
Remerciement

Je remercie Dieu de m'avoir donné la force d'accomplir ce travail.

Je remercie également mon promoteur, M. Merabet Elkheir, pour son soutien et ses conseils tout au long de ce projet. Je tiens également à exprimer ma sincère gratitude envers M. Mourad Hamimid pour son assistance et ses conseils dans ce travail, ainsi que pour sa patience et sa gentillesse à notre égard.

Je souhaite également remercier toutes les personnes qui ont contribué de quelque manière que ce soit à l'élaboration de ce mémoire.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers les membres du jury qui auront l'honneur de juger ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire à :

A mon cher père, symbole de courage, qu'il a donné sa vie pour mon bien-être.

A ma chère maman qui m'a soutenu et encouragé dans ma vie

À mon cher oncle, la personne inspirante, motivante et encourageante.

A mes chères sœurs

A mes chers frères

A ma belle famille

A Tous mes amis et tous ceux que j'ai connus pendant mes études universitaire.

Table des matières

<i>Symboles & Abréviations</i>	1
<i>Introduction générale</i>	3
<i>Chapitre 1</i>	5
<i>Étude d'une turbine aérogénérateur</i>	5
<i>1.1 Introduction</i>	6
<i>1.2 Historique</i>	6
<i>1.3 Définition de l'énergie éolienne</i>	7
<i>1.4 Statistique de production de l'éolienne</i>	8
<i>1.5 Production de l'éolienne dans l'Algérie</i>	9
<i>1.6 Description du système énergétique éolienne</i>	10
1.6.1 Constitution	10
a) La Tour	11
b) La nacelle	11
b.1) L'arbre lent	11
b.2) Multiplicateur	11
b.3) Système de refroidissement	12
b.4) Générateur	12
b.5) Anémomètre	12
b.6) Système de Contrôle-Commande	12
c) Rotor et pales	12
d) Le Moyeu	13
1.7 Principe de fonctionnement de l'éolienne	13
1.8 Taille des aérogénérateurs	14
1.9 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :	14
1.9.1 Les avantages	14
1.9.2 Inconvénients	14
1.10 Applications de l'énergie éolienne	15
1.11 Les différents types des turbines éoliennes	15
1.11.1 L'éolienne à axe vertical	15
1.11.2 L'éolienne a axe horizontal	15
1.12 Les avantages et inconvénients des axes	16
1.12.1 Les avantages de l'éolienne à axe horizontal	16

1.12.2	Les inconvénients de l'éolienne à axe horizontal	16
1.12.3	Les avantages de l'éolienne à axe vertical.....	17
1.12.4	Les inconvénients de l'éolienne à axe vertical.....	17
1.13	Chaîne de conversion de l'énergie éolienne	17
1.14	Modélisation de la turbine éolienne	17
1.15	Modélisation de multiplicateur de vitesse	19
1.16	Modélisation de l'arbre mécanique.....	19
1.17	Simulation de la turbine	20
1.18	Interprétations des résultats	21
Chapitre 2.....		22
Modélisation et simulation de la GASDE auto-excité.....		22
2.1	<i>Introduction</i>	23
2.2	<i>Histoire des machines électriques</i>	23
2.3	<i>Description de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE).....</i>	24
2.4	<i>Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile.....</i>	25
2.5	<i>Phénomène d'auto-amorçage</i>	25
2.6	<i>Les machines électrique utilisés dans un système éolien</i>	26
2.7	<i>Les Avantages des Machines asynchrones doubles étoiles</i>	27
2.7.1	<i>Segmentation de puissance</i>	27
2.7.2	<i>Amélioration de la fiabilité</i>	27
2.7.3	<i>Minimisation des ondulations des courants et du couple</i>	28
2.8	<i>Inconvénients des machines asynchrone double étoile.....</i>	28
2.9	<i>Modélisation de la génératrice asynchrone double étoile</i>	28
2.10	<i>Modèle biphasé de la GASDE dans le référentiel généralisé</i>	29
	• Équations des tensions.....	30
	• Équations des flux	30
2.11	<i>Modélisation de l'auto-amorçage</i>	31
2.12	<i>Mise sous forme d'équation d'état</i>	32
2.13	<i>Simulation et interprétations des résultats</i>	33
	• Fonctionnement à vide	33
2.14	<i>Discussion des résultats</i>	36
2.15	<i>Influence des capacités sur la forme de la tension</i>	36
2.16	<i>Discussion des résultats</i>	42

<i>2.17 Influence de la vitesse d'entraînement sur la forme de la tension</i>	<i>43</i>
<i>2.18 Discussion des résultats</i>	<i>44</i>
<i>Conclusion</i>	<i>44</i>
<i>Chapitre 3.....</i>	<i>45</i>
<i>Étude la fonction de couplage de la turbine avec GASDE.....</i>	<i>45</i>
<i>3.1 Introduction</i>	<i>45</i>
<i>3.2 Conditions de couplage aux réseaux</i>	<i>45</i>
<i>3.3 Conditions de couplages mécaniques</i>	<i>46</i>
<i>3.4 Descriptions de système</i>	<i>46</i>
<i>3.5 Les principales machines utilisées dans un système éolien sont</i>	<i>48</i>
<i>3.6 Simulation du système (turbine avec GASDE).....</i>	<i>49</i>
<i>3.7 Interprétation des résultats</i>	<i>52</i>
<i>Conclusion</i>	<i>52</i>
<i>Conclusion générale</i>	<i>54</i>
<i>Annexe</i>	<i>55</i>
<i>Bibliographie.....</i>	<i>56</i>

Symboles & Abréviations

MASDE	Machine asynchrone Double Etoile.
GASDE	Génératrice Asynchrone Double Etoile.
i	Le courant.
v	La tension.
$s1, s2, r$	Les indices correspondants à l'étoile 1, l'étoile 2 et au rotor.
$as1, bs1, cs1$	Les indices correspondants aux trois phases du stator 1.
$as2, bs2, cs2$	Les indices correspondants aux trois phases du stator 2.
ar, br, cr	Les indices correspondants aux trois phases du rotor.
$Rs1, Rs2, Rr$	Les résistances statoriques et rotorique.
$Ls1, Ls2, Lr$	Les inductances propres des étoiles statoriques et du rotorique.
Lms	L'inductance mutuelle entre phases statoriques.
Lmr	L'inductance mutuelle entre phases rotoriques.
Cem	Le couple électromagnétique.
Kf	Le coefficient de frottement.
J	Le moment d'inertie.
d, q	Les axes directs et quadratiques du repère de Park.
θ_m, Ω_m	La position et la vitesse mécanique du rotor.
ω_r	La pulsation électrique rotorique.
ω_s	La pulsation électrique statorique.
ω_{coor}	La vitesse angulaire des axes (d, q).
φ_r	Le flux rotorique.
I_m	Le courant de magnétisation de la GASDE.
$CemG$	Le couple électromagnétique de la génératrice.
G	Gain de multiplicateur.
J	Inerties de la turbine.
Cem	Couple électromagnétique Produit par la génératrice
$Cvis$	Des frottements visqueux
f_m	Coefficient de frottement de la machine.
C_{mec}	Couple mécanique
λ	La vitesse réduite

Ω_{turbine}	La vitesse de la turbine
β	L'angle de l'orientation des pales.
ρ	Densité de l'air
R	Rayon de l'éolienne
S	Surface circulaire balayée par la turbine
v	Vitesse du vent.
P _v	La puissance de vent
P _{aer}	La puissance aérogénérateur
CP	Le coefficient de puissance

Introduction générale

La demande énergétique croissante et l'épuisement des réserves de combustibles fossiles, qui entraînent des émissions élevées de gaz à effet de serre et des prix volatils, ont incité les individus à rechercher des sources d'énergie abondantes et abordables. Parmi les options propres et renouvelables, l'énergie géothermique, la biomasse, l'énergie solaire et l'énergie éolienne ont suscité un intérêt croissant de la part des chercheurs et des scientifiques pour diversifier les ressources énergétiques à long terme. L'énergie éolienne, en particulier, a connu une croissance remarquable récemment et est considérée comme une solution écologique majeure pour la production d'électricité en raison de son approvisionnement illimité et de ses avantages significatifs.

Au fil des siècles, divers types d'éoliennes ont été développés et sont aujourd'hui utilisés dans de nombreuses applications, comme l'éclairage et le pompage. Lorsqu'il s'agit de convertir l'énergie éolienne en énergie électrique, les machines asynchrones à courant alternatif sont privilégiées. Pourquoi ce choix particulier ? [1].

La réponse réside dans le rôle essentiel joué par les machines à courant alternatif dans la production d'énergie électrique et les entraînements électriques. Elles ont progressivement remplacé les machines à courant continu en raison de leur simplicité de construction et de leur fonctionnement fiable. Les machines asynchrones sont principalement utilisées en tant que moteurs, tandis que les machines synchrones sont généralement préférées en tant que générateurs.

Cependant, les avancées récentes dans le domaine des énergies renouvelables ont conduit à l'introduction des machines asynchrones en tant que générateurs, notamment pour les éoliennes. Cette décision est motivée par les nombreux avantages offerts par les machines asynchrones, notamment l'absence de collecteur mécanique. Cette caractéristique élimine la nécessité d'un entretien fréquent et réduit les coûts de maintenance, ce qui en fait une solution pratique et économique pour la production d'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne.

L'augmentation de la demande en énergie électrique et des applications à forte puissance a entraîné l'utilisation de machines multi-phasées, comprenant plus de trois phases, pour une meilleure segmentation de la puissance. En plus de cette segmentation de puissance sans augmentation des courants par phase, les machines multi-phasées présentent d'autres avantages notables, tels que la réduction des pertes fer. Elles sont largement utilisées dans de nombreux domaines, y compris la production d'énergie éolienne.

Les machines asynchrones se distinguent particulièrement dans ce contexte, offrant des avantages significatifs en termes de coût et de robustesse par rapport aux machines synchrones. Leur construction plus simple et l'absence de collecteur mécanique permettent de réduire les coûts de fabrication, d'entretien et de réparation. De plus, elles sont généralement plus résistantes et moins sensibles aux variations de charges et aux conditions environnementales.

Ainsi, les machines asynchrones sont devenues un choix privilégié dans le domaine de la production d'énergie éolienne et d'autres applications nécessitant une segmentation de puissance efficace. Leur combinaison d'avantages techniques, économiques et de robustesse en fait une solution attrayante pour répondre aux exigences croissantes en matière d'énergie électrique.

Nous avons structuré notre mémoire de fin d'étude en trois principaux chapitres pour aborder les différents aspects de notre travail.

Dans le premier chapitre, nous mettons en évidence l'importance de l'énergie éolienne en expliquant son origine et en soulignant ses avantages et ses risques. Nous présentons également des statistiques mondiales sur cette forme d'énergie et nous procédons à la simulation d'une turbine éolienne pour analyser les résultats obtenus.

Le deuxième chapitre est consacré à la génératrice asynchrone double étoile. Nous décrivons son fonctionnement et soulignons son rôle crucial dans la conversion de l'énergie mécanique en électricité. Nous travaillons sur la modélisation et la simulation de cette génératrice, et nous analysons les résultats obtenus.

Dans le troisième chapitre, nous abordons l'intégration de la turbine éolienne avec le générateur asynchrone double étoile. Nous discutons des conditions de couplage entre les deux composants et nous procédons à une simulation du système complet. Nous analysons ensuite les résultats obtenus de cette simulation.

Chapitre 1

Étude d'une turbine aérogénérateur

1.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont considérées comme la solution d'avenir la plus performante pour répondre de manière durable aux besoins énergétiques mondiaux. Comparées aux autres sources d'énergie telles que les énergies fossiles et nucléaires, elles offrent de nombreux avantages tels que la pureté, la durabilité et le faible coût. Parmi ces sources d'énergie renouvelables, l'énergie éolienne joue un rôle crucial. L'énergie éolienne est obtenue grâce à la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Dans ce premier chapitre, nous allons donner une définition précise de l'énergie éolienne, ainsi qu'une brève introduction sur son histoire.

Des statistiques seront également présentées pour illustrer l'évolution de la production éolienne à travers le monde et en Algérie en particulier. Nous allons également expliquer son fonctionnement, en mettant en évidence ses avantages et inconvénients.

L'un des facteurs clés de l'énergie éolienne est le nombre de pales des éoliennes. Nous aborderons donc l'effet du nombre de pales sur l'efficacité et les performances des turbines éoliennes. De plus, nous explorerons la simulation des turbines éoliennes et interpréterons les résultats obtenus à partir de ces simulations.

1.2 Historique

L'homme a pris conscience de l'énergie éolienne dès 2000 av. J.-C., lorsqu'elle a été utilisée pour propulser des navires. Environ 400 av. J.-C., l'hydroélectricité a été utilisée pour la première fois en Inde, et la civilisation babylonienne l'a également expérimentée vers 1700 av. J.-C. Avec l'avènement de l'électricité, Paul Lacour a eu l'idée novatrice de combiner une éolienne avec un générateur en 1891, redécouvrant ainsi le potentiel de l'énergie éolienne.

La technologie éolienne a connu des améliorations significatives grâce aux ingénieurs danois, en particulier pendant les premières et deuxièmes guerres mondiales. Toutefois, c'est surtout à la suite de la crise pétrolière de 1974 que des recherches approfondies et des expérimentations ont été relancées. Des pays comme le Danemark, qui ont fait le choix de ne pas développer l'énergie nucléaire, ont alors commencé à se tourner vers l'énergie éolienne. [2]

Au cours des dernières années, plusieurs pays européens tels que l'Allemagne, l'Espagne, le Danemark et la France ont lancé des programmes nationaux visant à améliorer l'utilisation de l'énergie éolienne dans la production d'électricité. Cette dynamique a donné lieu à la conception de nouveaux modèles d'éoliennes, revitalisant ainsi un marché qui était auparavant stagnant.

Il est important de souligner que la vitesse de développement des éoliennes n'a cessé d'augmenter ces dernières années. [3]

1.3 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une forme d'énergie produite par la force du vent. Historiquement, elle a été utilisée pour propulser les bateaux, moulinier les grains et pomper l'eau dans les moulins. Cependant, de nos jours, le vent est exploité comme source d'énergie dans de nombreuses autres applications.

Dans le domaine des sports nautiques, tels que la voile, la planche à voile et le kitesurf, l'énergie éolienne continue d'être utilisée comme moyen de propulsion.

En ce qui concerne la production d'électricité, l'énergie éolienne est utilisée pour faire tourner les pales d'une éolienne. L'énergie mécanique générée par le mouvement des pales est ensuite convertie en électricité grâce à un générateur. Ce processus permet de produire de l'électricité propre et renouvelable.

Outre la production d'électricité, l'énergie éolienne peut être exploitée à d'autres fins en fonction des besoins. Par exemple, elle peut être utilisée pour alimenter des systèmes de transport, moulinier des grains ou encore fournir de l'énergie à des équipements spécifiques.

Ainsi, l'énergie éolienne présente un large éventail d'applications, allant du domaine des sports nautiques à la production d'électricité et à d'autres utilisations spécifiques selon les besoins. [4]

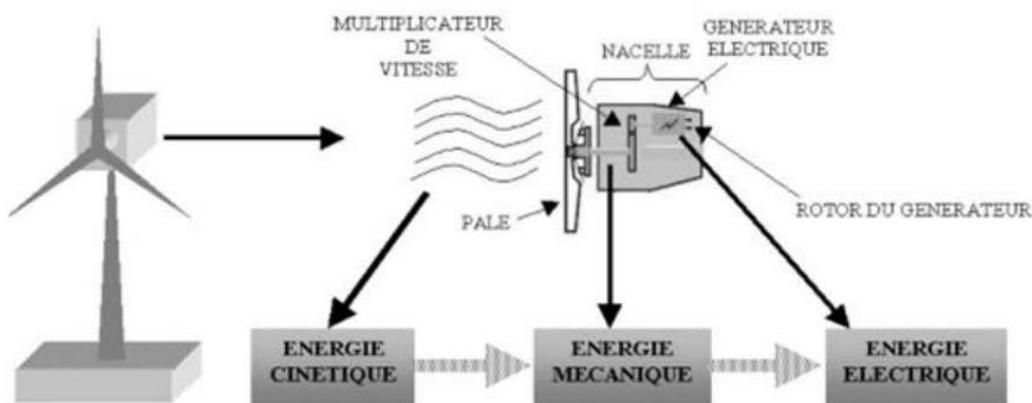


Figure 1.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.[4]

1.4 Statistique de production de l'éolienne

Selon les statistiques récemment publiées par la World Wind Energy Association (WWEA), la capacité mondiale de production d'énergie éolienne a connu une croissance exceptionnelle de 97,3 gigawatts (GW) en 2021. Cette augmentation record fait suite à une hausse de 92,7 GW en 2020, témoignant d'une dynamique stimulante pour le secteur. La capacité totale cumulée de toutes les éoliennes en fonctionnement à travers le monde dépasse désormais les 840 gigawatts, ce qui représente plus de 7 % de la consommation mondiale d'électricité.

