

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Commandes Electriques

Par: BENABDELKADER Sid Ahmed Nadir

Et BENADLA Mohammed Samir

### Sujet

**Commande d'une génératrice synchrone à rotor bobiné (GSRB) avec amortisseurs et pôles saillants en vue d'une application éolienne**

Soutenu publiquement , le 19/06/ 2023 ,devant le jury composé de :

|                              |            |                       |             |
|------------------------------|------------|-----------------------|-------------|
| Pr. MELIANI Sidi Mohammed    | Professeur | Université de Tlemcen | Président   |
| Dr. DRIS Younes              | MAB        | Université de Tlemcen | Examinateur |
| Dr. LAZREG Mohamed Haithem   | MCB        | Université de Tlemcen | Encadreur   |
| Mr. MORAD Mohamed Abdelhalim | Doctorant  | Université de Tlemcen | Invité      |

Année universitaire : 2022 /2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **Dédicace**

---

**Je dédie ce mémoire**

**A mes très chers parents**

**A mes frères et à ma sœur**

**A tous me sont chers proches**

**A tous ceux qui nous ont aidés à compléter cette mémoire**

BENABDELKADER Sid Ahmed Nadir

Tlemcen, le 30 Mai 2023

## **Dédicace**

---

**Avant tous, Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour  
réaliser ce travail**

**Je dédie ce mémoire**

**A ma mère et mon père**

**A mes sœurs**

**A tous mes amis, surtout TERKIA, DERDRA Mourad**

BENADLA Mohammed Samir

Tlemcen, le 30 Mai 2023

## Remerciements

---

Nous sommes heureux de vous adresser nos sincères remerciements pour votre soutien et votre contribution à notre récent projet de Master au Département de Génie Electrique et Electronique, Faculté de Technologie, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre gratitude envers Allah, seigneur de l'univers, pour la volonté et la santé qu'Il nous a accordées tout au long de ces années d'études.

Nous souhaitons également exprimer notre profond respect et notre reconnaissance à notre encadreur, Monsieur Dr. LAZREG Mohamed Haithem, pour son précieux encadrement

Nous tenons également à remercier chaleureusement Monsieur MECHERNENE Abdelkader, enseignant à la Faculté de Technologie de l'Université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen, pour son aide précieuse et ses conseils lors de nos études pratiques au Laboratoire d'Automatique Tlemcecn (LAT) de la Faculté de Technologie. Sa disponibilité et ses connaissances nous ont été d'une grande utilité dans la réalisation de notre projet.

Nous souhaitons également adresser nos remerciements les plus sincères aux membres du jury, Pr. MELIANI Sidi Mohammed, Dr. DRIS Younes et Mr. MORAD Abdelhalim enseignants à la Faculté de Technologie de l'Université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen, pour avoir accepté d'évaluer ce modeste mémoire. Leurs commentaires et leurs éclairages nous ont permis d'améliorer la qualité de notre travail.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers tous les enseignants du département de génie électrique qui ont contribué de près ou de loin à notre formation. Leurs enseignements et leur expertise ont été essentiels pour l'acquisition des connaissances nécessaires à la réalisation de ce travail.

## *Liste des figures*

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure I.1 :</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent  | 4  |
| <b>Figure I.2 :</b> Evolution de la taille et de la puissance des nouvelles unités de production                         | 6  |
| <b>Figure I.3 :</b> Différents types d'éolienne  | 7  |
| <b>Figure I.4 :</b> Technologie éolienne à axe vertical  | 8  |
| <b>Figure I.5 :</b> Eolienne à axe horizontal  | 8  |
| <b>Figure I.6 :</b> Principaux organes du système de conversion éolien   | 9  |
| <b>Figure I.7 :</b> Tub de courant d'air autour d'une éolienne   | 10 |
| <b>Figure I.8 :</b> Coefficient de puissance   | 10 |
| <b>Figure I.9 :</b> Circulation du vent dans le monde  | 11 |
| <b>Figure I.10 :</b> Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) en Algérie                                    | 13 |
| <b>Figure I.11 :</b> Photo de la première éolienne installée en Algérie  | 14 |
| <b>Figure I.12 :</b> Ferme éolienne à Adrar  | 14 |
| <b>Figure I.13 :</b> Eolienne à vitesse fixe.  | 15 |
| <b>Figure I.14 :</b> Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage                                   | 16 |
| <b>Figure I.15 :</b> Puissance produite par la turbine   | 17 |
| <b>Figure I.16 :</b> Chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électriques                                   | 17 |
| <b>Figure I.17 :</b> Système d'éolienne avec une génératrice synchrone à rotor bobiné                                    | 18 |
| <b>Figure I.18 :</b> Couplage unidirectionnel d'une GSAP au réseau   | 19 |
| <b>Figure I.19 :</b> Couplage bidirectionnel d'une GSAP au réseau  | 19 |
| <b>Figure II.1 :</b> Croquis simplifié d'une machine synchrone   | 21 |
| <b>Figure II.2 :</b> Machine synchrone à rotor à pôles lisses  | 22 |
| <b>Figure II.3 :</b> Machine à pôles saillants et enroulements amortisseurs  | 23 |
| <b>Figure II.4 :</b> Rotor d'une MS avec amortisseurs  | 23 |
| <b>Figure II.5 :</b> Alternateur à inducteur tournant avec système d'excitation équipé d'une excitatrice en bout d'arbre | 24 |
| <b>Figure II.6 :</b> Diagramme des puissances d'un moteur synchrone  | 25 |
| <b>Figure II.7 :</b> Caractéristique interne   | 26 |
| <b>Figure II.8 :</b> Symboles d'une machine synchrone à rotor bobiné   | 26 |
| <b>Figure II.9 :</b> Schéma modèle abc de la MSRBPS avec un amortisseur sur chacun des axes                              | 27 |
| <b>Figure II.10 :</b> Modèle de la machine synchrone   | 30 |
| <b>Figure II.11 :</b> Modèle de la machine synchrone avec amortisseurs   | 31 |
| <b>Figure II.12 :</b> Simulation de la (GSRB) sans amortisseurs fonctionnement à vide                                    | 34 |
| <b>Figure II.13 :</b> Résultats de simulations(GSRB) sans amortisseurs fonctionnement à vide                             | 35 |
| <b>Figure II.14 :</b> Simulation de la (GSRB) sans amortisseurs fonctionnement en cc                                     | 36 |
| <b>Figure II.15 :</b> Résultats de simulations (GSRB) sans amortisseurs fonctionnement en cc                             | 36 |
| <b>Figure II.16 :</b> Simulation de la (GSRB) sans amortisseurs fonctionnement en charge                                 | 37 |
| <b>Figure II.17 :</b> Résultats de simulations (GSRB) sans amortisseurs en charge  | 37 |
| <b>Figure II.18 :</b> Simulation de la (GSRB) avec amortisseurs fonctionnement à vide                                    | 38 |
| <b>Figure II.19 :</b> Résultats de simulations (GSRB) avec amortisseurs fonctionnement à vide                            | 39 |
| <b>Figure II.20 :</b> Simulation de la (GSRB) avec amortisseurs fonctionnement en cc                                     | 40 |
| <b>Figure II.21 :</b> Résultats de simulations (GSRB) avec amortisseurs fonctionnement en cc                             | 40 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure II.22</b> : Simulation de la (GSRB) avec amortisseurs fonctionnement en charge                                     | 41 |
| <b>Figure II.23</b> : Résultats de simulations (GSRB) avec amortisseurs en charge  | 41 |
| <b>Figure III.1</b> : Vue globale du banc d'essai  | 44 |
| <b>Figure III.2</b> : Schéma de Montage aval pour la mesure de la résistance apparente statorique                            | 46 |
| <b>Figure III.3</b> : Schéma de Montage amont pour la mesure de la résistance rotorique                                      | 47 |
| <b>Figure III.4</b> : Schéma de montage pour l'essai à vide  | 48 |
| <b>Figure III.5</b> : Caractéristique à vide (Croissante et décroissante)  | 49 |
| <b>Figure III.6</b> : Caractéristique à vide moyenne   | 49 |
| <b>Figure III.7</b> : Schéma de montage pour l'essai en court-circuit permanent  | 50 |
| <b>Figure III.8</b> : Caractéristique de court-circuit   | 51 |
| <b>Figure III.9</b> : Schéma de montage pour l'essai en charge   | 52 |
| <b>Figure III.10</b> : Caractéristiques externes avec charge résistive   | 54 |
| <b>Figure III.11</b> : Méthode de détermination graphique des paramètres de Potier   | 55 |
| <b>Figure III.12</b> : Essai sur charge déwatté et caractéristique $U = f(J)$  | 56 |
| <b>Figure III.13</b> : Diagramme Poitier $U = f(J)$  | 57 |
| <b>Figure IV.1</b> : Architecture de commande de la chaine de conversion éolienne connectée au réseau                        | 58 |
| <b>Figure IV.2</b> : Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse( $\lambda$ )et de l'angle de calage( $\beta$ ) | 60 |
| <b>Figure IV.3</b> : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée   | 60 |
| <b>Figure IV.4</b> : Couplage mécanique entre la turbine et le générateur  | 61 |
| <b>Figure IV.5</b> : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne  | 61 |
| <b>Figure IV.6</b> : Topologies de base d'un redresseur de tension   | 62 |
| <b>Figure IV.7</b> : Principes de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis                                      | 62 |
| <b>Figure IV.8</b> :Schéma fonctionnel du redresseur MLI de tension dans le référentiel tournant d $-q$                      | 63 |
| <b>Figure IV.9</b> : Schéma d'un onduleur de tension triphasé  | 64 |
| <b>Figure IV.10</b> : Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur  | 65 |
| <b>Figure IV.11</b> : Schéma électrique du bus continu   | 66 |
| <b>Figure IV.12</b> : Boucle de régulation de la tension du bus continu  | 66 |
| <b>Figure IV.13</b> : Schéma électrique du filtre passif   | 67 |
| <b>Figure IV.14</b> : Schéma monophasé équivalent simplifié du transformateur  | 68 |
| <b>Figure IV.15</b> : Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation                             | 69 |
| <b>Figure IV.16</b> : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation  | 70 |
| <b>Figure IV.17</b> : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation  | 71 |
| <b>Figure IV.18</b> : Principe de la commande du CCM   | 71 |
| <b>Figure IV.19</b> : Diagramme vectoriel du flux orienté de la GSRB   | 72 |
| <b>Figure IV.20</b> : Principe du contrôle des courants statoriques de la GSRB   | 74 |
| <b>Figure IV.21</b> : Boucle de régulation de courant $I_d$  | 74 |
| <b>Figure IV.22</b> : Schéma bloc de la régulation de la vitesse   | 75 |
| <b>Figure IV.23</b> : Résultats de simulations Commande (CCM)  | 76 |

