



UNIVERSITE ABDERRAHMANE
MIRA – BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE
ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue d'obtention du diplôme Master en Electromécanique

Option : Electromécanique.

Thème :

***Etude pratique et par simulation d'un émulateur
de vent à base d'une machine à courant continu***

Présenté par :

Bekkouche Koussaila

Encadré par :

M^r D.Aouzellag

M^r E.Amirouche

Promotion 2023-2024

Remerciements

Avant tout commencement je remercie Allah tout puissant de m'a donné la force et patience et le courage durant toutes ses années d'études.

Je tiens à adresser mes remerciements les plus chaleureux et profonde gratitude à Messieurs : Djamel Aouzellag et Elyazid Amirouche pour les encouragements, les orientations, les conseils précieux, la confiance et l'aide qu'il me a accordé pour mener ce travail à terme.

Mes s'insère remerciements pour les membres de jury pour le temps et l'énergie fournis pour lire et apprécier ce travail.

Je remercie aussi tous les enseignants qui m'ont enseignés durant toutes ces années pour leurs sérieux et sans réserve.

Je remercie aussi tous mes chères et mes proches qui ont été toujours là pour moi de près ou de loin.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui sont la source de mon éducation, mon savoir et mes principes et à cette occasion je vous dis merci d'avoir consacré votre vie pour bâtir la mienne.

A mes chers frères et chers sœurs pour leurs soutiens, qui m'ont aidé à tracer un tel chemin de réussite.

Je dédie également ce travail à mes amis qui m'ont soutenu pendant cette magnifique expérience dont je cite : Adel, Akli, Khireddine, Walid.

A toute la promotion électromécanique 2023/2024.

KOUSSAILA

Table des matières

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iii
Abréviations	iv
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne et les émulateurs

1. Introduction	2
2. Histoire de l'énergie éolienne.	2
3. Énergie éolienne dans le monde.	3
4. Énergie éolienne en Algérie.	4
5. Définition de l'énergie éolienne	5
6. Turbines éoliennes.	6
7. Machines Electriques utilises dans la conversion d'énergie éolienne	9
8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.	10
8.1. Avantages	10
8.2. Inconvénients.	10
9. Généralités sur les émulateurs des énergies renouvelables	11
9.1. Motifs d'émulation d'un système d'énergie renouvelable	11
9.2. Différents types d'émulateurs	11
9.2.1.Émulateur de batterie	11
9.2.2. Émulateur MCA (Analyseurs multi-canaux)	12
9.2.3.Émulateurs de systèmes d'exploitation	12
9.2.4. Émulateur d'une éolienne	12
10. Conclusion	13

Chapitre II : Modélisation des différentes parties et simulation de l'émulateur de L'éolienne étudiée

1. Introduction	14
2. Présentation du schéma global	14
3. Modélisation de la turbine éolienne.	15
4. Emulation par association de la MCC avec un hacheur série	16
5. Modélisation de la MSAP.	17
6. Simulation de l'émulateur de l'éolienne étudiée	19
6.1.Émulateur d'une éolienne par régulation de puissance de la MCC	19
6.2. Résultat et simulation :	21
7. Conclusion.	23

Chapitre III : Réalisation et étude expérimentale de l'émulateur de la chaine éolienne

1. Introduction	24
2. Description du banc d'essai et Construction de l'émulateur.	24
3. Essais expérimentaux et résultats obtenus.	26
3.1. Régulation de vitesse	26
3.2. Régulation de puissance	38
4. Conclusion	29
Conclusion générale	30
Bibliographie	v

Résumé

Table des figures

Table des figures

Fig. I-1 : Première éolienne inventée par l'Américain Charles Francis Brush 1888.	3
Fig. I-2 : Evolution des nouvelles capacités éoliennes installées.	4
Fig. I-3 : Première éolienne de pompage installée en 1953 à Adrar.	5
Fig. I-4 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.	5
Fig. I-5 : Différents types d'éoliennes.	6
Fig. I-6 : Principaux composants d'une éolienne.	7
Fig. I-7 : Constitution d'une nacelle.	8
Fig. II-1 : Schéma global de l'émulateur d'une éolienne à étudier.	14
Fig. II-2 : Association MCC –Hacheur série.	16
Fig. II-3 : Schéma du MCC à excitation séparée.	17
Fig. II-4 : Enroulements statoriques et rotoriques avant et après transformation vers un système biphasé dq relie au rotor.	18
Fig. II-5 : Schémas global émulateur d'éolienne par régulation de puissance de MCC.	20
Fig. II-6 : Vitesse du moteur en fonction du temps	21
Fig. II-7 : Coefficient de la puissance en fonction du temps	21
Fig. II-8 : Puissance DC du moteur MCC	22
Fig. II-9 : Puissance électrique du moteur et de la turbine en fonction du temps.	22
Fig. III-1 : Banc expérimental	25
Fig. III-2 : Plaques d'acier pour réaligement des arbres	25
Fig. III-3 : Vitesse du MCC	26
Fig. III-4 : Accouplement détruit	27
Fig. III-5 : Puissance DC du moteur MCC	27
Fig. III-6 : Puissance DC du MCC	38
Fig. III-7 : Tension du moteur	38
Fig. III-8 : Courant DC du MCC	29

Liste d'abréviations

Liste d'abréviations

MSAP	Machine (Moteur) synchrone à aimants permanents
GSAP	Génératrice synchrone à aimants permanents
GWEC	Global Wind Énergie Council
HAWT	Horizontal-axis wind turbines
PI	Proportionnel – Intégral
MCC	Machine à Courant Continu
VAWT	Vertical-Axis Wind Turbines
SCEE	Systèmes de conversion d'énergie éolienne
MADA	Machine asynchrone à double alimentation
MAS	Machine asynchrone à cage

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie éolienne, en tant que source d'énergie renouvelable, joue un rôle de plus en plus significatif dans la transition énergétique globale. Sa capacité à produire une électricité propre et durable en fait une technologie clé pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, la variabilité du vent pose des défis importants, notamment en termes de stabilité et de prévisibilité de la production électrique [1]. Ces défis rendent complexe l'étude et l'optimisation des turbines éoliennes dans des conditions réelles.

Pour répondre à ces défis, le développement de simulateurs avancés capables de reproduire fidèlement le comportement des turbines éoliennes dans des environnements contrôlés est crucial. Ce mémoire propose la conception et la validation d'un émulateur de turbine éolienne, visant à fournir des caractéristiques réalistes de puissance-vitesse du rotor. Ce simulateur est conçu pour permettre une étude approfondie en laboratoire et est basé sur une modélisation aérodynamique détaillée intégrée dans une simulation effectuée avec MATLAB/Simulink.

Le mémoire est structuré en trois chapitres principaux, chacun abordant un aspect clé du travail :

Dans le premier chapitre, nous présentons les bases de l'énergie éolienne, avec un aperçu historique et une analyse de sa situation actuelle à l'échelle mondiale et en Algérie. Il couvre les turbines éoliennes, leurs composants clés, et les machines électriques associées. Les avantages et inconvénients de cette technologie sont discutés, ainsi que les émulateurs d'énergies renouvelables, leur rôle, et les différents types d'émulateurs, en mettant l'accent sur l'émulateur de turbine éolienne.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation des différentes parties de l'émulateur de turbine éolienne, incluant la turbine, la machine à courant continu (MCC) avec hacheur série, la machine synchrone à aimants permanents (GSAP)

ainsi qu'une charge triphasée équilibrée autonome. Les simulations sont effectuées à l'aide de MATLAB/Simulink afin d'évaluer les performances de ce émulateur.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous avons réalisé l'émulateur de la chaîne éolienne et conduit des tests expérimentaux basés sur les modèles développés précédemment. Nous avons décrit les composants du banc d'essai, révélant quelques divergences dues à une identification incomplète des paramètres des machines (MSAP et MCC). Ces observations ouvrent des perspectives pour une meilleure calibration à l'avenir.

Finalement, une conclusion générale synthétisera les points les plus marquants de ce mémoire et récapitulera ainsi en gros le travail abordé .Nous proposerons en perspectives quelques axes de recherche.

Chapitre I :
Généralités sur l'énergie éolienne
et les émulateurs

1. Introduction

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable en pleine expansion, exploitant la force du vent pour produire de l'électricité de manière durable. Ce chapitre aborde les principaux aspects de cette technologie, en commençant par l'histoire de l'énergie éolienne, suivie de l'énergie éolienne dans le monde et en Algérie. Nous définirons l'énergie éolienne et explorerons les turbines éoliennes, y compris les principaux composants et les machines électriques utilisées pour la conversion de l'énergie éolienne. Nous discuterons des avantages et inconvénients de cette technologie, avant de nous pencher sur les émulateurs d'énergies renouvelables, leur émulation, les motifs d'émulation, les différents types d'émulateurs, et enfin, l'émulateur d'une éolienne. Ce survol des généralités et des outils modernes permettra de mieux comprendre les performances et les optimisations possibles dans le domaine de l'énergie éolienne.

2. Histoire de l'énergie éolienne

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable [2].

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poule La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [2].

Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle [2]. La figure I-1 représente la première éolienne inventée par l'Américain Charles Francis Brush.

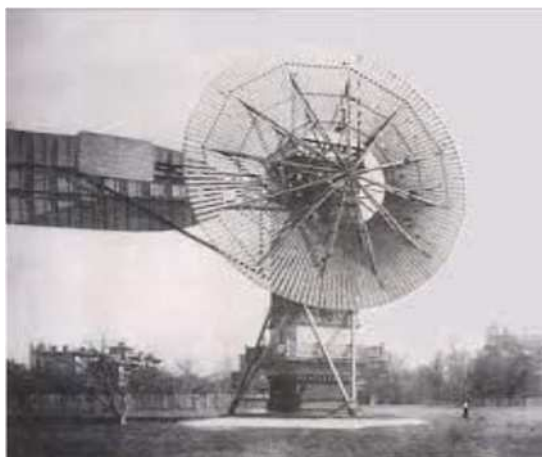


Fig.I-1 : Première éolienne inventée par l'Américain Charles Francis Brush 1888 [3]

3. Énergie éolienne dans le monde

Le GWEC (Global Wind Énergie Council) a publié le 4 avril son Global Wind Report 2022, voici ci-après quelques grandes données chiffrées de l'organisme défendant les intérêts de la filière éolienne au niveau international [4].

En 2021, la filière éolienne a connu, en matière de nouvelles installations, « la 2eme meilleure année de son histoire » au niveau mondial (après 2020) : 93,6 GW de nouvelles capacités éoliennes ont été déployées, portant la puissance du parc mondial en fin d'année à 837 GW (soit 12% de plus qu'à fin 2020) [4].

