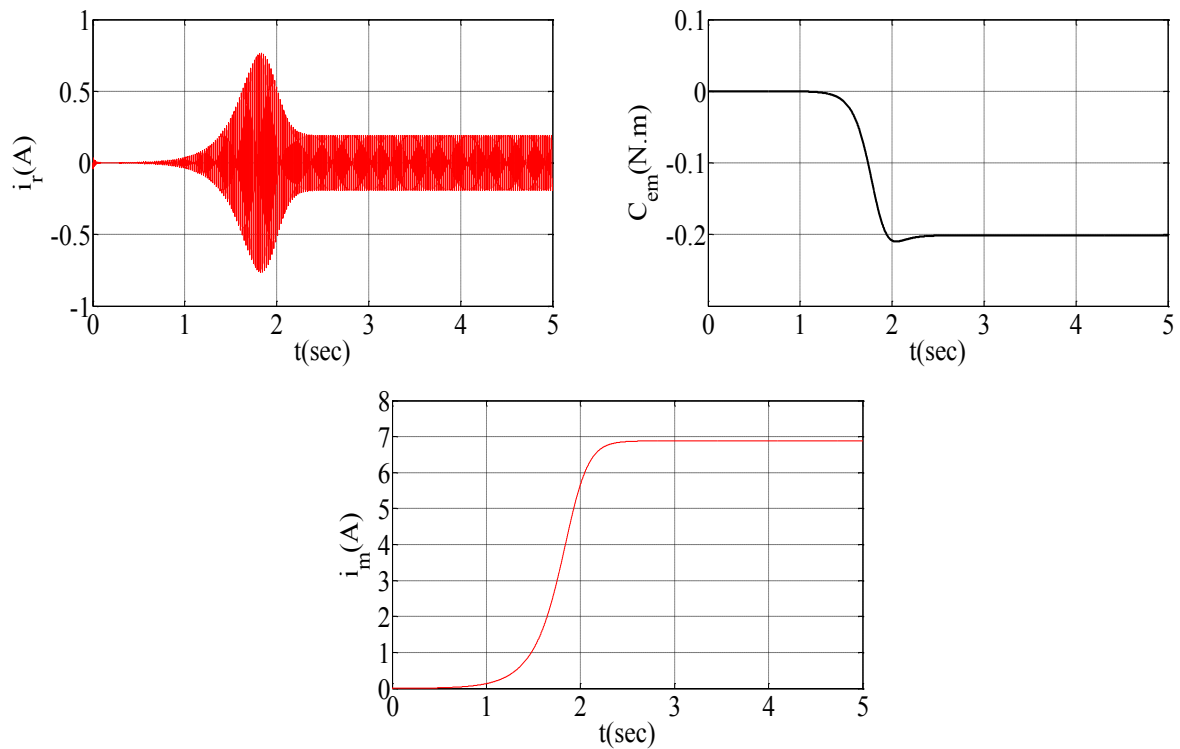


FIG. 2.26 – Evolutions du courant rotorique, du couple électromagnétique et du courant de magnétisation.

2.6.6 Effet de la capacité

Pour une capacité en-dessous d'une valeur critique ($C < C_{critique}$), il n'y a pas d'amorçage FIG. 2.27.

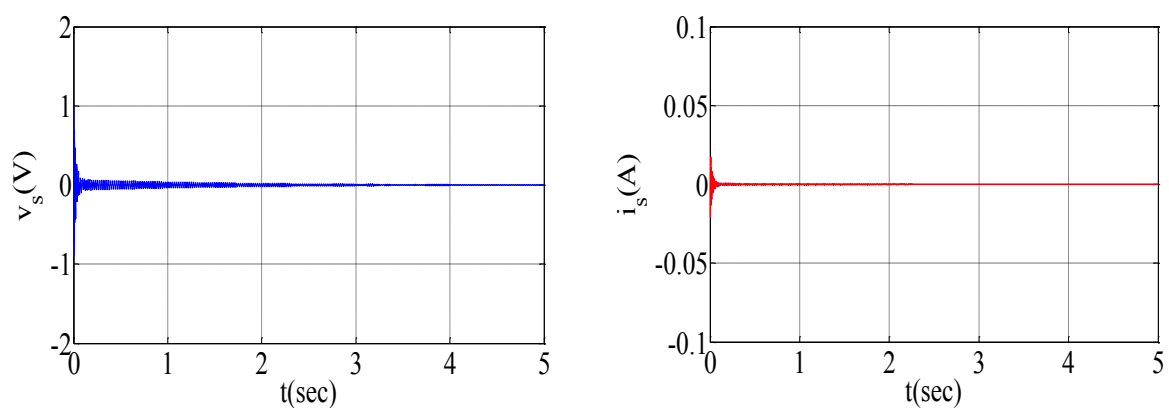


FIG. 2.27 – Effet de $C < C_{critique}$ sur la tension générée par la GASDE.

Pour analyser l'influence des capacités sur les tensions de la GASDE, on fait tourner le rotor à la vitesse de synchronisme et on représente les enveloppes de tension $v_{\alpha s1}$ et de

courant $i_{\alpha s1}$ FIG. 2.28 dans les 2 cas suivants:

- Première essai: $C_1 = 60 \mu f$ et $C_2 = 40 \mu f$;
- Deuxième essai: $C_1 = 40 \mu f$ et $C_2 = 50 \mu f$.

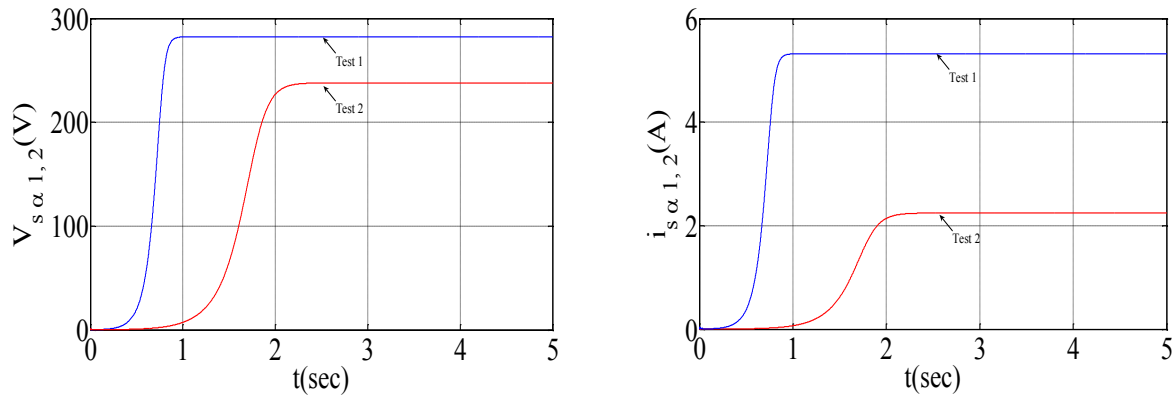


FIG. 2.28 – Influence des capacités sur les tensions et les courants.

2.6.7 Influence de la vitesse d'entraînement

On fait varier la vitesse d'entraînement pour voir l'influence de la vitesse d'entraînement sur la tension en amplitude et en fréquence (la valeur de la capacité fixe $C_1 = C_2 = 40 \mu f$).

- Première essai: $\omega_r = 300 \text{ rad/s}$;
- Deuxième essai: $\omega_r = 350 \text{ rad/s}$;
- Troisième essai: $\omega_r = 400 \text{ rad/s}$.

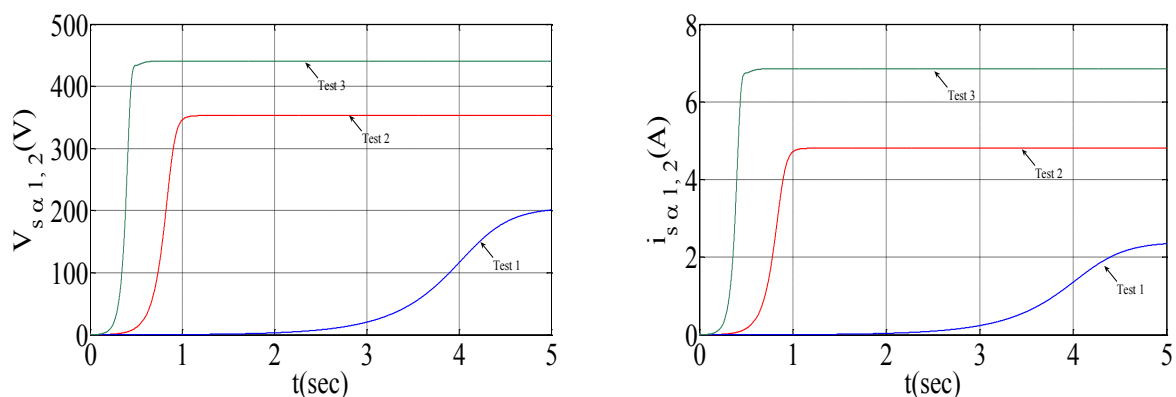


FIG. 2.29 – Influence de la vitesse d'entraînement sur les amplitudes des tensions et des courants.

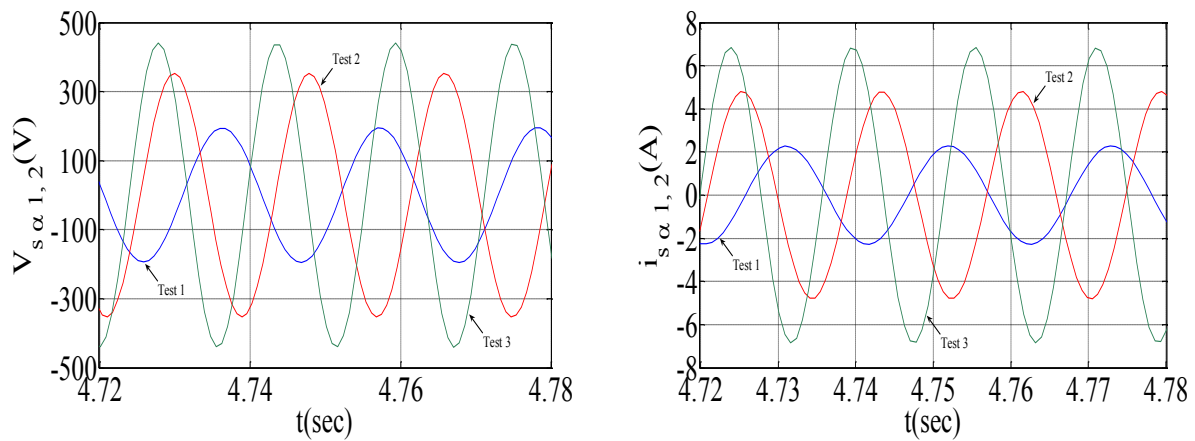


FIG. 2.30 – Influence de la vitesse d'entraînement sur les fréquences des tensions et des courants.

2.6.8 Simulation de la *GASDE* connectée à une charge *R* purement résistive

La charge résistive représentée par trois résistances identiques connectées en étoile et branchées en parallèle avec le banc de condensateurs pour chaque étoile de la *GASDE*.

Le schéma simplifié de connexion selon l'axe *d* de l'étoile 1 est donné par la FIG. 2.31.

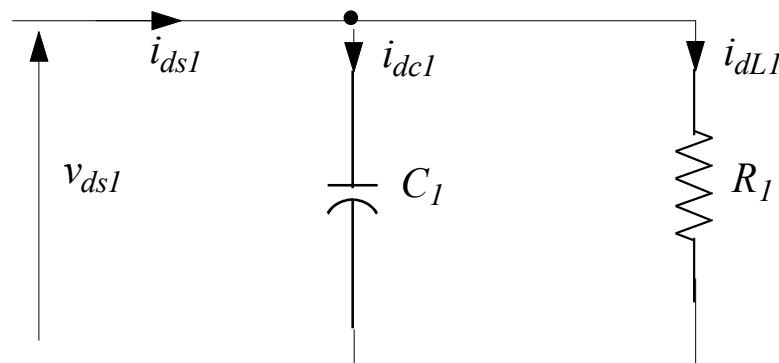


FIG. 2.31 – Connexion de la charge *R* selon l'axe *d* (étoile 1).

D'après le schéma ci-dessus, on écrit le système d'équations suivant:

$$\begin{aligned}
 i_{dc1} &= i_{ds1} - \frac{v_{ds1}}{R_1} \\
 i_{qc1} &= i_{qs1} - \frac{v_{qs1}}{R_1} \\
 i_{dc2} &= i_{ds2} - \frac{v_{ds2}}{R_1} \\
 i_{qc2} &= i_{qs2} - \frac{v_{qs2}}{R_1}
 \end{aligned} \tag{2.50}$$

$$\begin{aligned}
\frac{dv_{ds1}}{dt} &= \frac{1}{C_1} (i_{ds1} - \frac{1}{R_1} v_{ds1}) + \omega_s v_{qs1} \\
\frac{dv_{qs1}}{dt} &= \frac{1}{C_1} (i_{qs1} - \frac{1}{R_1} v_{qs1}) - \omega_s v_{ds1} \\
\frac{dv_{ds2}}{dt} &= \frac{1}{C_2} (i_{ds2} - \frac{1}{R_1} v_{ds2}) + \omega_s v_{qs2} \\
\frac{dv_{qs2}}{dt} &= \frac{1}{C_2} (i_{qs2} - \frac{1}{R_1} v_{qs2}) - \omega_s v_{ds2}
\end{aligned} \tag{2.51}$$

Les charges résistives ($R_{ch1}=R_{ch2}=200\Omega$) sont insérées à $t = 3s$. On constate une diminution de la tension et du courant statoriques à cet instant (régime transitoire) puis une stabilisation aux valeurs $167.65 V$ et $2.21 A$ respectivement (régime permanent) FIG. 2.32; il en est de même pour le courant de magnétisation FIG. 2.33, le courant rotorique est augmenté d'une valeur importante de $2.48 A$. Il est l'image de la puissance active générée par la génératrice à sa charge, FIG. 2.33.

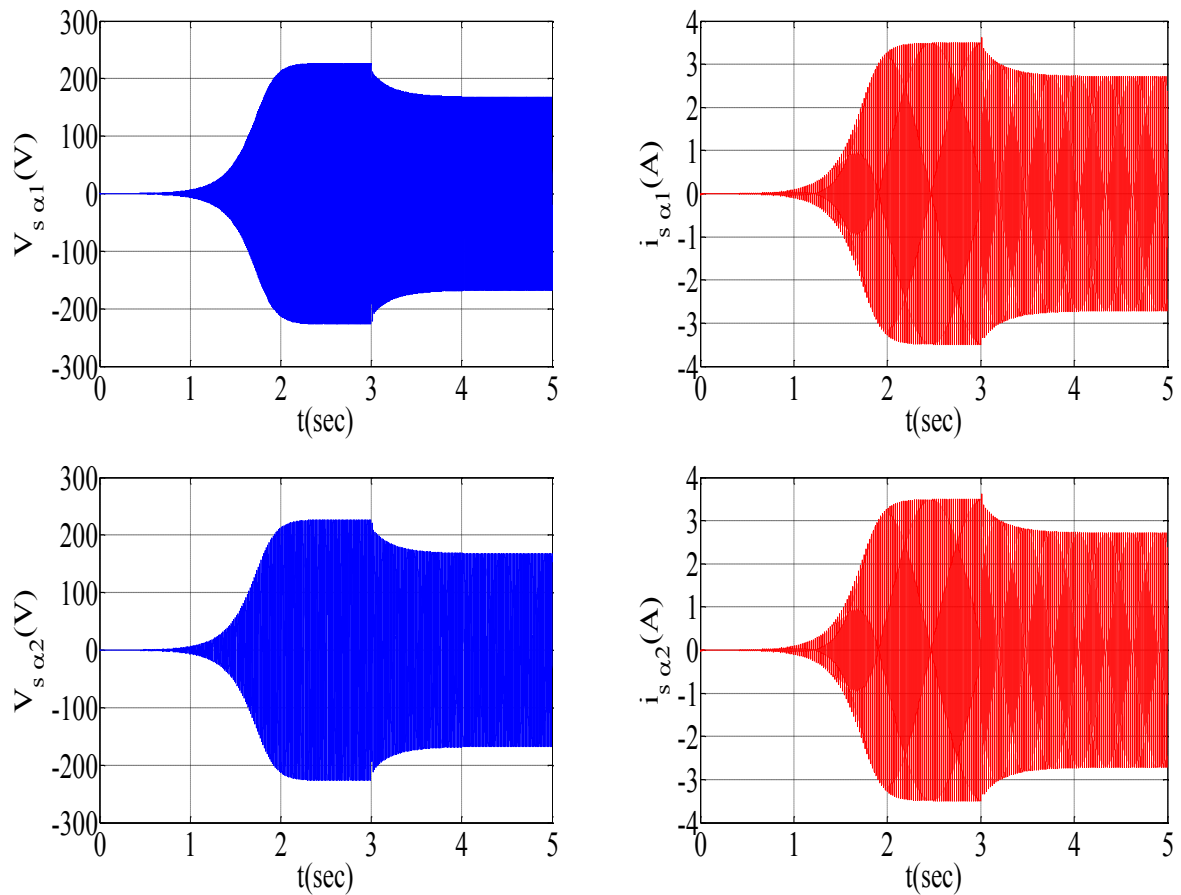


FIG. 2.32 – Evolutions des caractéristiques $i_{\alpha s}$ et $v_{\alpha s}$ dans l'étoile 1 et 2.

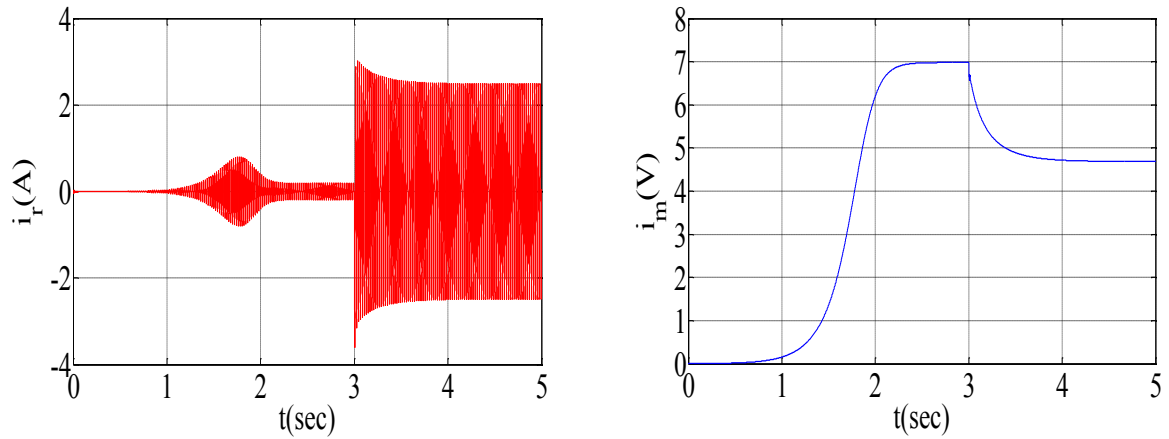


FIG. 2.33 – Effet de la charge sur le courant rotorique et le courant de magnétisation.

2.6.9 Simulation de la GASDE connectée à une charge RL inductive

La FIG. 2.34 représente le schéma de connexion de la charge inductive RL selon l'axe d de l'étoile 1. Au noeud 1, on écrit les équations de courants. On obtient les systèmes d'équations 2.52 et 2.53.

