الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

---

Département : Génie électrique Et Informatique Industrielle

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention de Master en Automatique

Spécialité

Automatique et Informatique Industrielle

Réalisation d'une Interface Homme-Machine HMI pour le banc d'essai d'un émulateur éolien

Réalisé par

ELAOUBI Abdeljalil

Présent(e) et soutenue publiquement le (04/07/2023)

Composition du Jury :

Président	M. Zaoui Abdelhalim	Professeur	ENST
Promoteur	M. Ridha CHEIKH,	M.R.B	UDES/CDER
Examinateur	Mme. Bougchiche Fazia	M.A.A	ENST
Examinateur	M. NaitSlimani Boukhalfa	M.A.A	ENST
Co-promoteur	M. Rezoug Amar	M.C.A	ENST

Remerciement

Le prophète Mohamed qu'Allah le comble de Ses éloges et de Ses salutations bénies a dit dans

Le sens de l'Hadith : « N'a pas remercié Allah celui qui ne remercie pas les gens ».

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

Mes remerciements particuliers vont également à M. Cheikh Ridha mon promoteur pour son aide et son dévouement inestimables. Sa disponibilité, sa patience et ses précieux conseils ont beaucoup aidé et contribué à la qualité de ce projet.

Grâce à Allah puis à lui, j'ai beaucoup appris. Je pense que cette expérience sera très bénéfique pour mon avenir professionnel.

Merci encore pour tout ce que vous avez fait pour moi dans ce projet.

Table des matières

Introduction générale……..1

Chapitre1

I.1 Introduction : 2

I.2 Contexte et justification du sujet 2

I.3 Les objectifs de cette étude : 2

I.4 Méthodologie de recherche 3

I.5 Définitions.....3

1.5.1. Un émulateur 3

1.5.2. Définition des HMI : 4

1.5.3. Définition du Logiciel ControlDesk 4

I.6 Constitution d'une éolienne : 4

I.6.1. Principe : 4

I.6.2. Constitution : .....**Error! Bookmark not defined.**

I.7 Rendement énergétique d'une éolienne (Théorie de Betz) 6

I.8 CONFIGURATIONS UTILISEES .....**Error! Bookmark not defined.**

I.8.1. Système Éolien Autonome 7

I.8.2. Système Éolien à Vitesse Fixe Connecté au Réseau 8

I.8.3. Système Eolien à Vitesse Variable Connecté au Réseau 8

I.9 Conclusion : 9

Chapitre2

II.1. Introduction : 11

II.2. Modélisation de la vitesse du vent.....11

II.3. Modélisation de la turbine éolienne.....12

II.3.1. Partie Aérodynamique.....12

II.3.2. Modèle dynamique de la turbine éolienne 13

II.4. Modélisation de la machine à courant continu :.....15

II.4.1. Partie électrique de la machine :.....15
II.4.2. Partie mécanique.....16
II.4.3. Stratégie de commande de la machine à courant continu 17
II.4.4. Résultats de simulation des modèles de la turbine et de la machine à Courant continu. 18
II.4.5. Commande optimale de la turbine.....20
II.5. Conclusion : 22

Chapitre3

III.1. Introduction :.....23
III.2. Besoins spécifiques de l'interface HMI 23
III.3. Outils et technologies appropriés pour le développement de l'interface 23
III.3.1. Convertisseurs SEMIKRON AC/DC : 24
III.3.2. Carte dSPACE : 24
III.4. Implémentation en temps réel de la commande.....25
III.4.1. Construction du Model SIMULINK 26
Paramètre de simulation :.....27
III.4.2. Création d'une application temps réel avec ControlDesk Next Generation 27
III.4.2.1. Description de l'interface contrôle desk.....27
III.4.2.2. Créer un nouveau projet sous ControlDesk :.....28
III.4.3. Lancer une mesure 29
III.5. Description de l'interface graphique et Interprétation des résultats :.....31
III.6. Conclusion 32
Conclusion générale…… .33

Table des figures

Figure I - 1 : Génératrice asynchrone couplée a un moteur a courant continue 3

Figure I - 2 : Energie cinétique du vent – conversion en énergie Mécanique 5

Figure I - 3 : constitution d'une éolienne.....5

Figure I - 4 : Tube de courant autour d'une éolienne 6

Figure I - 5 : Système éolienne auto-excitées 7

Figure I - 6 : Système éolien à vitesse fixe connecté au réseau. 8

Figure I - 7 : Système éolien à vitesse variable à base d'une MADA connecté au réseau. 9

Figure I - 8 : système éolien à vitesse variable à base d'une MSAP connecté au réseau. 9

Chapitre2

Figure II - 1 : Profil du vent 12

Figure II - 2 : Caractéristiques du coefficient de puissance pour déférent angle de calage β en fonction vitesse relatives λ.....13

Figure II - 3 : Modèle à une masse ramenée sur l'arbre rapide 15

Figure II - 4 : Modèle de l'éolienne.....15

Figure II - 5 : Génération d'une vitesse de référence à partir du modèle de l'éolienne ....**Error! Bookmark not defined.**

Figure II - 6 : modèle de moteur a courant continue à excitation séparé 15

Figure II - 7 : Schéma bloc du modèle de la MCC.....17

Figure II - 8 : Schéma bloc du régulateur 18

Figure II - 9 : Schéma bloc de la turbine éolienne associée à la MCC.....18

Figure II - 10 : simulation de vitesse du vent.....19

Figure II - 11 : coefficient de puissance 19

Figure II - 12 : Puissance mécanique de la turbine 19

Figure II - 13 : schéma Simulink avec l'introduction de MPPT 21

Figure II - 14 : résultats de simulation après l'introduction de MPPT 21

Figure II - 15 : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.....22

Chapitre3

Figure III - 1 : Photo d'un convertisseur SEMIKRON 24

Figure III - 2 : Illustration de la carte DS1104.....25

Figure III - 3 : Dongle d'activation de la licence 25

Figure III - 4 : Illustration du Panneau de contrôle CP1104.....25

Figure III - 5: fenêtre apparaît après avoir choisi le modèle de la carte 26

Figure III - 6: Interface graphique DSPACE control-desk 31

List des acronymes et Symboles

$V1$,$V2$: Vitesse du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne

ρ: densité de l'air 1,225 kg.m-3

S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne

m : Masse d'air traversant le rotor éolien en 1s

P_{aero} : Puissance extraite par le rotor éolien

P_{mt} : Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé

C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne

λ : Vitesse relative de l'éolienne

V : Vecteur vitesse du vent

β : Angle de calage des pales d'une éolienne à axe horizontal

C_{em}: Couple électromagnétique

C_t : Couple turbine

C_{frt} : coefficient du frottement des pales

J_p : Inertie des pales.

J_{Tr} : Inertie totale déplacée sur l'axe rapide de la génératrice.

Ω_{mec} : Vitesse de rotation de la génératrice

Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine

G : Gain de multiplicateur

C_{Tl}, C_{Tr} couples de la turbine sur l'axe lent et l'axe rapide

C_g :Couple Génératrice

Ω_{Tr}, Ω_{Tl} : Vitesse de rotation de l'éolienne respectivement avant et après le multiplicateur

u_a: tension d induit de l MCC

I_a : courant d induit de l MCC

e(t) : Force électromotrice de l MCC

L_a : inductance d induit

L_f : induction d'excitation

R_a : Résistance d induit

ϕ_e : Flux d'excitation

α : Rapport cyclique de l'Hacheur

U_m : Tension moyenne à la sortie de convertisseur

Introduction générale :

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par les émissions de gaz à effet de serre dans le processus minier, il est impératif de trouver des sources d'énergie alternatives durables. Par conséquent, d'autres sources d'énergie alternatives doivent être développées et promues. Parmi elles, l'énergie nucléaire issue de la fission est souvent citée en raison de ses faibles émissions de gaz à effet de serre. Cependant, il est important de prendre en compte les enjeux liés à la gestion des déchets radioactifs issus de cette forme de production. Leur gestion et leur élimination sont coûteuses et certains de ces déchets restent radioactifs pendant des années. Il est donc crucial de poursuivre les efforts de recherche et développement pour trouver des solutions énergétiques alternatives sûres, durables et respectueuses de l'environnement, en tenant compte de l'efficacité énergétique, de l'impact environnemental et des considérations environnementales.

Notre étude se focalise sur le développement d'un HMI (Interface Homme-Machine) pour un émulateur de turbine éolienne. L'objectif principal est de permettre une interaction intuitive et conviviale avec l'émulateur, qui est basé sur la commande de vitesse d'une MCC à excitation séparée. L'émulateur est conçu pour reproduire de manière précise les variations de vent réel. Le modèle de la turbine éolienne et de la commande est développé et implémenté sous MATLAB/SIMULINK. Grâce à cet émulateur et à l'HMI associée, nous pourrons étudier différents systèmes de conversion éolienne en laboratoire dans des conditions similaires à celles d'un système éolien réel. Cette approche permettra de faciliter le contrôle et la surveillance de l'émulateur, ainsi que d'obtenir des résultats pertinents pour l'analyse et l'optimisation des systèmes éoliens

Ce mémoire est composé de trois (03) chapitres, en plus de l'introduction et de la conclusion générale. Le premier chapitre fournit une introduction générale aux éoliennes, puis aborde les différentes définitions et les techniques de pointe pour développer une HMI à l'aide du logiciel ControlDesk.

Le deuxième chapitre porte sur la conception d'un simulateur d'éolienne basé sur un moteur à courant continu, incluant la modélisation des composants de l'éolienne. Ensuite, il aborde la régulation de la vitesse des simulateurs de vent en utilisant des techniques de contrôle classiques basées sur des régulateurs Proportionnel Intégral (PI).

Le dernier chapitre est consacré à la mise en œuvre expérimentale. Dans ce cadre, nous avons développé un HMI spécifique pour le banc d'essai, qui est basé sur la commande et la simulation en temps réel (Software In the Loop 'SIL') d'une machine à courant continu avec un hacheur dévolteur. Cette configuration nous permet de reproduire de manière fidèle le comportement réel d'une turbine éolienne. L'accent est mis sur le développement de l'interface utilisateur de l'HMI, qui joue un rôle essentiel dans le contrôle et la surveillance de l'émulateur éolien. Nous mettons en place une interface conviviale et intuitive, permettant aux utilisateurs de piloter et de suivre efficacement les paramètres et les performances de l'émulateur éolien

Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale résumant nos recherches dans ce mémoire. Les perspectives de ce travail sont également présentées.

Chapitre I

Problématique et Généralité sur les Interface Homme Machine (HMI) et l'Energie Eolienne.

.

I.1 Introduction :

La présentation générale a souligné l'importance croissante des éoliennes en tant que source d'énergie renouvelable en réponse à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux préoccupations environnementales croissantes.

Dans cette section, nous discutons des différentes définitions associées aux éoliennes, en nous concentrant sur leurs fonctionnements, leurs composants clés et leurs rôles dans la conversion de l'énergie éolienne en électricité. Nous passons également en revue les dernières technologies en matière de développement des HMI pour les éoliennes, en mettant l'accent sur l'utilisation du logiciel ControlDesk.

Le logiciel ControlDesk est largement utilisé dans l'industrie pour la conception et la mise en œuvre des HMI avancées. Il fournit des fonctions puissantes pour visualiser les données en temps réel, configurer les paramètres de contrôle et surveiller les performances. Nous explorons les avantages et les possibilités qu'offre le ControlDesk pour le développement des HMI pour éoliennes.

En résumé, le chapitre I fournit une introduction générale sur les éoliennes, suivie d'une discussion approfondie des différentes définitions liées aux éoliennes et à leurs fonctionnements. Nous examinons également les avancées technologiques en matière de développement d'interfaces homme-machine (HMI) pour les éoliennes, en mettant l'accent sur l'utilisation du logiciel ControlDesk. Cette section pose les fondements des chapitres suivants qui se concentrent sur la conception et la construction d'une HMI pour un simulateur de turbine éolienne.

I.2 Contexte et justification du sujet

Dans le laboratoire de l'équipe Systèmes Multi-Sources (SMS) de la Division Equipements à Energies Renouvelables (EER) de l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES/EPST CDER), un banc d'essai récemment installé pour tester les simulateurs du vent. Cependant, il manque une interface homme-machine (HMI) efficace pour s'interfacer avec le banc d'essai et contrôler divers paramètres du système.

Cette étude vise à combler cette lacune en implémentant une interface HMI fonctionnelle pour un banc d'essai d'un simulateur de vent.

Une telle interface permettrait aux chercheurs et aux ingénieurs d'interagir avec le système en temps réel, de configurer les paramètres de test, de surveiller les performances et de collecter des données pertinentes pour une analyse plus approfondie.

I.3 Les objectifs de cette étude :

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Concevoir et développer une interface Homme-Machine intuitive et conviviale pour le banc d'essai de l'émulateur éolien.

- Permettre le contrôle en temps réel des différents paramètres du système à travers l'interface.
- Faciliter la visualisation et l'analyse des données générées pendant les essais.

I.4 Méthodologie de recherche

La recherche sera menée selon une approche méthodique comprenant les étapes suivantes :

- Revue de la littérature sur les interfaces Homme-Machine dans le domaine des émulateurs éoliens, afin de recueillir les connaissances existantes.
- Analyse des besoins spécifiques du banc d'essai de l'émulateur éolien et des exigences fonctionnelles de l'interface HMI.
- Sélection des technologies et des outils appropriés pour le développement de l'interface, en prenant en compte des critères tels que la convivialité, la compatibilité matérielle et logicielle, ainsi que la flexibilité.
- Conception de l'architecture logicielle et matérielle de l'interface, en tenant compte des contraintes techniques et des performances requises.
- Implémentation de l'interface en utilisant les meilleures pratiques de développement logiciel et en effectuant des tests rigoureux pour assurer sa fonctionnalité et sa robustesse.
- Analyse des résultats obtenus et évaluation de l'efficacité de l'HMI

I.5 Définitions

1.5.1. Un émulateur

Un émulateur est conçu pour reproduire fidèlement le comportement d'un modèle dont toutes les variables sont connues, tandis qu'un simulateur doit extrapoler certaines variables inconnues pour reproduire le modèle. L'utilisation d'un émulateur peut faciliter le développement d'un système, ainsi que remplacer un système obsolète ou inutilisable par une alternative fonctionnelle. L'émulateur peut être configuré de manière à fonctionner de la même manière que le système imité, offrant ainsi une compatibilité et une continuité d'utilisation [1].



Figure I - 1 : Génératrice asynchrone couplée a un moteur a courant continue

1.5.2. Interface Homme Machine HMI :

Une Interface Homme-Machine (abréviation en anglais HMI), également appelée tableau de bord (Dashboard), facilite la communication entre un utilisateur et une machine, un programme informatique ou un système. Bien que le terme HMI puisse s'appliquer à n'importe quel écran utilisé pour interagir avec un équipement, il est souvent associé à des environnements industriels. L'HMI affiche des données en temps réel et fournit une interface utilisateur graphique pour contrôler la machine. Ils prennent différentes formes dans les environnements industriels tels que les écrans autonomes, les tableaux de bord intégrés à d'autres appareils ou tablettes. L'objectif principal d'une HMI est de permettre aux utilisateurs de visualiser les données relatives au fonctionnement et au contrôle des machines. Par exemple, un opérateur peut utiliser une HMI pour surveiller l'activité de la bande transporteuse ou régler la température d'un réservoir d'eau industrielle [2].

