



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
University d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département Electromécanique**

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Electromécanique  
**Spécialité :** Electromécanique industriel

### Thème

# Simulation Temps réel d'un générateur distribué

Présenté et soutenu publiquement par :

Doulat Karim

et

Bennaceur sakina

Devant le jury composé de :

| Nom et Prénom            | Grade                 | Etablissement                      | Qualité       |
|--------------------------|-----------------------|------------------------------------|---------------|
| BEKACEM belkacem         | MCA                   | IMSI Université Oran 2             | Président     |
| BELABBES Abdallah        | MCB                   | IMSI Université Oran 2             | Encadreur     |
| BOUZID Allal Al Moubarek | Maitre de conférences | Université Icam Toulouse<br>France | Co- Encadreur |
| ADDA NEGGAZ samir        | MAA                   | IMSI Université Oran 2             | Examineur     |

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## ...شكر وتقدير

قال رسول الل صلى الله عليه وسلم " من لا يشكر الناس لا يشكر الله".

الحمد لله الذي أكرمنا ومنّ علينا باجتياز هذه المرحلة بنجاح بعد سنواتٍ من الجدّ والاجتهاد وانطلاقاً من الحديث السابق يشرفنا ان ننتهز هذه الفرصة ونتقدم بالشكر الجزيل لكل شخص وقف معنا طوال هذه الفترة سواء أكان قريباً أم بعيداً ونخص بذلك أهلنا وكذلك الزملاء والأصدقاء الذين عرفناهم وعشنا معهم اللحظات الجميلة طوال هذه المسيرة فلهم منّا كل المحبة والتقدير.

كما أننا نريد أن نتوجه أيضاً بالشكر الجزيل لكافة كوادر الأسرة الجامعية في جامعة وهران 2 بمعهد امن وصيانة الصناعية سواء أكانوا طلبة أم أساتذة أم إداريين أم عمال واخص بذلك الأسرة التعليمية في الجامعة وعلى رأسهم الأستاذ المشرف الذي قام بتأطير هذه المذكرة نتكلم عن الدكتور عبد الله بلعباس و دكتور بوزيد علال كمأطر ثاني لمذكرة كونهما كانا معلمين و ناصحان وموجهان لنا في هذه مذكرة فشكراً لكما أستاذنا لقد أدبتم الأمانة على أكمل وجه وقمتم بواجبكم العلمي والأخلاقي تجاهنا فجزاك الله عنّا خير الجزاء.

كما إننا نريد أن نتوجه بالشكر لكل الأساتذة في معهد امن الصناعي وخصوصا الأساتذة في قسم الهندسة الكتر ومكانيك الذين تعلمنا على أيديهم ورافقونا على مدار 5سنوات، كما لا ننسى في هذا الشكر اللجنة المصححة لهذه المذكرة الذين سهروا وتعبوا من اجل تحرير هذه المذكرة فلهم منا كل التحية والتقدير على عملهم هذا.

كما نتقدم بأحر التهاني و شكر لجميع زملائنا الذين ساندونا طيلة هذه الأيام .

وفي الختام لا يسعنا إلا أن نتقدم بالاعتذار من كل شخص كنا قد نسيناه أو سقط اسمه سهواً في شكرنا هذا.

## Remerciement

Nous sommes honorés de profiter de cette occasion pour exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont été à nos côtés tout au long de cette période, qu'elles soient proches ou éloignées. Nous tenons à remercier en particulier notre famille, ainsi que nos collègues et amis avec qui nous avons partagé de merveilleux moments tout au long de ce parcours. Ils méritent tout notre amour et notre appréciation.

Nous souhaitons également adresser nos sincères remerciements à tous les membres de la famille universitaire de l'Université Oran 2, notamment au sein de l'Institut de Sécurité et de Maintenance Industrielle, qu'ils soient étudiants, enseignants, administratifs ou ouvriers. Nous tenons à mentionner en particulier l'équipe pédagogique de l'université, avec en tête le professeur superviseur qui a encadré ce mémoire, à savoir le Dr Abdullah Belabas et le Dr Bouzid Alal, en tant que deuxième encadrant du mémoire. Ils ont été nos enseignants, nos conseillers et nos guides tout au long de ce mémoire. Merci à vous, nos enseignants, vous avez accompli votre mission de manière exemplaire et avez rempli vos devoirs tant sur le plan académique que moral envers nous. Que Dieu vous récompense abondamment.

Nous aimerions également exprimer nos remerciements à tous les enseignants de l'Institut de Sécurité Industrielle, en particulier les enseignants du département de génie électromécanique, qui nous ont enseigné et accompagné pendant ces 5 années. Nous n'oublions pas non plus de remercier le comité d'évaluation de ce mémoire, qui a veillé et travaillé dur pour la rédaction de ce mémoire. Nous leur adressons nos salutations les plus respectueuses et notre reconnaissance pour leur travail.

Nous tenons également à féliciter et remercier chaleureusement tous nos camarades qui nous ont soutenus tout au long de ces jours.

En conclusion, nous ne pouvons qu'adresser nos excuses à toute personne que nous avons pu oublier ou dont nous avons omis le nom par inadvertance dans nos remerciements.

# SOMMAIRE

|   |    |
|---|----|
| Figure .....  | 8  |
| INTRODUCTION GENERALE.....  | 10 |
| Chapitre 1 : État d'art des aérogénérateurs.....  | 13 |
| 1.1 L'énergie éolienne en quelques chiffres.....  | 13 |
| 1.1.1 L'énergie éolienne pour quoi faire ?.....   | 13 |
| 1.1.2 Développement de l'énergie éolienne :.....  | 13 |
| 1.1.3 Emplacement des parcs éoliens :.....  | 14 |
| 1.1.4 Taille des aérogénérateurs :.....   | 14 |
| 1.1.5 Conversion vent → électricité :.....  | 15 |
| 1.2 Conception mécanique des éoliennes :.....   | 16 |
| 1.2.1 Eolienne à axe vertical :.....  | 16 |
| 1.2.2 Eolienne à axe horizontal :.....  | 17 |
| 1.2.3 Innovation sur les hélices :.....   | 20 |
| 1.2.4 Régulation de la vitesse du rotor :.....  | 22 |
| 1.2.5 Sécurité par grand vent :.....  | 23 |
| 1.3 Conversion mécanique → électrique avec multiplicateur.....                            | 23 |
| 1.3.1 A chaîne de conversion à étage continu :.....                                       | 24 |
| 1.3.2 Conversion continu/alternatif :.....  | 25 |
| 1.3.3 Connexion directe au réseau :.....  | 26 |
| 1.4 Conversion mécanique → électrique à attaque directe :.....                            | 29 |
| 1.4.1 Génératrice synchrone :.....  | 30 |
| 1.4.2 Génératrice asynchrone :.....   | 31 |
| 1.5 Mise en œuvre des éoliennes.....  | 31 |
| 1.5.1 Recherche du rendement maximum MPPT :.....  | 31 |
| 1.5.2 Eolienne autonome :.....  | 32 |
| 1.5.3 Eolienne isolée raccordée au réseau :.....  | 32 |
| 1.5.4 Parc éolien important :.....  | 33 |
| 1.5.5 Gestion du réseau électrique :.....   | 33 |
| 1.5.6 Nécessité de stockage :.....  | 34 |
| 1.6 Stockage d'énergie :.....   | 35 |
| 1.6.1 Stockage à court terme :.....   | 35 |
| 1.6.2 Stockage à long terme :.....  | 35 |
| Conclusion :.....   | 37 |
| Chapitre 2 : Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA):..... | 39 |
| Introduction :.....   | 39 |
| 2.1 Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation.....                  | 39 |
| 2.1.1 Schéma de la structure étudié.....  | 39 |
| 2.1.2 Description de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).....          | 40 |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.2 Représentation de la GADA dans le système triphasé et biphasé [74] .....                                | 40        |
| 2.2.1 Les équations électriques de la GADA .....  | 41        |
| 2.2.2 Les équations magnétiques de la GADA .....  | 42        |
| 2.2.3 L'équation mécanique .....  | 43        |
| 2.2.4. Choix de référentiel .....   | 43        |
| 2.3 Transformation de PARK : .....  | 44        |
| 2.3.1 Application de la transformation de PARK .....  | 45        |
| 2.3.2 Expression du couple .....  | 47        |
| 2.4 Fonctionnement moteur .....   | 48        |
| 2.5 Fonctionnement génératrice [74] .....   | 49        |
| 2.5.1. Les équations électriques du stator et le rotor dans le repère $(d, q)$ .....                        | 49        |
| 2.5.2. Les équations magnétiques du stator et le rotor dans le repère $(d, q)$ .....                        | 49        |
| 2.5.3 L'équation de tension du stator utilisée pour l'expression suivante : .....                           | 49        |
| Conclusion .....  | 50        |
| <b>Chapitre 3: Simulation en temps réel d'un générateur distribué en temps réel par Typhoon HIL :</b> ..... | <b>52</b> |
| Introduction .....  | 52        |
| 3.1 Système temps réel : .....  | 52        |
| 3.1.1 Générateur distribué en temps réel : .....  | 53        |
| 3.1.2. Les différents systèmes temps réels .....  | 54        |
| 3.2 Présentation Software Typhoon HIL : .....   | 56        |
| 3.2.1 Schematic Editor : .....  | 56        |
| 3.2.2 HIL SCADA .....   | 57        |
| 3.3 Modélisation du convertisseur d'énergie éolienne basé sur DFIG .....                                    | 57        |
| 3.4 Contrôle vectoriel du convertisseur d'énergie éolienne basé sur DFIG .....                              | 58        |
| 3.4.1. Contrôle du RSC .....  | 58        |
| 3.4.2 Contrôle du SGC .....   | 60        |
| 3.5 Les concepts généraux de la régulation .....  | 61        |
| 3.5.1 Synthèse du régulateur Proportionnel – intégral (pi) .....  | 61        |
| 3.5.2 Formulation du problème de réglage des contrôleurs PI en DFIG .....                                   | 62        |
| 3.6 Fonctionnement normal du générateur à induction à double alimentation (DFIG) .....                      | 64        |
| 3.7 Description du modèle : .....   | 66        |
| 3.7.1 Le sous-système de contrôle des éoliennes .....   | 68        |
| 3.7.2 Les valeurs nominales les plus importantes sont fournies .....  | 70        |
| 3.8 Simulation et résultats : .....   | 70        |
| 3.8.2 Résultat et graphes de la Commande du convertisseur côté rotor (RSC) .....                            | 72        |
| Conclusion .....  | 73        |
| <b>Conclusion général :</b> .....   | <b>74</b> |
| <b>Liste des symboles</b> .....   | <b>75</b> |
| <b>ANNEXE :</b> .....   | <b>78</b> |

Applications Typhoon HIL dans le workflow de conception de contrôle :..... 78

Bibliographie : ..... 79

# Figure

## Chapitre 1

|   |    |
|---|----|
| FIGURE 1.1 EVOLUTION DES PUISSANCES EOLIENNES INSTALLEES DANS LE MONDE EN MW.....                     | 13 |
| FIGURE 1.2 PUISSANCE EOLIENNE INSTALLEE JUSQU'EN 2004 EN EUROPE EN MW.....                            | 14 |
| FIGURE 1.3 INSTALLATION D'EOLIENNES OFFSHORE EN MER DU NORD (PHOTO GUNNAR BRITSE).....                | 14 |
| FIGURE 1.4 TAILLE DES HELICES EN M ET PUISSANCE EN KW [2].....  | 15 |
| FIGURE 1.5 EOLIENNE DE DARRIEUS DE 4.200 kW ET 100 M DE DIAMETRE.....                                 | 16 |
| FIGURE 1.6 PETITE EOLIENNE A AXE VERTICAL.....  | 17 |
| FIGURE 1.7 PYLONE TUBULAIRE D'UN FUTUR PARC EOLIEN [2]. .....   | 18 |
| FIGURE 1.8 EOLIENNE AVEC PYLONE EN TREILLIS [2].....  | 18 |
| FIGURE 1.10 EOLIENNE DE MARQUE BONUS DE 95KLTV AVEC TOUR A TROIS PIEDS [2). .....                     | 19 |
| FIGURE 1.9 PETITE EOLIENNE SOUS LE VENT DE 22KLTV AVEC PYLONE LEGER HAUBANE [2].....                  | 19 |
| FIGURE 1.11 EOLIENNE FACE AU VENT AVEC PYLONE CYLINDRIQUE DE GRANDE SECTION. ....                     | 20 |
| FIGURE 1.12 PALES D'UNE EOLIENNE AVEC SYSTEME DE FREINAGE EN BOUT.....                                | 21 |
| FIGURE 1.13 PROTOTYPE D'EOLIENNE A ROTOR DE FLETTNER. ....  | 22 |
| FIGURE 1.14 PRINCIPE DE L'EFFET FLETTNER/MAGNUS. ....   | 22 |
| FIGURE 1.15 EXEMPLE D'EOLIENNE AVEC MULTIPLICATEUR.....   | 23 |
| FIGURE 1.16 SCHEMA DE PRINCIPE DES EOLIENNES A ETAGE CONTINU, CONNECTEES AU RESEAU. ....              | 24 |
| FIGURE 1.17 SCHEMA DE PRINCIPE D'UN ONDULEUR DE TENSION POUR CONNEXION AU RESEAU. ....                | 25 |
| FIGURE 1.18 SCHEMA DE PRINCIPE DE LA DOUBLE ALIMENTATION.....   | 28 |
| FIGURE 1.19 EXEMPLE D'EOLIENNE A ATTAQUE DIRECTE.....   | 29 |
| FIGURE 1.20 SCHEMA CONSTITUTIF D'UNE EOLIENNE A ATTAQUE DIRECTE DE 4.5MW DE MARQUE ENERCON [1]. ..... | 30 |
| FIGURE 1.21 SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE GENERATRICE DISCOÏDE.....  | 31 |
| FIGURE 1.22 EXEMPLE DE STOCKAGE A COURT TERME AVEC VOLANT D'INERTIE.....                              | 34 |

## Chapitre 2

|   |    |
|---|----|
| FIGURE 2.1 GENERATEUR EOLIEN BASEE SUR UNE GADA CONNECTEE AU RESEAU.....          | 39 |
| FIGURE 2.2 REPRESENTATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION..... | 40 |
| FIGURE 2.3 REPRESENTATION DE LA GADA DANS LE SYSTEME BIPHASE ET TRIPHASE.....     | 41 |
| FIGURE 2.4 REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA GADA DANS LE REPERE (D,Q). ....       | 45 |

## Chapitre 3

|  |    |
|--|----|
| FIGURE 3.1 GENERATEUR DISTRIBUE DANS UN ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL .....     | 53 |
| FIGURE 3.2 LES TURBINES EOLIENNES QUI SONT CONNECTEES .....                | 53 |
| FIGURE 3.3 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES ET COMPATIBILITE DES SYSTEMES ..... | 55 |
| FIGURE 3.4 INTERFACE DU PROGRAMME SOFTWARE TYPHOON HIL.....                | 56 |
| FIGURE 3.5 EXEMPLE DU SCHEMATIC EDITOR.....                                | 56 |
| FIGURE 3.6 EXEMPLE DU HIL SCADA .....                                      | 57 |



|  |    |
|--|----|
| FIGURE 3.7 CONFIGURATION DU SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE (WECS) BASE SUR UN GENERATEUR A INDUCTION A DOUBLE ALIMENTATION (DFIG)..... | 57 |
| FIGURE 3.8 SCHEMA DE CONTROLE PROPORTIONNEL-INTEGRAL (PI) POUR LA BOUCLE DE COURANT INTERNE DU RSC.....  | 59 |
| FIGURE 3.9 CONCEPTION DE LA BOUCLE DE COURANT DU CONTROLEUR PI DU CONVERTISSEUR COTE GRILLE. ....  | 60 |
| FIGURE 3.10 SCHEMA DE PRINCIPE DE LA REGULATION .....  | 61 |
| FIGURE 3.11 L'ALGORITHME DE CONTROLE PROPOSE S'APPLIQUE AU SYSTEME DFIG.....   | 62 |
| FIGURE 3.12 COEFFICIENT DE PUISSANCE (Cp) EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT .....  | 65 |
| FIGURE 3.13 VITESSE ANGULAIRE DE L'ARBRE A GRANDE VITESSE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT. ....  | 65 |
| FIGURE 3.14 COUPLE MECANIQUE EN FONCTION DE LA VITESSE ANGULAIRE DE L'ARBRE RAPIDE.....  | 66 |
| FIGURE 3.15 DFIG GENERATRICE WITH BACK-TO-BACK CONVERTER.....  | 67 |
| FIGURE 3.16 SOUS-SYSTEME DE COMMANDE DU CONVERTISSEUR COTE ROTOR.....  | 68 |
| FIGURE 3.17 CONTROLE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU PAR PI.....  | 69 |
| FIGURE 3.18 PANNEAU SCADA LORS DE LA TRANSITION D'UNE VITESSE DE VENT A UNE AUTRE .....  | 70 |
| FIGURE 3.19 REPOSE DES EOLIENNES LORS DE L'AUGMENTATION DE LA VITESSE DU VENT DE 6 A 12 METRES PAR DEUXIEME .....                                | 71 |
| FIGURE 3.20 REPOSE DES EOLIENNES LORS DE L'ARRET DE L'EOLIENNE .....   | 71 |
| FIGURE 3.21 INTERFACE CONTROLE PANNAL DE COMMANDE DU CONVERTISSEUR COTE ROTOR PAR PI.....  | 72 |
| FIGURE 3.21 GRAPH EN TENSION SORTIR CONTROLER PI.....  | 73 |

# INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique est au cœur de notre société moderne qui serait bien en peine si elle devait s'en passer. Sa facilité de transport et surtout sa transformation en une autre forme d'énergie en font un élément désormais indispensable.

En effet, quel appareil domestique ou industriel n'utilise pas d'électricité que ce soit pour faire de l'éclairage, du chauffage, des mouvements de rotation ou translation, de la transmission de signaux, de l'imagerie médicale et bien d'autres choses encore... la liste est presque infinie en fait. C'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin d'en produire toujours plus mais de manière plus propre et plus durable.

Des solutions alternatives aux énergies fossiles que sont le charbon, le pétrole et uranium sont donc des voies vers lesquelles notre société toute entière doit s'engager. De plus, la consommation d'énergie, toujours en augmentation, fait réduire les réserves en énergies fossiles et rapproche l'échéance de leur épuisement, ou du moins leur extraction à moindre frais. En effet, pour prendre l'exemple du pétrole, les puits sont désormais beaucoup plus profonds et les gisements plus difficiles d'accès ce qui nécessite plus d'infrastructures et de transformations avant de pouvoir être utilisé comme combustible pour être transformé sous une autre forme d'énergie.

Cet exemple montre qu'un jour viendra où les solutions à base d'énergies renouvelables et alternatives qui sont en ce moment trop coûteuses et peu rentables, se révéleront moins chères que les énergies fossiles. Espérons toutefois que nous saurons développer ces énergies renouvelables avant ce jour. C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur une des énergies renouvelables en développement en ce moment qui est l'énergie éolienne. Nous allons nous intéresser à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le fonctionnement de ces aérogénérateurs, tout ceci en regardant aussi ce qui freine leur développement afin de pouvoir envisager des solutions permettant de faciliter l'insertion de tel dispositif dans la production électrique. Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de génératrices asynchrones à double alimentation (GADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Ces éoliennes sont aussi équipées d'hélices à angle de calage de pale variable pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum communément appelé MPPT.

Il en découle que la puissance produite par l'éolienne varie énormément tout au long de la journée car, du fait de la commande MPPT, la puissance produite suit la puissance disponible dans le vent et présente donc les mêmes variations que ce dernier. C'est un aspect gênant de la production électrique et il est donc très difficile pour un gestionnaire de réseau de contrôler, Notre objectif dans ce mémoire c'est simulation temps réels d'un générateur distribué, D'étudier et de modéliser la génératrice asynchrone double étoile afin de lui appliquer les techniques de commande, particulièrement la commande vectorielle. Le but de cette

commande est d'arriver à commander la génératrice asynchrone comme une génératrice à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation), et celle liée couple (le courant d'induit), Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple. Pour régler la vitesse de la génératrice indépendamment de la charge appliquée on fait appel à des régulateurs classiques de type PI. Les performances de ce dernier restent souvent limitées en raison de la complexité réelle du système à commander (non linéarité, variation des paramètres...).

Ce mémoire est organisé en trois chapitres: Dans le premier, nous présentons l'état d'art des aérogénérateurs, Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation mathématique d'une génératrice asynchrone à double alimentation basée sur la transformation de Park., Dans le dernier chapitre, il est dédié à la simulation à l'aide du logiciel TYPHOON. Les résultats de simulation avec des régulateurs classiques PI, Finalement, Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# Chapitre 1 : État d'art des aérogénérateurs

# Chapitre 1 : État d'art des aérogénérateurs

## 1.1 L'énergie éolienne en quelques chiffres

### 1.1.1 L'énergie éolienne pour quoi faire ?

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel. Ainsi l'Homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il en fait :

- Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année.
- Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètre sont choses courantes.
- Pour alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie propre, on utilise des éoliennes de plusieurs dizaines de mètres de diamètre pouvant produire jusqu'à 4.5MW [1].

### 1.1.2 Développement de l'énergie éolienne :

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier (figure 1.1). Ceci est principalement dû à deux raisons :

- Produire une énergie propre.
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

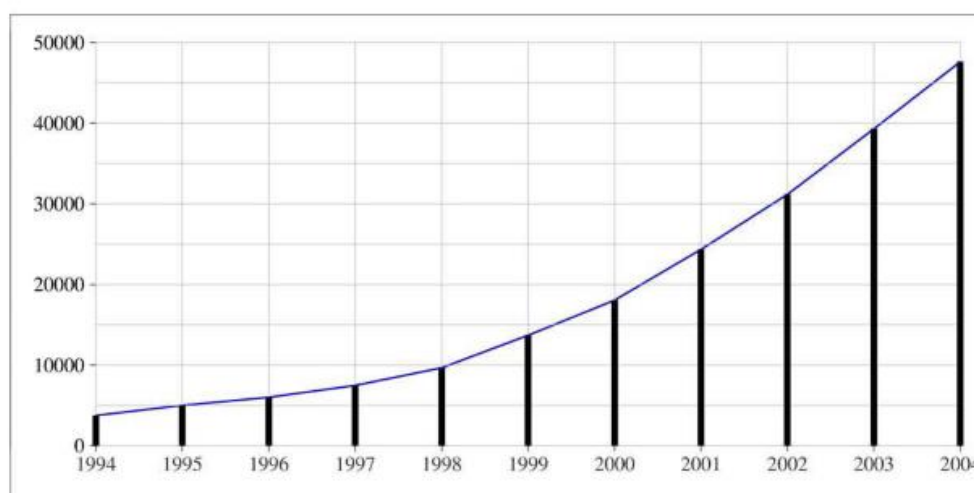


Figure 1.1 Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW

Cependant tous les pays n'y attachent pas la même importance et n'y accordent donc pas les mêmes moyens. C'est pour ces raisons que la France, par sa politique de production nucléaire, est en retard face à ses voisins Européens (figure 1.2) avec moins de 1000 MW installés jusqu'en 2006 alors que pour 2010 l'objectif est d'atteindre 13500 MW. Cette multiplication par 13 va être difficile à obtenir

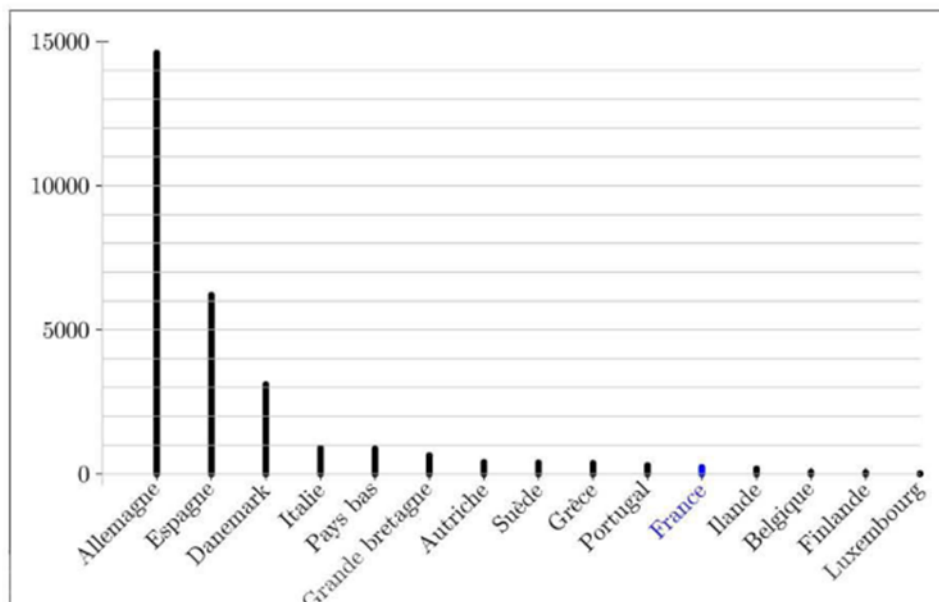


Figure 1.2 Puissance éolienne installée jusqu'en 2004 en Europe en MW

### 1.1.3 Emplacement des parcs éoliens :

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en termes de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits. Ces derniers comportent des dizaines d'éoliennes comme on peut le voir sur la figure 1.3.



Figure 1.3 Installation d'éoliennes offshore en Mer du Nord (Photo Gunnar Britse).

### 1.1.4 Taille des aérogénérateurs :

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes, ce que présente la figure 1.4. Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum. Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.

Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une hélice de plus de 100 mètres de diamètre. Cette hélice est perchée à plus de 100 mètres de hauteur pour produire jusqu'à 4.5MW [1].

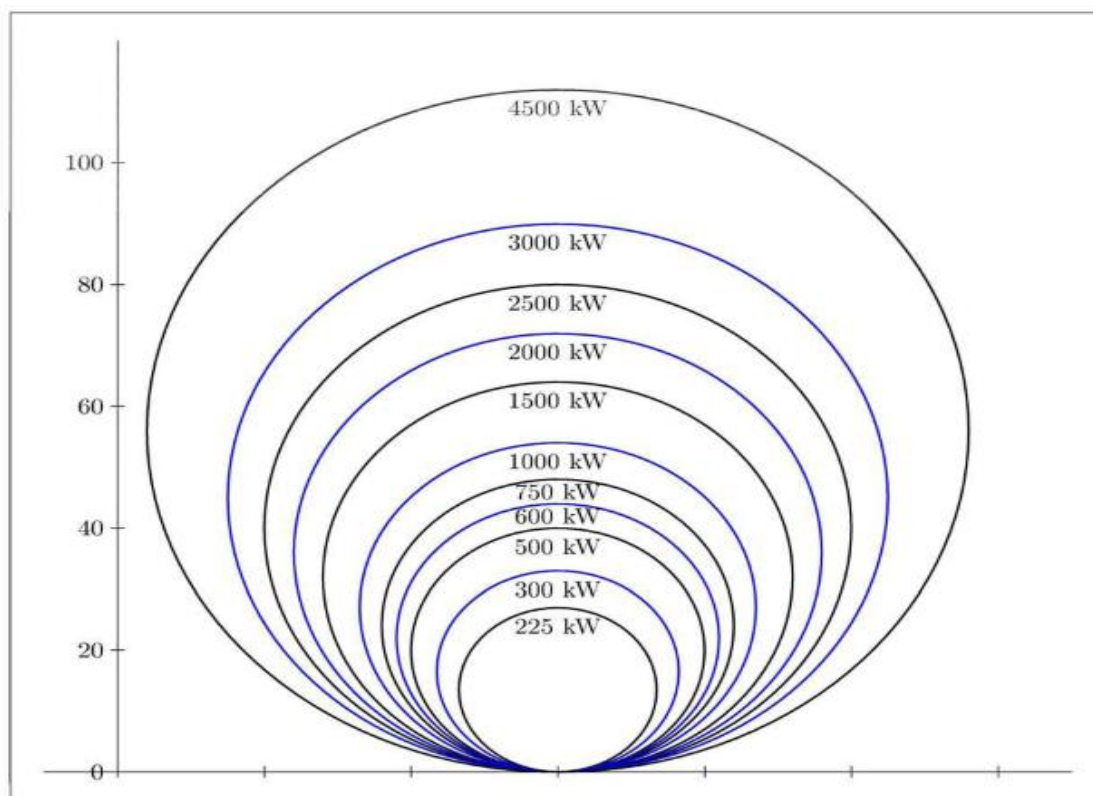


Figure 1.4 Taille des hélices en m et puissance en kW [2].

### 1.1.5 Conversion vent → électricité :

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de bases, à savoir :

1. Une hélice qui transforme le vent en énergie mécanique ;
2. Une transmission mécanique ;
3. Un générateur électromécanique ;
4. un système de liaison électrique ;
5. un régulateur.

Selon l'utilisation et la technologie d'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développés. On distingue deux grandes familles d'éoliennes :

1. Les éoliennes autonomes.
2. Les éoliennes raccordées au réseau.

Ceci va beaucoup influencer le procédé de conversion, notamment l'un des objets de notre étude : y associer ou non une unité de stockage d'énergie. Ce stockage pourra être réalisé au moyen de batteries, d'accumulateurs cinétiques (volant d'inertie) ou autre.