### *Liste des tableaux*

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau III.1</b> : Caractéristiques nominales de la machine synchrone _____        | 44 |
| <b>Tableau III.2</b> : Caractéristiques nominales de machine à courant continu _____   | 45 |
| <b>Tableau III.3</b> : Mesure de la résistance apparente de l'enroulement stator _____ | 46 |
| <b>Tableau III.4</b> : Mesure de la résistance apparente de l'enroulement rotor _____  | 47 |
| <b>Tableau III.5</b> : Mesure de l'essai à vide à vitesse constante _____              | 48 |
| <b>Tableau III.6</b> : Essai en court-circuit _____                                    | 51 |
| <b>Tableau III.7</b> : Essai en charge de nature résistive _____                       | 53 |
| <b>Tableau III.8</b> : Essai en charge de nature inductive _____                       | 56 |

## Liste des Acronymes et Symboles

### Liste des Acronymes

|         |  |
|---------|--|
| abc     | Repère triphasé                                    |
| d       | Axe direct   |
| q       | Axe quadrature                                     |
| dq      | Repère diphasé                                     |
| ex      | Excitation   |
| GS      | Générateur synchrone                               |
| MS      | Machine synchrone                                  |
| MSRB    | Machine synchrone à rotor bobiné                   |
| MSRBPS  | Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants |
| MSRBPL  | Machine synchrone à rotor bobiné à pôles lisses    |
| GSRB    | Génératrice synchrone à rotor bobiné               |
| MCC     | Moteur à courant continu                           |
| P       | Nombre de paires de pôles                          |
| AC / DC | Courant alternatif / Courant continu               |
| f.e.m   | Force électromotrice                               |
| CCM     | Convertisseur Côté Machine                         |
| CCR     | Convertisseur Côté Réseau                          |
| PI      | Régulateur Proportionnel intégral                  |
| G       | Gain de multiplicateur                             |
| R       | Rayon de la surface balayée en m                   |
| S       | Surface circulaire balayée par la turbine          |

### Liste des Symboles

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| $i_a, i_b, i_c$                   | Courants des phases (a,b,c)  |
| $i_d, i_q, i_f$                   | Courants direct, en quadrature, d'excitation   |
| $i_{kd}, i_{kq}$                  | Courants d'amortisseurs direct et quadrature   |
| $L_d, L_q, L_f$                   | Inductances d'axe direct, quadrature et inducteur                                    |
| $L_{kd}, L_{kq}$                  | Inductances d'amortisseurs d'axe direct et en quadrature                             |
| [R], [L], [I], [V]                | Matrice de (résistance, inductance, courant et tension)                              |
| $\theta$                          | Angle (position)   |
| $T_e$                             | Couple électromagnétique   |
| $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$ [wb] | Composantes du flux statorique dans le repère (d, q)                                 |
| $\varphi_f$ [wb]                  | Composantes du flux rotorique dans le repère (d, q)                                  |
| $\varphi_D, \varphi_Q$            | Flux totaux induits dans les amortisseurs de l'axe polaire et de l'axe inter polaire |
| $\omega$ [rad/s]                  | Pulsation électrique   |
| $\omega_r$ [rad/s]                | Pulsation électrique rotorique   |
| $p_m, p_f, p_j$ [W]               | Pertes mécaniques, fer, effet Joule  |
| $\eta$                            | Rendement  |
| $t$                               | Temps  |

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| $U$ [V]                       | Tension composée   |
| $V$ [V]                       | Tension simple   |
| $\Omega_m$ [rad/s]            | Vitesse angulaire mécanique                                  |
| $\Omega_t$ [rad/s]            | Vitesse de la turbine  |
| $\beta$                       | Angle de calage des pales                                    |
| $\lambda$                     | Rapport de vitesse de la turbine                             |
| $\lambda_{opt}$               | Valeur du rapport de vitesse pour laquelle $C_p$ est maximal |
| $n_s$ [tr/min]                | Vitesse de synchronisme                                      |
| $Z$ [ $\Omega$ ]              | Impédance  |
| $L$ [H]                       | Inductance   |
| $M$ [H]                       | Inductance mutuelle  |
| $J_T$ [ $kg \cdot m^2$ ]      | Moment d'inertie de la turbine                               |
| $J_g$                         | Moment d'inertie de la GSRB                                  |
| $R_{sa}$ [ $\Omega$ ]         | Résistance d'une phase statorique                            |
| $R_s$ [ $\Omega$ ]            | Résistance statorique  |
| $R_{sch}$ [ $\Omega$ ]        | Résistance statorique (chaude)                               |
| $R_{ch}$ [ $\Omega$ ]         | Résistance de la charge                                      |
| $r$ [ $\Omega$ ]              | Résistance rotorique   |
| $r_{kd}, r_{kq}$ [ $\Omega$ ] | Résistance d'amortisseurs                                    |
| $C_p$                         | Coefficient de puissance de la turbine éolienne              |
| $C_t$                         | Couple aérodynamique   |
| $C_{em}$                      | Couple électromagnétique de la GSRB                          |
| $C_g$                         | Couple sur l'arbre de la GSRB issu du multiplicateur         |
| $K_i$                         | Gain intégral  |
| $K_p$                         | Gain proportionnel   |
| $P, Q$                        | Puissances active et réactive statoriques                    |
| $S_a, S_b, S_c$               | États des interrupteurs hauts des trois bras de l'onduleur   |
| * ou $_{ref}$                 | Grandeur de référence  |

# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| Liste des figures   | I         |
| Liste des tableaux  | III       |
| Liste des Acronymes et Symboles   | IV        |
| Introduction générale   | 1         |
| <b>Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne</b>                                 | <b>3</b>  |
| <b>I.1</b> Introduction   | <b>3</b>  |
| <b>I.2</b> L'énergies renouvelables   | <b>3</b>  |
| <b>I.2.1</b> Energie éolienne   | <b>4</b>  |
| <b>I.2.2</b> Avantages et inconvénients de l'Energie Eolienne   | <b>5</b>  |
| <b>I.2.2.1</b> Avantages  | <b>5</b>  |
| <b>I.2.2.2</b> Inconvénients  | <b>5</b>  |
| <b>I.3</b> Aérogénérateur   | <b>6</b>  |
| <b>I.3.1</b> Types d'aérogénérateurs  | <b>7</b>  |
| <b>I.3.1.1</b> Eoliennes à axe vertical   | <b>7</b>  |
| <b>I.3.1.2</b> Eoliennes à axe horizontale  | <b>8</b>  |
| <b>I.4</b> Principes physiques de la conversion d'énergie éolienne  | <b>8</b>  |
| <b>I.4.1</b> Loi de BETZ  | <b>9</b>  |
| <b>I.5</b> Notions sur le vent  | <b>11</b> |
| <b>I.5.1</b> Direction et vitesse du vent   | <b>11</b> |
| <b>I.5.2</b> L'énergie disponible dans le vent  | <b>11</b> |
| <b>I.5.3</b> L'éolienne en Algérie et contexte actuel   | <b>12</b> |
| <b>I.5.3.1</b> Gisement éolien en Algérie   | <b>12</b> |
| <b>I.5.3.2</b> Carte des vents en Algérie   | <b>12</b> |
| <b>I.5.3.3</b> Capacité de production de l'énergie éolienne installée en Algérie                                    | <b>13</b> |
| <b>I.6</b> Conversion électromécanique  | <b>15</b> |
| <b>I.6.1</b> Eoliennes à Vitesse Fixe   | <b>15</b> |
| <b>I.6.2</b> Eoliennes à Vitesse Variable   | <b>16</b> |
| <b>I.7</b> Différents systèmes utilisés pour la conversion électromécanique   | <b>17</b> |
| <b>I.7.1</b> Génératrice synchrone à rotor bobiné   | <b>18</b> |
| <b>I.7.2</b> Génératrice synchrone à aimant permanent   | <b>18</b> |
| <b>I.7.2.1</b> Système de conversion unidirectionnel  | <b>19</b> |
| <b>I.7.2.2</b> Système de conversion bidirectionnel   | <b>19</b> |
| <b>I.8</b> Conclusion   | <b>20</b> |
| <b>Chapitre II : Modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants avec amortisseurs (MSRB)</b> | <b>21</b> |
| <b>II.1</b> Introduction  | <b>21</b> |
| <b>II.2</b> Description de la machine (MSRB)  | <b>21</b> |
| <b>II.2.1</b> Machines synchrones à pôles lisses (MSRBPL)   | <b>22</b> |
| <b>II.2.2</b> Machines synchrones à pôles saillants (MSRBPS)  | <b>23</b> |
| <b>II.2.3</b> Amortisseurs  | <b>23</b> |