Sur ce total, le GWEC répertorie 72,5 GW de nouvelles éoliennes terrestres, soit une chute de 18% par rapport au niveau de 2020 en raison d'un ralentissement dans les deux principaux pays de développement de la filière : la Chine et les États-Unis (la fin de tarifs d'achats garantis en Chine en 2021 a causé une chute de 39% des installations dans ce pays par rapport à l'année 2020) [4].

L'éolien offshore a connu sa meilleure année historique, avec 21,1 GW de nouvelles installations, soit près de trois fois plus que l'année précédente. Cela porte la capacité cumulée des éoliennes offshore dans le monde à 57 GW à la fin de 2021. La Fig. I-2 illustre l'évolution des nouvelles capacités éoliennes installées.

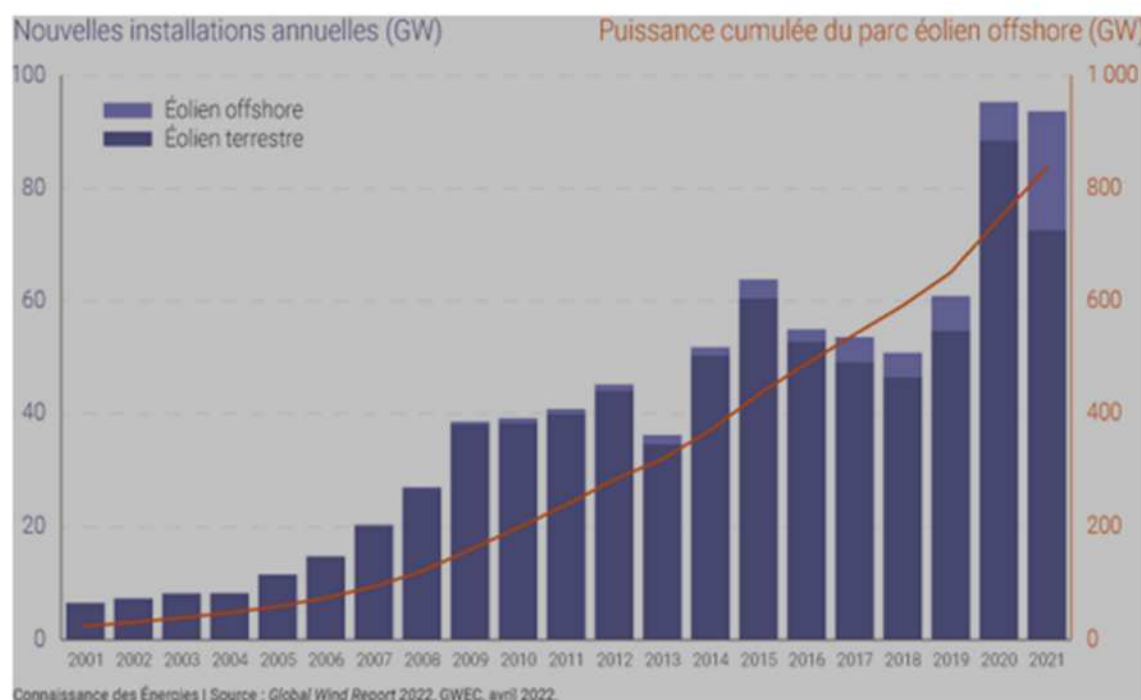


Fig. I-2 : Evolution des nouvelles capacités éoliennes installées [4]

4. Énergie éolienne en Algérie

La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur un mat de 25 mètres de hauteur (figure I-3), cette machine à trois pales de 15 m de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans [5].

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site de Grand Vent (Alger). Conçue par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-ALBAN en Angleterre. Cette bipale de type pneumatique, à pas variable, de 30 m de haut et avec un diamètre de 25 m fut rachetée par Electricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie. Par la suite, de nombreux autres aérogénérateurs, de plus petites puissances, ont été installés en différentes locations, notamment pour l'alimentation de localités isolées ou à accès difficile telles que les installations de relais de télécommunications. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Il est à noter que ce constat était également valable même à l'échelle internationale [6].



Fig. I-3 : Première éolienne de pompage installée en 1953 à Adrar [6]

5. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable, propre et durable. Elle permet de capter l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité via un processus de conversion. Une éolienne, également appelée aérogénérateur, est un dispositif qui convertit une fraction de cette énergie cinétique en énergie mécanique, laquelle est ensuite transformée en électricité. La figure I-4 illustre le processus de conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité [7] [8].

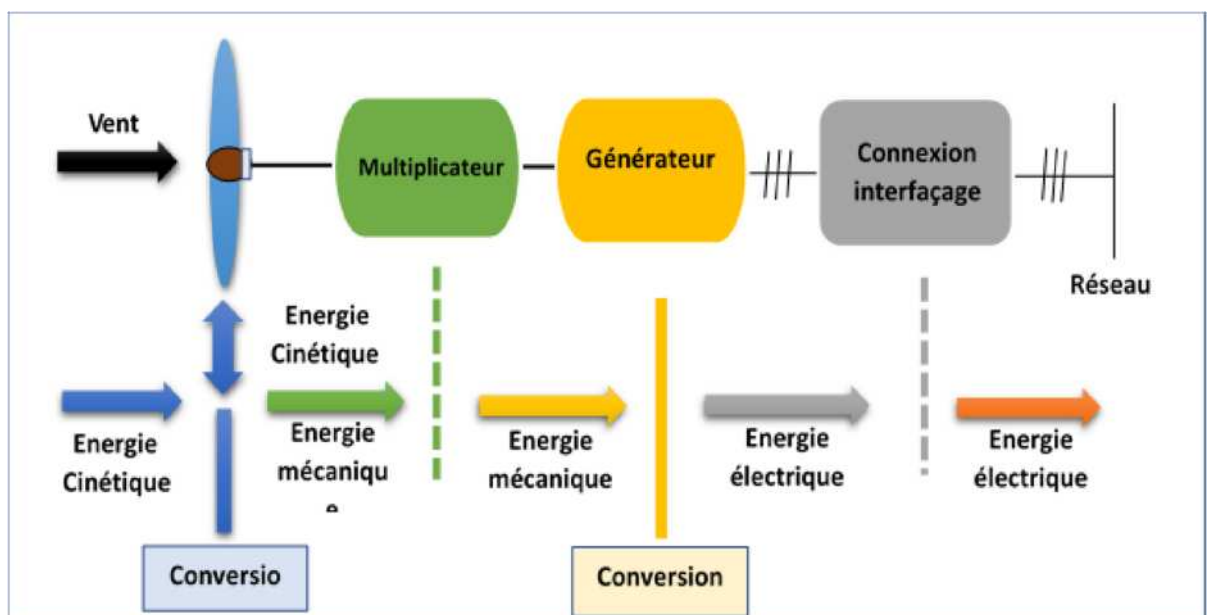


Fig. I-4 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [9]

6. Turbines éoliennes

Les turbines éoliennes se divisent en deux catégories principales selon l'orientation de leur axe de rotation : les turbines à axe horizontal (HAWT) et les turbines à axe vertical (VAWT). La majorité des éoliennes installées sont à axe horizontal, en raison de plusieurs avantages, tels qu'une faible vitesse de démarrage et un coefficient de puissance relativement élevé. Cependant, le positionnement du multiplicateur de vitesse et du générateur électrique en haut de la tour entraîne des défis mécaniques et économiques, compliquant les opérations de maintenance. La figure.I-5 illustre les différents types d'éoliennes.

Les HAWT peuvent avoir un, deux ou trois pales, voire plus. La plupart des turbines en service sont tripales, offrant une plus grande stabilité grâce à une répartition uniforme des charges aérodynamiques, et elles atteignent aujourd'hui les meilleurs coefficients de puissance. En fonction de leur orientation par rapport au vent, les turbines à axe horizontal se classent en deux types : les turbines dites "en amont" (up-wind) et celles "en aval" (down-wind). Les turbines en amont reçoivent directement le flux d'air, mais nécessitent un système de girouette pour orienter constamment les pales face au vent. Les turbines en aval n'ont pas besoin de ce mécanisme, mais subissent des charges aérodynamiques irrégulières lorsque les pales passent dans l'ombre de la tour. Les turbines en amont dominent largement le marché des éoliennes.

Les turbines à axe vertical (VAWT) captent le vent quelle que soit sa direction, éliminant ainsi la nécessité d'un dispositif d'orientation. De plus, le générateur électrique et les équipements annexes sont installés au sol, facilitant l'accès et réduisant les coûts de maintenance. Toutefois, les principaux inconvénients des VAWT incluent un rendement aérodynamique plus faible et une captation réduite et irrégulière du vent, souvent perturbée par des turbulences au niveau du sol [10].



Fig. I-5 : Différents types d'éoliennes [11]

Principaux composants d'une éolienne

Les éoliennes transforment l'énergie du vent en électricité à travers deux étapes. La première consiste à capter l'énergie cinétique du vent à l'aide de la turbine (rotor), qui la convertit en énergie mécanique. Ensuite, cette énergie mécanique est transformée en électricité par la génératrice, avant d'être transmise au réseau électrique. Ce processus est représenté par la figure I.6 la figure I.6 [12].

Une éolienne est principalement composée de trois parties : les pales, la nacelle et la tour, comme illustré dans la figure I.6 [8].

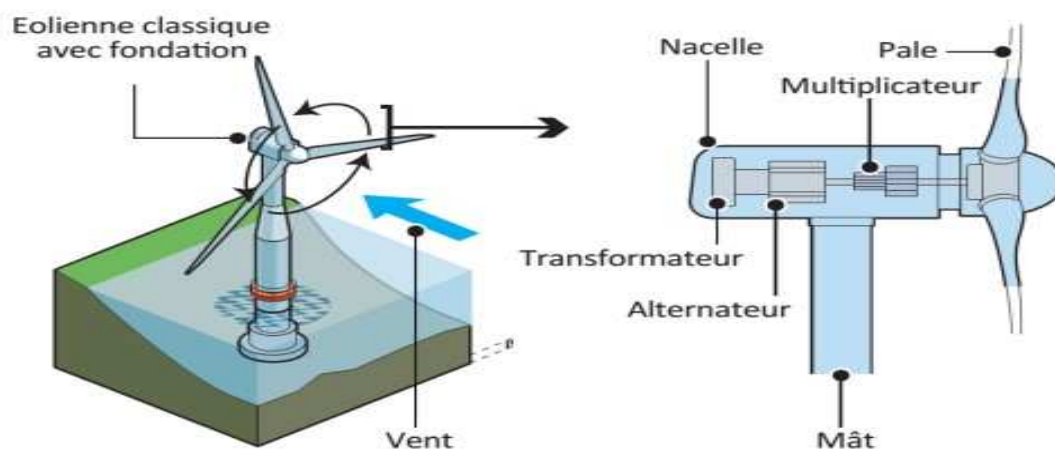


Fig. I-6 : Principaux composants d'une éolienne [13]

On peut également décrire chacune de ces pièces comme suit :

La tour : La tour est généralement constituée d'un tube en acier ou parfois d'une structure en treillis métallique. Elle doit être suffisamment haute pour minimiser les perturbations causées par le sol. Cependant, la quantité de matériaux nécessaires engendre un coût significatif, et il est important de limiter son poids.