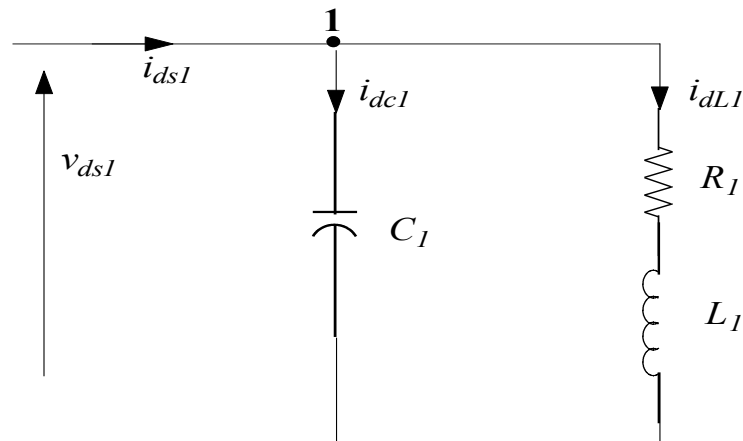


FIG. 2.34 – Connexion de la charge RL selon l'axe d (étoile 1).

$$\begin{aligned}
 \frac{dv_{ds1}}{dt} &= \frac{1}{C_1}(i_{ds1} - i_{dL1}) + \omega_s v_{qs1} \\
 \frac{dv_{qs1}}{dt} &= \frac{1}{C_1}(i_{qs1} - i_{qL1}) - \omega_s v_{ds1} \\
 \frac{dv_{ds2}}{dt} &= \frac{1}{C_2}(i_{ds2} - i_{dL2}) + \omega_s v_{qs2} \\
 \frac{dv_{qs2}}{dt} &= \frac{1}{C_2}(i_{qs2} - i_{qL2}) - \omega_s v_{ds2}
 \end{aligned} \tag{2.52}$$

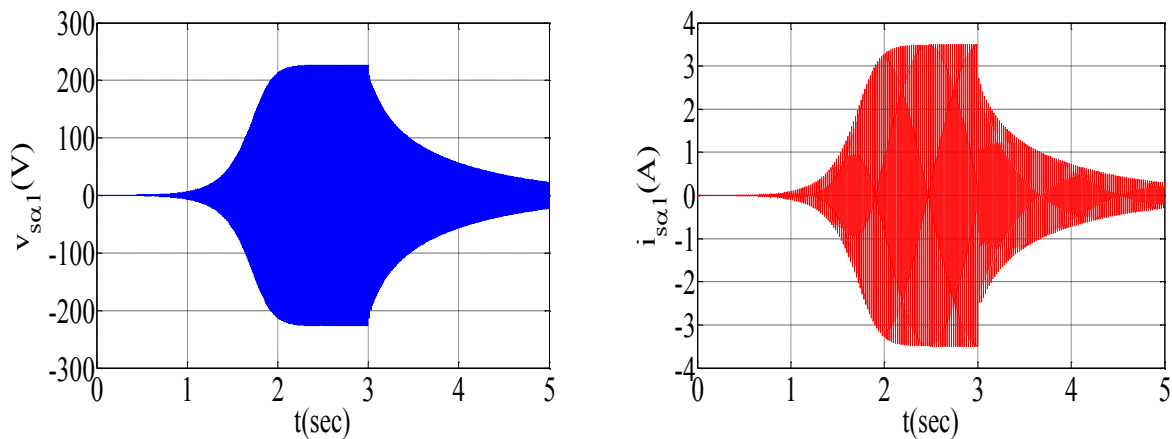
$$\begin{aligned}
\frac{di_{dL1}}{dt} &= \frac{1}{L_1}(v_{ds1} - R_1 i_{dL1}) \\
\frac{di_{qL1}}{dt} &= \frac{1}{L_1}(v_{qs1} - R_1 i_{qL1}) \\
\frac{di_{dL2}}{dt} &= \frac{1}{L_2}(v_{ds2} - R_2 i_{dL2}) \\
\frac{di_{qL2}}{dt} &= \frac{1}{L_2}(v_{qs2} - R_2 i_{qL2})
\end{aligned} \tag{2.53}$$

A $t = 3s$, on connecte les charges résistives ($R_{ch1} = R_{ch2} = 200 \Omega$) et inductives ($L_{ch1} = L_{ch2} = 0.5 h$), la vitesse étant fixée à $\omega_r = 315 \text{ rad/s}$ et les capacités d'excitation fixées à ($C_1 = C_2 = 40 \mu f$).

La connexion d'une charge inductive consommatrice d'énergie réactive (influence sur le courant de magnétisation) induira une chute de tension jusqu'à une valeur proche de 0; par ailleurs, l'auto amorçage de la génératrice en serait affecté ($X_c < X_L$).

L'insertion de la charge engendre des diminutions aux niveaux des tensions et courants statoriques FIG. 2.35 ainsi que celle du courant de magnétisation. Cela est dû à la démagnétisation de la machine en déficit d'énergie réactive nécessaire pour magnétiser la machine d'une part et pour l'alimentation de la charge d'autre part.

La connexion d'une charge inductive consommatrice d'énergie réactive aura pour effet de diminuer le courant de magnétisation qui est fourni par le condensateur FIG. 2.36. Cette diminution du courant signifie moins de flux, ce qui nuit aux performances de la machine. Les charges inductives consommant beaucoup plus d'énergie réactive vont entraîner des chutes de la tension plus importantes que dans le cas de charges purement résistives.



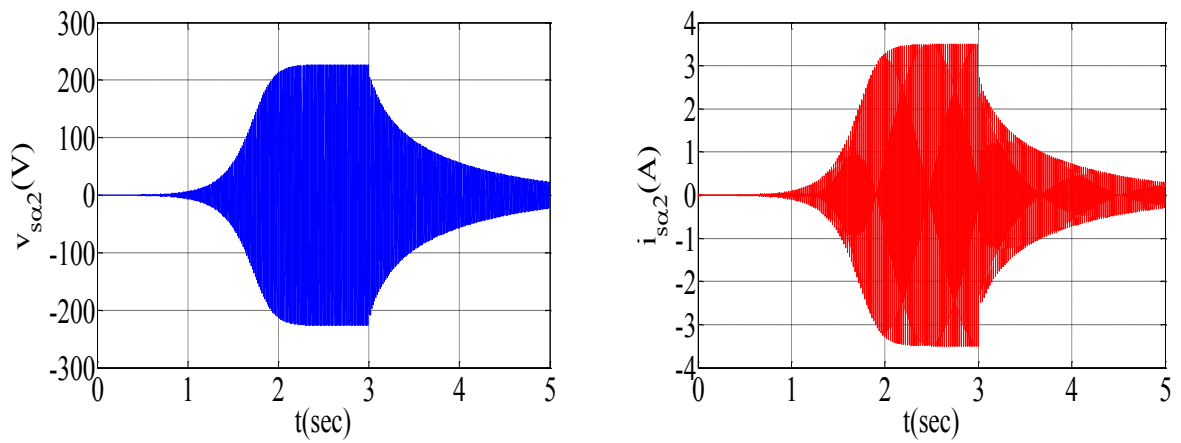


FIG. 2.35 – Evolutions des caractéristiques de la GASDE en charge RL de l'étoile 1 et 2.

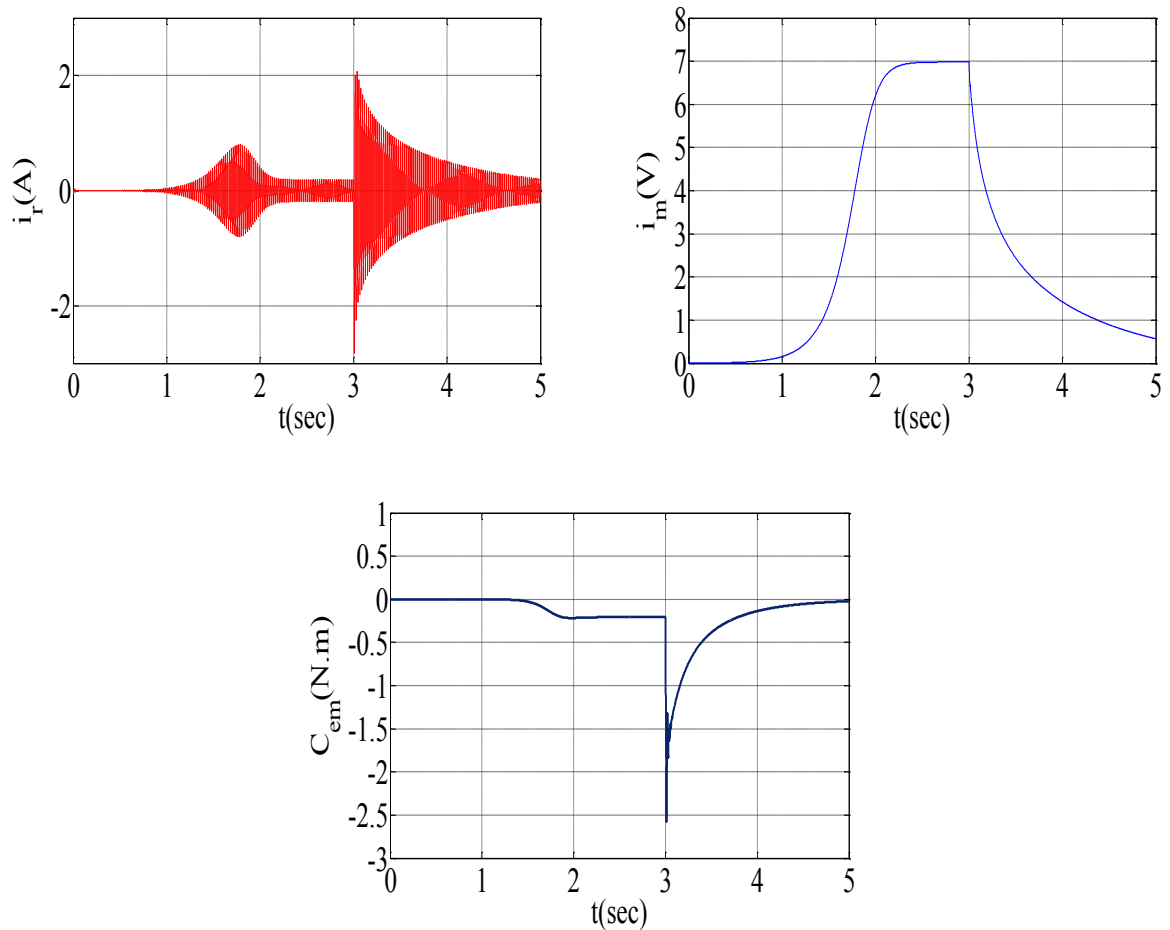


FIG. 2.36 – Effet de la charge inductive sur le courant rotorique, le courant de magnétisation et le couple électromagnétique.

2.7 Conclusion

La génératrice asynchrone à cage *GAS* ou double étoile *GASDE* peuvent être une solution pour la génération de l'énergie (électricité) en fonctionnement dans des sites isolés ou connectés au réseau. Le fonctionnement de ces génératrices en charge ou à vitesse variable nuit à leurs performances. Dans le cas où la charge est critique, elles peuvent être démagnétisés complètement. Une commande vectorielle sera proposée dans le chapitre suivant pour pouvoir à la fois contrôler l'amplitude de la tension et sa fréquence à l'aide des convertisseurs statiques placés entre la génératrice et la charge.

Chapitre 3

Commande Vectorielle de la génératrice asynchrone à cage GAS

3.1 Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse à la commande vectorielle au flux rotorique orienté afin de maintenir la tension constante à la sortie du redresseur et stabiliser la fréquence à l'aide d'un onduleur. Ce dernier est ramené du côté continu sous forme d'une résistance équivalente. Le système à étudier sera une génératrice asynchrone à cage GAS connectée à un redresseur MLI et une charge.

3.2 Modélisation du redresseur triphasé à MLI

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. 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.

Il y a deux manières de mettre en application des redresseurs MLI ; comme redresseurs à source de courant, et redresseurs à source de tension [Bou].

Le bus continu est entièrement géré par le redresseur, la valeur de la capacité de filtrage doit être suffisante afin d'avoir une tension stable et fixe quelque soit le fonctionnement de la génératrice asynchrone FIG. 3.1 [Lou] [Mer01].

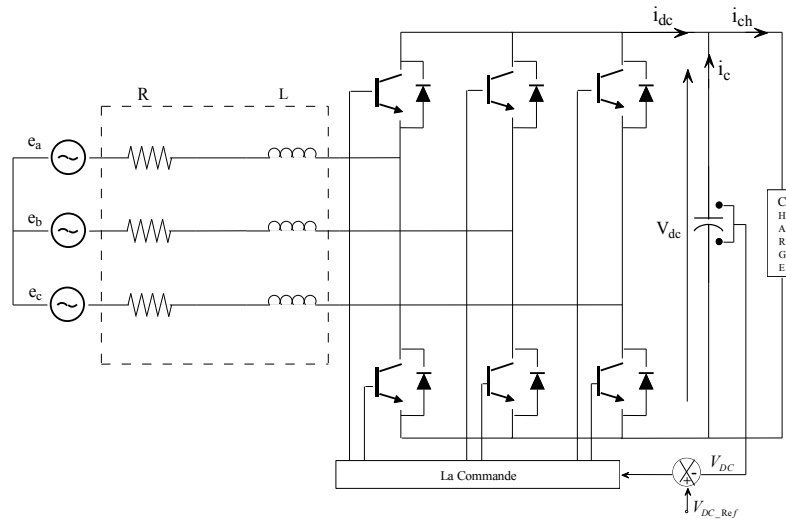


FIG. 3.1 – Topologie de base d'un redresseur à MLI.

3.2.1 Représentation fonctionnelle du redresseur à MLI dans le référentiel triphasé

Les tensions et les courants du réseau sont exprimées sous les systèmes d'équations 3.1 3.2:

$$\begin{aligned} u_{AN} &= E_m \sin \omega t \\ u_{BN} &= E_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ u_{CN} &= E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} i_{AN} &= I_m \sin(\omega t + \varphi) \\ i_{BN} &= I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi) \\ i_{CN} &= I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Où E_m , I_m , et ω sont les amplitudes de la tension de phase, du courant et de la fréquence angulaire.

La somme des courants i_{AN} , i_{BN} et i_{CN} est nulle et le système est équilibré 3.3.

$$i_{AN} + i_{BN} + i_{CN} = 0 \quad (3.3)$$

A l'entrée du redresseur, les tensions composées sont données par 3.4 [Mar]:

$$\begin{aligned} u_{AN} &= (S_A - S_B)u_{DC} \\ u_{BN} &= (S_B - S_C)u_{DC} \\ u_{CN} &= (S_C - S_A)u_{DC} \end{aligned} \quad (3.4)$$

et les tensions de phase sont comme suit:

$$\begin{aligned} u_{AN} &= f_a u_{DC} \\ u_{BN} &= f_b u_{DC} \\ u_{CN} &= f_c u_{DC} \end{aligned} \quad (3.5)$$

où:

$$\begin{aligned} f_a &= \frac{2S_A - (S_B + S_C)}{3} \\ f_b &= \frac{2S_B - (S_A + S_C)}{3} \\ f_c &= \frac{2S_C - (S_A + S_B)}{3} \end{aligned} \quad (3.6)$$

f_a , f_b et f_c sont de valeurs 0 , $\pm\frac{1}{3}$ et $\pm\frac{2}{3}$.

Les équations de tensions pour le système triphasé équilibré sans neutre peuvent être écrites comme (3.7) (3.8) (3.9).

$$u_s = u_1 + u_c \quad (3.7)$$

$$u_s = Ri_C + \frac{di_C}{dt}L + u_C \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} u_{Sa} \\ u_{Sb} \\ u_{Sc} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{Ca} \\ u_{Cb} \\ u_{Cc} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Le courant de la capacité est exprimé comme suit (3.10):

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_{Ca} + S_b i_{Cb} + S_c i_{Cc} - i_{dc} \quad (3.10)$$

D'après les équations ci-dessus, on représente le schéma du redresseur MLI, FIG. 3.2:

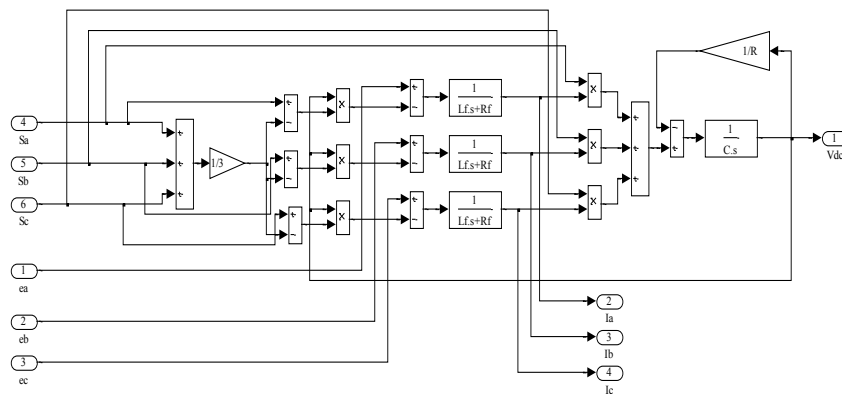


FIG. 3.2 – Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans les coordonnées triphasées normales.

3.2.2 Représentation du redresseur MLI dans le référentiel tournant (dq)

Les équations dans le repère tournant dq sont obtenues comme suit:

$$u_{sd} = Ri_{Cd} + L \frac{di_{Cd}}{dt} - \omega Li_{Cq} + u_{Cd} \quad (3.11)$$

$$u_{sq} = Ri_{Cq} + L \frac{di_{Cq}}{dt} + \omega Li_{Cd} + u_{Cq} \quad (3.12)$$

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = (i_{Cd}S_d + i_{Cq}S_q) - i_{dc} \quad (3.13)$$

Où: $S_d = S_\alpha \cos \omega t + S_\beta \sin \omega t$; $S_q = S_\beta \cos \omega t - S_\alpha \sin \omega t$

$S_\alpha = \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c)$; $S_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c)$

Un schéma fonctionnel dans le repère dq est présenté dans la FIG. 3.3.

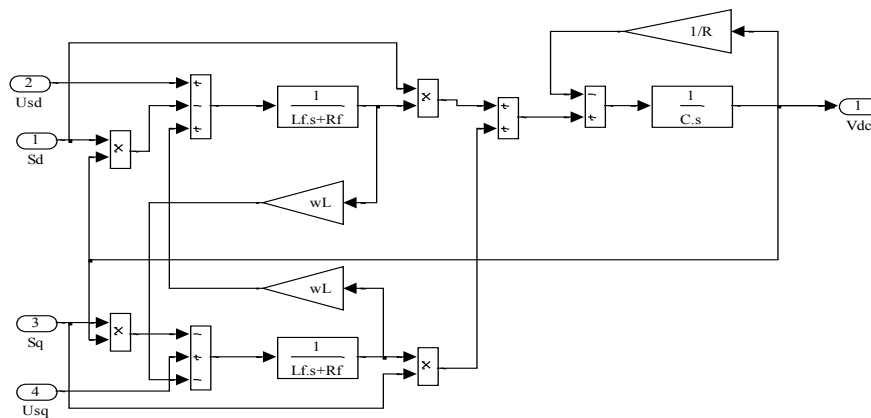


FIG. 3.3 – Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans le référentiel dq .

3.3 Commande vectorielle

L'objectif à atteindre par la commande d'un système éolien diffère selon le type d'utilisation. Dans le cas d'un raccordement au réseau, le système éolien doit fournir la puissance active requise tout en minimisant la puissance réactive absorbée, et ce quelque soit la vitesse du vent, sous réserve qu'elle soit suffisante pour produire de l'énergie électrique; alors que dans le cas d'un fonctionnement autonome, le système éolien doit générer un système triphasé de tension de valeur efficace et de fréquence fixes quelque soit la vitesse du vent et/ou la charge connectée, sous réserve que la puissance du vent soit suffisante. C'est cette dernière application qui fait l'objet de nos travaux [Idj].