Depuis 2014, le secteur de l'énergie éolienne affiche une croissance durable, mais cette tendance doit être accélérée en raison de la situation en Ukraine. Les gouvernements se tournent de plus en plus vers des sources d'énergie renouvelables et locales, offrant une solution abordable tout en garantissant l'indépendance énergétique.

En plus de contribuer à la transition vers des énergies plus propres, le secteur éolien joue un rôle essentiel dans la lutte contre le changement climatique. Selon le Conseil mondial de l'énergie éolienne, il permet d'éviter chaque année l'émission de 1,1 milliard de tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, soit l'équivalent des émissions annuelles de l'Amérique du Nord.

La Chine se positionne en tête en termes de production d'énergie éolienne, ayant installé à elle seule 55,8 GW de nouvelles capacités éoliennes en 2021. Ce chiffre représente plus de la moitié des nouvelles installations mondiales et dépasse même le record précédent de 52 GW enregistré en 2020, soit une croissance de 19,4 %. Aujourd'hui, la Chine compte une capacité totale de production éolienne de 344 GW, représentant environ 40 % du parc mondial.

Les États-Unis se classent au deuxième rang mondial du secteur de l'énergie éolienne, avec une capacité installée approchant les 135 GW (soit 16 % du parc éolien mondial). Le parc éolien allemand occupe la troisième position en termes de capacité cumulée, avec 64 GW, suivi de l'Inde avec 40 GW et de l'Espagne avec 28 GW.

Ces données témoignent de la croissance continue du secteur de l'énergie éolienne à travers le monde, avec des pays comme la Chine, les États-Unis et l'Allemagne en tête de file. Cela démontre également l'engagement mondial croissant en faveur des énergies renouvelables pour répondre aux besoins énergétiques tout en luttant contre le changement climatique. [5]

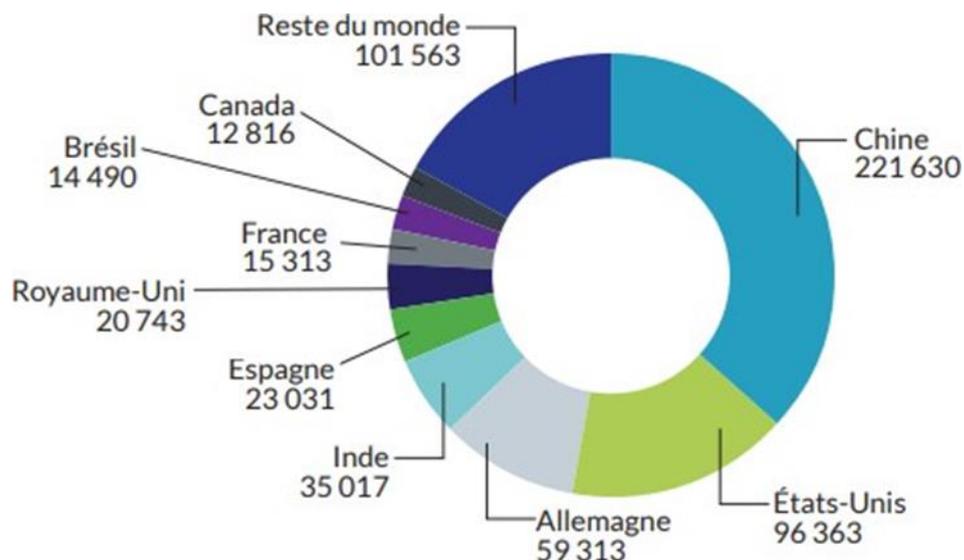


Figure 1.2 : Association mondiale de l'énergie éolienne (WWEA), données de (2018).

1.5 Production de l'éolienne dans l'Algérie

En Algérie, les premières tentatives de raccordement au réseau électrique à partir de l'énergie éolienne remontent à 1957, avec l'installation d'une éolienne de 100 kW. Le premier prototype, conçu par l'ingénieur français Andrew, a été initialement installé à St-Alban au Royaume-Uni, puis démantelé et transporté en Algérie. Cette éolienne pneumatique à deux pales mesurait 30 mètres de hauteur et 25 mètres de diamètre. Par la suite, plusieurs éoliennes de puissance plus faible ont été installées dans divers endroits du pays, notamment pour fournir de l'électricité aux zones isolées ou difficiles d'accès, comme les installations de relais de télécommunications. Cependant, ces premiers projets n'ont pas toujours été couronnés de succès en raison des limites technologiques de l'époque, ce qui est également un défi rencontré au niveau international.

Le premier parc éolien en Algérie d'une capacité de 10 MW a été installé à Adrar et mis en service en juin 2014. L'électricité produite par ce parc est injectée dans le réseau local et tarifée. La pénétration de l'énergie éolienne en Algérie est estimée à environ 5 %, ce qui est encore relativement faible. Toutefois, le ministère de l'Énergie et des Mines a prévu un programme ambitieux pour développer les énergies renouvelables, y compris l'énergie éolienne. Il est prévu d'installer d'autres parcs éoliens d'une capacité totale de 1000 MW à moyen terme (2015-2020), dans le but d'atteindre une capacité de 5010 MW d'ici 2030. Ce programme vise notamment à fournir de l'électricité aux communes isolées du pays.

L'Algérie reconnaît l'importance des énergies renouvelables pour garantir sa sécurité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre. En investissant dans le développement de l'énergie

éolienne, le pays cherche à diversifier son mix énergétique et à exploiter son important potentiel éolien. Les régions côtières et les hauts plateaux du pays offrent des conditions favorables pour l'exploitation de l'énergie éolienne.

Le développement de l'énergie éolienne en Algérie nécessite des investissements importants dans les infrastructures, la recherche et le développement, ainsi que des politiques incitatives et un cadre réglementaire favorable. Cependant, avec son engagement en faveur des énergies renouvelables et un potentiel éolien prometteur, l'Algérie a l'opportunité de devenir un acteur majeur de la transition énergétique dans la région. [6]

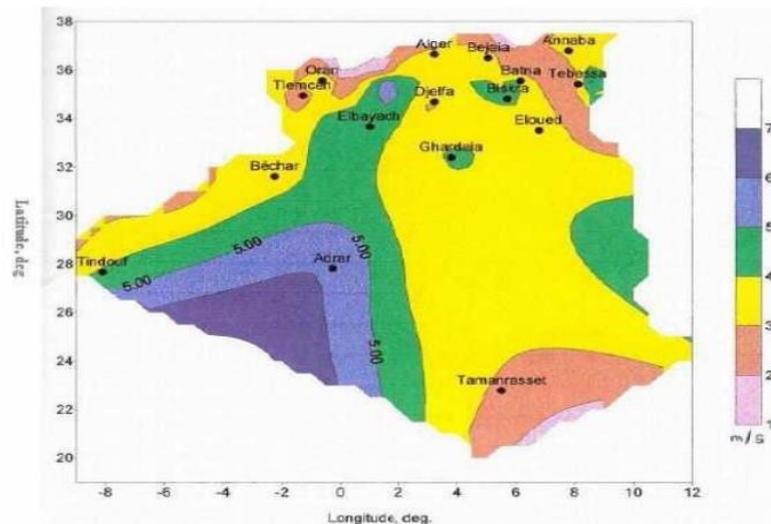


Figure 1.3 : Carte du potentiel éolien en Algérie. [6]

1.6 Description du système énergétique éolienne

1.6.1 Constitution

Les turbines à axe horizontal sont les plus largement utilisées dans le monde en raison de leur efficacité éprouvée. Elles se composent d'une tour robuste sur laquelle est montée la nacelle, contenant les composants essentiels du système éolien. La figure ci-dessous illustre cette configuration typique.

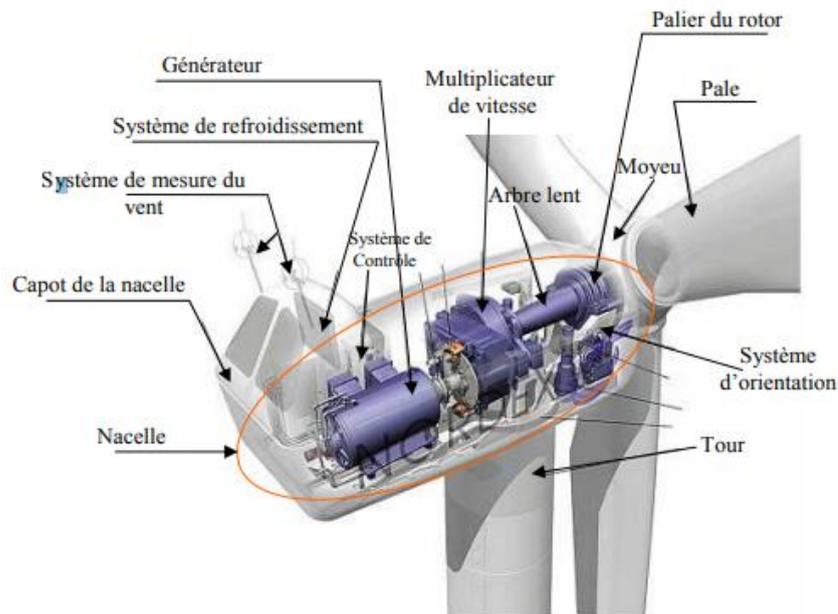


Figure 1.4 : Constitution d'une éolienne.

a) La Tour

La tour, élément porteur d'une éolienne, est généralement constituée d'un tube d'acier ou d'un treillis métallique. Elle doit être construite aussi haute que possible pour éviter les perturbations près du sol. À l'intérieur de la tour se trouvent les câbles de transport d'énergie électrique, les appareillages de connexion au réseau de distribution et l'accès à la nacelle. Sa forme conique optimise sa résistance structurelle [7].

b) La nacelle

Elle est le cœur de l'éolienne, abritant les composants qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle comprend également les actionneurs de commande. Les éléments essentiels de la nacelle sont les suivants : [8]

b.1) L'arbre lent

L'arbre lent, connecté au multiplicateur, intègre un système hydraulique pour un freinage aérodynamique lorsque nécessaire, améliorant ainsi le contrôle de la vitesse de rotation.

b.2) Multiplicateur

Le multiplicateur est essentiel pour adapter la vitesse de l'éolienne à celle du générateur électrique (généralement à 1500 tr/min). Il intègre un frein à disque mécanique qui se déclenche en cas d'urgence lorsque les freins aérodynamiques sont hors service ou pendant la maintenance

des éoliennes, assurant ainsi la sécurité et la fiabilité du système.

b.3) Système de refroidissement

Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique qui assure le refroidissement du générateur ainsi qu'un refroidisseur d'huile pour la boîte de vitesses. Ces composants garantissent un fonctionnement optimal en maintenant des températures adéquates et en prévenant la surchauffe des équipements.

b.4) Générateur

Le générateur joue un rôle essentiel en convertissant l'énergie mécanique de l'arbre de sortie du multiplicateur en puissance électrique. Deux types de machines sont couramment utilisés à cet effet : les génératrices asynchrones et synchrones. De plus, le générateur peut être connecté au réseau électrique de manière directe ou indirecte, selon le type de connexion utilisé. Cela permet d'acheminer efficacement l'énergie produite vers le réseau électrique pour une utilisation pratique. La sélection du type de générateur et de la méthode de connexion dépend des besoins spécifiques du système et des exigences du réseau électrique.

b.5) Anémomètre

L'anémomètre joue un rôle crucial dans le système de contrôle des éoliennes en fournissant des signaux électriques. Il permet de surveiller la vitesse du vent et de démarrer les éoliennes lorsque celle-ci atteint environ 5 m/s. De plus, le système de contrôle arrête automatiquement l'éolienne lorsque la vitesse du vent dépasse 25 m/s, assurant ainsi la sécurité et la protection des éoliennes.

b.6) Système de Contrôle-Commande

Le système de contrôle-commande est équipé d'un ordinateur qui surveille en continu l'état des éoliennes. En cas de surchauffe du multiplicateur ou du générateur, par exemple, le système éteint automatiquement l'éolienne et envoie des signaux à l'ordinateur de contrôle pour une gestion efficace du parc éolien.

c) Rotor et pales

Les pales du rotor sont des éléments essentiels de l'éolienne. Elles sont autoportantes et fixées au moyeu central. Leur rôle principal est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation. Le rendement maximal du rotor est généralement d'environ 59% (limite de Betz).

Le nombre de pales a un impact relativement faible sur les performances de l'éolienne. Toutefois, plus le nombre de pales est élevé, plus le couple de démarrage est important et la vitesse de rotation est réduite. Les éoliennes à une ou deux pales sont plus légères, mais elles génèrent

plus de fluctuations mécaniques, sont moins énergétiquement efficaces et peuvent provoquer plus de perturbations visuelles en raison de leur vitesse de rotation plus élevée. Il est préférable d'éviter un nombre pair de pales pour des raisons de stabilité.

La conception des pales est techniquement délicate. Elles doivent respecter des règles géométriques spécifiques liées à l'aérodynamique, tout en étant suffisamment résistantes pour supporter les forces exercées par le vent et les facteurs externes tels que la pollution atmosphérique ou les particules comme le sable. Les pales sont généralement fabriquées en fibre de verre ou en matériaux composites tels que la fibre de carbone. Ces matériaux offrent à la fois légèreté et résistance.

La conception des pales est un domaine de recherche et d'innovation important dans l'industrie éolienne, visant à améliorer leur performance, leur durabilité et leur efficacité énergétique. Des études sont menées pour optimiser leur profil aérodynamique, leur longueur et leur matériau afin de maximiser la capture d'énergie éolienne et de minimiser les coûts de maintenance.

d) Le Moyeu

Le moyeu est le composant qui supporte les pales de l'éolienne. Il doit être capable de résister aux chocs importants lors du démarrage de l'éolienne ou lors de changements brusques de la vitesse du vent. C'est pourquoi le moyeu est généralement moulé en une seule pièce, plutôt que soudé, pour assurer une plus grande résistance et durabilité [8].

1.7 Principe de fonctionnement de l'éolienne

Lorsque la vitesse du vent atteint un seuil suffisant (généralement entre 3 et 5 m/s), un automate programmable et un anémomètre situé au sommet de la nacelle envoient des signaux de commande au moteur d'orientation pour aligner l'éolienne face au vent.

Le vent soufflant sur les pales exerce une force qui les fait tourner, entraînant ainsi l'arbre lent de l'éolienne. Le mouvement de rotation est ensuite transmis au multiplicateur, qui augmente la vitesse de rotation et fournit une accélération à l'arbre rapide.

L'arbre rapide, désormais en rotation plus rapide, transfère cette énergie cinétique à la génératrice. La génératrice, grâce à des composants internes tels que des aimants permanents ou des bobines, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

Cette électricité produite par la génératrice est ensuite acheminée vers des systèmes de conversion et de distribution, qui la rendent utilisable pour alimenter des appareils électriques, des réseaux électriques locaux ou des réseaux électriques plus étendus.