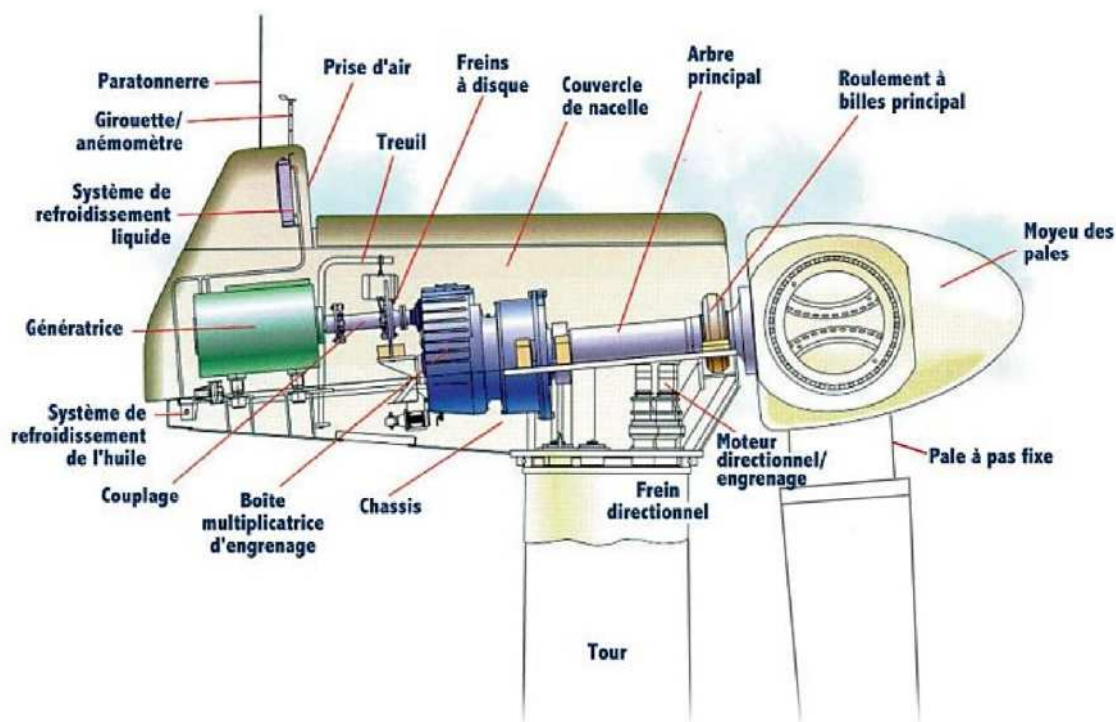


Fig. I-7 : Constitution d'une nacelle [14]

La nacelle : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge ainsi que le générateur et les systèmes électriques d'orientation des pales [15].

Les composants principaux d'une nacelle sont les suivants :

- **Contrôleur électronique :** Ce dispositif, équivalent à un ordinateur, supervise le fonctionnement de l'éolienne. Il gère le démarrage lorsque la vitesse du vent atteint environ 5 m/s, ajuste le pas des pales, contrôle le freinage, et oriente l'ensemble "rotor-nacelle" face au vent pour maximiser l'énergie récupérée. Le contrôleur se base sur les données d'un anémomètre (mesure de la vitesse du vent) et d'une girouette (direction du vent), généralement placés à l'arrière de la nacelle. Il assure également la gestion des pannes éventuelles.
- **Dispositifs de refroidissement :** Le multiplicateur et la génératrice sont refroidis par des systèmes comme des ventilateurs, des radiateurs d'eau ou d'huile.
- **Arbre secondaire :** Souvent équipé d'un frein mécanique, cet arbre permet d'immobiliser le rotor lors des opérations de maintenance et prévient l'emballement de l'éolienne.

- **Génératrice** : C'est le composant qui transforme l'énergie mécanique provenant du rotor en énergie électrique.

- **Système de supervision et de contrôle** : Ce mécanisme permet d'arrêter l'éolienne automatiquement et rapidement si nécessaire, assurant ainsi une sécurité constante du système [7].

Rotor : Composé des pales montées sur un moyeu, le rotor est essentiel pour capter l'énergie du vent. Dans les éoliennes conçues pour la production d'électricité, le rotor est généralement équipé de une à trois pales.

Armoire de commande : Cette unité intègre tous les dispositifs électroniques nécessaires à la gestion de l'éolienne, y compris les convertisseurs de puissance (tels que les onduleurs et redresseurs) ainsi que les systèmes de régulation pour la puissance, le courant, et la tension. Elle prend également en charge l'orientation des pales et de la nacelle [15].

Multiplicateur de vitesse : Cet élément ajuste la vitesse de rotation du rotor pour l'adapter à la vitesse requise pour la génératrice, facilitant ainsi la conversion efficace de l'énergie mécanique en énergie électrique.

7. Machines électriques utilisées dans la conversion d'énergie éolienne

Différents systèmes de conversion d'énergie éolienne (SCEE) sont développés pour optimiser la production d'électricité, réduire les coûts et améliorer la qualité énergétique. Selon le type de générateur électrique (GE) utilisé, les éoliennes peuvent être équipées d'un multiplicateur de vitesse ou fonctionner en attaque directe. De plus, le générateur peut être à excitation électrique ou utiliser des aimants permanents.

Les éoliennes avec multiplicateur de vitesse peuvent sembler plus coûteuses et lourdes en raison du réducteur, mais ces turbines permettent l'utilisation de générateurs plus petits et moins chers. Cela optimise la conception globale et améliore la performance en adaptant mieux la production d'électricité aux besoins du réseau. En revanche, les systèmes à attaque directe offrent de meilleures performances en termes de rendement énergétique, de fiabilité et de maintenance, ce qui les rend plus attractifs dans certaines applications. Les systèmes de conversion d'énergie éolienne à attaque directe utilisent généralement des générateurs comme la machine synchrone à rotor bobiné (avec excitation par une source de courant continu externe)

ou la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). En revanche, les générateurs asynchrones, tels que la machine asynchrone à cage (MAS) ou la machine asynchrone à double alimentation (MADA), nécessitent un multiplicateur de vitesse pour fonctionner correctement [16].

8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

8.1. Avantages [14]

- Une ressource renouvelable inépuisable ;
- L'énergie éolienne est une énergie propre, n'ayant pas d'impact négatif sur l'environnement, contrairement à d'autres sources énergétiques qui contribuent aux changements climatiques par une forte émission de CO₂ ;
- Contrairement à l'énergie nucléaire, l'énergie éolienne ne présente aucun danger et ne génère pas de déchets radioactifs ;
- Parmi les énergies renouvelables, c'est l'une des plus économiques après l'énergie hydraulique ;
- L'installation de parcs ou de turbines éoliennes est relativement simple ;
- Cette source d'énergie s'intègre facilement dans les réseaux électriques existants.

8.2. Inconvénients [14]

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor ;
- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel ;
- La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production ;
- La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées ;
- C'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés.

9. Généralités sur les émulateurs des énergies renouvelables

Le terme émulation est employé au sens de simulation et d'imitation. Plus précisément ce terme décrit un principe général consistant à remplacer un système par un autre sans changement du fonctionnement d'un point de vue externe. Le recours à un émulateur selon le contexte permet de faciliter le développement ou le débogage d'un système ou de remplacer un système obsolète ou inutilisable par un autre. Dans ce cadre, il est possible de faire fonctionner le nouveau système, l'émulateur de la même manière que le système simulé. La simulation et l'émulation ont été utilisées avec succès depuis des années pour l'amélioration et la conception des systèmes et elles ont contribué à optimiser les performances des processus avant qu'il soit mis en œuvre [17].

9.1. Motifs d'émulation d'un système d'énergie renouvelable

Il est bien établi que l'analyse en laboratoire des systèmes d'énergies renouvelables présente des défis importants, principalement en raison du coût élevé des installations, de l'espace considérable requis pour les équipements auxiliaires, de la complexité de la gestion du système, ainsi que des contraintes de sécurité et des conditions environnementales. Ces facteurs rendent le coût total d'un système complet prohibitif pour de nombreux établissements d'enseignement et petites entreprises intéressées par la recherche en énergies renouvelables.

Les simulateurs jouent alors un rôle crucial dans la recherche et le développement, offrant une alternative flexible et économique aux installations physiques. Ils permettent une introduction progressive des différentes étapes de test tout en réduisant les coûts associés à un équipement complet et performant.

Dans la suite de ce texte, nous aborderons brièvement les différents types d'émulateurs, y compris les émulateurs de batteries, les émulateurs MCA (Analyseurs multi-canaux), et les émulateurs de systèmes d'exploitation, avec une attention particulière portée à l'émulateur d'éolienne [18].

9.2. Différents types d'émulateurs

9.2.1. Émulateur de batterie

Les émulateurs de batterie permettent de simuler le comportement d'une batterie sur un appareil électronique. Les émulateurs permettent également d'optimiser la consommation

d'énergie de leurs produits en simulant différents scénarios d'utilisation de la batterie et en identifiant les sources de consommation d'énergie.

Il existe différents types d'émulateurs de batterie, certains simulent simplement la capacité de la batterie, tandis que d'autres simulent des comportements plus avancés tels que la décharge de la batterie en fonction de la charge et de l'utilisation de l'appareil [19].

9.2.2.Émulateur MCA (Analyseurs multi-canaux)

L'émulateur MCA propose un environnement de simulation avancé pour les Analyseurs MultiCanaux. Il offre des capacités de simulation complètes, permettant aux utilisateurs de tester et de calibrer leurs systèmes de spectrométrie gamma sans nécessiter de matériel physique [20].

9.2.3.Émulateurs de systèmes d'exploitation

Les avancées techniques ont facilité l'utilisation des émulateurs, qui ne sont plus réservés aux spécialistes. Actuellement, les émulateurs Android permettent de simuler des appareils mobiles sur des ordinateurs Windows, facilitant ainsi le test d'applications. Ils offrent des fonctionnalités comme l'accès au Google Play Store et la possibilité de jouer à des jeux sur des écrans plus grands.

Ces émulateurs sont également utiles dans un contexte professionnel pour utiliser des outils de productivité mobile sur différents équipements. Bien que certains émulateurs soient gratuits et largement adoptés, leur popularité a entraîné des problèmes de sécurité, comme des infections par des malwares. La prudence est donc nécessaire lors de leur utilisation [21].