La conception mécanique peut aussi aboutir à des éoliennes totalement différentes :

1. Axe rotor vertical.

2. Axe rotor horizontal.
3. Hélice face au vent.
4. Hélice sous le vent.
5. Avec ou sans multiplicateur de vitesse.

Il y a donc une éolienne adaptée à chaque utilisation avec un certain niveau de technologie et donc une robustesse qui peut en dépendre. L'architecture générale des aérogénérateurs peut également dépendre de nombreux facteurs comme le site d'implantation, l'impact sur le paysage, la technologie employée...

## 1.2 Conception mécanique des éoliennes :

### 1.2.1 Eolienne à axe vertical :

Elles sont très peu mises en œuvre de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydrauliques avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation. La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice au sol directement, mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol, moins fort qu'en hauteur car freiné par le relief. De par son axe vertical, il y a symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre, ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production.

En ce qui concerne leur implantation, elles ont une emprise au sol plus importante que les éoliennes à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances. En effet, les câbles des haubans doivent passer au-dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur pour une implantation sur un site agricole par exemple. Tous ces inconvénients alliés à la faible efficacité de la conversion d'énergie ont fortement limités le développement de ces éoliennes, laissant place aux aérogénérateurs à axe horizontal. Le seul modèle construit de manière industrielle fut l'éolienne de Darrieus, figure 1.5, d'après l'ingénieur français Georges Darrieus qui



Figure 1.5 Eolienne de Darrieus de 4.200 kW et 100 m de diamètre.



en breveta la conception en 1931. La compagnie américaine FloWind fabriquait cette éolienne jusqu'à en 1997. Elle se caractérise avec ses 2 ou 3 pâles en forme de C.

On trouve désormais des éoliennes à axes verticaux développées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Ce sont des génératrices de faible puissance, de 100W à 25kW. Elles sont destinées à des utilisations permanentes, par exemple la charge de batteries servant à alimenter un chalet en montagne (figure 1.6). Elles sont de conception simple et robuste et ne nécessitent pas ou peu d'entretien.



Figure 1.6 Petite éolienne à axe vertical.

## 1.2.2 Eolienne à axe horizontal :

C'est de loin la structure la plus répandue de par sa faible emprise au sol et son efficacité énergétique.

### 1.2.2.1 Avantages :

Ces éoliennes captent le vent en hauteur et loin du sol ; à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical.

Un autre avantage, et non des moindres, est l'emprise au sol qui est très faible par rapport aux éoliennes à axe vertical. Ici, seule la tour occupe de la place au sol et contient généralement tous les systèmes de raccordement. Ainsi il n'est pas nécessaire de rajouter un local électrique et l'emprise au sol est vraiment minimale.

### 1.2.2.2 Le pylône :

Le pylône ou tour supporte la nacelle et le rotor de l'éolienne. Il est de conception différente selon les dimensions de l'éolienne et selon l'impact souhaité sur le paysage. On rencontre les structures de pylônes suivantes :

- a) Tour auto porteuse cylindrique : En acier ou en béton, elle équipe la plupart des grandes éoliennes. Sa forme est conique pour augmenter la rigidité tout en minimisant le poids de la structure. Ce sont en



Figure 1.7 Pylône tubulaire d'un futur parc éolien [2].

général des sections de 20 à 30 mètres de longueur (figure 1.7). L'ancrage au sol est important et nécessite des fondations solides.

- b) Pylône en treillis métallique : C'est une construction plus légère et moins coûteuse que la tour cylindrique pour une même résistance. Par contre l'impact visuel est totalement différent. De plus, ce type de pylône (figure 1.8) génère beaucoup plus de perturbations aérodynamiques dans l'écoulement du vent.
- c) Mât haubané : Pour les petites éoliennes, ceci représente une alternative intéressante. Il s'agit d'un mât de faible section soutenu par une série de haubans. Ce type de pylône coûte alors moins cher qu'un pylône classique. Par contre, l'emprise au sol plus importante peut être gênante (figure 1.9).



Figure 1.8 Eolienne avec pylône en treillis [2].



*Figure 1.9 Petite éolienne sous le vent de 22kltV avec pylône léger haubané [2].*

- d) Solution mixte : On peut trouver par combinaison de ces différentes structures des solutions acceptables tant du point de vue économique qu'esthétique. Ainsi la figure 1.10 présente un pylône constitué de trois mâts de faible section assemblés par des renforts à mi-hauteur



*Figure 1.10 Eolienne de marque BONUS de 95kltV avec tour à trois pieds [2].*

### **1.2.2.3 Eolienne sous le vent :**

Ce sont les plus simples car ici le positionnement du rotor est naturel et automatique en fonction de la direction du vent. Le rotor se situe alors derrière le pylône comme le montre la figure 1.9. Cependant, comme la liaison électrique s'effectue le plus souvent par des câbles pour les aérogénérateurs de forte puissance, il faut quand même prévoir un système d'orientation permettant leur détorsion (un système bagues et balais collecteurs n'étant pas appropriés pour remplacer les câbles pour des courants de 1000A).

Un grand avantage de ce montage réside dans le fait que les pales du rotor peuvent être plus flexibles, ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du pylône. Par fort vent, la flexion des pales enlève une

partie de l'effort de poussée sur le rotor. Une éolienne sous le vent a donc une construction plus légère qu'un modèle face au vent.

Par contre, comme nous l'avons vu précédemment, le pylône (bien qu'il soit plus petit) fait obstacle au vent et lorsque la pale passe dans l'ombre de celui-ci, elle subit une forte variation d'efforts de flexion et de rotation. Ceci augmente le risque de rupture de la pale par fatigue du matériau et génère une production fluctuante d'électricité.

#### 1.2.2.4 Eolienne face au vent :

Ce sont les plus répandues. Le rotor est orienté dans la direction du vent afin que le vent en amont ne soit pas perturbé par le pylône, comme on le voit sur la figure 1.11. A l'arrière du pylône, il y a en effet de fortes perturbations du vent, son écoulement étant ralenti par l'obstacle que forme le pylône. Il en est de même devant le pylône mais dans de moindres proportions. C'est pour cette raison que le rotor se trouve à une certaine distance du pylône. Cependant, chaque fois qu'une des pales passe devant le pylône, la puissance instantanée de l'éolienne diminue brièvement. Ce phénomène est cependant compensé par la forte inertie de l'hélice.

Les pales des éoliennes face au vent doivent être rigides pour ne pas risquer de heurter le pylône par fort vent. Ceci est l'inconvénient majeur de ce type de structure. En plus, il est obligatoire de munir l'éolienne d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor soit toujours



Figure 1.11 Eolienne face au vent avec pylône cylindrique de grande section.

Tourné face au vent. Si elle pivotait librement elle aurait tendance à se mettre naturellement sous le vent, comme un drapeau. Le rotor face au vent est une position d'équilibre instable contrairement à la position rotor sous le vent qui est stable.

#### 1.2.3 Innovation sur les hélices :

Le rotor, et tout particulièrement les pales, constituent la partie mécanique la plus importante de l'éolienne. L'efficacité globale de l'aérogénérateur dépend fortement de celle-ci. Le rendement de la chaîne électromécanique est généralement élevé et de l'ordre de 85%.

### 1.2.3.1 Pales vrillées :

Du fait de la rotation de l'hélice, la vitesse du vent relatif sur les pales varie tout au long de celles-ci. Le vent relatif est plus important en bout de pales qu'au centre de l'hélice. Afin que chaque partie de la pale fonctionne dans des conditions aérodynamiques similaires, permettant une efficacité maximale, les pales s'affinent vers



*Figure 1.12 Pales d'une éolienne avec système de freinage en bout.*

l'extrémité et sont vrillées dans leur longueur (figure 1.12). Ainsi, l'angle d'attaque est plus important en pied de pale qu'en extrémité, ceci afin que l'angle d'incidence soit constant.

### 1.2.3.2 Limitation du bruit :

Le bruit aux alentours des éoliennes a deux origines :

1. **La chaîne de conversion mécanique :** Le multiplicateur, de par ses engrenages, génère en permanence un bruit et diminue le rendement de l'ensemble. C'est pour cela que les dernières générations d'éoliennes se développent avec des générateurs directement entraînés par l'hélice sans aucun engrenage. Ces Générateurs étant de grand diamètre avec un grand nombre de pôles pour produire avec des faibles vitesses de rotation variant de 30 à 100tr/min.
2. **Les pales du rotor :** Le vent qui frappe les pâles génère un bruit haute fréquence qui varie avec la puissance cinquième de la vitesse de rotation. Ainsi les grandes éoliennes tournent doucement pour limiter ce bruit. Il prend naissance principalement au bord de fuite de la pale et l'on a pu constater une grande attention portée par les constructeurs à la réalisation des profils de pales. Les chercheurs étudient et développent des solutions de réduction du bruit, par exemple à l'air des pales avec un bord de fuite en dent de scie.

### 1.2.3.3 Pales à forme non conventionnelle :

Des recherches sont effectuées sur de nouveaux moyens de capter l'énergie du vent pour en faire une énergie mécanique comme par exemple le système présenté figure 1.13, basé sur l'effet Flettner. Ce dispositif utilise en guise de pales des cylindres lisses tournant sur eux-mêmes. Le cylindre, en rotation autour de son axe de révolution et placé dans un courant d'air, subit une poussée transversale perpendiculaire au déplacement du courant d'air, ce qui fait tourner le générateur comme le décrit les figures 1.13 et 1.14.

Ce type de rotor présente deux avantages majeurs : on peut contrôler la vitesse du rotor en réglant la vitesse des cylindres et en cas de fort vent, il suffit d'arrêter l'entraînement des cylindres afin que l'éolienne s'arrête. De plus, à puissance égale, les dimensions sont plus faibles et le fonctionnement beaucoup plus silencieux.



Figure 1.13 Prototype d'éolienne à rotor de FLETTNER.

#### 1.2.4 Régulation de la vitesse du rotor :

Pour permettre une production d'électricité sur une large gamme de vitesses de vent, la plupart des éoliennes sont équipées de dispositifs de réglages de l'incidence des pâles pour que le rotor fonctionne à vitesse quasiment constante [31]. Ainsi la génératrice produit une tension à fréquence constante pour différents vents. Des génératrices asynchrones directement connectées au réseau sont alors utilisées. Ceci permet de produire une puissance constante quelle que soit la force du vent, ce qui diminue les perturbations sur le réseau. Le système de variation de pas est commandé soit de manière inertielle (des masselottes se centrifugent et diminuent le pas au fur et à mesure que la vitesse augmente), soit par une commande hydraulique avec un capteur de vitesse de rotation et un anémomètre qui mesure la vitesse du vent et modifie l'angle de calage des pales afin de garder constante la vitesse de rotation de l'hélice. Le calage des pales permet aussi de limiter la puissance produite par l'éolienne par fort vent.

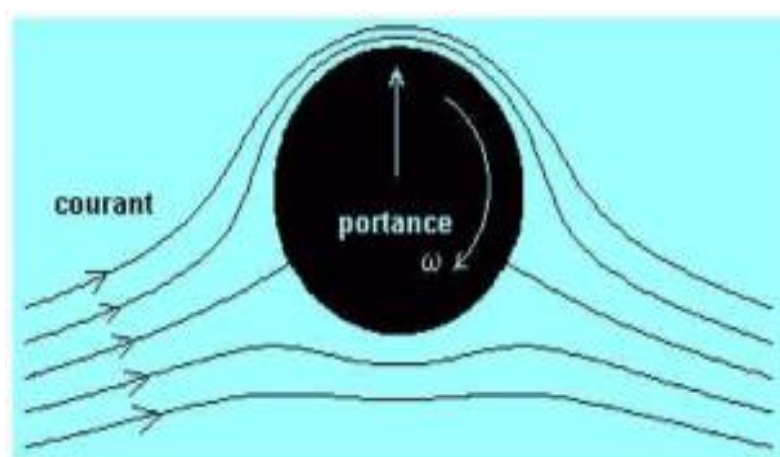


Figure 1.14 Principe de l'effet Flettner/Magnus.

### 1.2.5 Sécurité par grand vent :

Pour éviter l'emballement du rotor par fort vent, les pales sont conçues pour décrocher progressivement à la vitesse critique [33]. Ainsi le rotor ne monte plus en vitesse lorsque le vent augmente à cause des turbulences qui se créent autour de la pale et font diminuer sa portance, réduisant ainsi le couple produit. Certains rotors sont équipés d'aérofreins placés sur le bord de fuite (comme pour les avions) ou en extrémité des pales (rotation du bout de la pale figure 1.12 ou parachute ralentissant l'hélice) comme présenté sur la figure 1.12, actionnés par un système centrifuge ou hydraulique pour les plus grandes génératrices. Toutes les éoliennes possèdent un frein mécanique de sécurité pour ralentir ou maintenir à l'arrêt le rotor. Le plus généralement, ce sont des freins à disques à commande hydraulique, placés sur l'arbre de la génératrice.

### 1.3 Conversion mécanique → électrique avec multiplicateur

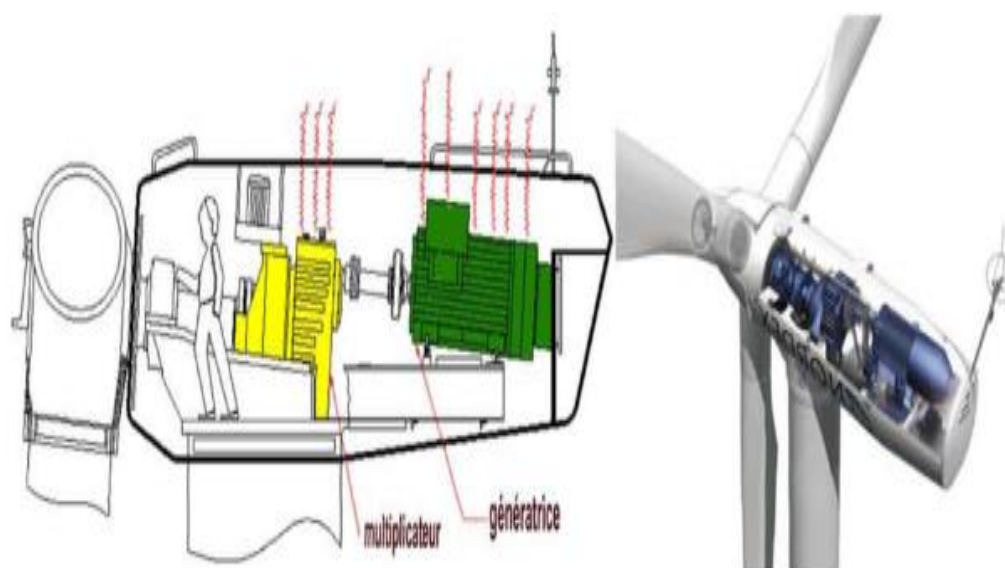


Figure 1.15 Exemple d'éolienne avec multiplicateur

En fonction de la puissance d'éolienne et de l'utilisation souhaitée pour l'énergie produite, on rencontre dans la littérature de nombreuses chaînes de conversion. Elles permettent soit

L'exploitation directe de l'énergie, soit le passage par un étage continu et éventuellement un stockage [5], [6], [71]. L'on peut distinguer deux constructions différentes de la conversion selon que l'on utilise, ou pas, un multiplicateur de vitesse.

### 1.3.1 A chaîne de conversion à étage continu :

Le passage par un étage continu permet une plus grande liberté lors de la gestion de l'énergie produite par l'éolienne car on n'a pas de fréquence imposée. C'est un moyen très approprié pour une alimentation de laboratoire ou une habitation isolée qui possède des appareils fonctionnant directement en basse tension

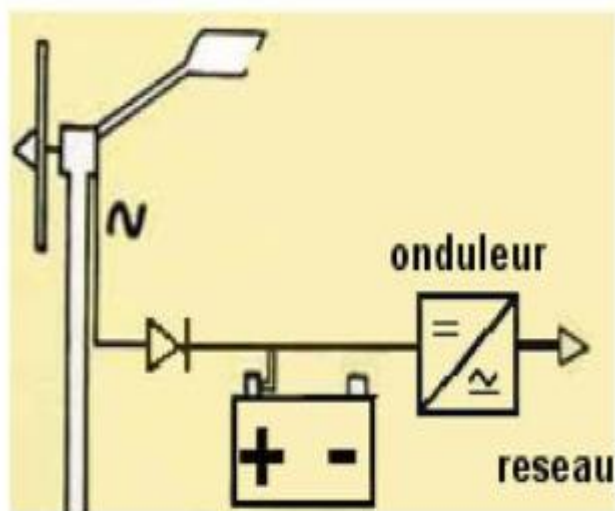


Figure 1.16 Schéma de principe des éoliennes à étage continu, connectées au réseau.

continue ; de plus, il est facile de stocker de l'énergie dans des batteries pour obtenir une source permanente. Par contre, il s'agit de se connecter au réseau alternatif, il faut y associer un onduleur ainsi que des filtres et des transformateurs qui permettront de convertir la tension continue en signal alternatif sinusoïdal (figure 1.16).

#### 1.3.1.1 Génératrice à Courant Continu :

Ce type de génératrice n'est utilisée que sur les éoliennes de très faible puissance (inférieure à 500W) pour charger des batteries et alimenter des installations de type station de mesure. Elles sont également utilisées sur les bateaux, en association avec des panneaux solaires. Pour une telle machine, les équations de fonctionnement sont simples. Elle comporte un stator portant le circuit inducteur (bobinages alimentés ou aimants permanents) excitation et un rotor constituant le circuit induit connecté aux bornes de sortie, via le système balais collecteurs. La tension est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'éolienne et à l'avaleur du courant d'excitation.

#### 1.3.1.2 Génératrice Synchrone :

C'est une génératrice de conception plus simple que la génératrice à courant continu. Son stator comporte des enroulements induits monophasés ou triphasés et son rotor porte un inducteur bobiné ou à aimants permanents. Ici il n'y a plus de système balais collecteur. L'alimentation de l'inducteur se fait par une petite génératrice inversée en bout d'arbre.



La tension statorique est proportionnelle au courant d'excitation et à la vitesse de l'éolienne, la fréquence de la tension de sortie dépend aussi de la vitesse de rotation. Une connexion directe au réseau n'est pas envisageable car l'éolienne devrait fonctionner toujours à la vitesse de synchronisme.

C'est pour cela que l'on redresse la tension statorique avec un pont de diodes ou de thyristors pour obtenir une tension continue que l'on met en forme par la suite.

Ces génératrices sont largement répandues pour la production d'électricité et sont bien adaptées à la production éolienne [8], [9], [10].

Le développement de nouvelles commandes permettant d'optimiser la conversion énergétique, avec des systèmes fonctionnant avec des hélices à pas variable, est un axe de recherche largement étudié par de nombreux laboratoires [11].

### 1.3.2 Conversion continu/alternatif :

Pour les éoliennes qui ne sont pas directement connectées au réseau, il faut un dispositif qui convertisse la tension continue en tension alternative sinusoïdale avec une pollution harmonique minimale.

Des onduleurs à trois bras sont mis en œuvre pour fournir un système de tensions triphasées. Ils peuvent être de deux types :

Onduleur autonome, avec des transistors de puissance de type IGBT commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion.

Onduleur assisté par le réseau, avec des thyristors retardés à l'amorçage.

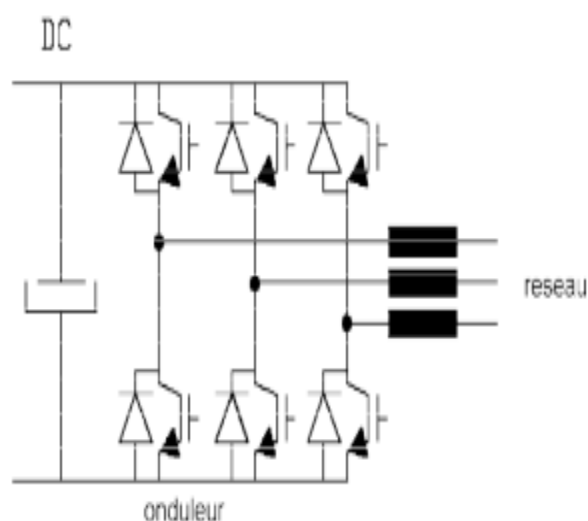


Figure 1.17 Schéma de principe d'un onduleur de tension pour connexion au réseau.

Une fois la tension alternative générée, il faut filtrer les courants qui peuvent ne pas être sinusoïdaux (cas de l'onduleur assisté) pour limiter leurs harmoniques qui risquent de perturber le réseau. Des filtres passifs sont souvent utilisés mais désormais le développement des filtres actifs offre de nouvelles possibilités [12], [13], [14]. Des transformateurs à couplage zigzag ou double étoiles adaptent la tension et font la mise en forme du signal [15].

Des commandes d'onduleur permettent de réduire les harmoniques en effectuant des découpages haute fréquence afin que les courants produits aient des formes les plus proches possibles de sinusoides [16], [17]. Ce sont les redresseurs à modulation de Largeur d'impulsion où on commande les interrupteurs de manière à ce que les courants produits restent dans une enveloppe sinusoidale plus ou moins large en fonction de la qualité de l'énergie souhaitée et en fonction des possibilités de commutation des interrupteurs [18].

Le contrôle de la puissance injectée au réseau est géré par la commande des onduleurs en fonction de la puissance instantanée de l'éolienne. La présence d'un condensateur associé ou non avec une batterie d'accumulateurs au niveau de l'étage continu permet de stabiliser la tension et de fournir une puissance moins fluctuante. La batterie se charge et se décharge en fonction de la force du vent.

Pour les grands parcs éoliens, différentes stratégies [19] sont mises en place pour optimiser la conversion. On peut avoir :

- a. **Un onduleur par éolienne** Ce sont des onduleurs de petite puissance, faciles à réaliser avec les composants électroniques courants. Par contre, l'onduleur est sous-exploité la plupart du temps car il doit être dimensionné pour la puissance maximale de l'éolienne.
- b. **Un onduleur pour tout le parc :** Cette solution permet d'optimiser la puissance de l'onduleur car on peut se baser sur la puissance moyenne de l'ensemble du parc. Cependant, l'onduleur doit supporter de très forts courants et les composants de puissance doivent alors supporter ces contraintes.
- c. **Un onduleur pour un groupement d'éoliennes :** C'est une solution intéressante car elle permet de construire des onduleurs de puissance raisonnable tout en les exploitant à un bon niveau de charge.

La mise en place d'un parc éolien avec Nage continu requiert donc une étude approfondie quant à la puissance des éoliennes et des onduleurs. Il peut y avoir lieu de créer des sous réseaux en tension continue pour connecter plusieurs éoliennes à un onduleur puis alimenter le réseau. La commande des onduleurs peut permettre une aide à la gestion du réseau et aux services système en régulant les puissances actives et réactives injectées.

### 1.3.3 Connexion directe au réseau :

#### 1.3.3.1 Génératrice Asynchrone :

La constitution du stator est la même que pour la génératrice synchrone et le rotor comporte soit un système d'enroulements triphasés (si le stator est triphasé lui aussi) ou une cage d'écureuil en court-circuit [20], [21], [22]. Pour produire de l'énergie, cette génératrice doit être magnétisée. Cette magnétisation peut provenir soit de condensateurs connectés en parallèle avec les enroulements statorique ou du réseau [23], [91]. Lorsqu'elle est connectée au réseau, elle ne produit que lorsque sa vitesse de rotation est légèrement supérieure à sa vitesse de synchronisme. Il y a un glissement<sup>1</sup> de l'ordre de 1 à 5%.

Cependant, si la vitesse de rotation du rotor est inférieure à la vitesse de synchronisme, il faudra déconnecter la génératrice asynchrone du réseau pour que l'éolienne ne se transforme pas en ventilateur car la génératrice

---

<sup>1</sup> . Différence entre vitesse de synchronisme et vitesse du rotor en %g% =  $100 \frac{\Omega_{\text{synchrone}} - \Omega_{\text{rotor}}}{\Omega_{\text{synchrone}}}$

asynchrone se trouverait en fonctionnement moteur. De plus, pour permettre une production sur une large gamme de vitesses de vent, ces éoliennes sont équipées de rotor à pas variable qui permet d'ajuster la caractéristique de l'hélice en fonction de la vitesse du vent pour produire une puissance électrique constante à vitesse de rotation constante.

Le grand avantage de ce type d'éolienne est sa simplicité et sa robustesse. En effet, pour la gestion de la puissance produite il suffit de connecter ou déconnecter la génératrice du réseau en fonction de sa vitesse de rotation. La conversion électromécanique ne comporte aucune pièce d'usure (pas de système balais collecteurs) et aucun composant électronique à l'exception ne peut être du relais de connexion au réseau. De plus, si la génératrice asynchrone est correctement bobinée avec une répartition sinusoïdale des enroulements, les tensions et courants produits sont de forme sinusoïdale avec un résidu

Harmonique négligeable. Il n'est donc pas nécessaire d'installer un système de filtrage avant la connexion au réseau.

Cette structure présente un inconvénient majeur : la production ne peut se faire que SI le réseau impose les tensions et la fréquence. Le fonctionnement en autonome nécessite des condensateurs et une commande plus complexe pour contrôler l'amplitude des tensions et la fréquence.

### **1.3.3.2 Génératrice à réluctance variable**

Conçues au départ pour produire des courants de fréquence élevée, les génératrices à réluctance variable (MRV) sont principalement destinées à des applications exigeant de grandes vitesses de rotation ou des entraînements lents à couple élevé [24], [26], [25]. Elles sont également utilisées comme actionneur de positionnement électromécanique tel que les moteurs pas à pas.

On distingue deux types de structures de MRV, les génératrices à réluctance non-excitées et les génératrices à réluctance excitées :

Les MRV non-excitées sont principalement destinées à des fonctionnements à hautes vitesses, ne possèdent pas de contact glissant et sont très robustes. L'inconvénient majeur est qu'elles possèdent un facteur de puissance médiocre.

Les MRV excitées pallient à ce problème de facteur de puissance en intégrant une excitation constituée d'une alimentation continue et de bobines ou d'aimants permanents.

L'application des génératrices à réluctance dans les systèmes éoliens est plutôt rare, cependant certaines éoliennes intègrent, comme alternateur de moyenne puissance, des génératrices à réluctances excitées à denture répartie. L'excitation est le plus souvent réalisée par des aimants permanents, on parle alors de génératrices hybrides.

### 1.3.3.3 Génératrice Asynchrone à double alimentation :

Pour cette machine, le rotor est bobiné et comporte des enroulements triphasés couplés en étoile associés à des bagues collectrices qui permettent d'alimenter ses enroulements. Le stator est identique à celui d'une génératrice asynchrone à cage.

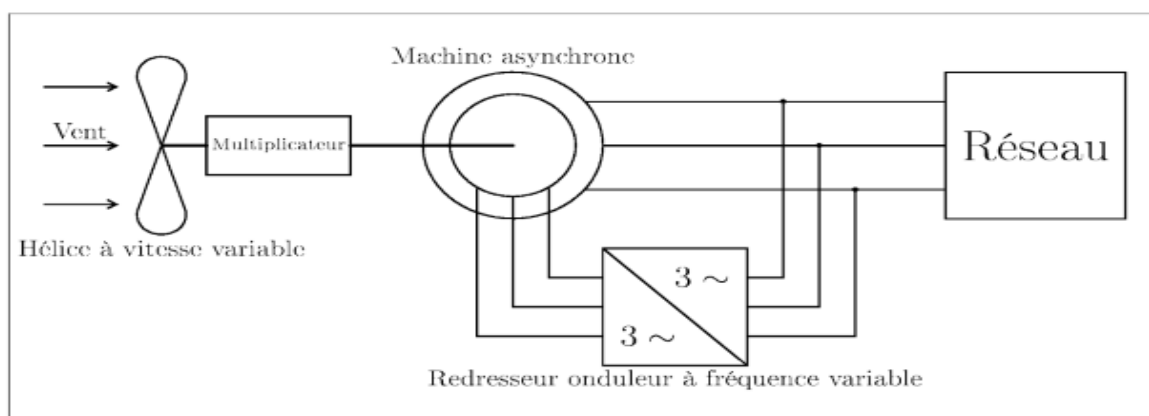


Figure 1.18 Schéma de principe de la double alimentation

On connecte toujours le stator au réseau mais ici au lieu de court-circuiter les enroulements rotoriques, on les alimente en alternatif à fréquence variable à partir du réseau via un onduleur de réduite (figure 1.18) La puissance à fournir au rotor est faible devant la puissance produite par le stator.

De cette manière, il est possible de produire de l'énergie avec des vitesses de rotation du rotor variant dans une large plage. En effet, la fréquence des tensions de sortie d'une génératrice asynchrone dépend de sa vitesse de rotation et donc du glissement  $g$  :

$$g = 100 \frac{\Omega_{\text{synchronisme}} - \Omega_{\text{rotor}}}{\Omega_{\text{synchronisme}}} \quad \text{Avec } \Omega: \text{ pulsation mécanique} \quad (1.1)$$

Comme la fréquence des courants rotoriques dépend du glissement :

$$\omega_{\text{rotor}} = g \omega_{\text{synchronisme}} \quad \text{Avec } \omega_{\text{synchronisme}} = \frac{\Omega_{\text{synchronisme}}}{\rho} \quad (1.2)$$

Avec  $\omega_{\text{synchronisme}}$  pulsation électrique et  $\rho$  nombre de paires de pôles de la machine. On peut ainsi obtenir une fréquence de sortie de 50Hz ( $\omega_{\text{synchronisme}} = 100\pi$ ) quelle que soit la vitesse de rotation de l'éolienne à condition d'injecter au rotor des tensions à une fréquence qui compense cette différence de vitesse.

$$\omega_{\text{rotor}} = \frac{\Omega_{\text{synchronisme}} - \Omega_{\text{rotor}}}{\rho} = 100\pi - \frac{\Omega_{\text{rotor}}}{\rho} \quad (1.3)$$

Il faut réguler l'amplitude des tensions rotoriques pour contrôler la production d'énergie. On obtient une éolienne plus complexe que précédemment mais qui permet de mieux capter le vent car la production s'effectue quelle que soit la vitesse du vent avec une puissance variable. De plus, si l'on installe une hélice à pas variable pour capter les très faibles vents et limiter la vitesse en cas de fort vent, on aboutit à un système très performant. Il est aussi envisageable de concevoir une telle génératrice avec un grand nombre de pôles pour une liaison mécanique directe à l'hélice.