L'objectif de la commande est alors de maintenir constante la tension continue en sortie du redresseur. Cela peut être obtenu par le contrôle du flux et de la puissance transmise par la machine, c'est à dire son couple électromagnétique (en fonction de la vitesse)[Idj]

[Lou] [Zhi01] [Sey01] [Mat]. On retrouve alors les mêmes contraintes que pour la commande vectorielle d'une machine asynchrone fonctionnant en moteur, c'est à dire le contrôle du flux et du couple électromagnétique indépendamment l'un de l'autre. Nous verrons, dans la suite, comment le contrôle du flux à une valeur constante permet de simplifier la structure de la commande tout en ne négligeant pas les effets de saturation.

3.3.1 Orientation du flux rotorique

Le contrôle du flux statorique ou du flux d'entrefer n'assure pas un découplage total entre le couple et celui du flux. On s'intéresse à utiliser la commande vectorielle avec orientation du flux rotorique suivant l'axe d , FIG. 3.4. Elle présente de meilleures performances par rapport aux autres techniques d'orientation.

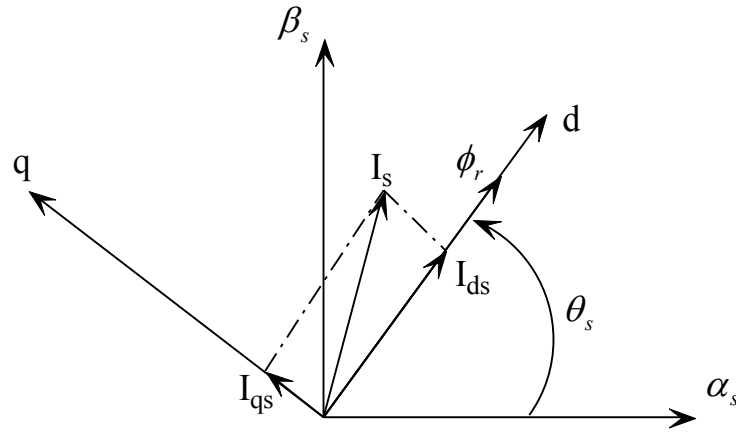


FIG. 3.4 – Principe d'orientation du flux rotorique.

Si le repère est parfaitement orienté, alors la composante ϕ_{qr} est nulle et $\phi_{dr} = \phi_r$. Ceci simplifie le modèle de la machine étudiée dans le chapitre I. L'avantage d'utiliser ce repère est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent. Il est alors plus aisé de cou avoir la régulation.

On a le système d'équations de la machine exprimé comme suit:

$$V_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \phi_{sq} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \quad (3.14)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \phi_{sd} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} \quad (3.15)$$

$$0 = R_r i_{rd} - \omega_r \phi_{rq} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} \quad (3.16)$$

$$0 = R_r i_{rq} + \omega_r \phi_{rd} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} \quad (3.17)$$

Le flux rotorique est constant: $\phi_{rd} = \phi_r = C^{st}$ et $\phi_{rq} = 0$, alors les dérivées temporelles des flux sont nulles en régime permanent $\frac{d\phi_{rd}}{dt} = \frac{d\phi_r}{dt} = 0$ et $\frac{d\phi_{rq}}{dt} = 0$.

on aura d'après (3.16):

$$\frac{d\phi_r}{dt} = -R_r i_{rd} \quad (3.18)$$

Le flux rotorique est considéré constant ce qui implique d'après l'équation précédente que le courant i_{rd} est nul en régime permanent.

Le flux rotorique peut s'exprimer en fonction du courant et de la pulsation rotorique sous la forme suivante:

$$\phi_r = -\frac{R_r i_{rq}}{\omega_r} \quad (3.19)$$

D'après (3.17), on peut exprimer le courant i_{rd} (3.20):

$$i_{rd} = \frac{\phi_r - M i_{sd}}{L_r} \quad (3.20)$$

comme $i_{rd} = 0$, on alors: $\phi_{rd} = \phi_{md} = \phi_r = L_m i_{sd} = M i_{sd}$.

D'après la relation du flux rotorique ϕ_{rq} , on écrit le courant i_{rq} comme suit:

$$i_{rq} = -\frac{M i_{sq}}{L_r} \quad (3.21)$$

L_m dépend uniquement de i_{md} qui est égal à i_{sd} , et si i_{sd} est maintenu constant, alors L_m reste constante et ϕ_r qui est égal au produit de L_m par i_{sd} est aussi constant. Le caractère constant de L_m implique alors que $L_{mq} = L_{mq} = L_m = M$. Il s'agit bien des équations similaires à celles utilisées pour un fonctionnement linéaire [Idj].

D'après les simplifications faites précédemment, tout en orientant le flux rotorique, on obtient le modèle simplifié de la machine (3.22):

$$\begin{aligned} \frac{di_{isd}}{dt} &= \frac{1}{L_s} (V_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_s L_s i_{sq} - M \frac{di_{rd}}{dt} + \omega_s M i_{rq}) \\ \frac{di_{isq}}{dt} &= \frac{1}{L_s} (V_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_s L_s i_{sd} - M \frac{di_{rq}}{dt} + \omega_s M i_{rd}) \\ \phi_r &= \frac{M i_{sd}}{1+T_r p} \\ C_{em} &= p \frac{M}{L_r} \phi_r i_{sq} \\ \omega_s &= \frac{M i_{sq}}{T_r \phi_r} + p \Omega \end{aligned} \quad (3.22)$$

Où: $T_r = \frac{L_r}{R_r}$: constante du temps rotorique.

Dans notre cas, on choisit d'utiliser des correcteurs de courants par hystérésis. De ce fait, il n'y a pas de consignes de tensions à déterminer et donc la connaissance du modèle interne de la génératrice n'est pas nécessaire, et il n'y a aucun besoin de prendre en considération les termes de compensation dans le système de commande.

3.3.2 Algorithme de commande

L'objectif de la commande vectorielle dans notre cas est de maintenir la tension de sortie de redresseur constante, quelque soit la vitesse et la charge dans une grande plage de variation; et à partir de la valeur désirée de la tension continue, il est possible d'exprimer celle de la puissance de référence par (3.23) [Mat] [Idj]:

$$V_{DC}i_{dc} = P^* = P_{ele} = C_{em}\Omega \quad (3.23)$$

En négligeant les pertes, l'expression du couple peut s'écrire comme suit:

$$C_{em} = \frac{P^*}{\Omega} \quad (3.24)$$

D'après l'équation du couple électromagnétique (3.22), ce dernier peut être contrôlé par le courant statorique en quadrature i_{sq} [Idj] [Mat] [Sey01].

$$i_{sq} = \frac{L_r}{pM\phi_r} C_{em} \quad (3.25)$$

Le flux ϕ_r est estimé à partir du courant i_{sd} . Une fois celui-ci maintenu à sa référence, le couple est alors directement proportionnel à i_{sq} [Mat] [Idj]. Ce qui revient à la même démarche que celle utilisée dans le cas d'une commande classique en fonctionnement moteur.

La mise en oeuvre de la commande est représentée dans la FIG. 3.5.

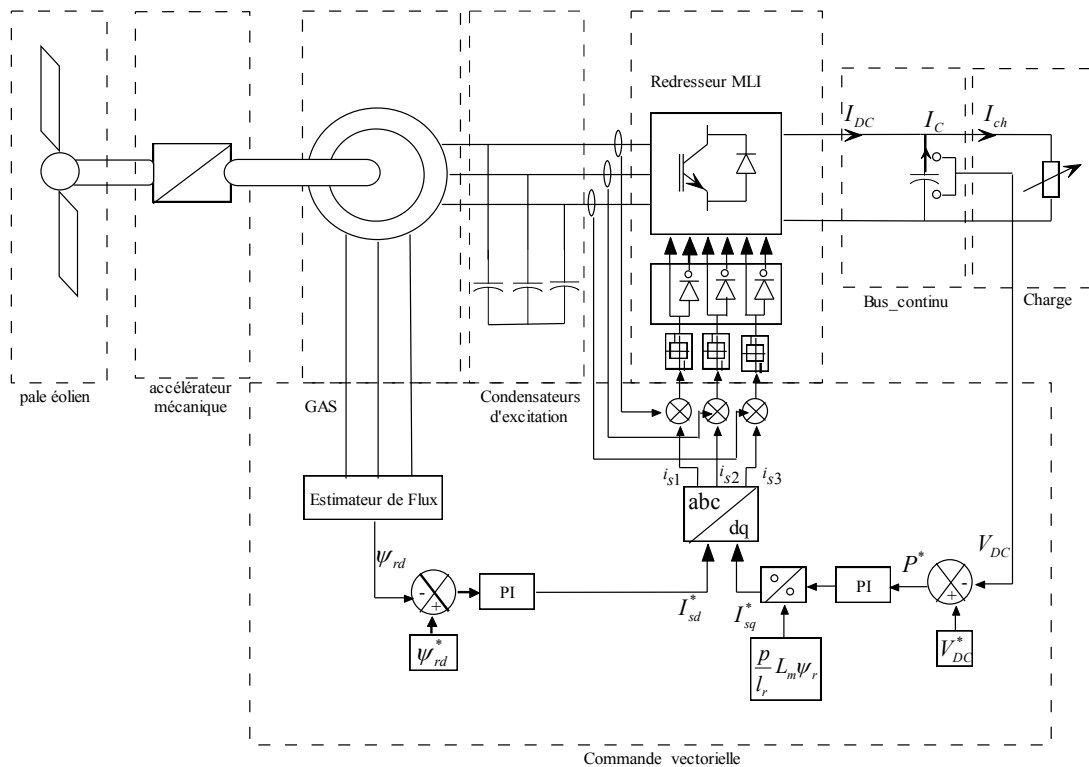


FIG. 3.5 – Algorithme de la commande vectorielle.

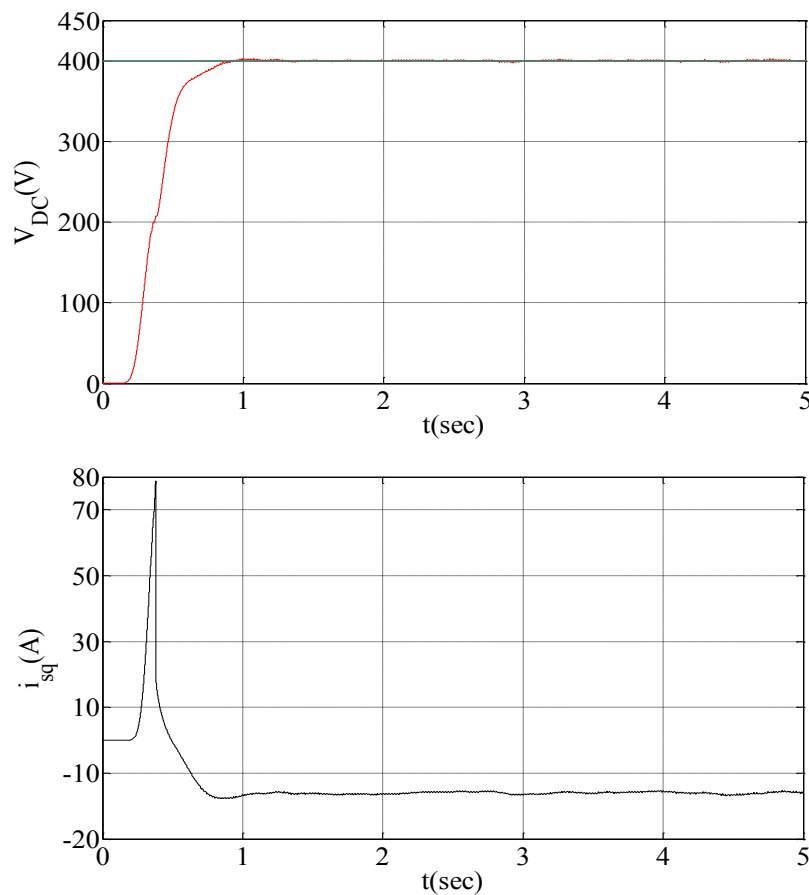
3.4 Interprétation des résultats

Le système à étudier est composé d'une génératrice *GAS* connectée à un redresseur à *MLI* est commandé suivant la stratégie de commande présentée ci-dessus. Dans ce qui suit, quatre tests de simulations sont effectués afin d'analyser les performances de la commande. Le premier test est consacré au comportement de la commande à vitesse et charge constante, le deuxième test permettra d'étudier l'influence de variations de la vitesse, le troisième sera consacré à la commande en cas de variation de la charge, enfin le quatrième sera l'objet d'étude de la commande en présence d'une charge *RL*.

3.4.1 Essai sans variation de la vitesse ou de la charge

le premier essai a pour objectif de voir la réponse de la commande pour une charge et vitesse fixes. Les régulateur *PI* sont utilisés pour maintenir le flux et la puissance à leurs valeurs de référence.

La machine entraînée à la vitesse de synchronisme alimente une charge de 70Ω à la sortie du redresseur. On constate que la tension de bus continu suit bien la référence, ainsi que l'orientation de flux rotorique est bien maintenue, FIG. 3.6.



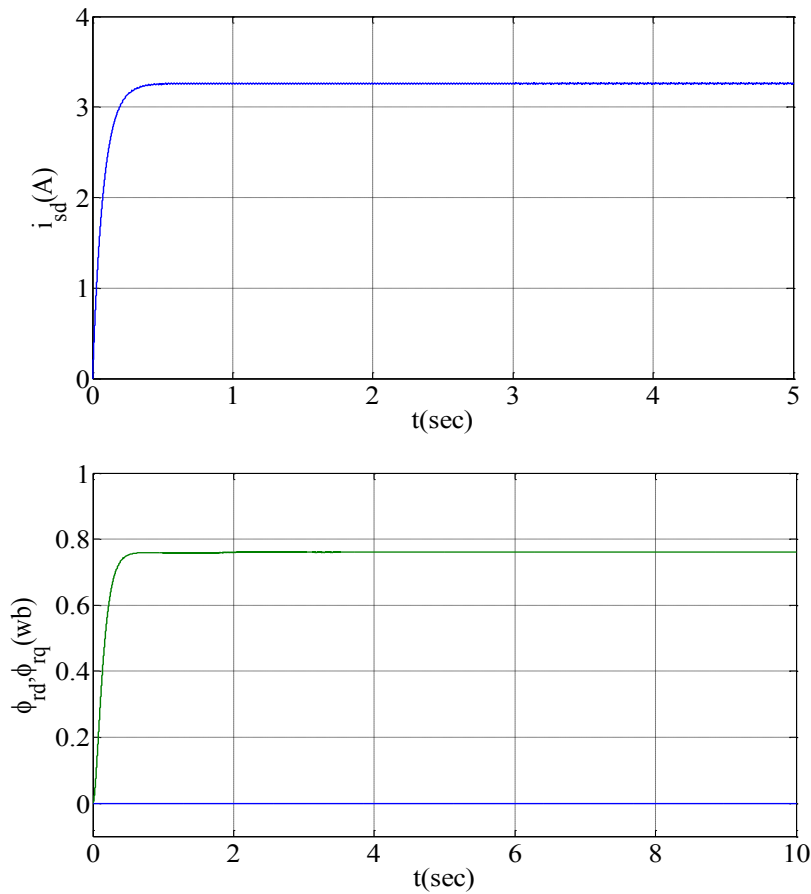


FIG. 3.6 – Comportement de la Commande sans variation de la vitesse ou de la charge, V_{DC} tension de bus continu, i_{sq} , i_{sd} les courants de références, ainsi que le flux de référence ϕ_r .

3.4.2 Essai avec variation de la vitesse d'entraînement

Dans cet essai, on va tester les performances de la génératrice en cas de la variation de la vitesse d'entraînement.

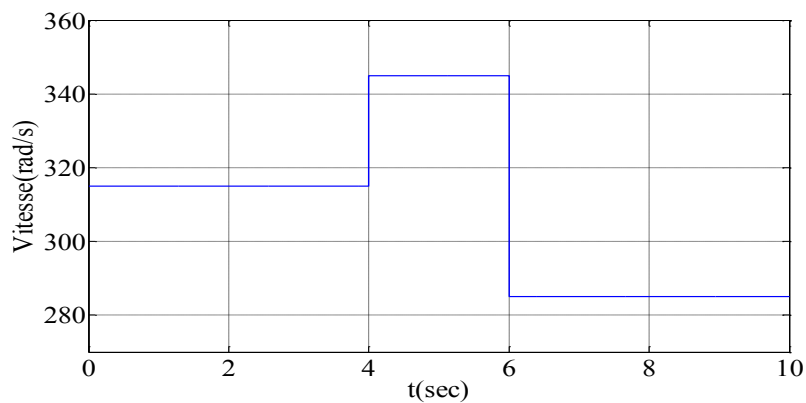


FIG. 3.7 – Vitesse d'entraînement

A l'instant $t = 4s$, la vitesse de rotation ω est augmenté de 315 jusqu'à $345rad/s$, il y a alors une augmentation de la puissance mécanique, donc de la tension; dans ce cas, le regulateur de la tension intervient tout en diminuant le courant de I_{sq} . La tension V_{DC} reprends sa valeur de référence après une petite augmentation de 1.25% de sa valeur de référence.

Une diminution de la vitesse de rotation à l'instant $t = 6s$ ω de 345 jusqu'à $285rad/s$, engendre une diminution de la puissance mécanique, donc de la tension. Dans cette situation, le regulateur de la tension intervient tout en augmentant le courant de I_{sq} ; la tension V_{DC} reprends sa valeur de référence après une petite diminution de 3% de sa valeur de référence.

L'allure du premier est similaire à celle du flux rotorique et le deuxième, qui est le courant actif, varie avec la vitesse pour adapter le couple pour que la tension du bus continu demeure constante égale à la valeur de référence FIG.3.8 FIG. 3.9.

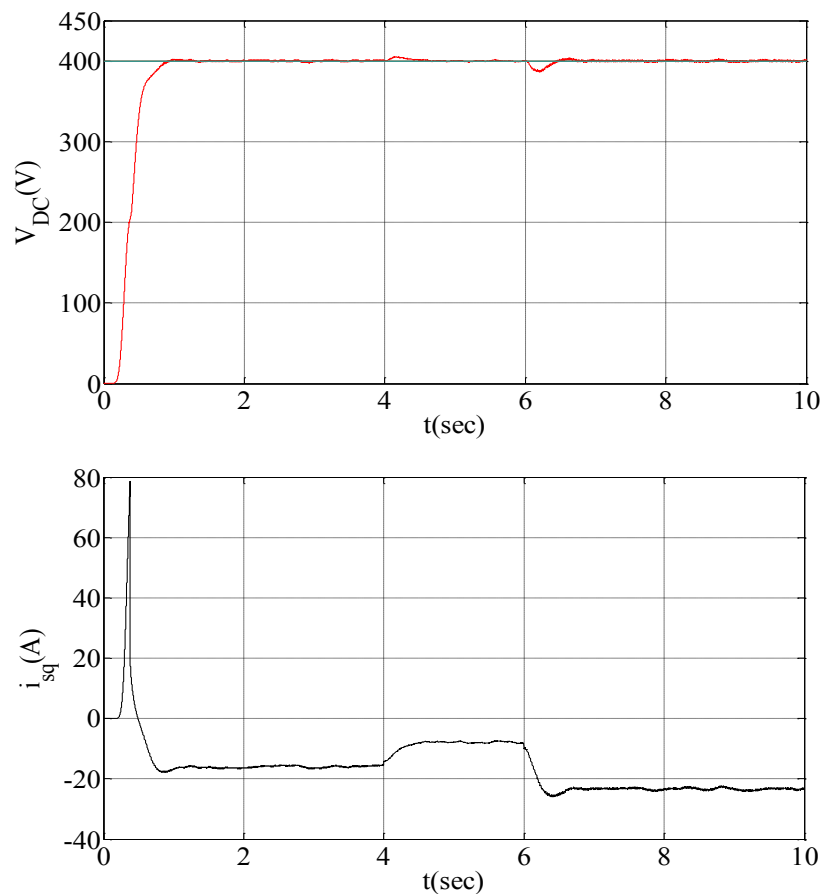


FIG. 3.8 – Performances de la génératrice Asynchrone à cage en cas de variation de la vitesse d'entraînement.