|  |  |    |
|--|--|----|
| II.3   | Systèmes d'excitation  | 24 |
| II.4   | Bilan des puissances et rendement  | 24 |
| II.4.1   | Bilan des puissances actives   | 24 |
| II.4.2   | Rendement  | 25 |
| II.5   | Principe de fonctionnement   | 25 |
| II.5.1   | Alternateur  | 25 |
| II.5.1   | Moteur   | 26 |
| II.6   | Hypothèses simplificatrices  | 27 |
| II.6.1   | Modèle de la MSRB sur les axes réels   | 27 |
| II.6.1.1   | Expressions des inductances propres et mutuelles statorique et rotorique               | 28 |
| II.6.1.2   | Equations des tensions et des flux magnétiques   | 28 |
| II.6.2   | Modèle de la MSRB dans le repère de PARK   | 29 |
| II.6.2.1   | Transformation de Park   | 29 |
| II.6.2.2   | Modélisation et simulation de MSRB sans amortisseurs                                   | 30 |
| II.6.2.3   | Modélisation et simulation de MSRB avec amortisseurs                                   | 31 |
| II.7   | Représentation d'état de la génératrice synchrone                                      | 33 |
| II.8   | Simulation des génératrices synchrones à rotor bobiné à pôles saillants                | 34 |
| II.8.1   | Simulation sans amortisseurs   | 34 |
| II.8.1.1   | Essai à vide   | 34 |
| II.8.1.2   | Essai en court-circuit   | 35 |
| II.8.1.3   | Essai en charge  | 37 |
| II.8.2   | Simulation avec amortisseurs   | 38 |
| II.8.2.1   | Essai à vide   | 38 |
| II.8.2.2   | Essai en court-circuit   | 40 |
| II.8.2.3   | Essai en charge  | 41 |
| II.9   | Conclusion   | 42 |
| <b>Chapitre III : Caractéristiques statiques du générateur synchrone à rotor bobiné avec amortisseurs (MSRB)</b> |  | 43 |
| III.1  | Introduction   | 43 |
| III.2  | Présentation du banc d'essais  | 43 |
| III.3  | Caractéristiques des machines utilisées (Machine Synchrone+ Machine à courant continu) | 44 |
| III.4  | Identifications paramétriques de la machine synchrone                                  | 45 |
| III.4.1  | Mesures des résistances du stator et du rotor (Méthode Voltampère-métrique)            | 45 |
| III.4.1.a  | Mesure de la résistance des enroulements du stator                                     | 45 |
| III.4.1.b  | Mesure de la résistance des enroulements du rotor                                      | 46 |
| III.5  | Tous les essais faits dans laboratoire   | 47 |
| III.5.1  | Essais à vide et caractéristique interne à vitesse constante                           | 47 |
| III.5.1.a  | Schéma de montage  | 48 |
| III.5.1.b  | Procédure du teste   | 48 |
| III.5.1.c  | Résultats expérimentaux  | 48 |
| III.5.1.d  | Courbe   | 49 |
| III.5.1.e  | Interprétation des résultats   | 49 |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| <b>III.5.2</b>  | Essais en court-circuit permanent   | 50        |
| <b>III.5.2.a</b>  | Schéma de montage   | 50        |
| <b>III.5.2.b</b>  | Procédure du teste  | 51        |
| <b>III.5.2.c</b>  | Résultats expérimentaux   | 51        |
| <b>III.5.2.d</b>  | Courbe  | 51        |
| <b>III.5.2.e</b>  | Interprétation des résultats  | 52        |
| <b>III.5.3</b>  | Essais en charge et caractéristiques externes avec charge résistive ( $\cos \phi = 1$ ) | 52        |
| <b>III.5.3.a</b>  | Schéma de montage   | 52        |
| <b>III.5.3.b</b>  | Procédure du teste  | 53        |
| <b>III.5.3.c</b>  | Résultats expérimentaux   | 53        |
| <b>III.5.3.d</b>  | Courbe  | 54        |
| <b>III.5.3.e</b>  | Interprétation des résultats  | 54        |
| <b>III.5.4</b>  | Détermination de la modèle Potier   | 54        |
| <b>III.5.4.a</b>  | Détermination graphique des paramètres de Potier  | 55        |
| <b>III.5.4.b</b>  | Schéma de montage   | 56        |
| <b>III.5.4.c</b>  | Procédure du teste  | 56        |
| <b>III.5.4.d</b>  | Résultats expérimentaux   | 56        |
| <b>III.5.4.e</b>  | Courbe  | 57        |
| <b>III.5.4.f</b>  | Interprétation des résultats  | 57        |
| <b>III.6</b>  | Conclusion  | 57        |
| <b>Chapitre IV : Commande vectorielle du système éolien basé sur une GSRB</b> |   | <b>58</b> |
| <b>IV.1</b>   | Introduction  | 58        |
| <b>IV.2</b>   | Architecture générale (Schéma global Turbine/ Convertisseurs/ Génératrice/ Commande)    | 58        |
| <b>IV.3</b>   | Modélisation du circuit de puissance  | 59        |
| <b>IV.3.1</b>   | Modèle de la Turbine  | 59        |
| <b>IV.3.1.1</b>   | Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine éolienne                 | 59        |
| <b>IV.3.1.2</b>   | Energie mécanique transformée   | 59        |
| <b>IV.3.1.3</b>   | Modèle du Multiplicateur et l'arbre de transmission                                     | 61        |
| <b>IV.3.2</b>   | Convertisseur   | 62        |
| <b>IV.3.2.1</b>   | Modèle du Redresseur MLI  | 62        |
| <b>IV.3.2.2</b>   | Modèle de L'onduleur MLI  | 64        |
| <b>IV.3.2.3</b>   | Stratégie de la commande MLI naturelle (sinus triangle)                                 | 65        |
| <b>IV.3.3</b>   | Modèle de bus continu   | 66        |
| <b>IV.3.4</b>   | Modèle du filtre RL   | 67        |
| <b>IV.3.5</b>   | Modèle du transformateur  | 68        |
| <b>IV.3.6</b>   | GSRB  | 68        |
| <b>IV.4</b>   | Modélisation du circuit de commande   | 68        |
| <b>IV.4.1</b>   | Extraction du maximum de la puissance du vent   | 68        |
| <b>IV.4.1.1</b>   | Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation                                  | 69        |
| <b>IV.4.1.2</b>   | Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation                                  | 70        |
| <b>IV.4.2</b>   | Commande coté machine (CCM)   | 71        |
| <b>IV.4.2.1</b>   | Principe de la commande   | 72        |

|  |    |
|--|----|
| <b>IV.4.2.2</b> Commande des courants de la GSRB                               | 73 |
| <b>IV.4.2.3</b> Commande de la vitesse de la GSRB                              | 75 |
| <b>IV.5</b> Résultats de simulation (à vitesse constante / à vitesse variable) | 75 |
| <b>IV.6</b> Interprétation des résultats                                       | 77 |
| <b>IV.7</b> Conclusion   | 77 |
| <b><i>Conclusion générale</i></b>  | 79 |
| <b><i>Annexe A</i></b>   | 80 |
| <b><i>Annexe B</i></b>   | 82 |
| <b><i>Annexe C</i></b>   | 83 |
| <b><i>Bibliographies</i></b>   | 85 |
| <b><i>Résumé</i></b>   | 89 |

### *Introduction générale*

La recherche de systèmes de conversion des énergies renouvelables est un thème d'actualité ces dernières années. L'exploitation des énergies renouvelables génère théoriquement peu de polluants : notamment, l'électricité d'origine renouvelable émet très peu de  $CO_2$  notamment lorsqu'on la compare aux énergies fossiles comme le charbon. Pour cette raison, ces énergies sont notamment un vecteur privilégié de la lutte contre le réchauffement climatique. Elles sont aussi considérées comme un facteur de résilience car elles permettent des productions décarbonnées et décentralisées.