L'inconvénient majeur de cette génératrice est la présence de bagues collectrices pour alimenter les enroulements du rotor. Ces contacts s'usent et demandent donc de l'entretien. Pour remédier à ce problème,

des génératrices asynchrones à double stator sont à l'étude [8] pour des fonctionnements en GADA brushless. On envisage même l'utilisation de deux génératrices sur le même arbre, l'une servant à la production électrique et l'autre à l'alimentation des enroulements rotoriques.

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de génératrice asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne. Avec un onduleur de taille réduite et une commande appropriée, on obtient une qualité de tension similaire à celle de la génératrice asynchrone classique.

#### 1.4 Conversion mécanique → électrique à attaque directe :

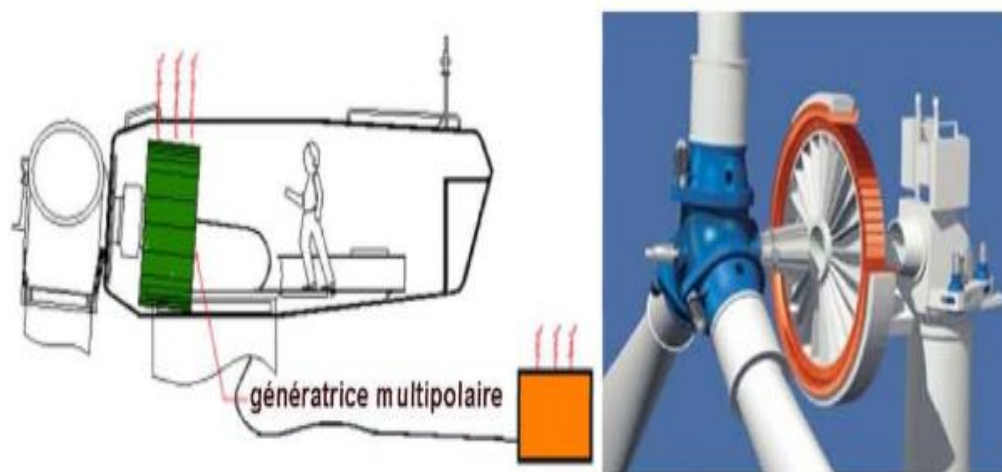


Figure 1.19 Exemple d'éolienne à attaque directe

Ce type d'éolienne est peu répandu mais se développe de plus en plus. Certains constructeurs se spécialisent dans la réalisation de telles éoliennes qui présentent différents avantages par rapport aux autres éoliennes [1]. Le principe de l'attaque directe est d'avoir la génératrice directement sur l'hélice. Ainsi il n'y a plus de multiplicateur, siège de perte de puissance et source de bruit. En contrepartie, la génératrice ne tourne plus à 1500 tr/min mais à la vitesse de l'hélice, environ 18 à 50 tr/min, il faut donc qu'elle soit de conception différente de celle fonctionnant à plus grande vitesse.

Un autre avantage de ces éoliennes est qu'il n'y a qu'une pièce en mouvement pour toute l'éolienne : c'est l'arbre de l'hélice. Il n'y a donc que le palier de celui-ci à entretenir. C'est une maintenance moins lourde que pour les éoliennes à multiplicateur et ces éoliennes devraient alors être plus rentables.

Au niveau de la chaîne de conversion mécanique/électrique, on peut retrouver les mêmes ensembles que pour les éoliennes à multiplicateur, seule la conception des génératrices diffère sensiblement.

Afin de produire de l'électricité avec une faible vitesse de rotation, les génératrices à attaque directe possèdent un grand diamètre pour obtenir une vitesse de déplacement relative importante entre le rotor et le stator et permettre de loger un grand nombre de pôles, permettant ainsi d'obtenir une fréquence de 50Hz pour des vitesses de l'ordre de 15 à 30 tr/min.

### 1.4.1 Génératrice synchrone :

Toutes les grandes éoliennes à attaque directe sont équipées de génératrices synchrones multipolaires à aimants permanents [1]. Elles produisent des tensions multi phases qui sont redressées par un pont de diodes situé dans la nacelle de l'éolienne. Elles génèrent une tension continue qui alimente un onduleur, installé au pied de l'éolienne et qui la relie au réseau de distribution.

#### 1.4.1.1 Génératrice multipolaire classique :

Une majeure partie des génératrices synchrones multipolaires ressemble à la génératrice synchrone classique. Cependant le rotor et le stator sont inversés. En effet, le rotor forme une couronne entraînée par l'hélice et les aimants sont fixés à l'intérieur de celle-ci. Le stator

Quant à lui est logé à l'intérieur de la couronne du rotor, il comporte les enroulements et est fixé à la nacelle de l'éolienne. La longueur utile de ces génératrices est faible devant leur diamètre, elles ressemblent plus à de grands alternateurs automobiles qu'à des alternateurs de centrale électrique.

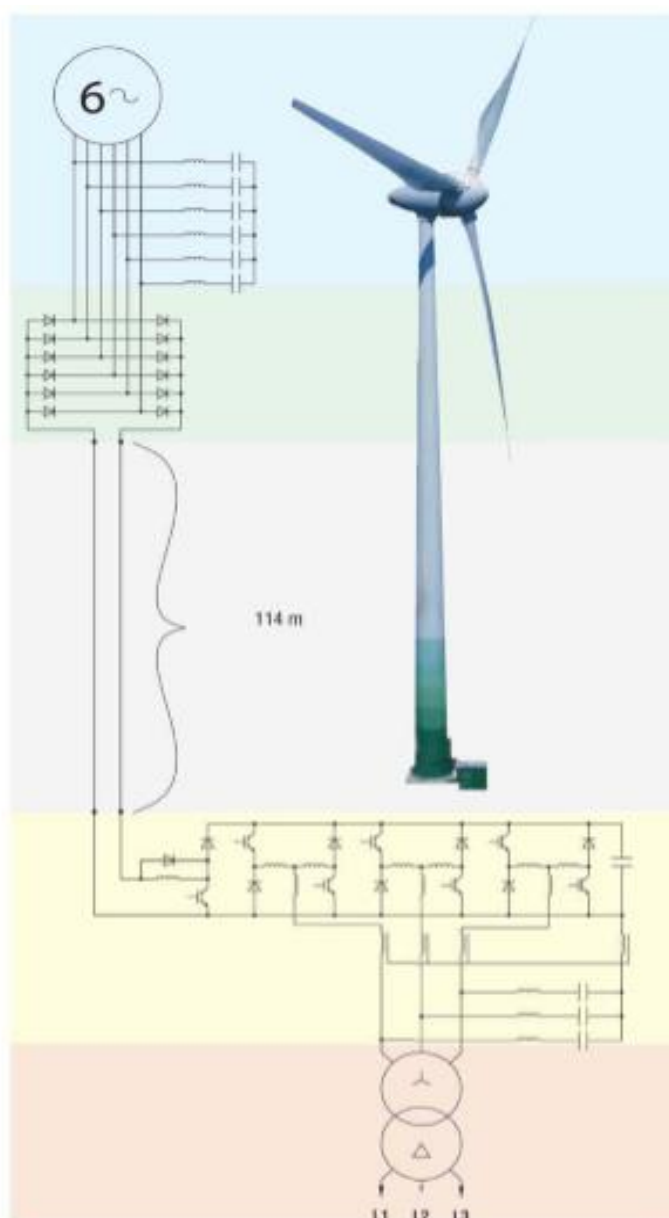
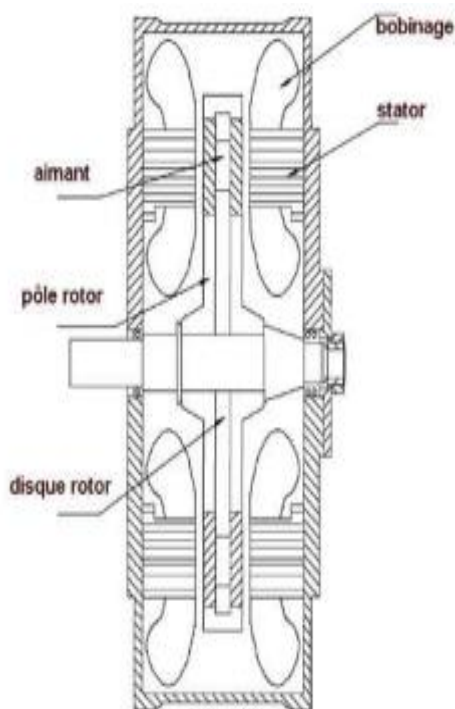


Figure 1.20 Schéma constitutif d'une éolienne à attaque directe de 4.5MW de marque ENERCON [1].

### 1.4.1.2 Génératrice multipolaire discoïde :

Certaines éoliennes sont constituées de génératrices dites discoïdes [9]. Leur conception est telle que le stator et le rotor sont des disques empilés les uns à côté des autres, le long de l'arbre de l'hélice. Il y a alternance de disques stator, comportant les enroulements, et de disques rotor, équipés d'aimants permanents. Il s'agit toujours d'une conception multipolaire et de grand diamètre. Dans ces génératrices, le flux magnétique créé par les aimants est parallèle à l'axe de rotation, contrairement aux génératrices classique où le flux était radial.



*Figure 1.21 Schéma de principe d'une génératrice discoïde*

### 1.4.2 Génératrice asynchrone :

On peut aussi concevoir et utiliser des génératrices asynchrones multipolaires pour la production éolienne. Cependant, il n'existe pas encore sur le marché des éoliennes à attaque directe avec ce type de génératrice. Il paraît intéressant d'étudier la faisabilité et le fonctionnement de telles génératrices pour des puissances élevées. On pourrait aussi envisager des constructions de type discoïde comme pour les génératrices synchrones. C'est principalement la forte valeur des inductances et la faible puissance massique qui freinent son développement.

## 1.5 Mise en œuvre des éoliennes

### 1.5.1 Recherche du rendement maximum MPPT :

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie.

On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT en anglais pour Maximum Power Point Tracking) [30], [31], [32], [33]. Ces systèmes utilisent différents moyens afin d'obtenir ce point de puissance maximum. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice.

La recherche du maximum se fait en permanence et éolienne s'adapte donc à chaque variation de vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance. De tels systèmes incorporent aussi des sécurités qui permettent par exemple de limiter la puissance produite lorsque le vent devient trop important et risque d'endommager l'éolienne.

### **1.5.2 Eolienne autonome :**

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans des gammes de puissances de quelques dizaines de Watts à quelques dizaines de KW pour l'alimentation d'appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage. Les plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux, le camping ou les stations météo. Des génératrices de plus forte puissance sont utilisées, quant à elles, pour la production destinée à alimenter en énergie électrique des chalets isolés ou encore des villages [34], [23].

Les points communs entre toutes ces productions éoliennes sont leur faible puissance et leur association à une unité de stockage d'énergie, généralement constituée de batteries d'accumulateur.

L'éolienne charge les batteries par la tension continue produite soit directement par une génératrice à courant continu pour les plus faibles puissances, soit par une génératrice de type synchrone, à aimants ou bobine, via un pont redresseur et une électronique plus ou moins élaborée pour réguler leur charge.

La tension continue des batteries est ensuite utilisée soit directement pour de l'éclairage en tension continue ou alors mise en forme par un onduleur pour obtenir une alimentation sinusoïdale 50Hz permettant l'utilisation de tous les appareils électriques classiques.

### **1.5.3 Eolienne isolée raccordée au réseau :**

Les éoliennes isolées connectées au réseau de distribution sont souvent en fonctionnement pour tester le potentiel éolien du site considéré, ou appartiennent à des industriels ou des privés qui produisent leur propre électricité et revendent l'excédent au distributeur local.

Ce type de production décentralisée se rencontre de plus en plus avec le développement des primes et autres aides à la production d'énergie électrique propre. Le prix de rachat du kWh étant important, cela facilite et encourage le développement de l'éolien.

Les puissances de ces éoliennes peuvent varier, selon qu'il s'agit d'un exploitant privé ou d'industriel, de 50 kW à 4.5 MW pour les plus récentes éoliennes du marché. Les amortissements qui s'étaient normalement sur 20 à 30 années sont considérablement réduits par toutes les aides. Une telle installation peut être rentable en 10 à 15 ans.

Ces éoliennes fonctionnent en permanence et ont, le plus souvent, besoin d'être raccordés à un réseau puissant, dans le cas d'utilisation de génératrices asynchrones par exemple. Il n'y a pas d'unité de stockage pour ce type de production et la puissance produite fluctue beaucoup au gré du vent.



### 1.5.4 Parc éolien important :

En ce qui concerne les parcs éoliens, aussi appelés fermes éoliennes, on peut rencontrer différentes structures d'éoliennes, de génératrices et de modes de connexion au réseau. Les types de génératrices sont ceux précités. Pour ce qui est des modes de raccordement, il peut y avoir différentes stratégies selon la situation du parc et la technologie employée [19], [35].

Principalement, on peut observer les structures suivantes :

- Les éoliennes raccordés, une à une, directement au réseau de distribution ou de transport.
- Les éoliennes connectées ensemble par un bus continu, alimentant un onduleur assurant la connexion avec le réseau.
- Des solutions mixtes existent afin d'avoir des onduleurs de taille modérée fonctionnant proche de leurs charges nominales.

Ces parcs peuvent se situer sur terre comme en mer. Ainsi, une partie du transport de l'énergie peut être faite par un bus continu qui relie le parc éolien au littoral où peut se situer l'onduleur pour le raccordement au réseau.

### 1.5.5 Gestion du réseau électrique :

Pour pouvoir fonctionner correctement et produire de l'énergie électrique, la majorité des éoliennes a besoin d'un réseau puissant qui impose la fréquence et la tension. De plus, ce réseau doit aussi pouvoir fournir la puissance réactive nécessaire aux génératrices asynchrones par exemple et pouvoir absorber en permanence toute la puissance produite par les éoliennes [36].

Tout ceci est très complexe à gérer car la puissance produite par les éoliennes est très fluctuante à cause des aléas du vent [37], [38]. "Une éolienne d' 1 MW ne peut pas produire en permanence cette puissance nominale ; on ne peut compter que sur 20 à 30 % de cette puissance en moyenne. C'est pour cela qu'il est intéressant d'interconnecter un grand nombre d'éoliennes sur plusieurs sites entre elles afin d'avoir une production qui puisse se stabiliser.

Par contre, de par leur électronique et le réglage possible de l'angle de calage des pales, les éoliennes peuvent fournir des services système. En effet, il est possible de régler la puissance produite en modifiant le pas des pales de l'hélice. Si pendant une période de fort vent il y a un excédent d'énergie électrique au niveau du réseau, pouvant conduire à une déstabilisation de la fréquence, il est possible de limiter la puissance produite par les éoliennes. Ceci est effectué par l'action sur la commande de la partie électronique et sur l'angle de calage des pales afin de diminuer le rendement de l'hélice. Cet axe de recherche est actuellement bien étudié et de nombreux laboratoires apportent leurs contributions pour des solutions innovantes et performantes [30], [40], [29].

De plus, en intervenant sur la commande des onduleurs associés à la génératrice, on peut faire varier la valeur de la puissance réactive produite par un parc éolien. Ainsi, en fonction de la chaîne de conversion choisie, il est possible d'absorber ou fournir une puissance réactive donnée et de contrôler le plan de tension du réseau. Le gestionnaire de réseau peut alors compter sur l'éolienne pour aider à la correction du facteur de puissance

du réseau [41], [42]. Cette option est désormais incorporée à la plupart des éoliennes utilisant des génératrices asynchrones à double alimentation.

Cependant, s'il y a une période sans vent, on ne peut rien faire et l'exploitant du réseau électrique ne peut donc pas compter sur les éoliennes comme source de production, fiable. On peut cependant prédire les conditions de vent et donc de production d'énergie électrique avec quelques jours d'avance. Ceci reste de la prédiction météo et ne change rien lorsque le vent tombe.

Pour avoir une plus grande souplesse d'utilisation et une meilleure efficacité du système, il faudrait pouvoir stocker l'énergie durant les périodes de fort vent pour pouvoir la restituer quand il n'y a plus de vent. Ou alors associer les éoliennes avec d'autres sources de production comme des groupes diesel dans le cas de production sur réseau autonome [47].

### 1.5.6 Nécessité de stockage :

On a vu précédemment que le stockage d'énergie 1391 permettrait d'obtenir un service réseau appréciable 1431. Il y a deux types de stockage à envisager: d'une part le stockage à court terme permettant de faire face aux bourrasques de vent et aux turbulences, et d'autre part le stockage de longue durée qui permettrait de restituer l'énergie lorsqu'il n'y a plus de vent.

#### a) Stockage à court terme :

Généralement dans l'inertie de l'hélice [48] ou avec des accumulateurs cinétiques au pied de l'éolienne. Ces accumulateurs sont constitués de volants d'inerties entraînés par des génératrices asynchrones (figure 1.22). On trouve aussi du stockage sous forme électrochimique dans des supercondensateurs [49]. Ce stockage permet de lisser les fluctuations de puissance du vent.

#### b) Stockage à long terme :

Plusieurs solutions sont envisagées, notamment les batteries d'accumulateurs chimiques [50], l'air comprimé [51], la production d'hydrogène par électrolyse et la restitution avec une pile à combustible [52] ... Ce stockage permet de compenser les périodes où le vent est insuffisant et contribue ainsi à maintenir constante la puissance fournie au réseau.

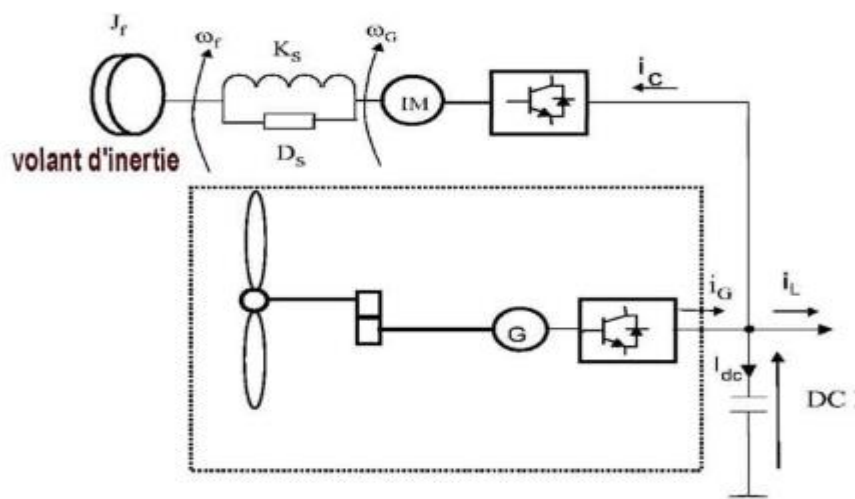


Figure 1.22 Exemple de stockage à court terme avec volant d'inertie.

Ce stockage d'énergie associé à une gestion adéquate permettrait de garantir une production constante tout au long de l'année pour les parcs éoliens. Ceci faciliterait leur insertion dans les réseaux et soulagerait les gestionnaires des réseaux.

## 1.6 Stockage d'énergie :

Nous allons nous intéresser ici aux modes de stockage qui peuvent être associés à une éolienne. Le but est double : stocker de l'énergie électrique dans les périodes de fort vent pour pouvoir la restituer dans les périodes de vent plus faible et lisser au maximum la puissance produite par l'ensemble éolienne plus stockage. Le stockage se fait le plus souvent sous une forme autre que l'énergie électrique et demande donc des conversions énergétiques. Le rendement global du stockage est donc très variable en fonction des procédés choisis [53].

Il apparaît donc deux types de stockage, l'un à court terme et l'autre à long terme. Ils mettent en œuvre des méthodologies et des contrôles différents.

### 1.6.1 Stockage à court terme :

Les systèmes de stockage à court terme permettent de transférer rapidement des puissances élevées sur des durées pouvant aller de la seconde à la dizaine de minutes. On trouve principalement des systèmes à stockage inertiel mais le développement récent de nouveaux composants tels que les super-capacités permet d'envisager des solutions de stockages électrochimiques [54].

Les systèmes inertiels sont eux aussi en grande évolution avec l'utilisation de génératrices rapides. Effectivement, le stockage qui s'effectuait classiquement dans de très lourds volants d'inertie tournant à 3000tr/min accouplés à des génératrices classiques, s'effectue désormais à très grande vitesse avec des génératrices complexes comportant plusieurs rotors concentriques à des vitesses différentes. L'alimentation se fait par de l'électronique de puissance permettant d'obtenir de plus grandes puissances et de stocker encore plus d'énergie. Il est désormais possible de stocker et restituer une puissance de plusieurs dizaines de KW pendant plus de dix minutes. Ces systèmes permettent donc de lisser la puissance fluctuante du vent [48], [55], [56], [57], [58].

Les super capacités ont elles aussi un grand intérêt pour le lissage des fluctuations de puissance de par leur dynamique plus rapide que celle des batteries. Leurs capacité augmente et l'on trouve désormais des super capacités de 1800F [49], utilisées en association avec un convertisseur alternatif/continu permettant l'échange avec le réseau [59], [60], [61].

### 1.6.2 Stockage à long terme :

Pour ce qui est des systèmes de stockage a long terme, on connaît Olen les batteries et l'on voit se développer des systèmes complexes tels que les systèmes à air comprimé ou encore l'électrolyse associé à une pile à combustible.

Les batteries ont évolué durant cette dernière décennie et offrent C1esormais des capacités volumiques et massiques très importantes notamment avec les dernières générations du type lithium polymère. Elles

permettent aussi des fonctionnements en cyclage sans grande contrainte avec des chargeurs optimisant leur durée de vie [62], [50], [63].

Les systèmes à air comprimé utilisent différents procédés afin de stocker et restituer l'énergie en utilisant ou non l'énergie d'échauffement que la compression procure. De plus, un compresseur est utilisé pour le stockage et une turbine associé à une génératrice pour le déstockage [51], [61].

Les systèmes utilisant un électrolyseur pour le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène et la restitution d'énergie à raide d'une pile à combustible sont aussi à l'étude [64], [521], [65].

Pour ce qui est des systèmes à air comprimé ou électrolyse, ils sont encore en développement et le rendement global pour la restitution est relativement faible. Par contre, ils permettent d'obtenir des capacités importantes à moindre frais car le stockage se fait dans des réservoirs qui peuvent être dimensionnés en fonction de l'énergie que l'on veut stocker.

Il existe donc plusieurs solutions pour le stockage. Elles peuvent être associées [661], [67] afin d'obtenir une unité permettant simultanément de lisser les fluctuations de puissance (court terme) et d'atténuer les effets des périodes de faible ou forte production (long terme). En tous cas, il ne faut pas écarter un système de stockage associé à l'éolien à cause de son faible rendement global car les pertes dans les systèmes de conversion peuvent globalement ne pas être si pénalisantes si cela nous permet de maintenir constante la production en permanence.

## Conclusion :

La production d'électricité par l'énergie éolienne intéresse de plus en plus les pays afin de produire une énergie propre et durable.

Son développement va progresser grâce aux recherches effectuées sur les moyens de conversion de l'énergie. Une éolienne faisant appel à de nombreux domaines de compétences, allant de la mécanique des fluides au génie électrique en passant par la résistance des matériaux. Elle nécessite une communication et un travail en commun entre de nombreux corps de métiers.

Utilisant les matériaux et les procédés technologiques les plus novateurs, l'industrie éolienne devrait pouvoir produire des aérogénérateurs permettant de limiter, voire même supprimé, l'utilisation de nos centrales thermiques. Les grandes fermes de production donnent de bons résultats et se développent de plus en plus avec des éoliennes toujours plus puissantes.

L'état avancé des recherches dans le domaine éolien montre une volonté de développer des éoliennes toujours plus puissantes et capables de capter au mieux la puissance disponible dans le vent. Beaucoup de recherches sont faites en ce moment sur les stratégies des différentes chaînes de conversion utilisées pour la production d'électricité éolienne [68], [69], [70], [71], [72].

Ainsi des génératrices autres que synchrone et asynchrone classiques sont en développement et en test pour permettre d'exploiter différemment la puissance disponible dans le vent. Ces génératrices , à réluctance ou multipolaire par exemple, permettront d'extraire de la puissance même pour des vents faibles tout en réduisant les installations mécaniques par suppression du multiplicateur. Ceci augmentera le rendement de la conversion tout en limitant l'entretien.

Un autre domaine de recherche concerne la qualité de l'énergie produite : il s'agit d'imaginer des systèmes permettant de faciliter l'insertion dans le réseau électrique et la gestion des parcs éoliens. Des dispositifs de stockage permettent de lisser les variations de puissance, en mettant au point des structures de génératrices et des commandes permettant d'offrir toujours plus de services au gestionnaire du réseau : fourniture de puissance réactive, aide au maintien du plan de tension, tolérance aux défauts, fonctionnement en îlotage, amélioration de la qualité de l'énergie du réseau.

Nous allons, dans notre étude, nous intéresser à ces différents aspects en modélisant une éolienne comprenant une unité de stockage afin de voir la faisabilité et l'intérêt que cela peut présenter. Le but est de pouvoir fournir au réseau une puissance constante afin de permettre au gestionnaire du réseau de compter sur la puissance des éoliennes. De plus, nous ajouterons des services système tels que la fourniture d'énergie réactive, nous étudierons également comment il est possible d'améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique en effectuant du filtrage actif à l'aide de l'éolienne.

# Chapitre 2 : Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA):

## Chapitre 2 : Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA):

Introduction :

La modélisation est un passage obligatoire pour concevoir des systèmes de commande performants, elle nous permet de simuler la génératrice et d'en déduire les lois de commande en manipulant les équations décrivant le comportement de la machine.

Le modèle mathématique d'une génératrice électrique est un mode de représentation de la génératrice idéal permettant de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement, elle apporte une aide appréciable dans la résolution des problèmes techniques.

Dans cette étude, on adopte les hypothèses simplificatrices suivantes [73] :

- L'effet d'encoche ainsi que l'effet de peau sont négligeable.
- Un même nombre des phases entre le stator et rotor.
- Une répartition sinusoïdale, le long de l'entrefer, de la force magnétomotrice créée par Chaque bobinage.
- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- Les pertes ferromagnétiques négligeables.