9.2.4. Émulateur d'une éolienne

Parmi toutes les sortes d'énergies renouvelables qui existent, l'énergie éolienne présente le développement le plus rapide. Par conséquent de nombreux chercheurs ont concentré leur intérêt sur ce domaine. Afin d'améliorer les activités de recherche liées à la commande de génératrices électriques pour éoliennes, un test contrôlé qui ne repose pas sur le vent est nécessaire. Par conséquent, avant de déployer n'importe quel système de turbine de vent, il est nécessaire d'évaluer régulièrement l'état et le comportement dynamique du système de turbine de vent en l'étudiant dans un environnement de la boratoire pour éviter des problèmes lors de l'installation. Un émulateur de petites éoliennes, devrait pouvoir traiter des situations de survitesse de sorte que les composants mécaniques et électriques de la

turbine peuvent garder la sécurité du fonctionnement. En outre, il est toujours souhaitable d'extraire la puissance maximale à partir du vent est également recommandé de fournir la puissance associée à un circuit électronique de l'éolienne elle-même. Un émulateur éolien permet de satisfaire à ces exigences, car il intègre plus de contrôle de vitesse, alimentation isolée pour l'électronique de puissance du système et il permet l'extraction de la puissance maximale [18].

Emulateur d'une éolienne à bas d'un moteur à courant continu

Ce système à bas d'un un moteur à courant continu couplé au générateur à induction/générateur synchrone à aimants permanents, dont la vitesse est contrôlée selon la référence de vitesse calculée en résolvant le modèle mathématique de l'éolienne. Un générateur à induction est couplé au moteur à courant continu et un onduleur bidirectionnel est connecté aux bornes du générateur. Le chercheur peut exécuter les modèles mathématiques de son éolienne nouvellement développée ou modifiée et peut simuler la vitesse/puissance du profil de l'éolienne sur l'environnement matériel directement pour différentes vitesses de vent et différents angles de tangage [22].

Cet émulateur est conçu pour reproduire fidèlement les performances d'une éolienne réelle dans un environnement de laboratoire. Grâce à son moteur à courant continu et aux générateurs associés, il permet de simuler des conditions de vent variées et d'ajuster des paramètres tels que l'angle de tangage. L'onduleur bidirectionnel facilite la conversion de l'énergie électrique et permet d'expérimenter avec une large gamme de scénarios de test.

10. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a offert un aperçu global de l'énergie éolienne, une technologie en plein essor qui joue un rôle clé dans la transition énergétique mondiale. Après avoir retracé l'évolution historique de l'énergie éolienne, nous avons examiné son développement à l'échelle internationale et en Algérie. Nous avons ensuite défini l'énergie éolienne et détaillé le fonctionnement des turbines éoliennes, en mettant en lumière leurs composants essentiels et les machines électriques utilisées pour convertir cette énergie en électricité. Les avantages et inconvénients de cette technologie ont également été abordés, offrant une vision équilibrée de ses potentialités et de ses défis. Enfin, l'étude des émulateurs d'énergies renouvelables, en particulier ceux liés aux éoliennes, a permis de mieux comprendre les outils et méthodes modernes pour optimiser les performances de cette source d'énergie. Ce chapitre jette ainsi les bases pour une compréhension approfondie des enjeux et des possibilités offertes par l'énergie éolienne, ouvrant la voie à des innovations futures dans ce domaine crucial pour le développement durable.

Le chapitre suivant sera dédié à la modélisation des différentes parties et simulation de l'émulateur d'éolienne étudiée.

Chapitre II :
Modélisation des différentes
parties et simulation de
l'émulateur de
l'éolienne étudiée

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous traiterons de la modélisation mathématique des différentes composantes d'un émulateur d'éolienne. Nous commencerons par une présentation générale du schéma du système à étudier. Par la suite, nous détaillerons la modélisation de la turbine éolienne. Nous aborderons ensuite l'émulation en combinant la machine à courant continu (MCC) avec un hacheur série, suivie par la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Nous poursuivrons avec la simulation de l'émulateur d'éolienne étudiée, avant de passer à l'analyse de l'émulation via la régulation de puissance de la MCC. Pour conclure, nous présenterons les résultats de simulation, en examinant des aspects clés tels que l'évolution de la vitesse du moteur au fil du temps, le coefficient de puissance en fonction du temps, ainsi que la puissance électrique du moteur et de la turbine en fonction du temps.

2. Présentation du schéma global

La figure II.1 représente notre système, composé de deux sources à courant continu, d'un hacheur série avec un moteur à courant continu à excitation séparée de 3 kW, commandé par une commande en puissance, couplé à une génératrice triphasée à aimants permanents de 1,5 kW. Cette génératrice alimente ensuite une charge triphasée.

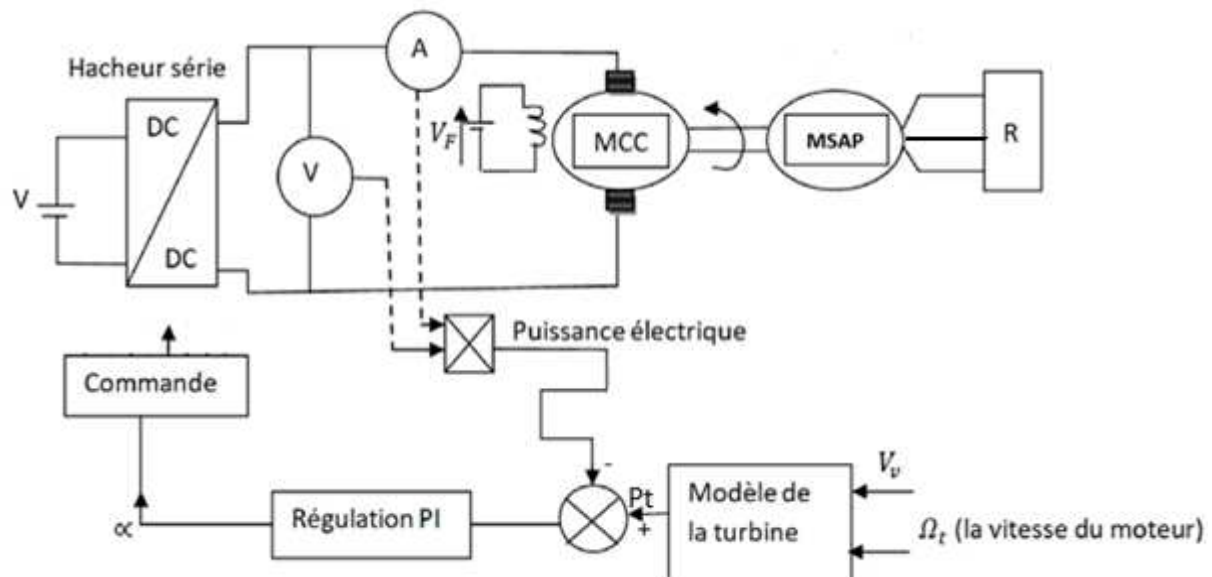


Fig. II-1 : Schéma global de l'émulateur d'une éolienne à étudier [23]

Où : V : Tension d'alimentation d'induit ; V_F : Tension d'alimentation d'inducteur ; R : Charge autonome.

Pour simuler notre émulateur d'éolienne, il est essentiel de commencer par identifier les équations mathématiques qui régissent le comportement du système. Cela inclut la modélisation des différentes composantes comme la turbine éolienne, la MCC, et la MSAP. Chaque élément possède ses propres équations dynamiques et paramètres qui influencent le comportement global de l'émulateur [23].

3. Modélisation de la turbine éolienne

Présentation du modèle de la turbine éolienne UE15 plus-1.80 kW

Caractéristiques techniques de la turbine [24]

- **Modèle** : UE15 plus-1.80 KW
- **Puissance nominale** : 1,80 kW
- **Diamètre du rotor (D)** : 3,8 m
- **Nombre de pales** : 3
- **Vitesse de rotation du rotor (ω)** : 525 tours/min
- **Vitesse du vent (V)** : 10.5 m/s

Le coefficient de puissance C_p désigne le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il varie en fonction du rapport de vitesse λ , et de l'angle d'orientation des pales β . Il est approché par l'expression suivante [25].

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left(\frac{72.5}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-13.125}{\lambda_i}} \quad (II.1)$$

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

La puissance extraite du vent par la turbine est donnée par la formule suivante :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho S V_v^3 \quad (II.2)$$

Où : C_p : Coefficient de puissance ; ρ : Masse volumique de l'air (1.225 kg/m³ au niveau de la mer) ; S : Surface balayée par les pales ; V_v : Vitesse du vent.

On introduit une variable sans dimension appelée vitesse spécifique pour caractériser les performances aérodynamiques d'une turbine éolienne :

$$\lambda = \frac{\Omega_r R_t}{V_v} \quad (II.3)$$

Sachant que : Ω_r : Vitesse de rotation de la turbine ; R_t : Rayon de la turbine éolienne ; V_v : Vitesse du vent.

4. Emulation par association de la MCC avec un hacheur série

Pour ajuster la vitesse de rotation d'un MCC à excitation séparée, on agit principalement sur la tension appliquée à l'induit, tandis que le champ magnétique est généré par un circuit d'excitation indépendant, souvent alimenté par une source de tension continue stable. Le moteur à excitation séparée présente l'avantage de permettre un contrôle plus précis de la vitesse et du couple, car le courant d'excitation et celui de l'induit sont réglés indépendamment.

Le couple électromagnétique C_e généré par le moteur est proportionnel au produit du flux magnétique Φ (proportionnel au courant d'excitation) et du courant d'induit I_a . Mathématiquement, cela s'exprime par :

$$C_e = K_\Phi \Phi I_a \quad (II.4)$$

Où K_Φ est une constante dépendant des caractéristiques du moteur. Puisque Φ est maintenu constant grâce à la source d'excitation séparée, le couple est directement proportionnel au courant d'induit I_a [9]. La figure II.2 représente association MCC –Hacheur série.