L'éolienne continue de s'ajuster automatiquement à la direction et à la vitesse du vent grâce aux capteurs et au système de contrôle-commande intégrés. Elle peut également être équipée d'un système de freinage pour arrêter la rotation des pales dans des situations d'urgence ou pour des opérations de maintenance. Ainsi, le principe de fonctionnement de l'éolienne repose sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation, puis en énergie électrique utilisable, contribuant ainsi à la production d'énergie renouvelable et durable [7].

1.8 Taille des aérogénérateurs

La demande croissante en énergie électrique a incité les chercheurs et les fabricants à concevoir des éoliennes de plus en plus puissantes, avec des pales plus longues.

Les caractéristiques dimensionnelles des aérogénérateurs allant jusqu'à 3 MW sont répertoriées dans le tableau suivant [9].

<i>Dimensions des aérogénérateurs selon la puissance</i>	<i>Puissance unitaire en MW</i>	<i>Puissance unitaire en MW</i>	<i>Puissance unitaire en MW</i>
	<i>0.5-0.6</i>	<i>1.5</i>	<i>3</i>
<i>Longueur de pale en (mètres)</i>	<i>19-22</i>	<i>30-33</i>	<i>50-60</i>
<i>Poids de la pale (tonnes)</i>	<i>1.2</i>	<i>3-5</i>	<i>7-9</i>
<i>Poids de la nacelle (tonnes)</i>	<i>10-25</i>	<i>30-60</i>	<i>>100</i>
<i>Hauteur du pylône (mètres)</i>	<i>40-65</i>	<i>70-100</i>	<i>>100</i>
<i>Poids du pylône (tonnes)</i>	<i>30-40</i>	<i>70-90</i>	<i>>100</i>

Tableau 1.1 : dimensions des aérogénérateurs [9].

1.9 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

1.9.1 Les avantages

- Elle est considérée comme une source d'énergie renouvelable.
- Son coût est généralement inférieur à celui de l'énergie nucléaire.
- Elle ne provoque pas de pollution, étant une source d'énergie propre.
- Elle constitue une solution efficace pour fournir de l'énergie aux zones éloignées.
- Les parcs éoliens peuvent être facilement assemblés et démontés

1.9.2 Inconvénients

- La fluctuation du vent peut entraîner une qualité de puissance irrégulière des aérogénérateurs.
- Le bruit et l'impact visuel des aérogénérateurs peuvent être perturbants.

- Les parcs éoliens nécessitent de vastes superficies pour être installés.
- Ils peuvent causer des interférences électromagnétiques

1.10 Applications de l'énergie éolienne

- Production d'énergie électrique.
- Utilisation dans la propulsion de navires et de voiliers.
- Utilisation dans le processus de mouture de la farine.
- Pratique d'activités sportives telles que le kite-surf ou la planche à voile.
- Pompage de l'eau à des fins d'irrigation ou d'approvisionnement en eau. [10]

1.11 Les différents types des turbines éoliennes

Les éoliennes peuvent être divisées en deux catégories principales : celles à axe horizontal (HAWT, pour Horizontal Axis Wind Turbine) et celles à axe vertical (VAWT, pour Vertical Axis Wind Turbine).

1.11.1 L'éolienne à axe vertical

Ce type de turbine éolienne était le premier utilisé pour produire de l'énergie éolienne en raison de sa conception simplifiée. Contrairement à la turbine à axe horizontal, il présente l'avantage d'avoir les commandes et le générateur situés au niveau du sol, ce qui le rend plus facilement accessible et élimine le besoin d'un mécanisme de suivi des pales en fonction de la direction du vent. Cependant, de nos jours, ce type d'éolienne est devenu moins courant en raison de problèmes aérodynamiques et de sa nécessité de disposer d'une plus grande emprise au sol.



Figure 1.5 : Éolienne à axe verticale [10]

1.11.2 L'éolienne a axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus largement utilisées en raison de leur

efficacité aérodynamique supérieure par rapport aux éoliennes à axe vertical. Elles offrent une plus grande robustesse mécanique et sont également plus économiques. Fonctionnant sur le principe des moulins à vent, ces éoliennes sont généralement équipées de trois pales, ce qui constitue un compromis optimal entre le facteur de puissance, le coût et la vitesse de rotation en réponse au vent. En outre, esthétiquement, les éoliennes à trois pales sont préférées par rapport aux modèles à deux pales.



Figure 1.6 : Éolienne horizontale [10]

1.12 Les avantages et inconvénients des axes

1.12.1 Les avantages de l'éolienne à axe horizontal

- Un bon rendement
- Installateurs compétents
- Technologie éprouvée
- Choix plus large
- Le prix

1.12.2 Les inconvénients de l'éolienne à axe horizontal

- Doit être orienté selon les vents
- Nuisances sonores éventuelles
- Mauvais rendement avec des vents turbulents
- Emprise au sol du mat si haubanage
- Doit être orienté selon les vents
- Fonctionnement par intermittence

1.12.3 Les avantages de l'éolienne à axe vertical

- Bon comportement aux vents turbulents
- Peut être intégrée aux bâtiments
- Démarre avec des vents faibles
- Faible encombrement (selon les modèles)
- Ne nécessite pas de système d'orientation

1.12.4 Les inconvénients de l'éolienne à axe vertical

- Poids peut être important
- Le prix
- Faible rendement

1.13 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne



Figure 1.7 : Chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

Une turbine : qui permet de transférer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Une transmission mécanique : transmet l'énergie mécanique au générateur

Le multiplicateur : il permet de minimiser le couple et d'augmenter la vitesse.

Une génératrice : qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Un système de liaison électrique.

Les convertisseurs

1.14 Modélisation de la turbine éolienne

L'éolienne fonctionne en captant l'énergie cinétique du vent et en la convertissant en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs principaux influencent la relation entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par

le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui varient en fonction du site. Le coefficient de puissance évolue de manière spécifique pour chaque éolienne. À partir des données recueillies sur une éolienne donnée, l'expression du coefficient de puissance est approximée par l'équation suivante pour ce type de turbine. [10]

$$C_p = (\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-21/\lambda_i} \quad (1.1)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

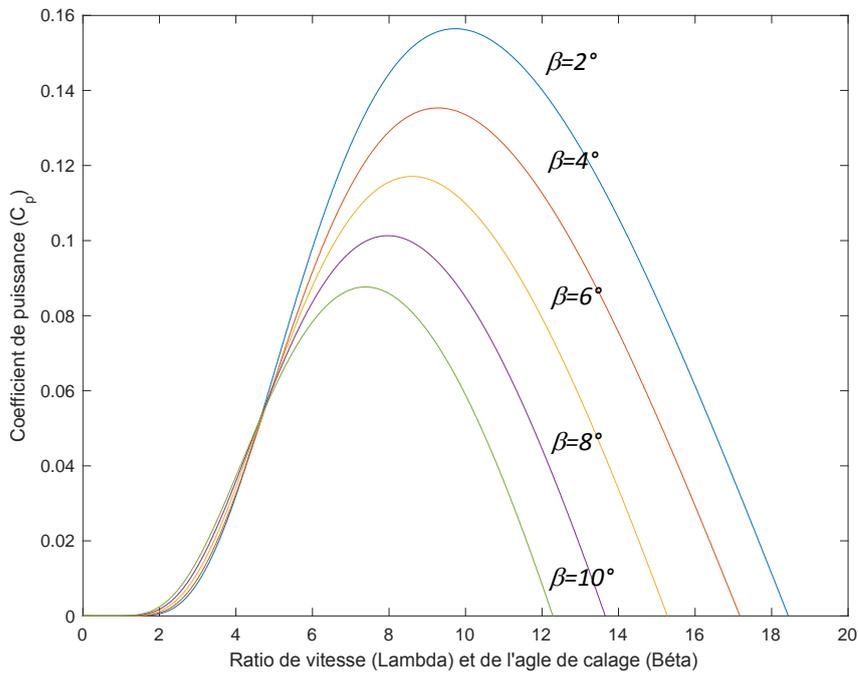


Figure 1.8 : Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse (lambda) et de l'angle de calage (beta).

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme

$$P_{aer} = C_p(\lambda, \beta) \times \frac{\rho \times S \times V^3}{2} \quad (1.2)$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \times \frac{\rho \times S \times V^3}{2} \times \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (1.3)$$

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice

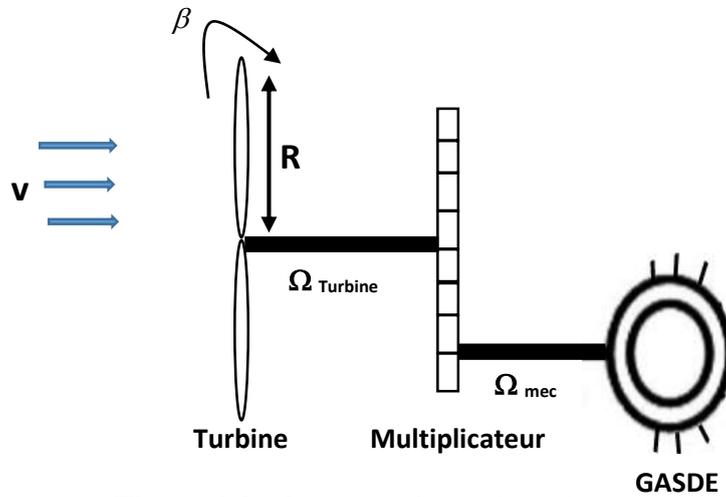


Figure 1.9 : Structure du système de conversion éolien

1.15 Modélisation de multiplicateur de vitesse

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes

$$C_r = \frac{C_{aer}}{G} \quad (1.4)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (1.5)$$

Avec : **G** le gain du multiplicateur de vitesse

1.16 Modélisation de l'arbre mécanique

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_r \quad (1.6)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor:

$$C_{mec} = J \times \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (1.7)$$

Où : J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique (C_{em}) produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux (C_{vis}), et le couple de multiplicateur (C_r).

$$C_{mec} = C_r - C_{em} - C_{vis} \quad (1.8)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f

$$C_{vis} = f \times \Omega_{mec} \tag{1.9}$$

1.17 Simulation de la turbine

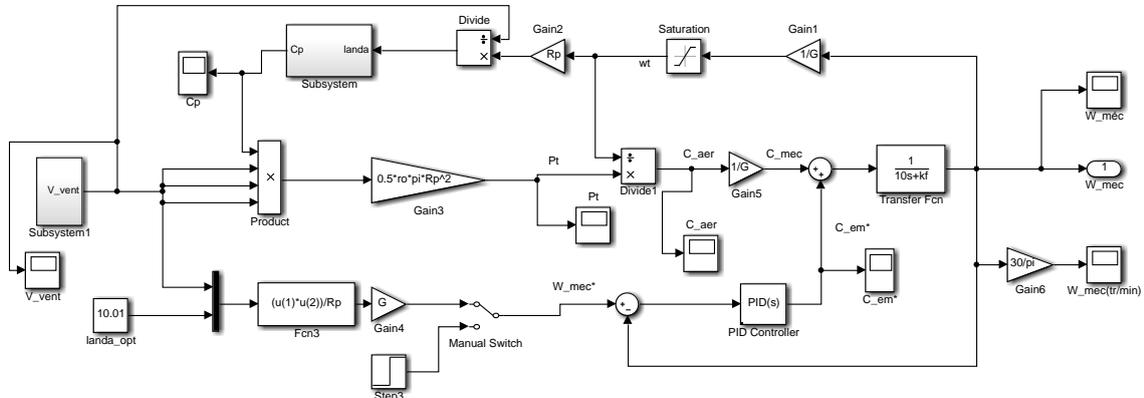


Figure 1.10 : Schéma bloc de la turbine.

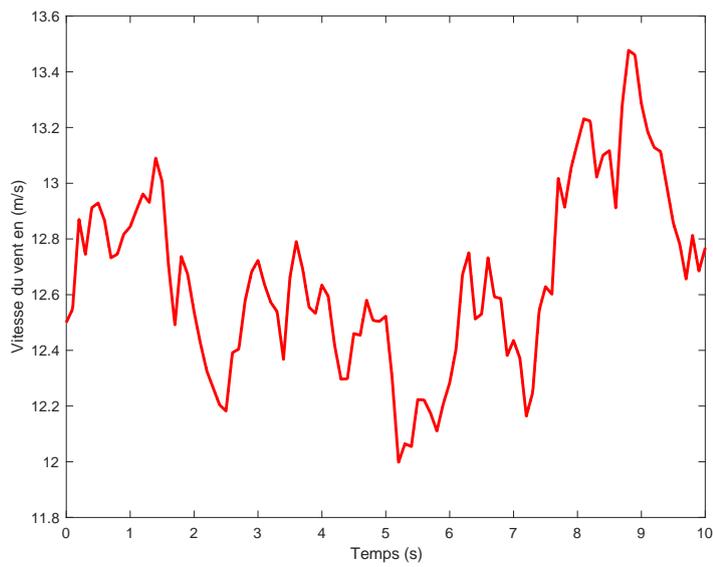


Figure 1.11 : Variation de la vitesse du vent (m/s).

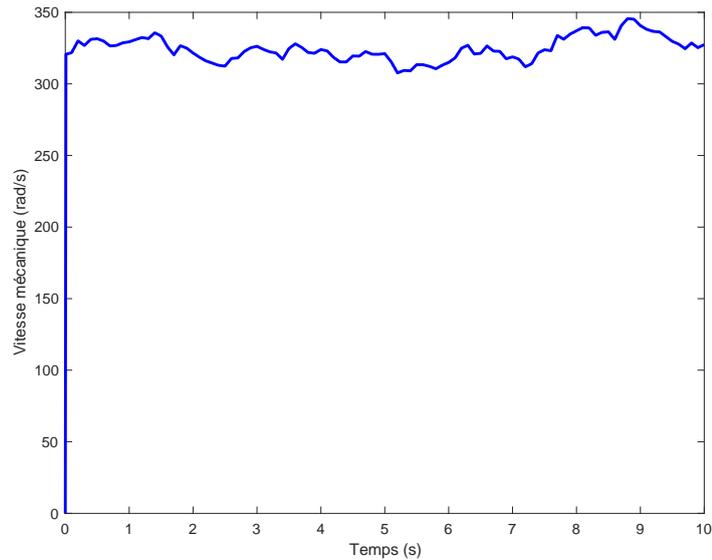


Figure 1.12 : Variation de la vitesse mécanique (rad/s).

1.18 Interprétations des résultats

La figure 1.11 représente les résultats de simulation d'un profil aléatoire du vent, ce profil impose comme une entrée du système et il est constitué d'une composante oscillante variant autour d'une composante moyenne de (12 m /s).

La figure (1.12) représente la variation de la vitesse mécanique. Elle est imposée comme sortie du système, sa valeur est entre 300 et 350 (rad/s).

Conclusion

Dans ce chapitre nous l'avons étudié, la turbine et les déférents entre ces deux axes verticale et horizontale et les différentes tailles des aérogénérateurs avec leur puissance et nous avons fait la modélisation et la simulation par MATLAB/SIMULINK.

Chapitre 2

Modélisation et simulation de la GASDE auto-excité

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'identifier les machines électriques, d'examiner leur origine et leur évolution au fil des années. Dans cette partie, nous aborderons spécifiquement la génératrice asynchrone double étoile (GASDE), en expliquant son mode de fonctionnement, ainsi que ses avantages et inconvénients. Nous procéderons également à la modélisation et à l'analyse de la génératrice asynchrone double étoile, en tenant compte de la saturation du circuit magnétique. Enfin, nous commenterons les résultats de la simulation de ce type de génératrice.

2.2 Histoire des machines électriques

En 1821, l'Anglais Michael Faraday réalisa le premier moteur électromagnétique, auquel Peter Barlow ajouta une roue dentée en 1822. En 1831, Faraday formula les principes de l'induction électromagnétique. Parallèlement, le Russe Friedrich Emil Lenz et l'Américain Joseph Henry réalisèrent des travaux similaires, contribuant ainsi à la découverte et à la compréhension de ce phénomène.