### 2.1 Modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation

#### 2.1.1 Schéma de la structure étudié

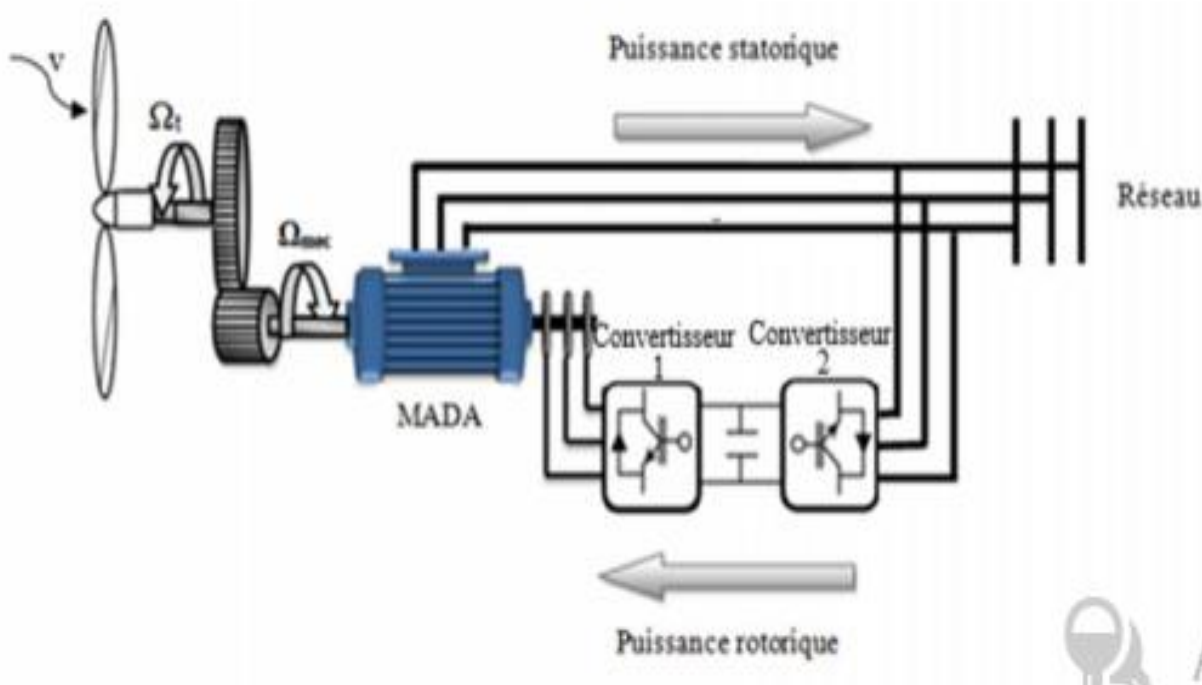


Figure 2.1 Générateur éolien basée sur une GADA connectée au réseau

### 2.1.2 Description de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA)

La première apparition de cette génératrice date de l'année 1899, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation. La GADA est une génératrice asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures ; elle présente un stator analogue à celui des génératrices triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écurie coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais, il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la génératrice tourne. La figure 2.2 suivante représente la structure de la génératrice asynchrone à double alimentation. [83]

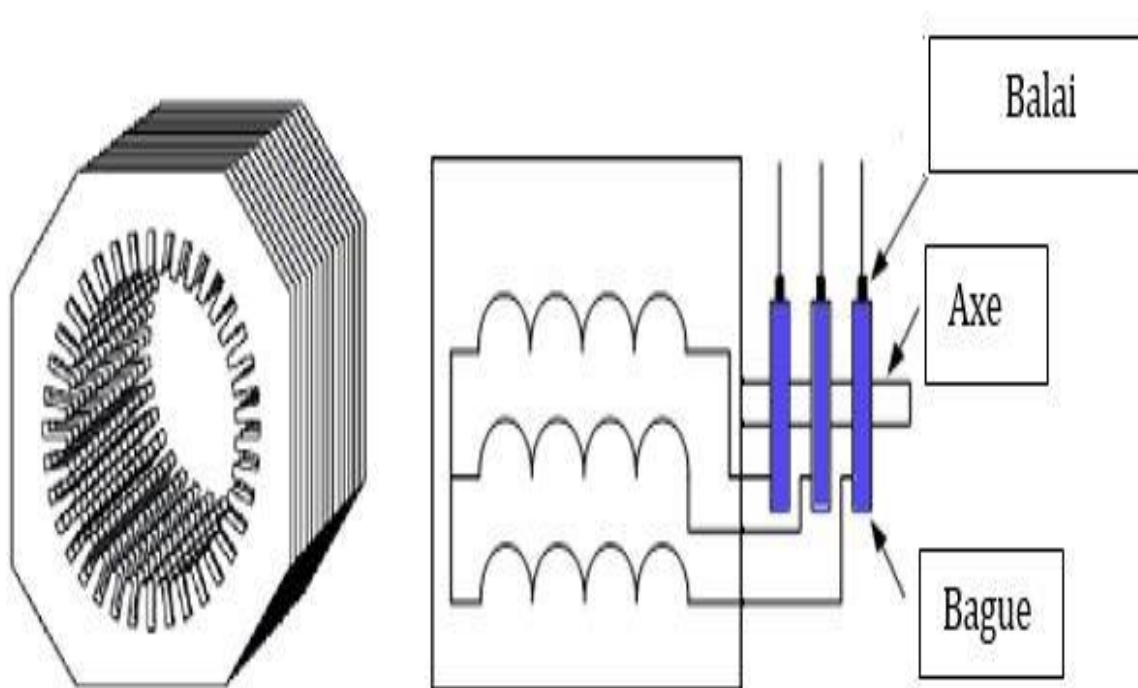


Figure 2.2 Représentation de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général.

### 2.2 Représentation de la GADA dans le système triphasé et biphasé [74]

La génératrice asynchrone à double alimentation est formée d'un stator fixe, et d'un rotor cylindrique mobile. Le stator à trois enroulements couplés en étoile ou en triangle et qui sont alimentés par un système triphasé de tensions, il en résulte alors la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, (THEOREME DE FERRARIS). La vitesse de glissement de ce champ par rapport au stator est  $\Omega_s$   $\omega = S/p$  où  $\omega_s$  désigne la pulsation de réseau d'alimentation statorique triphasée et p le nombre de paires de pôles. Le rotor de la génératrice supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de paires de pôles que celui du



stator couplé en étoile. La génératrice asynchrone à double alimentation doit être représentée dans le système triphasé et biphasé par la figure (2.3).

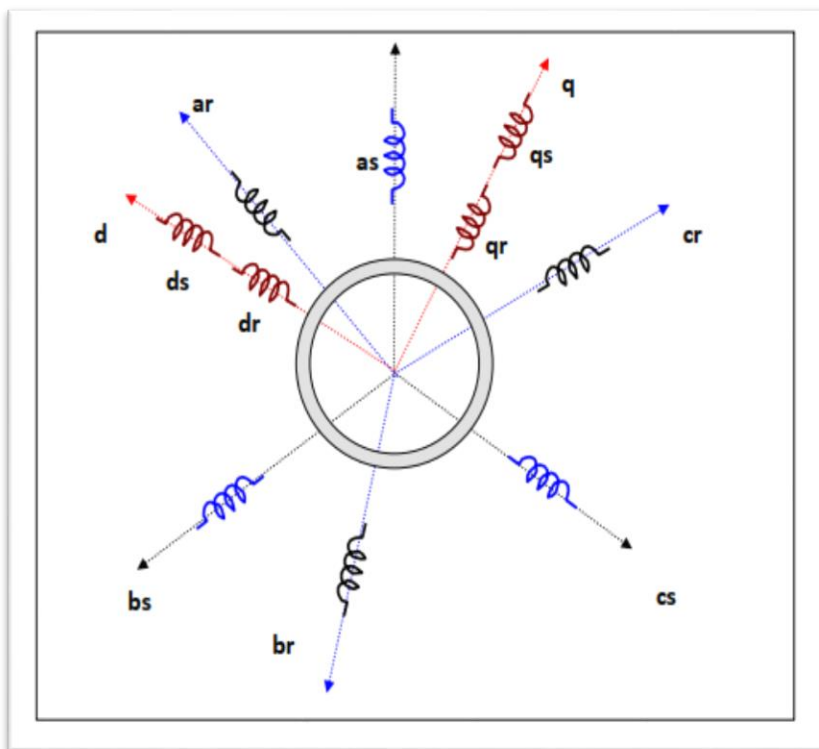


Figure 2.3 Représentation de la GADA dans le système biphasé et triphasé

### 2.2.1 Les équations électriques de la GADA

A partir de la loi de Faraday qui donne la relation entre la tension V aux bornes d’une bobine de résistance R, d’inductance L, le courant i, et les variations de flux.

$$\frac{d\phi}{dt} = V - R i \quad (2.1)$$

On applique cette relation sur l’enroulement triphasé du stator et de rotor on trouve :

➤ pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s * i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s * i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s * i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (2.2)$$

➤ pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r * i_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r * i_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r * i_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (2.4)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] \quad (2.5)$$

### 2.2.2 Les équations magnétiques de la GADA

➤ pour le stator :

$$\begin{cases} \Phi_{sa} = L_s * i_{sa} + M_{sr} * i_{ra} \\ \Phi_{sb} = L_s * i_{sb} + M_{sr} * i_{rb} \\ \Phi_{sc} = L_s * i_{sc} + M_{sr} * i_{rc} \end{cases} \quad (2.6)$$

➤ pour le rotor :

$$\begin{cases} \Phi_{ra} = L_r * i_{ra} + M_{sr} * i_{sa} \\ \Phi_{rb} = L_r * i_{rb} + M_{sr} * i_{sb} \\ \Phi_{rc} = L_r * i_{rc} + M_{sr} * i_{sc} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s][i_{sabc}] + M_{sr}[i_{rabc}] \quad (2.8)$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r][i_{rabc}] + M_{sr}[i_{sabc}] \quad (2.9)$$

Les équations des flux en fonction des courants s'obtiennent à partir de la matrice des inductances  $[L(\theta)]$ . Celle-ci comporte 36 coefficients non nuls, dont la moitié de ces coefficients dépend du temps par l'intermédiaire de l'angle électrique " $\theta$ " qui représente la position de la phase (ar) du rotor par rapport à la phase (as) du stator, figure (2.3).

L'angle électrique s'exprime par  $\theta = n_p \theta_m$  où  $p$  est le nombre de paires de pôles de la génératrice et  $\theta_m$  la position mécanique du rotor par rapport au stator [75].

$$\begin{bmatrix} \Phi \\ \Phi \\ \Phi \\ \Phi \\ \Phi \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s & M_1 & M_3 & M_2 \\ M_s & l_s & M_s & M_2 & M_1 & M_3 \\ M_s & M_s & l_s & M_3 & M_2 & M_1 \\ M_1 & M_2 & M_3 & l_r & M_r & M_r \\ M_3 & M_1 & M_2 & M_r & l_r & M_r \\ M_2 & M_3 & M_1 & M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Avec

$$\begin{cases} M_1 = M \cos \theta \\ M_2 = M \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_3 = M \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.11)$$

Où  $M$  représente la valeur maximale des inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques. La matrice  $[L(\theta)]$  fait apparaître quatre sous-matrices d'inductances [75].

$$\begin{bmatrix} \phi_{sabc} \\ \phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

La matrice des inductances statorique [Ls] :

$$[Ls] = \begin{bmatrix} Ms & ls & Ms \\ Ms & ls & Ms \\ Ms & Ms & ls \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

La matrice des inductances rotoriques [Lr] :

$$[Lr] = \begin{bmatrix} lr & Mr & Mr \\ Mr & lr & Mr \\ Mr & Mr & lr \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$[Mrs]^t = [Msr] = M * \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Cette dernière matrice est normée inductance mutuelle entre le rotor et le stator.

### 2.2.3 L'équation mécanique

L'étude des régimes transitoires fait intervenir, en plus des grandeurs électriques, les grandeurs mécaniques. Ainsi, pour compléter le modèle, nous devons ajouter l'équation mécanique déduite à partir du théorème des moments.

$$Ce - Cr - Cf = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2.16)$$

$$Cf = f . \Omega \quad (2.17)$$

Avec :

- J : Est le moment d'inertie du moteur.
- f: C'est le coefficient de frottement visqueux.
- Ce : C'est le couple électromagnétique délivré par le moteur.
- Cr : C'est le couple résistant, ou de charge.

### 2.2.4. Choix de référentiel

Pour étudier la théorie des processus transitoires des génératrices électriques, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe [77].

A partir du système d'axe (d,q) on peut avoir d'autres axes qui sont des cas particuliers. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles :

### 2.2.4.1 Référentiel lié au stator

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial \theta_r}{\partial t} = -\omega \end{cases} \quad \begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{\partial \phi_{sd}}{\partial t} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{\partial \phi_{sq}}{\partial t} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{\partial \phi_{rd}}{\partial t} + \omega \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{\partial \phi_{rq}}{\partial t} - \omega \phi_{rd} \end{cases} \quad (2.18)$$

### 2.2.4.2 Référentiel lié au rotor

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \omega_s \\ \frac{\partial \theta_r}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{\partial \phi_{sd}}{\partial t} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{\partial \phi_{sq}}{\partial t} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{\partial \phi_{rd}}{\partial t} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{\partial \phi_{rq}}{\partial t} \end{cases} \quad (2.19)$$

### 2.2.4.3 Référentiel lié au champ tournant

Il permet correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent.

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \omega_s \\ \frac{\partial \theta_r}{\partial t} = \omega_s - \omega \end{cases} \quad \begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{\partial \phi_{sd}}{\partial t} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{\partial \phi_{sq}}{\partial t} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{\partial \phi_{rd}}{\partial t} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{\partial \phi_{rq}}{\partial t} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \end{cases} \quad (2.20)$$

Le système d'axes lié au champ tournant à l'avantage qu'avec une alimentation sinusoïdale les grandeurs variables sont traitées comme des grandeurs continues [76].

Ainsi que ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplification dans la formulation des équations, il est très intéressant dans les problèmes où la fréquence d'alimentation est constante ce qui simplifie considérablement les calculs.

En plus, le choix d'un tel référentiel approprié pour la modélisation repose sur la stratégie de commande appliquée et les grandeurs à commander.

## 2.3 Transformation de PARK :

Afin de déterminer les lois de contrôle d'une génératrice à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d,q) tournant dont l'orientation est à priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la génératrice triphasée en une génératrice diphasée équivalente [78].

Cette transformation qui permet le passage du système triphasé équilibré (abc) au système biphasé (d,q), afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le module physique de la machine

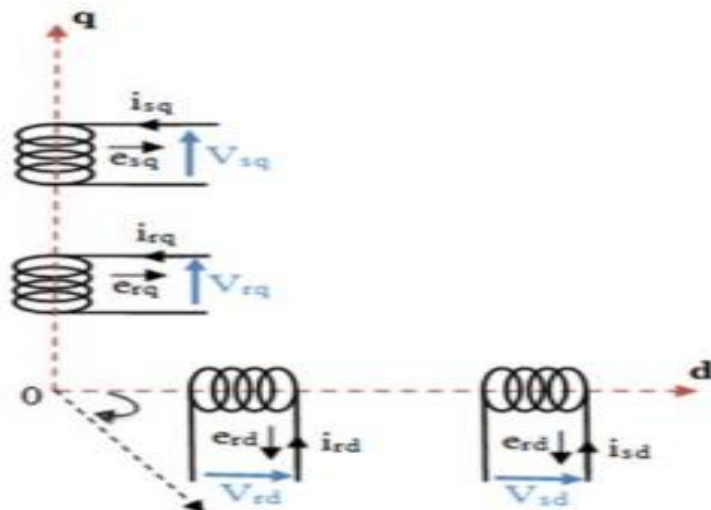


Figure 2.4 Représentation schématique de la GADA dans le repère (d,q).

Donc pour le passage du système triphasé au système biphasé en utilise la matrice de park

$$[Ap] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

L'angle  $\theta$  dans la matrice de Park  $[Ap]$  prend la valeur  $(\theta_s)$  pour les grandeurs statoriques et  $(\theta_s - \theta_r)$  pour les grandeurs rotoriques.

D'autre part :

$$[Ap]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

### 2.3.1 Application de la transformation de PARK

En appliquant la transformation de Park aux équations de la génératrice asynchrone à double alimentation dans le repère quelconque (équations (2.2), (2.3)). Alors le modèle de la génératrice est obtenu en tenant compte des composantes homopolaires sous la forme suivante :

$$[A_p]^{-1} [V_{dq}] = [R][A_p]^{-1} [i_{dq}] + \frac{d}{dt} [[A_p]^{-1} [\phi_{dq}]] \quad (2.23)$$

$$[V_{dq}] = [R][i_{dq}] + \frac{d}{dt} [\phi_{dq}] + \left[ \frac{d}{dt} [A_p]^{-1} [\phi_{dq}] \right] \quad (2.24)$$

$$[A_p] \left[ \frac{d}{dt} [A_p]^{-1} \right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \left[ \frac{d\theta}{dt} \right] \quad (2.25)$$

Tel que :

- Pour les grandeurs statoriques :  $\theta = \theta_s$
- Pour les grandeurs rotoriques :  $\theta = \theta_s - \theta_r$

En remplaçant la relation (2.9) dans (2.10) on obtient le modèle biphasé équivalent suivant :

$$\begin{cases} V_d = R \cdot i_d + \frac{d\phi_d}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \phi_q \\ V_q = R \cdot i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \phi_d \end{cases} \quad (2.26)$$

A partir de ce qui précède on tire les équations suivantes :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.27)$$

Avec :

$$\begin{cases} \theta_{coor} = \theta_s \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \theta_{coor} = \theta_s - \theta_r \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} = \omega_s - \omega_r \end{cases} \quad (2.28)$$

L'équation (2.18) représente le modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation dans le repère  $(d,q)$  lié au champ tournant.

En appliquant la transformation de Park pour établir les relations entre les flux d'axes  $(d,q)$  et ceux des axes  $(a,b,c)$  on obtient :

$$\begin{cases} [\phi_{dq}] = [A_p] [[L_r][i_r] + [M_{sr}][i_s]] \\ [\phi_{dq}] = [A_p][L_r][A_p]^{-1} [i_{dq}] + [A_p][M_{sr}][A_p]^{-1} [i_{dq}] \end{cases} \quad (2.29)$$

Après un calcul prolongé et fastidieux des équations (2.20) et (2.21) on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \emptyset ds \\ \emptyset qs \\ \emptyset dr \\ \emptyset qr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 3/2(Msr) & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 & 3/2(Msr) \\ 3/2(Msr) & 0 & l_s - M_s & 0 \\ 0 & 3/2(Msr) & 0 & l_s - M_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ids \\ iqs \\ idr \\ iqr \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Pour :

- $L_s = l_s - M_s$  : inductance cyclique statorique.
- $L_r = l_r - M_r$  : inductance cyclique rotorique.
- $L_m = 3/2.M sr$  : inductance mutuelle cyclique entre l'enroulement du stator et Celui du rotor

On obtient :

$$\begin{bmatrix} \emptyset ds \\ \emptyset qs \\ \emptyset dr \\ \emptyset qr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ids \\ iqs \\ idr \\ iqr \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

### 2.3.2 Expression du couple

On a:

$$P_s = V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} \cdot i_{qs} \quad (2.32)$$

En remplaçant les tensions par leurs valeurs, on obtient :

$$P_s = R_s \cdot i_{ds}^2 + \frac{d}{dt} \emptyset_{ds} \cdot i_{ds} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \cdot i_{ds} + R_s \cdot i_{qs}^2 + \frac{d}{dt} \emptyset_{qs} \cdot i_{qs} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \cdot i_{qs} \quad (2.33)$$

$$P_s = R_s \cdot (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \left( \frac{d}{dt} \emptyset_{ds} \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \emptyset_{qs} \cdot i_{qs} \right) + \omega_s (\phi_{ds} \cdot i_{qs} + R_s \cdot i_{qs}^2 - \phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (2.34)$$

$$P_s = P_{js} + P_e + P_{em} \quad (2.35)$$

$$\begin{cases} P_{js} = R_s \cdot (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \\ P_e = \frac{d}{dt} \emptyset_{ds} \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \emptyset_{qs} \cdot i_{qs} \\ P_{em} = \omega_s (\phi_{ds} \cdot i_{qs} + R_s \cdot i_{qs}^2 - \phi_{qs} \cdot i_{ds}) \end{cases} \quad (2.36)$$

- $P_{js}$  : Les pertes joule du stator.
- $P_e$  : L'énergie électromagnétique transitoire
- $P_{em}$  : La puissance électromagnétique. A partir de la relation qui donne l'énergie

Électromagnétique en fonction du couple :

$$P_{em} \Omega = s \cdot C_e \quad (2.37)$$

On distingue l'expression du couple :

$$C_e = K_p (\Phi_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (2.38)$$

Les puissances au stator et le rotor sont données comme suit :

$$P_s = \Re(\bar{v}_s \otimes i_s^*) \quad (2.39.)$$

$$Q_s = \Im(\bar{v}_s \otimes \bar{i}_s^*) \quad (2.40)$$

$$P_r = \Re(\bar{v}_r \otimes i_s^*) \quad (2.41)$$

$$Q_r = \Im(\bar{v}_r \otimes \bar{i}_s^*) \quad (2.42)$$

## 2.4 Fonctionnement moteur

Les équations de moteur les mêmes équations générales de la GADA.

En utilisant les équations suivantes :

$$\bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_s + j\omega_s \bar{\Phi}_s \quad (2.43)$$

$$\bar{V}_r = R_r \bar{i}_r + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_r + j(\omega_s - \omega) \bar{\Phi}_r \quad (2.44)$$

Les équations des flux restent invariantes quel que soit le référentiel.

### a) (Equation Rigides)

$$\bar{\phi}_s = L_s \bar{i}_s + M \bar{i}_r \quad (2.45)$$

$$\bar{\phi}_r = M \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r \quad (2.46)$$

### b) Equation du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé par la génératrice est donné par la formule suivante :

$$C_e = \frac{p_{em}}{\Omega} = p \frac{p_{em}}{w} = p \Im m \left( \bar{i}_s \bar{\phi}_s^* \right) \quad (2.47)$$

### c) Equation mécanique de la machine

Le mouvement de rotation de la machine, chargée par un couple résistant  $C_r$  et ayant un coefficient de frottement 'f' supposé linéaire, est régie par l'équation d'équilibre des solide en rotation qui suit :

$$C_e - C_r = J \frac{d}{dt} \Omega + f \Omega \quad (2.48)$$

On passe au domaine Laplace rien pour trouver la fonction de la génératrice  $\frac{C_e - C_r}{\Omega}$ :

$$\frac{C_e - C_r}{\Omega} = Js + f \quad (2.49)$$



## 2.5 Fonctionnement génératrice [74]

L'adoption des conventions « générateur » au stator et « récepteur » au rotor donne lieu au changement de signe sur les courants tels que :

$$\bar{i}_s \rightarrow -\bar{i}_s : \text{Générateur,}$$

$$\bar{i}_r \rightarrow \bar{i}_r : \text{Récepteur}$$

### 2.5.1. Les équations électriques du stator et le rotor dans le repère (d, q)

$$\begin{cases} \mathbf{Vsd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ \mathbf{Vs q} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\ \mathbf{Vrd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \\ \mathbf{Vrq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \end{cases} \quad (2.50)$$

### 2.5.2. Les équations magnétiques du stator et le rotor dans le repère(d, q)

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = -L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \Phi_{sq} = -L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} - M_{rs} i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} - M_{rs} i_{sq} \end{cases} \quad (2.51)$$

### 2.5.3 L'équation de tension du stator utilisée pour l'expression suivante :

$$\bar{V}_s = R_s \cdot \bar{i}_s + \frac{d\phi_s}{dt} + j \cdot \omega_s \cdot \phi_s \quad (2.52)$$

$$\bar{V}_s = R \cdot \bar{i}_s \quad (2.53)$$

On compare les deux équations :

$$R_s \cdot \bar{i}_s + \frac{d\phi_s}{dt} + j \cdot \omega_s \cdot \phi_s = R \cdot \bar{i}_s \quad (2.54)$$

On en déduit :

$$\frac{d\phi_s}{dt} = R \cdot \bar{i}_s - R_s \cdot \bar{i}_s - j \cdot \omega_s \cdot \phi_s \quad (2.55)$$

$$\frac{d\phi_s}{dt} = (R - R_s) \bar{i}_s - j \cdot \omega_s \cdot \phi_s \quad (2.56)$$

### (Equation Rigides)

$$\bar{\phi}_s = -L_s \cdot \bar{i}_s + M \cdot \bar{i}_r \quad (2.57)$$

$$\bar{\phi}_r = -M \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r \quad (2.58)$$

L'expression de la puissance active et réactive est donnée par :

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{sd} i_{sd} - V_{sq} i_{sq}) \quad (2.59)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq}) \quad (2.60)$$

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{rd} i_{rd} - V_{rq} i_{rq}) \quad (2.61)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq}) \quad (2.62)$$

L'expression du couple :

$$C_e = \frac{p_m}{L_s} (\phi_{rd} \cdot i_{sq} - (\phi_{rq} \cdot i_{sd})) \quad (2.63)$$

## Conclusion

L'étude de modélisation nous a permis d'élaborer un modèle mathématique simple et adéquat pour commander la génératrice asynchrone à double alimentation.

Le modèle de la GADA dans le référentiel lié au champ tournant nous a permis l'analyse de cette génératrice en régime temporel. Ce choix de référentiel repose sur la stratégie de commande appliquée et les grandeurs à commander.

Dans ce chapitre, nous avons vu que la génératrice asynchrone à double alimentation triphasée a été ramenée à une génératrice biphasée équivalente à l'aide d'une transformation de PARK.

Pour contrôler la GADA nous avons utilisé une loi de commande vectorielle directe par un système d'orientation de flux statorique.

Cette commande qui ramené les équations de modèle de la génératrice en deux équations permet de faciliter la commande de la génératrice à double alimentation.

Le chapitre suivant est consacré aux résultats de simulation du système aérogénérateur à la base de la génératrice à double alimentation

# Chapitre 3: Simulation en temps réel d'un générateur distribué en temps réel par Typhoon HIL :

## Chapitre 3: Simulation en temps réel d'un générateur distribué en temps réel par Typhoon HIL :

### Introduction

L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelable utilisant la force du vent pour produire de l'électricité. L'une des méthodes courantes pour utiliser l'énergie éolienne est l'utilisation d'équipements appelés éoliennes. Les éoliennes sont composées de plusieurs composants essentiels, parmi lesquels se trouve le rotor. Le rotor convertit l'énergie éolienne en énergie mécanique en tournant grâce au vent. Il est généralement composé de trois ou plusieurs pales qui sont reliées au moyeu central. Lorsque le rotor est exposé au vent, il tourne à une vitesse déterminée en fonction de la vitesse du vent. Lorsque le rotor tourne, le mouvement mécanique est transféré à la génératrice, qui le convertit en énergie électrique. Des transformateurs peuvent être utilisés pour augmenter la tension électrique produite par la génératrice afin de l'adapter au système électrique utilisé.

En général, le fonctionnement des éoliennes est contrôlé à l'aide de systèmes de contrôle automatiques qui traitent les données et détectent les conditions environnantes de l'éolienne. Des techniques de contrôle intelligentes telles que le contrôle proportionnel-intégral (PI control) sont utilisées pour ajuster le fonctionnement du rotor et obtenir une performance stable et efficace. L'utilisation d'éoliennes avec un contrôle PI est considérée comme une méthode efficace et durable pour la production d'électricité.

Après une brève explication du fonctionnement du logiciel de simulation utilisé dans le cadre de ce travail, les simulations réalisées seront détaillées et les résultats obtenus seront expliqués. L'objectif de ce chapitre est donc de présenter une simulation fonctionnelle qui pourra à l'avenir être adaptée afin de commander une simulation en temps réel. Il est important de noter que tous les paramètres des régulateurs ont été obtenus par une méthode manuelle d'essais-erreurs. Il existe d'autres méthodes plus mathématiques dont une, la méthode de régulateur pi.

### 3.1 Système temps réel :

La simulation temps réel d'un générateur distribué est un sujet important pour les professionnels de l'énergie et de la technologie. Cette technologie permet de simuler le fonctionnement d'un générateur en temps réel, ce qui peut aider à prévenir les pannes et à améliorer l'efficacité du système. Dans cette présentation, nous allons discuter des avantages et des défis de la simulation temps réel d'un générateur distribué. L'image ci-dessous représente une simulation temps réel d'un générateur distribué dans un environnement industriel. On peut voir les différentes parties du générateur et les données qui sont collectées en temps réel pour la simulation.

### 3.1.1 Générateur distribué en temps réel :

Un générateur distribué est un système qui génère de l'électricité à partir de plusieurs sources d'énergie, telles que l'énergie éolienne. Les générateurs distribués sont souvent utilisés dans les zones rurales ou isolées où il n'y a pas de réseau électrique central. Ces systèmes peuvent également être utilisés pour fournir une alimentation de secours en cas de panne de courant. L'image ci-dessous montre un exemple d'un générateur distribué qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'électricité. Vous pouvez voir des éoliennes connectées au réseau électrique.



*Figure 3.1 générateur distribué dans un environnement industriel*

#### 3.1.1.1 Simuler un générateur distribué en temps réel

La simulation en temps réel d'un générateur distribué est importante car elle prédit les pannes et augmente l'efficacité du système. Par exemple, si un générateur tombe en panne, les simulations peuvent aider à identifier rapidement le problème et à prendre des mesures pour le résoudre. De plus, les simulations peuvent aider à optimiser la production d'électricité en ajustant les paramètres du système en temps réel. L'image ci-dessous montre une simulation en temps réel d'un générateur distribué surveillé par un technicien. On peut voir les données collectées en temps réel et des graphiques qui montrent la production d'énergie du système.



*Figure 3.2 les turbines éoliennes qui sont connectées*

### 3.1.1.2 Les avantages de la simulation temps réel

La simulation temps réel présente de nombreux avantages, notamment une meilleure précision, une réduction des temps d'arrêt et une augmentation de l'efficacité. En utilisant des données en temps réel pour simuler le fonctionnement d'un générateur, il est possible de détecter rapidement les problèmes et de les résoudre avant qu'ils ne deviennent critiques. De plus, la simulation peut aider à identifier les zones où l'efficacité du système peut être améliorée. L'image ci-dessous montre une simulation temps réel d'un générateur distribué en train de produire de l'électricité. On peut voir les données collectées en temps réel et les graphiques qui montrent la production d'énergie du système.

### 3.1.1.3 Les défis de la simulation temps réel

La simulation temps réel pour un générateur distribué présente plusieurs défis. Tout d'abord, il est difficile de modéliser avec précision le comportement complexe d'un générateur distribué en temps réel. De plus, la collecte et l'analyse des données en temps réel peuvent être coûteuses et nécessiter des investissements importants dans l'infrastructure informatique. Enfin, la sécurité des données est un autre défi important. Les données collectées par les capteurs et les dispositifs de surveillance peuvent être sensibles et confidentielles, ce qui nécessite des mesures de sécurité appropriées pour protéger la vie privée et prévenir le piratage informatique.

### 3.1.1.4 L'importance de la simulation temps réel

La simulation temps réel est importante pour un générateur distribué car elle permet de modéliser le comportement du générateur dans des conditions réelles. Cela permet aux opérateurs de réseau de surveiller et de contrôler le flux d'énergie à travers le réseau en temps réel, ce qui améliore la fiabilité et la stabilité du système. De plus, la simulation temps réel peut aider à identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne deviennent critiques, ce qui permet une intervention précoce et une résolution rapide des problèmes. Enfin, la simulation temps réel peut être utilisée pour tester de nouveaux scénarios et stratégies de gestion de l'énergie, ce qui peut améliorer l'efficacité énergétique globale du réseau.