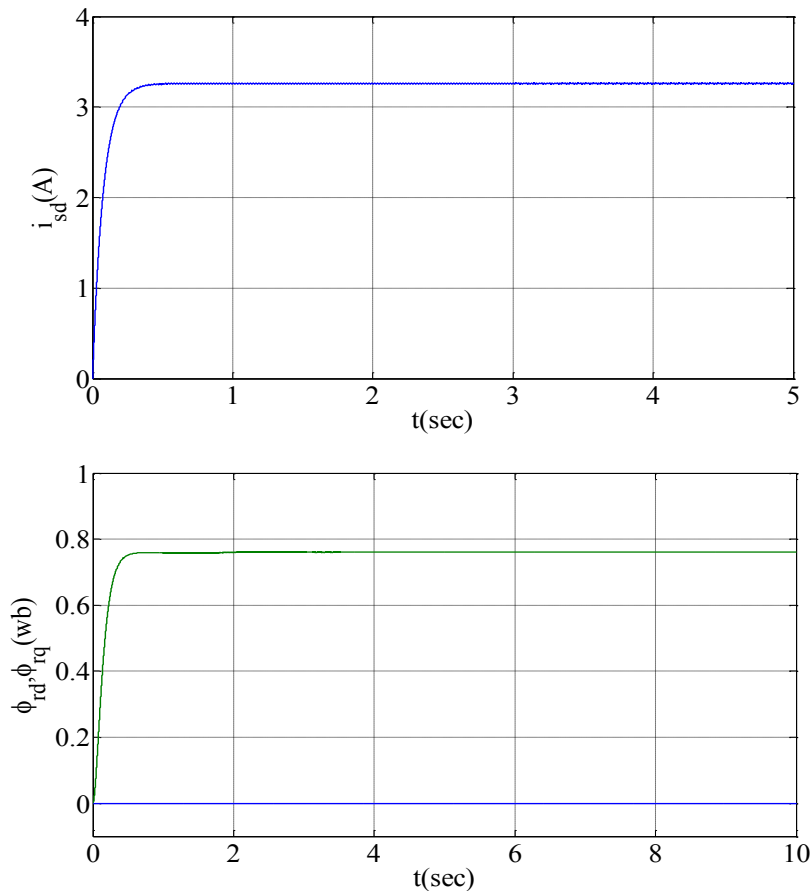


FIG. 3.9 – Performances de la génératrice Asynchrone à cage en cas de variation de la vitesse d'entraînement.

3.4.3 Essai avec variation de la charge

Dans ce test, on s'intéresse aux performances de la commande vectorielle en présence des variations de la charge. Lorsque la génératrice est entraînée à la vitesse de synchronisme, comme la vitesse est fixe, le flux et le courant i_{sd} restent fixes. Les simulations sont menées pour une charge initiale $R = 60\Omega$. A l'instant $t = 4s$, la résistance est augmentée à une valeur de 80Ω , puis à $t = 6s$, la résistance est diminuée à une valeur de 50Ω . Le flux rotorique régulé par le courant i_{sd} est totalement insensible à la variation de la charge. La tension redressée est sensible à la variation de la charge contrairement à la variation de la vitesse. On constate des dépassements avoisinant les 4%. La variation de charge affecte la valeur de la puissance demandée directement liée à la tension V_{DC} et donc à la composante active du courant statorique i_{sq} , FIG. 3.10.

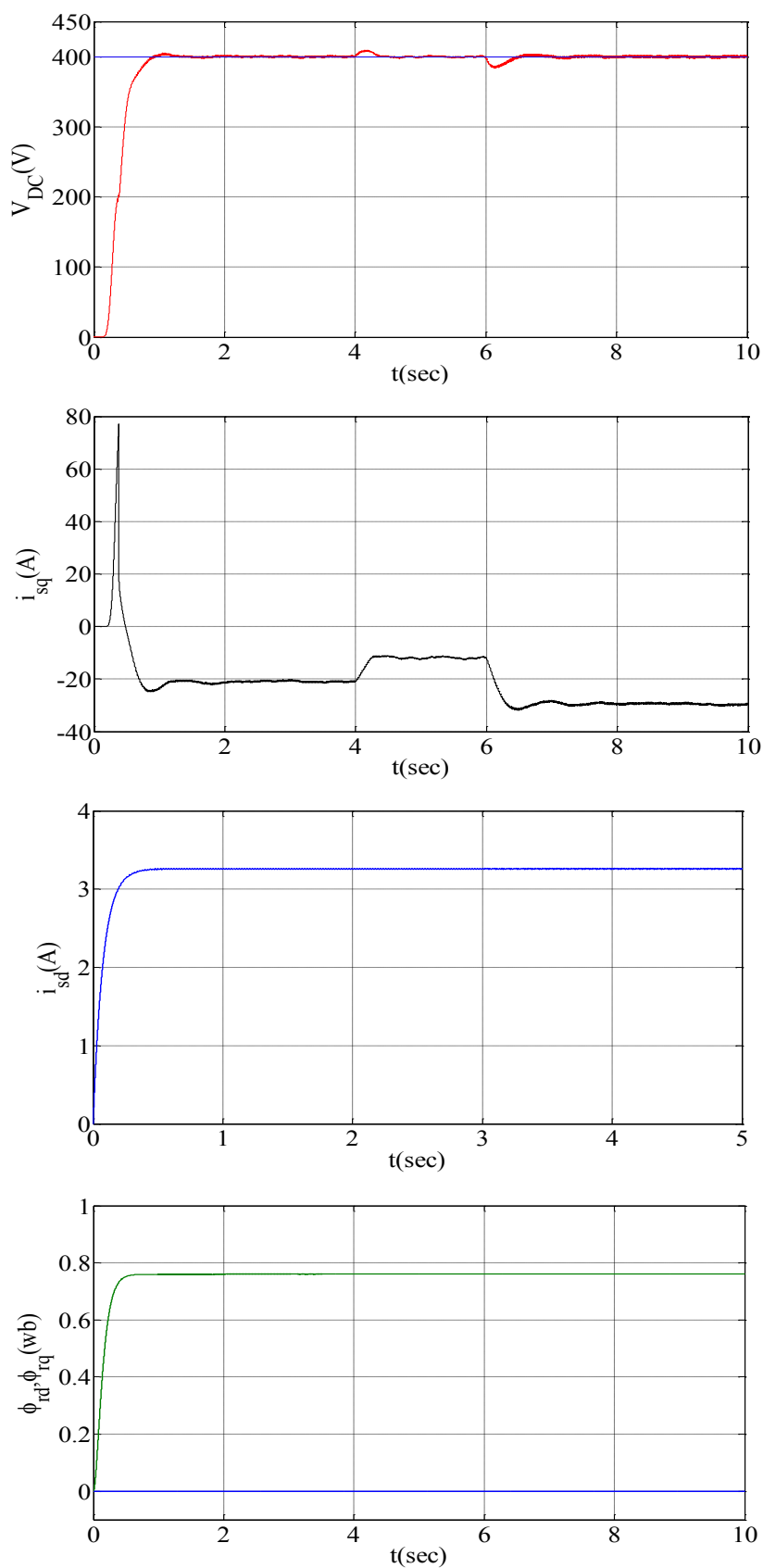
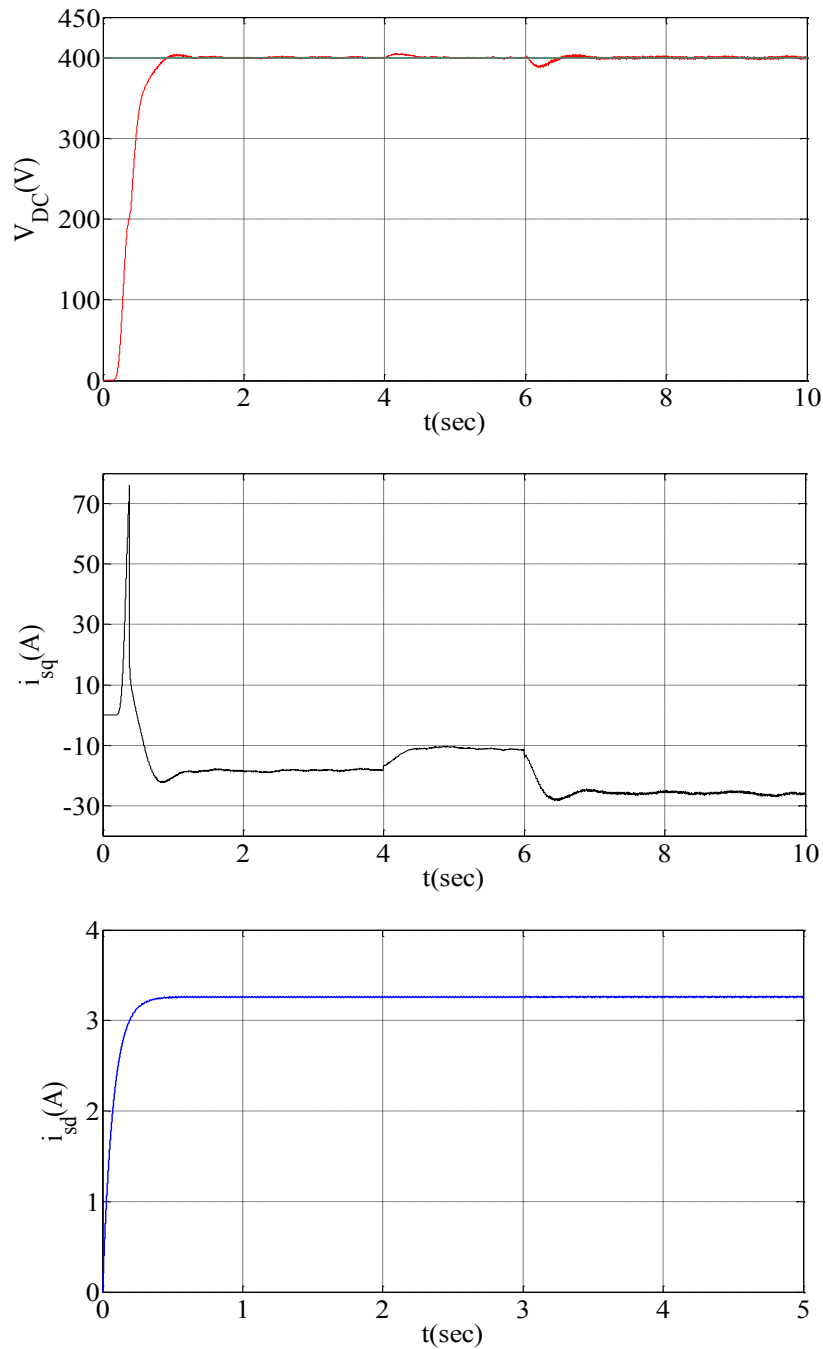


FIG. 3.10 – Performances de la génératrice Asynchrone à cage en cas de variation de la charge.

3.4.4 Essai avec une charge RL

Dans ce paragraphe, on va tester les performances de la génératrice asynchrone à cage pour une charge RL , tout en variant la vitesse d'entraînement à $t = 4s$ et à $t = 6s$, FIG. 3.11, la commande vectorielle a donné des performances remarquables. On constate des dépassements de moins de 2% ce qui est acceptable. avec une très bonne orientation de flux rotorique.



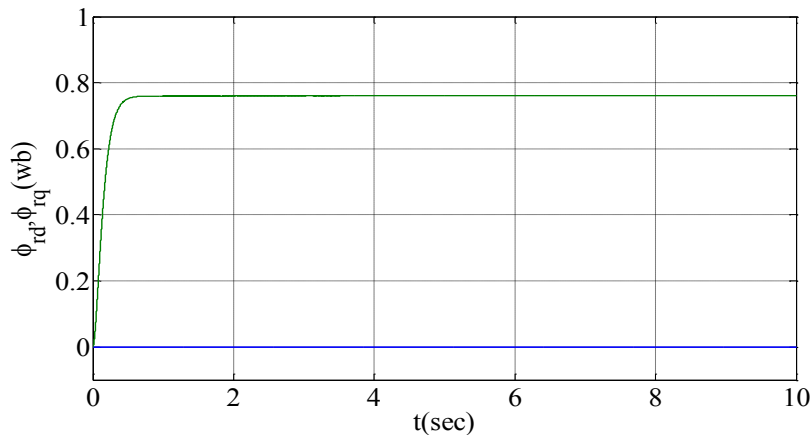


FIG. 3.11 – Performances de la génératrice Asynchrone à cage en cas d'une charge RL .

3.4.5 Essai avec variation de la vitesse et de la charge

A l'instant $t = 4s$, la vitesse est augmenté de $315rad/s$ à $340rad/s$ ce qui engendre une augmentation de la puissance mécanique, donc de la tension aux bornes du stator. A cet instant là, le regulateur intervient tout en diminuant la puissance donc du courant i_{qs} . A la diminution de la vitesse de rotation à l'instant $t = 6s$ de $340rad/s$ à $280rad/s$, on constate une augmentation du courant active i_{qs} pour maintenir la tension V_{DC} à sa référence. En présence de la variation de la vitesse, l'augmentation ou à la diminution de la charge affecte la puissance demandée, ce qui influe directement sur la valeur du courant actif. Les variations de la vitesse et de la charge engendrent des dépassements qui ne dépassent pas les 3% de la valeur de la tension de référence ce qui est acceptable pour une telle commande, FIG. 3.13.

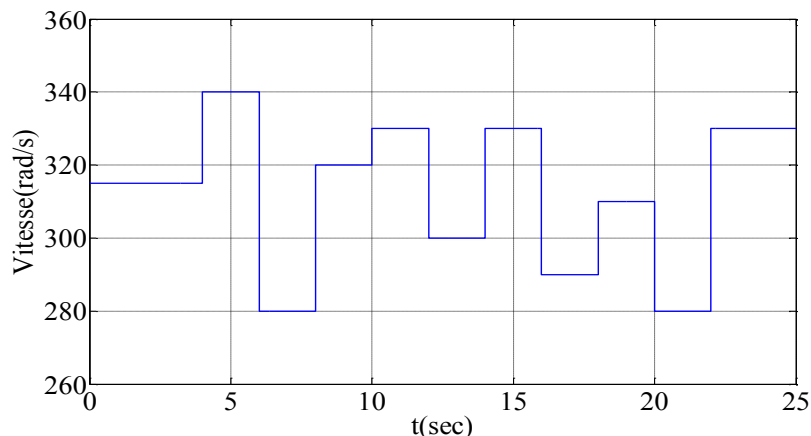


FIG. 3.12 – Variation de la vitesse.

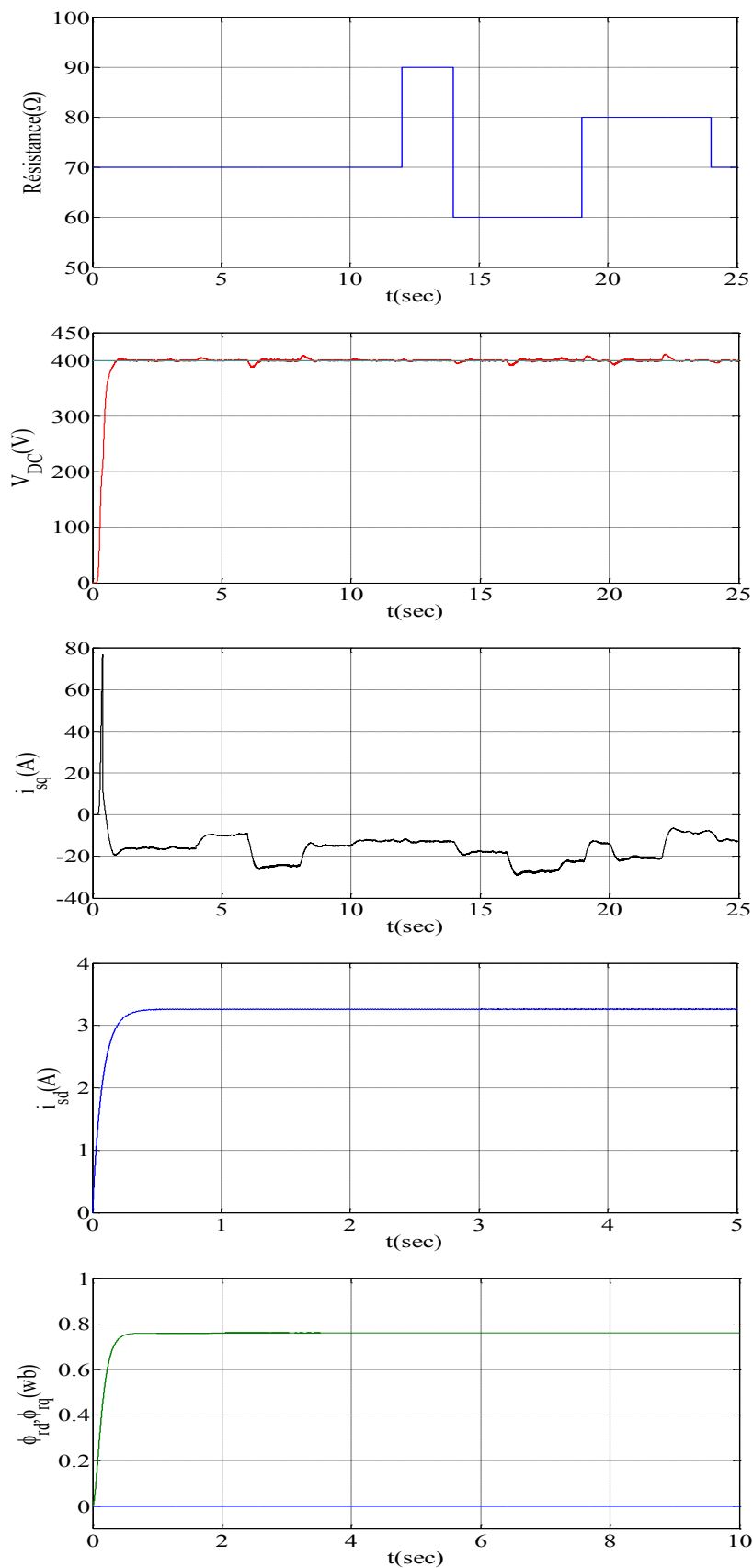


FIG. 3.13 – Performances de la génératrice Asynchrone à cage en cas de variations de la vitesse et de la charge.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a pour objectif de commander la génératrice asynchrone à cage connectée à un redresseur commandé à MLI afin de maintenir la tension du bus continu à la sortie du redresseur constante quelque soit la variation de la tension ou de la charge.

Afin de tester les performances de la commande vectorielle, plusieurs perturbations ont été introduites (variations de la vitesse, et la charge). A l'apparition des perturbations, le système de contrôle intervient pour stabiliser la tension à la sortie du redresseur à sa référence. Cela engendre une augmentation ou diminution du courant actif.

La commande vectorielle en courant à orientation du flux rotorique est simple à implanter. Elle possède des performances acceptables. Aussi, elle constitue une solution technoeconomique valable pour les systèmes de génération de l'électricité.

Chapitre 4

Commande Vectorielle de la génératrice asynchrone à cage double étoile GASDE

4.1 Introduction

Les machines double étoiles avec ces divers topologies, et types d'utilisation moteur ou générateur ont été étudiés depuis longtemps. Le développement de l'électronique de puissance et les techniques de commande ont donné une nouvelle impulsion à l'exploration de nouvelles applications pour la machine.

L'utilisation d'un redresseur à MLI au côté du stator pour les deux étoiles permet d'effectuer une commande vectorielle à flux rotorique orienté afin de maintenir la tension à la sortie du redresseur constante.