L'année suivante, Ampère et le constructeur français Hippolyte Paxi réalisèrent la première génératrice à courant continu. En 1836, l'Anglais Hyde Clarke inversa la structure de la machine par rapport à celle de Paxi/Ampère, améliorant ainsi le commutateur redresseur.

En 1842, Davidson utilisa l'un des premiers moteurs à réactance variable. En 1848, les moteurs de Froment firent leur apparition, offrant un couple atteignant 500 N.m. Ces moteurs furent largement utilisés dans les applications industrielles.

En 1860, la compagnie "l'Alliance" commença la fabrication industrielle de génératrices aux structures complexes. En 1865, l'Italien Antonio Paccinotti construisit un prototype de machine à courant continu avec un induit en anneau et un collecteur radial, améliorant considérablement son fonctionnement.

En 1888, Nikola Tesla inventa le premier moteur à courant alternatif, qui joua un rôle majeur dans le développement de l'industrie électrique. En 1889, l'Allemand Michael Dolivo Dobrowolski réalisa la première machine asynchrone triphasée, qui domina largement le domaine des machines électriques grâce à ses nombreux avantages. Elle était la plus simple à fabriquer, la moins coûteuse, nécessitait moins d'entretien et avait un taux de défaillance très faible. Elle fut produite en grande quantité et dans une large gamme de puissances.

Depuis la fin des années 1920, les machines à deux enroulements triphasés au stator furent introduites pour augmenter la puissance des alternateurs synchrones de très haute puissance [12].

2.3 Description de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE)

La génératrice asynchrone double étoile (GASDE) est similaire à la génératrice asynchrone à cage (GAS) en ce sens que si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, une force électromagnétique se développe, similaire à celle obtenue avec un générateur synchrone. Cependant, contrairement à un générateur synchrone, la GASDE ne génère pas sa propre énergie d'excitation. Par conséquent, il est nécessaire de lui fournir cette énergie et de stabiliser sa tension de sortie et sa fréquence à l'aide de condensateurs connectés à la borne du stator. La figure (2.1) présente une représentation schématique de la GASDE auto-amorcée. [13]

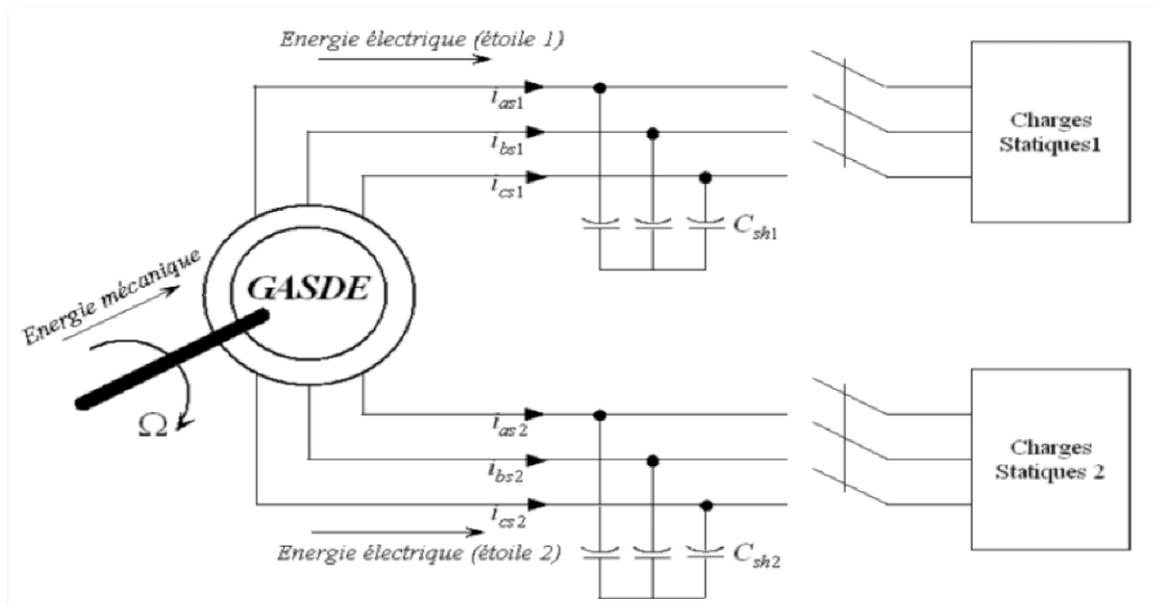


Figure 2. 1 : Le schéma représentatif de la GASDE auto-amorcée [13]

2.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile

Comme toutes les machines électriques, la machine asynchrone double étoile (MASDE) peut fonctionner selon deux modes de fonctionnement : moteur et génératrice.

- **Fonctionnement moteur**

Les courants qui circulent dans les enroulements du stator de la MASDE créent un champ magnétique tournant dans les deux stators. La fréquence de rotation de ce champ magnétique est déterminée par la fréquence des courants statoriques, qui est généralement déterminée par l'alimentation électrique. La vitesse de rotation de ce champ magnétique est appelée vitesse de synchronisme ω_s (Eq.2.1), et elle est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique. [14]

Ces deux champs magnétiques tournants, produits par les enroulements statoriques, induisent des courants dans les barres du rotor. Ces courants induits génèrent des forces électromotrices qui entraînent le rotor à une vitesse inférieure à celle de synchronisme. La différence de vitesse entre le rotor et le champ magnétique du stator est appelée vitesse de glissement (Eq. 2.2).

- **Fonctionnement génératrice :**

Pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant) exprimée par l'équation suivante : [14]

$$\omega_s = \frac{60f}{P} \quad (2.1)$$

Le rotor développe ainsi son propre champ magnétique, la différence entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de rotation du champ magnétique :

$$\omega = \omega_s - \omega_r \quad (2.2)$$

2.5 Phénomène d'auto-amorçage

La figure 2.2 schématise le phénomène d'auto-amorçage de la génératrice. Ce processus commence avec le flux magnétique rémanent et la rotation du rotor, ce qui génère une faible tension/courant aux bornes de la machine asynchrone double étoile (GASDE). Grâce au condensateur d'auto-amorçage, cette tension/courant est amplifiée, ce qui permet au

condensateur de renvoyer une tension/courant d'une valeur supérieure à celle envoyée par la génératrice. Ce processus est répété jusqu'à ce que la tension/courant renvoyée par le condensateur soit égale à celle envoyée par la génératrice, ce qui définit le point de fonctionnement.

Il est essentiel de prendre en compte le phénomène de saturation magnétique lors de la simulation de l'auto-excitation d'une machine. En effet, la saturation magnétique joue un rôle déterminant dans la fixation du point de fonctionnement en régime permanent. C'est pourquoi il est important de considérer cet aspect lors de l'étude et de la modélisation du phénomène d'auto-amorçage de la GASDE [14].

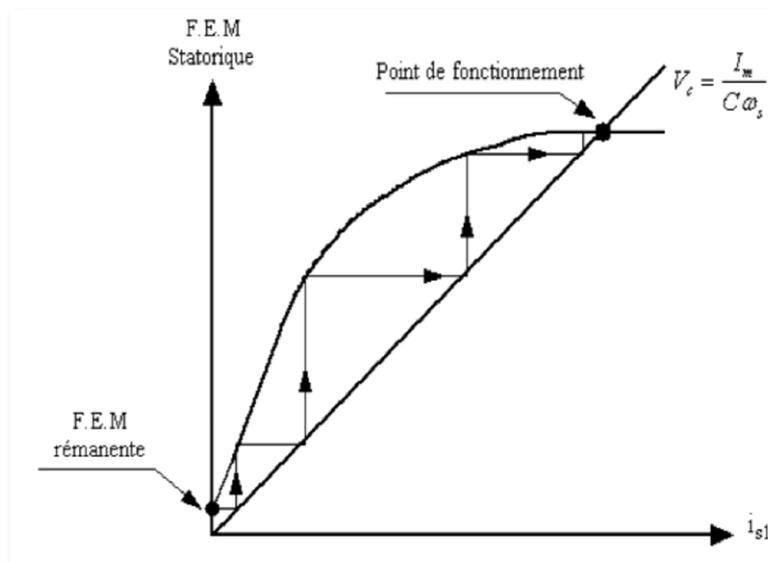


Figure 2.2 : Le phénomène d'auto-amorçage.[14]

2.6 Les machines électrique utilisés dans un système éolien

La plupart des machines électriques sont utilisées dans la production d'énergie électrique d'origine éolienne, en fonction des besoins de consommation, des emplacements et de la rentabilité économique. Bien que la machine asynchrone soit principalement utilisée comme moteur, elle est entièrement réversible.

Contrairement aux méthodes traditionnelles de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement préféré, la génératrice asynchrone à cage d'écureuil équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. Cela

s'explique par plusieurs avantages qu'elle présente par rapport aux autres types de machines. Elle conserve ses composants essentiels presque inchangés, offre une simplicité de conception, une robustesse, un coût abordable et une facilité d'entretien. De plus, son absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rend parfaitement adaptée à une utilisation dans des conditions parfois extrêmes rencontrées dans le domaine de l'énergie éolienne [15].

2.7 Les Avantages des Machines asynchrones doubles étoiles

La machine asynchrone double étoile présente plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles parmi ces avantages :

2.7.1 Segmentation de puissance

L'augmentation du nombre de phases permet une augmentation automatique de la puissance. Pour réduire les courants de phase sans diminuer les tensions d'alimentation, l'une des solutions consiste à augmenter le nombre de phases dans le stator. Ainsi, la puissance totale demandée par la machine est répartie entre les différentes phases, ce qui permet de réduire la puissance par phase.

Avec cette configuration, la machine peut être alimentée par un onduleur dont les composants semi-conducteurs sont de calibre inférieur, ce qui permet de fonctionner à des fréquences de commutation plus élevées. Cela contribue à minimiser les ondulations des courants et du couple. La segmentation de la puissance est l'avantage principal des machines multiphasées, et c'est un aspect particulièrement valorisé de nos jours.

2.7.2 Amélioration de la fiabilité

En cas de défaillance d'une phase due à la défaillance des éléments semi-conducteurs de l'onduleur qui alimente la machine, le fonctionnement en régime dégradé se caractérise par une perte de contrôle de la machine et des ondulations de couple de grande amplitude. Pour pouvoir contrôler la machine dans ce régime, une solution consiste à relier le neutre de la machine au point médian de la source de tension continue.

Dans les machines multiphasées, cette contrainte peut être évitée tant que trois phases au moins restent actives. Il est possible d'avoir jusqu'à $(n_{ph} - 3)$ phases ouvertes sans nécessiter la connexion du neutre au point médian de la source de tension équilibrée. Plus le nombre de phases augmente, plus on dispose de degrés de liberté pour commander la machine [12].

2.7.3 Minimisation des ondulations des courants et du couple

Pour comparer les harmoniques du couple électromagnétique, on prend en compte deux machines : l'une est une machine conventionnelle, tandis que l'autre est une machine double étoile, toutes deux alimentées par des tensions non sinusoïdales.

L'ondulation du couple électromagnétique, dont la fréquence est six fois celle du fondamental, est principalement créée par les harmoniques cinq et sept du temps. Ces harmoniques existent dans la machine triphasée, cependant, dans la machine double étoile, ils sont naturellement éliminés [12].

2.8 Inconvénients des machines asynchrone double étoile

La machine asynchrone double étoile présente certains inconvénients, notamment

- L'augmentation du nombre de phases entraîne une augmentation du nombre de semi-conducteurs, ce qui peut éventuellement augmenter le coût global du convertisseur-machine.
- La relation entre le nombre de semi-conducteurs et la structure dynamique de la machine est fortement non linéaire, ce qui rend la commande plus complexe en raison de l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux.
- L'un des principaux inconvénients des machines double étoile est l'apparition de courants harmoniques lorsqu'elles sont alimentées par un onduleur de tension. Ces courants harmoniques peuvent engendrer des problèmes indésirables dans le fonctionnement de la machine.

2.9 Modélisation de la génératrice asynchrone double étoile

Les équations des tensions et des flux pour le fonctionnement en moteur peuvent être réécrites en différenciant le fonctionnement en génératrice par le placement d'un signe négatif devant chaque courant statorique, soit de l'axe d ou de l'axe q, de l'étoile 1 ou de l'étoile 2. Cela est fait en tenant compte des hypothèses simplificatrices, à l'exception de la saturation du circuit magnétique, qui ne peut être négligée car l'inductance de magnétisation joue un rôle important dans la stabilisation de la tension générée en conditions de fonctionnement à vide ou en charge [15].

La représentation des enroulements de la machine dans le repère de Park est donnée par la Figure (2.3).

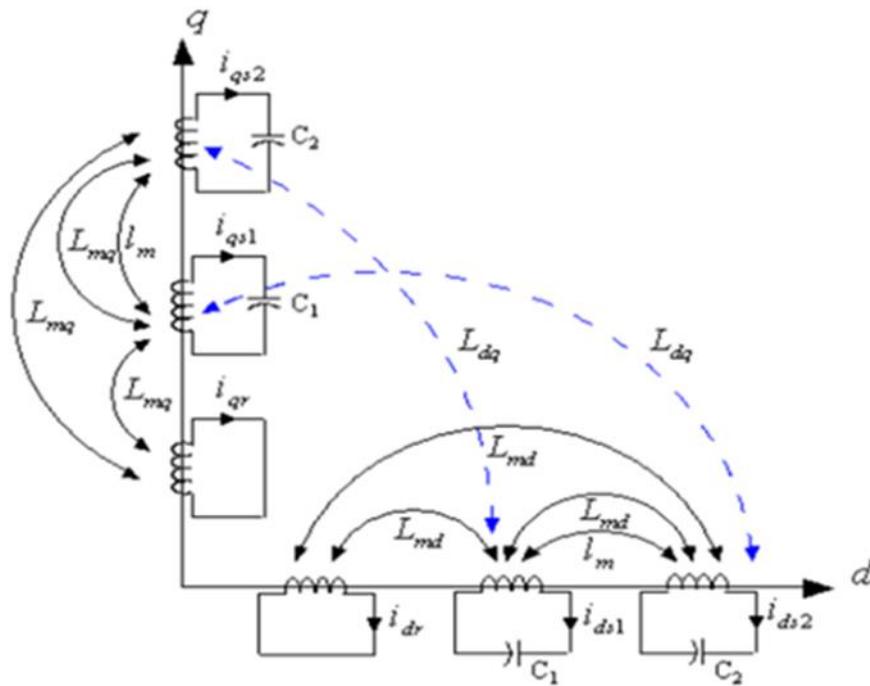


Figure 2. 3 : Représentation des enroulements de la machine asynchrone double étoile selon les axes d, q.

2.10 Modèle biphasé de la GASDE dans le référentiel généralisé

La figure 2. 4 représenté le schéma équivalent de la GASDE dans le référentiels de Park généralisé.