1.5.3. Logiciel ControlDesk

ControlDesk est un logiciel ou environnement qui offre la possibilité de réaliser des interfaces graphiques pour visualiser en temps réel diverses variables et de modifier les paramètres qui définissent le fonctionnement des blocs dans un schéma Matlab/Simulink. La visualisation des variables et la modification des paramètres peuvent être effectuées à l'aide d'instruments graphiques sélectionnables dans la fenêtre des instruments [3].

I.6 Constitution d'une Eolienne :

I.6.1.Principe :

Les éoliennes sont des dispositifs utilisés pour transformer l'énergie du vent en énergie électrique. Ce processus de conversion s'effectue en deux étapes distinctes :

Tout d'abord, au niveau de la turbine, également connue sous le nom de rotor, une partie de l'énergie cinétique du vent est capturée et convertie en énergie mécanique. La turbine joue un rôle crucial dans l'extraction de cette énergie cinétique du vent.

Ensuite, au niveau de la génératrice, l'énergie mécanique obtenue de la turbine est transmise et convertie en énergie électrique. Cette énergie électrique est ensuite acheminée vers le réseau électrique pour être utilisée.

Le fonctionnement global de ce processus de conversion est illustré dans la fig. I.2 Cependant, il convient de noter que la chaîne de conversion éolienne englobe des domaines techniques variés, tels que l'aérodynamique, la mécanique, l'électricité et l'automatique.

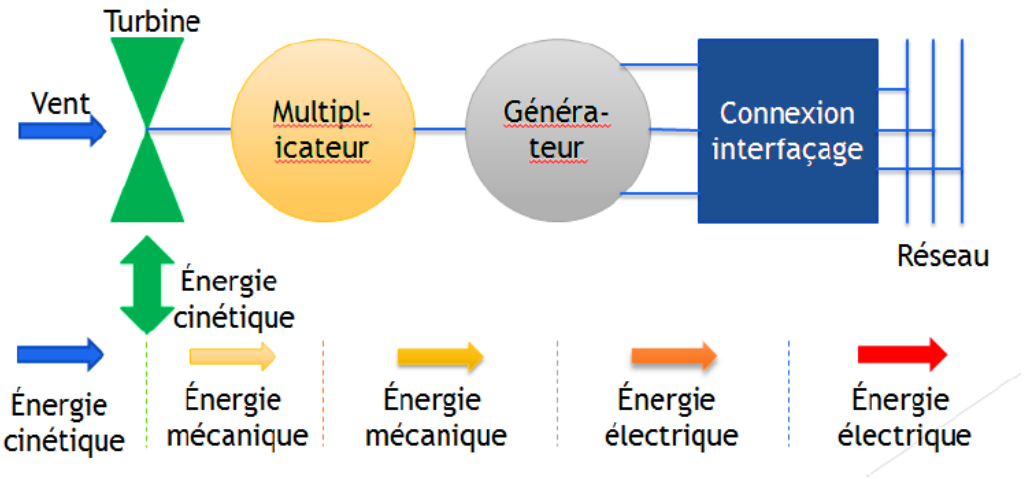


Figure I - 2 : Energie cinétique du vent – conversion en énergie Mécanique

I.6.2.Composants :

Une éolienne est composée de plusieurs éléments dont sont présentés dans la figure I.3

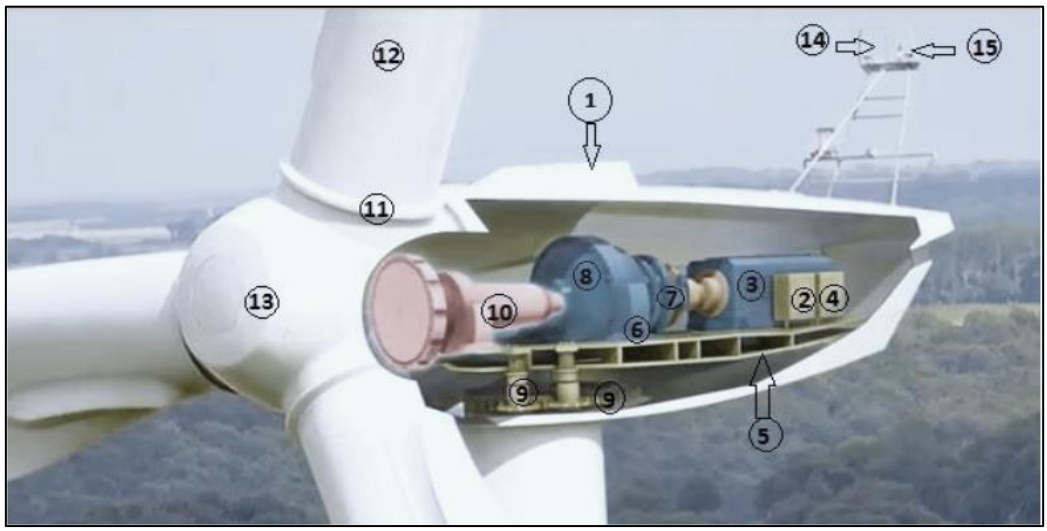


Figure I - 3 : constitution d'une éolienne

- 1 : Nacelle.
- 2 : Système de refroidissement.
- 3 : Génératrice
- 4 : Système de contrôle.
- 5: Armature métallique.
- 6 : Insonorisent.
- 7: Frein à disque.
- 8: Multiplicateur de vitesse.
- 9 : Servomoteurs.
- 10 : Arbre lent.
- 11 : Système d'orientation des pales.
- 12 : Les pales.
- 13 : Rotor de la turbine

- 14 : Girouette.
- 15 : Anémomètre.

Le mat ou tour soutient la nacelle et la turbine. Il est essentiel d'avoir une hauteur suffisante pour exploiter la vitesse du vent et le diamètre des pales. La nacelle est partiellement insonorisée et abrite la génératrice, le système de refroidissement, le multiplicateur de vitesse et les équipements électroniques de contrôle. Le multiplicateur de vitesse est constitué d'un arbre lent pour la turbine et d'un arbre à grande vitesse. Il est équipé d'un frein mécanique à disque et peut avoir un système de refroidissement à l'huile.

La turbine se compose de trois pales qui captent l'énergie du vent et la transmettent à l'arbre lent. Un système électromécanique ou hydraulique permet d'orienter les pales, de contrôler le couple de la turbine et de réguler sa vitesse de rotation [1][4].

La nacelle peut être orientée face au vent à l'aide de servomoteurs électriques. Des anémomètres et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires pour le contrôle de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent.

I.7 Rendement énergétique d'une éolienne (Théorie de Betz)

Considérez le système éolien à axe horizontal illustré à la fig. I - 4, où la vitesse du vent V1 supposons que la vitesse du vent à travers le rotor est égale à la vitesse du vent d'origine devant l'éolienne V1 et la vitesse du vent après son passage Via rotor V2 soit :

$$\frac{V1 + V2}{2} \qquad (1,1)$$

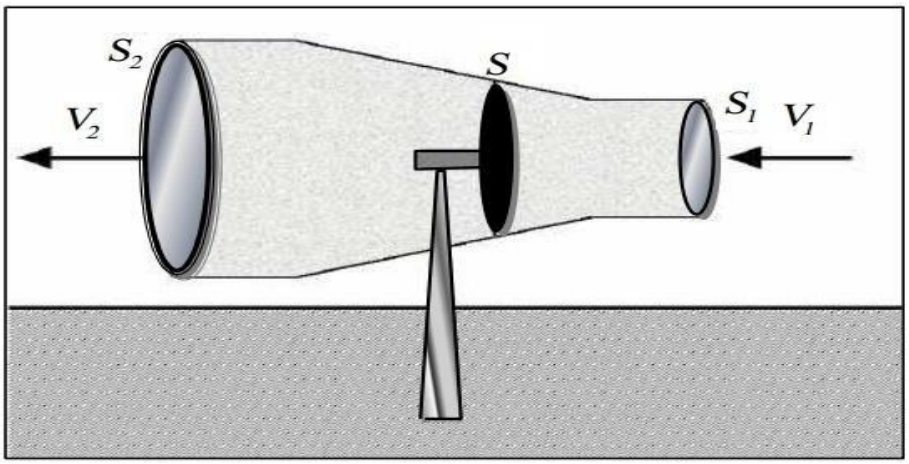


Figure I - 4 : Tube de courant autour d'une éolienne

Une masse d'air en mouvement de densité ρ travers la surface S de la lame en une seconde est

$$m = \frac{\rho\, S\, (V_1 + V_2)}{2} \qquad (1,2)$$

Ce qui permet d'extraire une puissance égale à la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent

$$P_{aero} = \frac{m\, ({V_1}^2 - {V_2}^2)}{2} \qquad (1,3)$$

Remplaçant m par son expression dans (1.3) :

$$P_{aero} = \frac{\rho\, S\, (V_1 + V_2)\, ({V_1}^2 - {V_2}^2)}{4} \qquad (1,4)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V1, la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho\, S\, {V_1}^3}{2} \qquad (1,5)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est

Alors :

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right)\left(1 - \frac{{V_1}^2}{{V_2}^2}\right)}{2} \qquad (1,6)$$

La théorie de Betz, développée par le physicien allemand Albert Betz en 1920, démontre qu'il est impossible de récupérer la totalité de l'énergie du vent sous forme d'énergie mécanique à l'aide d'une éolienne. Cette théorie propose une approche simplifiée pour déterminer la quantité maximale d'énergie cinétique pouvant être extraite d'un flux d'air dans un domaine ouvert, indépendamment du type d'éolienne utilisée [5], [6], 7],[8]. Selon cette théorie, la puissance théorique maximale récupérable par une éolienne est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent traversant l'éolienne.

I.8 Configurations Existantes

En fonction du type de fonctionnement, du type de générateur et du milieu où l'éolienne est installée, il existe plusieurs configurations dont les plus utilisés sont :

I.8.1. Système Éolien Autonome

Ce type de configuration est recommandé pour les régions éloignées qui n'ont pas accès à l'électricité du réseau. Il utilise généralement des petites machines auto-excitées, comme les machines synchrones à aimants permanents ou les machines à courant continu sans balais. Pour obtenir la meilleure utilisation de l'énergie éolienne, le système éolien doit fonctionner à des vitesses variables, ce qui permet d'optimiser l'extraction de l'énergie du vent.

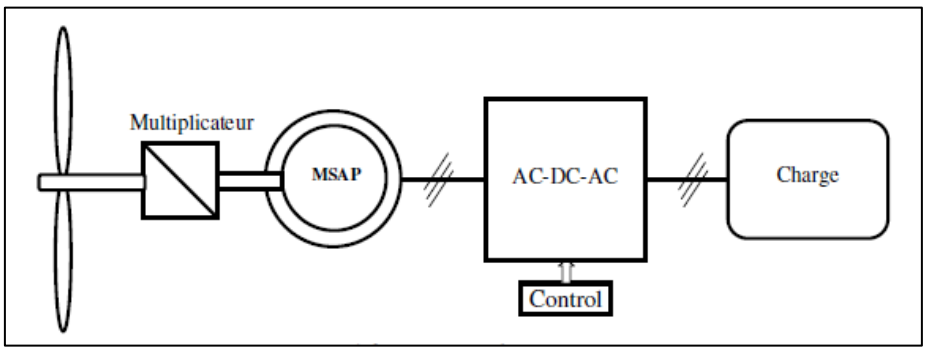


Figure I - 5 : Système éolienne auto-excitées

Avantages

- Plus légers que les autres types de générateurs,
- Couts plus faibles,
- Adapter aux petites éoliennes,

Inconvénient

- Démarrage difficile (nécessite un vent relativement important).

I.8.2. Système Éolien à Vitesse Fixe Connecté au Réseau

Dans la plupart des cas, cette configuration utilise la machine asynchrone à induction (MAS) car elle peut tolérer de petites variations de vitesse de rotation. Cela est particulièrement avantageux pour les éoliennes, où la vitesse du vent peut changer rapidement, notamment lors de rafales. Une illustration de ce type de configuration est présentée dans (fig. I – 6).

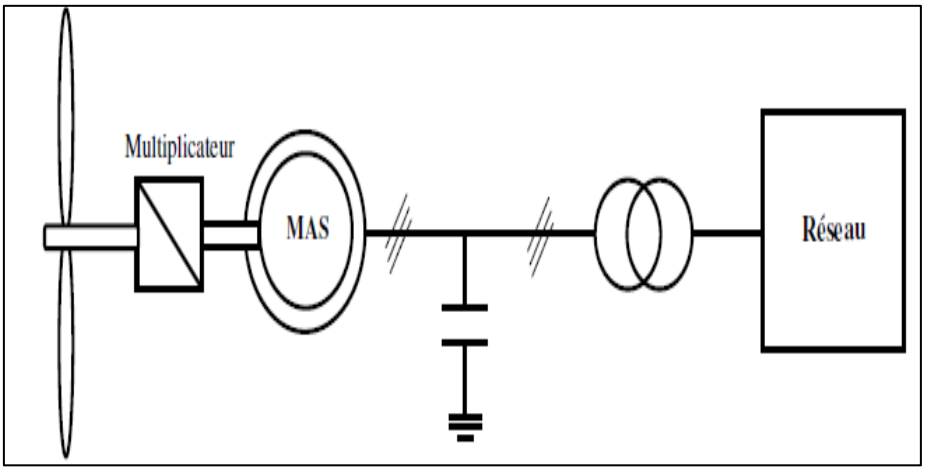


Figure I - 6 : Système éolien à vitesse fixe connecté au réseau.

Avantages

- Simple et utilisée depuis longtemps,
- Économiquement plus intéressante.

Inconvénient

- Vibrations plus importantes,
- Usure des pièces plus importante (maintenance plus importante),
- Seule une opération avec une vitesse fixe possible
- Mauvaise qualité d'énergie produite entraînant des perturbations sur le réseau.

I.8.3. Système Eolien à Vitesse Variable Connecté au Réseau

Le système possède deux configurations principales, l'une à base de la machine asynchrone à Double alimentation MADA (fig. I – 7) et l'autre à base de la machine synchrone à inducteur Bobiné ou à aimants (fig. I – 8).

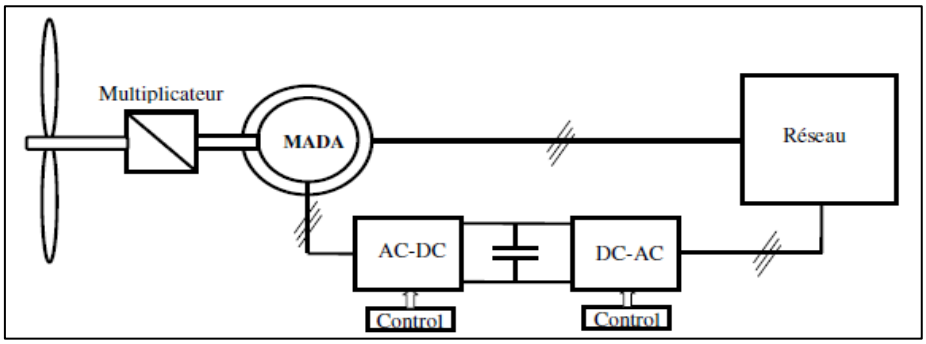


Figure I - 7 : Système éolien à vitesse variable à base d'une MADA connecté au réseau.