L'achitecteur de la GASDE nous amène à utiliser deux techniques de commande: une avec deux redresseurs, un bus continu et l'autre avec deux redresseurs, et deux bus continus.

4.2 Commande Vectrorille à orientation du flux rotorique

L'application d'orientation du flux rotorique sur le modèle de la GASDE étudié dans le chapitre II permet d'écrire [Ami] [Mer] [Ami01]:

$$\begin{aligned}\phi_{dr} &= \phi_r^* \\ \phi_{qr} &= 0 \\ p\phi_r^* &= 0\end{aligned}\tag{4.1}$$

On obtient:

$$R_r i_{dr} + p\phi_r^* = 0 \Rightarrow i_{dr} = 0\tag{4.2}$$

$$R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r)\phi_r^* = 0 \Rightarrow i_{qr} = -\frac{(\omega_s - \omega_r)\phi_r^*}{R_r}\tag{4.3}$$

les courants rotoriques en fonction des courants statoriques se présentent comme suit:

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} (\phi_r^* - L_m(i_{ds1} + i_{ds2})) \quad (4.4)$$

$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \quad (4.5)$$

L'expression finale du couple électromagnétique est :

$$C_{em}^* = p \frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \phi_r^* \quad (4.6)$$

Les tensions statoriques sur l'axe dq deviennent comme suit [Ami] [Mer]:

$$\begin{aligned} v_{ds1} &= R_{s1}i_{ds1} + L_{s1}p i_{ds1} - \omega_s(L_{s1}i_{qs1} + T_r\phi_r^*(\omega_s - \omega_r)) \\ v_{qs1} &= R_{s1}i_{qs1} + L_{s1}p i_{qs1} + \omega_s(L_{s1}i_{ds1} + \phi_r^*) \\ v_{ds2} &= R_{s2}i_{ds2} + L_{s2}p i_{ds2} - \omega_s(L_{s2}i_{qs2} + T_r\phi_r^*(\omega_s - \omega_r)) \\ v_{qs2} &= R_{s2}i_{qs2} + L_{s2}p i_{qs2} + \omega_s(L_{s2}i_{ds2} + \phi_r^*) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Où: $T_r = L_r/R_r$. Après transformations et simplifications, on aura le système d'équations (4.8) qui décrit le modèle de la *GASDE* [Zhi] [Zhi01]:

$$\begin{aligned} p i_{ds1} &= \frac{1}{L_{s1}} (v_{ds1} - R_{s1}i_{ds1} + \omega_s(L_{s1}i_{qs1} + T_r\phi_r^*(\omega_s - \omega_r))) \\ p i_{qs1} &= \frac{1}{L_{s1}} (v_{qs1} - R_{s1}i_{qs1} - \omega_s(L_{s1}i_{ds1} + \phi_r^*)) \\ p i_{ds2} &= \frac{1}{L_{s2}} (v_{ds2} - R_{s2}i_{ds2} + \omega_s(L_{s2}i_{qs2} + T_r\phi_r^*(\omega_s - \omega_r))) \\ p i_{qs2} &= \frac{1}{L_{s2}} (v_{qs2} - R_{s2}i_{qs2} - \omega_s(L_{s2}i_{ds2} + \phi_r^*)) \\ p \phi_r &= -\frac{R_r}{L_r + L_m} \phi_r + \frac{R_r L_m}{L_r + L_m} (i_{ds1} + i_{ds2}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

4.2.1 Algorithme de commande

Deux bus continus

La commande vectorielle a pour objectif de maintenir la tension à la sortie des deux redresseurs constante quelque soient la vitesse d'entraînement et la charge dans une plage de faisabilité [Zhi] [Zhi01].

A partir de la valeur de la tension désirée, on détermine l'expression de la puissance de référence (4.9):

$$V_{DC}i_{dc} = P^* = P_{ele} = C_{em}\Omega \quad (4.9)$$

L'expression du couple devient, (4.10).

$$C_{em} = \frac{P^*}{\Omega} \quad (4.10)$$

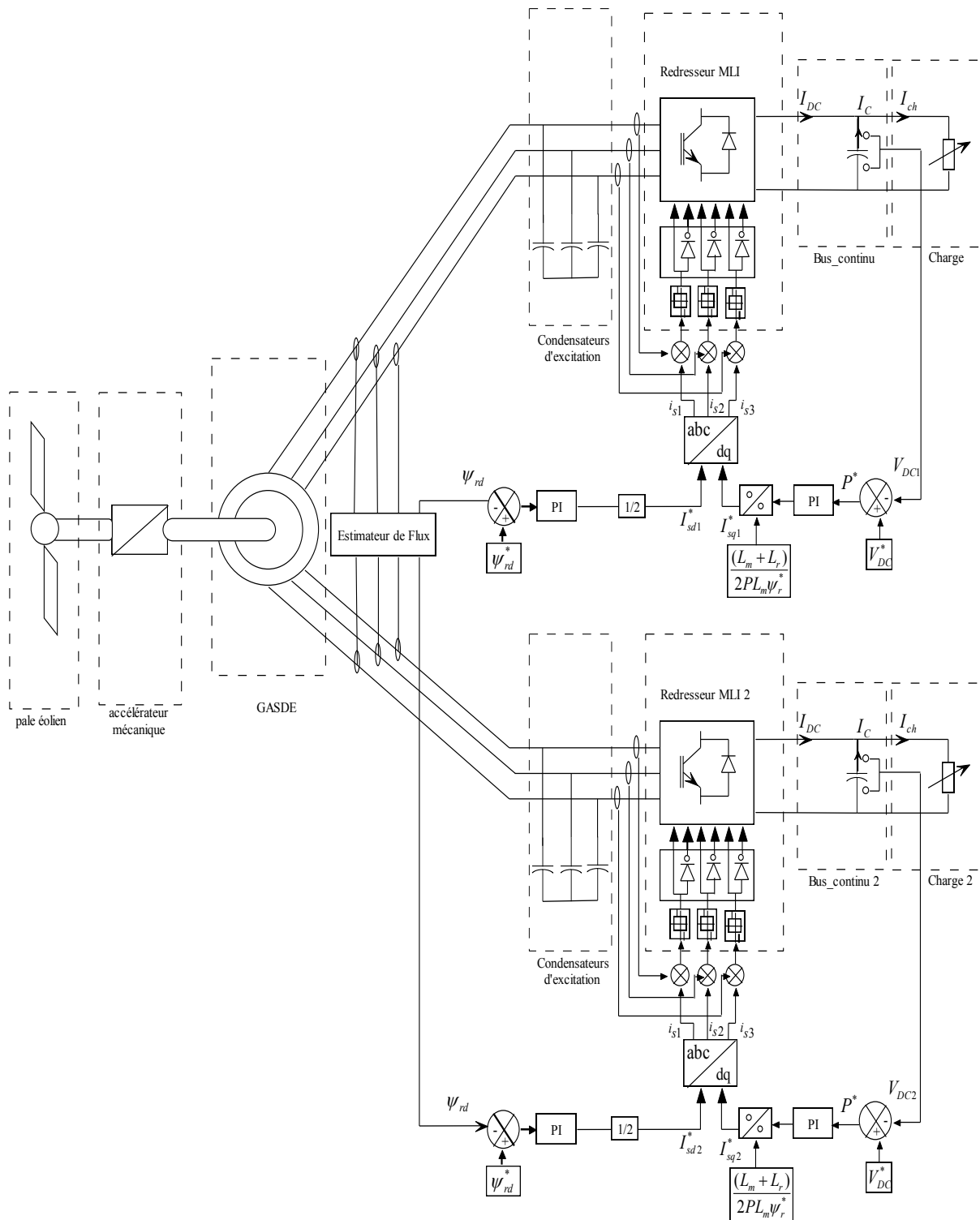


FIG. 4.1 – Algorithme de la commande vectorielle de la GASDE à 2 bus continus.

D'après l'expression du couple, ce dernier est contrôlé par la quadrature du cou-

rant i_{qs1} et i_{qs2} des deux étoiles (4.11).

$$i_{qs1} + i_{qs2} = \frac{(L_m + L_r)C_{em}^*}{pL_m\phi_r^*} \quad (4.11)$$

Le flux ϕ_r est estimé à partir des courant i_{sd1} et i_{sd2} des deux étoiles. Une fois celui ci maintenu à sa référence, le couple est alors directement proportionnel aux i_{sq1} et i_{sq2} (4.12) [Mer] [Ami].

$$\phi_r^* = \frac{R_r L_m}{(L_r + L_m)P + R_r} (i_{ds1} + i_{ds2}) \quad (4.12)$$

4.2.2 Essai sans variation de la vitesse ou de la charge

Dans un premier temps on va vérifier le comportement de la commande vectorielle par la technique, d'orientation du flux rotorique, ainsi que la tension de bus continu.

Les régulateurs *PI* sont utilisés pour maintenir le flux et la puissance à leurs valeurs de référence. La *GASDE* est entraînée à la vitesse de synchronisme alimentant une charge de 55Ω à la sortie du redresseur. La tension de bus continu suit la référence, et l'orientation de flux rotorique est bien orienté FIG. (4.2, 4.3, 4.4, 4.5).

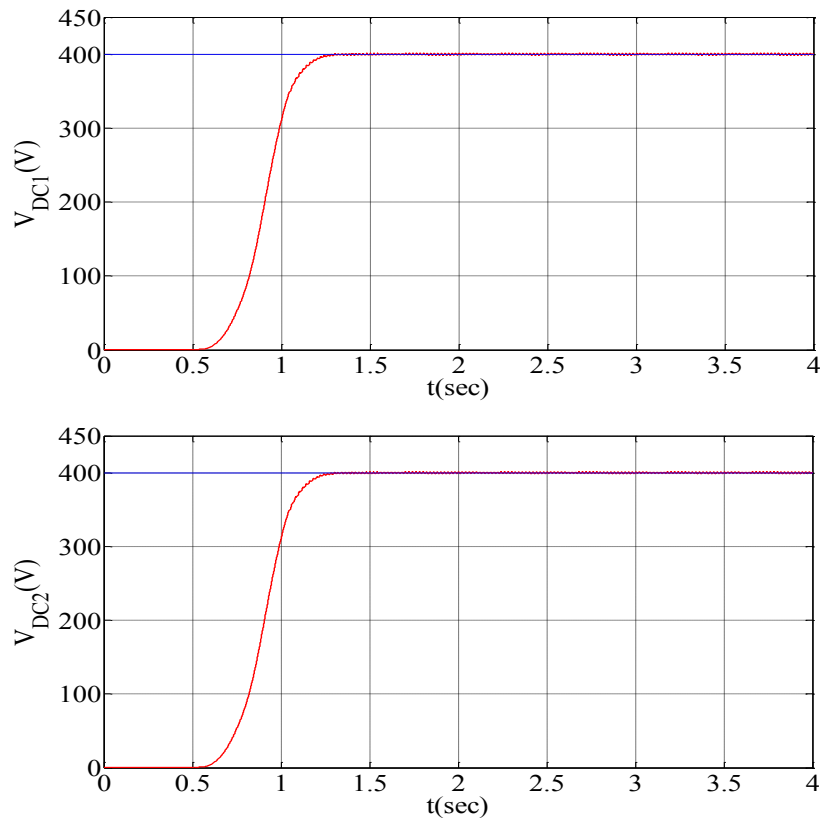
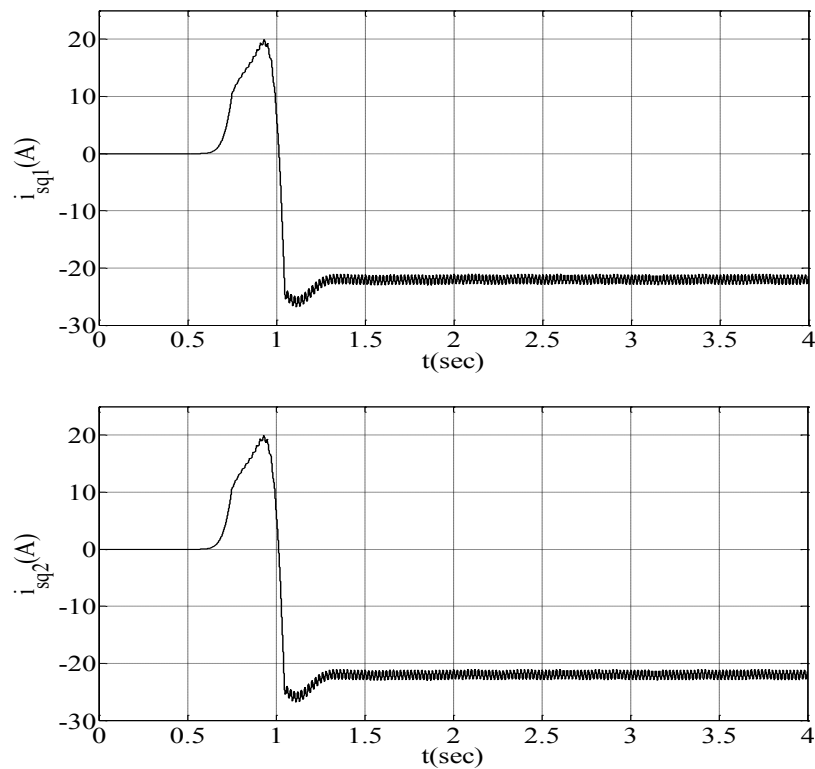
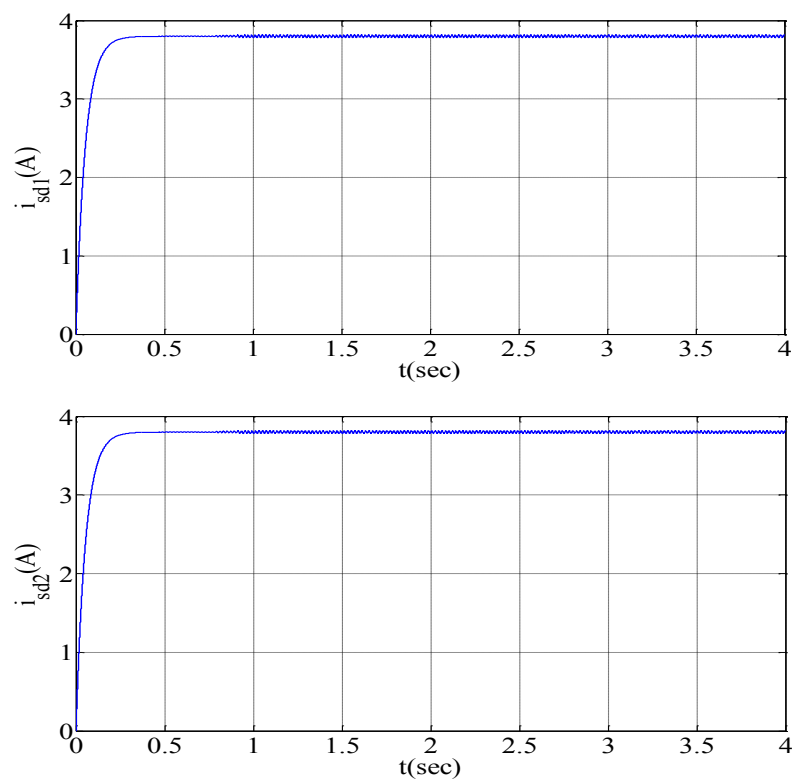
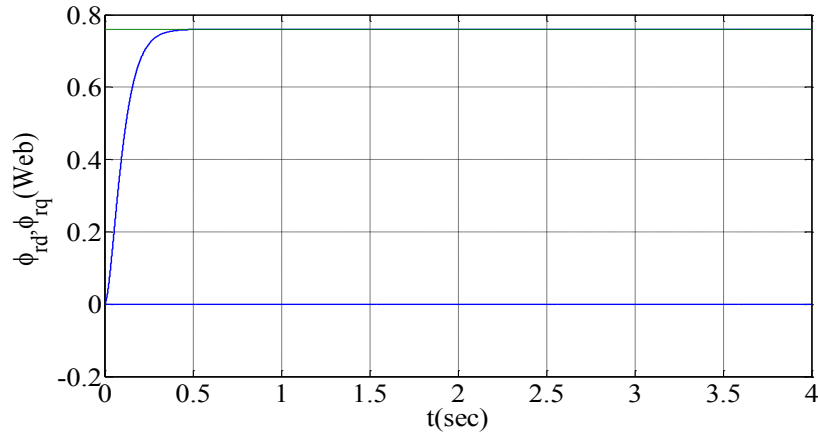


FIG. 4.2 – Tensions des bus continus V_{DC1} , V_{DC2} .

FIG. 4.3 – Courants i_{sq1} , i_{sq2} .FIG. 4.4 – Courants i_{sd1} , i_{sd2} .

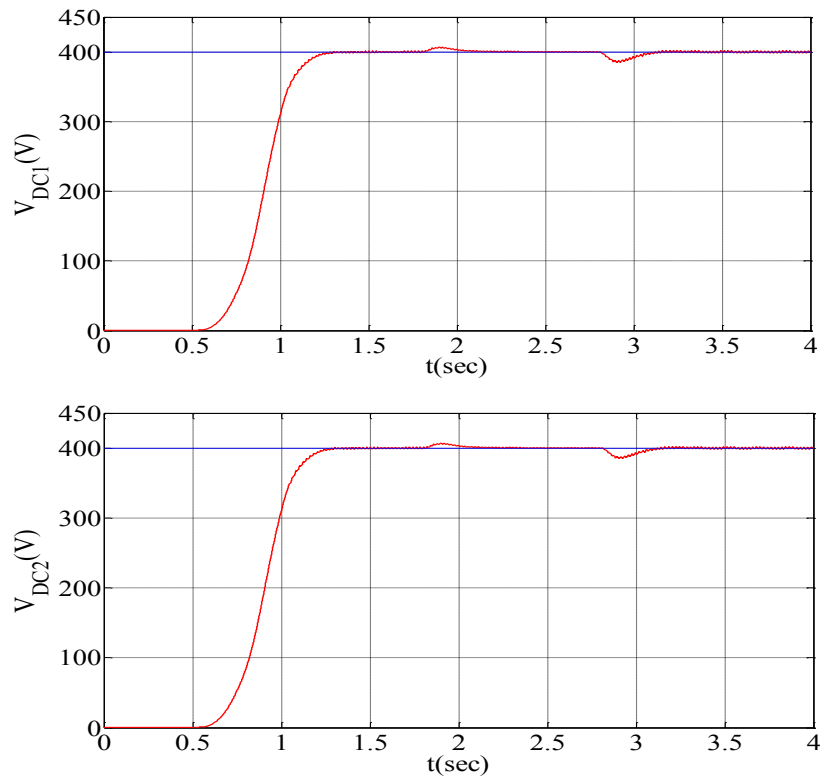
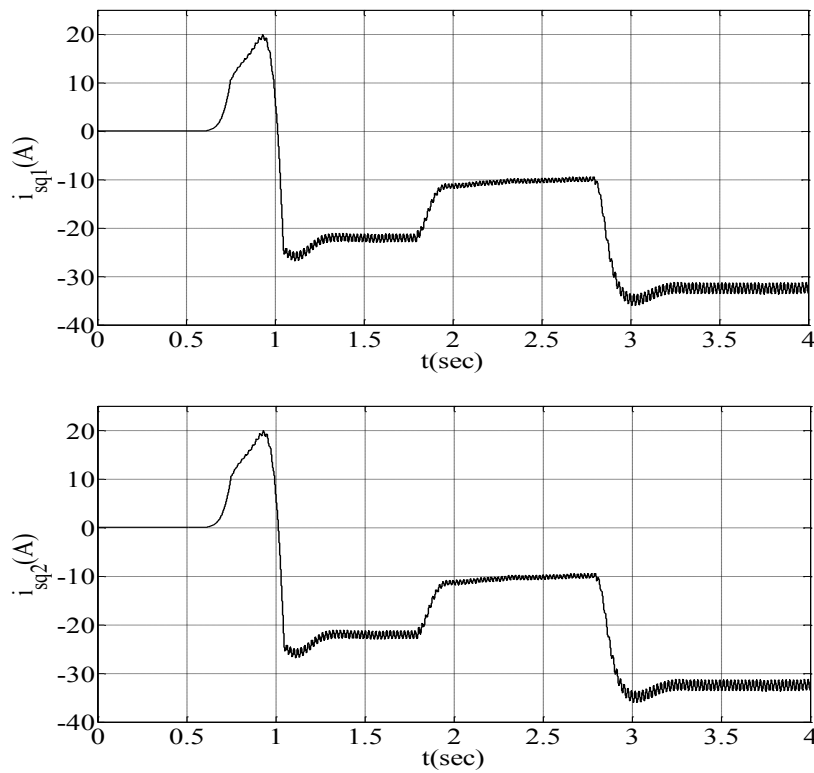
FIG. 4.5 – Flux rotorique ϕ_{rd} , ϕ_{rq} .