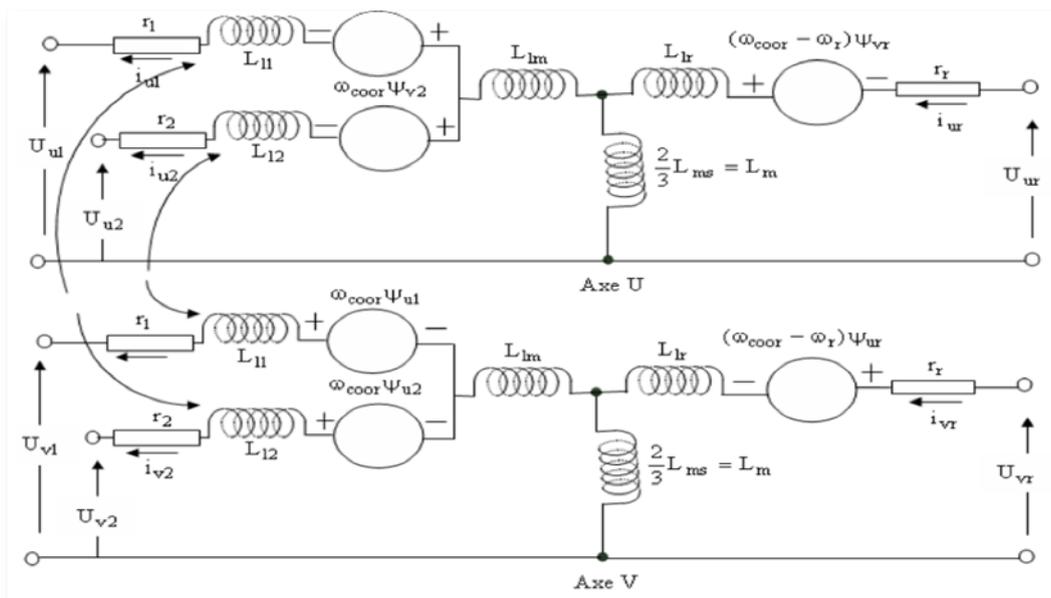


Figure 2. 4 : Le schéma équivalent de la GASDE.[15]

- **Équations des tensions**

$$v_{ds1} = -R_{s1}i_{ds1} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds1} - \omega_s\varphi_{qs1}$$

$$v_{qs1} = -R_{s1}i_{qs1} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs1} - \omega_s\varphi_{ds1}$$

$$v_{ds2} = -R_{s2}i_{ds2} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds2} - \omega_s\varphi_{qs2}$$

$$v_{qs2} = -R_{s2}i_{qs2} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs2} - \omega_s\varphi_{ds2}$$

$$0 = -R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}\varphi_{dr} - (\omega_s - \omega_r)\varphi_{qr}$$

$$0 = -R_r i_{qr} + \frac{d}{dt}\varphi_{qr} - (\omega_s - \omega_r)\varphi_{dr}$$

(2.3)

Avec ω_s : la vitesse du champ tournant, ω_r la pulsation rotorique.

R_{s1} , R_{s2} , R_r : sont respectivement les résistances du stator (étoile 1 et 2) et du rotor.

- **Équations des flux**

Les expressions des flux statoriques et rotoriques en fonction des courants sont exprimés par le système d'équations suivant [15].

$$\varphi_{ds1} = -l_{s1}i_{ds1} - l_m(i_{ds1} + i_{ds2}) + l_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) - l_{dq}i_{qs2}$$

$$\varphi_{qs1} = -l_{s1}i_{qs1} - l_m(i_{qs1} + i_{qs2}) + l_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}) - l_{dq}i_{ds2}$$

$$\varphi_{ds2} = -l_{s2}i_{ds2} - l_m(i_{ds1} + i_{ds2}) + l_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) - l_{dq}i_{qs1}$$

$$\varphi_{qs2} = -l_{s2}i_{qs2} - l_m(i_{qs1} + i_{qs2}) + l_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}) - l_{dq}i_{ds1}$$

$$\varphi_{dr} = l_r i_{dr} + l_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr})$$

$$\varphi_{qr} = l_r i_{qr} + l_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr})$$

(2.4)

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'inter saturation donnée par [15].

$$L_{dq} = \frac{l_{md}l_{mq}}{|l_m|} \left[\frac{dL_m}{d|I_m|} \right] \quad (2.5)$$

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.

$$L_m = \frac{|\varphi_m|}{|I_m|} \quad (2.6)$$

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 :

$$I_m = \sqrt{(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr})^2 + (-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr})^2} \quad (2.7)$$

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 [14]

$$L_m = b_1 + b_2 I_m + b_3 I_m^2 + b_4 I_m^3 \quad (2.8)$$

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

Les inductances de magnétisation directe et en quadrature sont [15] :

$$L_{md} = L_m + \left[\frac{I_{md}}{I_{mq}} \right] L_{dq} \quad (2.9)$$

$$L_{mq} = L_m + \left[\frac{I_{mq}}{I_{md}} \right] L_{dq} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \text{Avec :} \quad I_{md} &= -i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr} \\ I_{mq} &= -i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr} \end{aligned} \quad (2.11)$$

L'expression du couple électromagnétique de la génératrice est écrite comme suit :

$$C_{emGe} = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) \left(\frac{L_m}{L_{dr}}\right) [(i_{qs1} + i_{qs2})\varphi_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2})\varphi_{qr}] \quad (2.12)$$

2.11 Modélisation de l'auto-amorçage

Les bancs de condensateurs sont connectés en étoile aux bornes des deux étoiles de la machine. Les équations de tension aux bornes des condensateurs de chaque étoile sont écrites dans le référentiel lié au champ tournant de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} v_{ds1} &= \frac{1}{c_1} i_{dc1} + \omega_s v_{qs1} \\
\frac{d}{dt} v_{qs1} &= \frac{1}{c_1} i_{qc1} + \omega_s v_{ds1} \\
\frac{d}{dt} v_{ds2} &= \frac{1}{c_1} i_{dc2} + \omega_s v_{qs2} \\
\frac{d}{dt} v_{qs2} &= \frac{1}{c_1} i_{qc2} + \omega_s v_{ds2}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Ou : $i_{dc1}, i_{qc1}, i_{dc2}, i_{qc2}$, représentent les courants d'excitation selon les axes d et q, l'étoile 1, 2.

C1, C2 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 :

$$\begin{aligned}
i_{ds1} &= i_{dc1} \\
i_{qs1} &= i_{qc1} \\
i_{ds2} &= i_{dc2} \\
i_{qs2} &= i_{qc2}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

2.12 Mise sous forme d'équation d'état

Les systèmes d'équation (2.3) et (2.13), peuvent être exprimé comme suit :

$$\left\{ \begin{aligned}
\frac{d}{dt} \varphi_{ds1} &= v_{ds1} + R_{s1} i_{ds1} + \omega_s \varphi_{qs1} \\
\frac{d}{dt} \varphi_{qs1} &= v_{qs1} + R_{s1} i_{qs1} + \omega_s \varphi_{ds1} \\
\frac{d}{dt} \varphi_{ds2} &= v_{ds2} + R_{s2} i_{ds2} + \omega_s \varphi_{qs2} \\
\frac{d}{dt} \varphi_{qs2} &= v_{qs2} + R_{s2} i_{qs2} + \omega_s \varphi_{ds2} \\
\frac{d}{dt} \varphi_{dr} &= R_r i_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\
\frac{d}{dt} \varphi_{qr} &= R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \\
\frac{d}{dt} v_{ds1} &= \frac{1}{C_1} i_{ds1} + \omega_s v_{qs1} \\
\frac{d}{dt} v_{qs1} &= \frac{1}{C_1} i_{qs1} + \omega_s v_{ds1} \\
\frac{d}{dt} v_{ds2} &= \frac{1}{C_2} i_{ds2} + \omega_s v_{qs2} \\
\frac{d}{dt} v_{qs2} &= \frac{1}{C_2} i_{qs2} + \omega_s v_{ds2}
\end{aligned} \right. \tag{2.15}$$

2.13 Simulation et interprétations des résultats

Les résultats de simulation ont été obtenus en utilisant les paramètres de la GASDE qui sont fournis dans l'annexe. Les performances de la GASDE ont été testées en mode de fonctionnement à vide.

- **Fonctionnement à vide**

Pour étudier la GASDE, en fonction à vide, on va tourner le rotor avec une vitesse fixe de 314.5 (rad /s).

Les résultats de simulation en fonctionnement à vide de la GASDE avec :

$C_1=C_2=40\mu F$ sont présentes par les figures suivants :

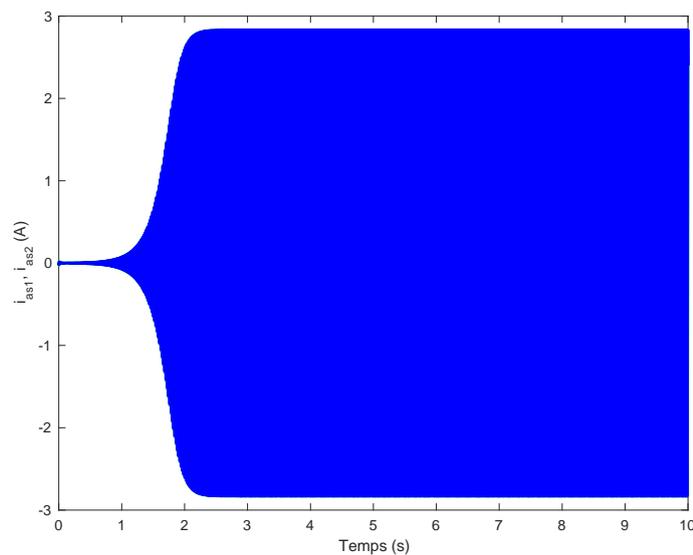


Figure 2.5 : Les courants i_{as1} , i_{as2} (A).

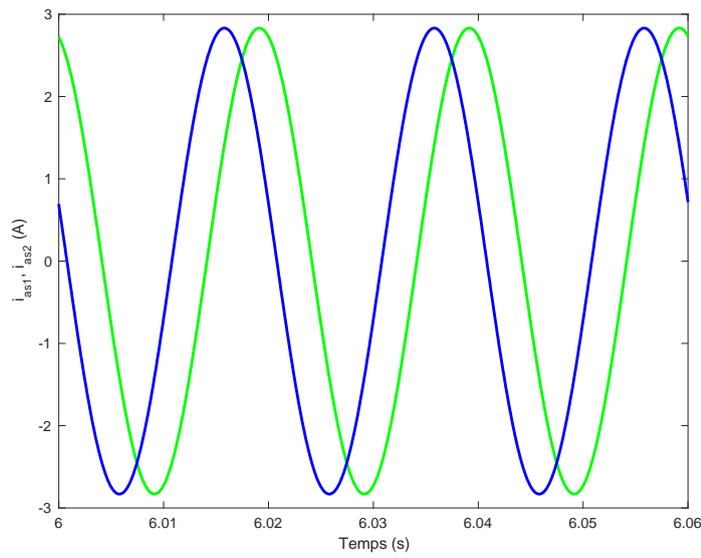


Figure 2.6 : Zoom des courants i_{as1} , i_{as2} (A).

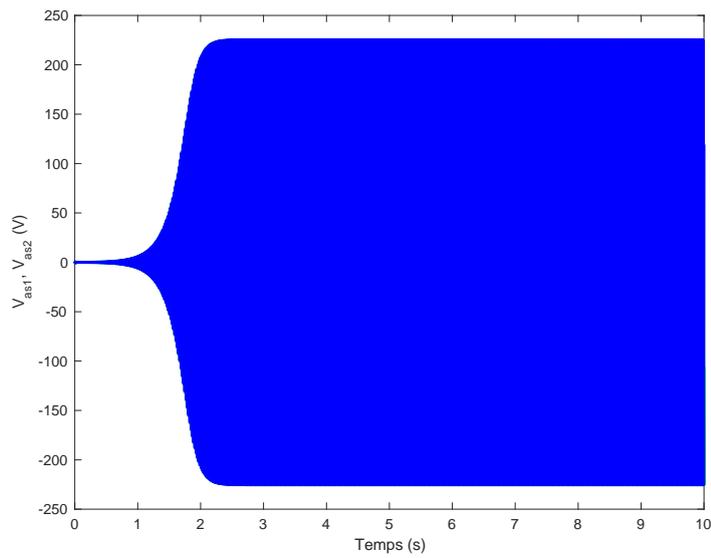


Figure 2.7 : Les tensions V_{as1} , V_{as2} (V).

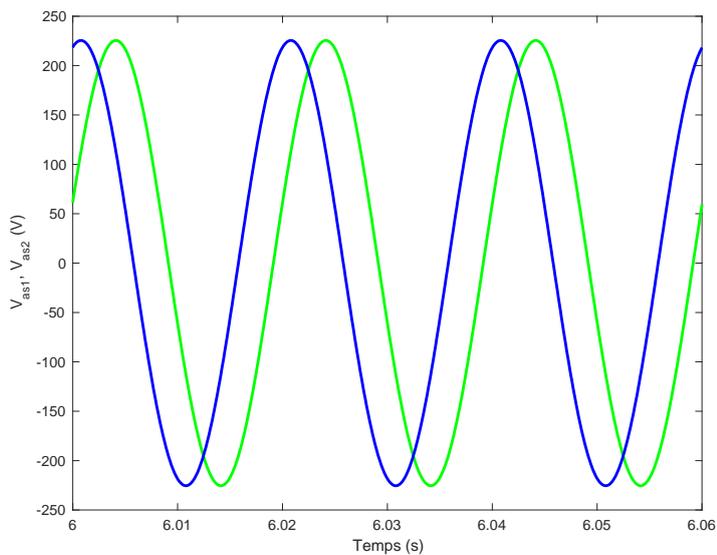


Figure 2.8 : Zoom des tensions V_{as1} , V_{as2} (V).

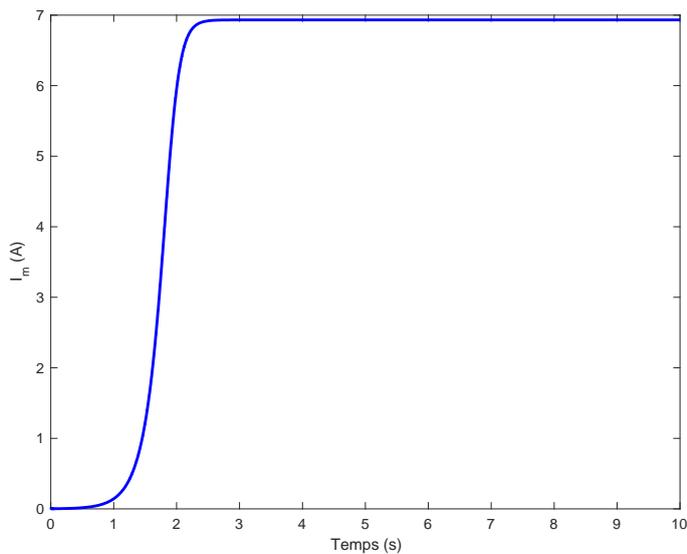


Figure 2.9 : Le courant de magnétisation I_m (A).

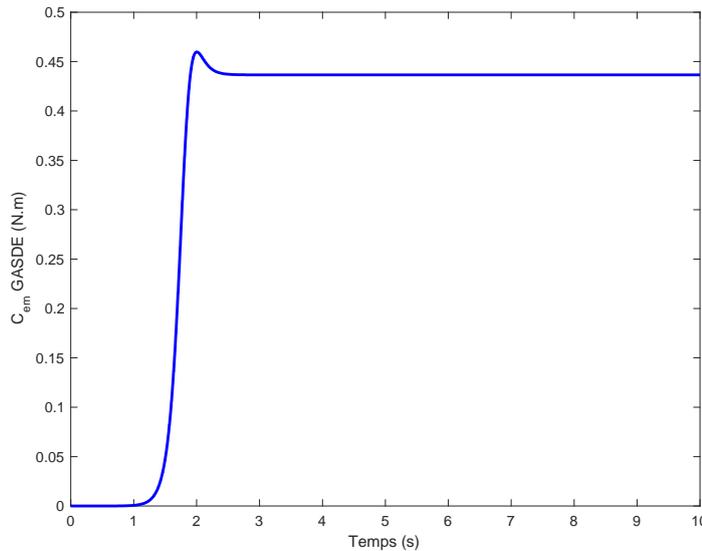


Figure 2.10 : Le couple électromagnétique (C_{em} (N.m)).

2.14 Discussion des résultats

Les tensions V_{as1} et V_{as2} aux bornes de la première phase de l'étoile (1) et de l'étoile (2), respectivement, ainsi que les courants i_{as1} et i_{as2} , ont une évolution exponentielle de $t = 1.6s$ à $t = 3.8s$, où ils se stabilisent et prennent une forme sinusoïdale avec une valeur crête de 222.6V pour les tensions et 2.8A pour les courants statoriques, à une fréquence d'environ 50Hz. Le courant de magnétisation suit une évolution exponentielle pendant la période de [1.6s à 3.8s], puis se stabilise à une valeur de 6.89A.