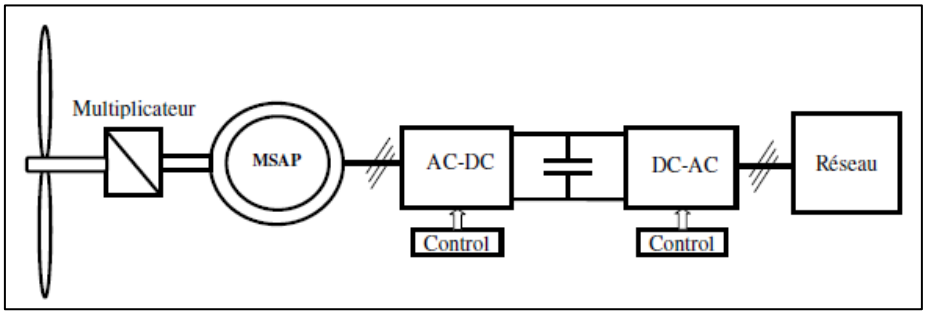


Figure I - 8 : système éolien à vitesse variable à base d'une MSAP connecté au réseau.

Avantages

- Optimisation de l'énergie captée,
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée sur le réseau.

Inconvénients

- Utilisation de machines spéciales,
- Convertisseur de puissance _complexe_,
- Coût élevé.

I.9 Conclusion :

Le chapitre I a abordé plusieurs aspects importants liés à notre étude sur les éoliennes. On a examiné le contexte et justifié la pertinence de notre sujet dans le contexte actuel de l'épuisement des ressources énergétiques et des préoccupations environnementales.

Les objectifs de notre étude ont été clairement définis, et ils visent à réaliser un HMI d'un émulateur éolienne basé sur la commande en vitesse d'une Machine à Courant Continu (MCC) à excitation séparée.

En outre, nous avons fourni des définitions claires des termes clés tels que ControlDesk, émulateur et HMI, afin de garantir une compréhension commune des concepts utilisés dans notre étude.

Enfin, nous avons exploré la constitution d'une éolienne en expliquant les principes et les composants impliqués dans ce système énergétique. Cela nous

donne un aperçu approfondi de la complexité de la conception et du fonctionnement des éoliennes.

Le Chapitre I a donc jeté les bases nécessaires pour la poursuite de notre étude, en fournissant une introduction, un contexte, des objectifs clairs, une méthodologie et des connaissances sur la constitution des éoliennes. Dans les chapitres suivants, nous approfondirons davantage ces aspects et nous concentrerons sur la conception et la construction d'une HMI pour notre simulateur de turbine éolienne.

Chapitre II

Modélisation et commande d'un émulateur éolien à base d'un MCC.

II.1. Introduction :

Ce chapitre présente les étapes de modélisation d'un émulateur physique pour une turbine éolienne. Tout d'abord, les variations du vent sont reconstruites en utilisant la décomposition spectrale de Van der Hoven. Ensuite, ces variations sont appliquées à un modèle de turbine éolienne de 3.7 kW, et les fluctuations de vitesse ainsi obtenues sont utilisées comme référence pour une machine à courant continu (MCC). L'objectif principal de cette étude est de développer un émulateur physique permettant de connecter différentes génératrices électriques, afin de tester leur intégration et leur efficacité dans un système éolien et sur un réseau électrique. Cela offre la possibilité d'effectuer des essais pratiques et de mieux évaluer les performances des différentes génératrices dans des conditions réelles afin d'aborder tout étude de simulation sur cette chaine, il est primordial de connaitre les modèles des différentes parties qui la composent.

Pour cela, nous présentons les modèles :

1. Du vent.
2. De la turbine éolienne.
3. De la MCC.
4. De l'hacheur à MLI. (Annex1)

II.2. Modélisation de la vitesse du vent

Pour reproduire les caractéristiques de la vitesse du vent, il existe deux méthodes. Ces méthodes sont basées sur des mesures expérimentales sur des sites bien définis et modélisation analytique à partir de modèles mathématiques. Dans notre exemple, nous utiliserons la flexibilité de la deuxième approche qui prend en compte plusieurs situations. C'est la méthode le plus couramment utilisé pour modéliser le vent, basée sur l'analyse de spectre de Van Der Hoven [9].

La vitesse du vent V est habituellement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps [5].

$$\boldsymbol{V = f(t)}$$

Cette fonction du vent peut être décomposée en une composante moyenne, variant

Lent, fluctuant :

$$\boldsymbol{V = V_0 + \sum_{i=1}^{n} A_i \, sin(\omega_i t + \varphi_i)}$$

Tel que :

V_0: est la composante moyenne.

A_i, ω_i, φ_i Sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuante.

Sur la Fig. II-1 est montré un exemple de profil de vent reconstruit à partir de la Caractéristique spectrale de Van der Hoven et c'est ce profil qui sera appliqué au système étudie dans ce mémoire. Son équation est donnée par :

$$V = 12 + 2sin(2.5t - \frac{\Pi}{5}) + 2sin(4t - \frac{\Pi}{3}) + 1.5sin(5.4t + \frac{\Pi}{12}) + 0.5sin(2.5t - \frac{\Pi}{12})$$

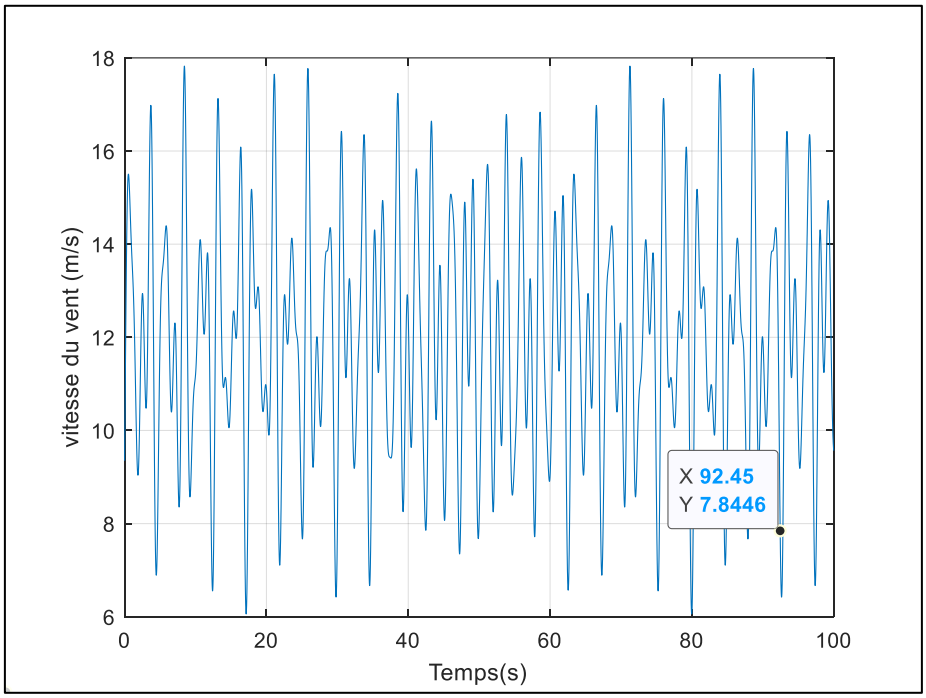


Figure II - 1 : Profil du vent

II.3. Modélisation de la turbine éolienne

II.3.1. Partie Aérodynamique

L'équipement impliqué dans notre étude comprenait une éolienne composée d'Une lame de longueur R entraîne un générateur à travers un multiplicateur de vitesse On connait déjà que l'énergie produite par le vent sur une surface S dépend du cube Vitesse du vent V et densité de l'air ρ. Ce pouvoir est donné par [10] :

$$P_v = \frac{1}{2}\rho S {V_1}^3 \quad (2.1)$$

En multipliant (P_v) par le coefficient de la puissance C_p, on obtient la puissance aérodynamique donnée par P_{aer}

$$P_{aer} = \frac{1}{2} Cp(\lambda, \beta)\rho S {V_1}^3 \quad (2.2)$$

L'expression de coefficient de puissant de cette turbine peut s'approcher par l'équation suivant :

$$C_p = \frac{P_{aer}}{P_v} = C_1\left(\frac{C_2}{\lambda_r} - C_3 * \beta - C_4\right)e^{\frac{-C_5}{\lambda}} + C_6 * \lambda \quad (2.3)$$

Avec $C_1 = 0.5109$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$, $C_6 = 0.0068$

Le paramètre λ_r dépend également de β et λ

$$\frac{1}{\lambda_r} = \frac{1}{\lambda + 0.08 * \beta} \tag{2.4}$$

La vitesse relative peut s exprimé par la relation suivant

$$\lambda = \frac{R \,.\, \Omega_t}{V} \tag{2.5}$$

Où R et V représentent respectivement le rayon de l'éolienne et la vitesse du vent.

La vitesse du vent

Ω_t : Vitesse de la turbine [radis].

Dans la Fig. II - 2 plusieurs courbes sont distinguées, mais nous nous intéressons aux Celui avec le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par un point optimal $\boldsymbol{\lambda_{opt}}$**=8.1** ; $\boldsymbol{C_{Pmax}}$**=0.475** ; β =5) est le point correspondant à la valeur maximale du coefficient La puissance Cp est donc à la puissance mécanique maximale récupérée. On Note que l'augmentation de β réduit le coefficient Cp, il en résulte donc une diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'arbre de l'éolienne.

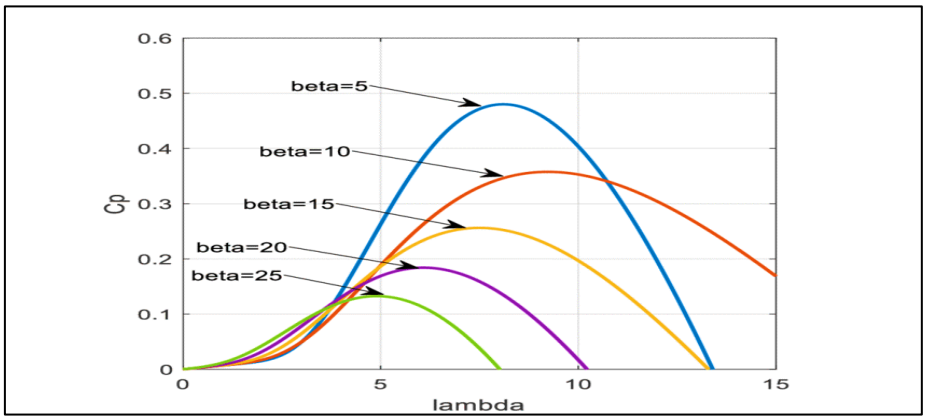


Figure II - 2 : Caractéristiques du coefficient de puissance pour déférent angle de calage β en fonction vitesse relatives λ

La puissance aérodynamique est exprimée comme suit :

$$P_{t=} C_t \, \Omega_t \tag{2.6}$$

Le couple aérodynamique aura donc pour expression

$$C_{aer} = Cp\,(\lambda\,,\beta\,)\,\frac{\rho\, S\, V_1{}^3}{2}\,\frac{1}{\Omega_t} \tag{2.7}$$

II.3.2. Modèle dynamique de la turbine éolienne

Le modèle dynamique de la turbine éolienne est le modèle à une masse et est illustré par la Fig. II -3. Les hypothèses posées sont [11] :

- L'inertie de l'axe lent et du multiplicateur est négligée par rapport à l'inertie des pales.
- Les frottements sont également négligés.
- L'inertie de la génératrice peut être considérée comme négligeable par rapport à celle de la turbine.

Le rôle du multiplicateur est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice. Dans le cas d'un multiplicateur idéal, le rapport de transmission peut être déterminé par :

$$\boldsymbol{G = \frac{C_{Tl}}{C_{Tr}} = \frac{\Omega_{Tr}}{\Omega_{Tl}}} \tag{2.8}$$

Ou C_{Tl}, C_{Tr} couples de la turbine sur l'axe lent et l'axe rapide.

Ω_{Tl}, Ω_{Tr}vitesses de rotation de la turbine sur l'axe lent et rapide.

Alors, l'équation dynamique de la turbine éolienne est donnée par :

$$\boldsymbol{J_{Tr}\ \frac{d\Omega_{Tr}}{dt} = C_{Tr} - C_g - \cancel{C_{frt}}\ \Omega_{Tr}} \tag{2.9}$$

C_{frt} : est le coefficient du frottement.

$$\boldsymbol{J_{Tr} = \frac{J_p}{G^2} + \cancel{J_g}} \tag{2.10}$$

Où :

J_p *:* Inertie des pales.

J_{Tr} *:* Inertie totale déplacée sur l'axe rapide de la génératrice.

La référence de vitesse à envoyer au régulateur est déterminée en utilisant Le couple électromécanique C_{Tr} de la turbine et de la génératriceC_{Tr} sur l'arbre rapide Fig. II -3. Donc, L'équation (2.9) devient alors :

$$\boldsymbol{\Omega_{Tr} = \int \frac{C_{Tr} - C_g}{J_{Tr}}\ dt} \tag{2.11}$$

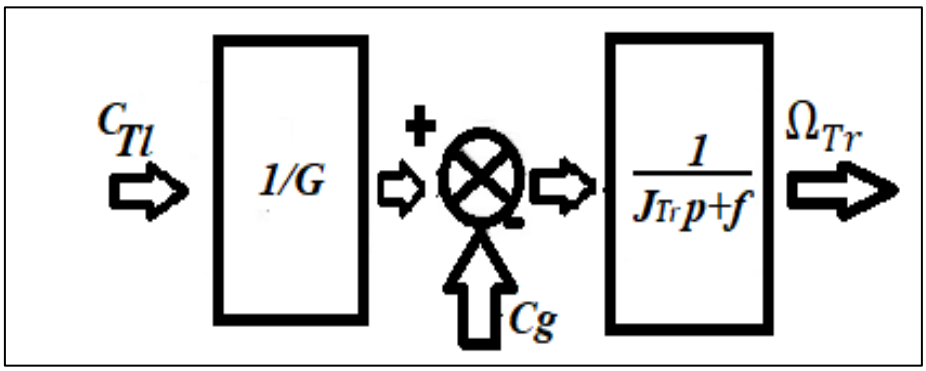


Figure II - 3 : Génération d'une vitesse de référence à partir du modèle de l'éolienne

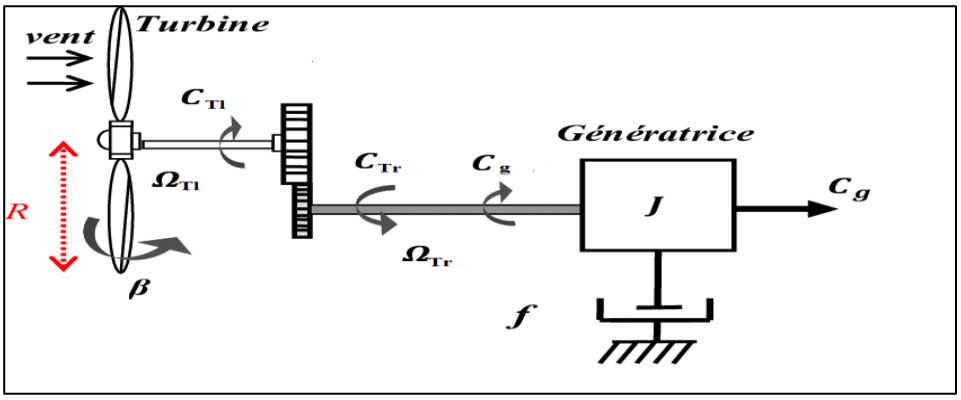


Figure II - 4 : Modèle à une masse ramenée sur l'arbre rapide

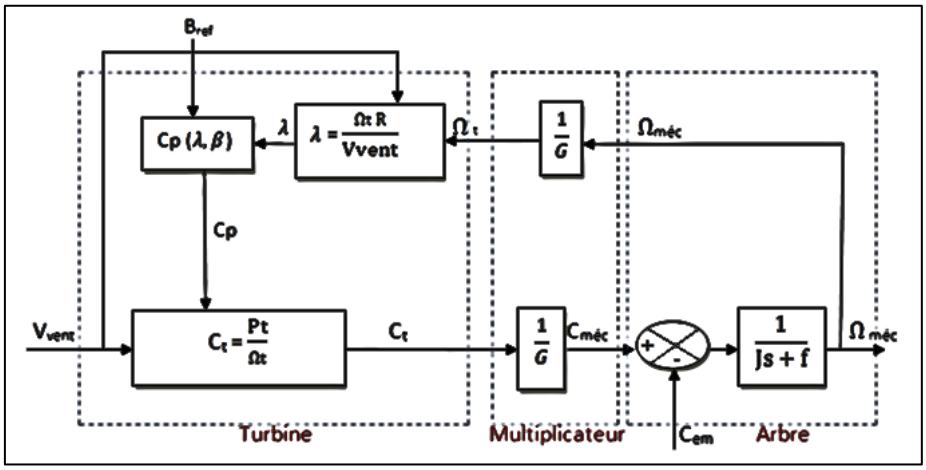


Figure II - 5 : Modèle de l'éolienne

II.4. Modélisation de la machine à courant continu :

On peut représenter la machine à courant continu en utilisant des équations électriques, électromécaniques et mécaniques.