L'énergie éolienne est devenue l'un des secteurs d'énergie renouvelable les plus attractifs ces dernières années, dans le domaine de l'énergie renouvelable, devenant la deuxième énergie la moins chère parmi les sources d'énergie renouvelables, après l'hydroélectricité, avec des prix en baisse de plus de 25% entre 2010 et 2019 [1].

Cependant, au fil du temps, cette énergie a été utilisée pour générer de l'électricité. La première turbine éolienne capable de produire de l'électricité a été construite par le Danois Paul La Cour en 1891. Depuis lors, la technologie éolienne n'a cessé de s'améliorer, en particulier pendant les deux guerres mondiales lorsque le Danemark a dû faire face à une pénurie d'électricité. La crise pétrolière de 1974 a également stimulé la recherche et le développement des éoliennes [2,4].

Cependant, il reste encore des défis à relever en ce qui concerne la qualité et le coût de l'énergie éolienne [4,5]. L'un des principaux défis est d'assurer une conversion efficace de l'énergie éolienne et son intégration au réseau électrique, tout en respectant les normes de qualité et de tarification. Les derniers développements technologiques se concentrent sur l'utilisation de l'électronique de puissance, qui joue un rôle crucial dans la conversion de l'énergie éolienne [6,7].

Cependant, les composants électroniques peuvent produire des harmoniques et des pertes de commutation qui peuvent affecter la qualité de la tension produite et les performances globales du système [8,10].

Les fabricants cherchent également à améliorer les performances des générateurs synchrones, qui sont largement utilisés dans les installations industrielles et dans les convertisseurs d'énergie électromécaniques. Les générateurs synchrones couvrent une large gamme de puissance et représentent une part importante du marché. Dans le cadre de ce mémoire de master, l'objectif est de se concentrer sur le contrôle d'une génératrice synchrone à rotor bobiné (GSRB) avec des amortisseurs et des pôles pour des applications éoliennes. Cela nécessite la mise en place de lois de commande appropriées pour gérer efficacement l'énergie entre les différents éléments du système.

Effectivement, pour obtenir un système de contrôle de haute performance, il est essentiel d'avoir une réponse rapide et précise à la fois aux perturbations externes et aux variations des conditions de fonctionnement et des paramètres du processus. Dans notre mémoire, nous avons structuré votre manuscrit en quatre chapitres, suivis d'une conclusion et des perspectives. Voici un aperçu du contenu de chaque chapitre :

Le premier chapitre de notre mémoire porte sur la revue de la littérature, où nous abordons l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, en mettant l'accent sur les concepts physiques qui régissent leur fonctionnement. Nous présentons également les différents types d'éoliennes existantes, notamment les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous examinons également le développement de l'énergie éolienne

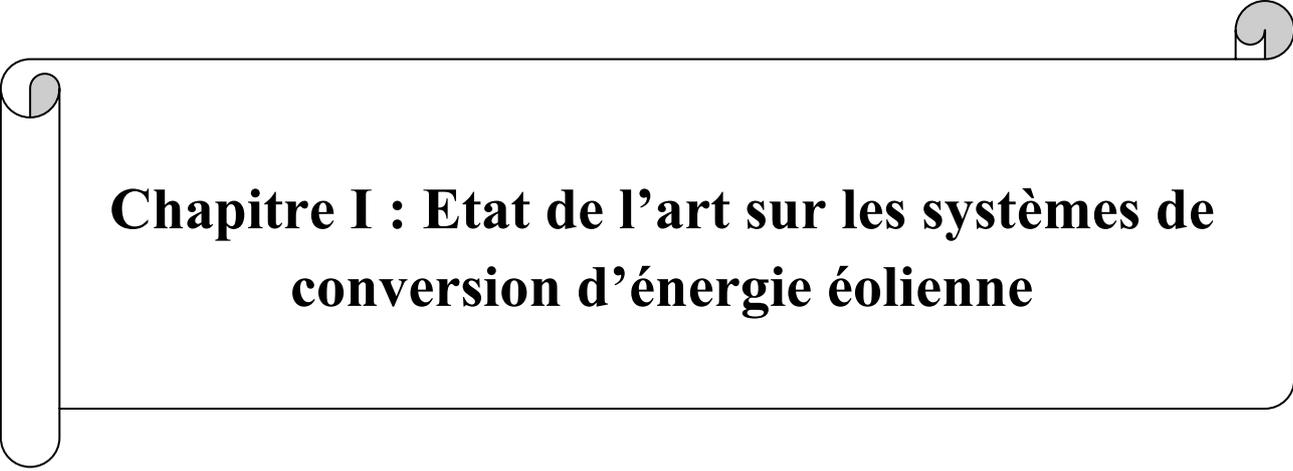
dans le monde et en Algérie, et nous abordons brièvement les générateurs synchrones et les convertisseurs associés à l'énergie éolienne.

Le deuxième chapitre concerne la modélisation d'une machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants avec amortisseurs dans le référentiel diphase  $dq$  de Park. Nous effectuons des simulations pour comprendre le comportement de la machine et des éléments du générateur lors de tests de différentes parties du modèle de manière indépendante.

Le troisième chapitre est dédié à la détermination des propriétés statiques d'une génératrice synchrone à rotor bobiné et amortisseurs. Nous présentons des études expérimentales en régime permanent, y compris des mesures de résistance de la machine, des tests en circuit ouvert et en court-circuit, ainsi que des tests en charge avec différents types de récepteurs disponibles au Laboratoire d'Automatique de Tlemcen (LAT).

Dans le quatrième chapitre, Nous présentez la commande de la chaîne de conversion d'énergie électrique basée sur une génératrice synchrone à rotor bobiné. Nous expliquons en détail chaque module, y compris le module de commande du convertisseur de courant continu vers courant continu (CCM) et le module de commande du convertisseur de courant continu vers courant alternatif (CCR). Nous abordons également les algorithmes de capture du point de puissance maximale (MPPT), la modélisation de l'onduleur et du redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) avec une commande sinus-triangle. Nous discutons également du contrôle de la connexion au réseau, en mettant en évidence l'adéquation de la MLI pour le contrôle des machines à courant alternatif. Nous appliquons la commande vectorielle basée sur des régulateurs proportionnel-intégral (PI) aux courants statoriques de la génératrice synchrone à rotor bobiné et aux courants traversant le filtre du côté du réseau.

Enfin, Nous présentons les résultats de simulation obtenus avec cette approche. Nous utilisons Matlab-Simulink pour les simulations présentées à la fin du mémoire.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and rounded corners on the right side. The text is centered within this border.

# **Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne**

### *1.1 Introduction :*

Face à la montée des prix du pétrole et à l'épuisement inéluctable des ressources d'énergie fossile à long terme, de nombreuses alternatives ont été envisagées. Le début du 21<sup>e</sup> siècle a connu une progression spectaculaire vers les énergies renouvelables, avec pour objectif ultime de se libérer de la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles. Récemment, cette tendance s'est accentuée, principalement pour des raisons environnementales.

En effet, la consommation intensive de combustibles fossiles traditionnels a des conséquences néfastes sur l'environnement. De plus, tous les pays sont désormais appelés à se joindre aux efforts internationaux de lutte contre le changement climatique. L'énergie éolienne est une forme d'énergie bien connue et utilisée depuis longtemps. Selon l'observatoire des énergies renouvelables, l'énergie éolienne est actuellement le secteur énergétique le plus dynamique au monde, bénéficiant d'un fort soutien en termes de développement et de commercialisation des éoliennes.

Au fil du temps, l'utilisation des ressources éoliennes est devenue de plus en plus efficace, et l'industrie éolienne a connu une croissance significative au cours de la dernière décennie. La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique joue un rôle crucial dans ce processus. De nombreux dispositifs utilisent principalement des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de contrôle visent à maximiser la capture de l'énergie éolienne afin d'améliorer la rentabilité des entreprises. Une bonne connaissance des propriétés du vent sur chaque site est essentielle pour une utilisation optimale des ressources éoliennes.

En ce qui concerne l'Algérie, les ressources éoliennes varient considérablement d'un endroit à l'autre en raison de la diversité de la topographie et du climat. Dans ce chapitre, nous aborderons brièvement le concept de l'énergie renouvelable, ainsi qu'un survol des systèmes de conversion de l'énergie éolienne et de leurs technologies associées. Nous présenterons également des statistiques sur la production mondiale d'énergie éolienne et l'utilisation de l'énergie éolienne en Algérie.

Étant donné les avantages remarquables de la machine synchrone à rotor bobiné dans les éoliennes, nous la présenterons en détail dans ce chapitre. Mettant en avant les avantages qu'ils offrent en termes de réduction des harmoniques dans les courants et tensions de sortie. Les détails des systèmes de contrôle seront analysés de manière approfondie dans les chapitres suivants.