Le couple électromagnétique de la GASDE est initialement très faible (quasiment nul) de $t = 0$ à $t = 1.6s$, car les courants sont également faibles (le couple étant lié aux courants). Ensuite, il augmente fortement pendant la période de [1.6s à 3.8s]. En régime établi, le couple électromagnétique a une valeur constante de 0.44N.m.

On se pose que la vitesse d'entraînement de la GASDE est considérée comme constante égale 314.5 rad/s

2.15 Influence des capacités sur la forme de la tension

Pour étudier l'influence des capacités sur les tensions de la GASDE, on fait tourner le rotor de la GASDE à une vitesse de synchronisme. Les enveloppes des tensions v_{as1} et v_{as2} sont représentées pour analyser les résultats.

Trois tests sont effectués pour cette étude :

- *Premier test:* $C1 = C2 = 35\mu\text{F}$;

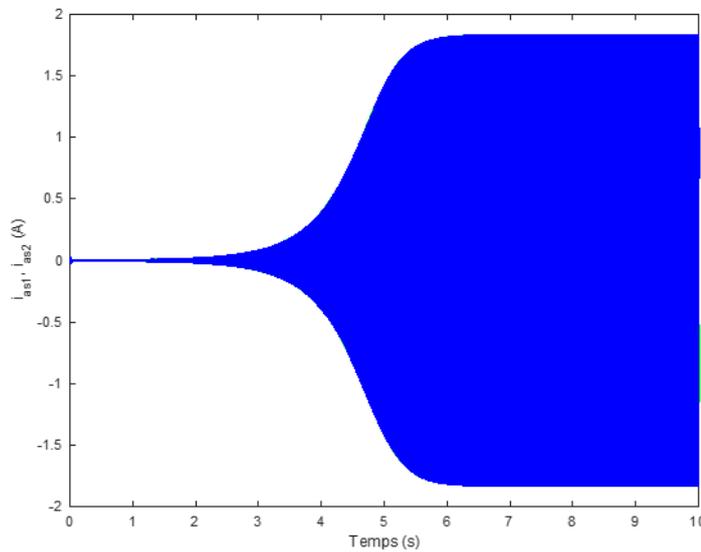


Figure 2.11 : Les tensions ias1, ias2 (A).

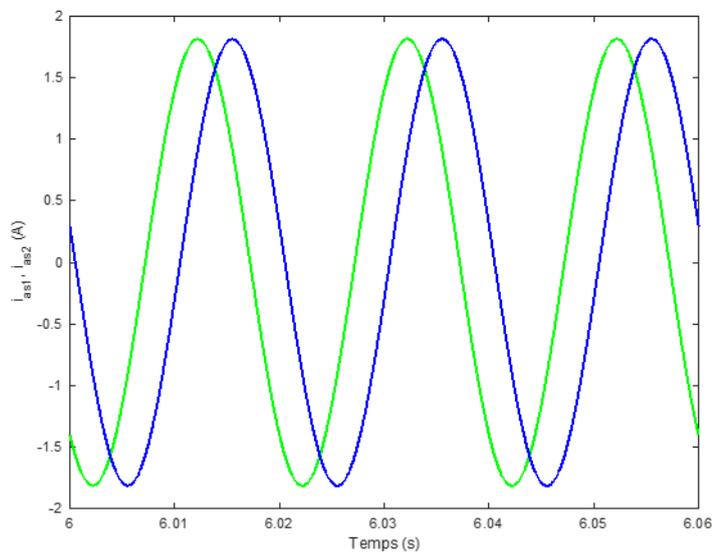


Figure 2.12 : Zoom des courants ias1, ias2 (A).

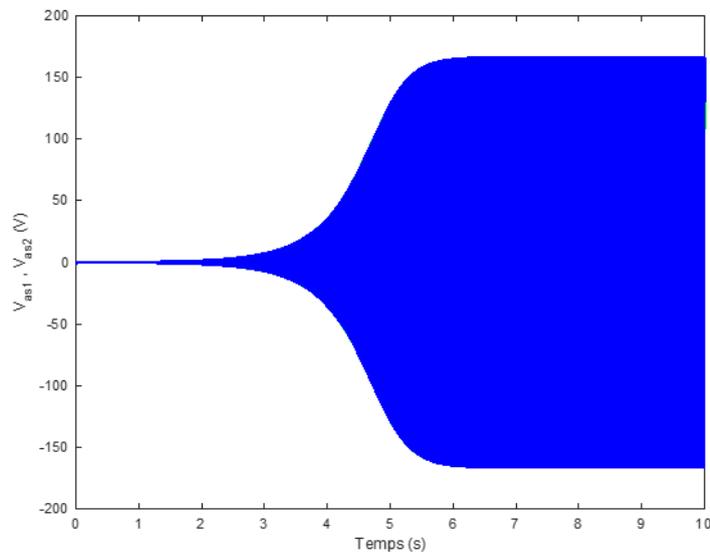


Figure 2.13 : Les tensions V_{as1} , V_{as2} (V).

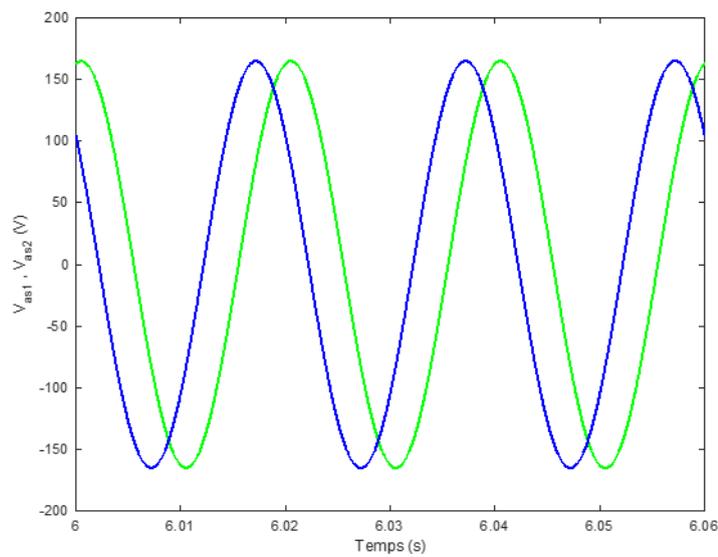


Figure 2.14 : Zoom des tensions V_{as1} , V_{as2} (V).

- *Deuxième test* : $C1 = C2 = 60\mu\text{F}$;

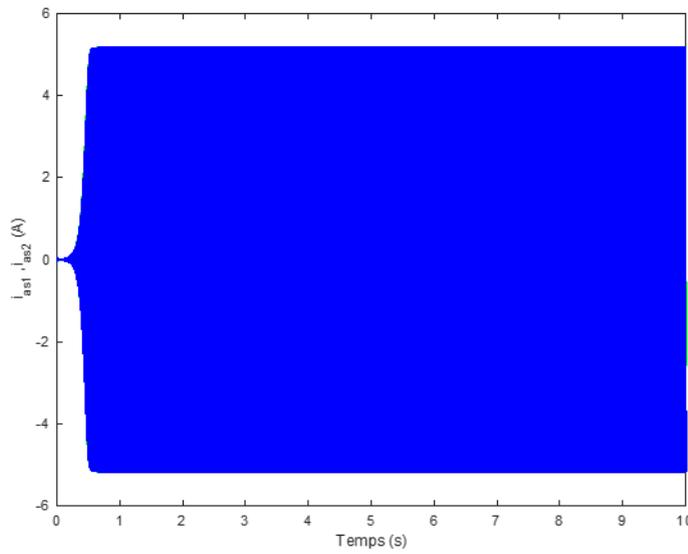


Figure 2.15 : Les courants i_{as1} , i_{as2} (A).

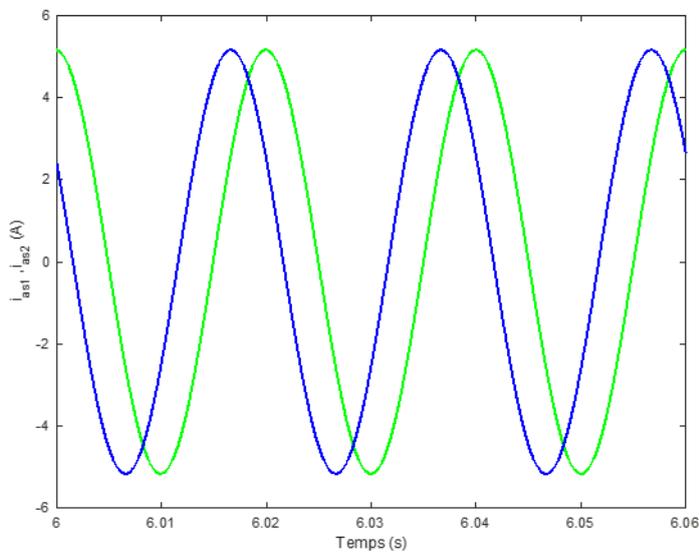


Figure 2.16 : Zoom des courants (A).

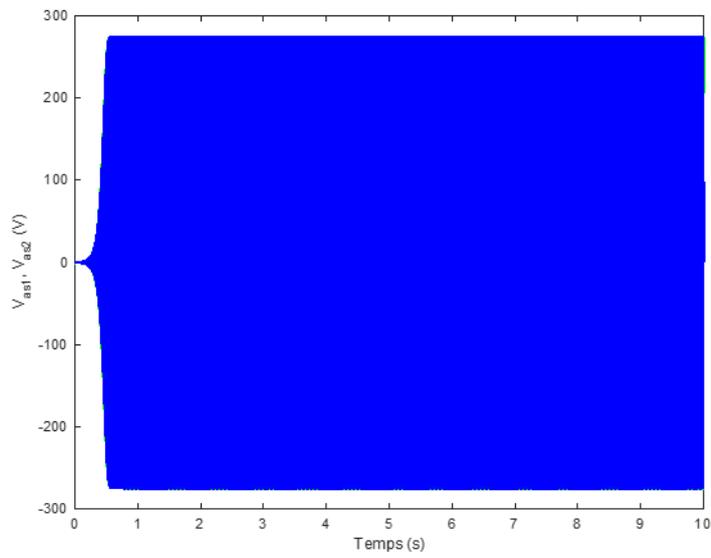


Figure 2.17 : Les tensions Vas1, Vas2 (V).

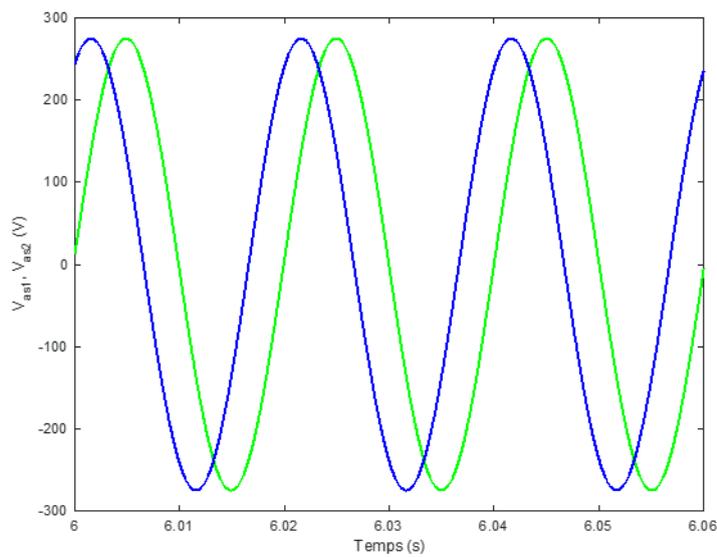


Figure 2.18 : Zoom des tensions Vas1, Vas2 (V).

- *Troisième test* : $C1 = 35\mu\text{F}$, $C2 = 60\mu\text{F}$.

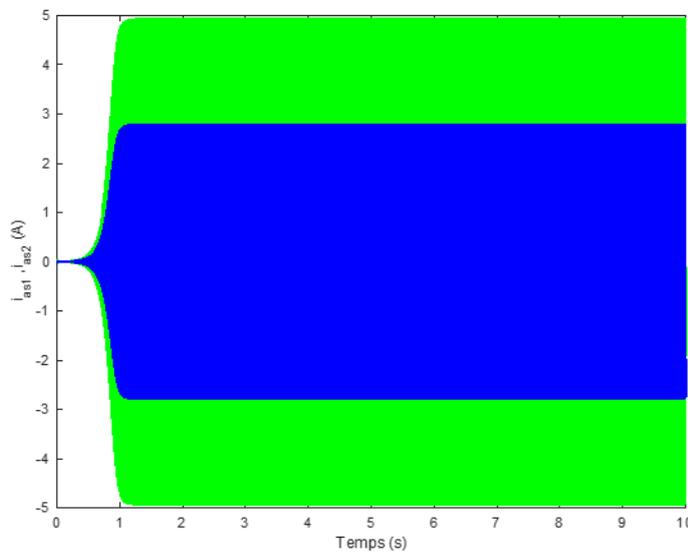


Figure 2.19 : les courants i_{as1} , i_{as2} (A).

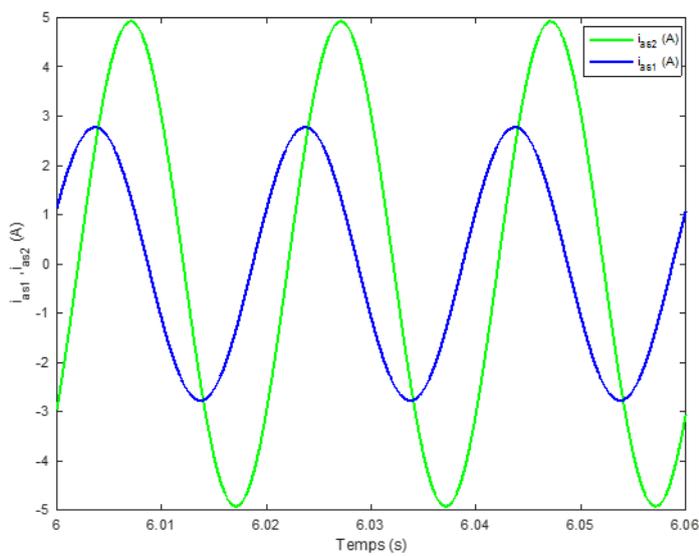


Figure 2.20 : Zoom des courants i_{as1} , i_{as2} (A).

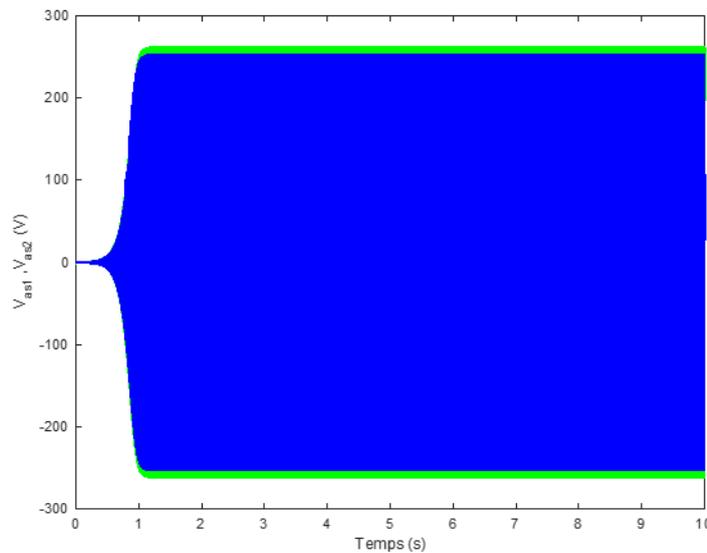


Figure 2.21 : Les tensions Vas1, Vas2 (V).