Le modèle électrique de la machine à courant continu à excitation séparée est donné :

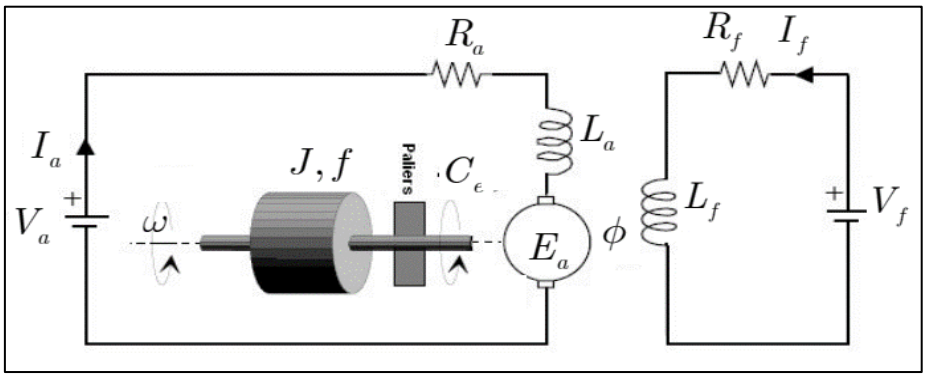


Figure II - 6 : modèle de moteur a courant continue à excitation séparé

II.4.1. Partie électrique de la machine :

En tenant compte de la résistance Ra et de l'inductance La du circuit d'induit, du collecteur, des balais et des connexions, et en supposant qu'elles sont toutes deux constantes

(2.12)

(sans variation due à l'échauffement ou à la saturation magnétique), l'équation de tension induite peut être exprimée comme suit :

$$\boldsymbol{u_a(t) = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e(t)}$$

La tension induite $e(t)$, également connue sous le nom de force électromotrice *(FEM)*, est directement proportionnelle à la vitesse angulaire Ω_{mcc} (t) et au flux inducteur ϕ_e(t). À son tour, le flux inducteur est proportionnel au courant d'inducteur i_e(t) et à l'inductance mutuelle L_m.

$$\boldsymbol{e(t) = \phi_e(t)\, \Omega_{mcc}\, (t)} \quad (2.13)$$

$$\boldsymbol{\phi_e(t) = L_f\, i_e(t)} \quad (2.14)$$

L'équation (2.12) indique que la tension induite e(t) s'oppose à u_a(t), ce qui signifie que le moteur réagit en générant une force électromotrice e(t) qui tend à équilibrer u_a(t),. Le couple électromagnétique C_{mcc}(t), développé peut-être exprimé par :

$$\boldsymbol{C_{mcc}(t) = \phi_e(t) i_a} \quad (2.15)$$

II.4.2. Partie mécanique

L'équation mécanique qui décrit le moteur en rotation est le suivant :

$$\boldsymbol{J_{mcc} \frac{d\Omega_{mcc}}{dt} = C_{mcc} - C_r - C_{fmcc}\Omega_{mcc}} \quad (2,16)$$

Où :

C_{fmcc} : Coefficient de frottement.

C_r : Couple résistant.

J_{mcc} : Inertie de la machine à courant continu

Ce sont les équations qui contrôlent le fonctionnement du moteur. Mais pour mieux les utiliser, nous utiliserons leurs transformées de Laplace. La transformée de Laplace de l'équation est la suivante :

$$\boldsymbol{u_a(t) = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e(t) \rightarrow V_a - E = R_a I_a + L_a p I_a} \quad (2,17)$$

$$\boldsymbol{e(t) = \phi_e(t)\Omega_{\text{mcc}}\, (t) \rightarrow E = \phi_e\, \Omega_{\text{mcc}}} \quad (2,18)$$

$$\boldsymbol{C_{mcc}(t) = \phi_e(t) i_a \rightarrow C_{mcc} = \phi_e I_a} \quad (2,19)$$

$$\boldsymbol{J_{mcc} \frac{\mathrm{d}\Omega_{mcc}(t)}{\mathrm{dt}} = C_{mcc}(t) - C_r - C_{fmcc}\Omega_{mcc}(t) \rightarrow C_{mcc} - C_r = C_{fmcc}\Omega_{mcc} + p J_{mcc}\Omega_{mcc}} \quad (2,20)$$

Cette transformées de Laplace obtenues il permet de modéliser le moteur sous

Forme de schéma bloc suivant :

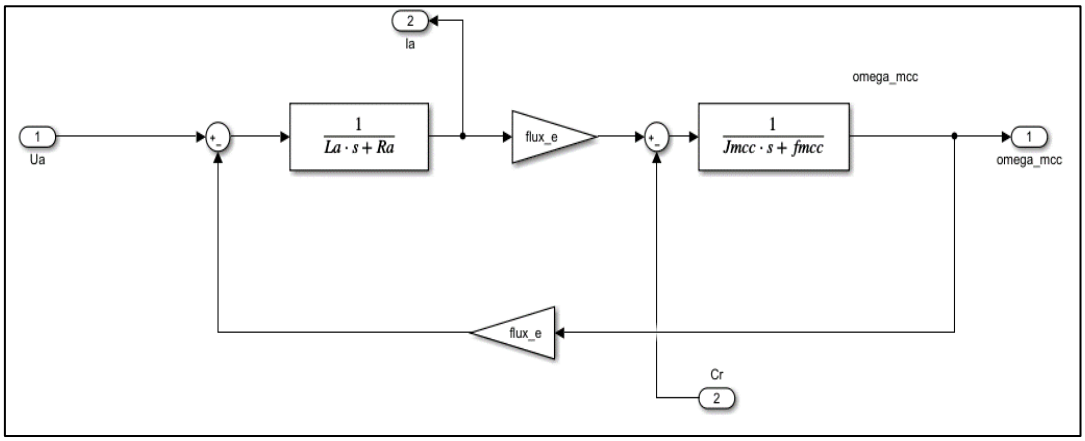


Figure II - 7 : Schéma bloc du modèle de la MCC

II.4.3. Stratégie de commande de la machine à courant continu

À la sortie du modèle de la turbine, nous obtenons une vitesse de rotation. Cette vitesse de rotation représente la référence à laquelle nous souhaitons asservir la machine. L'objectif de la commande est de maintenir la vitesse de rotation malgré le couple résistant, en utilisant les mesures du courant d'induit et de la vitesse de rotation de la machine. Pour cela, des régulateurs de type proportionnel intégral (PI) seront utilisés en raison de leur simplicité et de leur capacité à réduire l'erreur statique.

Le régulateur sera constitué de deux boucles en cascade : une boucle interne qui régule le courant de la machine et une boucle externe qui contrôle la vitesse de rotation de la machine (Fig. II - 8) La boucle interne sera dix fois plus rapide que la boucle externe afin d'assurer une bonne régulation. Les fonctions de transfert des régulateurs seront de la forme :

Pour la boucle de courant :

$$FT_{courant} = \frac{K_{pc}p + K_{ic}}{p}$$

Pour la boucle de vitesse :

$$FT_{vitesse} = \frac{K_{pv}p + K_{iv}}{p}$$

Par compensation des pôles on détermine les paramètres des régulateurs comme suit :

$K_{pc} = \frac{L_a}{\tau_i}$: Le coefficient proportionnel du régulateur de boucle de courant.

$K_{pv} = \frac{R_a}{\tau_v}$: Le coefficient proportionnel du régulateur de boucle de vitesse.

$K_{ic} = \frac{R_a}{\tau_i}$: Le coefficient d'intégrale du régulateur de boucle de courant.

$K_{iv} = \frac{f_{mcc}}{\tau_v}$: Le coefficient d'intégrale du régulateur de boucle de vitesse.

τ_i : Constante de temps de la boucle de courant est fixée à l ms.

τ_v : Constante de temps de la boucle de vitesse est fixée à 10 ms.

La fonction de transfère de la MCC en introduisant les régulateurs est :

$$FT_{mcc} = \frac{1}{L_a p + R_a} \frac{1}{J_{mcc} p + f_{mcc}}$$

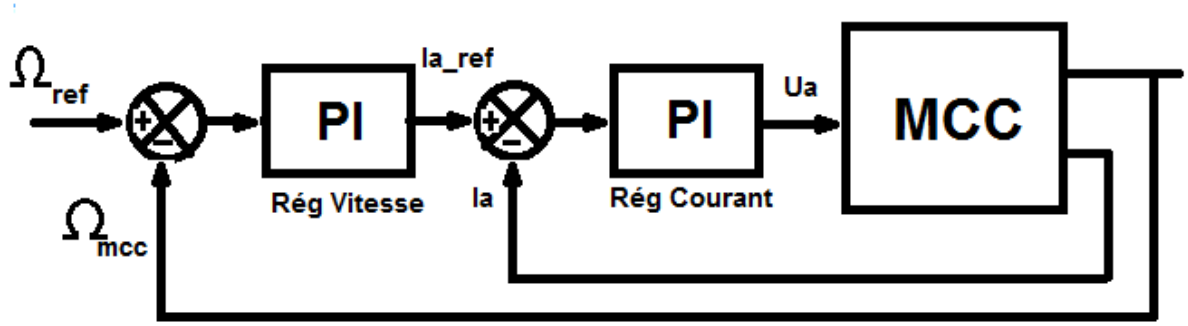


Figure II - 8 : Schéma bloc du régulateur

II.4.4. Résultats de simulation des modèles de la turbine et de la machine à Courant continu.

Le schéma utilisé pour la simulation est illustré dans la Fig. II - 1. Dans la Fig. II - 2, on peut observer le profil de la vitesse du vent reconstruite à partir de la caractéristique spectrale de Van der Hoven. Fig. II - 12 représente la puissance mécanique générée par la turbine. Malgré le fait que cette puissance soit proportionnelle au cube de la vitesse du vent, elle ne parvient pas à atteindre la puissance nominale de la turbine (3.7 kW), même lors de vents forts (environ 12 à 18 m/s). Cela est dû au fait que la vitesse de rotation de la turbine n'est pas adaptée à la vitesse du vent mais on a une bonne poursuite entre la valeur de référence de la vitesse de rotation de la MCC et la vitesse de référence pour faire l'adaptation on force la turbine de suivre un couple correspondant a sa puissance maximale.