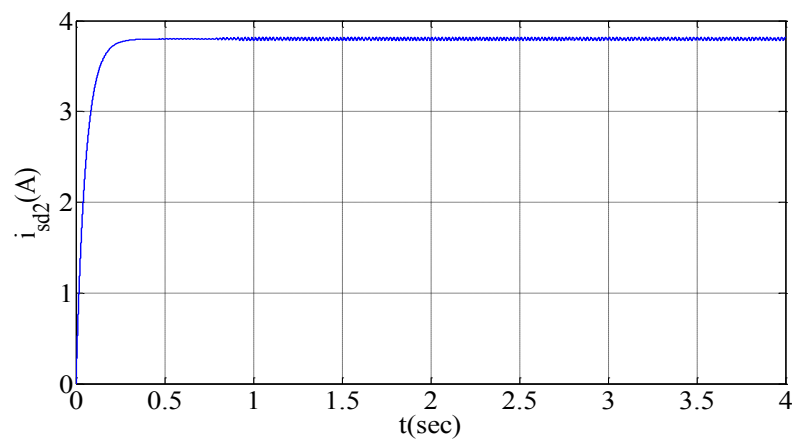
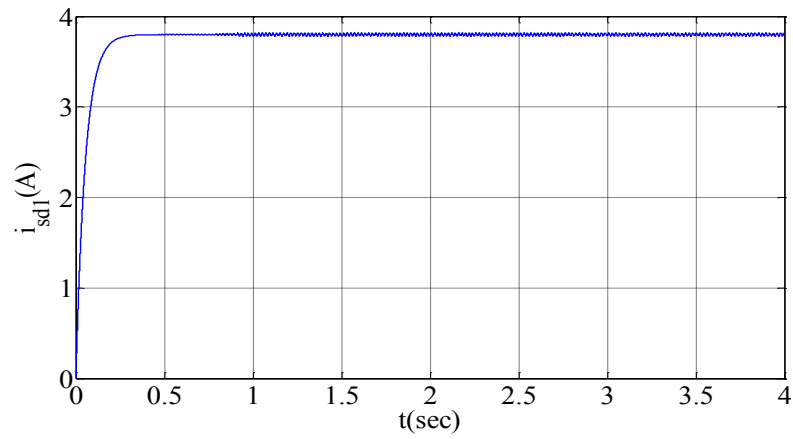
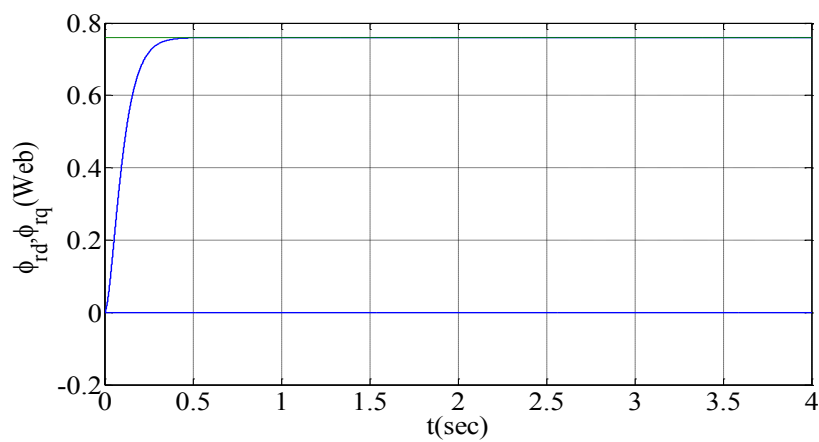
4.2.3 Essai avec variation de la vitesse d'entraînement

A l'instant $t = 4s$, on considère que la turbine éolienne impose à la *GASDE* une augmentation de la vitesse d'entraînement ω de $315rad/s$ jusqu'à $325rad/s$, alors une augmentation de puissance mécanique, ce qui engendre l'augmentation de la tension aux bornes des deux étoiles; les régulateurs interviennent, le régulateur de la puissance agit tout en diminuant le courant actif I_{sq} , alors que la tension V_{DC} reprend sa valeur de référence après un petit rejet de perturbation d'environ 2% de sa valeur de référence FIG. 4.6.

On constate d'après les FIG.4.8 et 4.9 que le flux suit la référence et l'allure du courant i_{sd} est similaire à celle du flux rotorique.

La turbine éolienne impose à la génératrice une diminution de la vitesse de rotation ω à l'instant $t = 7sec$ de $325rad/s$ jusqu'à $305rad/s$, alors il y a une diminution de la puissance mécanique, donc de la tension. Dans cette situation, le régulateur de la puissance intervient tout en augmentant le courant i_{sq} , la tension V_{DC} reprend sa valeur de référence après un rejet de perturbation d'environ 5% de sa valeur de référence.

FIG. 4.6 – Tensions des bus continus V_{DC1} , V_{DC2} en cas de variation de la vitesse.FIG. 4.7 – Courants i_{sq1} , i_{sq2} .

FIG. 4.8 – Courants i_{sd1} , i_{sd2} .FIG. 4.9 – Flux rotoriques ϕ_{rd} , ϕ_{rq} .

4.2.4 Essai avec variation de la charge

Dans cet essai, on s'intéresse aux performances de la commande vectorielle pour des variations de la charge. Lorsque la génératrice est entraînée à la vitesse du synchronisme, comme la vitesse est fixe, le flux est fixe ainsi que le courant i_{ds1} et i_{ds2} . La simulation est menée pour une charge initiale $R = 60\Omega$, pour les deux bus continus.

À l'instant $t = 2s$, la résistance du premier bus continu est augmentée à une valeur de 80Ω par contre la résistance du deuxième bus continu est atténuée à 50Ω , puis à $t = 3s$ la résistance du premier bus continu est diminuée à une valeur de 50Ω ; par contre la résistance du deuxième bus continu est augmentée à une valeur de 90Ω . Le flux rotorique régulé par les courants i_{sd1} et i_{sd2} sont insensibles aux variations de la charge. La variation de la charge affecte la valeur de la puissance demandée, directement liée aux tensions V_{DC1} et V_{DC2} et donc les composantes actives des courants statoriques i_{sq1} et i_{sq2} . On constate des dépassements avoisinants les 4% FIG. 4.10.

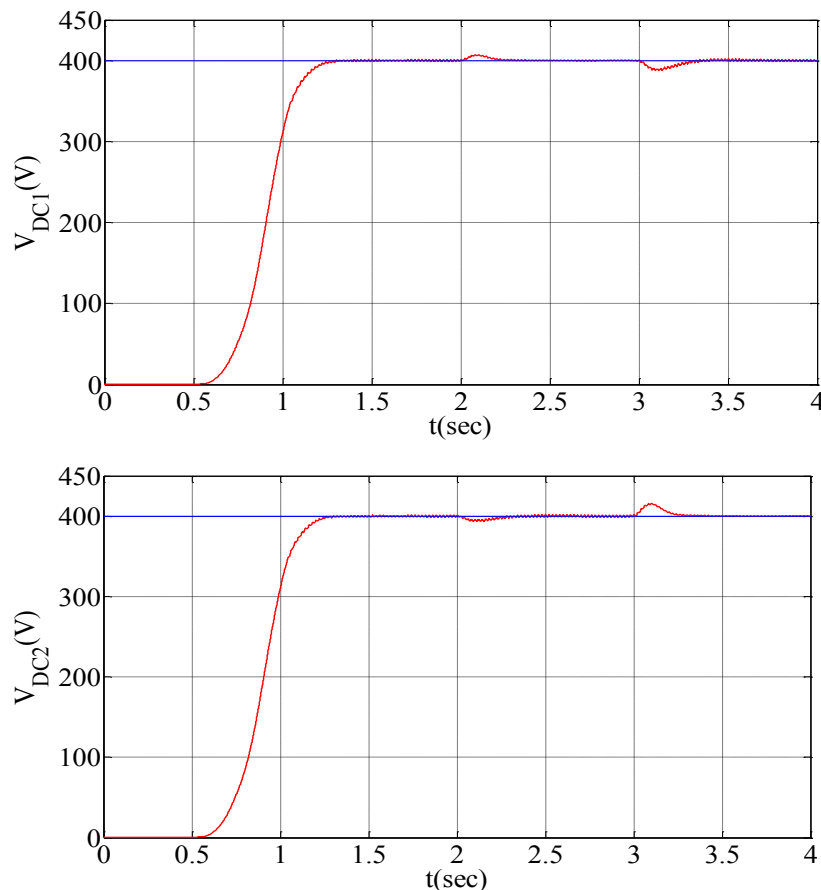
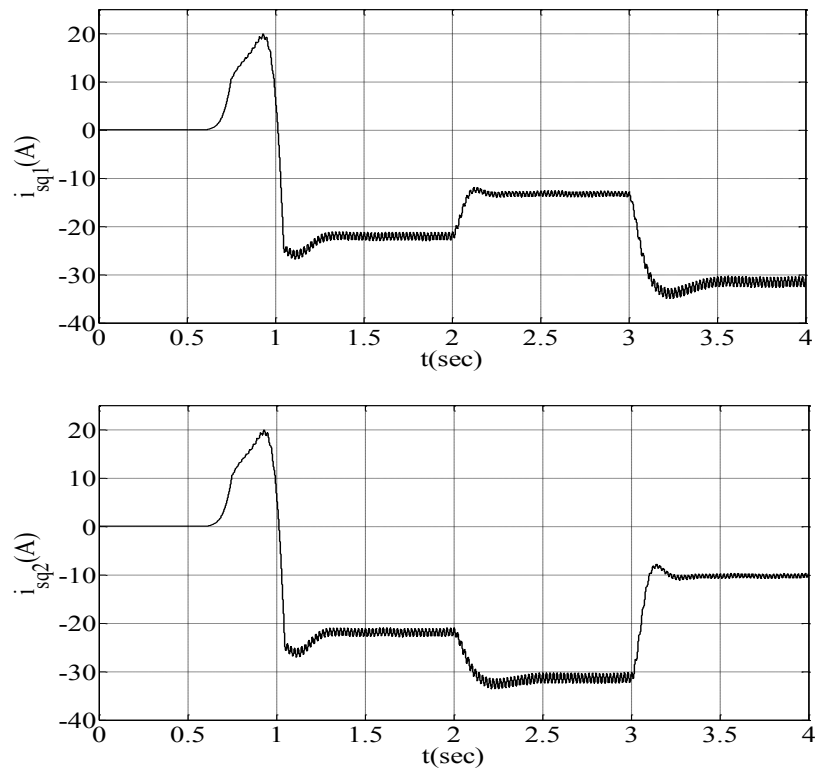
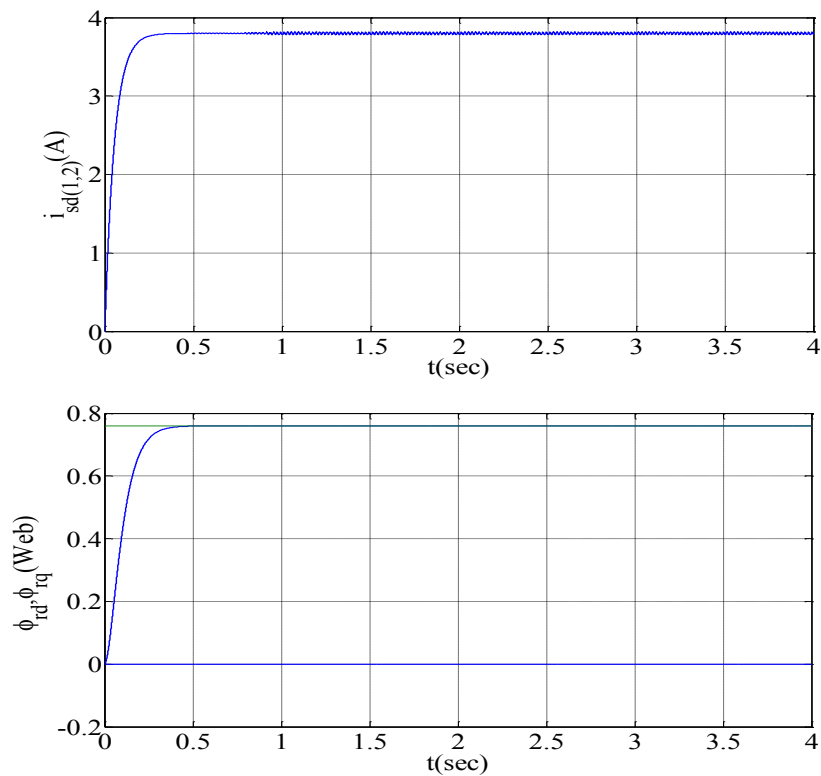


FIG. 4.10 – Tensions des bus continus V_{DC1} , V_{DC2} en cas de variation de la Charge.

FIG. 4.11 – Courants i_{sq1} , i_{sq2} .FIG. 4.12 – Flux rotoriques ϕ_{rd} , ϕ_{rq} , et les courants i_{sd1} , i_{sd2} .

4.2.5 Essai avec une résistance intermédiaire

Dans cet essai, on insère une autre résistance intermédiaire entre les deux sorties des redresseurs FIG. 4.13. Le courant dans la 3^{ème} charge est $i_{ch3} = \frac{V_{DC1} - V_{DC2}}{R_3}$ [Zhi01].

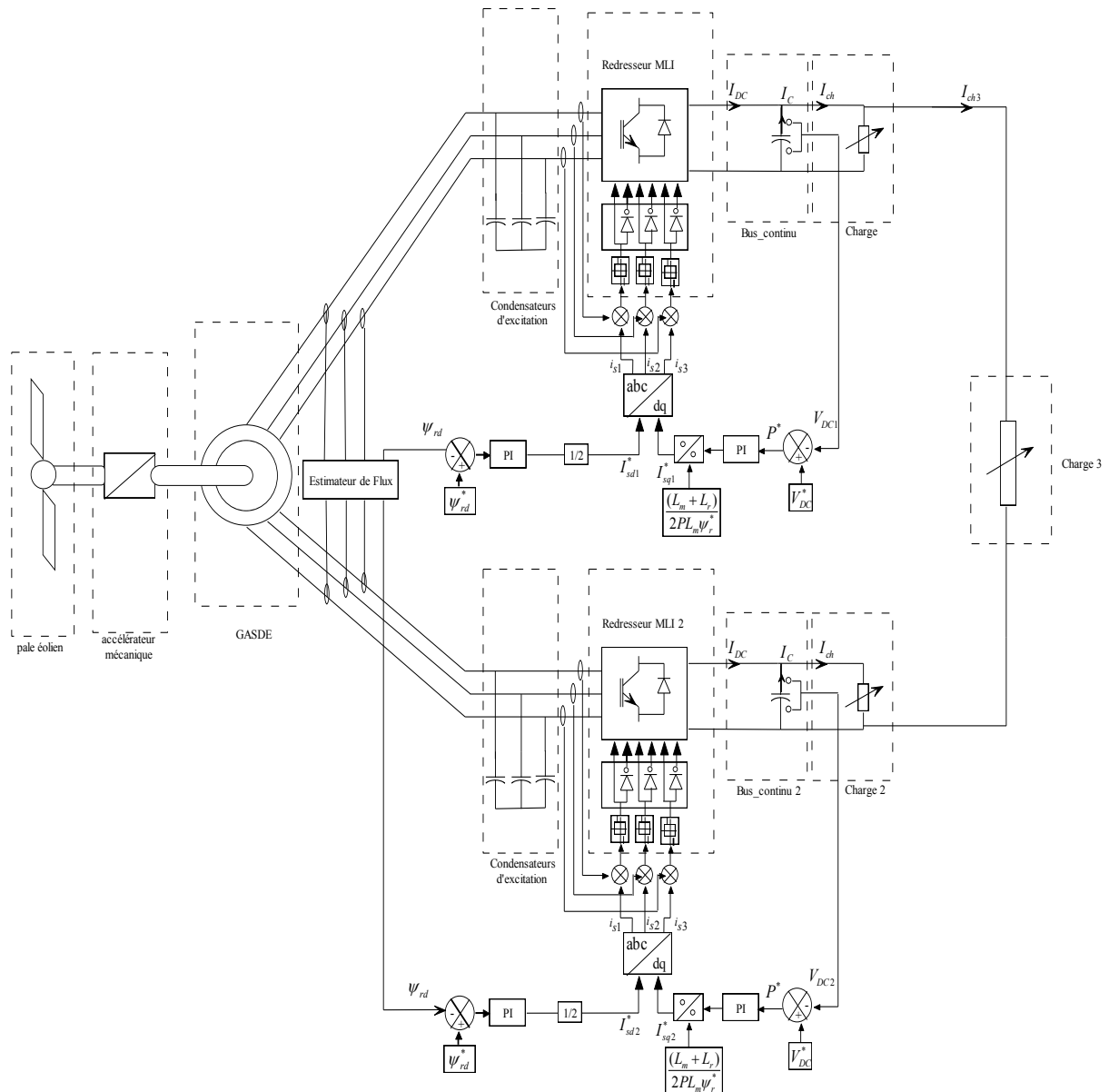


FIG. 4.13 – Algorithme de commande vectorielle de la GASDE à 2 bus continus avec une résistance intermédiaire.

Variation de la vitesse

Les résistances de charges sont fixées à 130Ω connectées à la sortie des deux redresseurs, et 200Ω pour la résistance intermédiaire. A $t = 2s$, la vitesse d'entraînement est augmentée de 315rad/s à 325rad/s , puis à l'instant $t = 3s$, elle est diminuée de 325rad/s à 305rad/s .

Les tensions continues aux bornes des deux redresseurs suivent leurs références après de petits rejets de perturbations suite aux variations de la vitesse. On constate des dépassements d'environ 4%, FIG.4.14.