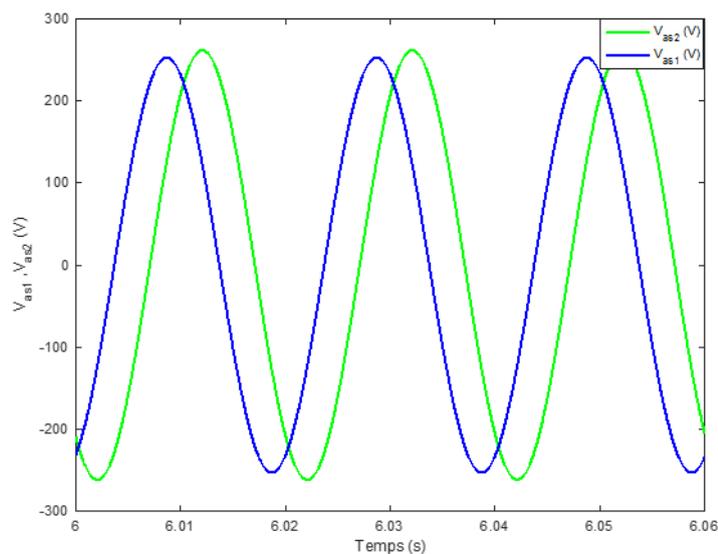


Figure 2.22 : Zoom des tensions Vas1, Vas2 (V).

2.16 Discussion des résultats

L'influence des capacités sur les tensions générées par la GASDE se manifeste de plusieurs manières :

- Le régime transitoire (où les tensions se stabilisent à vide), diminue à mesure que les valeurs des capacités augmentent. Les durées correspondantes sont de 2.3s, 1.2s et 0.6s pour les tests 1, 2 et 3 respectivement. En revanche, la tension augmente avec l'augmentation des valeurs des capacités. La valeur crête de vas1 à vide est de 223V, et de 224V, pour vas2.

Lorsque $C_1 = C_2$, les valeurs des tensions sont identiques dans le test 1 et 2, tandis que dans le test 3, les tensions sont différentes.

2.17 Influence de la vitesse d'entraînement sur la forme de la tension

Pour étudier l'influence de la vitesse d'entraînement sur la tension (amplitude et fréquence), des tests ont été réalisés à quatre vitesses différentes ($\omega_{r1} = 330$ rad/s, $\omega_{r2} = 300$ rad/s, $\omega_{r3} = 290$ rad/s) avec une valeur fixe de capacité $C_1 = C_2 = 40\mu\text{F}$. Les formes des tensions V_{as1} et V_{as2} sont représentées ci-dessous.

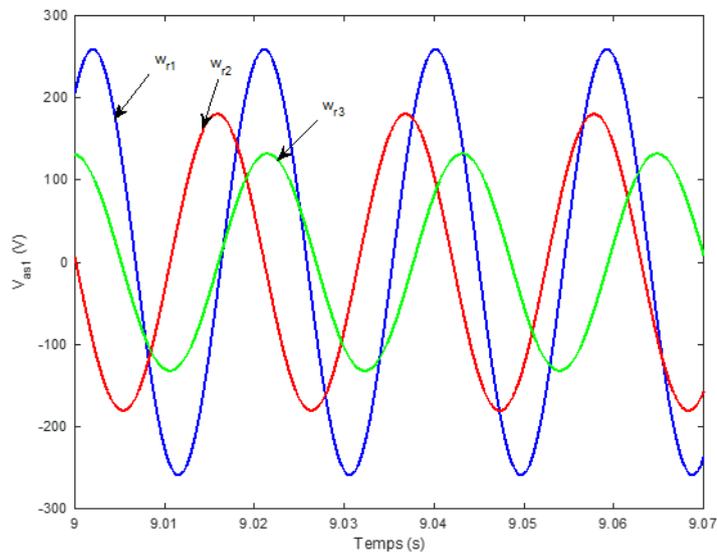


Figure 2.23 : La tension v_{as1} pendant les 3 tests.

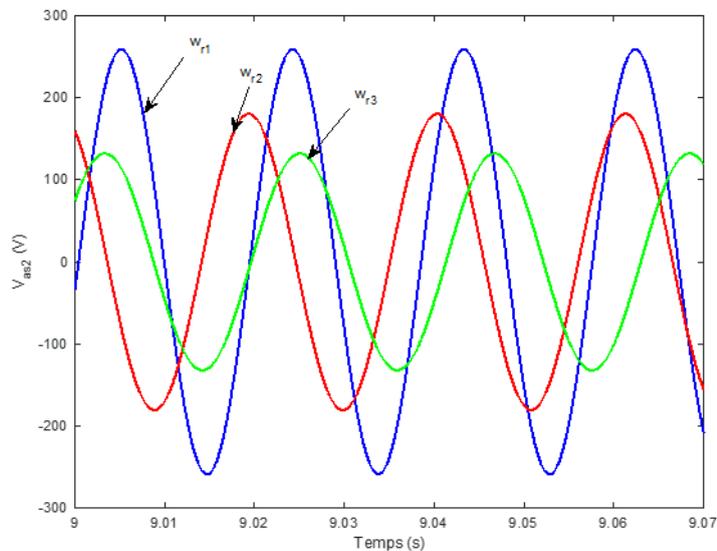


Figure 2.24 : La tension V_{a2} pendant les 3 tests**2.18 Discussion des résultats**

La vitesse a une influence sur les deux tensions v_{a1} et v_{a2} en termes d'amplitude. Pour $\omega_1 > \omega_2 > \omega_3$, on observe des tensions de valeurs crêtes $v_1 = 253V > v_2 = 180V > v_3 = 130V$ (Fig. 2.23). (2.24).

Le temps de réponse (t_r) diminue avec l'augmentation de la vitesse : $t_{r3} = 8.5s$, $t_{r2} = 4.3s$, $t_{r1} = 2.4s$. La fréquence est également influencée par la vitesse d'entraînement : $f_3 = 45.45Hz < f_2 = 47.61Hz < f_1 = 50Hz$.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé et simulé la GASDE auto-excité en régime de saturation.

Les résultats de simulations montrent l'influence de plusieurs paramètres tel que : la vitesse du rotor, la valeur de capacité de condensateur sur la forme (l'amplitude + la fréquence) des tensions V_{a1} , V_{a2} ainsi que sur la forme des courants i_{a1} , i_{a2} .

Chapitre 3

Étude la fonction de couplage de la turbine avec GASDE

3.1 Introduction

Dans cette partie nous parlons sur le couplage d'une turbine avec GASDE, ainsi la détermination des conditions de couplage nécessaires pour obtenir des meilleurs résultats, puis la description de ce système en générale, et on va faire la simulation de ce système, et commenter sur les résultats obtenus

3.2 Conditions de couplage aux réseaux

Les conditions de couplage d'une turbine avec une génératrice dépendent du type de système et des spécifications techniques de chaque composant. Cependant, voici quelques conditions générales qui sont généralement requises pour assurer un couplage approprié :

Correspondance des caractéristiques de puissance : La puissance nominale de la génératrice doit être compatible avec la puissance de sortie de la turbine. Il est essentiel de s'assurer que la génératrice peut gérer la puissance fournie par la turbine sans surcharge ni sous-charge.

Correspondance de la fréquence : La fréquence de sortie de la génératrice doit être synchronisée avec la fréquence du réseau électrique ou avec d'autres sources d'alimentation déjà connectées au réseau. Dans de nombreux pays, la fréquence standard du réseau est de 50 Hz ou 60 Hz, et la génératrice doit être conçue pour générer une fréquence correspondante.

Correspondance de la tension : La tension nominale de la génératrice doit correspondre à la tension du réseau électrique ou à la tension requise par les charges connectées. Des transformateurs ou d'autres dispositifs de régulation de tension peuvent être utilisés pour adapter la tension de la génératrice aux besoins spécifiques du réseau ou des charges.

Synchronisation : Avant le couplage, la génératrice doit être synchronisée avec le réseau électrique existant ou avec d'autres génératrices déjà en fonctionnement. Cela implique de faire correspondre la phase, la fréquence et la tension de la génératrice avec celles du réseau, afin de permettre un transfert d'énergie fluide et sans perturbations.

Protection contre les surintensités : Des dispositifs de protection appropriés, tels que des disjoncteurs et des fusibles, doivent être installés pour détecter et interrompre les surintensités potentielles qui pourraient endommager la génératrice ou le réseau électrique en cas de court-circuit ou de surcharge.

Contrôle de la vitesse : Dans certains systèmes, une régulation précise de la vitesse de la turbine peut être nécessaire pour maintenir une fréquence stable du réseau. Des dispositifs de contrôle de la vitesse, tels que des régulateurs de gouverne, peuvent être utilisés pour ajuster la vitesse de rotation de la turbine en fonction des variations de la demande électrique.

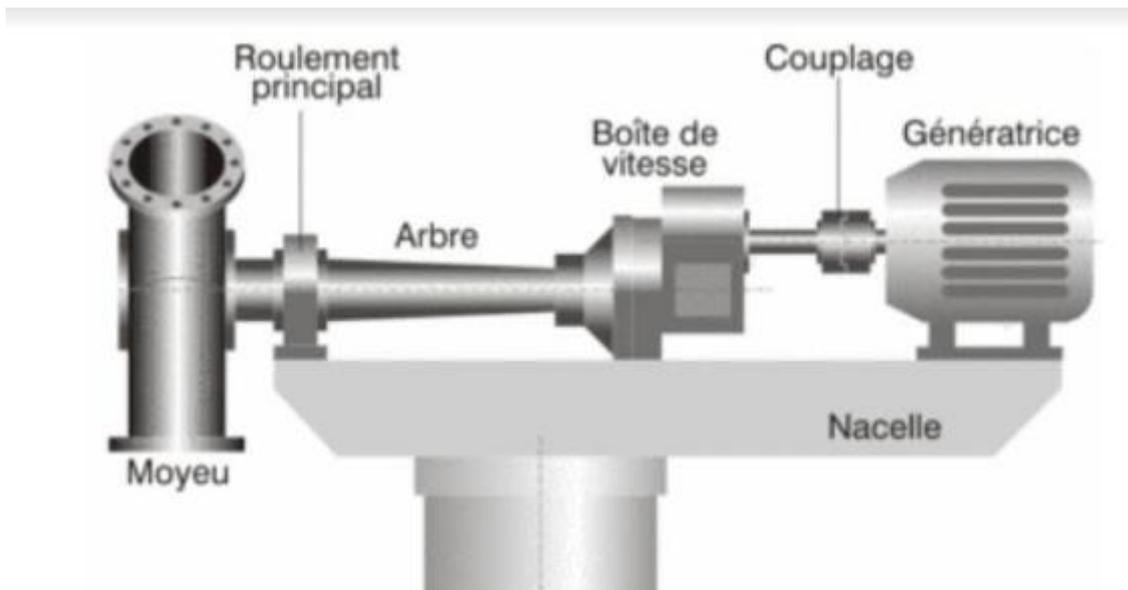


Figure 3.1: Illustration de la transmission entre le couple moteur appliqué sur les pals
Et la génératrice

3.3 Conditions de couplages mécaniques

Le même axe de rotation

Le freine manuelle pour protéger la turbine contre les sur vitesse

3.4 Descriptions de système

Une éolienne à base d'une génératrice asynchrone est un système utilisé pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique. Ce type d'éolienne est également connu sous le nom d'éolienne à induction ou d'éolienne à rotor bobiné. Voici une description générale de son fonctionnement :

Rotor : L'éolienne comprend un grand rotor doté de pales qui capturent l'énergie cinétique du vent. Lorsque le vent souffle, il fait tourner le rotor.

Génératrice asynchrone : La génératrice asynchrone, également appelée génératrice à induction, est le cœur du système. Elle est composée de deux parties principales : le rotor et le stator.

Rotor : Le rotor de la génératrice asynchrone est constitué d'enroulements électriques alimentés par un courant alternatif. Ce courant crée un champ magnétique tournant à l'intérieur du rotor.

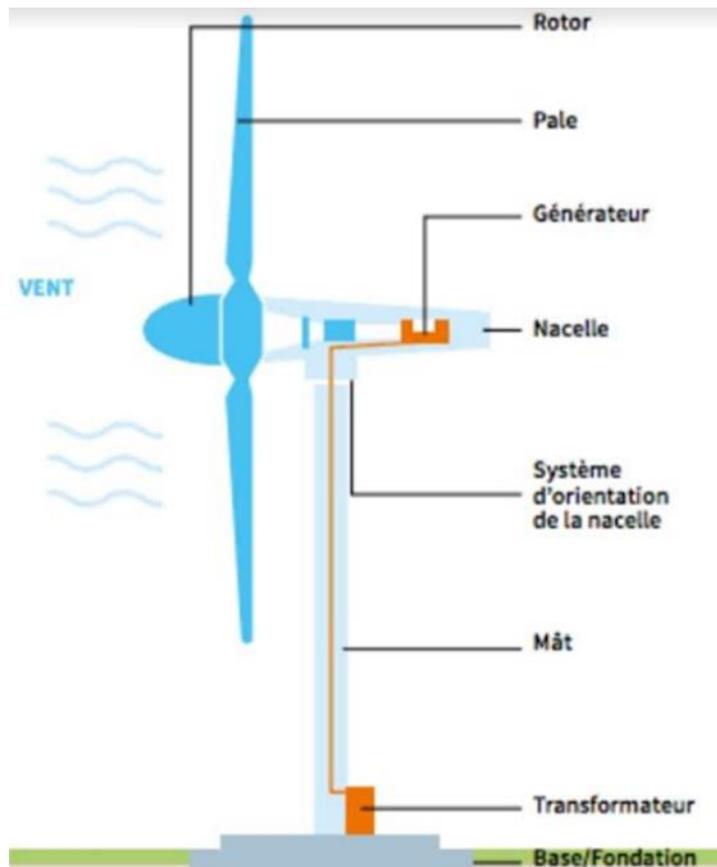


Figure 3.2 : Présentation d'un rotor d'éolienne.

Stator : Le stator est fixe et entoure le rotor. Il est également équipé d'enroulements électriques. Lorsque le rotor tourne, le champ magnétique tournant induit un courant électrique dans les enroulements du stator.

Conversion de l'énergie : Le courant électrique généré dans les enroulements du stator est ensuite envoyé vers un convertisseur d'énergie qui transforme le courant alternatif (CA) généré par la génératrice asynchrone en courant continu (CC) utilisable. Ce convertisseur permet d'adapter la tension et la fréquence du courant électrique à celle du réseau électrique auquel l'éolienne est connectée.

Il convient de noter que les éoliennes à génératrice asynchrone ont certains avantages par rapport à d'autres types d'éoliennes, tels que leur simplicité de conception, leur faible coût de fabrication et leur bonne capacité à s'adapter à des vitesses de vent variables. Cependant, elles peuvent nécessiter des systèmes de contrôle plus sophistiqués pour maintenir la synchronisation avec le réseau électrique et assurer une production d'énergie optimale.



Figure 3.3 : Les différents composants de système éolien.

3.5 Les principales machines utilisées dans un système éolien sont

Éolienne (ou turbine éolienne) : C'est la machine principale qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Génératrice asynchrone à cage d'écureuil : C'est la machine qui transforme l'énergie mécanique fournie par l'éolienne en énergie électrique. Elle fonctionne en tant que générateur et produit de l'électricité.

Convertisseur de puissance : C'est un composant électronique qui régule la tension et la fréquence de l'électricité produite par la génératrice, pour la rendre compatible avec le réseau électrique ou pour charger des batteries.

Système de contrôle et de surveillance : Il s'agit d'un ensemble de capteurs, d'instruments et de logiciels qui supervisent et contrôlent le fonctionnement de l'éolienne. Ils mesurent des paramètres tels que la vitesse du vent, la direction, la température, la production d'électricité, etc.

Système de transmission : C'est le mécanisme qui transmet la puissance mécanique de l'éolienne à la génératrice. Il peut être composé d'un multiplicateur de vitesse pour augmenter la vitesse de rotation de l'arbre de l'éolienne et d'une boîte de vitesses pour adapter cette vitesse à la génératrice.

Mât et structure de support : Ce sont les éléments physiques qui soutiennent l'éolienne, y compris le mât qui élève la turbine à une hauteur optimale pour capter le vent, ainsi que les fondations nécessaires pour garantir la stabilité de l'ensemble.