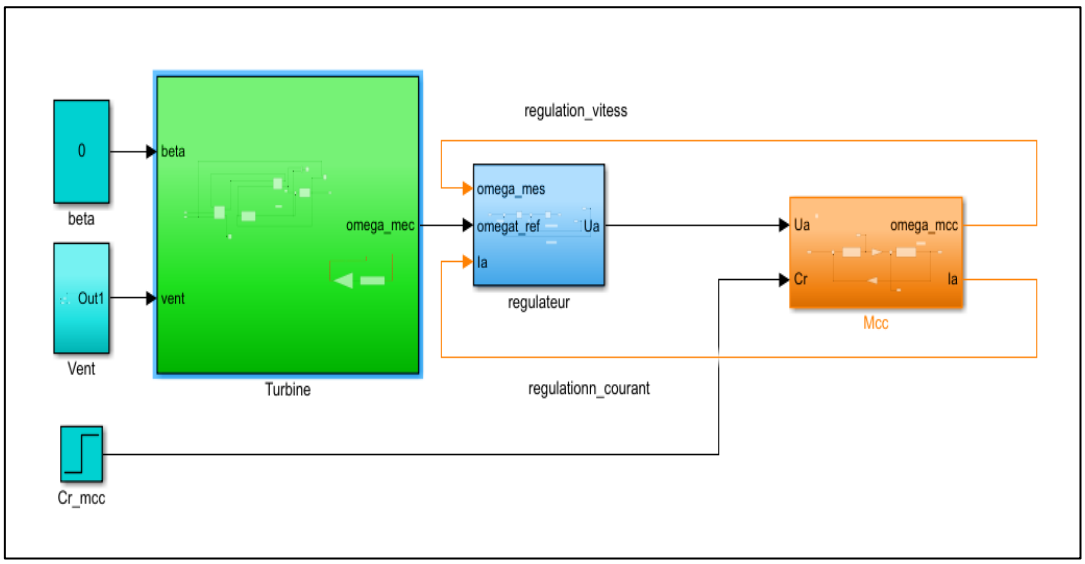


Figure II - 9 : Schéma bloc de la turbine éolienne associée à la MCC

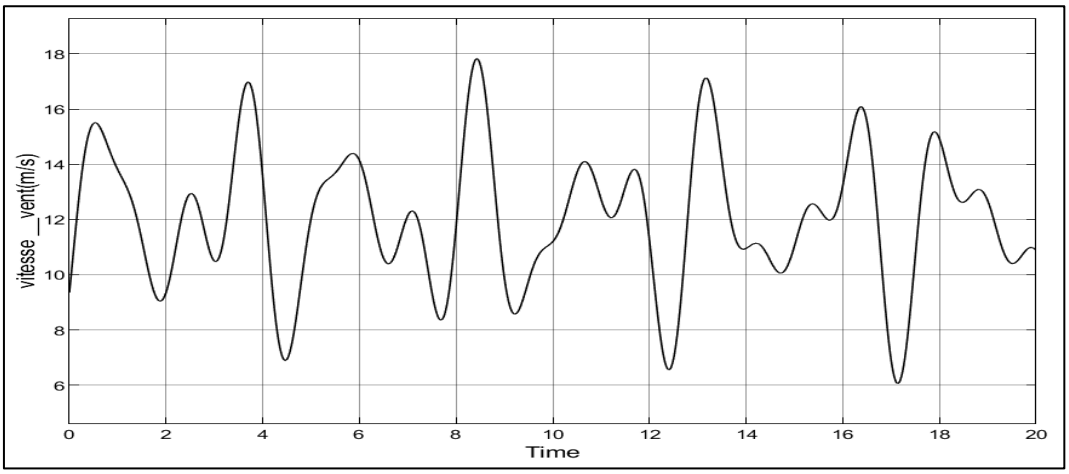


Figure II - 10 : simulation de vitesse du vent

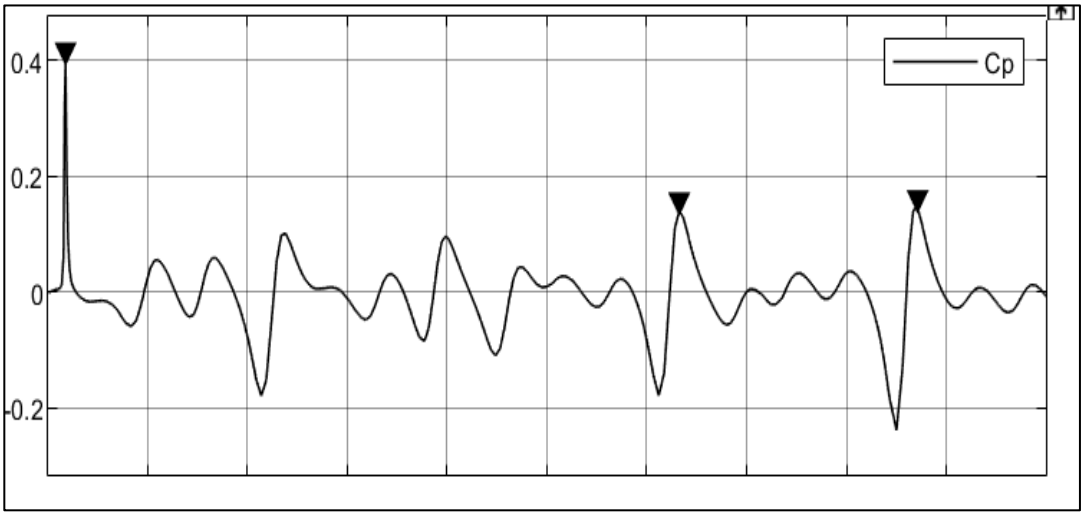


Figure II - 11 : coefficient de puissance

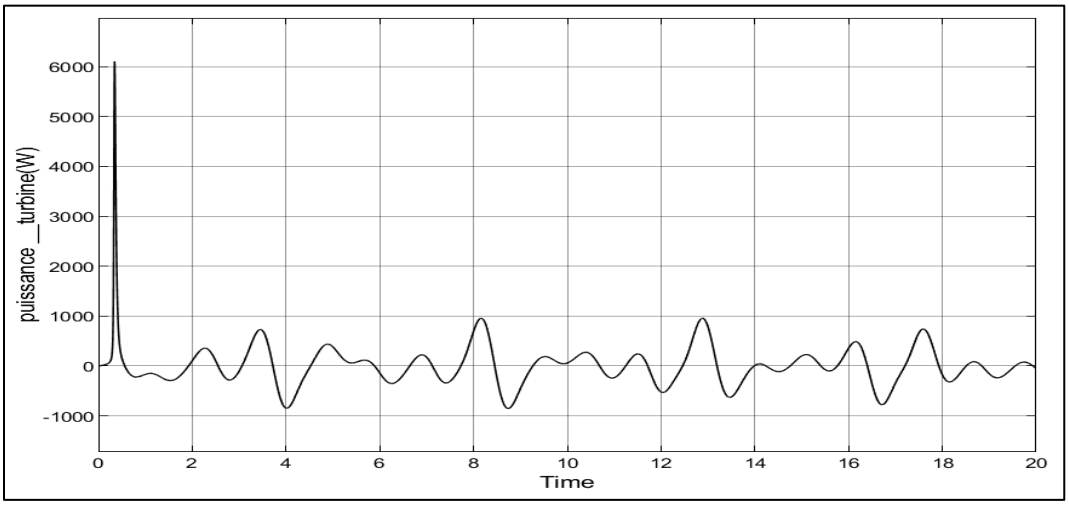


Figure II - 12 : Puissance mécanique de la turbine

On remarque que la valeur moyenne de Cp est environ 0, ce qui implique que nous n'avons pas une adaptation de la vitesse mécanique ou de la vitesse du vent, car Cpmax=0.475. Pour adapter la vitesse mécanique au vent, on applique une technique qui

permet d'extraire le maximum de puissance à chaque instant du vent, appelée MPPT (Maximum Power Point Tracking).

II.4.5. Commande optimale de la turbine

Pour maximiser la puissance capturée par la turbine éolienne, il est essentiel d'ajuster le coefficient Cp, qui dépend de la vitesse de la génératrice. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable offre la possibilité de maximiser cette puissance. Par conséquent, il est nécessaire de concevoir des stratégies de commande visant à optimiser la puissance générée en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence, indépendamment de la vitesse du vent.

a. Maximisation de la puissance avec la connaissance de la courbe Cp

Les techniques de MPPt varient en fonction des informations requises pour délivrer la référence de vitesse. La méthode MPPt (Maximum Power Point tracking), basée sur la connaissance de la courbe Cp, permet de rechercher le point de puissance maximale en utilisant cette caractéristique. Elle offre une convergence rapide vers l'optimum en utilisant simplement des mesures simples de vitesse de rotation, sans nécessiter obligatoirement l'utilisation de capteurs de vitesse du vent. Cette méthode repose sur l'adaptation du système pour suivre un couple maximal correspondant à sa valeur de vitesse [12],[14].

b. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse :

Ce type de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie légèrement en Régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui Implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine équation (2.9), on obtient L'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine : (2,21)

$$\boldsymbol{J_{Tr}\frac{d\Omega_{Tr}}{dt} = C_{Tr} - C_{em} = 0}$$

L'équation (2.21) nous permet d'écrire :

$$\boldsymbol{C_{Tr} = C_{em}} \quad (2,22)$$

L'équation précédant signifie que le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien et est défini par :

$$\boldsymbol{C_{emref} = C_{Trestime}} \quad (2,23)$$

Le couple éolien peut être calculé en utilisant une estimation de la vitesse du vent et la mesure de la vitesse mécanique, à l'aide de l'équation suivante

$$\boldsymbol{C_{Trestime} = Cpmax\frac{\rho S V_{estime}{}^{3}}{2\Omega_{testime}}} \quad (2,24)$$

L'estimation de $\Omega_{testime}$ vient de la vitesse mécanique de la turbine Ω_{Tr} *:*

$$\Omega_{testime} = \Omega_{Tr} \quad (2,25)$$

La vitesse du vent estimée est donnée par l'équation suivante :

$$V_{estime} = \frac{R * \Omega_{testime}}{\lambda_{opt}} \quad (2,26)$$

$$C_{emref} = \frac{C_{pmax} \Pi \rho R^2 {\Omega_{tr}}^2}{2{\lambda_{opt}}^3} \quad (2,27)$$

Le schéma Simulink est illustré dans la Fig. I – 13

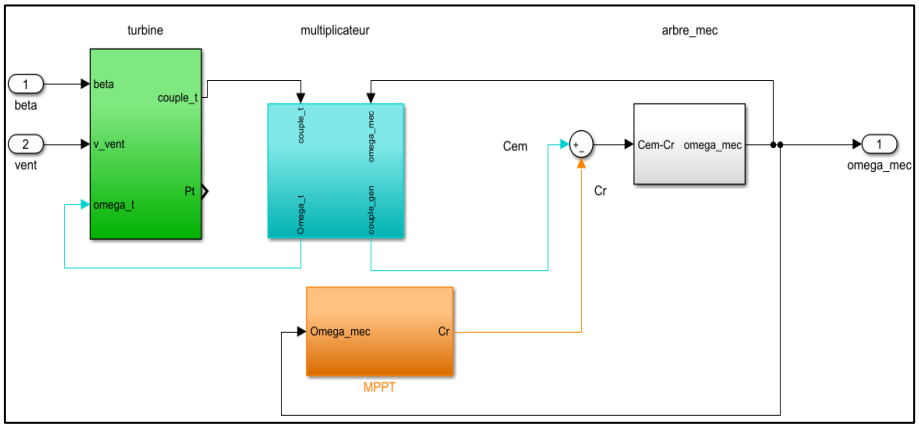


Figure II - 13 : schéma Simulink avec l'introduction de MPPT

Résultat de simulation :

Après avoir construit le modèle Simulink, nous avons contraint le système à suivre un couple correspondant à la puissance maximale extraite Voici les résultats obtenus :

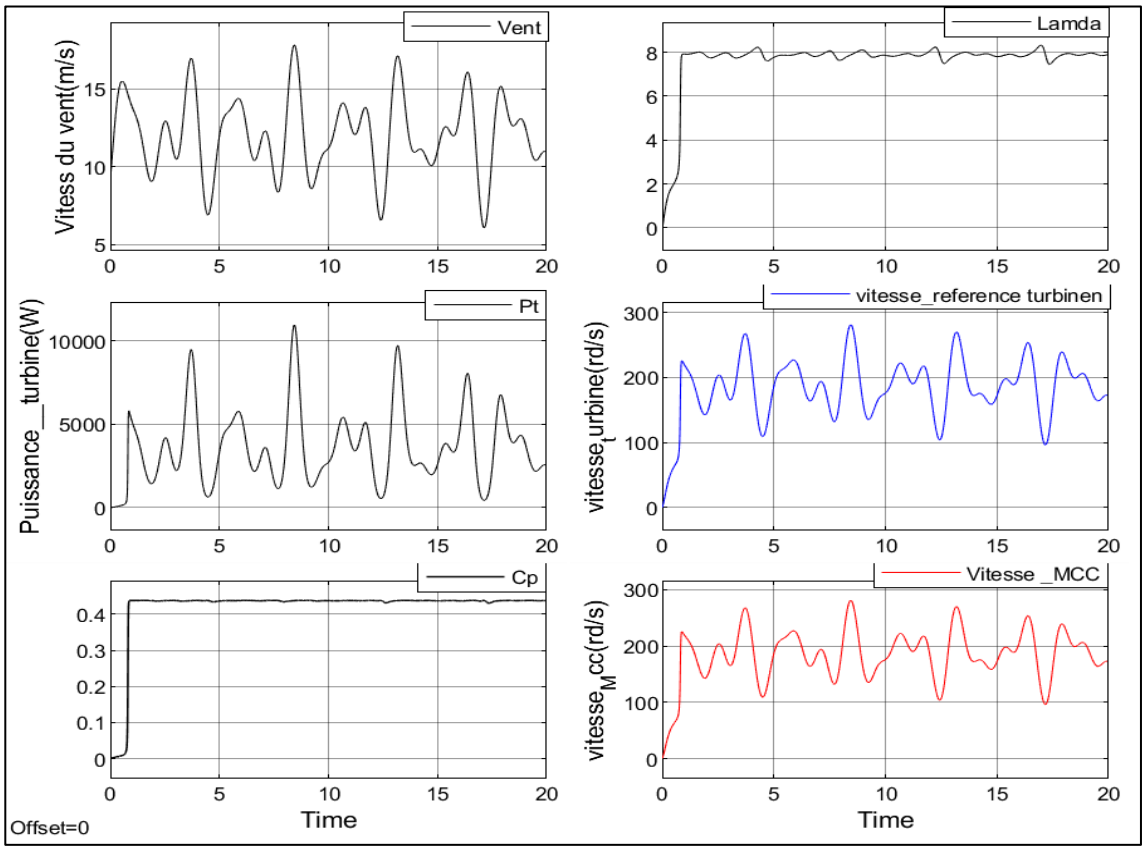


Figure II - 14 : résultats de simulation après l'introduction de MPPT

c. Synthèse des résultats :

On observe que le coefficient de puissance Cp se rapproche de sa valeur maximale Cpmax=0.475, ce qui suggère une quasi-adaptation entre la vitesse de rotation de la turbine et la vitesse du vent. De plus, on constate une augmentation de la puissance de la turbine au-delà de sa valeur nominale lorsque le vent atteint des vitesses élevées (12 m/s - 18 m/s). Ces résultats confirment l'importance de mettre en œuvre une loi de commande optimale pour une éolienne à vitesse variable, correspondant à la plage 3 des caractéristiques de puissance. Ils soulignent également la nécessité d'utiliser la régulation de l'angle de calage afin de maximiser la puissance et d'éviter la saturation de la turbine.

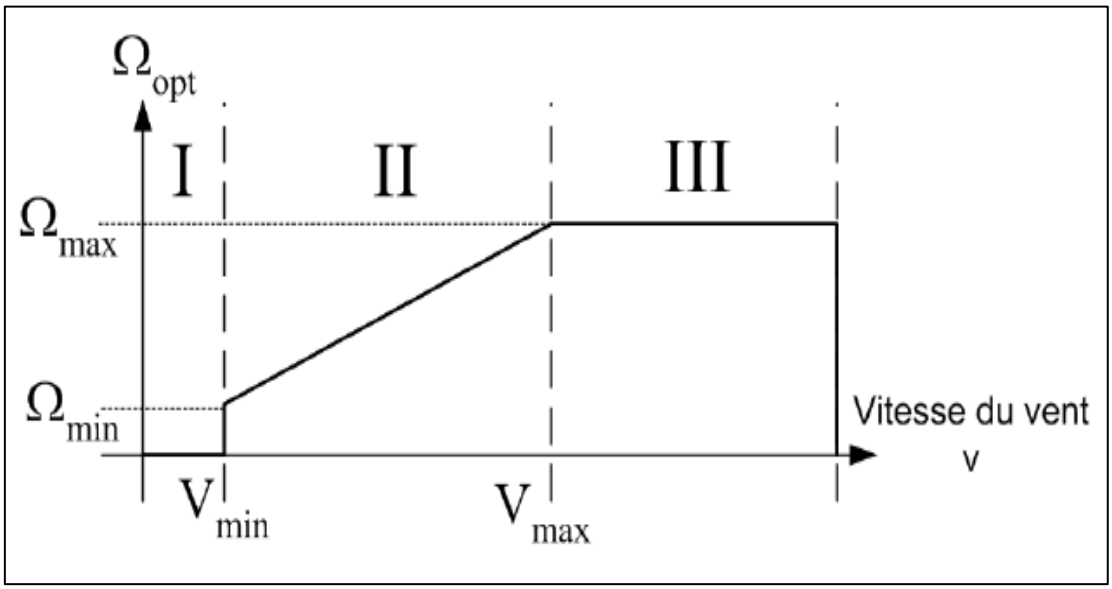


Figure II - 15 : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable

II.5. Conclusion :

Ce chapitre présente les étapes de modélisation d'une turbine éolienne et l'entraînement d'une machine à courant continu pour reproduire les variations de vitesse d'une éolienne réelle. Dans un premier temps, un modèle a été établi pour générer des variations de la vitesse du vent en utilisant la décomposition spectrale de Van der Hoven. Ces variations ont été appliquées à un modèle de turbine de 3.7 kW, en utilisant les équations de base qui relient le couple éolien à la densité de l'air, au coefficient de puissance de l'éolienne, à la vitesse du vent et à la longueur des pales. La vitesse de rotation de l'éolienne, calculée en fonction de l'inertie, a ensuite été utilisée comme référence pour la machine à courant continu de même puissance. La machine à courant continu a été modélisée et commandée par un régulateur PI afin de réduire l'erreur statique. Les résultats de simulation ont montré une bonne poursuite de la référence de vitesse.