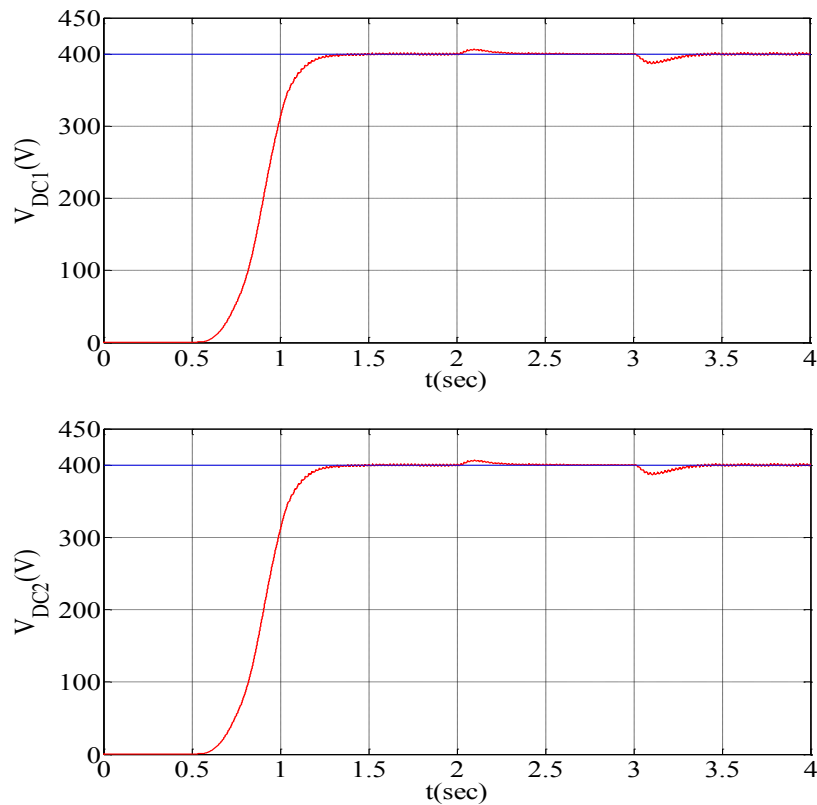


FIG. 4.14 – Tensions des bus continus V_{DC1} , V_{DC2} en cas de variation de la vitesse d'entraînement.

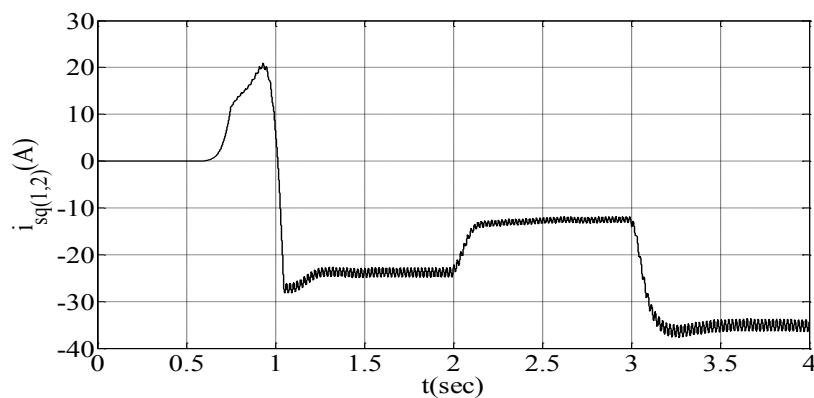


FIG. 4.15 – Courants i_{sq1} , i_{sq2} .

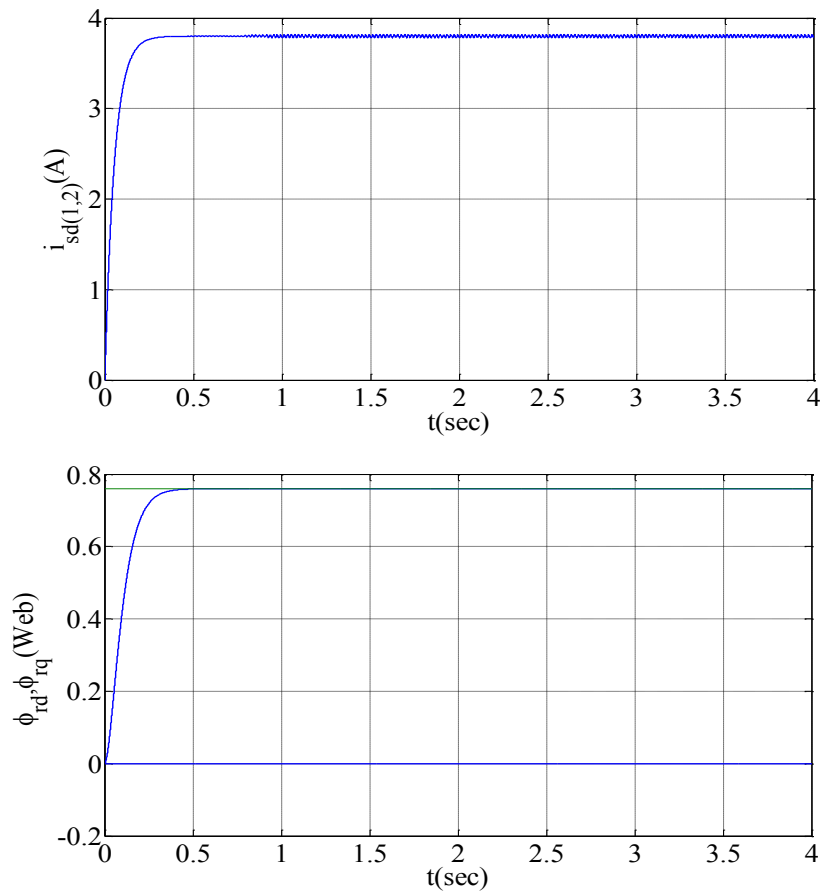


FIG. 4.16 – Flux rotoriques ϕ_{rd} , ϕ_{rq} , et les courants i_{sd1}, i_{sd2} .

Cas de Variation de la charge

La vitesse d'entraînement est fixée à 315 rad/s , à l'instant $t = 1.7 \text{ s}$, la résistance R_3 est augmentée de 200 Ohm jusqu'à 300 Ohm ; puis à $t = 2.2 \text{ s}$, la résistance du premier bus continu augmente de 130 Ohm jusqu'à 150 Ohm , et la résistance du deuxième bus continu diminue de 130 Ohm à 100 Ohm .

A l'instant $t = 2.7 \text{ s}$, la résistance du premier bus continu diminue à 100 Ohm , par contre la résistance du deuxième bus continu augmente à 150 Ohm . Enfin, à l'instant $t = 3.5 \text{ s}$, la résistance intermédiaire diminue à 200 Ohm .

Aux cours des différentes perturbations, les régulateurs interviennent pour maintenir la tension des bus continus à leurs références, tout en augmentant ou en diminuant les courants actifs, qui sont proportionnels à la puissance transmise à la charge. Des rejets de perturbation sont observés qui ne dépassent pas les 3% de la valeur de la tension de référence, FIG. 4.17.

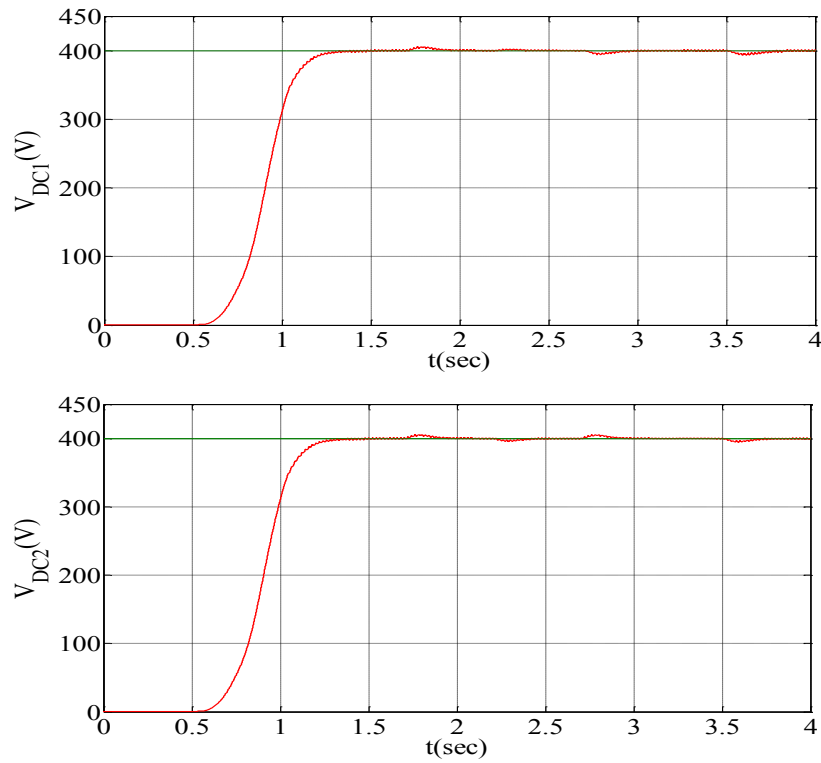


FIG. 4.17 – Tensions des bus continus V_{DC1} , V_{DC2} en cas de variation de la vitesse d'entraînement.

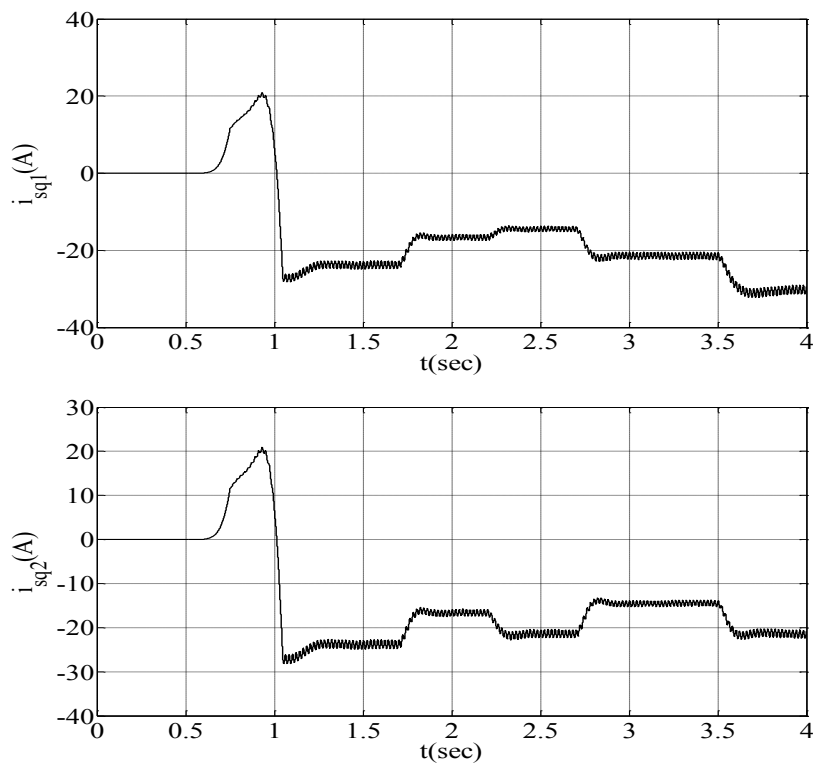


FIG. 4.18 – Courants i_{sq1} , i_{sq2} .

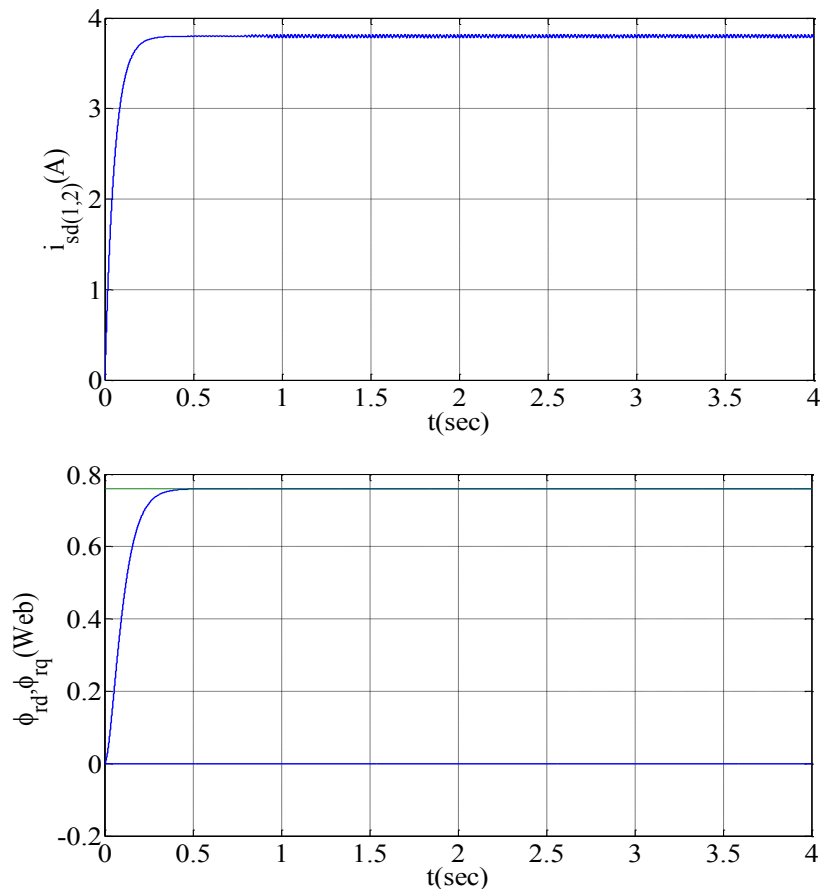


FIG. 4.19 – Flux rotoriques ϕ_{rd} , ϕ_{rq} , et les courants i_{sd1} , i_{sd2} .

4.2.6 Commande de la GASDE avec un bus continu à la sortie des deux redresseurs

Dans ce paragraphe, on s'intresse à la commande de la *GASDE* à un bus continu à la sortie des deux redresseurs. La tension de référence est de 800V [Zhi] [Zhi01].

Essai avec variation de la vitesse d'entraînement

Dans cet essai, on s'intresse aux performances de la commande en cas de variation de la vitesse d'entraînement. A l'instant $t = 2s$, la vitesse diminue de $315rad/s$ jusqu'à $300rad/s$; puis la vitesse de rotation augmente à $325rad/s$ à l'instant $t = 3s$.

On constate des rejets de perturbations de la tension de bus continu qui ne dépasse pas les 3% de sa valeur de référence, FIG. 4.21. Le flux de référence est réglé à $0.76Wb$ pour un fonctionnement semblable au régime permanent de la machine. Les courants actifs $i_{sq(1,2)}$ interviennent lorsque la vitesse change pour maintenir la tension à sa référence. Les courants $i_{sd(1,2)}$ sont de la même forme que le flux de référence FIG.4.22.

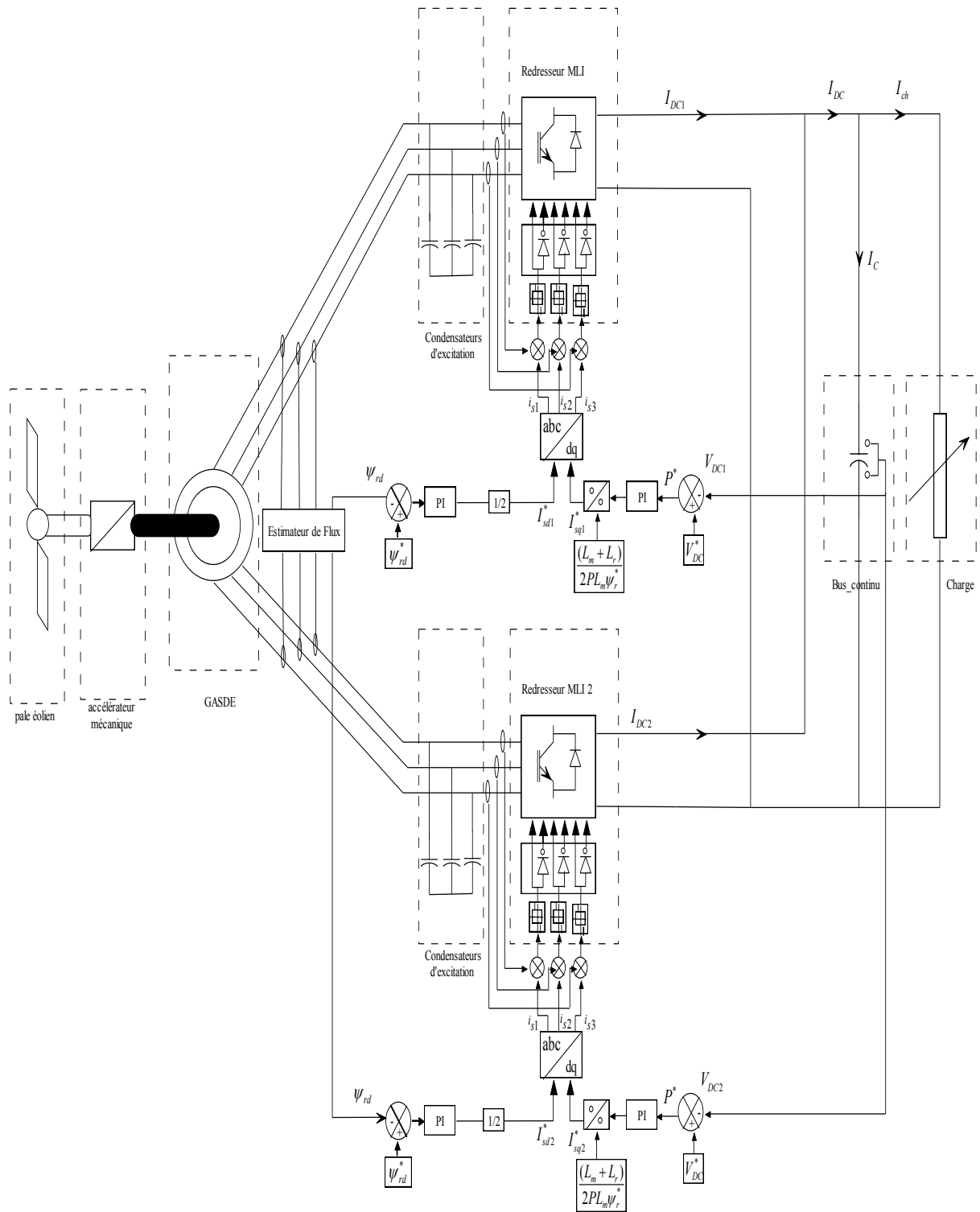


FIG. 4.20 – Algorithme de commande pour un bus continu à la sortie des deux redresseurs.

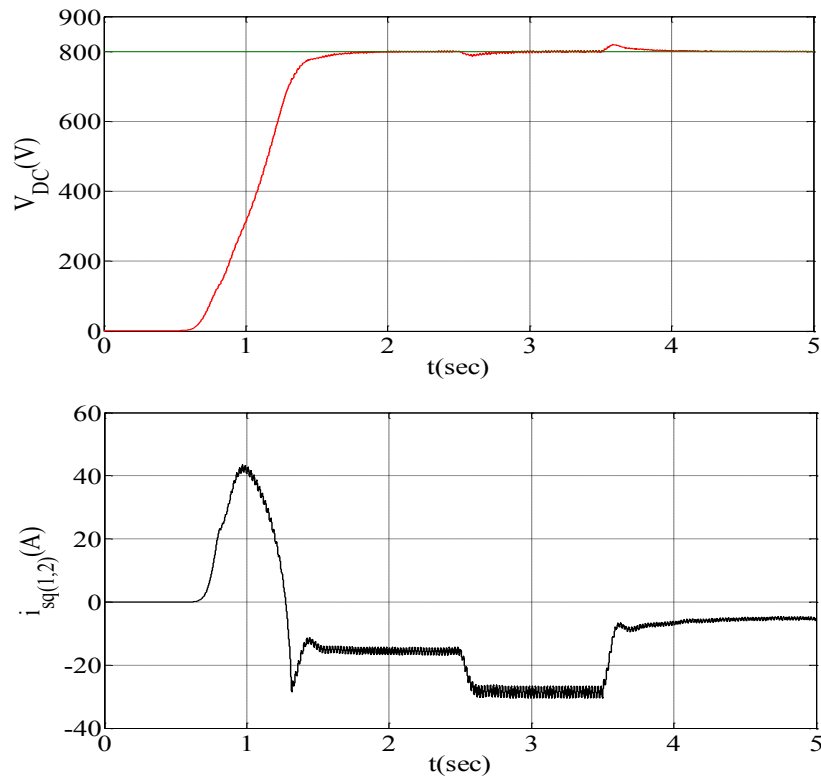


FIG. 4.21 – Tension du bus continu V_{DC} , et les Courants i_{sq1}, i_{sq2} .