### *1.2 L'énergies renouvelables*

Les mouvements écologiques sont préoccupés à la fois par le réchauffement global de l'atmosphère et par les risques réels ou perçus liés à l'énergie nucléaire. Ils souhaitent donc que les énergies renouvelables se développent plus rapidement qu'elles ne le font actuellement. Les énergies renouvelables, telles que la biomasse, l'hydroélectricité, le solaire thermique ou photovoltaïque, l'énergie éolienne et l'énergie marémotrice, contribuent actuellement à hauteur de 18 % de la demande énergétique mondiale, ce qui les place en avant du nucléaire. Ces sources d'énergie renouvelables ne dépendent pas de réserves statiques, contrairement aux énergies fossiles. Cependant, elles ne sont pas capables de fournir des puissances aussi élevées que les énergies fossiles et nucléaires en raison de leur concentration énergétique relativement faible.

Il existe également des énergies d'origine gravitationnelle, telles que l'énergie marémotrice, qui est produite à partir des marées, ainsi que d'autres énergies d'origine terrestre, comme la géothermie. Ces sources d'énergie tirent parti des forces gravitationnelles ou de la chaleur interne de la Terre pour générer de l'énergie. Les mouvements écologiques encouragent le développement

et l'utilisation de ces diverses sources d'énergie renouvelable afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de diminuer la dépendance aux combustibles fossiles et à l'énergie nucléaire. Cependant, ils reconnaissent également que ces énergies renouvelables ont des limites en termes de puissance énergétique et nécessitent une combinaison de différentes sources pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux [11].

### 1.2.1 Energie éolienne

Le terme « Énergie éolienne » décrit le processus par lequel le vent est utilisé pour produire de l'énergie mécanique ou électrique. Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette puissance mécanique peut être utilisée pour des tâches spécifiques (par exemple, moulin à grain ou pompage de l'eau), ou un générateur peut convertir cette énergie mécanique en électricité.

Il existe plusieurs organismes de recherche de l'énergie éolienne dans le monde, comme le conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC), National Renewable Energy Laboratory (NREL), et American Wind Energy Association (AWEA). Selon un rapport GWEC [12], environ 12% de la demande totale d'électricité du monde peut être alimentée par l'énergie éolienne. Actuellement, ce chiffre indique l'importance de la recherche de l'énergie éolienne.

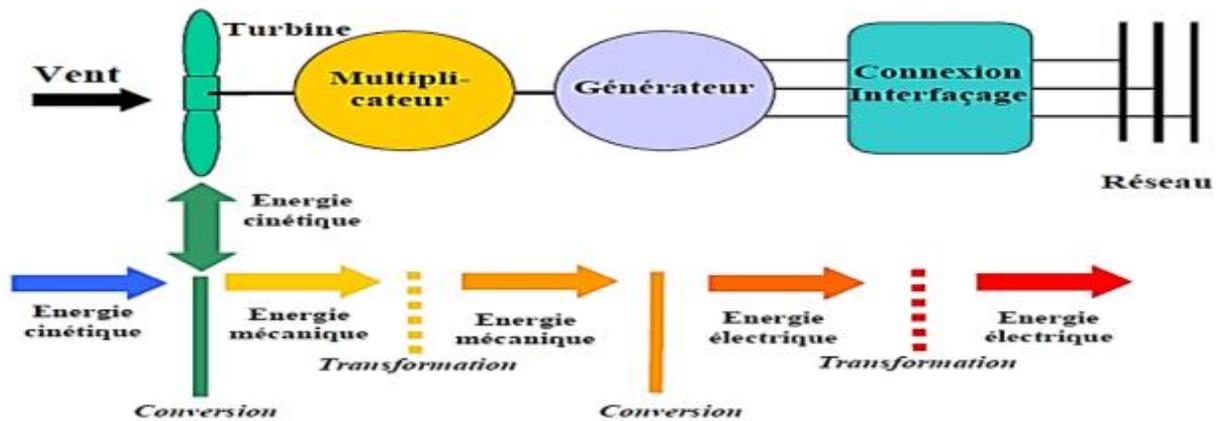


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [13].

Un aérogénérateur, ou éolienne, est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui peut ensuite être transformée en énergie électrique par le biais d'une génératrice. L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable qui n'est pas épuisable et est largement répartie géographiquement. Cependant, sa disponibilité peut varier en fonction des saisons. L'un des avantages majeurs de l'énergie éolienne est qu'elle ne génère pas d'émissions atmosphériques ni de déchets radioactifs, contrairement à l'énergie nucléaire ou aux combustibles fossiles. Elle contribue donc à réduire les impacts sur l'environnement et à lutter contre le changement climatique. L'énergie éolienne est également considérée comme une forme d'électricité décentralisée, ce qui signifie qu'elle peut être produite localement, près des zones de consommation, réduisant ainsi les pertes d'énergie liées au transport sur de longues distances. Cependant, le déploiement d'éoliennes nécessite des infrastructures importantes, notamment des mâts de grande taille et des pales pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres de long pour les éoliennes de plusieurs mégawatts. Il est également essentiel de les installer dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les turbulences qui pourraient affecter leur efficacité. La recherche continue dans le domaine de l'énergie éolienne vise à améliorer la technologie des

éoliennes, à optimiser leur rendement, à réduire les coûts de production et à résoudre les défis techniques et environnementaux associés à leur déploiement à grande échelle [14, 15].

### ***1.2.2 Avantages et inconvénients de l'Énergie Éolienne***

L'utilisation croissante et rapide de l'énergie éolienne dans le monde est liée aux avantages qu'elle offre.

#### ***1.2.2.1 Avantages***

- Propre et respectueuse de l'environnement : L'énergie éolienne ne produit pas de pollution atmosphérique ni de déchets radioactifs, contribuant ainsi à réduire les émissions de gaz à effet de serre et les impacts sur la santé et l'environnement [16].
- Inépuisable : Le vent est une ressource renouvelable, ce qui signifie qu'il ne s'épuise pas. Il est disponible de manière continue, ce qui garantit une source d'énergie stable à long terme [15, 17].
- Réduction des émissions : L'utilisation de l'énergie éolienne permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>2</sub>, qui sont responsables de problèmes environnementaux tels que les pluies acides et le réchauffement climatique [16].
- Facilité d'installation : L'installation des éoliennes est relativement simple par rapport à celle des centrales conventionnelles, ce qui permet une mise en service plus rapide et une flexibilité accrue [16, 18].
- Durée de vie et démontage facile : Les éoliennes modernes ont une durée de vie pouvant atteindre 25 ans et les parcs éoliens peuvent être facilement démontés sans laisser de traces [19].
- Énergie universelle : L'énergie éolienne est disponible dans de nombreux pays, ce qui la rend accessible à un plus grand nombre de régions. Elle offre une alternative moins coûteuse par rapport à d'autres sources d'énergie renouvelable [20].
- Intégration dans les systèmes électriques existants : L'énergie éolienne peut être facilement intégrée dans les réseaux électriques existants, ce qui la rend particulièrement intéressante pour les pays en voie de développement [16].

#### ***1.2.2.2 Inconvénients***

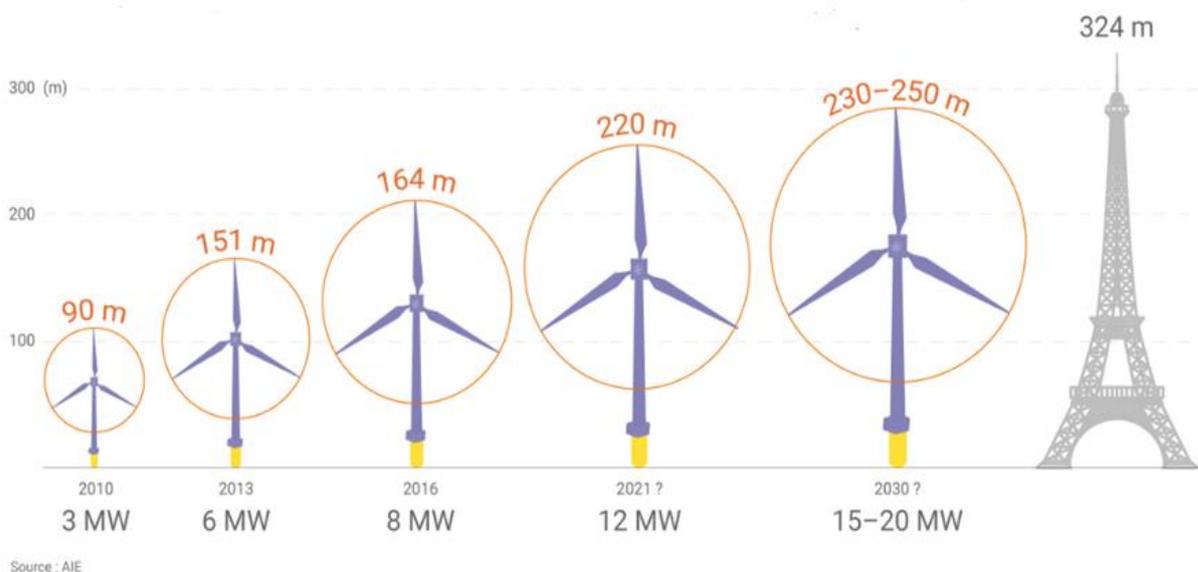
- Bruit : Les éoliennes peuvent produire des bruits mécaniques et aérodynamiques, ce qui peut être perçu comme une nuisance sonore par les personnes vivant à proximité [16].
- Variabilité de la production : La production d'énergie éolienne dépend de la vitesse du vent, qui peut être variable. Cela peut entraîner une qualité d'énergie électrique moins constante [16].
- Risques d'accidents : Les éoliennes peuvent présenter des risques d'accidents, notamment lors de fortes vitesses de vent, qui peuvent endommager les structures du système [16].
- Interférences avec les ondes hertziennes : Les parcs éoliens peuvent perturber la propagation et la réception des ondes hertziennes utilisées pour les communications sans fil.
- Impacts visuels : Certains considèrent les éoliennes comme des éléments indésirables dans le paysage, ce qui peut susciter des oppositions lors de leur installation.
- Dépendance aux conditions météorologiques : L'énergie éolienne est tributaire des conditions météorologiques, ce qui peut entraîner une disponibilité intermittente et une production d'énergie moins prévisible [21].