## 3.1.2. Les différents systèmes temps réels

Dans le contexte de ce travail, il a été principalement question de Typhoon HIL, mais il existe d'autres entreprises proposant des systèmes similaires pour la pratique du HIL. Ce paragraphe présente ces différents systèmes.

### 3.1.2.1 Les simulateurs temps réel

Parmi les entreprises proposant des simulateurs temps réel, les plus populaires sont OPAL-RT, RTDS Tech., Typhoon HIL, NI-PXI et dSPACE.

En général, les systèmes temps réel sont tous basés sur le même principe. Plusieurs processeurs travaillent en parallèle pour effectuer une simulation. Ils sont contrôlés par un ordinateur hôte qui prépare le modèle en mode "hors ligne". Une fois le modèle chargé et compilé, il est envoyé vers une cible. Cette cible est un simulateur composé d'entrées/sorties (I/O) qui fait fonctionner le modèle avec un "pas de temps" très court (parfois quelques nanosecondes). Grâce à ses I/O, il peut envoyer et recevoir des informations avec les composants réels, le matériel ("hardware").

Chacune de ces entreprises propose un logiciel associé à son simulateur, bien que ceux-ci soient parfois compatibles avec des logiciels plus connus. Le tableau (3) ci-dessous présente quelques caractéristiques techniques et leur compatibilité avec les systèmes informatiques et les autres logiciels.

[Figure 3.3 : Caractéristiques techniques et compatibilité des systèmes]

**Note :** La traduction du tableau et les détails spécifiques concernant les caractéristiques techniques ne sont pas fournis.

| Simulator   | Hardware Engines           | OS                | Software Compatibility    | Communication, Interfacing                             | Applications   |
|-------------|----------------------------|-------------------|---------------------------|--|--|
| Opal-RT     | Intel processors and FPGAs | Windows and Linux | MATLAB, Simulink, Labview | Gigabit Ethernet, PCIe with DSP-based A/C and D/A, CAN | Power electronics, control systems, HIL, power systems like smart grid                 |
| RTDS        | NPX processor              | Windows and Linux | MATLAB and Simulink       | Optical fiber, Gigabit Ethernet, TCP/IP                | Power electronics, control systems, HIL, power systems like smart grid                 |
| Typhoon     | Processor and FPGA         | Windows           | MATLAB                    | Ethernet RJ45, CAN                                     | Power electronics, control systems, HIL  |
| NI Hardware | Intel processors and FPGA  | Windows and Linux | Labview                   | Optical fiber, Gigabit Ethernet, PCI, CAN              | Power electronics, control systems, HIL, power systems like smart grid                 |
| dSPACE      | Intel processor and FPGA   | Windows           | MATLAB and Simulink       | Gigabit Ethernet, PCIe, CAN                            | Power electronics, real-time control, rapid prototyping, power systems like smart grid |

Figure 3.3 Caractéristiques techniques et compatibilité des systèmes

## 3.2 Présentation Software Typhoon HIL :

Le software développé par TyphoonHIL s'appelle le « Typhoon HIL control center » et il est composé de deux sous-menus principaux, Le « schematic Editor » et le « HIL SCADA ». Interface du programme figure 3

1. schematic Editor
2. HIL SCADA
3. Tayphoon test IDE

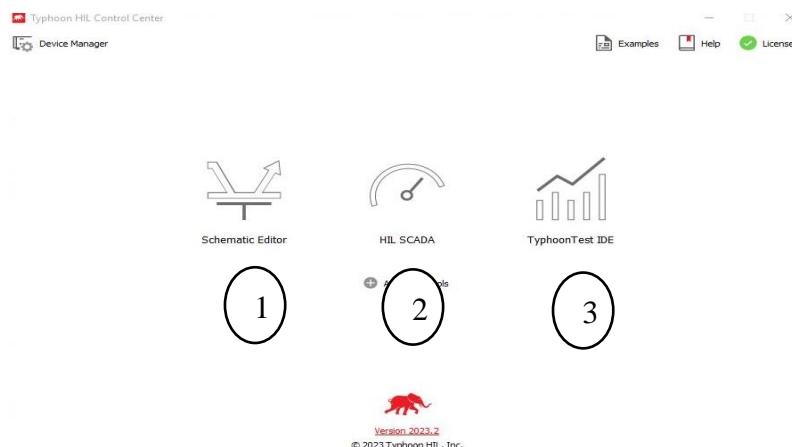


Figure 3.4 interface du programme Software Typhoon HIL

### 3.2.1 Schematic Editor :

Le « schematic editor » est la partie du logiciel permettant de modéliser le système que l'on veut étudier. Il permet de concevoir des schémas électriques et des schémas de traitement des signaux qui illustrent le processus. Afin de réaliser ces schémas, une bibliothèque met à disposition des composants électriques ou électroniques. Un exemple représenté à la [figure 4](#) montre la modélisation d'un variateur de fréquence alimentant un moteur électrique. Ce modèle est commandé par une boucle de régulation (schéma de traitement des signaux) qui détermine la consigne à appliquer au variateur en fonction d'une consigne de vitesse.

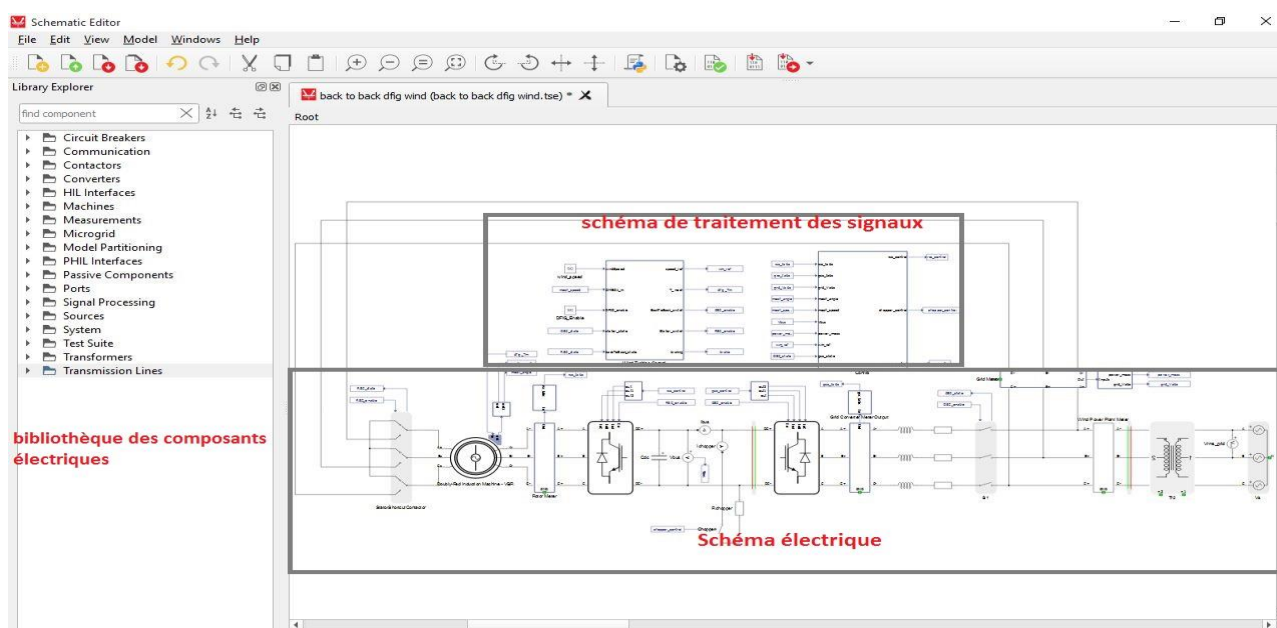


Figure 3.5 Exemple du schematic editor



### 3.2.2 HIL SCADA

La deuxième partie de ce software, le HIL SCADA permet d'interagir avec le modèle créé précédemment. Pour ce faire, il faut concevoir une interface graphique à l'aide de composants proposés par une autre bibliothèque. Cette interface peut récupérer différents types de signaux générés par le modèle et elle peut aussi en modifier les valeurs. A la figure 5, on retrouve l'interface graphique du HIL SCADA qui va commander le schéma du moteur précédent. Une partie des composants permet de commander la vitesse et la charge tandis qu'une autre partie offre la possibilité d'afficher des éléments d'observation tels que des graphiques, des jauges ou encore des écrans numériques. [5] Ces deux interfaces ont permis de créer et commander les différents scénarios définis précédemment.

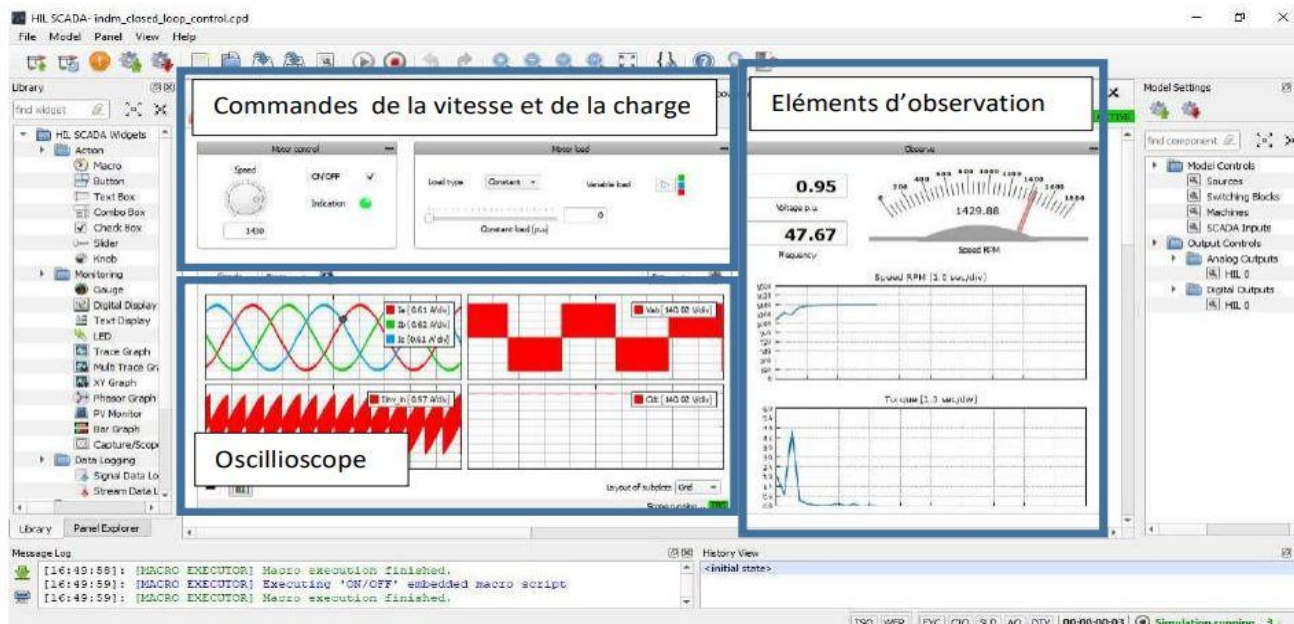


Figure 3.6 Exemple du HIL SCADA

### 3.3 Modélisation du convertisseur d'énergie éolienne basé sur DFIG

La configuration du WECS basé sur DFIG est illustrée à la figure 1. Un WT est joint au DFIG au moyen d'une boîte de vitesses. Le DFIG est une génératrice à induction, dont les enroulements du stator sont directement connectés au réseau, tandis que les enroulements du rotor sont connectés au réseau grâce à un convertisseur dos à dos.

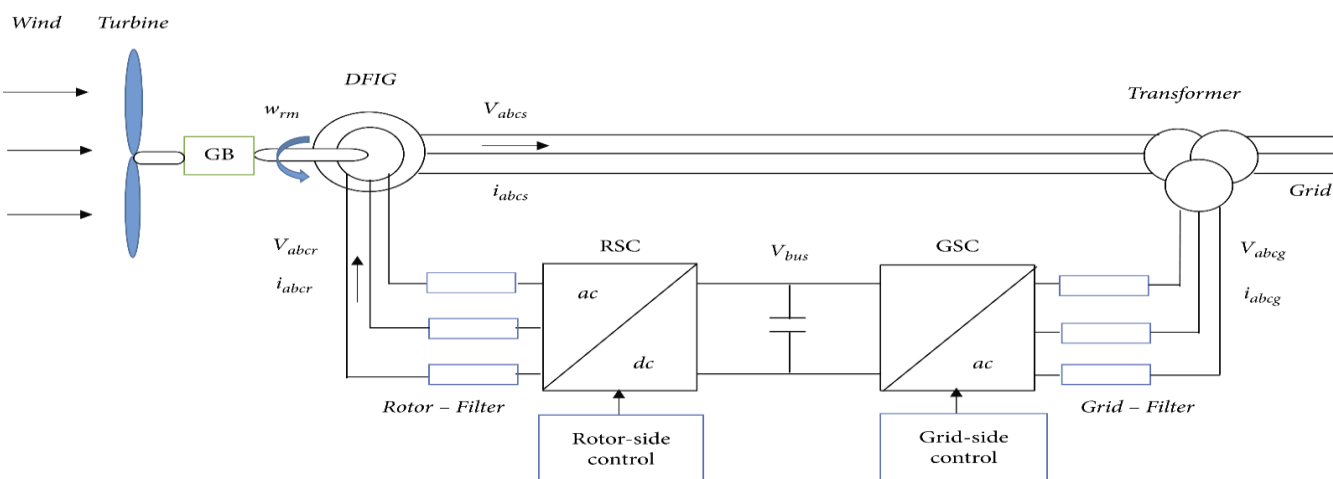


Figure 3.7 Configuration du système de conversion d'énergie éolienne (WECS) basé sur un générateur à induction à double alimentation (DFIG).

### 3.4 Contrôle vectoriel du convertisseur d'énergie éolienne basé sur DFIG

Le contrôle direct de puissance classique du système DFIG est divisé en boucles de contrôle RSC et GSC, où la structure de contrôle des composants RSC et GSC est composée de deux couches de contrôle en cascade. Les couches internes PI sont utilisées pour réguler les composantes des courants rotorique et du réseau. D'autre part, les couches externes PI dans le RSC sont mises en œuvre pour contrôler les puissances active et réactive, tandis que la boucle externe PI dans le GSC est adoptée pour maintenir la tension du lien continu à sa valeur de référence. Cependant, dans ce travail, les boucles internes PI dans les circuits RSC et GSC sont conçues sur la base d'une technique d'assignation de pôles [79,86], tandis que les boucles externes PI sont ajustées sur la base d'une approche basée sur des algorithmes métaheuristiques proposés.

#### 3.4.1. Contrôle du RSC

Le circuit RSC est responsable de réguler de manière indépendante les puissances actives et réactive afin d'extraire la puissance disponible maximale. Le contrôle vectoriel par le schéma SFO est utilisé pour la régulation de puissance du système DFIG.

En supposant que le réseau électrique est stable, le flux statorique  $\varphi_s$  est constant. De plus, pour les DFIG de puissance moyenne et élevée, la valeur de la résistance du stator est très faible et peut donc être négligée. Ainsi, sur la base de ces hypothèses, les tensions et flux statoriques dans l'équation et l'équation peuvent être réécrits respectivement comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qs} = 0 = L_r i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (3.2)$$

Les puissances active et réactive du stator et les tensions du rotor sont données respectivement par :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} V_s i_{qr} \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} i_{ds} + V_{ds} i_{qs}) = \frac{3}{2} \left( \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{L_m}{L_s} V_s i_{dr} \right) \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{di_{dr}}{dt} - \sigma \omega_r L_r i_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \sigma \omega_r L_r i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \omega_r \varphi_{ds} \end{cases} \quad (3.4)$$

Où  $\sigma = L_r - L_m^2/L_s$  est le coefficient de fuite de la génératrice et  $\omega_r = \omega_s - \omega_m$  est la fréquence angulaire de glissement.

Comme le montre l'équation (3.4), les puissances active et réactive du stator sont indépendantes l'une de l'autre. De plus, les composantes de la puissance du stator varient linéairement avec les courants directs et en quadrature du rotor. La régulation de cette puissance est donc effectuée à l'aide de contrôleurs PI pour les composants des axes d et q des courants du rotor.

Les boucles de contrôle externes pour les puissances active et réactive du stator sont réglées en fonction de la procédure métaheuristique proposée. Par conséquent, la conception des contrôleurs PI pour les boucles de courant du rotor intérieur est détaillée conformément à la figure 3.8

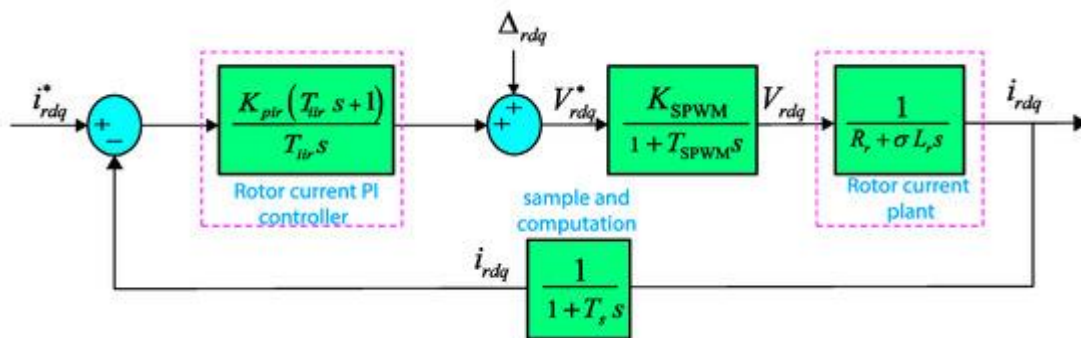


Figure 3.8 Schéma de contrôle proportionnel-intégral (PI) pour la boucle de courant interne du RSC.

Basé sur une méthode de placement de poteau comme suit :

$$R_{PI}(s) = k_{pir} \left( 1 + \frac{1}{T_{iir}s} \right) \quad (3.5)$$

Où  $K_{pir}$  et  $T_i$ . Sont respectivement le gain proportionnel et la constante de temps des contrôleurs PI du rotor. La fonction de transfert qui décrit la relation entre la dynamique des tensions et des courants est donnée comme suit [79,86] :

$$R_{plant}(s) = \frac{i_{rdq}}{V_{rdq}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r s} \quad (3.6)$$

Étant donné que les mêmes fonctions de transfert pour les courants de rotor continu et en quadrature sont considérées, la fonction de transfert en boucle fermée  $R_{cli}(s)$  entre le courant du rotor de référence  $J_{e_{rdq}}$  et le vrai  $J_{e_{rdq}}$  s'écrit comme suit :

$$R_{cli}(s) = \frac{i_{rdq}}{V_{rdq}} = \frac{k_{pir}(T_{iir}s+1)}{T_{iir}\sigma L_r s^2 + T_{iir}(R_r + k_{pir})s + k_{pir}} \quad (3.7)$$

En assimilant le dénominateur de la fonction de transfert en boucle fermée de l'équation (87) sous la forme générale d'un système du second ordre, les paramètres des régulateurs de courant du rotor PI peuvent être trouvés comme suit [79,86]:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{pir} = 2\varepsilon\omega_n\sigma L_r - R_r \\ T_{iir} = \frac{2\varepsilon}{\omega_n} - \frac{R_r}{\sigma\omega_n^2 L_r} \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Où  $\xi$  et  $\omega_n$  sont respectivement le coefficient d'amortissement et la fréquence naturelle du modèle de référence en boucle fermée souhaité.

Aux fins de la conception, la discussion porte sur le choix du coefficient d'amortissement  $\xi$  et fréquence naturelle  $\omega_n$ . Étant donné que la boucle de courant interne dans le schéma de contrôle en cascade aura une largeur de bande beaucoup plus grande que celle utilisée dans la boucle extérieure, une régulation à 1/20, de la fréquence de commutation  $f_s$ ,  $\omega_s$ ,  $R_{SC}$  est conservée. Pour la boucle externe, une régulation entre 1/20 Et 1/10 de la bande passante de la boucle interne est faite. Ensuite, les compensations de report  $\Delta_{Dr}$  et  $\Delta_{qr}$  doit être rajouté pour générer les tensions de rotor souhaitées  $V_{Dr}^*$  net  $V_{qr}^*$ .

### 3.4.2 Contrôle du SGC

La stratégie COV est appliquée pour contrôler le GSC, qui contient généralement une boucle de contrôle PI externe qui régule la tension de liaison CC, quelle que soit l'ampleur et la direction de la puissance du rotor. Deux boucles de courant PI internes qui régulent les courants de ceinture directs et en quadrature sont également incluses [87,88]. De plus, la stratégie d'amortissement passif est utilisée pour atténuer le problème de résonance. La représentation mathématique de GSC est construite sur le modèle approximatif du filtre LCL, qui est utilisé pour régler les contrôleurs de courant de la grille PI. Considérant que toute la fonction de transfert du filtre LCL avec amortissement passif est prise en compte pour l'analyse et l'investigation de la stabilité. Le schéma fonctionnel des boucles de courant de la grille est illustré à la figure 3.9.

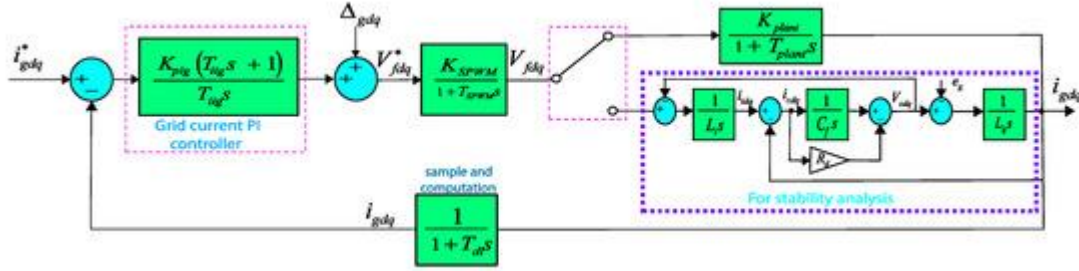


Figure 3.9 Conception de la boucle de courant du contrôleur PI du convertisseur côté grille.

Pour implémenter le schéma COV, l'axe d est aligné avec la tension vectorielle de la grille. Par conséquent, cela conduit à une tension de grille sur l'axe d égale à sa magnitude et à une tension de l'axe des q qui est alors égale à zéro. Par conséquent, les expressions de puissance du réseau peuvent être exprimées comme [87,88]:

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} e_{dg} i_{dg} \\ Q_g = -\frac{3}{2} e_{dg} i_{qg} \end{cases} \quad (3.9)$$

L'équation (3.9) décide de la puissance active et, par conséquent, la tension de liaison CC est contrôlée via le courant continu tandis que le courant de quadrature est utilisé pour réguler la puissance réactive qui échange avec le réseau [88]. Avec l'approche COV, les équations dynamiques des courants de grille sont réécrites comme suit :

$$e_{dg} = R_T i_{dg} - \omega_g L_T i_{qg} + L_T \frac{di_{dg}}{dt} + V_{df} \quad (3.10)$$

$$0 = R_T i_{qg} - \omega_g L_T i_{dg} + L_T \frac{di_{qg}}{dt} + V_{qf} \quad (3.11)$$

En appliquant la même méthodologie de conception des contrôleurs de courant de rotor PI dans le RSC, les gains des contrôleurs PI pour la dynamique des courants de grille sont trouvés comme [86,89]:

$$\begin{cases} k_{pig} = 2\varepsilon\omega_n L_T - R_T \\ k_{iiq} = \omega_n^2 L_T \end{cases} \quad (3.12)$$

Où  $\omega_n=847.80$  rad/sec et  $\xi=0.707$

### 3.5 Les concepts généraux de la régulation

Une boucle de régulation se présente toujours sous la forme suivante :

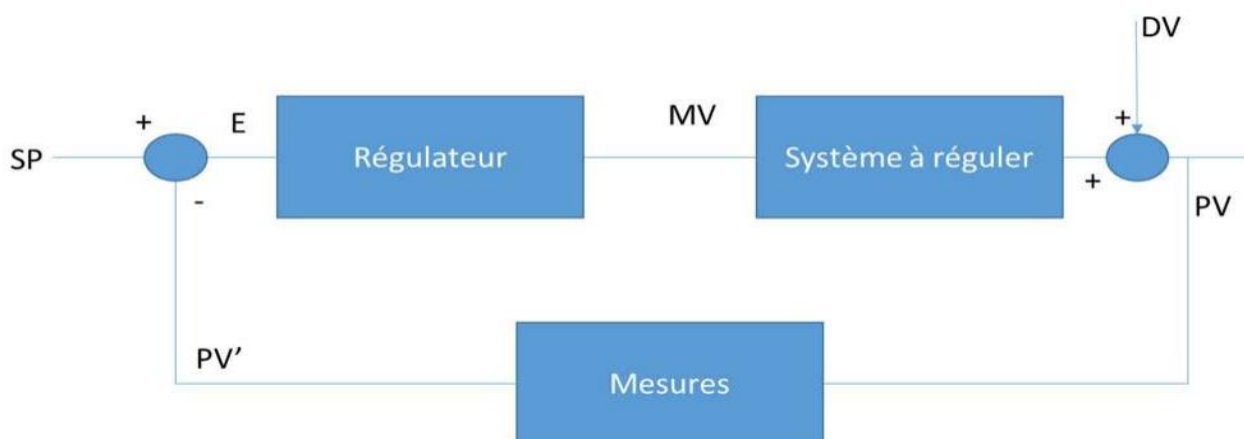


Figure 3.10 Schéma de principe de la régulation

SP : Consigne

E : erreur

MV : grandeur manipulée

DV : Perturbation

PV : valeur de sortie

PV' : valeur mesurée

Une consigne SP va être comparée à une valeur mesurée PV' afin d'obtenir une erreur E. L'erreur va permettre au régulateur, grâce à un algorithme, de fournir une grandeur manipulée MV. Cette grandeur manipulée va agir sur un processus qui, à son tour, va émettre une valeur de sortie PV pouvant être influencée par un élément perturbateur DV. Cette valeur de sortie est mesurée et à nouveau comparée à la consigne SP. Ainsi la boucle se referme et la valeur mesurée PV' tend vers la consigne SP alors que l'erreur E tend vers 0. En sortie du régulateur, il est important de placer des limites et des systèmes « anti wind-up » qui évitent l'emballement. Sans ces sécurités, il est fréquent que les régulateurs s'emballent et que le système devienne incontrôlable. Chacune des boucles présentées dans les paragraphes suivants va suivre ce schéma de principe pour ensuite être complexifiée en fonction du modèle.

#### 3.5.1 Synthèse du régulateur Proportionnel – intégral (pi)

Le régulateur proportionnel-intégral (PI) est un type de régulateur utilisé dans les systèmes de contrôle. Il combine une action proportionnelle et une action intégrale pour ajuster la sortie du système en fonction de l'erreur entre la consigne et la valeur mesurée. L'action proportionnelle corrige l'erreur actuelle, tandis que l'action intégrale corrige les erreurs passées en intégrant l'erreur au fil du temps. Le régulateur PI permet d'obtenir une réponse précise et stable aux variations de la consigne et des perturbations. Le réglage des coefficients proportionnel et intégral est crucial pour optimiser la performance du régulateur PI. En résumé, le régulateur PI est utilisé pour assurer une régulation précise et stable dans divers systèmes de contrôle.

### 3.5.2 Formulation du problème de réglage des contrôleurs PI en DFIG

Dans le cadre de contrôle de l'IP, les valeurs appropriées de  $K_p$  et  $K_{Je}$  Les gains sont généralement obtenus par des méthodes empiriques et des procédures fondées sur des essais et des erreurs [90]. Ces tâches non systématiques et stimulantes deviennent plus difficiles et prennent plus de temps, en particulier pour les systèmes complexes et à grande échelle comme le WECS étudié basé sur DFIG. Ainsi, l'idée de formuler le  $K_p$  et  $K_{Je}$  La sélection de GANTS comme problème d'optimisation est une solution prometteuse. Un tel problème de contrôle peut être non linéaire, non lisse ou même non convexe et peut être résolu efficacement grâce à des métaheuristiques avancées [81,81]. Dans ce travail, trois contrôleurs PI pour les boucles externes des composants RSC et GSC sont envisagés pour le processus d'optimisation. Ces contrôleurs PI pour la tension de liaison CC, la dynamique des puissances actives et réactives sont systématiquement réglés grâce à la métaheuristique TEO proposée qui est décrite ci-dessous. La figure 3.11 présente le schéma de réglage basé sur l'optimisation proposé des contrôleurs PI pour le WECS basé sur DFIG.