Ces différentes machines travaillent en collaboration pour produire de l'électricité à partir de l'énergie éolienne.

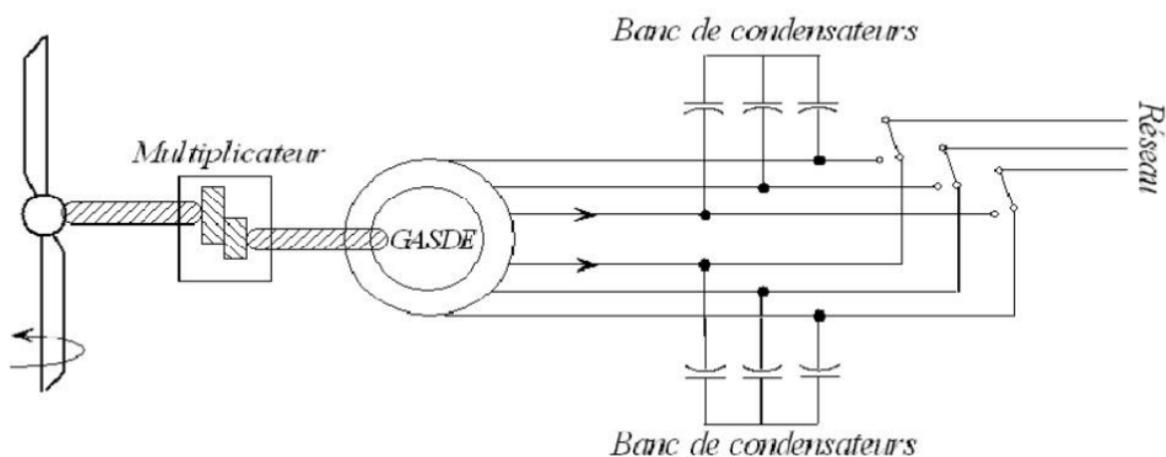


Figure 3.4 : Système éolien à vitesse fixe basé sur la GASDE.

3.6 Simulation du système (turbine avec GASDE)

Nous allons intégrer la turbine avec la génératrice asynchrone double étoile par le MATLAB/SIMULINK et nous obtenons les résultats suivants :

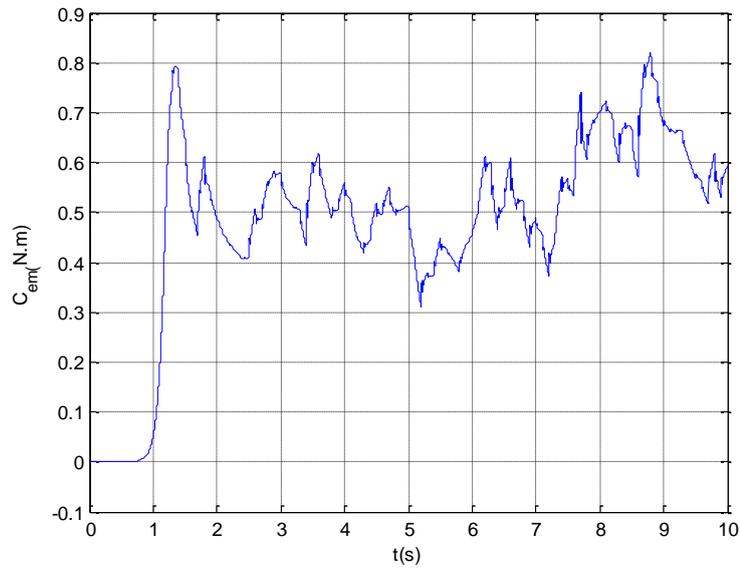


Figure 3.5 : Le couple électromagnétique (N.m).

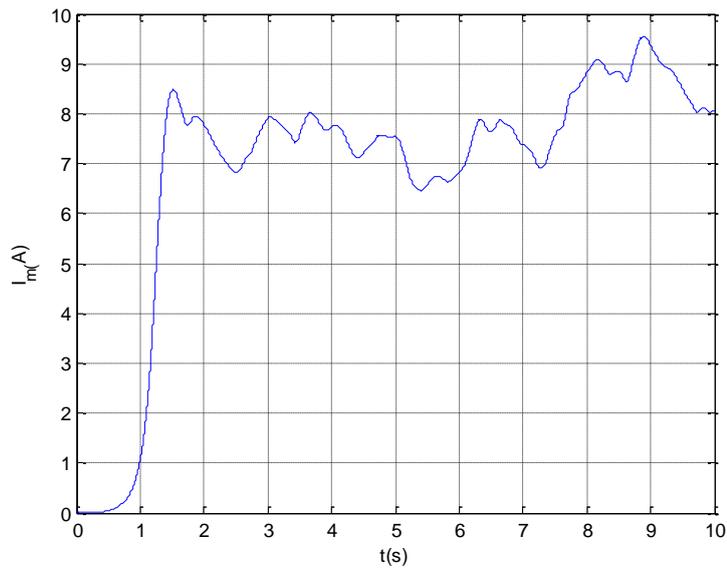


Figure 3.6 : Le courant de magnétisation I_m (A).

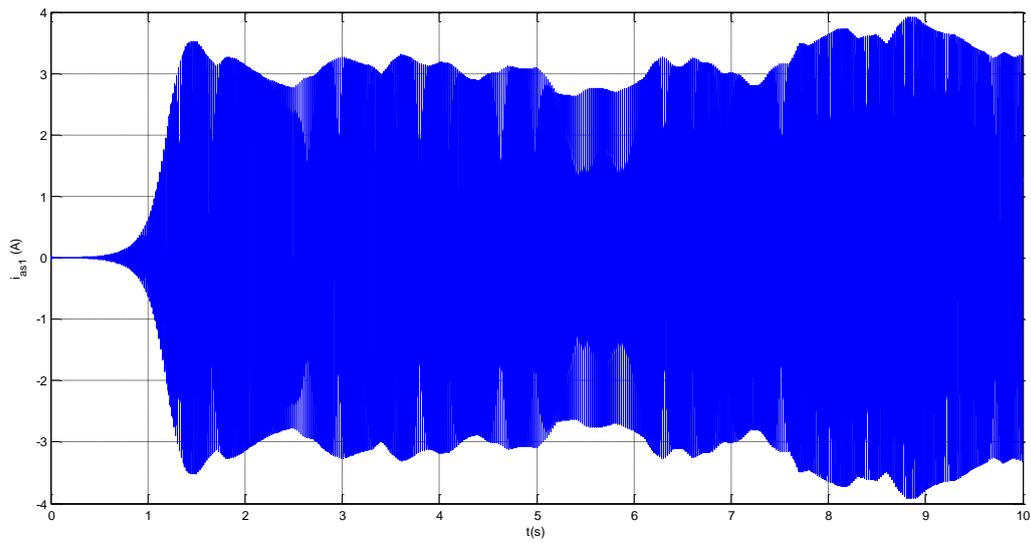


Figure 3.7 : Le courant i_{as1} (A).

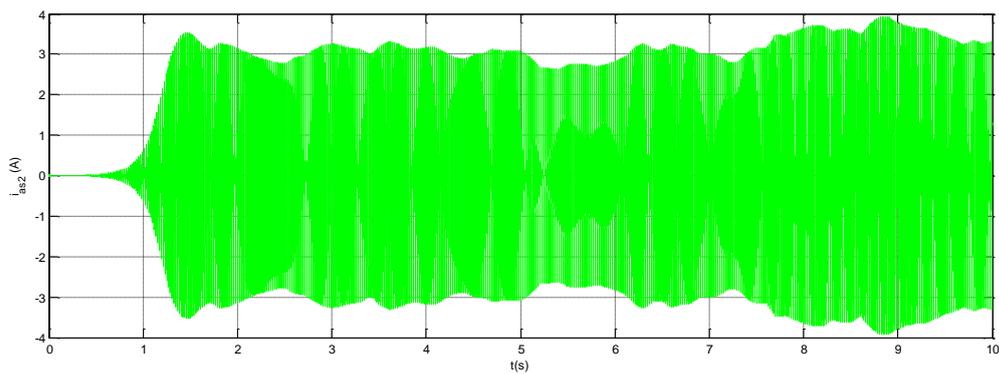


Figure 3.8 : Le courant i_{as2} (A).

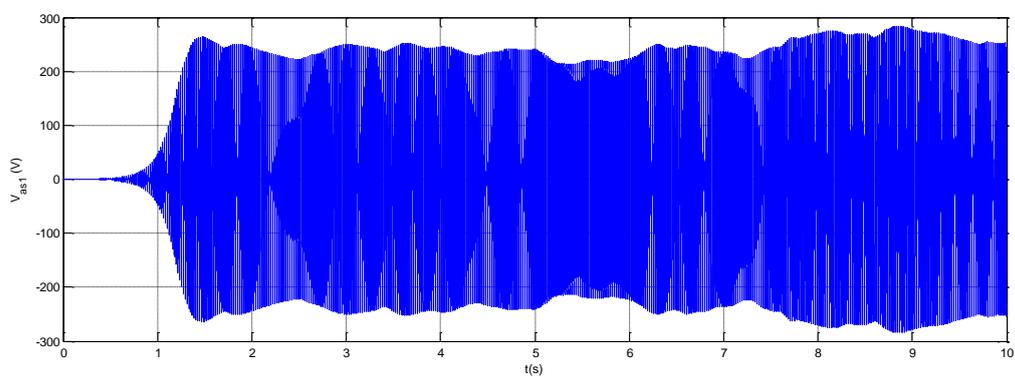


Figure 3.9 : La tension V_{as1} (V).

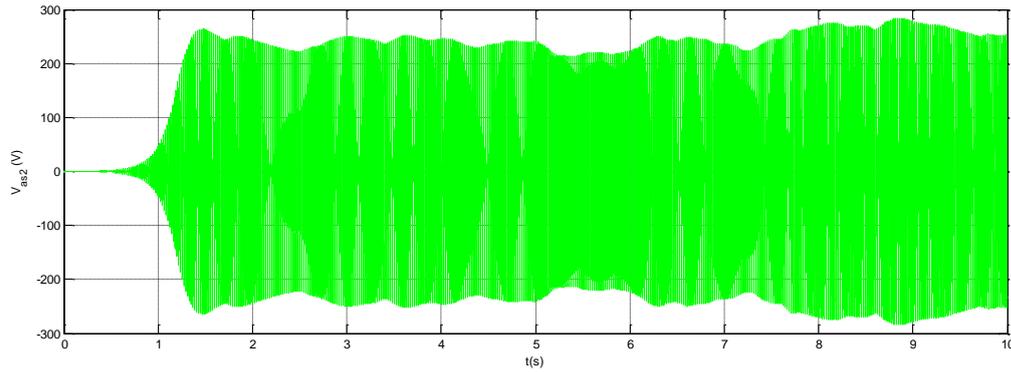


Figure 3.10 : La tension Vas2 (V).

3.7 Interprétation des résultats

La forme de l'enveloppe des amplitudes des tensions / courants sont similaires à celle de la vitesse de la turbine par conséquent la fréquence est infectée.

La figure 3.5, représentant le couple électromagnétique (C_{em}) est similaire en forme à la vitesse de la turbine. Ainsi que le courant de magnétisation (I_m).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons couplé la turbine étudiée dans le premier chapitre avec la génératrice asynchrone double étoile étudiée dans le deuxième chapitre, et nous avons obtenu les résultats par simulation en appliquant des conditions de couplage, et nous avons vu l'effet d'une vitesse de vent irrégulière sur les courants et les tensions.

Conclusion générale

Conclusion générale

La problématique abordée dans ce mémoire nous a permis d'étudier le fonctionnement d'aérogénérateur basé sur la GASDE.

Pour alimenter en énergie des zones isolées, est devenu coûteux. Car il doit être raccordé aux réseaux électriques sur de longues distances, et c'est ce qui est fatigant, ardu et coûteux.

Le système étudié dans ce projet est la solution la plus appropriée, l'énergie éolienne étant considérée comme l'une des énergies renouvelables et propres. Il peut également fournir de l'électricité à des zones isolées.

Nous avons commencé notre mémoire par le premier composant de ce système. C'est la turbine, nous avons donné un bref historique de la façon dont il été utilisé depuis les temps anciens, nous avons également aborde ses différents entre ces axes et sont avantages. Et nous avons modélisé puis simulé cette turbine.

Dans le deuxième chapitre nous avons étudié la GASDE auto-excité et son principe de fonctionnement outre son importance et ses risques. Nous avons simulé cette génératrice en fonction à vide et obtenu les résultats mentionnes au chapitre 2.

Dans le troisième chapitre nous avons couplé la turbine avec la génératrice asynchrone double étoile, aussi nous avons mentionné dans ce chapitre les conditions de couplages mécaniques entre la turbine et la GASDE et les conditions de couplages dans les réseaux.

Et les simulations du système, et nous obtenu les résultats de notre simulations

Perspectives

- Commande de système à vitesse fixe.
- Etude la GASDE connecté au réseau.

Annexe

Paramètres de la Génératrice Asynchrone Double Etoile

Les paramètres de la Gasde utilisée sont [15] :

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

Tension à vide	$V_n = 158 \text{ V}$
Courant à vide	$I_n = 2 \text{ A}$
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	$l_r = 0,0132 \text{ H}$
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	$p = 2$

Paramètres de la turbine

Nombres des pales	3 pales
Gain de multiplicateur de vitesse	8.3
Puissance nominal de turbine	7.5 Kw
Beta	2
P	1.225 Kg.m ³ Densité volumique de l'air
Rayon de l'éolienne	R= 3 m

Bibliographie

- [1] <https://www.afd.fr/fr/carte-des-projets/une-energie-renouvelable-pour-repondre-la-demande-croissante-d-électricité>.
- [2] Mr. SAIDI Yazid & Mr. YAHIAOUI Yahia, « Etude et réalisation d'une turbine éolienne », mémoire master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia (2014).
- [3] HERISSI Belgacem, « Commande d'une Eolienne basée sur les modèles flous de Takagi-Sugeno », mémoire master, UNIVERSITÉ LARBI TEBESSI-TÉBESSA(2015).
- [4] <https://www.conservation-nature.fr/ecologie/la-production-denergie/energie-eolienne/>
- [5] <https://classe-export.com/index.php/actus/56102-une-percee-historique-de-energie-eolienne-dans-le-monde-en-2021/>
- [6] Dr Ouahiba GUERRI Maitre de Recherche Classe A Directrice de la Division Energie Eolienne. « L'énergie éolienne en Algérie », 2014 E-mail: o.guerri@cder.dz
- [7] AIT KACI Djedjiga, BOUBOUZAL Naïma, « étude et simulation d'un aérogénérateur » mémoire de magister, université mouloud Mammeri 2009.
- [8] Saki Ali, belaidi Mourad, « étude d'un générateur asynchrone dans la production d'énergie électrique par éolienne » mémoire de magister, E.N.P .10 avenue hassenbadi EL-HARRACH 2006.
- [9] T. Saci, « Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation » ; Thèse de magister, 2008.
- [10] Islam Jar Allah Boulegroune, « Etude et réalisation d'une turbine éolienne », mémoire de master, université de Biskra 2020.
- [11] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed et H. Benalla, « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation », article, Revue des Energies Renouvelables Vol.N°1 pp 109_120, université mentouri, costantine 2011.

[12] Boukais Mahrez, Aliouat Malik, « Etude et modélisation d'une génératrice asynchrone à double étoile : application dans un système éolien », mémoire de master académique, université mouloud mammri, Tizi-Ouzou, 2014.

[13] Berkan Tahar, Khaled foudil, « Etude par simulation d'une génératrice asynchrone double étoile en fonctionnement autonome », mémoire master, université de Abderrahmane mira, Bejaia 2019.

[14] Yousfi djaouida, « commande par la logique floue d'une génératrice asynchrone double étoile en fonctionnement autonome », université de Abderrahmane mira, Bejaia, 2021.

[15] Elkheir Merabt, « commande flou adaptive d'une machine asynchrone double étoile », mémoire de magister, université de Batna, 2008