## ***1.3 Aérodynamique***

Un aérodynamique, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [15].

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories :

- Éoliennes de petite puissance : Ce sont des éoliennes dont la puissance nominale est inférieure à 40 kW. Elles sont souvent utilisées pour alimenter des applications spécifiques telles que les maisons individuelles, les exploitations agricoles, les systèmes de pompage d'eau ou les installations isolées.
- Éoliennes de moyenne puissance : Ces éoliennes ont une puissance nominale comprise entre 40 kW et quelques centaines de kilowatts. Elles sont généralement utilisées pour alimenter des bâtiments plus importants tels que des fermes, des complexes résidentiels ou des petites industries.
- Éoliennes de forte puissance : Ce sont des éoliennes dont la puissance nominale est supérieure à 1 MW (mégawatt). Elles sont principalement utilisées dans les parcs éoliens commerciaux et sont conçues pour produire de l'électricité à grande échelle et se connecter au réseau électrique.



**Figure I.2 :** Evolution de la taille et de la puissance des nouvelles unités de production [22]

### 1.3.1 Types d'aérodynamique

Les turbines éoliennes peuvent être classées en deux groupes principaux en fonction de l'orientation de leur axe de rotation : les turbines à axe horizontal (HAWT, Horizontal Axis Wind Turbine) et les turbines à axe vertical (VAWT, Vertical Axis Wind Turbine). Les turbines éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues et les plus largement utilisées. Elles sont composées d'un rotor à plusieurs pales qui est monté sur un axe horizontal et qui tourne face au vent. Ce type de turbine éolienne est généralement utilisé dans les parcs éoliens terrestres et offshore, où les vents sont plus réguliers et constants. Les turbines à axe horizontal sont efficaces pour capturer le vent

dans des conditions de vent élevé et produire une quantité importante d'électricité. Les turbines éoliennes à axe vertical, quant à elles, ont leur rotor monté sur un axe vertical, ce qui leur permet de capturer le vent de toutes les directions, sans nécessiter d'orientation particulière. Ces turbines sont souvent utilisées dans des applications plus spécifiques, telles que les éoliennes urbaines, les installations résidentielles ou les systèmes de petite échelle. Elles peuvent être plus adaptées dans des zones où les vents sont plus variables ou présentent des directions changeantes. Il convient de noter que les deux types de turbines éoliennes ont leurs avantages et leurs inconvénients en termes d'efficacité, de coût, d'impact visuel et de facilité d'installation. Le choix entre une turbine à axe horizontal ou à axe vertical dépendra des conditions spécifiques du site et des objectifs du projet [23].

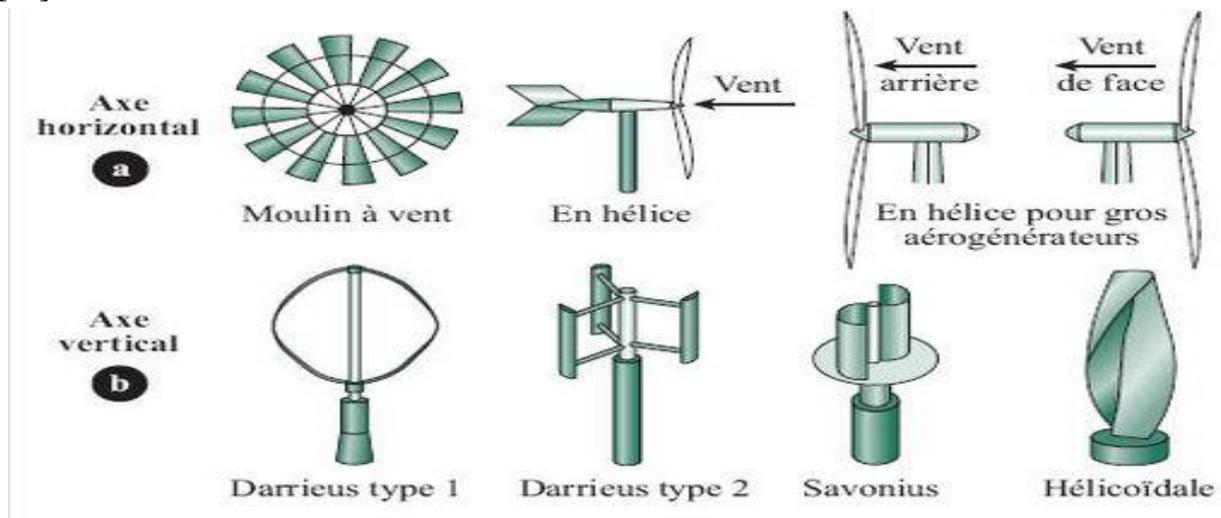


Figure I.3 : Les Différents types d'éolienne [24]

### 1.3.1.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été parmi les premières structures développées pour la production d'électricité à partir de l'énergie éolienne. Ces éoliennes ont certains avantages par rapport à leurs homologues à axe horizontal. Leur conception cylindrique et leur structure compacte les rendent moins imposantes et plus discrètes sur le paysage environnant, ce qui peut être un avantage dans certaines applications, notamment en milieu urbain. Étant donné que leur conception leur permet de capturer le vent de toutes les directions, elles sont moins sensibles aux variations de direction du vent. En outre, les éoliennes à axe vertical peuvent être plus facilement installées sur des structures existantes, telles que les toits des maisons ou les bâtiments. Elles ont généralement une efficacité énergétique inférieure à celle des éoliennes à axe horizontal, ce qui signifie qu'elles peuvent produire moins d'électricité pour une surface donnée [25].

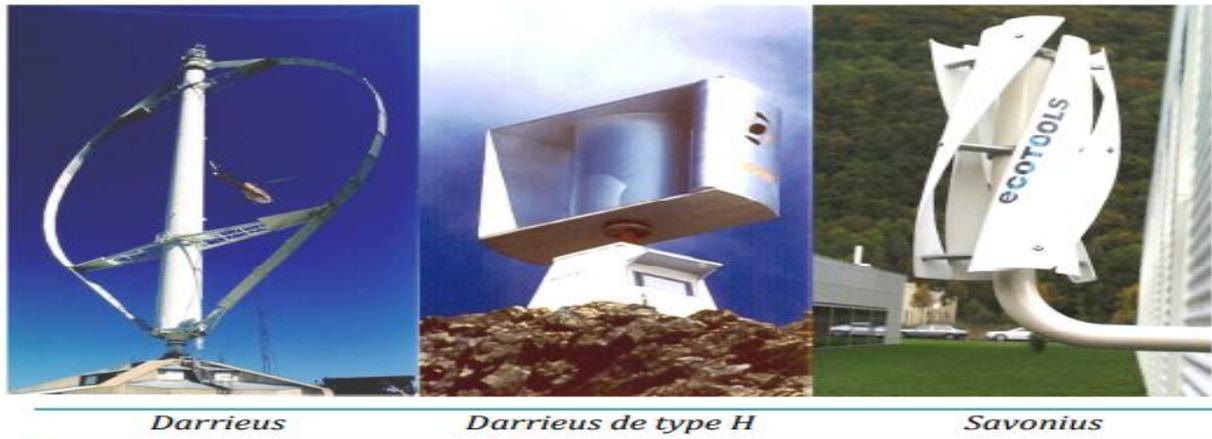


Figure I.4 : technologie éolienne à axe vertical [13].

### I.3.1.2 Eoliennes à axe horizontale

La majorité des éoliennes présentes sur le marché appartiennent à la catégorie des éoliennes à axe horizontal. Ces éoliennes ont leur axe de rotation à l'horizontale, parallèle à la direction du vent. Elles sont généralement composées d'une à trois pales profilées aéro\_dynamiquement. Les éoliennes à axe horizontal ont pris le dessus sur les éoliennes à axe vertical pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elles sont généralement moins coûteuses à fabriquer et à installer. Cependant, les éoliennes à axe vertical ont également leur place dans des applications spécifiques, notamment en milieu urbain où l'espace est limité ou lorsque des caractéristiques spécifiques telles que la tolérance aux vents forts sont recherchées [26].



Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales.



Figure I.5 : éolienne a axe horizontal [27].

### I.4 Principes physiques de la conversion d'énergie éolienne

Le vent, une des premières ressources naturelles, utilisée pour faciliter la vie au quotidien de l'homme. Maîtriser la force du vent, permet aujourd'hui de produire de l'électricité, grâce à l'énergie éolienne. Le principe est le même que celui d'une bonne dynamo de vélo. Les pales, elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice, tournent grâce au vent et entraîne la génératrice qui produit l'électricité. L'éolienne est donc ni plus ni moins qu'un aérogénérateur, s'inspirant du procédé des moulins à vent. L'éolienne est généralement composée de trois pales, qui sont portées

par un rotor et fixées en haut d'un mat. C'est un moteur électrique qui permettra d'orienter les pales de manière à ce qu'elles se trouvent continuellement face au vent [28].

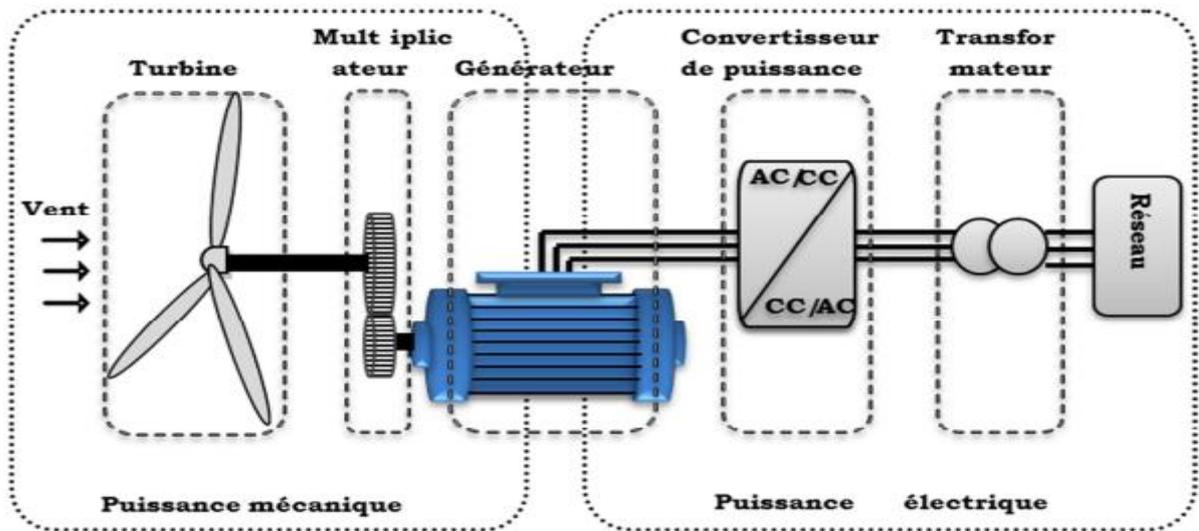


Figure I.6 : Principaux organes du système de conversion éolien [28].

Le mouvement des pales transforme l'énergie cinétique (énergie que possède un corps par son mouvement et s'exprime en joule) du vent en énergie mécanique (quantité d'énergie emmagasinée). La vitesse de rotation se trouve être en fonction de la taille des pales. Plus les pales sont petites et plus elles tournent rapidement. En moyenne on peut dire qu'elles tournent entre 10 et 25 tours/minutes.

Le rôle du générateur est ensuite de transformer cette énergie mécanique, en énergie électrique pour les besoins de l'homme. Les besoins d'un générateur sont d'environ 1000 à 2000 tours/minutes afin de produire une quantité d'électricité idéale. C'est la raison pour laquelle un multiplicateur est utilisé afin d'accélérer le mouvement des pales [29].

#### 1.4.1 Loi de BETZ

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « Le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse et à l'infini aval d'une vitesse » [30].

Considérons le système de vent horizontal illustré à la Figure I.7, qui montre la vitesse du vent  $v_1$  devant l'éolienne et la vitesse  $V_2$  derrière l'éolienne.

En supposant que la vitesse du vent à travers le rotor est la moyenne de la vitesse du vent non perturbé devant l'éolienne  $V_1$  et de la vitesse du vent après avoir traversé le rotor  $V_2$ , c'est-à-dire  $H(V_1 + V_2)/2$ , est la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  à travers la surface  $S$  des pales :

$$M = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (1.1)$$

La puissance  $P_{aér}$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_{aér} = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

Soit en remplaçant par son expression dans (1.1):

$$P_{aér} = \rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot \frac{V_1^2 - V_2^2}{4} \quad (1.3)$$

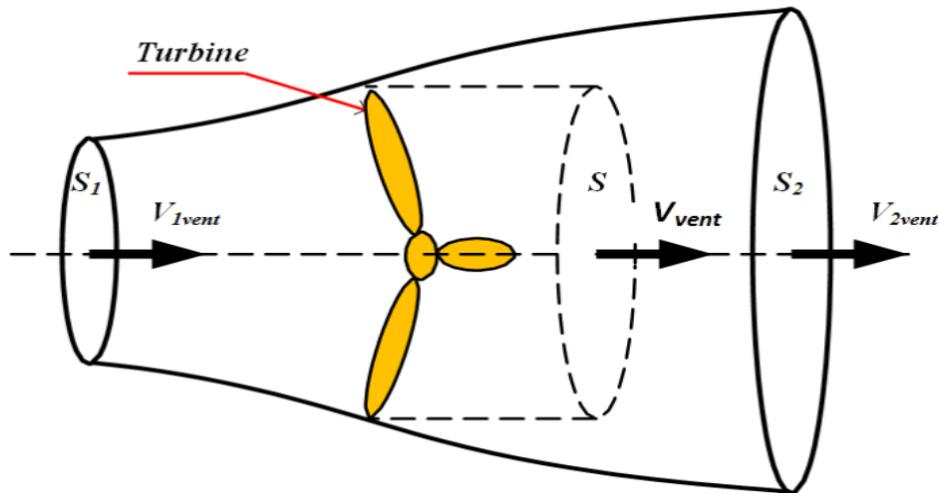


Figure I.7 : Tub de courant d'air autour d'une éolienne [31].

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse, la puissance correspondante serait alors :

$$P_v = \rho \cdot \frac{S V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement Disponible est alors :

$$\frac{P_{aér}}{P_v} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{V_1}{V_2} \right) \left( 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right) = C_p \quad (1.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus **Figure I.8** on s'aperçoit que le ratio  $P_m/P_v$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de  $16/27$  soit  $0,59$ . C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [30].

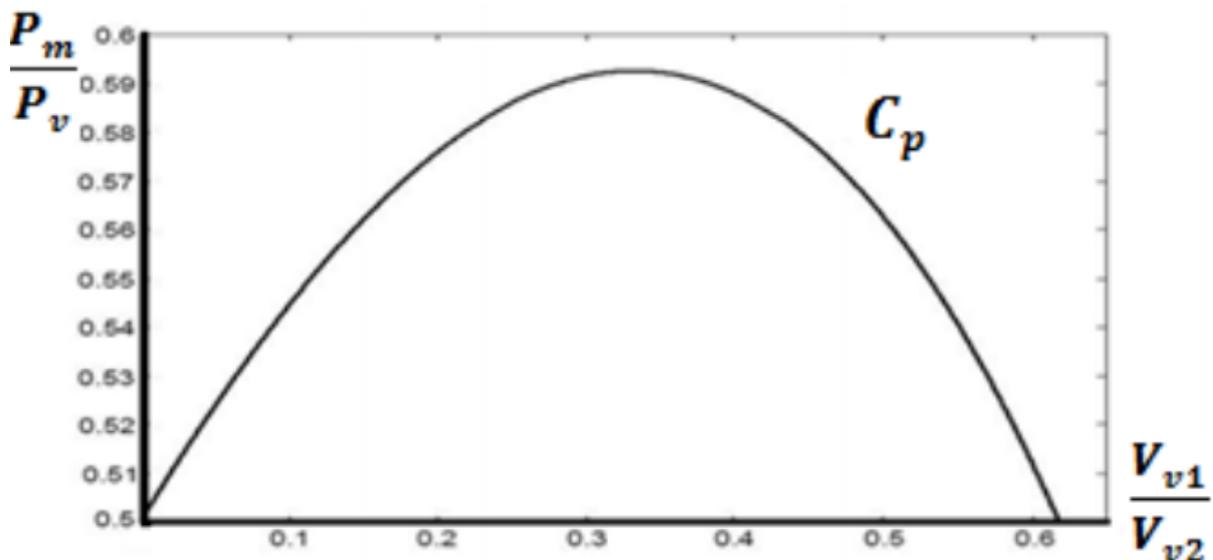
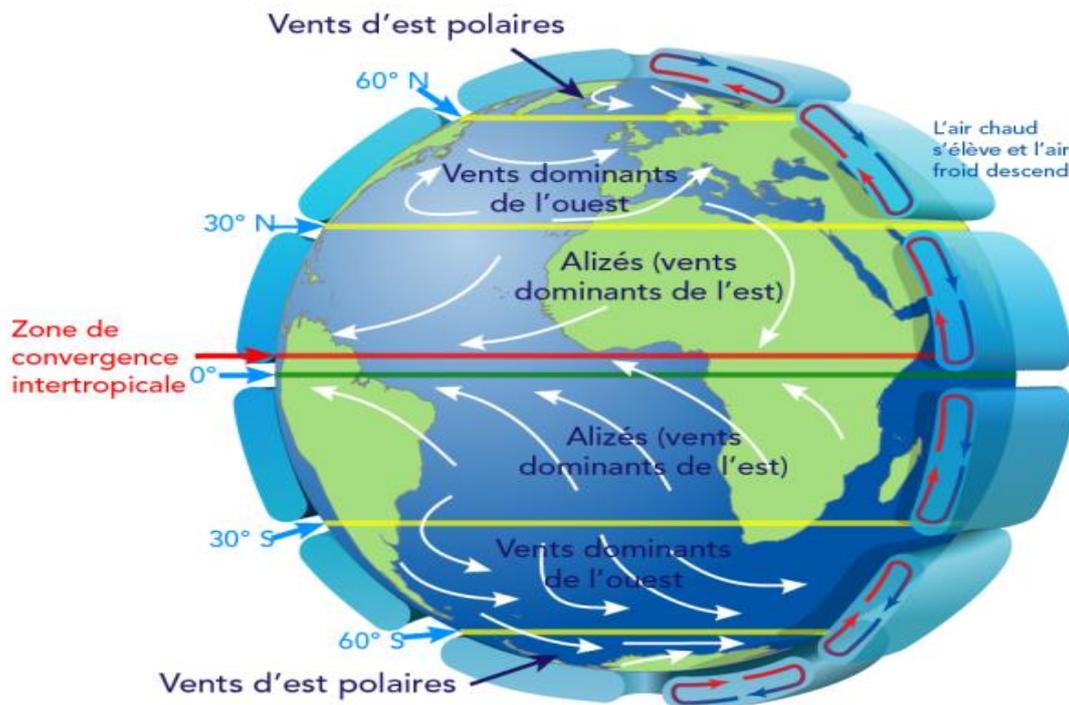