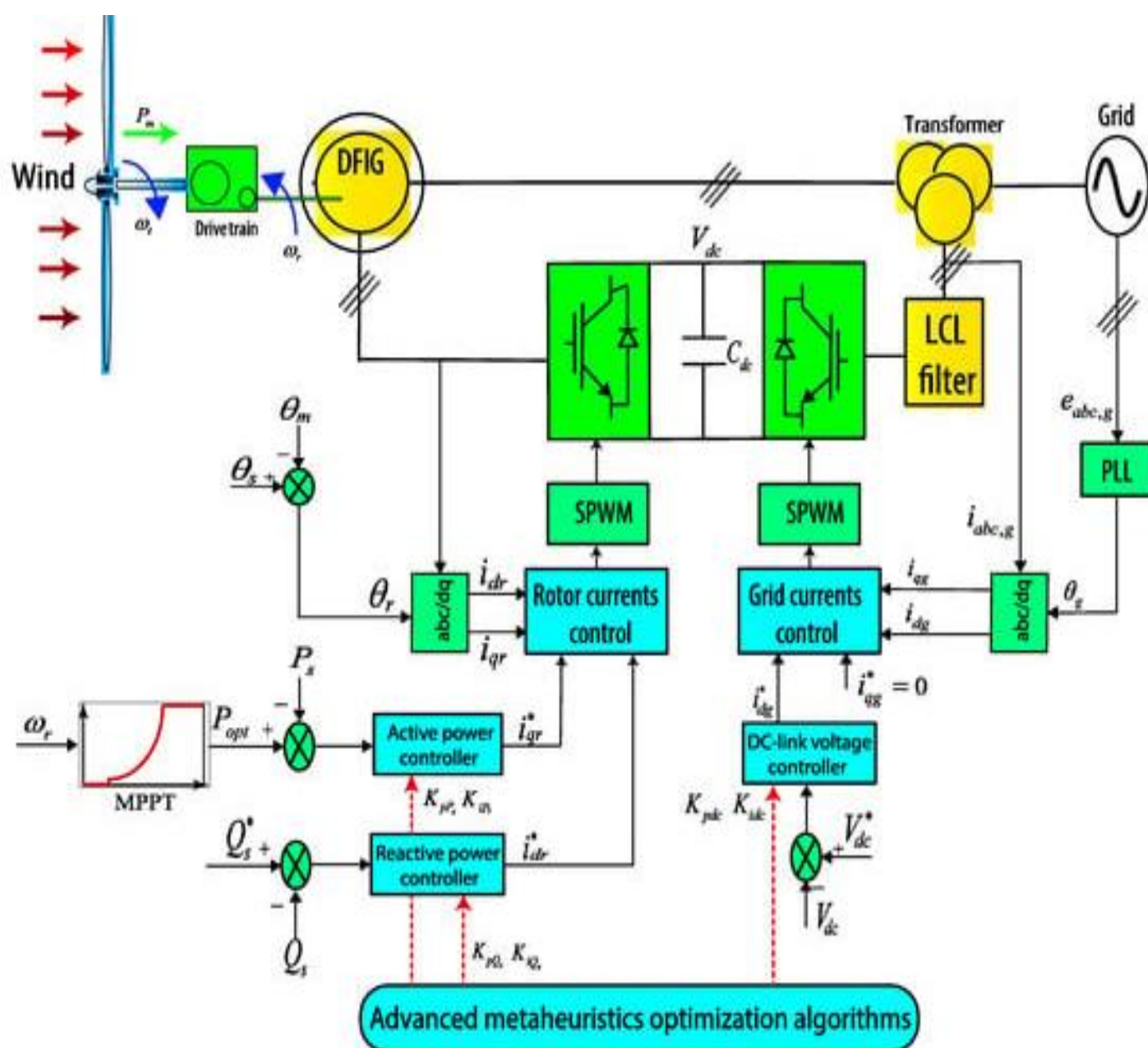


Figure 3.11 L'algorithme de contrôle proposé s'applique au système DFIG.

Les variables de décision du problème d'optimisation formulé sont évidemment les gains proportionnels et intégraux des contrôleurs PI pour les puissances actives/réactives et les boucles de liaison CC. Ils sont spécifiés pour le processus d'optimisation comme suit :

$$x = [k_{pPs}, k_{iPs}, k_{pQs}, k_{iQs}, k_{pdc}, k_{idc}]^T \in S \subseteq R_+^6 \quad (3.13)$$

Où  $S = \{x \in \mathbb{R}^6_+, x_{low} \leq x \leq x_{up}\}$  indique l'espace de recherche délimité pour tous les paramètres PI.

Cependant, les fonctions objectives définies sont minimisées en tenant compte d'une portée de restrictions de domaine temporel. Ceux-ci sont préoccupants jusqu'au dépassement maximal  $\delta^{max}$ , erreur en régime permanent  $E_s$ ,  $S^{temps}$  de montée  $t_r$  et/ou le temps de règlement  $t_s$  de la réponse par étapes du système en boucle fermée [91]. Ainsi, le problème de réglage associant les contrôleurs PI du WECS basé sur DFIGI peut être exprimé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimize } f_m(x), m \in \{IAE, ISE, ITSE, ITAE\} \\ x = [k_{pPs}, k_{iPs}, k_{pQs}, k_{iQs}, k_{pdc}, k_{idc}]^T \in S \subseteq R_+^6 \\ \text{subject to:} \\ g_1(x) = \delta_{p_s} - \delta_{p_s}^{max} \leq 0 \\ g_2(x) = \delta_{Q_s} - \delta_{Q_s}^{max} \leq 0 \\ g_3(x) = \delta_{dc} - \delta_{dc}^{max} \leq 0 \\ k_{pj,min} \leq k_p \leq k_{pj,max} \\ k_{pj,min} \leq k_p \leq k_{pj,max}, j \in \{P_s, Q_s, dc\} \end{array} \right. \quad (3.14)$$

où  $f_m : \mathbb{R}^6_+ \rightarrow \mathbb{R}$  sont les fonctions de coût,  $g_q : \mathbb{R}^6_+ \rightarrow \mathbb{R}$  sont les contraintes d'inégalité du problème,  $\delta_{dc}$ ,  $\delta_{Ps}$  et  $\delta_{Qs}$  sont les dépassements de la dynamique de tension continue contrôlée, active et réactive, respectivement,  $\delta_{dc}^{max}$ ,  $\delta_{Ps}^{max}$  et  $\delta_{Qs}^{max}$  indiquent leur valeur maximale donnée.

Étant donné que le problème d'optimisation (90) est de type multi-objectifs, les fonctions d'agrégation basées sur la somme pondérée sont utilisées comme suit pour gérer les coûts multiples [92]

$$f_{IAE}(x) = w_{ps} \int_0^T |e_{ps}(x, t)| dt + w_{Qs} \int_0^T |e_{Qs}(x, t)| dt + w_{dc} \int_0^T |e_{dc}(x, t)| dt \quad (3.14)$$

$$f_{ISE}(x) = w_{ps} \int_0^T |e_{ps}^2(x, t)| dt + w_{Qs} \int_0^T |e_{Qs}^2(x, t)| dt + w_{dc} \int_0^T |e_{dc}^2(x, t)| dt \quad (3.15)$$

$$f_{ITSE}(x) = w_{ps} \int_0^T |te_{ps}^2(x, t)| dt + w_{Qs} \int_0^T |te_{Qs}^2(x, t)| dt + w_{dc} \int_0^T |te_{dc}^2(x, t)| dt \quad (3.16)$$

$$f_{ITAE}(x) = w_{ps} \int_0^T t |e_{ps}^2(x, t)| dt + w_{Qs} \int_0^T t |e_{Qs}^2(x, t)| dt + w_{dc} \int_0^T t |e_{dc}^2(x, t)| dt \quad (3.17)$$

Où  $T$  indique le temps total de simulation,  $w_{Ps} > 0$ ,  $w_{Qs} > 0$  et  $w_{dc} > 0$ . Les coefficients de pondération des fonctions d'agrégation sont-ils satisfaisants ? ,  $w_{Ps} + w_{Qs} + w_{dc} = 1$  et  $e_j(\cdot)$ ,  $j \in \{Ps, Qs, dc\}$  désignent les erreurs de suivi entre la production de l'usine et les valeurs de consigne relatives, c.-à-d.  $e_{Ps}(x,t) = P_s^* - P_s(x,t)$ ,  $e_{Qs}(x,t) = Q_s^* - Q_s(x,t)$  et  $e_{dc}(x,t) = V_{dc}^* - V_{dc}(x,t)$ .

La méthode de la matrice de jugement est utilisée pour déterminer les coefficients de pondération des fonctions objectives [92,93]. Une telle méthode classe toutes les fonctions objectives en fonction de l'importance de chacune. Après avoir calculé les valeurs propres d'une telle matrice, les coefficients de pondération des fonctions (3.14) et (3.17) peuvent être choisis comme suit :  $w_{Ps} = 0.6370$ ,  $w_{Qs} = 0.2583$  et  $w_{dc} = 0.1047$ .

### 3.6 Fonctionnement normal du générateur à induction à double alimentation (DFIG)

Le générateur asynchrone à double alimentation (DFIG) avec convertisseur dos à dos est un système fréquemment utilisé dans les éoliennes. Les éoliennes traditionnelles ont des vitesses de rotation fixes, tandis que le DFIG permet aux éoliennes de fonctionner à différentes vitesses. Le convertisseur dos à dos est connecté au rotor du DFIG et a pour but d'alimenter le rotor avec des courants de fréquence variable, afin d'atteindre les vitesses de rotor souhaitées. Cette note d'application présente la mise en œuvre d'une éolienne DFIG avec un contrôleur de convertisseur dos à dos. Les cas de simulation présentés dans ce document couvrent la réponse dynamique du DFIG aux changements de vitesse du vent et pendant le processus de freinage de l'éolienne.

La puissance contenue sous forme d'énergie cinétique dans le vent  $P_v$  est exprimée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 V_v^3 \quad (3.18)$$

Où  $V_v$  est la vitesse moyenne du vent dans la zone balayée par l'éolienne  $A = \pi R^2$  où  $R$  est le diamètre de la pale du rotor et  $\rho$  est la densité de l'air. L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de cette puissance ( $P_t$ ) :

$$P_t = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 V_v^3 C_p \quad (3.19)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  est un paramètre sans dimension qui exprime l'efficacité de l'éolienne dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ce coefficient est fonction de la vitesse du vent, de la vitesse des pales du rotor et de l'angle de pas. Pour notre modèle d'éolienne avec DFIG, la longueur des pales du rotor est fixée à  $R = 50\text{m}$ , tandis que la densité de l'air est fixée à  $\rho = 1.225 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ . L'angle de pas est automatiquement régulé de manière à ce que la variation de  $C_p$  soit telle qu'illustrée dans Figure 3.12



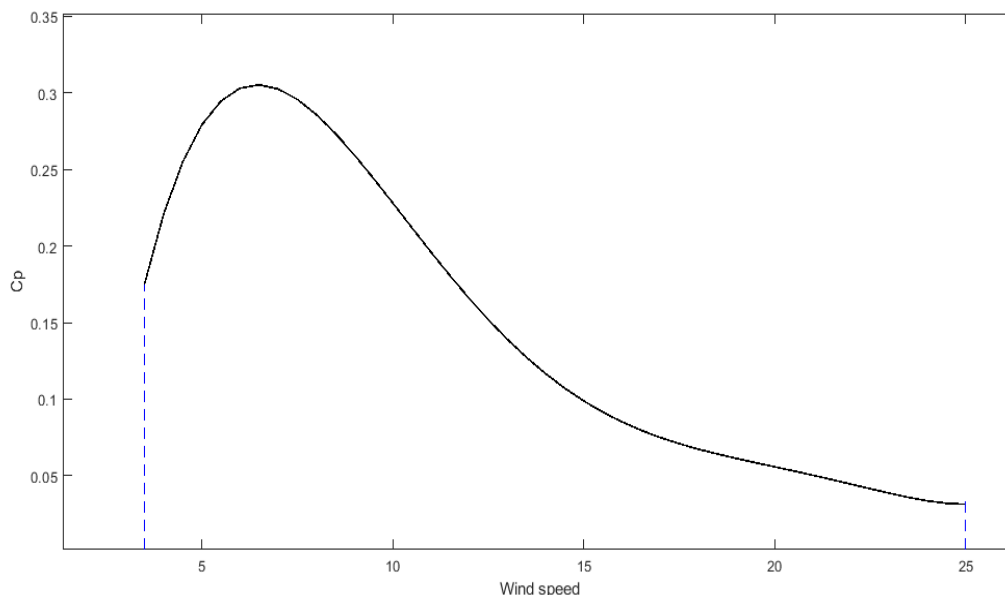


Figure 3.12 Coefficient de puissance ( $C_p$ ) en fonction de la vitesse du vent

Comme mentionné précédemment, les pales du rotor peuvent tourner à différentes vitesses. La courbe de la vitesse angulaire de l'arbre à grande vitesse en fonction de la vitesse du vent peut être observée dans la Figure 3.13. Ce graphique peut être divisé en zones, où dans chaque zone, le changement de vitesse angulaire est différent. Un contrôle différent du DFIG est mis en œuvre en fonction de la zone dans laquelle la génératrice fonctionne actuellement.

- **Remarque**

**L'éolienne contient un arbre à grande vitesse et un arbre à basse vitesse, reliés par une boîte de vitesses (où l'arbre à basse vitesse est fixé au moyeu du rotor et l'arbre à grande vitesse est fixé au générateur). Comme la partie mécanique n'a pas d'importance pour notre modèle (et donc la vitesse angulaire de l'arbre rapide et le rapport de la boîte de vitesses sont également sans importance), nous observerons uniquement l'arbre rapide et le couple qui lui est appliqué.**

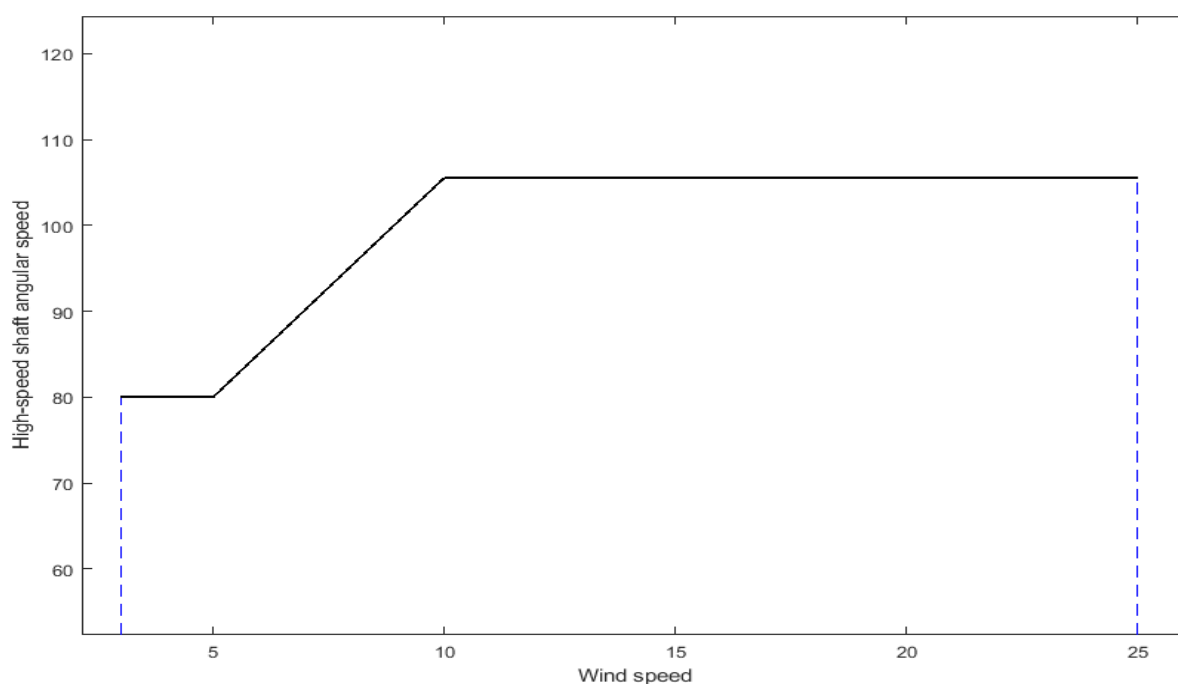


Figure 3.13 Vitesse angulaire de l'arbre à grande vitesse en fonction de la vitesse du vent.

A partir de la vitesse du vent et du coefficient de puissance, on peut calculer le couple mécanique sur l'arbre rapide. La commande du convertisseur côté rotor est configurée de manière à ajuster la vitesse du rotor en fonction du couple mécanique actuel. Cette dépendance peut être observée dans la figure 3.14.

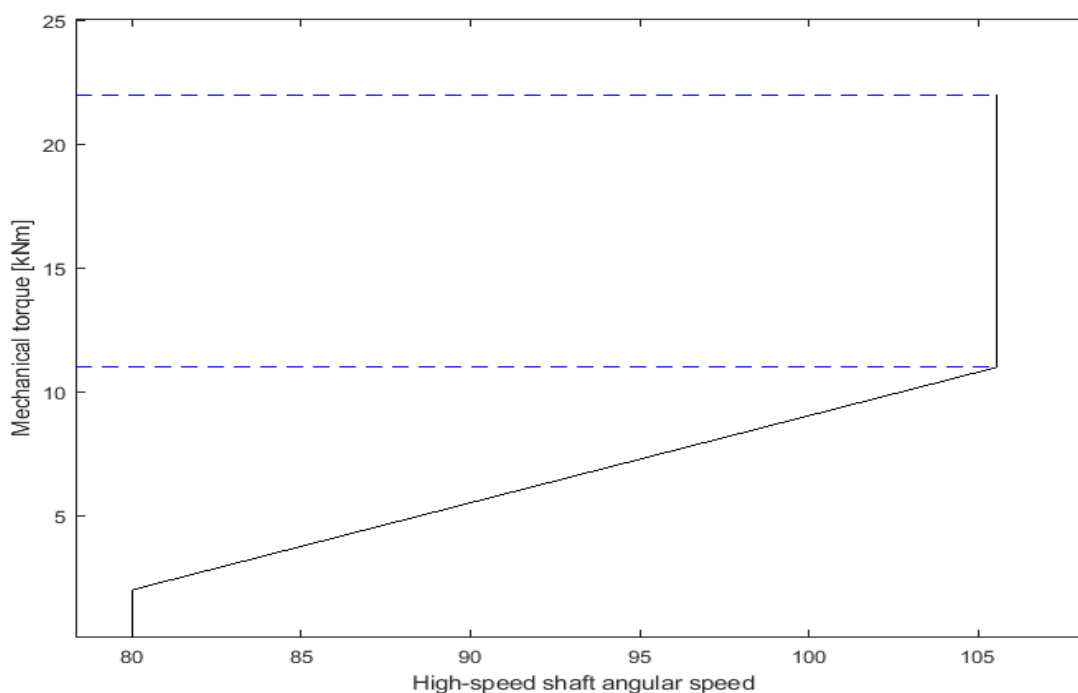


Figure 3.14 Couple mécanique en fonction de la vitesse angulaire de l'arbre rapide

Les valeurs nominales (couple mécanique de la génératrice et vitesse angulaire) sont indiquées dans la Figure 3.14 en tant que point maximum des deux valeurs, qui se produit lorsque le couple mécanique nominal est de 20006 Nm, tandis que la vitesse angulaire nominale du générateur est 105.56 rad/s. Ces valeurs nominales sont atteintes lorsque la vitesse du vent est 22 m/s, et sont maintenues jusqu'à ce que la vitesse du vent soit considérée comme trop forte pour la génératrice (dans ce cas, 25 m/s).

### 3.7 Description du modèle :

Le DFIG avec le modèle de convertisseur dos à dos est présenté à la figure 3.15. Le contacteur de stator peut être vu du côté du stator (en bas à gauche) tandis que le contacteur du convertisseur est visible du côté du convertisseur dos à dos (en bas à droite). Leur but est de déconnecter le DFIG et le convertisseur adossé du réseau et de ramener la vitesse du rotor à zéro lorsque la vitesse du vent est hors plage de fonctionnement ou lorsque le freinage est activé. Les contacteurs sont contrôlés dans le sous-système de contrôle des contacteurs.

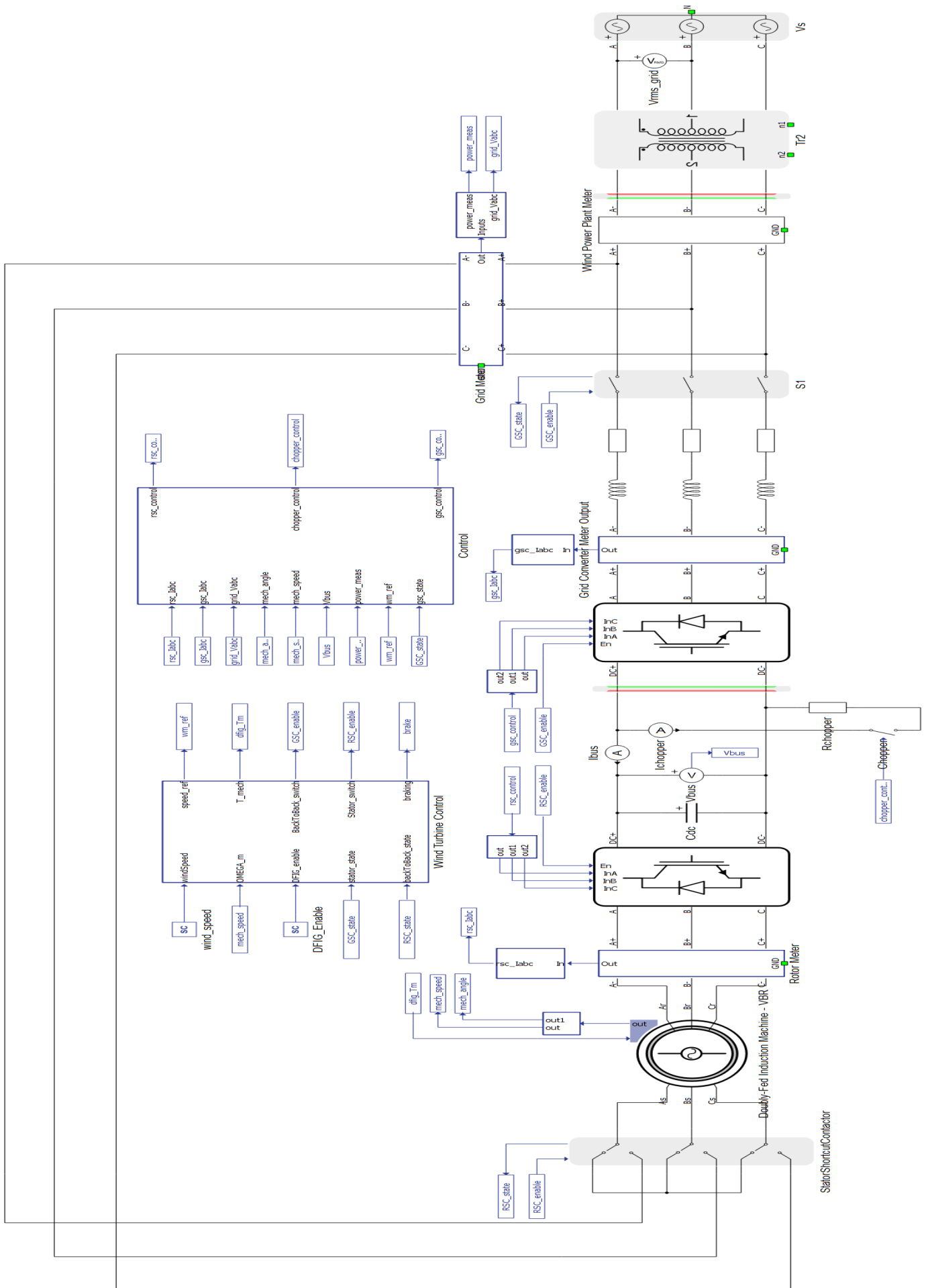


Figure 3.15 DFIG génératrice with back-to-back converter

### 3.7.1 Le sous-système de contrôle des éoliennes

#### 3.7.1.1 Commande du convertisseur côté rotor (RSC)

Contient une fonction C qui calcule le couple mécanique et la référence de vitesse, en fonction de la vitesse du vent. Il détermine également le mode de fonctionnement du DFIG.

Dans la figure 3.16 nous voyons le sous-système de contrôle du convertisseur côté rotor où le contrôle vectoriel est implémenté. Cette commande est chargée d'alimenter le rotor avec des tensions qui prennent une amplitude et une fréquence différentes en régime établi afin d'atteindre la vitesse requise du rotor. L'entrée 'omega\_r' alimente cette commande en tant que sortie d'une fonction C basée sur l'entrée de vitesse du vent.

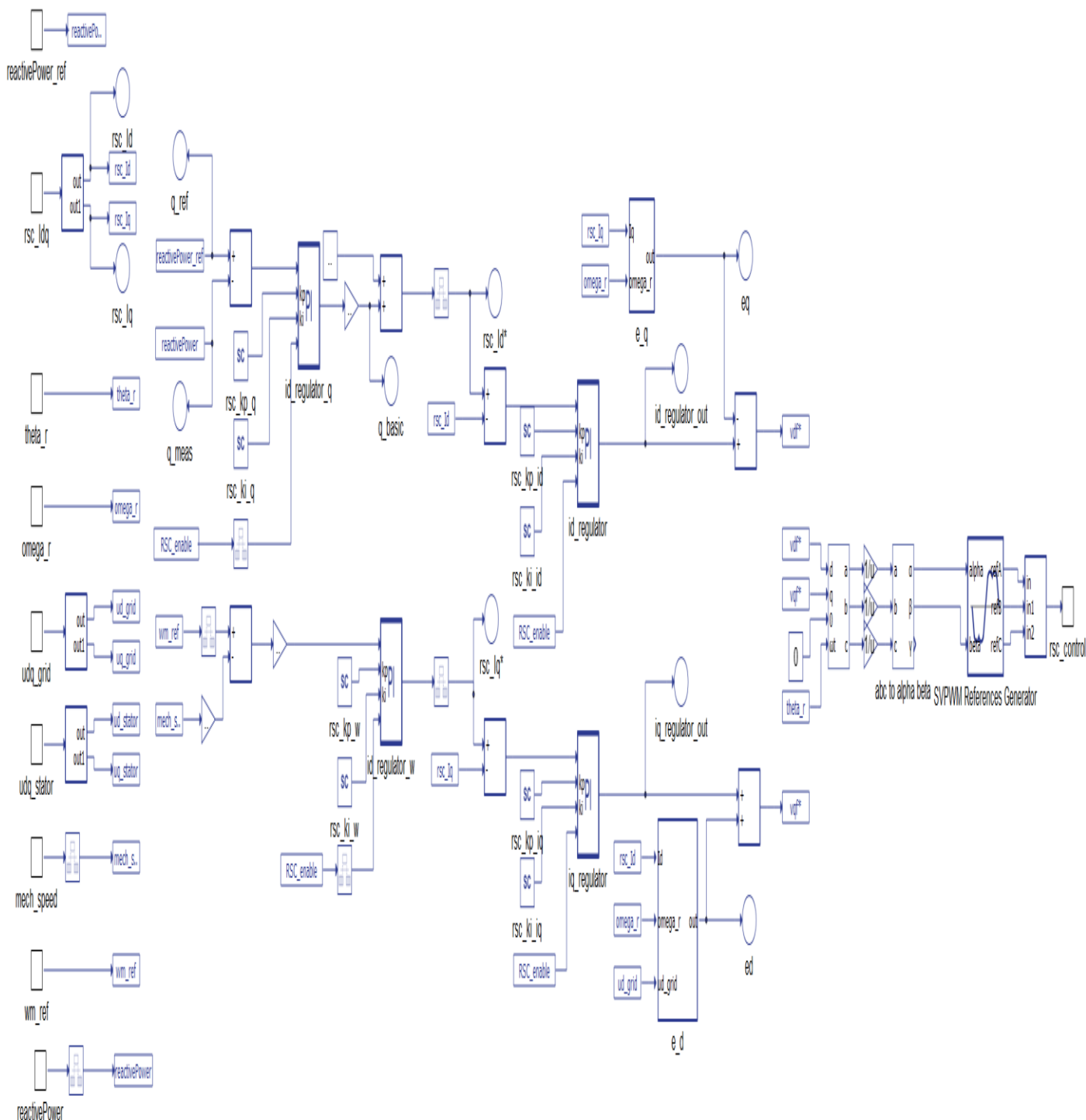


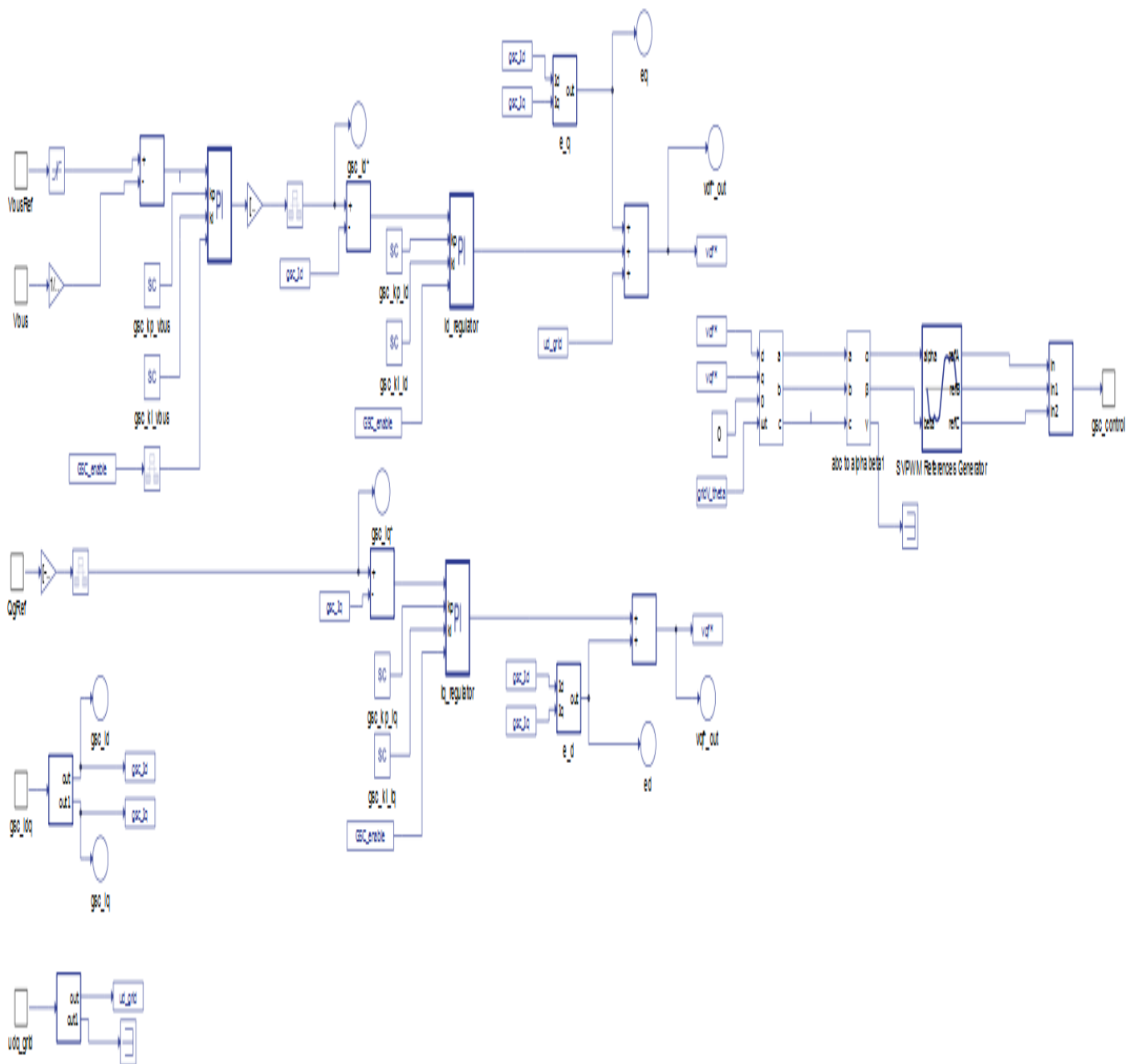
Figure 3.16 Sous-système de commande du convertisseur côté rotor

### 3.7.1.2 Contrôle du convertisseur côté réseau (SGC)

Il contient une fonction C qui calcule la puissance effective et la tension de référence, à partir d'une valeur obtenue à partir d'une pièce de commande du rotor. Il spécifie également les valeurs réelles pour le.