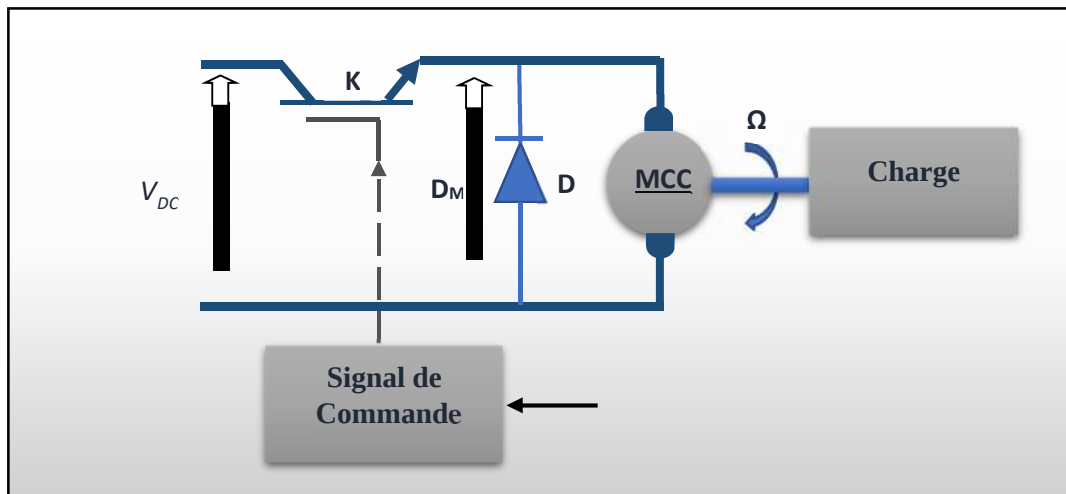


Fig. II-2 : Association MCC –Hacheur série [9]

Le fonctionnement est défini par l'état des composants de puissance, le Transistor K et la diode D :

- Pendant l'intervalle $[0, \alpha T]$; K passant et D bloquée
- Pendant l'intervalle $[\alpha T, T]$; K bloquée et D passant

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V_{DC} dt \quad (II.5)$$

Avec : α : rapport cyclique.

On obtient :

$$V_m = \alpha V_{DC} \quad (II.6)$$

Le coefficient α s'appelle le rapport cyclique, $0 < \alpha < 1$, il est sans dimension, l'équation de la vitesse de rotation du moteur est écrite comme suit :

$$\Omega = \frac{\alpha V_{DC}}{K_e \Phi} - \frac{R_a I_a}{K_e \Phi} \quad (II.7)$$

Modèle mathématique de la machine à courant continu à excitation séparée

La figure II-3 représente le schéma de la MCC à excitation séparée :

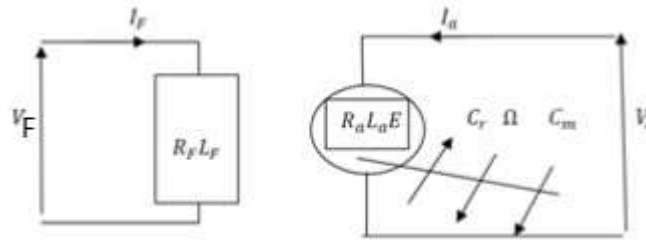


Fig. II-3 : Schéma du MCC à excitation séparée [23]

La modélisation consiste à écrire à partir d'une analyse physique et d'un système électromécanique, les équations mathématiques régissant son fonctionnement pour représenter notre système sous forme fonction de transfert. Les équations qui régissent le MCC à excitation séparée.

$$\begin{cases} V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \\ V_a = R_F I_F + L_F \frac{dI_F}{dt} \\ J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \\ E = K_e \Omega \\ C_{em} = K_t I_a \end{cases} \quad (II.8)$$

Avec : K_e : Constante de la FEM; V_a : Tension aux bornes de l'induit ; I_a : Courant aux bornes de l'induit; Ω : Vitesse de rotation du moteur; E : Force contre électromotrice; R_a : Résistance d'induit, L_a : Inductance d'induit , L_F : Inductance d'inducteur , R_F : Résistance d'inducteur.

5. Modélisation de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné ont un stator identique. Les aimants permanents à terres rares utilisés récemment dans les machines synchrones permettent d'avoir

des couples massiques élevés. Dans notre cas d'étude, on utilisera une machine synchrone à pôles saillants à aimants permanents.

Les principales équations sont données sous forme matricielle par les expressions suivantes :

$$[v_s]_{abc} = R_s[i_s]_{abc} + \frac{d[\Phi_s]_{abc}}{dt} \quad (II.9)$$

$$[\Phi]_{abc} = [L_s][i_s]_{abc} + [\Phi_f] \quad (II.10)$$

Avec : $[v_s]_{abc} = [V_{as} V_{bs} V_{cs}]^t$, $[i_s]_{abc} = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^t$, $[\Phi]_{abc} = [\Phi_a \Phi_b \Phi_c]^t$

$$J_g \frac{d\Omega_g}{dt} = C_{emg} - C_{mg} \quad (II.11)$$

Où : J_g : Inertie totale des parties tournantes ; C_{mg} : Couple de charge et des frottements, C_{emg} : Couple électromagnétique de la MSAP ; Ω_g : Vitesse mécanique du rotor.

Transformation de Park

La représentation schématique de la machine synchrone équivalente au sens de Park est donnée sur la figure II.4. La matrice de la transformation de Park modifiée (égale la matrice de rotation de Park fois (x) la matrice transformation de Concordia) pour le stator est donnée comme suit (le repère est relié au rotor ($\theta = \theta_r$)) :

$$P[\theta] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (II.12)$$

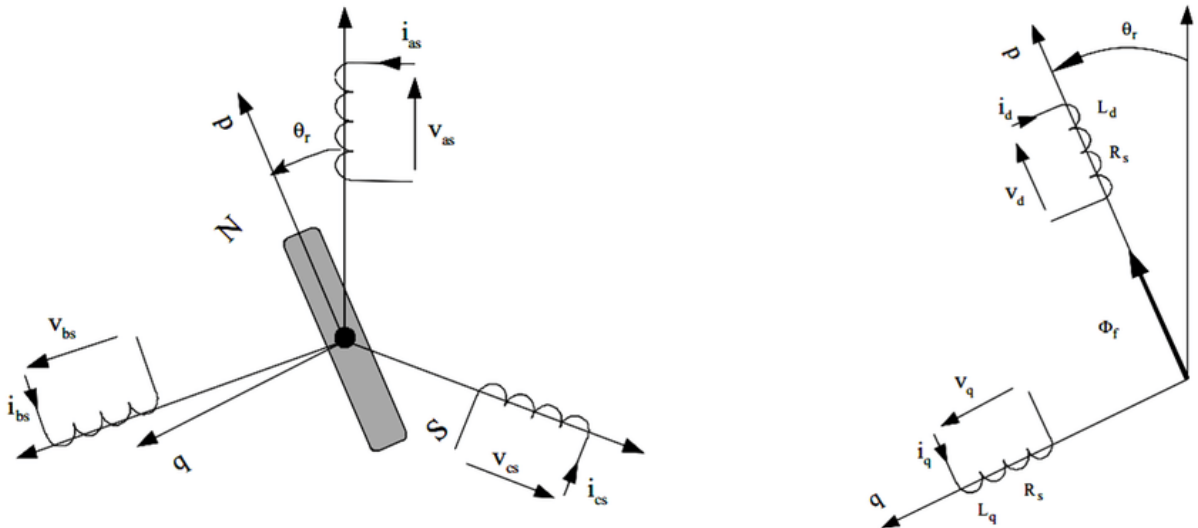


Fig. II-4 : Enroulement statorique et flux des AP avant et après transformation vers un système biphasé dq relié au rotor synchrone [26]

Après le développement mathématique des équations de la machine et le passage au repère de Park, les équations finales de la MSAP, avec i_d , i_q , Ω et θ comme variables, sont exprimées par la formule matricielle suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ \Omega_g \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-R_s}{L_d} i_d & +P \frac{L_q}{L_d} i_q \Omega_g \\ \frac{-R_s}{L_q} i_q & -P \frac{L_d}{L_q} i_q \Omega_g & -P \frac{\Phi_f}{L_q} \Omega_g \\ \frac{1}{J_g} P \Phi_f i_q & -\frac{1}{J} C_{mg} \\ & \Omega_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} \quad (II.13)$$

Où :

- P : Nombre de paires de pôles ;
- V_d : Tension statorique sur l'axe d ;
- V_q : Tension statorique sur l'axe q ;
- i_d : Courant statorique sur l'axe d ;
- i_q : Courant statorique sur l'axe q ;
- R_s : Résistance statorique ;
- L_d : Inductance cyclique statorique sur l'axe d ;
- L_q : Inductance cyclique statorique sur l'axe q ;
- Φ_f : Flux des AP.

6. Simulation de l'émulateur de l'éolienne étudiée

6.1.Émulateur d'une éolienne par régulation de puissance de la MCC

Dans cette section, nous nous concentrons sur la simulation d'un émulateur d'éolienne basé sur une MCC, régulée en fonction de la puissance. L'objectif est de simuler le comportement du système lorsque le moteur atteint le régime permanent, on applique un couple résistant variable de 0 à 20 N.m. La régulation vise à ajuster la puissance électrique produite afin qu'elle corresponde au mieux à celle générée par le modèle de la turbine éolienne. Cette approche permet d'évaluer la capacité du système à maintenir la stabilité et la performance, tout en garantissant que la puissance électrique produite se rapproche de celle attendue dans les conditions simulées de l'éolienne.

On représente sur la figure II-5 le schéma bloc global d'un émulateur d'une éolienne par régulation de puissance du MCC.