Cependant, en adaptant la vitesse du vent à la vitesse de rotation de la turbine, on parvient à atteindre la puissance maximale.

Chapitre III

Simulation software in the Loop SIL d'un émulateur éolien et Réalisation d'une HMI

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, notre objectif est de réaliser une interface homme-machine (HMI) répondant aux besoins de notre travail. Cette interface joue un rôle essentiel dans la mesure des différentes grandeurs s l'émulateur éolien, telles que le courant, la tension d'induit et le rapport cyclique. On a utilisé le logiciel Control Desk pour faciliter cette tâche.

Pour commencer, nous décrirons les différentes parties et composants du banc d'essai afin de mieux comprendre son fonctionnement. Ensuite, nous aborderons le paramétrage nécessaire sur le logiciel MATLAB-Simulink, qui constitue la base de notre système de contrôle, On a détaillé ensuite les étapes à suivre pour réaliser l'interface HMI, en expliquant les choix de conception et les fonctionnalités implémentées. Nous mettrons également l'accent sur les essais réalisés et l'interprétation des résultats obtenus.

L'objectif final de ce chapitre est de mettre en place une interface conviviale et efficace pour faciliter les mesures et les contrôles sur notre émulateur éolien, tout en assurant une interprétation claire des données recueillies.

III.2. Besoins spécifiques de l'interface HMI

On se concentre sur les besoins spécifiques de l'interface HMI du banc d'essai de l'émulateur éolien. L'objectif est de déterminer les fonctionnalités nécessaires pour visualiser les mesures pertinentes sur l'interface HMI.

Parmi les besoins spécifiques identifiés, on considère la visualisation du courant induit, de la tension d'induit, et de la vitesse de sortie du MCC. Il est essentiel que ces mesures puissent être affichées de manière claire et compréhensible sur l'interface HMI. Cela permettra aux utilisateurs de surveiller en temps réel les paramètres importants du système éolien simulé.

En plus de la visualisation des mesures, l'interface HMI doit permettre d'ajuster les gains des régulateurs PI de manière intuitive. Cette fonctionnalité facilitera le réglage des paramètres de contrôle afin d'optimiser les performances du système.

Il est primordial que l'interface HMI offre une présentation conviviale et ergonomique des informations, avec des graphiques clairs, des indicateurs visuels et des éléments de contrôle appropriés. Ainsi, les utilisateurs pourront interagir facilement avec l'interface et interpréter les données affichées.

III.3. Outils et technologies appropriés pour le développement de l'interface

- 1. Alimentation stabilisée AC/DC 220 pour la partie induit et pour l'excitation du moteur pour une configuration shunt.
- 2. Convertisseur SEMIKRON AC/DC (Redresseur +Filtre+ Hacheur).
- 3. Moteur à courant continu de 2 KW.
- 4. Carte de mesures 3 courants/3 tensions menue des capteurs à effet Hall.
- 5. Résistance variable.
- 6. carte de contrôle dSPACE DS1104.

- 7. Micro-Ordinateur plus puissant équipé par le logiciel control desk et Matlab-Simulink.

III.3.1. Convertisseurs SEMIKRON AC/DC :

Ce convertisseur est composé :

- D'un module en pont redresseur,
- D'un onduleur à base d'IGBT de puissance de 20 KW,
- D'un hacheur,
- L'ensemble des capacités électrolytiques de filtrage.

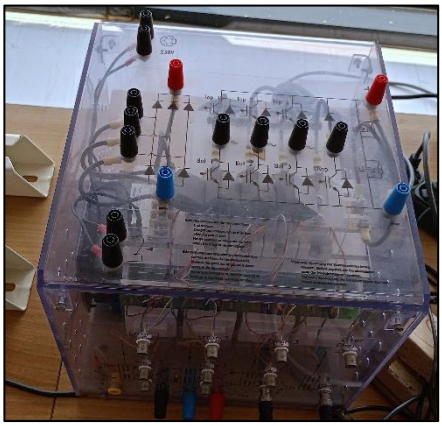


Figure III - 1 : Photo d'un convertisseur SEMIKRON

III.3.2. Carte dSPACE :

Le contrôle en temps réel des systèmes continus est réalisé en utilisant un PC connecté à la carte dSPACE DS1104. La programmation est effectuée à l'aide de l'outil de modélisation SIMULINK, qui permet de formuler le problème de manière graphique en utilisant des blocs interconnectés. De nos jours, de nombreux systèmes de développement en temps réel basés sur des DSP offrent une interface avec Simulink, ce qui permet de convertir les blocs Simulink en code machine pouvant être exécuté sur un système à base de DSP. Cette approche réduit considérablement le temps de développement et de prototypage pour le contrôle des systèmes. Le prototypage du système passe ainsi par trois étapes [1][17] :

- Construction du système de commande en utilisant les blocs Simulink.
- Simulation du système pour évaluer les résultats dans différents scénarios.
- Exécution du modèle en temps réel en utilisant la carte DS1104.

Le processeur principal utilisé est le MPC8240, qui fonctionne à une fréquence de 250 MHz. La carte DS1104 (Master PPC) est équipée de 8 convertisseurs analogiques-numériques (CAN) avec une plage de tension d'entrée de -10V à +10V, ainsi que de 8 convertisseurs numériques-analogiques (CNA) avec une plage de tension de sortie de -10V à +10V. Elle offre également plusieurs interfaces, telles que des E/S numériques et des codeurs incrémentaux, entre autres (voir figure 2). La carte DS1104 intègre également un DSP esclave, le TMS320F240 DSP, qui sera utilisé pour générer les signaux PWM.

III.4. Implémentation en temps réel de la commande

Pour implémenter la commande en temps réel en utilisant la carte « dSPACE DS1104 R&D Controller Board » et le logiciel Matlab/Simulink, on a besoin de :

1) La carte de contrôle dSPACE DS1104 [15],[16]:



Figure III - 2 : Illustration de la carte DS1104



Figure III - 3 : Dongle d'activation de la licence

2) La licence sous forme de clé USB (Dongle)

3) La licence software (fichier Licence.dsp)
4) Le fichier Keys.dsp

5) Et enfin le panneau de connexion CP1104



Figure III - 4 : Illustration du Panneau de contrôle CP1104

III.4.1. Construction du Model SIMULINK

1. Avant de créer un model sous Simulink, démarrez le programme Matlab puis choisissez le model de votre carte DSPACE à l'ouverture de Matlab [15].

Une fois la carte choisie et activée vous aurez le message suivant (figure)

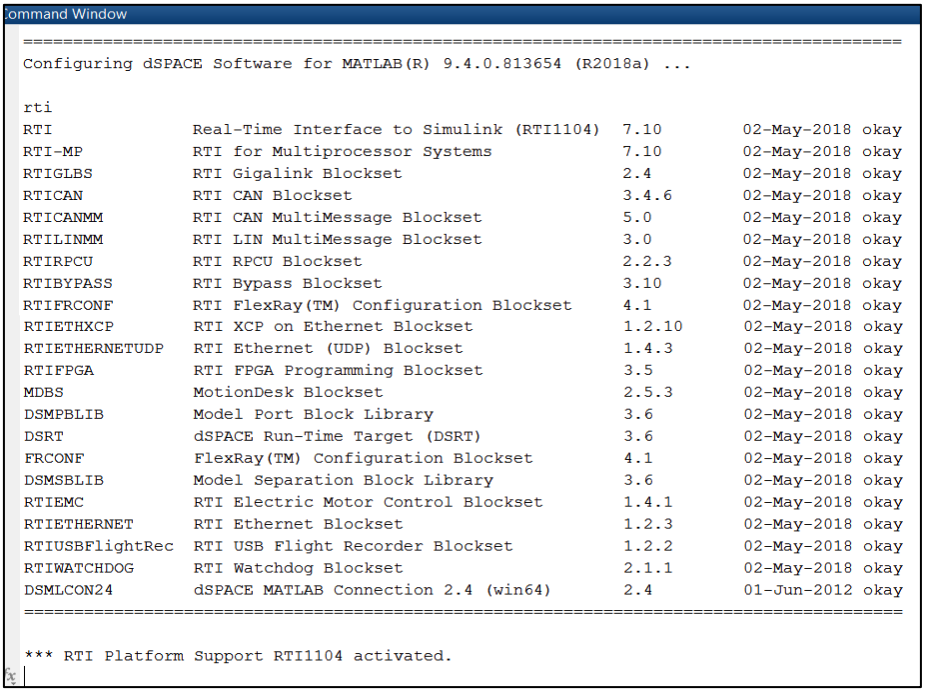
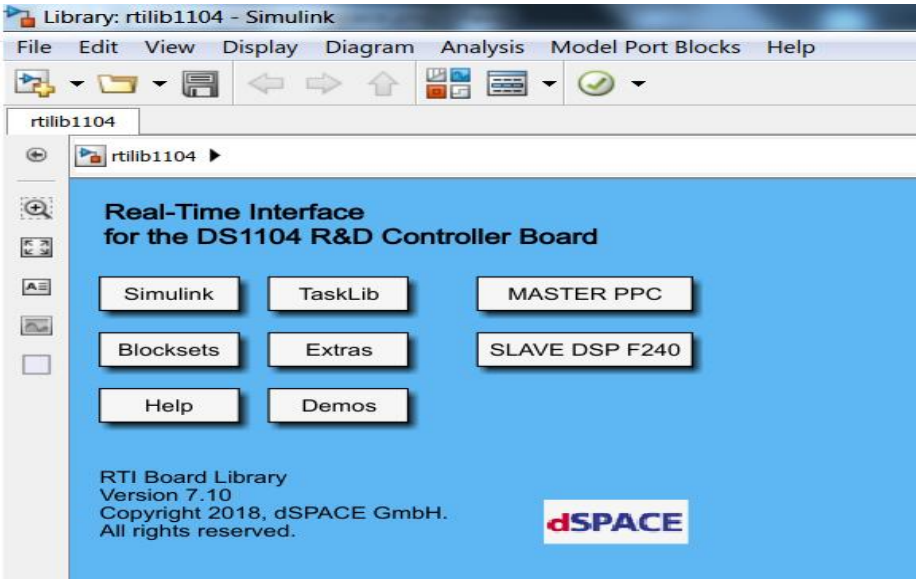


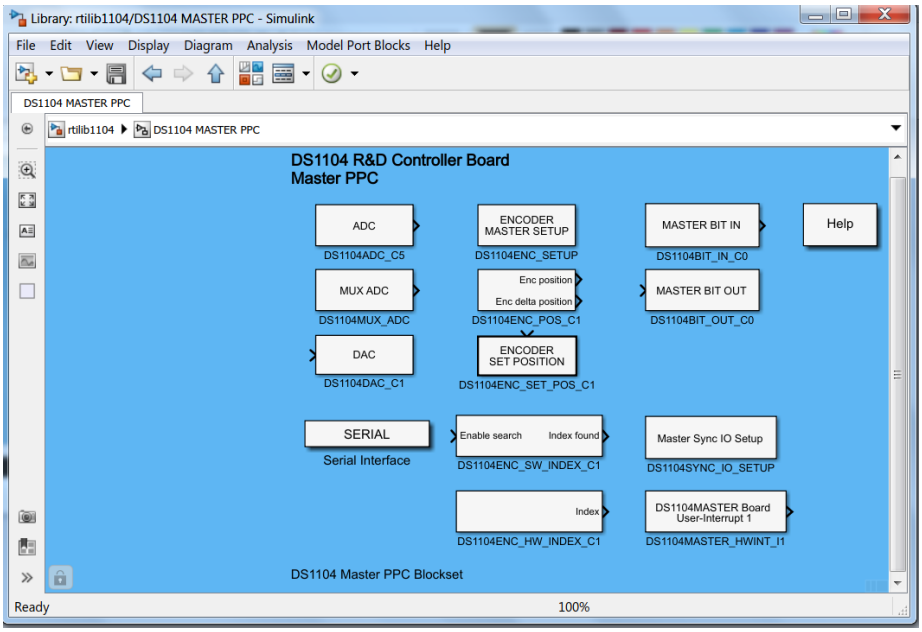
Figure III - 5: fenêtre apparaît après avoir choisi le modèle de la carte

2. Démarrez ensuite le programme Simulink dans Matlab. Pour ajouter des blocs de la librairie RTI1104.

Ouvrez la librairie en tapant la commande RTI1104, ou à partir de Simulink Librairy Brower.



3. Cliquez par exemple sur MASTER PPC, la fenêtre suivante s'ouvre :



4. Choisissez new file.
5. Enregistrez le fichier et ensuite réglez les paramètres de simulation.

Paramètre de simulation :

5.1 - Dans l'onglet Simulation, accédez à Model Configuration Parameters. Dans l'onglet **Solver,** modifiez le Stop time en mettant Inf (infini). Dans **Solver Options**, choisissez le type **Fixed-step**, puis sélectionnez une période d'échantillonnage, par exemple 1e-3 ou 1e-4.

5.2 - Dans l'onglet **Optimization**, décochez la case **Bloc réduction.**

5.3 - Toujours dans **Optimization**, accédez à **Signals and Parameters**, puis décochez la case Signal **storage reuse.**

5.4 - Allez dans **Hardware implementation**, puis dans **Device Vendor**, choisissez **Generic**. Pour le Device Type, sélectionnez Custum, et pour le **Byte ordering**, choisissez **Big Endian.** Pour le paramètre **Signed Integer division rounds to**, choisissez **Zero.**

5.5 - Ensuite, accédez à **Code Generation**. Dans **System target file**, choisissez le **fichier rti1104.tlc**, et pour le **Language**, sélectionnez C (pour générer un code C). Cliquez ensuite sur **Apply.**

5.6 - Vous pouvez maintenant exécuter le programme et générer le code C en cliquant sur Control+B (B comme build), ou en cliquant sur l'icône correspondante. Vous pouvez également accéder au menu **Cod**e, puis **C/C++ Code**, et sélectionner **Build Model**.

5.7 - Le code C sera créé, compilé et envoyé à la carte DSPACE. **Un fichier *.sdf** sera ensuite généré dans le répertoire de travail. Ce fichier contient toutes les variables utilisées dans votre programme Simulink.

III.4.2. Création d'une application temps réel avec ControlDesk Next Generation

III.4.2.1. Description de l'interface ContrôleDesk

L'espace de travail dans ControlDesk est composé de plusieurs éléments :

- Une fenêtre de navigation (Navigator) qui répertorie les agencements (Layouts), la carte connectée et le programme en cours.
- Une zone de travail qui contient le Layout.
- Une fenêtre d'instruments (instrument selector) pour créer un Layout.
- Une fenêtre d'outils (tools window) qui affiche les variables Simulink (fichier .sdf).

Les variables sont organisées sous forme d'arborescence correspondant aux blocs et sous-blocs du programme Simulink.