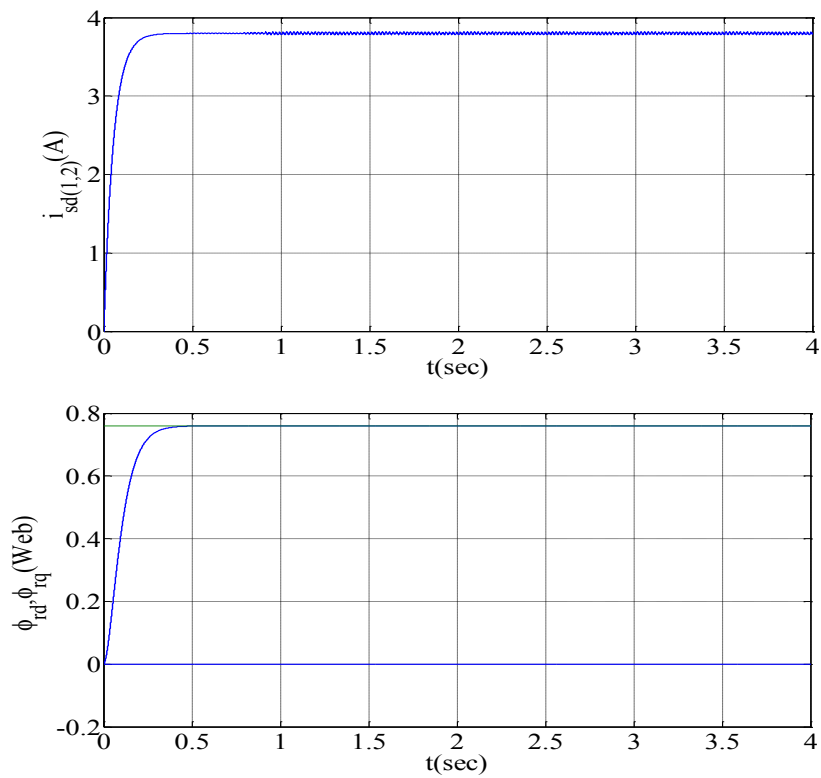


FIG. 4.22 – Flux rotoriques ϕ_{rd}, ϕ_{rq} , et les courants i_{sd1}, i_{sd2} .

Essai avec variation de la charge

A l'instant $t = 2s$, la charge est augmentée de 80Ω jusqu'à 120Ω , puis diminué à 60Ω à l'instant $t = 3.5s$. On constate une bonne réponse de la commande. Les courants actifs $i_{sq(1,2)}$ sont affectés par la variation de la charge puisque la puissance transmise à la charge est proportionnelle aux courants actifs. On constate des dépassements de moins de 4%, FIG. 4.23.

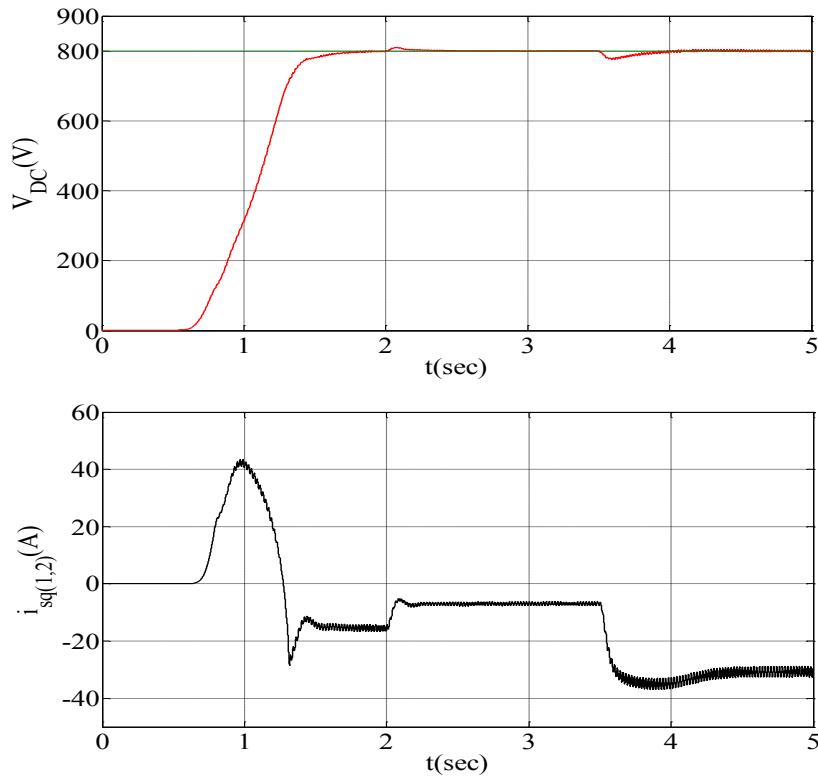


FIG. 4.23 – Tension de bus continu V_{DC} , et les Courants i_{sq1}, i_{sq2} .

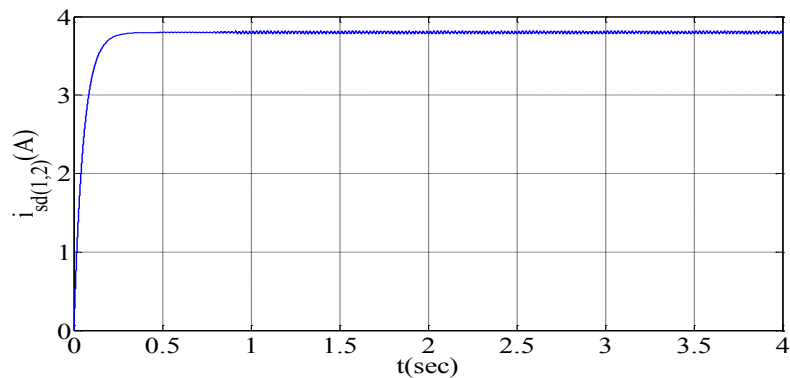
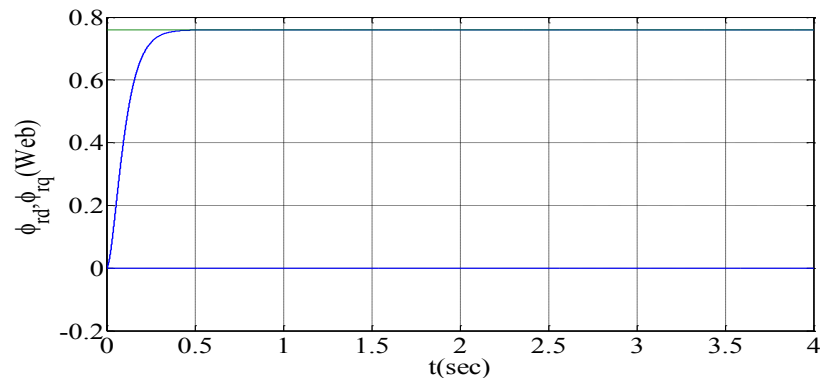


FIG. 4.24 – Les courants i_{sd1}, i_{sd2} .

FIG. 4.25 – Flux rotoriques ϕ_{rd} , ϕ_{rq} .

4.3 Conclusion

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique a été appliquée à la *GASDE* afin de maintenir la tension à la sortie du bus continu constante.

Trois algorithmes de commande sont proposés. Le premier est constitué de deux bus continus alimentant deux charges qui sont connectées à la sortie des deux étoiles de la génératrice. Une résistance est insérée en intermédiaire entre les deux résistances des deux bus continus est l'objet du deuxième algorithme de commande.

Enfin une troisième technique consiste à connecter un seul bus continu à la sortie des deux redresseurs pour alimenter une seule charge.

Tous les types de commandes ont presque les mêmes performances et la même simplicité d'implantation. La *GASDE* donne la possibilité de réaliser plusieurs techniques de commandes et de l'utiliser dans différentes applications.

Conclusion Générale

Le travail présenté a pour objectif d'étudier les performances de la génératrice asynchrone à cage simple et double étoile pour la production décentralisée de l'énergie électrique.

Dans le premier chapitre on a présenté un historique des éoliennes, leur évolution et leurs applications. Ensuite, on a présenté quelques structures de commande des génératrices asynchrones à cage raccordées au réseau, puis celles exploitées dans des sites isolées et autonomes. Enfin, pour des raisons de fiabilité, de robustesse et de prix de revient, on a étudié le système utilisant la génératrice asynchrone à cage pour la génération décentralisée de l'énergie électrique.

Une étude sur le principe de fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage, et la détermination des capacités nécessaires à son excitation a été menée. Ensuite, des modèles de la génératrice asynchrone à cage simple et double étoile dans le repère de PARK en tenant compte de la saturation ont été établis. Les modèles ont été utilisés pour étudier les performances à vide et en charge équilibrées et déséquilibrées. Enfin, des tests sur les deux types de génératrices débitant sur une charge, dans le cas des variations de la vitesse, confirment la nécessité de contrôler la tension.

Une commande vectorielle à orientation du flux rotorique a été appliquée à la génératrice asynchrone à cage connectée au redresseur à MLI et débitant sur une charge équivalente. L'objectif du système de contrôle est de maintenir la tension du bus continu constante. Différents essais sont effectués (variations de la vitesse, de la charge, variations de la vitesse et de la charge). La commande présente de bons résultats, la tension est bien contrôlée, et le flux rotorique bien orienté.

Aussi, une commande de la génératrice asynchrone à cage double étoile avec différentes structures a été effectuée. Le premier Algorithme est une génératrice asynchrone double étoile connectée aux deux redresseurs et à deux résistances équivalentes. Pour le deuxième algorithme, une résistance intermédiaire connectée entre les deux résistances équivalentes. Pour la troisième structure, les deux étoiles de la génératrice sont connectées au redresseur et à une résistance équivalente. Les différentes structures de commande ont donné un bon contrôle de la tension en présence des variations de la vitesse et de la charge.

D'après les résultats obtenus, il serait intéressant de tester les performances d'un système global associant la génératrice et les deux convertisseurs (redresseur et onduleur), la turbine, le multiplicateur afin d'être proche d'un fonctionnement réel.

Annexe A

Paramètres de la Génératrice Asynchrone à Cage

Les paramètres de la GAS utilisée sont :

| | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Tension nominale | $V_n = 415 \text{ V}$ |
| Courant nominal | $I_n = 7.8 \text{ A}$ |
| Résistance statorique | $R_{s1} = 1.7 \Omega$ |
| Résistance rotorique | $R_r = 2.7 \Omega$ |
| Inductance de fuite statorique | $l_{s1} = 0,024 \text{ H}$ |
| Inductance de fuite rotorique | $l_r = 0,023 \text{ H}$ |
| Inductance de fuite mutuelle | $l_m = 0,023 \text{ H}$ |
| Moment d'inertie | $J = 0,038 \text{ kg.m}^2$ |
| Coefficient de frottement | $K_f = 0 \text{ N.m.s/rad}$ |
| Fréquence nominale | $f = 50 \text{ Hz}$ |
| Nombre de paires de pôles | $p = 4$ |

Annexe **B**

Paramètres de la Génératrice Asynchrone Double Etoile

Les paramètres de la MASDE utilisée sont :

$b_1 = 0.1406$, $b_2 = 0.0014$, $b_3 = 0.0012$, $b_4 = 0.00005$.

| | |
|--|-----------------------------|
| Tension nominale | $V_n = 158 \text{ V}$ |
| Courant nominal | $I_n = 2 \text{ A}$ |
| Résistance du premier enroulement statorique | $R_{s1} = 1.9 \ \Omega$ |
| Résistance du deuxième enroulement statorique | $R_{s2} = 1.9 \ \Omega$ |
| Résistance rotorique | $R_r = 2.1 \ \Omega$ |
| Inductance de fuite du premier enroulement statorique | $l_{s1} = 0,0132 \text{ H}$ |
| Inductance de fuite du deuxième enroulement statorique | $l_{s2} = 0.0132 \text{ H}$ |
| Inductance de fuite rotorique | $l_r = 0,0132 \text{ H}$ |
| Inductance de fuite mutuelle | $l_m = 0,011 \text{ H}$ |
| Moment d'inertie | $J = 0,038 \text{ kg.m}^2$ |
| Coefficient de frottement | $K_f = 0 \text{ N.m.s/rad}$ |
| Fréquence nominale | $f = 50 \text{ Hz}$ |
| Nombre de paires de pôles | $p = 2$ |

Bibliographie

- [Abd] R. Abdessamed & M. Kadjoudj, *Modélisation des machines électriques*, Presses de l'Université de Batna, Batna, Algérie, 1997.
- [Abd01] L. Abdelhamid, Contribution à l'amélioration des performances des générateurs éoliens - évaluation de l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement, *Thèse de Doctorat*, Batna, 2012.
- [Ahm] T. Ahmed, O. Noro, K. Matsuo, Y. Shindo, M. Nakaoka, "Minimum excitation capacitance requirements for wind turbine coupled stand-alone self-excited induction generator with voltage regulation based on SVC," *INTELEC'03.*, The 25th International Telecommunications Energy Conference, pp.396-403, Octobre 2003.
- [Aim] S. El Aimani, Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension, *Thèse de Doctorat*, Université des Sciences et technologies de Lille1 (USTL).
- [Ami] A. Hocine, Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile, *Thèse de Doctorat*, Batna, 2012.
- [Ami01] H. Amimeur, D. Aouzellag, R. Abdessemed, K. Ghedamsi. "Sliding mode control of a dual-stator induction generator for wind energy conversion systems". *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* vol. 42, No 1, Nov.2012.
- [Arg] A. Argan, "L'énergie électrique d'origine éolienne", *RGE* 1/82, pp. 43-50, Janv.82.
- [Ben] A. Benlamoudi, R. Abdessemed. "Autonomous SEIG in a Small Wind Power Plant with Voltage and Frequency Control". *Serbian Journal of Electrical Engineering* Vol. 9, No. 3, October 2012.
- [Ber] M. Bernard, Olivier Gergaud, Hamid Ben Ahmed, Xavier Roboam, Stéphan, Astier, Brayima Dakyo, Cristian Nichita, "Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques", " *L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour l'énergies renouvelables 97-154 2002* .
- [Bhi] Bhim Singh, S. S. Murthy, and Sushma Gupta, "Analysis and design of STATCOM - based voltage regulator for self - excited induction generators", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 19, No. 4, December 2004.
- [Bou] B. Abdelmalek, Etude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique, Constantine, 2009.
- [Cam] H. Camblong, Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable, *Thèse de Doctorat*, ENSAM, 2003.

- [Elh] M.L. Elhafyani, S. Zouggar, A. Aziz, M. Benkaddour, "Conception et modélisation d'un système éolien contrôlé par un régulateur de tension", Colloque International sur les Energies Renouvelable (CER'2007), oujda, Maroc, pp. 1-5, 4-5 Mai 2007.
- [Gra] C. Grantham, D. Sutanto, B. Mismail, "Steady-state and transient analysis of self-excited induction generators," *in IEEE. Proc.*, Vol.136, Pt. B, No. 2, pp. 61-68, March 1989.
- [Had] D. Hadiouche, Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile: modélisation, alimentation et structure, *Thèse de Doctorat*, Université de Nancy I, France, 2001.
- [Hal] K. E. Hallenius, P. Vas and J. E. Brown, "The analysis of a saturated self-excited asynchronous generator," *IEEE Trans on Ener Conv.*, , vol. 6, No. 2, pp. 336-341, June 1991.
- [Hau] E. Hau, *Wind-Turbines*, Springer, 2000.
- [Idj] I. Kassa , Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des centrales Electriques Eolienne autonomes, Université Lille 1, France, Thèse de Doctorat, 2010.
- [Jac] P. Jaco, C.V. Nayar, "Power controller for a wind-turbine driven tandem induction generator", School of Electrical and Computer Engineering, pp. 599-624, 1991.
- [Jyo] S. Jyoti, O. Olorunfemi, W. Zhiqiao, "High-Performance control of a boost AC-DC PWM rectifier/Induction generator system", *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 42, No. 5, September/October 2006.
- [Lou] L. Louze, Production décentralisée de l'énergie électrique: Modélisation et contrôle d'une génératrice, *Thèse de Doctorat*, Constantine, 2010.
- [Mar] M. Cichowlas , PWM Rectifier with Active Filtering, Warsaw, Poland, Thèse de Doctorat, 2004.
- [Mat] B. Mateo, V. Dinko, "Vector control system of a self-excited induction generator including iron losses and magnetic saturation", *Control Engineering Practice* 21, pp. 395-406, 2013.
- [Mer] M. Elkhier, Amélioration des performances de régulation d'une machine double étoile par les technique de l'intelligence artificielle, *Thèse de Doctorat*, Batna, 2012.
- [Mer01] A. Merabet , Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone, université du Québec à Chicoutimi, Thèse de Doctorat, Mai 2007.
- [Mul] E. Muljadi, C.P. Butterfield, J. Sallan, M. Sanz, "Investigation of self-excited induction generators for wind turbine applications", *IEEE Trans on Indus Appl.*, Society Annual Meeting, Phoenix, October 3-7, 1999.
- [Mur] S.S Murthy, " A novel self-excited self-regulated single phase induction generator", *IEEE Trans on Indus Appl.*, vol. 8, No. 3, pp. 377-382, September, 1993.
- [Pap] Papathanassiou, S.A, Papadopoulos, M.P, " Dynamic behavior of variable speed wind turbines under stochastic wind", *IEEE Trans on Indus Appl.*, Trans. on Energy Conversion, vol. 14, No. 4, pp. 1617-1623, December 1999.
- [Sam] H. Samir, "DC bus voltage build up and control in stand-alone wind energy conversion system using direct vector control of SCIM", *Industrial Electronics, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE*, 2008.
- [Sey] D. Seyoum, C. Grantham and M. F. Rahman, "The dynamic characteristics of an isolated self-excited induction generator driven by a wind turbine," *IEEE Trans on Indus Appl.*, vol. 39, No. 4, pp. 936-944, July/August, 2003.

- [Sey01] D. Seyoum, The dynamic analysis and control of a self-excited induction generator driven by a wind turbine, *Thèse de Doctorat*, School of Electrical Engineering and Telecommunications, 2003.
- [Sin] G.K. Singh, “Modeling and experimental analysis of a self-excited six-phase induction generator for stand-alone renewable energy generation,” *Renewable energy 0960-1481 2007 Elsevier.*, doi:10.1016/j.renene.2007.08.007
- [Sin01] G.K. Singh, K. B. Yadav and R. P. Saini “Modeling and analysis of multi-phase (six phase) self-excited induction generator,” *In Proc. IEEE Conf. ICEMS’2005, The Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems.*, pp. 1922–1927, China, 2005.
- [Sin02] G. K. Singh K. B. Yadav, R. P. Saini “Analysis of a saturated multi-phase (six-phase) self-excited induction generator,” *Inter Jour of Emer Elec Pow Syst.*, vol. 7, No. 2, article. 5, pp. 1–21, 2006.
- [Wan] D. Wang, W. Ma, Y. Guo, ”Optimal design of a self-excited capacitor in a dual-stator winding induction generator”, *IET Electric Power Applications*, Vol. 3, Iss. 4, pp. 334-342, 2009.
- [Yog] Yogesh K. Chauhan, Sanjay K. Jain, Bhim Singh ”Performances of self-excited induction generator with costeffective static compensator,” *Maejo Int. J. Sci. Technol.* 6(01), pp. 12-27, 2012.
- [Zhi] W. Zhiqiao, An investigation of dual stator winding induction machines, *Thèse de Doctorat*, The faculty of the Graduate School, Tennessee Technological University, 2006.
- [Zhi01] W. Zhiqiao, O. Olorunfemi, S. Jyoti, ”High-Performance control of a dual stator winding DC power induction generator”, *IEEE transactions on industry applications*, Vol. 43, No. 2, March/April 2007.