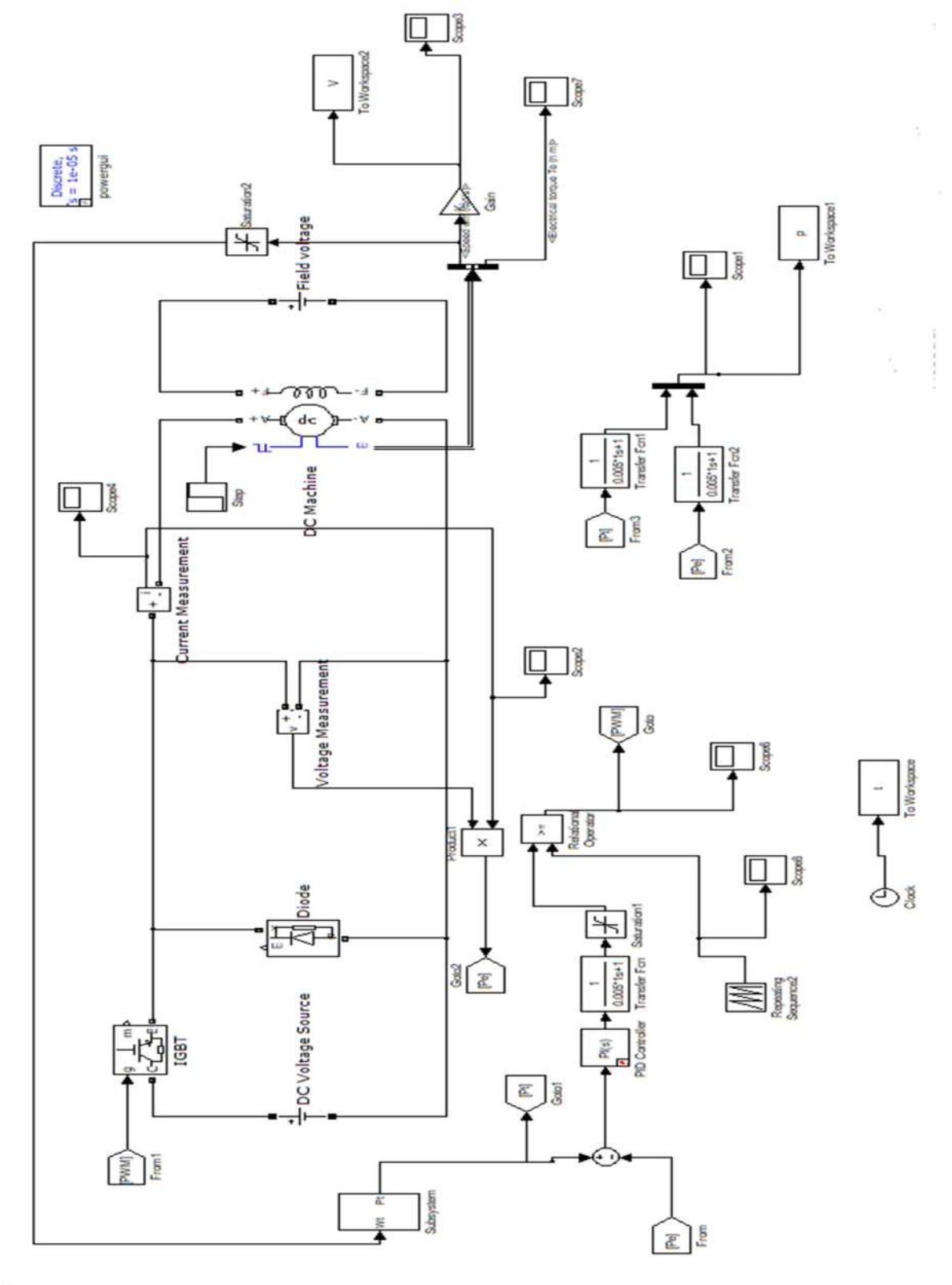


Fig. II-5 : Schéma global émulateur d'éolienne par régulation de puissance du MCC

En résolvant le modèle mathématique d'une éolienne, on a réussi à faire le montage de la figure II-6, pour la partie commande de ce schéma a pour but d'annuler l'erreur en comparant la puissance de la turbine avec la puissance électrique.

6.2. Résultats de simulation

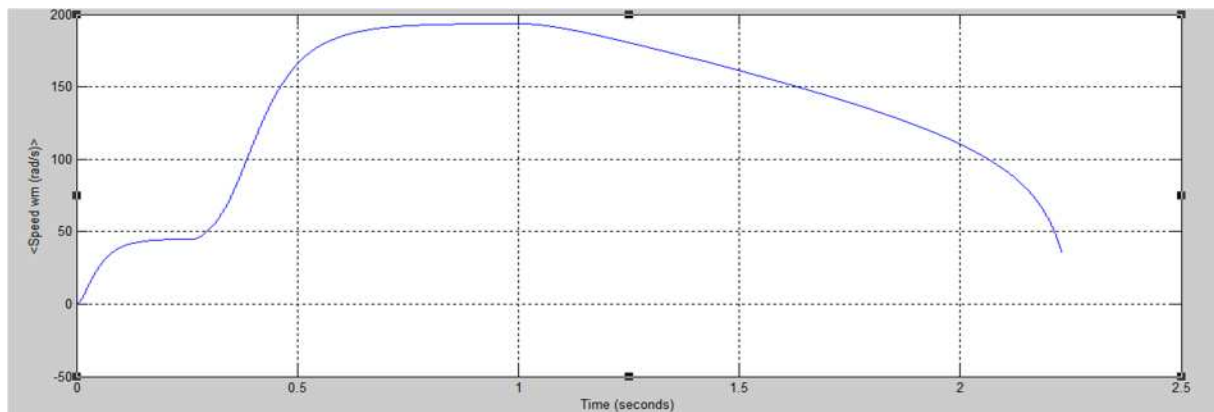


Fig. II-6 : Vitesse du moteur en fonction du temps

Commentaires :

On remarque une dégradation progressive de la vitesse du moteur à courant continu (MCC) lorsque l'on applique un couple résistant variable. Cela s'explique par l'augmentation de la charge mécanique sur l'axe du moteur.

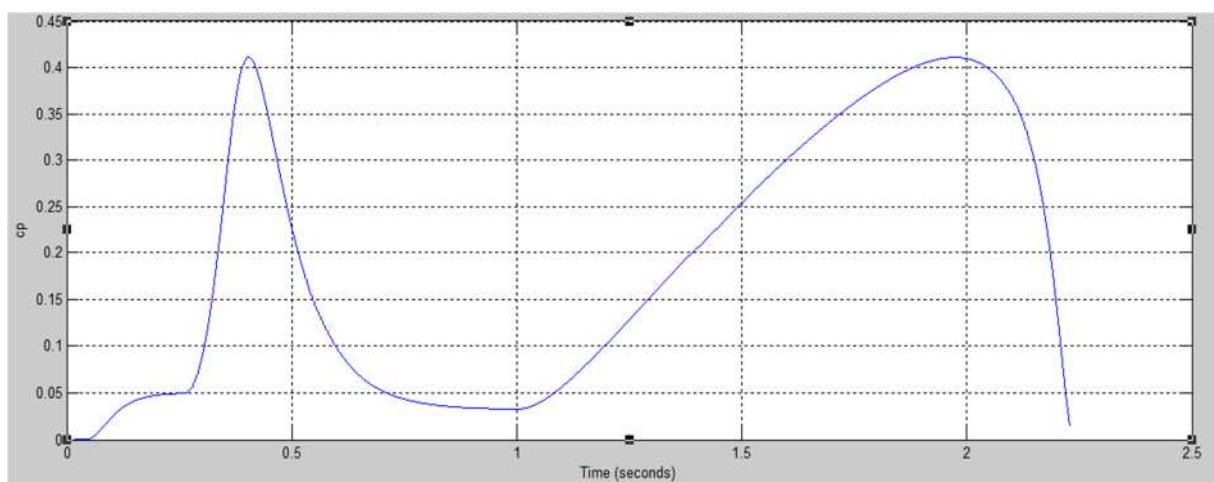


Fig. II-7 : Coefficient de la puissance en fonction du temps.

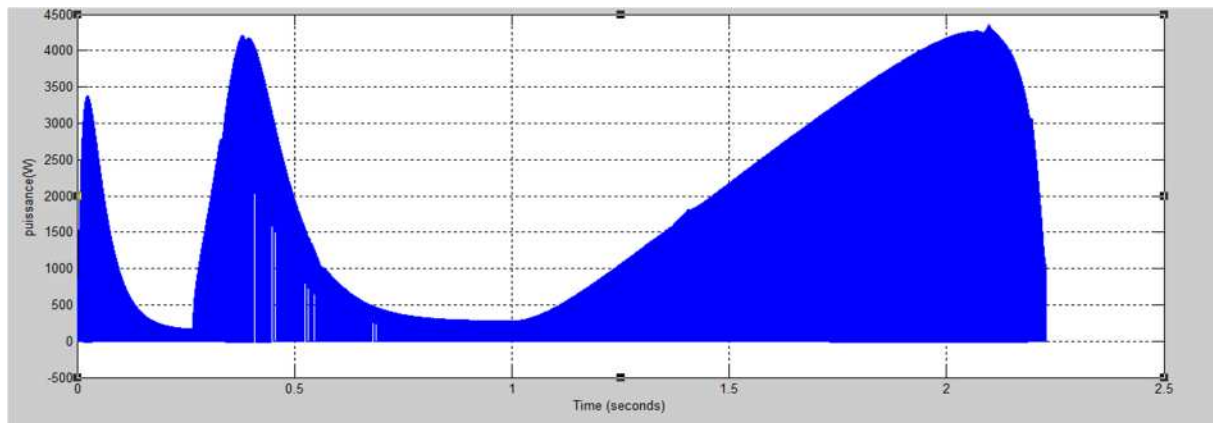


Fig. II-8 : Puissance DC du moteur MCC

Commentaires :

Dans l'allure de la puissance DC du MCC, on observe que la puissance suit de manière cohérente l'évolution du coefficient de puissance du modèle de turbine éolienne. Cela montre que l'émulateur est capable de reproduire fidèlement les caractéristiques aérodynamiques de la turbine.

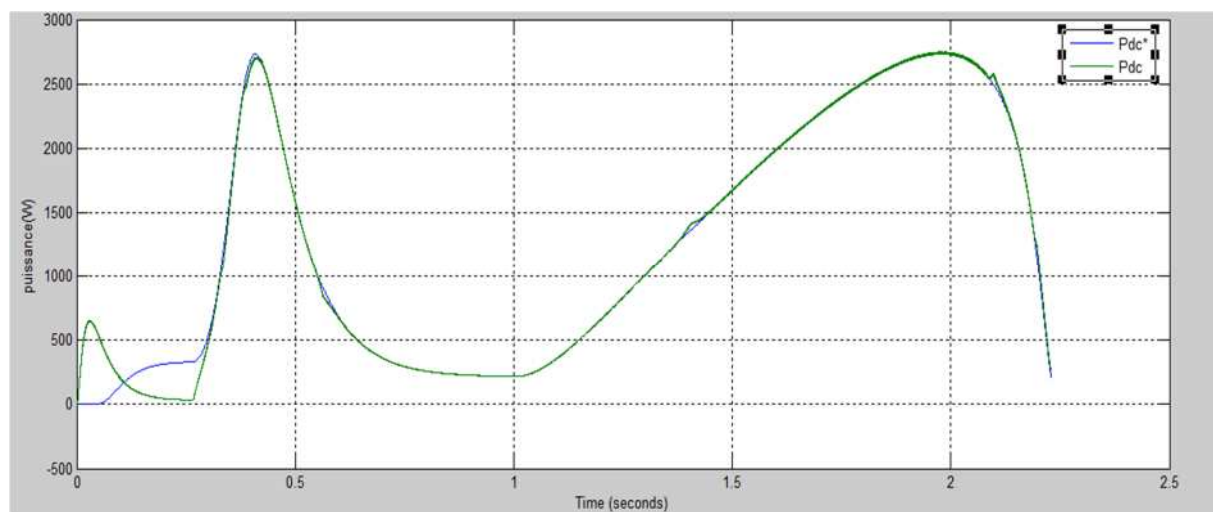


Fig. II-9: Puissances électrique du moteur et de la turbine en fonction du temps

Nous constatons que la puissance électrique produite par l'émulateur est très proche de la puissance de référence du modèle de la turbine. Cela montre que l'émulateur reproduit bien le comportement énergétique de la turbine. La différence entre la figure II-8 et la figure II-9, malgré une puissance identique, est due à la présence d'un filtre visant à éliminer les ondulations à haute fréquence, afin de rendre les résultats plus lisibles.

7. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a détaillé la modélisation des différentes parties d'un émulateur d'éolienne. Nous avons couvert la présentation du schéma global, la modélisation de la turbine éolienne, l'émulation par association de la MCC avec un hacheur série, et la modélisation de la MSAP. Chaque section a apporté des éléments essentiels pour comprendre et optimiser le fonctionnement de l'émulateur. Ces modélisations permettent d'obtenir une vue claire des composants et de leur interaction, facilitant ainsi l'amélioration des systèmes éoliens.

Nous avons finalement procédé à une simulation pour vérifier si la puissance électrique régulée par l'émulateur correspondait à la puissance de référence du modèle de la turbine. Cette validation démontre que l'émulateur est capable de réguler la puissance de manière précise, reproduisant ainsi le comportement énergétique attendu de la turbine. Ce contrôle est crucial pour optimiser la performance du système tout en garantissant sa stabilité avant une mise en œuvre réelle. Cette étape finale assure que les modèles théoriques sont appliqués efficacement, renforçant la capacité de l'émulateur à tester et ajuster les systèmes éoliens dans des conditions contrôlées.

Dans le prochain chapitre, nous nous concentrerons sur la réalisation pratique de l'émulateur de la chaîne éolienne et sur les tests expérimentaux basés sur les modèles développés. Nous décrirons les étapes de la mise en place du banc d'essai, les procédures de validation, et analyserons les résultats expérimentaux pour évaluer la performance de l'émulateur dans des conditions réelles.

Chapitre III :
Réalisation et étude
expérimentale de l'émulateur de
la chaine éolienne

1. Introduction

Ce chapitre traite de la réalisation et de l'expérimentation de l'émulateur de la chaîne éolienne, basé sur la modélisation et la simulation effectuées avec MATLAB/Simulink dans les chapitres précédents. Nous commencerons par présentation des composants du banc expérimental mis en place au Laboratoire de recherche de l'Université de Bejaia. Les tests expérimentaux seront ensuite détaillés pour évaluer le comportement de l'émulateur.

Il est important de noter que, bien que les principes fondamentaux du modèle soient corrects, certaines divergences ont été observées entre les résultats expérimentaux et les simulations. Ces écarts peuvent être attribués à une identification des paramètres de la (MSAP) et de la (MCC) qui n'a pas pu être complètement optimisée dans le temps imparti. Cette situation offre des perspectives pour des améliorations futures et souligne l'importance de la calibration précise dans les études de modélisation et de simulation.

2. Description du banc d'essai et construction de l'émulateur

Nous avons mis en place un banc d'essai expérimental pour tester notre algorithme de commande en pratique. Ce banc, illustré à la Figure III-1, se compose d'un MCC à excitation indépendante, couplé à une MSAP permanents qui alimente une charge triphasée équilibrée.

Au cours de l'expérimentation, nous avons rencontré un problème : l'arbre de la génératrice était décalé vers le haut par rapport à sa position normale. Pour résoudre ce problème, nous avons fabriqué des plaques d'acier pour le moteur à courant continu au niveau de la technologie Hall, comme le montre la figure III-2, afin de réaligner les arbres des machines et d'assurer leur bon couplage.

Le moteur à courant continu est alimenté par un hacheur série, qui est contrôlé par une carte dSpace 1104 installée sur un ordinateur de bureau.

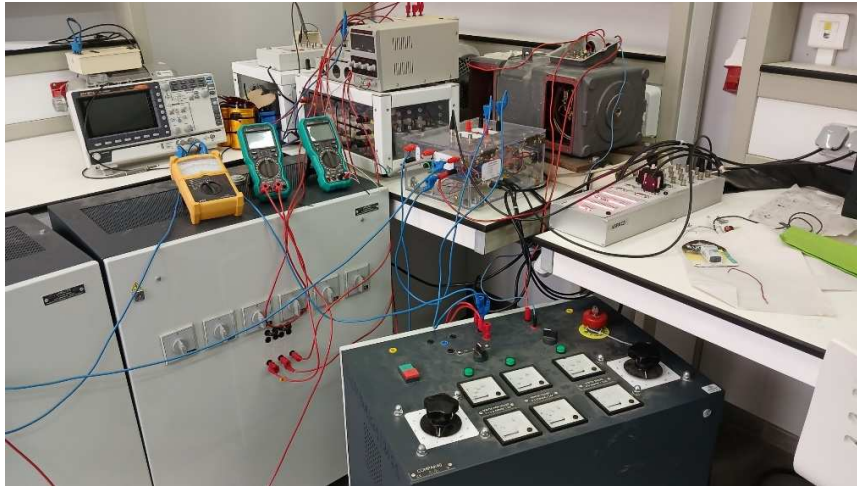


Fig. III-1 : Banc expérimental



Fig. III-2 : Plaques d'acier pour réalignement des arbres

3. Essais expérimentaux et résultats obtenus

3.1. Régulation de vitesse

Initialement, nous avons implémenté l'algorithme de régulation de vitesse pour le (MCC). Cependant, au cours de l'expérimentation, un problème majeur est survenu : l'accouplement a cédé sous la pression des forces générées, entraînant un bris de l'accouplement et déclenchant immédiatement un arrêt d'urgence pour éviter d'autres dommages.

Les résultats obtenus avant cet incident montrent l'évolution de la vitesse du moteur, comme illustré dans la figure III-3. Au départ, le moteur suivait très bien la référence de vitesse définie par notre algorithme, ce qui indique que la régulation fonctionnait comme prévu. Cependant, après environ 20 secondes du début du test, l'accouplement n'a pas pu supporter l'augmentation de la charge due à l'accélération, et a finalement cédé, comme montré sur la figure III-4.

Cette défaillance a provoqué des dégâts notables, dont une photo est également présentée pour illustrer l'ampleur des dommages causés par la rupture de l'accouplement. Ces résultats soulignent la nécessité de renforcer les composants de couplage pour assurer une meilleure tolérance aux charges élevées et garantir le bon fonctionnement de l'algorithme de régulation sous des conditions de test réalistes.

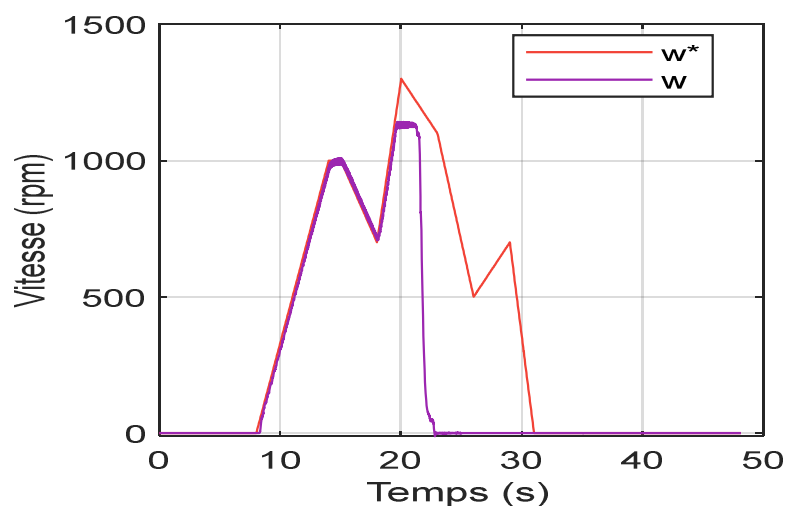


Fig. III-3 : Vitesse du MCC



Fig. III-4 : Accouplement détruit

Analyse de la puissance consommée par le moteur à courant continu

La consommation de puissance en courant continu par le moteur est illustrée dans la figure III-5. On observe clairement que le moteur consomme une puissance importante, qu'il convertit en puissance mécanique transmise à la génératrice. Cette puissance mécanique est ensuite transformée de nouveau en puissance électrique pour alimenter la charge triphasée.

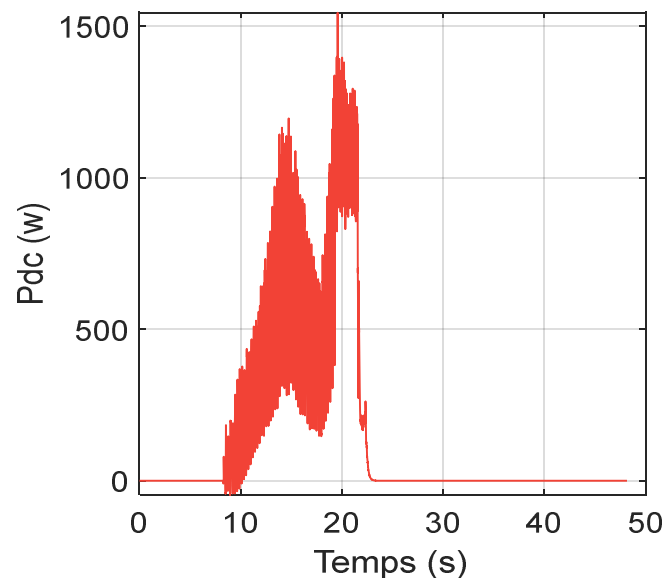


Fig. III-5 : Puissance DC du moteur MCC

3.2. Régulation de puissance

Malgré la rupture de l'accouplement, les tests ont été poursuivis. Cependant, le moteur fonctionne désormais à vide, et la puissance qu'il consomme se perd sous forme de pertes Joule et de pertes mécaniques et de pertes fer. En conséquence, aucune puissance mécanique utile n'est produite.

La figure III-6 illustre la puissance régulée de la machine. Bien que le moteur fonctionne à vide, il parvient à consommer la puissance demandée en référence. Toutefois, cette puissance est entièrement dissipée sous forme de pertes, sans générer de puissance mécanique utile.

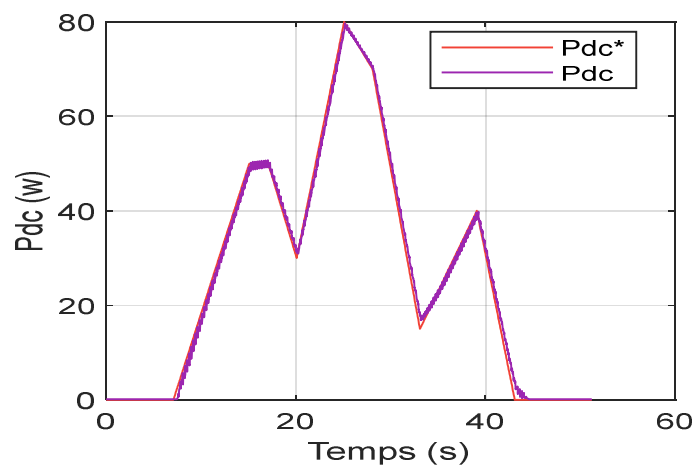


Fig. III-6 : Puissance DC du MCC

La figure III-7 montre la tension appliquée au moteur. On constate que le hacheur parvient à ajuster cette tension de manière efficace, ce qui permet au moteur de fonctionner à diverses vitesses.