Sur la Fig. 3.17, nous voyons le sous-système de contrôle du transformateur côté réseau où le contrôle vectoriel est implémenté. Cette commande est chargée de fournir au rotor une tension électrique d'amplitude et de fréquence différentes en régime permanent afin d'obtenir la compatibilité requise avec un sous-réseau. L'entrée 'omega\_r' l'alimente en sortie de la fonction C en fonction de l'entrée de vitesse du vent.

Où le contrôleur est défini par contrôler pi. Comme montré figure 3.17



Activar Windows

Figure 3.17 Contrôle du convertisseur côté réseau par pi

### 3.7.2 Les valeurs nominales les plus importantes sont fournies

Tableau 1. Valeurs nominales des variables dans le modèle

|  |              |
|--|--------------|
| Tension de la ligne de réseau              | 690 V        |
| Puissance nominale DFIG                    | 2250 kW      |
| Vitesse du vent adéquate                   | 3 - 25 m/s   |
| Vitesse nominale du rotor                  | 105,56 rad/s |
| Courant nominal du stator                  | 2241 A       |
| Plage de liaisons CC dos à dos             | 950 - 2000 V |
| Fréquence porteuse de l'onduleur dos à dos | 4000 Hz      |

### 3.8 Simulation et résultats :

Dans le premier exemple de simulation, on observe l'impact d'un changement de vitesse du vent de 6 m/s à 12 m/s sur l'état du modèle. Vous pouvez modifier la vitesse du vent dans le panneau SCADA et le changement de vitesse de l'arbre du rotor, de puissance de sortie et de perturbation dans  $V_{bus}$  peuvent être vus dans les graphiques de traces dans HIL SCADA (Figure 3.18). Il est également possible d'activer et de désactiver l'éolienne à tout moment en décochant la case **Activer la machine**. L'état de l'éolienne (Les contacteurs (stator

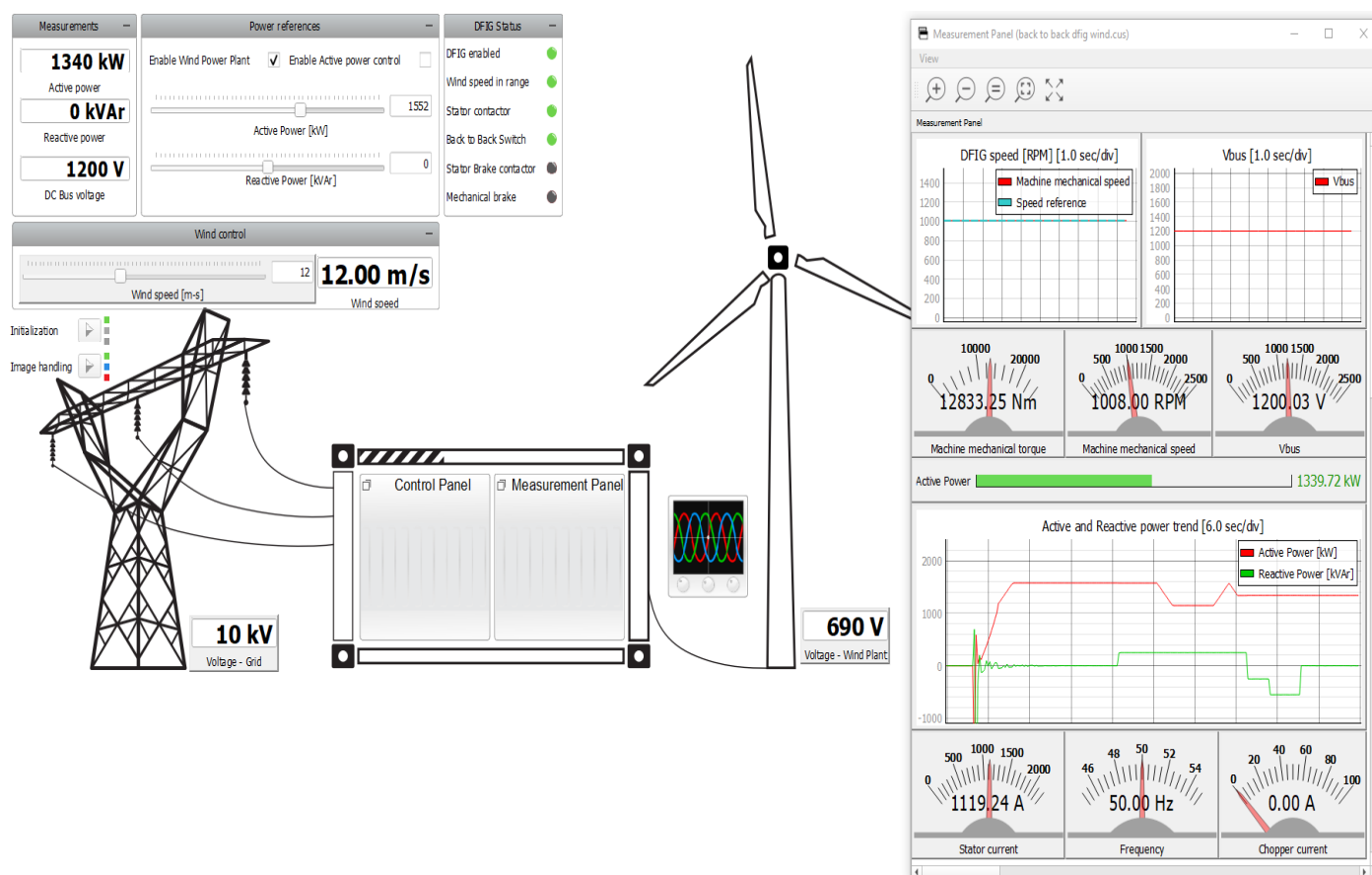


Figure 3.18 Panneau SCADA lors de la transition d'une vitesse de vent à une autre

et contacteur dos à dos) peuvent également être observés dans le panneau SCADA. PI Les paramètres des régulateurs peuvent être modifiés via SCADA, en modifiant la valeur dans les widgets de **la zone de texte**.

Dans la figure 3.18 nous pouvons observer des changements dans puissance de sortie, courants de rotor et de stator et tension de ligne invariable, mesurée par le Composant de compteur triphasé.

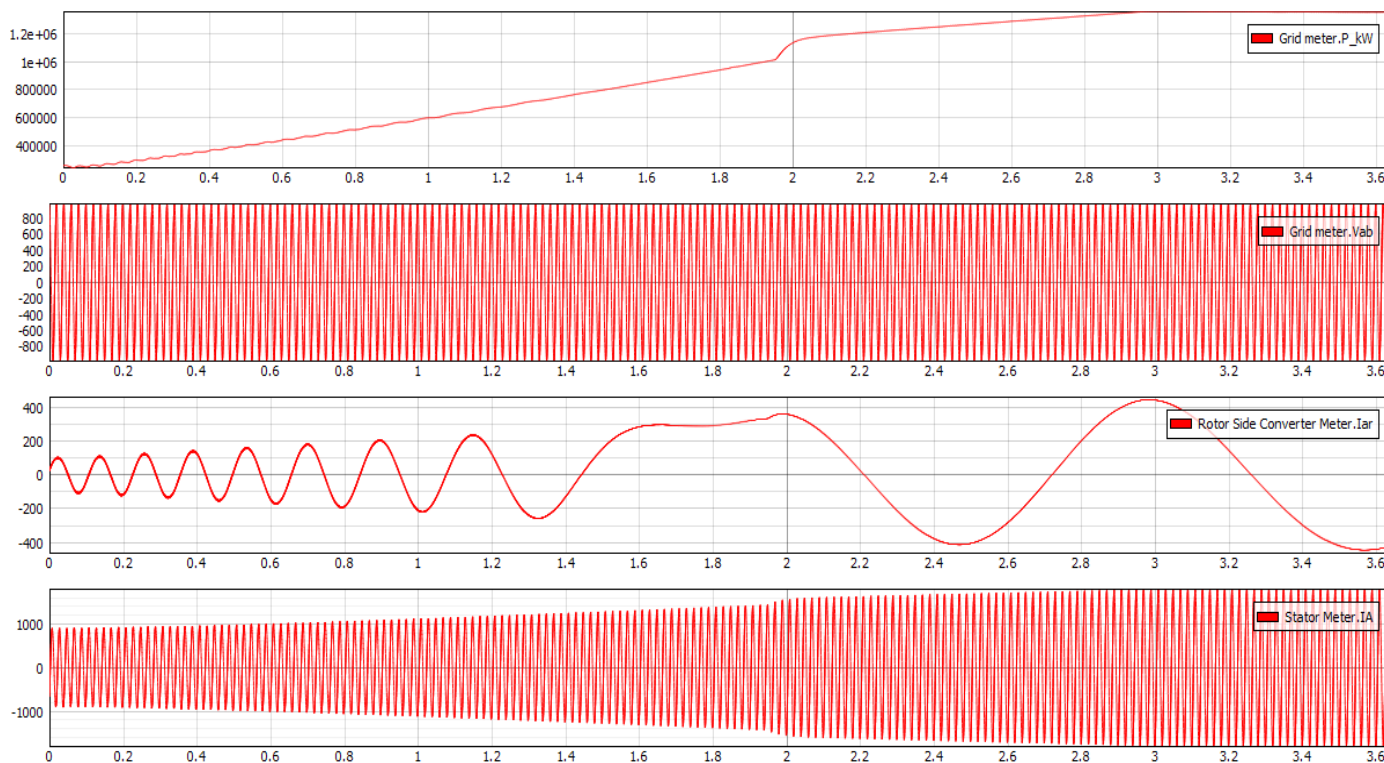


Figure 3.19 Réponse des éoliennes lors de l'augmentation de la vitesse du vent de 6 à 12 mètres par deuxième

Si la vitesse du vent devient trop élevée, ou si nous désactivons le DFIG manuellement, une mécanique inverse Le couple sera appliqué à l'arbre afin de ramener sa vitesse à zéro (par lequel nous simulons freinage). En

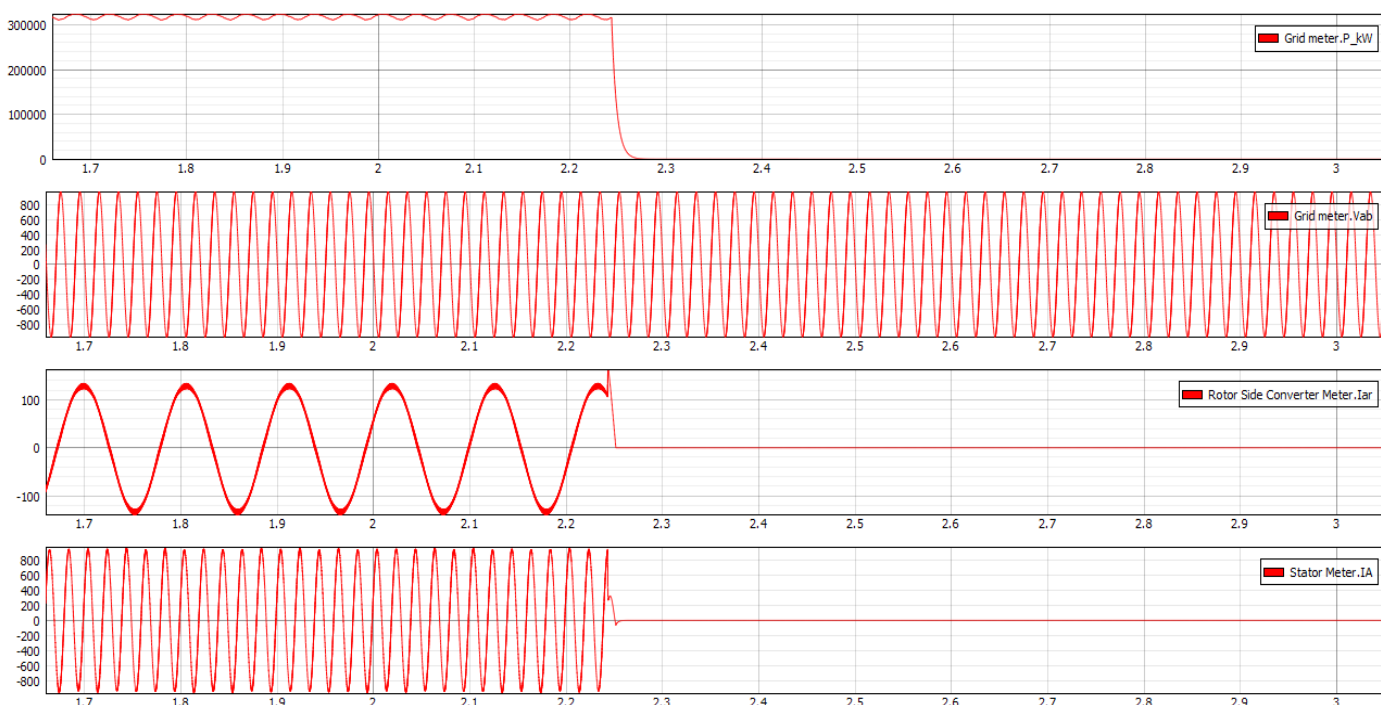


Figure 3.20 Réponse des éoliennes lors de l'arrêt de l'éolienne

plus de ce processus, le DFIG et le back-to-back sont déconnectés du et le Vbus commence à tomber à zéro. Ce processus peut être observé à la figure 3.19, où le DFIG est manuellement désactivé alors que la vitesse du vent était à 6 m/s.

### 3.8.2 Résultat et graphes de la Commande du convertisseur côté rotor (RSC)

À partir de l'interface du logiciel Typhoon et en ce qui concerne l'interface Hill SCADA, il est possible d'effectuer des ajustements sur des valeurs spécifiques liées au taux de contrôler PI.

Comme indiqué dans figure 3.21, il est possible de modifier les valeurs de puissance active nécessaires ainsi que les valeurs spécifiques de KP et KI.

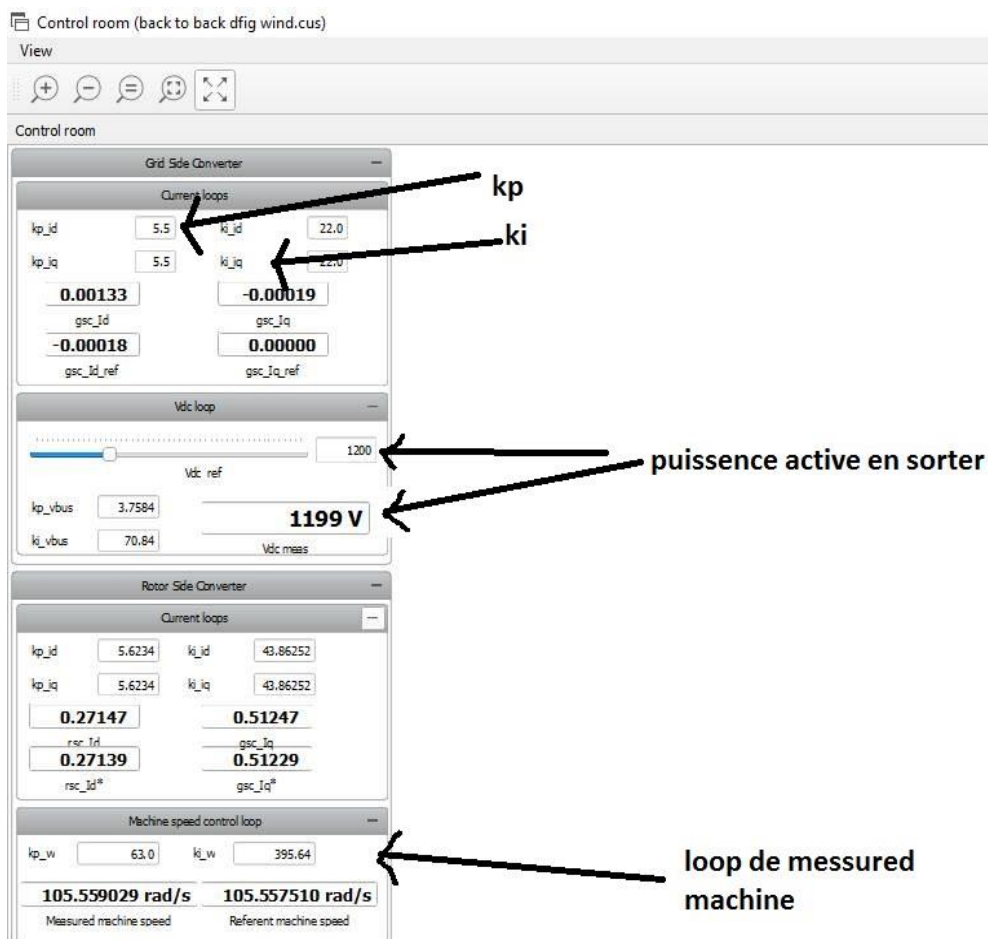


Figure 3.21 interface contrôle pannal de Commande du convertisseur côté rotor par pi

Sur la Fig. 3.21, nous pouvons observer des changements dans la puissance de sortie, les tensions du rotor et la tension de ligne constante, mesurées avec un composant de compteur triphasé.

Avec plusieurs tentatives et calculs différents, nous avons modifié la partie commande du rotor, et nous avons pu déterminer les valeurs pour kp et ki, et nous avons déterminé la puissance requise après avoir fait des simulations avec le programme typhoon nous avons obtenu les graphes qui nous représente Valeurs de tension vdf et vqf obtenues à partir de commande rotor par pi contrôler comme indiqué dans figure 3.21



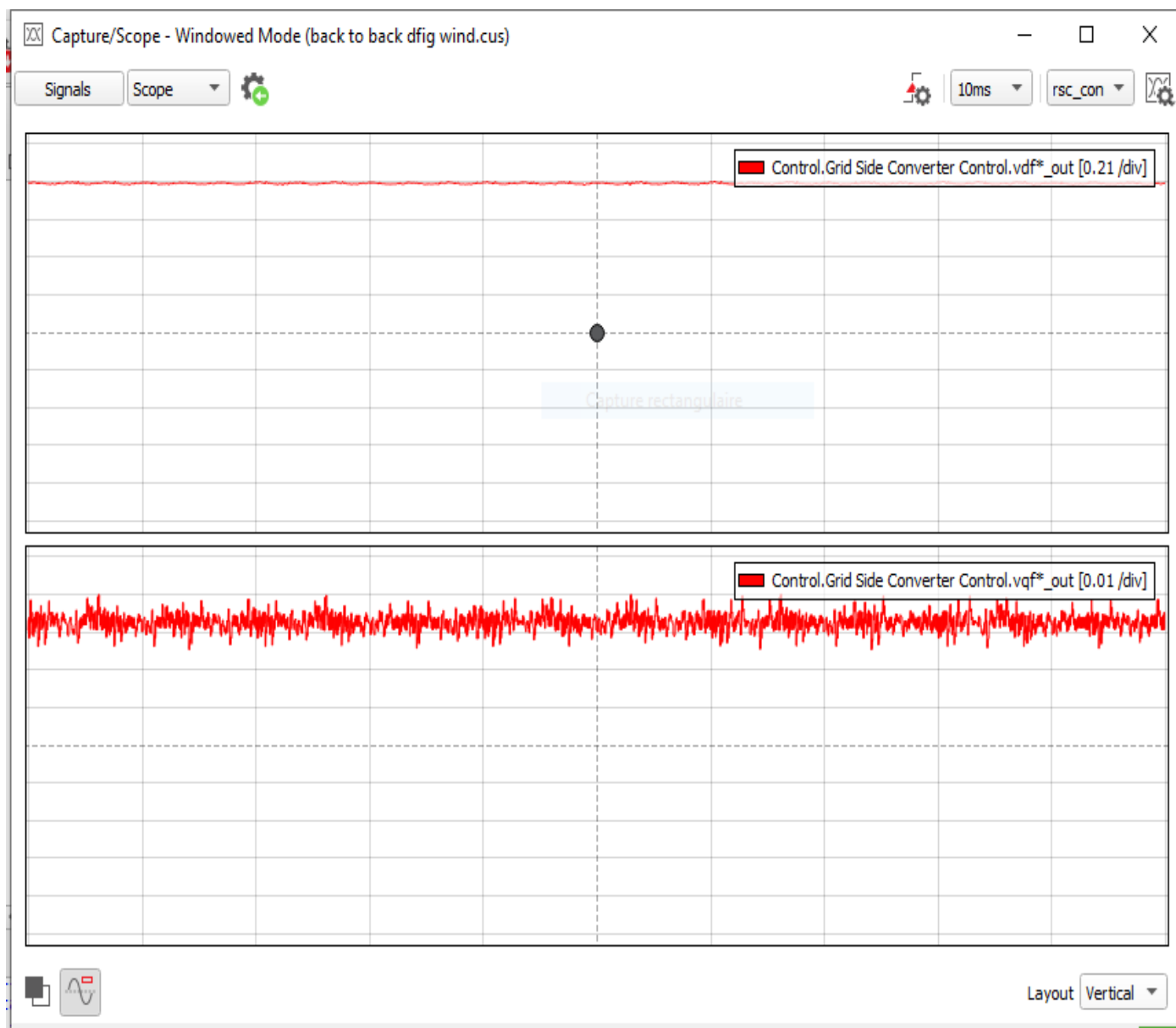


Figure 3.21 graph en tension sortir contrôler pi

## Conclusion

Après une brève explication du fonctionnement du logiciel de simulation utilisé dans ce travail, des simulations détaillées seront effectuées et les résultats obtenus. L'objectif de ce chapitre est de présenter une simulation fonctionnelle qui pourra être adaptée dans le futur pour piloter un simulateur temps réel. Il est important de noter que tous les paramètres de la console ont été obtenus par une méthode manuelle d'essais et d'erreurs. Il existe d'autres méthodes mathématiques, y compris la méthode IMC présentée, et l'utilisation d'éoliennes avec contrôle PI est un moyen efficace et durable de produire de l'électricité dans les zones rurales aux ressources éoliennes abondantes. L'énergie éolienne offre une alternative propre et renouvelable pour répondre aux besoins énergétiques. Et une méthode de contrôle qui nous donne un contrôle presque complet sur l'énergie obtenue, et nous avons effectué des simulations en temps réel à l'aide d'un programme spécial tayphoon qui est sur Windows et similaire à MATLAB.

Malgré les défis de faire des simulations et la difficulté d'employer des éléments de contrôle... Cependant, nous avons réalisé une partie complète de contrôle de l'énergie générée par les vents.

## Conclusion général :

Notre étude nous a permis de réaliser une modélisation complète et globale d'un système de génération d'électricité à partir de l'énergie éolienne. Cette modélisation se démarque principalement par l'approche différente qui a été faite de la partie mécanique qui fait appel aux calculs d'aérodynamique pour déterminer les relations liant la vitesse du vent, le couple et la vitesse de l'hélice, mais aussi de l'étude de l'ensemble avec l'association de l'unité de stockage permettant la fourniture d'une puissance constante au réseau et des services système tels que la puissance réactive ou l'option de filtrage actif des harmoniques avec la GADA.

Tout ceci a été conçu autour d'une GADA et un contrôle MPPT de l'éolienne permettant de maximiser la puissance produite à chaque instant. Le contrôle indépendant des puissances actives et réactives a été étudié et deux commandes, directe et indirecte, ont été exposées, la commande indirecte ayant été retenue pour son contrôle des courants rotoriques et sa bonne robustesse due aux deux boucles de régulation en courant et en puissance. De plus, la commande indirecte permet d'ajouter simplement la commande de filtrage actif par simple addition des courants de référence, ce qui n'était pas possible sur la commande directe. L'objectif est de pouvoir faciliter l'insertion des éoliennes dans les réseaux électriques afin d'augmenter la part de la production d'énergie renouvelable dans le réseau électrique futur.

La mise en place de l'unité de stockage et sa simulation nous a montré qu'il était judicieux d'utiliser cette solution afin d'obtenir un système de production plus pratique pour le gestionnaire de réseau; Il peut désormais compter sur une puissance constante comme l'a montré la simulation sur une longue durée. La GADA produit, grâce à la commande MPPT, le maximum de la puissance qui est disponible dans le vent et l'unité de stockage gère sa puissance et son énergie pour maintenir constante la puissance fournie au réseau en se déchargeant et se rechargeant aux grès du vent.

Après avoir traité ce sujet, nous avons réalisé comment contrôler les éoliennes pour produire une énergie durable et propre.