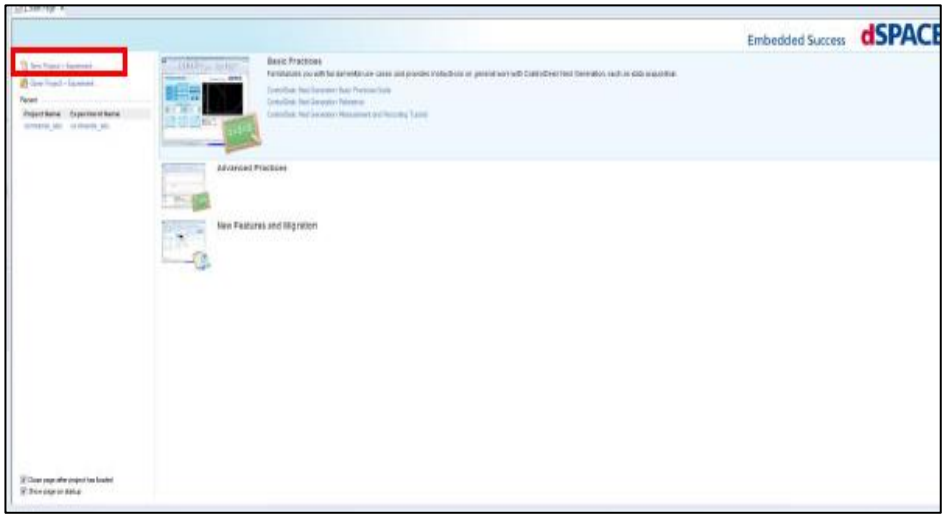
ControlDesk propose trois modes de fonctionnement :

- Le mode de création de Layout (Layouting) : permet de construire le Layout.
- Le mode standard : utilisé pour tester la validité des connexions entre le Layout et les variables Simulink.
- Le mode de mesure (Measuring) : permet d'exécuter le programme contenu dans le DSP avec le Layout comme interface homme-machine (HMI).

Layout est une interface graphique à laquelle on peut ajouter divers instruments de contrôle /ou de Visualisation, dans le but de visualiser et/ou modifier en temps réel les différentes variables du projet.

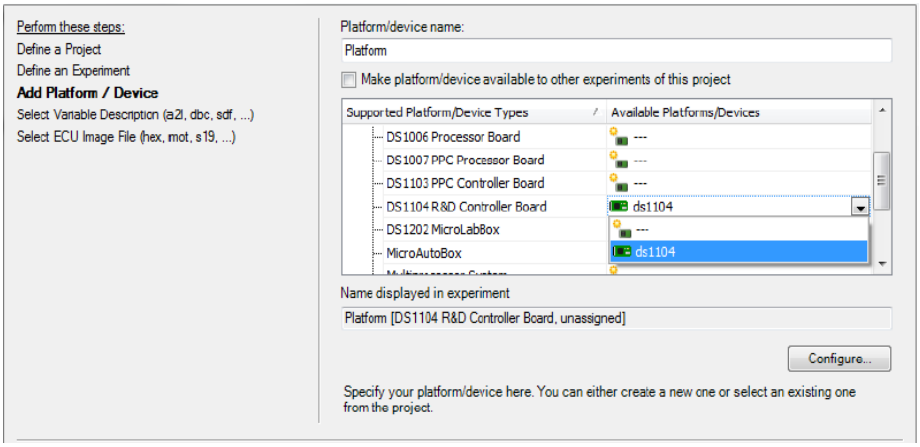
III.4.2.2. Créer un nouveau projet sous ControlDesk :

1- En ouvrant l'icône ControlDesk Next Génération sur votre bureau, la fenêtre suivante s'affiche.



2- Dans ControlDesk, un projet doit inclure au moins une expérience. Pour créer un nouveau projet et une nouvelle expérience, accédez au menu Fichier, puis sélectionnez Nouveau **Projet+Expérience**. Choisissez un nom et définissez le répertoire de sauvegarde du projet.

3- La fenêtre de configuration du projet apparaîtra. Entrez le nom du projet, puis cliquez sur Suivant. Sélectionnez Next.

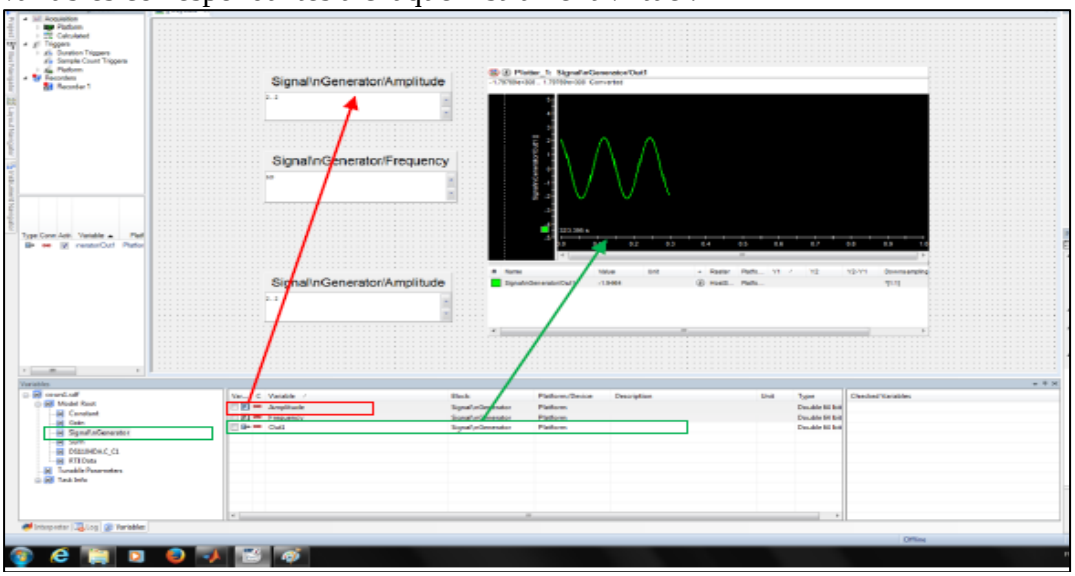


Choisissez la plateforme (DS1104) dans la liste, puis cliquez sur **Next**.

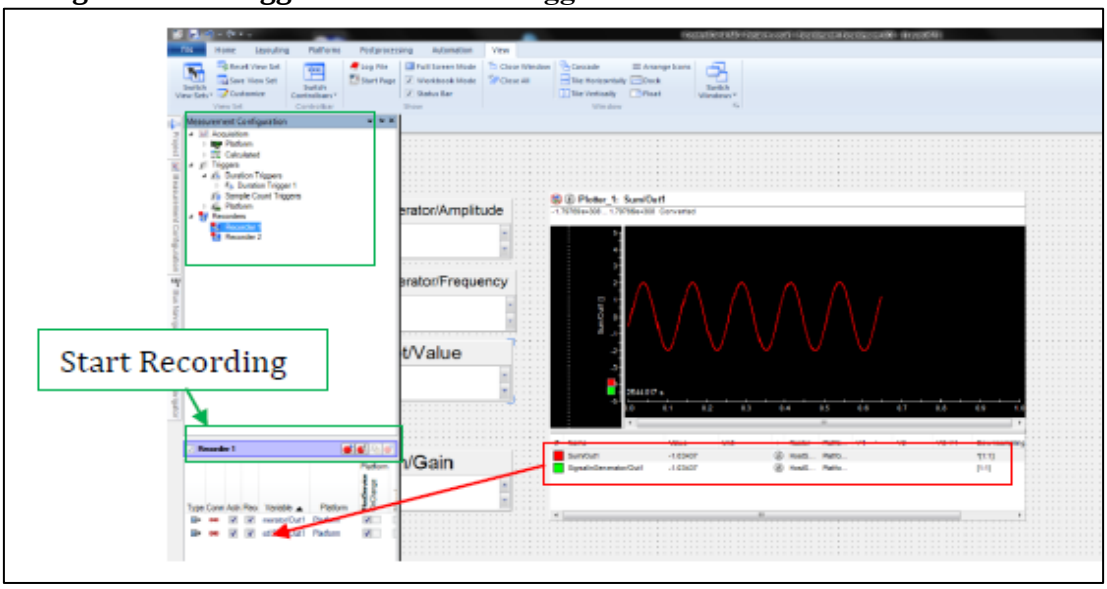
4- Sélectionnez **le fichier .sdf** correspondant (généré lors de l'exécution de votre programme Simulink) et cliquez sur Terminer.

Vous venez de créer un projet. Maintenant, vous pouvez créer une ou plusieurs **Layout (**mises en page) associées à ce projet. Layout est créée dans l'espace de travail. Ajoutez des instruments à Layout ajouter, en distinguant **les instruments virtuels** utilisés pour la visualisation et la modification des variables, et **les instruments de données** utilisés pour l'acquisition de variables (à l'écran ou dans un fichier). ControlDesk offre également la possibilité de personnaliser de nouveaux instruments et de les enregistrer dans une bibliothèque à l'aide de l'onglet "Instruments personnalisés". Une fois les instruments ajoutés, attribuez une variable à chaque bloc et ajustez les propriétés de l'instrument si nécessaire en effectuant un clic droit et en sélectionnant Propriétés [16].

III.4.3. Lancer une mesure

- Pour effectuer la mesure d'une variable, il est nécessaire de connecter cette variable à un **Virtual Instrument**. Lorsque la mesure est effectuée correctement, cela confirme que votre application ControlDesk Next Generation fonctionne comme prévu.
- Insérez dans le Layout un « **plotter** » et des « **numerical input** », ensuite glissez les variables correspondantes à chaque instrument virtuel.
- 

- Pour prolonger la durée d'affichage des mesures, accédez à " **Measurement Configuration**> **Triggers** > **Duration Trigger1''**1" et modifiez la "Durée".



- Pour enregistrer les données (mesures) sur votre ordinateur, accédez à " **Measurement** > **View Measurement** ", puis dans " **Recorders** ", sélectionnez " **Create New**
- **Recorder**. ". Donnez un nom à l'enregistrement, puis faites glisser les variables que vous souhaitez mesurer dans le tableau de **Recorder**.

- Pour exporter les données vers un fichier Matlab, accédez à Projet, Expérience1, Données de mesure, puis effectuez un clic droit sur le fichier .idf créé. Choisissez l'option d'exportation et sélectionnez le format de fichier. mat dans la liste déroulante de l'onglet Enregistrer sous le type.
- Une fois que vous avez terminé l'exportation du fichier. mat, vous pouvez charger le fichier et extraire les variables en utilisant le programme de récupération de données suivant [3].

```
load test.mat; % pour charger les données
t = test.X.Data; % création du vecteur temps
variable_1=test.Y(1).Data; %récupération des variables
variable_2=test.Y(2).Data;
%ainsi de suite
%*************************%
%*****tracé des courbes*****%
figure;
plot(t, variable_1); grid;
figure;
plot(t, variable_2); grid;
%fin%
```

III.5. Description de l'interface graphique et Interprétation des résultats :

La fig. III 6 présente une capture d'écran du logiciel en cours de fonctionnement. On peut observer les chronogrammes des différentes grandeurs acquises, ainsi que les curseurs de réglage des paramètres des contrôleurs PI appliqués à la machine MCC. De plus, on peut également voir les curseurs de réglage de l'angle de calage. Cette application permet de valider les différentes approches utilisées pour représenter le modèle de MCC (fig. II - 7).

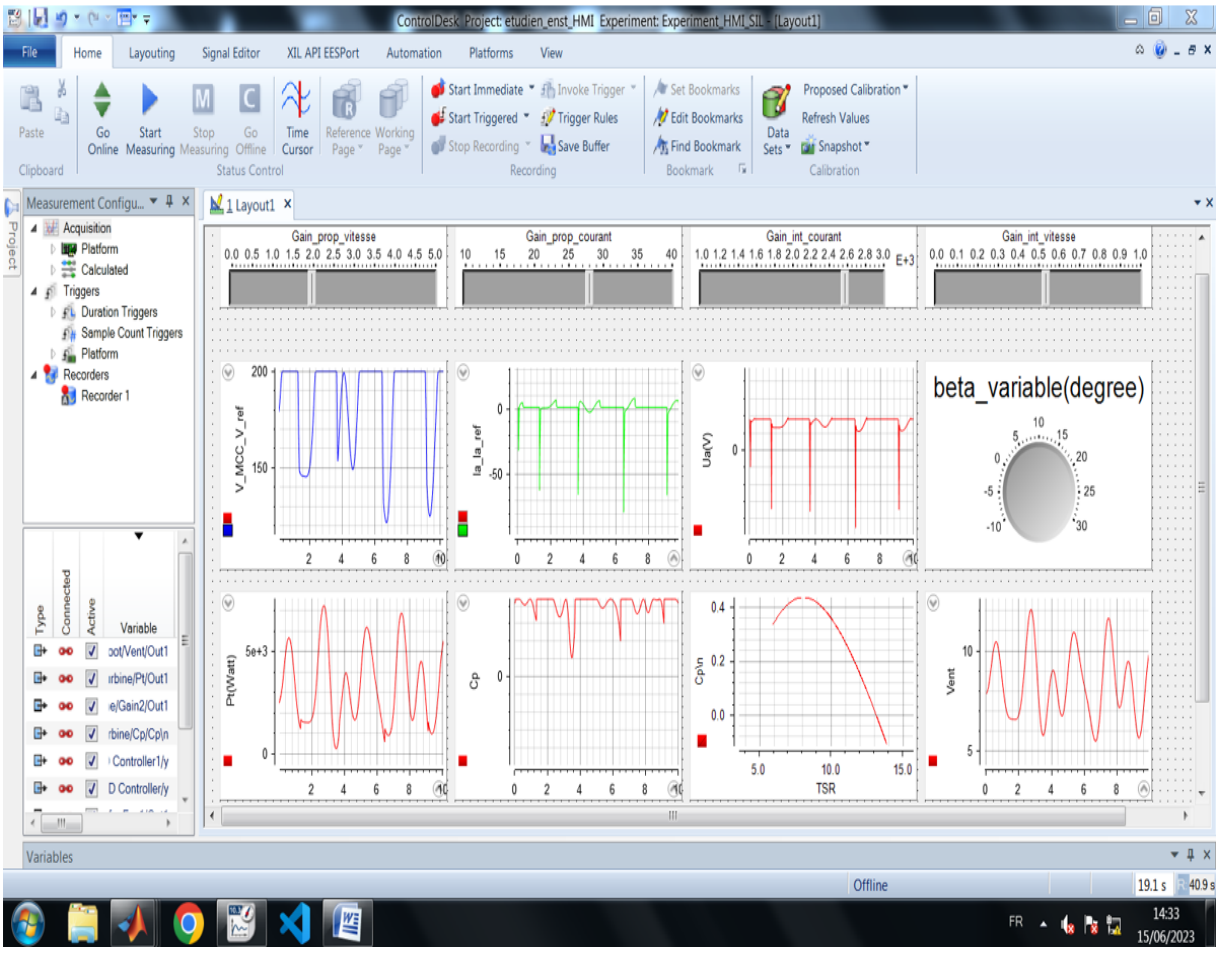


Figure III - 6: Interface graphique DSPACE control-desk

Le programme de simulation a été adapté pour permettre une exécution en temps réel et un interfaçage avec la carte DSPACE. La référence de la machine à courant continu provient du modèle de la turbine (Fig. II - 4).