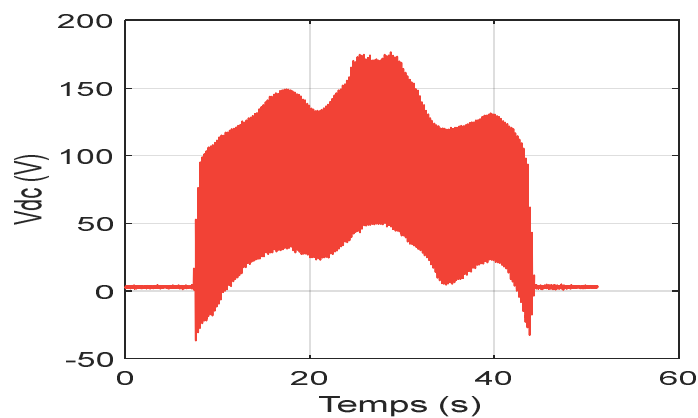


Fig. III-7 : Tension du moteur

La figure III-8 illustre le courant consommé par le moteur, montrant clairement que le moteur utilise un courant continu haché. Malheureusement, en raison de la rupture de l'accouplement, il n'a pas été possible de mesurer la vitesse du moteur, car le capteur de vitesse est installé sur l'arbre de la génératrice.

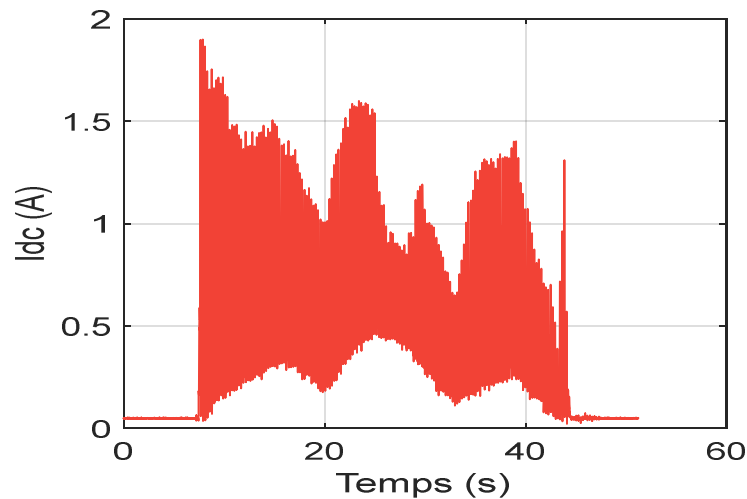


Fig. III-8 : Courant DC du MCC

4. Conclusion

Ce chapitre a validé notre algorithme de régulation de la vitesse du moteur à courant continu ainsi que le fonctionnement de l'émulateur éolien développé. Les tests ont démontré que l'algorithme permettait un contrôle efficace de la vitesse et de la puissance fournie, tandis que l'émulateur a réussi à imiter le comportement d'une éolienne réelle.

Cependant, la rupture de l'accouplement a causé des pertes significatives et a empêché la mesure précise de la vitesse. Ces résultats soulignent la nécessité de renforcer les composants critiques pour améliorer la robustesse du système. Les données recueillies fournissent des bases solides pour optimiser les régulations de vitesse et de puissance et assurer la fiabilité des expérimentations futures.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif est de développer une méthode efficace pour simuler l'énergie éolienne, une source d'énergie renouvelable cruciale. Étant donné les coûts élevés des installations réelles pour les analyses et les tests, nous avons conçu un émulateur de chaîne de conversion éolienne utilisant la carte dSPACE 1104, une machine à courant continu (MCC) et une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP). Ce projet est organisé en trois chapitres, chacun explorant un aspect clé de la conception, de la modélisation et de la validation de cet émulateur pour optimiser l'étude et l'exploitation des éoliennes .

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une analyse de l'énergie éolienne, en détaillant son évolution historique, son importance actuelle et future, ainsi que les composantes essentielles des turbines éoliennes. Nous avons également exploré le rôle crucial des émulateurs dans l'optimisation et l'analyse des systèmes éoliens. Cette base théorique a permis de mieux comprendre les enjeux techniques et les défis associés à cette technologie, ainsi que l'importance des émulateurs pour simuler les conditions de fonctionnement des turbines éoliennes et tester leurs performances dans un environnement contrôlé.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation de l'émulateur de turbine éolienne, en intégrant les différentes parties du système, telles que la turbine, la (MCC), et la (MSAP). Les simulations réalisées ont permis de vérifier le bon fonctionnement de l'émulateur et de s'assurer que la puissance régulée correspondait à celle attendue.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous avons testé et validé le fonctionnement de l'émulateur. Bien que des divergences entre les résultats simulés et expérimentaux aient été observées, dues à une identification incomplète des paramètres des machines, les résultats obtenus confirment la pertinence de l'approche développée. Des ajustements futurs, notamment en termes de calibration et de robustesse des composants, seront nécessaires pour améliorer la fiabilité et la précision de l'émulateur.

En conclusion, ce travail a établi les bases d'un émulateur de turbine éolienne performant, capable de simuler fidèlement les caractéristiques d'une turbine réelle en laboratoire.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] A. Dhabbi, "Contribution à la Commande et à l'Amélioration des Performances de l'Énergie Électrique d'une Chaîne de Production Éolienne," Thèse de Doctorat, Université de Batna 2, 2018.
- [2] M.T. Latreche, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisé dans un système éolien," mémoire de magister, Université de Ferhat Abbas de Sétif, 2012.
- [3] https://www.researchgate.net/figure/First-wind-mill-built-by-Charles-Brush-in-1888-6_fig1_329680977 .
- [4] [Éolien dans le monde : les nouvelles installations en 2021 en infographies | Connaissances des énergies \(connaissancedesenergies.org\)](https://www.connaissancedesenergies.org) .
- [5] S. Guerida et O. Ouafi, "Modélisation et contrôle d'un système de pompage d'eau connecté à l'éolienne," Mémoire Master, Université Adrar, 2019.
- [6] A.A. Zahoui et O.A. Boudenna «Etude, Modélisation et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Turbine à Axe Vertical», Mémoire MASTER, Université Adrar, 2021.
- [7] R. Redjem, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de magister, Université Constantine, 2009.
- [8] M.S. Abduolaye, «Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de magister, Université du Québec à Trois-Rivières, 2013.
- [9] A. Ben Hadji et M.A. Bekri, "Etude et réalisation d'un émulateur d'une chaîne de conversion éolienne à base de la carte dspace," Mémoire Master, Université de Adrar, 2022.
- [10] A. Mirecki, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance," thèse de doctotat, INPT, France, 2005.
- [11] S. Lahlah, "Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incremental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C)," Mémoire MAGISTER, Université de Batna, 2007.
- [12] A. Lakhrif et M. Baba, "Commande d'une éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA)," Mémoire de master, Université d'Adrar, 2019.
- [13] F. Dehoum, «Commande d'un système éolien basé sur une GADA Par différentes techniques", Mémoire de Master, Université de Msila, 2019. 1

- [14] L. Gagnon, «Mémoire concernant la contribution possible de la production 6olienne en réponse à l'accroissement de la demande québécoise d'électricité d'ici 2010» ARTICLE 803-004-009/avril 2004Montréal.
- [15] H. Yaichi et S. Guendouz, « Modélisation et simulation d'un générateur synchrone a aiment permanant couple a un aérogénérateur », Mémoire de master, Université d'Adrar, 2018.
- [16] D. Bang, H. Polinder, G. Shrestha, and J.A. Ferreira,“Review of generator systems for direct drive Wind turbines,” Européen Wind Energie Conf., pp. 1–11, 2008.
- [17] S. Karnou, D. Idir et K. Manseur,, "Simulation d'un émulateur d'un panneau photovoltaïque en utilisant un hacheur Buck sous Matlab-SIMULINK,' 'Mémoire master, Université Tizi-Ouzou ,2012
- [18] G. Marsala, «Modelling and Implémentation of an Emulator for Fuel cell systèmes », thèse de doctorat, Université de Belfort-Monbéliard, 2008.
- [19] <https://www.mbelectronique.fr/Boutiquemob.awp?P1=&P2=209&P3=1&AWPID40754F34=2CA8D11E6C4CF38C701436A7B282EE4E0C987ED6> .
- [20] https://www.htds.fr/nucleaire-radioprotection/logiciels-de-spectrometrie/emulateur-mca-maestro/?utm_source=perplexity .
- [21] https://www.ionos.fr/digitalguide/sites-internet/developpement-web/emulateur-android/?utm_source=perplexity .
- [22] https : //www.ecosenseworld.com/labs/wind-energy-labs/wind-turbine-emulator, <<Wind turbine emulator >>.
- [23] L. Laidi et J. Brahmi," Etude et réalisation d'un émulateur éolienne," Mémoire master,Université de Bejaia ,2022
- [24] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1882-unitron-ue15-plus> .
- [25] <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/6/2774> .
- [26] https://www.researchgate.net/figure/Interpretation-physique-de-la-transformation-de-Park_fig5_271324940 .

Résumé

Ce projet porte sur l'étude pratique d'un aérogénérateur utilisant une génératrice synchrone à pôles saillants. L'objectif est de concevoir un émulateur pour simuler les caractéristiques de ce type de génératrice dans un environnement de laboratoire. L'émulateur est construit avec une carte dSPACE 1104, une machine à courant continu (MCC), et une génératrice synchrone à pôles saillants.

Le travail est divisé en trois parties: l'analyse théorique de l'énergie éolienne et des génératrices synchrones, la modélisation de l'émulateur avec des simulations MATLAB/Simulink, et la validation expérimentale des performances. Les résultats montrent que l'émulateur est efficace pour simuler le comportement de la génératrice en conditions contrôlées, bien que des ajustements soient nécessaires pour optimiser la précision.

Mots-clés: Énergie éolienne, Émulateur de turbine, Carte dSPACE 1104, Machine à courant continu, Génératrice synchrone à aimants permanents, Simulation MATLAB/Simulink.

Abstract

This project investigates the practical study of a wind turbine generator utilizing a salient pole synchronous generator. The objective is to develop an emulator to replicate the characteristics of this type of generator within a laboratory setting. The emulator is constructed with a dSPACE 1104 board, a direct current machine (DCM), and a salient pole synchronous generator.

The project is structured into three main components: theoretical analysis of wind energy and synchronous generators, modeling of the emulator using MATLAB/Simulink simulations, and experimental validation of its performance. The results demonstrate that the emulator effectively simulates the generator's behavior under controlled conditions, though further adjustments are required to enhance accuracy.

Keywords: Wind turbine generator, Salient pole synchronous generator, dSPACE 1104, Direct current machine, MATLAB/Simulink simulation, Laboratory emulator.