## Liste des symboles

| Symboles                                       | Interprétation  |
|--|---|
| MADA   | Génératrice asynchrone à double alimentation                            |
| GADA   | génératrice asynchrone à double alimentation.                           |
| $S, r$   | Indices d'axes correspondants au stator et au rotor                     |
| (d,q)  | Axes correspondants au référentiel lié au champ tournant.               |
| P  | Nombre de pair de pole de la GADA                                       |
| L  | L'inductance [H].   |
| R  | Résistance [ $\Omega$ ].  |
| $R_s$  | Résistance d'une phase statorique [ $\Omega$ ].                         |
| $R_r$  | Résistance d'une phase rotorique [ $\Omega$ ].                          |
| $L_s$  | Inductance propre d'une phase statorique [H ].                          |
| $L_r$  | Inductance propre d'une phase rotorique [H]                             |
| M  | Inductance cyclique mutuelle [H ].                                      |
| $f_s, f_r$                                     | Respectivement les fréquences statorique et rotorique[H z].             |
| V  | La tension [V].   |
| $V_s$  | Tension appliquée au stator [V].  |
| $V_r$  | Tension appliquée au rotor [V].   |
| $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$                       | Les tensions triphasées statoriques [V].                                |
| $V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$                       | Les tensions triphasées rotoriques [V].                                 |
| $V_d$  | Tension appliquée au stator selon l'axe (d) [V].                        |
| $V_q$  | Tension appliquée au rotor selon l'axe(q) [V].                          |
| $V_{sd}, V_{sq}$                               | Composantes de la tension statorique dans le référentiel synchrone [V]. |
| $V_{rd}, V_{rq}$                               | Composantes de la tension rotorique dans le référentiel synchrone [V].  |
| $i_{rd}, i_{rq}$                               | Courant rotorique selon l'axe(d,q) [ A].                                |
| $i_{sd}, i_{sq}$                               | Courant statorique selon l'axe(d,q) [ A].                               |
| $\theta_s, \theta_r$                           | Positions respectives du référentiel synchrone                          |
| $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$              | Vitesse du référentiel synchrone par rapport au stator [rad/s]          |
| $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$              | Vitesse du référentiel synchrone par rapport au rotor[rad/s].           |
| $\omega_m = \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt}$ | vitesse mécanique [rad/s]   |

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| $\Omega$                          | Vitesse mécanique [tr/min].  |
| $\Omega_s$                        | Vitesse synchrone en [tr/min].   |
| $C_e$                             | Couple électromagnétique de la génératrice [N.m].                              |
| $C_r$                             | Couple résistant [N.m].  |
| $C_m$                             | Couple résistant [N.m].  |
| $C_f$                             | Couple de frottement [N.m].  |
| $g$                               | Glissement.  |
| $\eta$                            | Rendement.   |
| $P_s, P_r$                        | Respectivement les puissances active statorique et rotorique [W].              |
| $P_{js}$                          | Les pertes joule du stator [W]   |
| $P_e$                             | L'énergie électromagnétique échanges [Joul] .                                  |
| $P_{em}$                          | La puissance électromagnétique [W].  |
| $P_{abs}$                         | La puissance absorbée [W].   |
| $P_{mec}$                         | La puissance mécanique [W].  |
| $Q_s, Q_r$                        | Respectivement les puissances réactive statorique et rotorique [VAR].          |
| $\Phi_s$                          | Flux statorique nominal [Wb].  |
| $\Phi_r$                          | Flux rotorique nominal [Wb].   |
| $\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$ | Les flux triphasés statorique [Wb]   |
| $\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$ | Les flux triphasés rotorique [Wb]  |
| $\Phi_{sd}, \Phi_{sq}$            | Flux statorique selon l'axe (d,q) [Wb]   |
| $\Phi_{rd}, \Phi_{rq}$            | Flux rotorique selon l'axe (d,q) [Wb]  |
| $A_p$                             | La matrice de transformation de park.  |
| <i>DFIG</i>                       | générateur à induction à double alimentation (Doubly-fed Induction Generator ) |
| CD                                | Différence critique  |
| CTE                               | Efficacité du temps de calcul  |
| ET                                | Temps écoulé   |
| Les DFIG                          | Générateurs à induction doublement alimentés                                   |
| Le                                | Algorithme de recherche Harmony  |
| L'IAE                             | Erreur absolue intégrale   |
| IGBT                              | Transistors bipolaires à grille isolée   |
| ISE                               | Erreur d'espace intégral   |
| ITAE                              | Erreur absolue pondérée dans le temps intégrale                                |
| L'ITSE                            | Erreur carrée pondérée dans le temps intégrale                                 |
| GA                                | Algorithme génétique   |

|             |  |
|-------------|--|
| GOA         | Algorithme d'optimisation des sauterelles  |
| SGC         | Convertisseur côté grille  |
| MPPT        | Suivi du point de puissance maximale   |
| PI          | Proportionnel-Intégral   |
| RTPP        | Optimisation des essaims de particules   |
| RSC         | Convertisseur côté rotor   |
| SFO         | Stator Flux Orientation  |
| Le          | Modulation sinusoïdale de largeur d'impulsion  |
| MST         | Écart type   |
| <i>PARK</i> | une technique de conversion des grandeurs électriques triphasées dans un système de coordonnées tournant |

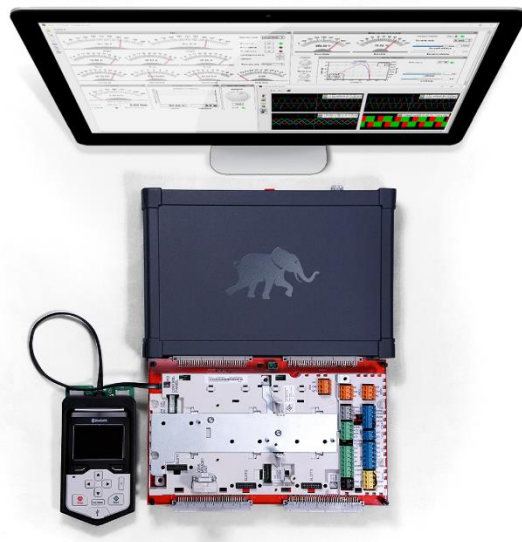
## ANNEXE :

**Applications Typhoon HIL dans le workflow de conception de contrôle :**

Notre plate-forme HIL ultra-haute fidélité a été conçue sur mesure pour les concepteurs de contrôle et pour la vérification et la validation (V & V). Notre système est conçu pour être utilisé dans toutes les phases de conception et de test de logiciels de contrôle :

- Phase de développement du contrôle : l'étape initiale de la conception du contrôle – tests SIL et C-HIL.
- Test du contrôleur de convertisseur automatisé : contrôleur V&V à un stade avancé.
- Phase d'intégration du système : intégration logicielle au niveau du système V&V.
- Tests d'interopérabilité : p. ex., interopérabilité entre EVSE et EV.

Augmentez vos performances lors de la simulation, du test et de l'émulation de tous les aspects de l'électronique de puissance dans les voitures modernes. ISO26262 « Véhicules routiers – Sécurité fonctionnelle » définit le matériel dans la boucle (HIL) comme un outil standard pour le développement et les essais de logiciels automobiles critiques pour la sécurité. Notre matériel / logiciel intégré verticalement, notre fidélité élevée du modèle, la compacité du modèle, la compatibilité avec d'autres outils de conception et de test font de Typhoon HIL le choix HIL parfait, autonome ou interfacé avec des simulateurs existants au niveau du système. Notre compatibilité avec les outils de conception de moteurs (par exemple JMAG), les outils de développement de commandes (par exemple Matlab/Simulink) et d'autres outils d'automatisation des tests (par exemple ECUTest) permet un flux de travail transparent.



## Bibliographie :

- [1] EL AIMANI, Salma. Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension. 2004. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille.
- [2] HAMANE, Bekhada. Commande robuste d'un aérogénérateur à base de machine asynchrone à double alimentation pilotée par un convertisseur matriciel. 2018. Thèse de doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [3] E. F. Mogos, X. Guillaud, V. Rogez, "SYNOPSIS A VOLTAGE REGULATION SYSTEM FOR PITCHCONTROLLED VARIABLE-SPEED WIND TURBINE", Laboratoire d'Electro- technique et d'Electronique de Puissance de Lille (1.2EP), Securing Critical Infrastructures, Grenoble, October 2001.
- [4] E. Muljadi, K. Pierce, P. Migliore, "Control Strategy for Variable-Speed, Stall-Regulated Wind Turbines", Presented at American Controls Conference Philadelphia, PA June 24-26, 1998,
- [5] B. Multon, "Acrogénérateur électriques", technique de l'ingénieur, 2004 D3960.
- [6] MENY IVAN, "Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion colienne petite puissance" Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM).
- [7] MENY Ivan, ENRICI Philippe, HUSELSTEIN Jean-Jacques, MATT Daniel, "Simulation and testing of a low power wind system", Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM).
- [8] Andreas Petersson, "Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generator for Wind Turbines", department of electric power engineering, Chalmers university of technology. Göteborg, Sweden 2003.
- [9] Maxime R. Dubois, "Review of electromechanical conversion in wind turbines", faculty ITS april 2000.
- [10] Tomas Petru, "modelling of wind turbines for power system studies", thèse Suede 2003.
- [11] A. Haniotis, A. Kladas and J. Tegopoulos, "A control procedure for permanent magnet variable speed wind turbine", Laboratory of Electrical génératrices Electric Power Division, Department of Electrical and Computer Engineering, National Technical University of Athens 9. Iron Poly- techniou Street, 15780 Athens, Greece.
- [12] Mohamed Choukri BENHABIB, "Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension: Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande", thèse France 2004.
- [13] Dimitrie Alexa, Adriana Sirbu, dan Marins Dobrea, "An Analysis of Three-Phase Rectifiers With Near-sinusoidal Input Currents", IEEE transactions on industrial electronics, vol 51, no 4 aout
- [14] Koen. J. P. Macken, Koen Vanthournout, Jeroen Van den Keybus, Geert Deconinck, and Ronnie J. M. Belmans, "Distributed Control of Renewable Generation Units With Integrated Active Filter". IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 19, NO. 5, SEPTEMBER 2004.
- [15] J. Rosner, H. P. Beck, C. Sourkounis, "Wind Energy Converter with Asynchronous génératrices and Three-Phase AC Controller in Generator Mode", ETEP Vol. 10, No. 4, July/August 2000.

- [16] Guy Segulier Francis Labrique "le convertisseur de l'électronique de puissance", tome 4 la conversion continu-alternatif.
- [17] Robert bausiere, Guy Seguir, Francis Labrique, "electronique de puissance, structure, fonctionde base, princepales applications", 8 eme édition.
- [18] Pasi Puttonen, Mika Salo and Heikki Tuusa, "Wind Power Plant Harmonics Reduction Using a Current Source Inverter with a Controlled PWM rectifier", EPE 2001 - Graz.
- [19] P. Baner. S.W.H.de Haan, M.E.C.Damen. J.T.G.Pierik, "Tool for Evaluation of Configuration of Offshore Windparks: Models of the Components", EPE 2001 – Graz
- [20] S.El Aimani, B. François, F. Minne, B. Robyns, "Modelling and simulation of doubly fed induction generators for speed wind turchine integrated in an distribution network", EPE 2003.
- [21] J. Bendl., M. Chommat., L. Schreier, "Energy Conversion with Doubly Fod génératrices ", ICRED 2003.
- [22] Panda. Eric L. Benedict, Giri Venkataramanan and Thomas A. Lipo. "A Novel Control Strategy for the Rotor Side Control of a Doubly-Fed Induction Génératrice Debiprasad", Department of Electrical and Computer Engineering University of Wisconsin-Madison Madison, WI 53706 USA.
- [23] H. Roissel.G. Peset2, V. Hautier, J.P F. Brudny1, "Wind Turbines Equipped with Self-Excited Induction Génératrice in Autonomous Mode : Analytical and Numerical Starting Studies", La boratoire Systemes Electrotechniques et Environnement (L.S.EE.), France. 2Groupe Eolien de l'Université du Québec à Rimouski. Canada. ICREP 03, 2003.
- [24] Sofiane Taïbi, Abdelmomaim TOUNZI. Francis PIRIOU, "Determination of magnetic characteristics of a variable reluctance génératrice excited by DC and AC currents", EPNC2004, 6-2004.
- [25] Sufiane TAIBI, Thomas HENNERON, Abdelmounaïm TOUNZI. "Analysis of supplementary conditions for a smooth torque running of heteropolar excited Vernier Reluctance génératrices " ISEF 2003, 1-2003.
- [26] Lue Moreau, "MODELISATION, CONCEPTION ET COMMANDE DE GENERATRICES ARELUCTANCE VARIABLE BASSE VITESSE", IREENA-Institut de Recherche en Electro- nique et Electrotechnique de Nantes Atlantique
- [27] Hermann-Josef Conrathis. "Rotor-Controlled Generator Systems For Wind Energy Applications", EPE 2001 - Graz.
- [28] W. Hofmann A. Thieme, "Control of a Double-Fed Induction Generator for Wind-Power Plants", Lehrstuhl Elektrische Maschinen und Antriebe Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Str. 70 D-09126 Chemnitz.
- [29] Mitsutochi Yamamoto, Osamu Motoyoshi "active and reactive power control for doubly fedwound rotor induction generator". IEEE transaction on power electronic vol 6 no 4 oct 1991.
- [30] S. El Aimani, B. Francois, F. Minne, B. Robyns, "Modelling and Simulation of Doubly Fed Induction Generators For Variable Speed Wind Turbines integrated in a Distribution Network", EPE 2003 Toulouse, ISBN: 90-75815-07-7.



- [31] Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis, "Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications". IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 53, NO. 2. APRIL 2006,
- [32] Hofmann, W., Okafor, F., "Doubly-Fed Full-Controlled Induction Wind Generator for Optimal Power Utilisation", PEDS OF CONFERENCE PROCEEDINGS.
- [33] E. Muljadi, K. Pierce, P. Migliore, "Control Strategy for Variable-Speed, Stall-Regulated Wind Turbines", Presented at American Controls Conference Philadelphia, PA June 24-26, 1998.
- [34] Christian Bouly, David Defois, Jerome Faucillon, Frederic Billon. "Slow rotation small windturbine for proximity applications criteria of design, expected performances, technology and applications", Maroc FIER2002
- [35] A. Tapin, G. Tupin, X. Ostolaza, J.J. Molina, J.R. Saenz, "WIND FARM MODELLING AND PERFORMANCE SIMULATION"
- [36] Arnaltes, "Comparison of Variable Speed Wind Turbine Control Strategies", Department of Electrical Engineering Escuela Politécnica Superior. Universidad Carlos III de Madrid.
- [37] Bertand Raison, Ana Morales, Michel Crappe, Jacques Trecat, "T'energie électrique éolienne". faculté polytechnique de mons, Belgique",
- [38] Mukund r.Patel, "Wind and Solar Power Systems", p 30.
- [39] Alfred Rufer. Philippe Barrade, David Hotellier. "Super condensateurs et stockage d'énergie Solution pour l'alimentation en bout de ligne des transports publics", Bulletin SEV/AES.
- [40] JR. Saenz, A. Tapia, G. Tapia, X. Ostolaza L. Albizn, F. Pérez-Hidalgo, M. Irizar, "Reactive Power Régulation in Wind Farms: Control Stratégies", EPE 2001 - Graz.
- [41] Lie Xu and Phillip Cartwright, "Direct Active and He active Power Control of DFIG for Vind Energie Génération, VOL. 21, SEPTEYII3ER 2006.
- [42] Zhang Xin fang, LIU y Ibm, Li Prédicative Fonctionnel Control Of a Doubly Fed Induction Generator for Variable Vind turbines, département of automation north china electrical power university, IEEE2004 China.
- [43] Black, M.; Silva, V. Strbac, G., "The Hole of Storage in Integrating Vind Energie", International Conference on Future Power Systems, 16-18. 2005, pp. 1 - 6.
- [44] Barton, J.P.; Infield, D.G., Li Energie storage and its use with intermittent renewable énergie, IEEE TJ:"ansactions on Energy Conversion, Volume 19, Issue 2, June 2004 Page(s):441 - 448.
- [45] P. S. Panickar, M. S. Hahman and S. M. Islam, "A NEURO-FUZZY ODEL FOH THE CONTROL OPERATION OF A WIND-DIESEL-BATTETIY HYBTIID POWER SYSTEM ", Centre for Renewable Energy and Sustainable Technologies Australia Curtin Cniversity of Tech- nology, Australia.
- [46] P. S. Panickar, S. Hahman, S. M. Islam, T. 1. Pryor, "ADAPTIVE COKTHOL STHATEGIES".
- [47] Hari Sharma Syed Islam Trevor Pryor C. V. Nayar, "POWER QUALITY ISSUES IN A WIND TURBINE DRIVEN INDUCTION GENERATOR AND DIESEL HYBRID AUTO NOM OU GRID", Murdoch UniversityEnergyResearch Institute (MUERI). Murdoch University, WA.

- [48] Roberto Cardenas, RubénPeña, Greg Asher, Jon Clare, "A Novel Control Strategy for Power Smoothing in Variable Speed Wind Energy Systems". Department of Electrical Engineering University of Magallanes PO 113-D, Punta Arenas Chile School of Electrical Engineering University of in Nottingham NG7, 2RD UK.
- [49] P. Barrade, "Energystorage and applications with supercapacitors" Laboratoire d'Electronique Industrielle, LEISTI-ISE, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFLCH 1015 Lausanne (Switzerland).
- [50] M. S. Illindala. "BATTERY ENERGY STORAGE FOR STAND-ALONE MICRO-SOURCE DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS", Department of Electrical and Computer Energie ring Université of Wisconsin-Madison Madison, WI 53706, USA.
- [51] S.Zunft, R. Time,U. Hartwing, A. Ternedde. "hermal energy storage technologies for advance adiabatic compressed air energy storages (AA-CAES)", STORE conference, aix en provence, octobre 2003.
- [52] T. Allean, "Electrolysis, hydrogen storage and fuel cell as a complete storage system for resapplication", STORE conference, aix en provence, octobre 2003.
- [53] A. Rufer, "SOLUTIONS FOR STORAGE OF ELECTRICAL ENERGY ", Laboratoire d'électronique industrielle LEI EPFL, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne CH 1015 Lausanne, Switzerland
- [54] Abbey, C.; Jons, G., "Shorterterm Energie Storage for wind energy applications", Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005, Volume 3, 2-6 Oct, 2005, pp. 2035-2042 Vol. 3.
- [55] Ludovic Leclercq, Aymeric Ansel, Benoit Robyns, Autonomous high power variable speed windgenerator system", EPE 2003 Toulouse.
- [56] Lisias V. L. Abren, Member, IEEE and Mohammad Shahidichpour, "Wind Energy and Power System Inertia",
- [57] Bagen Billinton, "Incorporating well being considerations in generating system su sin genenergy storage", Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume 20, Issue 1, Mar 2005, pp. 225-230.
- [58] A.J. Ruddell, "Fly wheel energy storage in renewable energy systems. STORE conference, aix en provence, octobre 2003.
- [59] Alfred Rufer, Senior Member, IEEE, David Hotellier, Philippe Barrade, Member. "A Supercapacitor Based Energy-Storage Substation for Voltages Compensation in Weak Transportation Networks", IEEE 2003.
- [60] Carl Klaes Technical Fellow, "Modeling Optimum Charging of an Ultra Capacitor by an Alternator", Electrimnes 2002, August 18-21
- [61] S.Lemofouet, A. Rufer, P. Barrade, F. Grasser, "principle of a hybrid compressed air and saper Capacitors energy storage system with maximum efficiency point tracking" STORE conference, aix en provence, octobre 2003,

- [62] A. D. Karlis and D. P. Papadopoulos, "Modelling, Testing and Economic Analysis of a Small-Scale Hybrid Wind-Photovoltaic-Battery System Installation". Electrical Génératrices Laboratory Department of Electrical and Computer Engineering Democritus University of Thrace Xanthi,
- [63] Laurent Torchoux, Jean Alzien, Guy Schweitz, "Multibat manager for renewable energy systems", STORE conference, aix en provence, octobre 2003.
- [64] Magnus Korpas and Arne T. Holen. "Operation Planning of Hydrogen Storage Connected to Wind Power Operating in a Power Market". IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 21, NO. 3. SEPTEMBER 2006.
- [65] Agbossou, K.; Kolbe, M.; Hamelin, J., Bose, T.K., "Performance of a stand-alone renewable energy system based on energy storage as hydrogen", Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume 19, Issue 3, Sept. 2004, pp. 633-640.
- [66] Yu, X. Strumz, "Combined long-term and short-term access storage for sustainable energy system", K., Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE, 6-10 June 2004, pp. 1946- 1951 Vol.2.
- [67] Hennessy, T.: Kuntz, M., "The multiple benefits of integrating electricity storage with wind energy", Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, June 12-16, 2005, pp. 1388- 1390.
- [68] R. Hoffmann: P. Mutschler, "The Influence of Control Strategies on the Energy Capture of Wind Turbines, Institute of Power Electronics and Drives Darmstadt University of Technology, Landgraf-Goerg-Str. 4 D-64283 Darmstadt Germany (C) 2000,
- [69] M.M. Hand, "Variable Speed Wind Turbine Controller Systematic Design Methodology: A Comparison of Non-Linear and Linear Model-Based Designs", July 1999 NREL TP-500-25540.
- [70] Santiago Arualtes Gomez, "Comparison of Variable Speed Wind Turbine Control Strategies". Universidad Carlos III de Madrid, Spain. ICREP 03, 2003.
- [71] H. Camblong, X. Guillaud, and V. Roger, "Comparison of Two Distinct Approaches for Wind Turbines Control Design", Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance de Lille (LZEP), Control and Applications 2005
- [72] "Is the answer blowing in the wind?" IEEE power & energy magazine, November December 2003.
- [73] AKKARI NADIA, "Contribution à l'alimentation de la Robustesse de la Commande d'une Génératrice Asynchrone a Double Alimentation ", Thèse de Doctorat, Université de Batna, 02 juin 2010.
- [74] Abdelhakim. Dendoug, " commande par mode glissant de la génératrice à double alimentation alimenté par un onduleur ", Thèse Magistère, Université de Batna,
- [75] Abdelhakim.Dendouga, " Contrôle Des Puissances Active et Réactive de la Génératrice a Double Alimentation (DFIM) ", Thèse de Doctorat, Université de Batna, 10 février 2010
- [76] N.Goléa, "commande vectorielle", cours, Université de Batna, 2004.
- [77] C.Bennour, «Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation », Mémoire de magister, université de Biskra, 2012.

- [78] A. Tamarat, « modélisation d'une chaîne de conversion basée sur une génératrice Asynchrone à double alimentation » mémoire de magister, université de Biskra, 2009
- [79] Hamane, B.; Doumbia, M.L.; Bouhamida, M.; Draou, A.; Chaoui, H.; Benghanem, M. Modélisation et contrôle d'un système de conversion d'énergie éolienne basé sur DFIG piloté par un convertisseur matriciel. In Proceedings of the Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, Monte Carlo, Monaco, 6-8 avril 2016 ; p. 1 à 8. [Google Scholar]
- [80] Tanvir, AA; Merabet, A.; Beguenane, R. Contrôle en temps réel de la puissance active et réactive pour le système de conversion d'énergie éolienne basé sur un générateur à induction à double alimentation (DFIG). *Energies* 2015, 8, 10389-10408. [Google Scholar] [CrossRef] [Version verte]
- [81] Bekakra, Y.; Attous, D.B. Réglage optimal du contrôleur PI à l'aide de l'optimisation PSO pour le contrôle indirect de la puissance pour l'éolienne basée sur DFIG avec MPPT. *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.* 2014, 5, 219-229. [Google Scholar] [CrossRef]
- [82] Vieira, J.P.A.; Nunes, M.N.A.; Bezerra, U.H. Design of Optimal PI Controllers for Doubly Fed Induction Generators in Wind Turbines Using Genetic Algorithm. In Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, USA, 20–24 juillet 2008; p. 1 à 7. [Google Scholar]
- [83] Asgharnia, A.; Shahnazi, R.; Jamali, A. Performance et robustesse des contrôleurs PID flous fractionnaires optimaux optimaux pour le contrôle du pas d'une éolienne à l'aide d'algorithmes d'optimisation chaotique. *ISA Trans.* 2018, 79, 27-44. [Google Scholar] [CrossRef]
- [84] Assareh, E.I.; Poultangari, I.; Tandis, E.; Nedaei, M. Optimisation de la production d'énergie éolienne dans les zones à faible vitesse du vent à l'aide d'un réseau neuronal RBF hybride avancé couplé à la méthode d'optimisation HGA-GSA. *J. Mech. Sci. Technol.* 2016, 30, 4735 à 4745. [Google Scholar] [CrossRef]
- [85] Kaveh, A.; Dadras, A. Un nouvel algorithme d'optimisation méta-heuristique : l'optimisation des échanges thermiques. *Adv. Eng. Softw.* 2017, 110, 69-84. [Google Scholar] [CrossRef]
- [86] Gagra, S.K.; Mishra, S.; Sing, M. Analyse de performance d'un générateur à induction doublement alimenté intégré au réseau pour une petite centrale hydroélectrique. *Int. J. Renew. Énergie Rés.* 2018, 8, 2310-2323. [Google Scholar]
- [87] Qiao, W. Modélisation dynamique et contrôle de générateurs à induction doublement alimentés par des éoliennes. In Proceedings of the IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Seattle, DC, USA, 15–18 mars 2009; p. 1 à 8. [Google Scholar]
- [88] Xu, D.; Blaabjerg, F.; Chen, W.; Zhu, N. *Advanced Control of Doubly Fed Induction Generator for Wind Power Systems*, 1re éd.; John Wiley & Sons: New York, NY, États-Unis, 2018. [Google Scholar]
- [89] Hato, M.M.; Bouallègue, S.; Ayadi, M. Contrôle PI réglé par algorithme du cycle de l'eau d'un générateur à induction doublement alimenté pour la conversion de l'énergie éolienne. Dans Actes du 9e Congrès international sur les énergies renouvelables (IREC), Hammamet, Tunisie, 20-22 mars 2018 ; p. 1 à 6. [Google Scholar]

- [90] Åström, A.K.; Hägglund, T. *Contrôle PID avancé*; ISA-Instrumentation, Systems and Automation Society: Research Triangle Park, Caroline du Nord, États-Unis, 2006. [Google Scholar]
- [91] Bouallègue, S.; Haggège, J.; Ayadi, M.; Benrejeb, M. Réglage du contrôleur logique flou de type PID basé sur l'optimisation de l'essaim de particules. *Eng. Appl. Artif. Intel.* 2012, 25, 484-493. [Google Scholar] [CrossRef]
- [92] Qu, B.Y.; Zhu, Y.S.; Jiao, Y.S.; Wu, M.Y.; Suganthan, P.N.; Liang, J.J. Une enquête sur les algorithmes évolutifs multi-objectifs pour la solution des problèmes environnementaux / économiques de dispatching. *Essaim Evol. Calcul.* 2018, 8, 1-11. [Google Scholar] [CrossRef]
- [93] <https://www.typhoon-hil.com/> the website of Typhoon HIL, a company specializing in hardware-in-the-loop (HIL) testing solutions for power electronics, microgrids, and renewable energy systems.

في هذه الأطروحة، ينصب التركيز الرئيسي على محاكاة الوقت الحقيقي لطاقة الرياح باستخدام برنامج TYPHOON HILL. تبدأ الرسالة بتقديم لمحة موجزة عن عمل أنظمة الرياح والمفاهيم الأساسية المرتبطة بها، بما في ذلك المكونات الأساسية لتوربينات الرياح ومبادئ تحويل طاقة الرياح الحركية إلى كهرباء.

بعد ذلك، تتعمق الأطروحة في المعادلات المهمة التي تحكم تشغيل المولدات غير المتزامنة المستخدمة في أنظمة الرياح. يشرح المبادئ الأساسية لتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية في هذه المولدات، ويعرض المعادلات الكهرومغناطيسية التي تصف هذه العملية. كما يناقش الجوانب المتعلقة بالمزامنة وتنظيم السرعة وأداء المولدات غير المتزامنة في سياق أنظمة الرياح.

أخيراً، تركز الأطروحة على المحاكاة في الوقت الفعلي للتحكم في طاقة الرياح باستخدام منظم PI في TYPHOON HILL. يشرح كيف يتم استخدام منظم PI لتنظيم الطاقة التي تنتجها توربينات الرياح من خلال ضبط معاملات التحكم بناءً على التغيرات في ظروف الرياح. بالإضافة إلى ذلك، فإنه يصف كيفية استخدام TYPHOON HILL لنمذجة المكونات المختلفة لنظام الرياح، ومحاكاة ظروف الأرصاد الجوية، وتنفيذ عمليات محاكاة في الوقت الفعلي للتحكم في طاقة الرياح.

**كلمة مفتاحية:** محاكاة الطاقة الريحية، Typhoon Hill، أنظمة الرياح، المحركات الريحية، تحويل الطاقة، المولدات الغير متزامنة، المنظم PI، تحكم الطاقة الريحية، الرياح، تنظيم السرعة، الأداء، نمذجة الأنظمة الريحية، شروط الجو، .DFIG ,GADA.

## RESUME

Dans cette thèse, vous vous concentrez sur la simulation en temps réel de l'énergie éolienne à l'aide du programme Typhoon Hill. Vous commencez par fournir un bref rappel sur le fonctionnement des systèmes éoliens et les concepts clés qui y sont associés, y compris les composants essentiels des éoliennes et les principes de conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité.

Ensuite, vous abordez les équations importantes régissant le fonctionnement des générateurs asynchrones utilisés dans les systèmes éoliens. Vous expliquez les principes fondamentaux de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique dans ces générateurs, en présentant les équations électromagnétiques qui décrivent ce processus. Vous discutez également des aspects liés à la synchronisation, à la régulation de la vitesse et aux performances des générateurs asynchrones dans le contexte des systèmes éoliens.

Enfin, vous vous concentrez sur la simulation du contrôle de l'énergie éolienne en temps réel en utilisant le régulateur PI sur Typhoon Hill. Vous expliquez comment le régulateur PI est utilisé pour réguler la puissance produite par une éolienne en ajustant les paramètres de commande en fonction des variations du vent. Vous décrivez également comment Typhoon Hill est utilisé pour modéliser les différents composants du système éolien, simuler les conditions météorologiques et exécuter la simulation en temps réel du contrôle de l'énergie éolienne.

**MOTE CLES :** Simulation de l'énergie éolienne en temps réel, Typhoon Hill, systèmes éoliens, éoliennes, conversion d'énergie, générateurs asynchrones, régulateur PI, contrôle de l'énergie éolienne, vent, régulation de vitesse, performances, modélisation des systèmes éoliens, conditions météorologiques, DFIG ,GADA.

## **ABSTRACT**

In this thesis, the main focus is on real-time simulation of wind energy using the Typhoon Hill program. The thesis begins by providing a brief overview of the functioning of wind systems and the key concepts associated with them, including the essential components of wind turbines and the principles of converting kinetic wind energy into electricity.

Next, the thesis delves into the important equations that govern the operation of asynchronous generators used in wind systems. It explains the fundamental principles of converting mechanical energy into electrical energy in these generators, presenting the electromagnetic equations that describe this process. It also discusses aspects related to synchronization, speed regulation, and the performance of asynchronous generators in the context of wind systems.

Finally, the thesis focuses on the real-time simulation of wind energy control using the PI (proportional-integral) regulator on Typhoon Hill. It explains how the PI regulator is utilized to regulate the power produced by a wind turbine by adjusting control parameters based on variations in wind conditions. Additionally, it describes how Typhoon Hill is used to model the various components of the wind system, simulate meteorological conditions, and execute real-time simulations of wind energy control.

**KEY WORDS : Real-time simulation of wind energy, Typhoon Hill, wind systems, wind turbines, energy conversion, asynchronous generators, PI controller, wind energy control, wind, speed regulation, performance, modeling of wind systems, meteorological conditions , GADA , DFIG .**