La figure montre l'acquisition de la vitesse du MCC et la vitesse de la turbine, ainsi que la consommation de courant d'induit grâce au couple résistant appliqué et la tension d'induit Ua. On peut également observer la puissance extraite de la turbine Pt, le profil de vent et les coefficients de puissance, ainsi que leur variation par rapport à la vitesse relative.

La figure démontre une bonne poursuite de la vitesse du MCC par rapport à la vitesse de référence, ainsi qu'un coefficient de puissance élevé proche de sa valeur optimale (Cpmax=0.475), grâce à l'application de la technique de MPPT.

III.6. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a abordé plusieurs aspects essentiels liés à l'interface HMI de notre étude. Nous avons commencé par une introduction qui a mis en évidence l'importance de cette interface dans le contexte de notre travail. Ensuite on a examiné les outils et les technologies appropriés pour le développement de cette interface en mettant en évidence les convertisseurs SEMIKRON AC/DC et la carte dSPACE.

Dans la section sur l'implémentation en temps réel de la commande, nous avons détaillé les étapes de construction du modèle SIMULINK, en spécifiant les paramètres de simulation nécessaires. Nous avons également décrit la création d'une application temps réel avec ControlDesk Next Generation, en expliquant en détail l'interface du contrôle desk et en donnant des instructions pour créer un nouveau projet.

Enfin, nous avons abordé la description de l'interface graphique et l'interprétation des résultats obtenus. Nous avons souligné l'importance de cette interface pour suivre et interagir avec l'émulateur en temps réel.

En conclusion, ce chapitre a permis de mettre en place les fondements nécessaires pour le développement de l'interface HMI, en identifiant les besoins, en sélectionnant les outils appropriés et en décrivant les étapes de mise en œuvre. Cela nous permettra d'interagir efficacement avec notre émulateur et de comprendre les résultats obtenus lors des simulations

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude et de l'exploitation de nouvelles sources d'énergie non polluantes. L'objectif de ce travail est de modéliser un système éolien et de développer une Interface Homme-Machine (HMI) pour un émulateur de turbine éolienne. Cet émulateur est basé sur la commande en vitesse d'une machine à courant continu, régulée par un régulateur PI classique.

Le premier chapitre nous a permis de nous familiariser avec les systèmes éoliens. Nous avons commencé par définir l'énergie éolienne, les interfaces homme-machine (HMI) et le logiciel utilisé, ainsi que les composants d'une éolienne. Après ce rappel et cette description des notions élémentaires, nous avons abordé la conversion électromécanique et présenté et évalué les différentes configurations électriques utilisées dans le domaine éolien.

Dans la deuxième partie de ce mémoire, nous avons décrit les étapes de modélisation d'une turbine éolienne dans le but d'entraîner une machine à courant continu capable de reproduire les variations de vitesse d'une éolienne. Tout d'abord, nous avons généré un modèle permettant de reproduire les variations de la vitesse du vent en se basant sur des paramètres statistiques qui les définissent. Ensuite, nous avons appliqué ces variations à un modèle de turbine basé sur les équations décrivant la vitesse de l'éolienne.

Ensuite, nous avons présenté les résultats de la simulation de la commande classique (PI) du modèle de MCC. Ces résultats montrent que les vitesses de rotation obtenues à la sortie de l'émulateur sont fluctuantes et suivent les variations du vent appliqué au modèle de la turbine après l'introduction de la technique de la MPPT.

Le troisième chapitre est consacré à la réalisation d'une interface permettant de suivre et d'interagir en temps réel avec l'émulateur.

En raison de l'intérêt considérable suscité par ce travail, il est possible d'envisager diverses perspectives qui pourraient contribuer au développement et à l'amélioration de l'émulateur. Voici quelques-unes de ces perspectives :

- Explorer l'application de commandes avancées pour enrichir les fonctionnalités de l'émulateur et augmenter sa robustesse.
- Mettre en œuvre des approches plus récentes telles que les algorithmes génétiques pour la synthèse des régulateurs conventionnels. Ces méthodes offrent de nouvelles possibilités et peuvent.
- Réalisation d’une emulation hardware in the loop (HIL).

ملخص

تعرض هذه المذكرة تصميم وتنفيذ محكات توربينات الرياح مع واجهة للتحكم بين الانسان والالة. الهدف هو دراسة سلسلة تحويل طاقة الرياح في ظل ظروف قريبة من الحقيقية، يعتمد جهاز المحاكات على التحكم في السرعة لمحرك تيار مباشر منفصل الاثارة. تم تطوير نموذج التوربين والتحكم فيه بواسطة برنامج MATLAB/Simulink. تسمح واجهة التحكم انسان_الة (HMI) التي ينتجها برنامج مكتب التحكم ControlDesk لإعطاء امكانية مشاهدة متغيرات النظام , تغير الاعدادات والمدخلات الرئيسية والتحكم فيها في الوقت الفعلي.

يسهم المشروع في تحسين المعرفة حول طاقة الرياح ويوفر أدوات لتحليل أنظمة الرياح في المختبر وتحسينها.

كلمات مفتاحية:

توربينات الرياح، محاكي، محرك تيار مباشر منفصل الاثارة.، محول ذو أربعة أرباع، محاكاة في الوقت الفعلي.

Résumer :

Ce mémoire présente la conception et la mise en œuvre d'un simulateur éolienne avec une Interface Homme-Machine (HMI). L'objectif est d'étudier la chaîne de conversion d'une éolienne dans des conditions proches de la réalité. Le simulateur est basé sur le contrôle de la vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparée (MCC). Le modèle turbine\commande a été développé dans l'environnement MATLAB/Simulink. La HMI est réalisée par le logiciel ControlDesk permet la visualisation et le contrôle en temps réel des variables clés.

Le projet contribue à l'amélioration des connaissances sur l'énergie éolienne et fournit des outils pour l'analyse et l'optimisation des systèmes éoliens en laboratoire.

Mots clés : Éolienne, émulateur, machine à courant continu, hacheur à quatre quadrants, simulation en temps réel.

Abstruct

This thesis presents the design and implementation of a wind turbine simulator with a human-machine interface (HMI). The aim is to study the wind turbine conversion chain under conditions close to real wind turbine systems. The simulator is based on the speed control of a separately excited DC motor (MCC). The turbine and control model were developed in MATLAB/Simulink. The Control Desk HMI software allows real-time visualization and control of keys variables.

The project contributes to improving knowledge of wind energy and provides tools for the analysis and optimization of wind systems in the laboratory.

Key words : Wind turbine, emulator, DC machine, four-quadrant chopper, real-time simulation.

Références :

[1] - Mekkaoui Abderezak Ali Hicham, Commande Par Retour D'état Adaptative À Modèle De Référence D'un Émulateur Éolien, Mémoire De Fin D'études Diplôme De Master, Université Ibn-Khaldoun De Tiaret Faculté Des Sciences Appliquées Département De Génie Electrique,2016/2017.

[2] - Définition d'une IHM. https://www.copadata.com/fr/produits/zenon-software platform /visualisation-controle/quest-ce-qu-une-ihm-interface-homme-machine-copa-data/29-05-2023.

[3] Abdallah Darkawi. Initiation au système dSPACE, de l'interface RTI dans Simulink et de ControlDesk Next Generation 5.4 version 2.0. École d'ingénieur. France. 2016. <cel01259564v2>.

[4]. S. Mathew, Wind energy : fundamentals, resource analysis and economics, vol. 1. Springer, 2006.

[5] - F. POITIERS, Étude et commande de génératrices asynchrones pour l 'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone double alimentation reliée au réseau, Thèse nO ED 0366-125 (2003), École Polytechnique de l'Université de Nantes, France.

[6] - Frank Kreith and D. Yogi Goswami, Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, Pages 22-1-22-30, Ltd, 2007.

[7] - Hartwanger, D., Horvat, A., "3D Modelling of A Wind Turbine Using CFD," NAFEMS UK Conference 2008, Engineering Simulation: Effective Use and Best.

[8] - CHEIKH RIDHA, Étude et Commande d'une Éolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents et d'une Machine Asynchrone a Double Alimentation, Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de Doctorat en sciences Spécialité (Option) : ELECTROTECHNIQUE,2018.

[9] - Van der Hoven, "Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.0007 to 900 Cycle per Hour", Journal of Meteorology, 1957, Vol. 14, pp 160-164.

[10] - ABDOULA YB MAMADIE SYLLA, Modélisation D'un Émulateur Éolien À Base De Machine asynchrone À Double Alimentation, L'université Du Québec À Trois-Rivières, Hiver 2013.

[11] - B. Boukhezzar, Les stratégies de commande pour l 'optimisation et la régulation de Puissance des éoliennes à vitesse variable, Thèse N°8212 (2006), Université Paris XI, France.

[12] - Tahar TAFTICHT, Analyse et commande d 'un système hybride photovoltaïque éolien, Thèse (2006), Université du Québec à Trois-Rivières, Canada.

[13] - N. LA VERDURE, L'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires, Thèse (2005), Institut national polytechnique de Grenoble, France.

[14] - A. MIRECKI, Étude comparative de chaînes de conversion d 'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, Thèse N°2213 (2005), Institut national polytechnique de Toulouse, France.

[15] - Azad Ghaffari, dSPACE and Real-Time Interface in Simulink San Diego State University Department of ECE San Diego CA 92182-1309 12/20/2012.

[16] - Nicanor Quijano and Kevin Passino, A Tutorial Introduction to Control Systems Development and Implementation with dSPACE, Dept. of Electrical Engineering the Ohio State University 2015 Neil Ave. Columbus, OH 43210.

[17] - Pradyumna Kumar Behera, Robust wind turbine emulator design using sliding mode controller, Renewable Energy Focus _ Volume 36 _ March 2021.

Annex 1 : Description et modélisation d'un Hacheur quart quadrant

Aujourd'hui, la combinaison d'un hacheur et d'un moteur à courant continu est très largement utilisée dans les systèmes d'entraînement électrique. Les moteurs à courant continu sont de nature réversible. Un hacheur à quatre quadrants est également réversible car la valeur moyenne de la tension peut être positive ou négative selon le rapport cyclique appliqué, indépendamment du signe de la valeur moyenne du courant.

Un hacheur à quatre quadrants tel qu'illustré à la fig.1 a une configuration en "H" avec des commandes complémentaires permettant un fonctionnement dans les "quatre quadrants" du plan vitesse-couple.

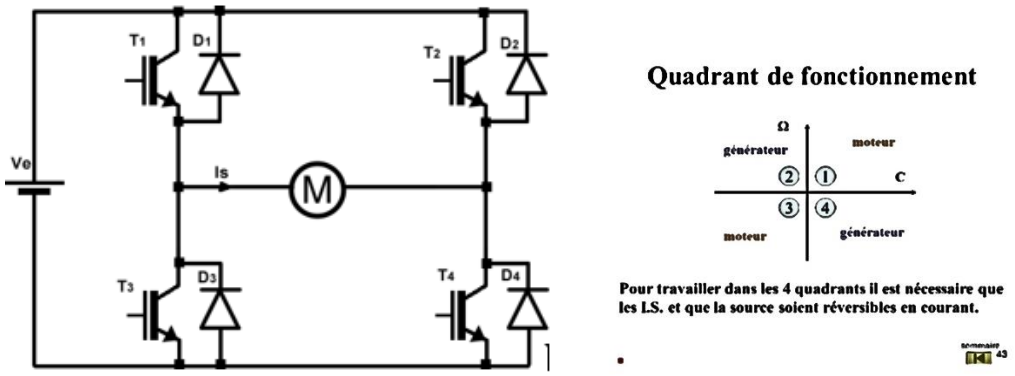


Figure 1 : Schéma d'un Hacheur quatre quadrants avec fonctionnement d'un MCC a

Les principaux modes de fonctionnement du convertisseur sont résumés comme suit :

Dans l'intervalle [0, αT], les transistors T1 et T4 sont conducteurs, ce qui entraîne une tension de sortie du convertisseur égale à U=E.

Dans l'intervalle [αT, T], les transistors T2 et T3 sont conducteurs, ce qui entraîne une tension de sortie du convertisseur égale à U=-E. La tension moyenne à la sortie du convertisseur peut alors être calculée de la manière suivante :

$$\boldsymbol{U_m = \frac{1}{T} \int_0^T E\,(t)dt}$$

$$\mathbf{U_m = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E\,(t)dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^{T} -E\,(t)dt}$$

Ce qui donne $$U_m = (2\,\alpha - 1)E$$

Les différentes configurations possibles d'une machine à courant continu associée à un hacheur à quatre quadrants, avec les formes de tension et de courant correspondantes, sont illustrées dans la fig.2.

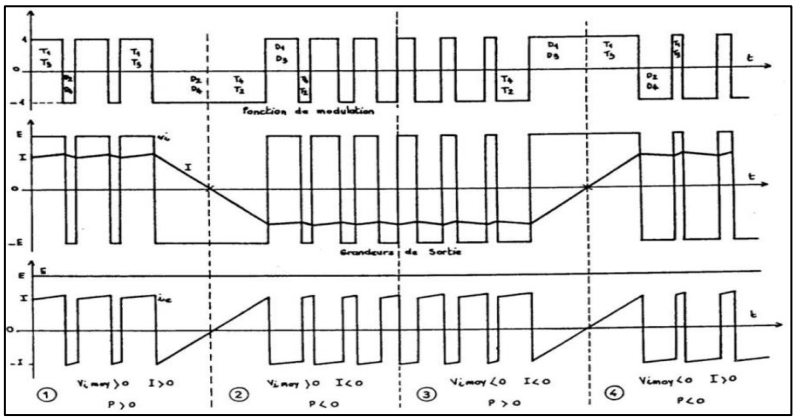


Figure 2 : Formes de tension et de courant de la machine MCC.

Les différentes configurations des interrupteurs de l'hacheur à quatre quadrants sont :

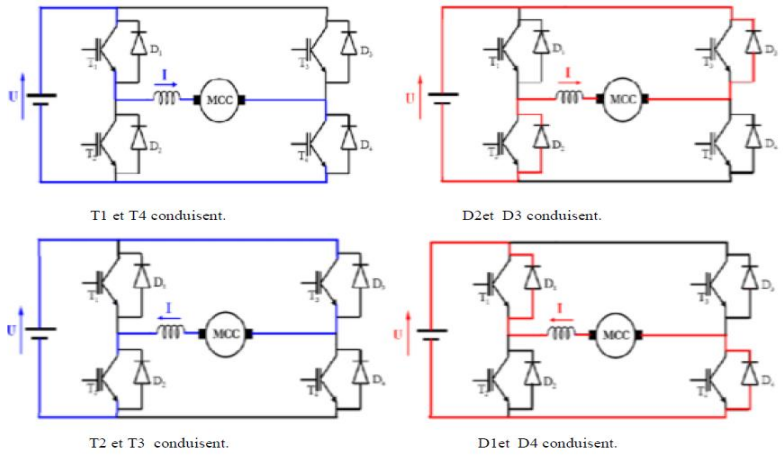


Figure 3 : Les différentes configurations des interrupteurs de l'hacheur à quatre quadrants.

Calcul un rapporte cyclique et gère single PWM :

En général l'hacheur à quatre quadrants se caractérise par deux grandeurs (la tension d'entree E et la tension de sorte U), la relation **qui lié entre elle est représentée par**

$$U_m = (2\,\alpha - 1)E$$

$$\alpha = \frac{\frac{U}{E} + 1}{2}$$