Figure I.8 : Coefficient de puissance [32].

### I.5 Notions sur le vent

#### I.5.1 Direction et vitesse du vent

Le vent souffle à partir des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et grandes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère Sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Une graduation a été établie, selon l'échelle beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories [33].



**Figure I.9 :** Circulation du vent dans le monde [34].

#### I.5.2 L'énergie disponible dans le vent

L'énergie éolienne représente une source d'énergie courante pour la nouvelle production d'électricité et un acteur important sur le marché mondial de l'énergie. En tant que technologie énergétique de pointe, la maturité technique et la vitesse de déploiement de l'énergie éolienne sont reconnues, tout comme le fait qu'il n'y a pas de limite supérieure pratique au pourcentage de vent pouvant être intégré dans le système électrique [35]. On estime que l'énergie solaire totale reçue par la terre est d'environ  $1,8 \times 10^{11}$  MW. De cet apport solaire, seulement 2 % (soit  $3,6 \times 10^9$  MW) sont convertis en énergie éolienne et environ 35 % de l'énergie éolienne est dissipée à moins de 1000 m de la surface de la terre [36].

Par conséquent, l'énergie éolienne disponible qui peut être convertie en d'autres formes d'énergie est d'environ  $1,26 \times 10^9$  MW. Comme cette valeur représente 20 fois le taux de consommation d'énergie mondiale actuelle, l'énergie éolienne pourrait en principe répondre à la totalité des besoins énergétiques de la planète. Par rapport aux sources d'énergie traditionnelles, l'énergie éolienne présente un certain nombre de bénéfices et d'avantages. Contrairement aux

combustibles fossiles qui émettent des gaz nocifs et à l'énergie nucléaire qui génère des déchets radioactifs, l'énergie éolienne est une source d'énergie propre et respectueuse de l'environnement. En tant que source d'énergie inépuisable et gratuite, elle est disponible et abondante dans la plupart des régions du globe. En outre, une utilisation plus étendue de l'énergie éolienne contribuerait à réduire la demande de combustibles fossiles, qui pourraient s'épuiser au cours de ce siècle, si l'on en croit leur consommation actuelle. En outre, le coût du kWh de l'énergie éolienne est bien inférieur à celui de l'énergie solaire [37].

### *1.5.3 L'éolienne en Algérie et contexte actuel*

#### *1.5.3.1 Gisement éolien en Algérie*

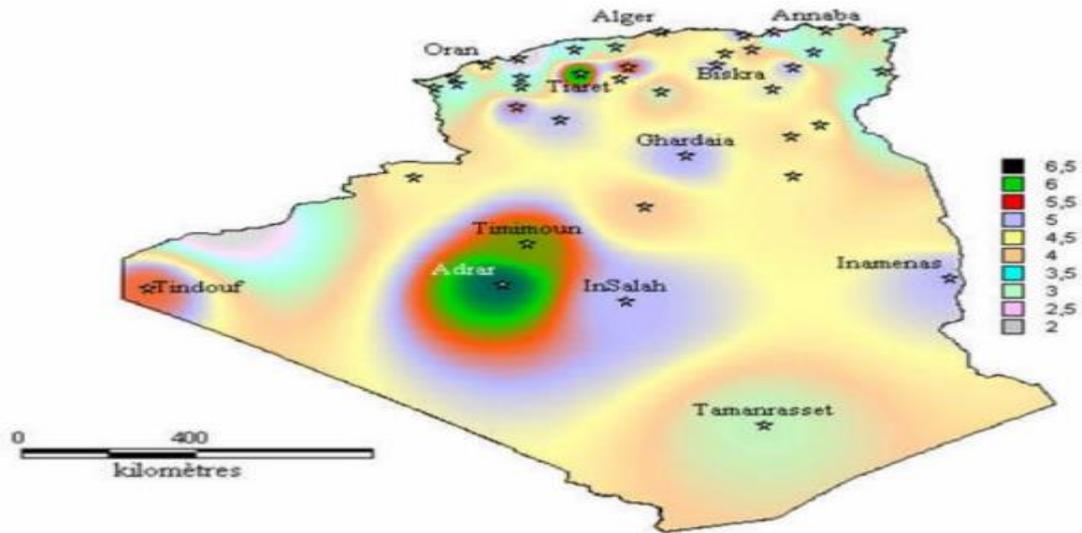
En Algérie, de nombreux habitants des zones rurales n'ont pas accès à l'électricité, et il existe un besoin important en eau potable et en irrigation. Ces besoins représentent un marché potentiel pour les technologies d'énergie renouvelable.

L'Algérie s'est engagée avec détermination dans la transition vers les énergies renouvelables afin de relever les défis environnementaux et de préserver ses ressources énergétiques fossiles. Elle constitue l'axe principal du programme de développement des énergies renouvelables en Algérie [38]. Le photovoltaïque occupent une place essentielle dans ce programme. Le solaire thermique est utilisé pour la production d'eau chaude sanitaire, de chauffage et de climatisation, tandis que le solaire photovoltaïque permet la production d'électricité à partir de la conversion directe de la lumière du soleil [39]. Parallèlement, l'intérêt pour l'énergie éolienne en Algérie a également connu une croissance significative. Depuis 1984, de nombreuses études ont été menées pour évaluer le potentiel éolien du pays. L'exploitation de ce potentiel éolien pourrait contribuer à diversifier le mix énergétique de l'Algérie et à fournir une source d'électricité propre et renouvelable.

En développant les énergies renouvelables, l'Algérie cherche à répondre aux besoins énergétiques des communautés rurales non raccordées au réseau, tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et en contribuant à la lutte contre le changement climatique. Les initiatives dans le domaine des énergies renouvelables visent à apporter des solutions durables et à assurer un avenir énergétique plus propre pour le pays [40].

#### **1.5.3.2 Carte des vents en Algérie :**

Effectivement, pour déterminer la faisabilité d'un parc éolien dans une région donnée, il est essentiel d'estimer l'énergie éolienne disponible. Cela implique la réalisation d'un atlas éolien de la région, qui permet de quantifier le gisement énergétique éolien. En Algérie, plusieurs travaux ont été réalisés pour établir l'Atlas du vent. En 2000, Kasbadji-Marzouk a tracé la carte des vents en utilisant les données recueillies en 1990 par Hammouch. En 2011, Chellali et al. ont contribué à la mise à jour de la carte des vents en utilisant 37 points de mesure à travers le pays [3].



**Figure I.10 :** Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) en Algérie [41].

Selon la cartographie représentée à la figure I.10, le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre, mais on peut dire que le meilleur potentiel d'énergie éolienne est dans le sud du pays et particulièrement dans la région du sud-ouest où la vitesse du vent est plus grande que 6 m/s.

Cette évaluation du potentiel éolien permet de déterminer les zones où les conditions sont les plus favorables pour l'implantation de parcs éoliens. Elle aide les développeurs à prendre des décisions éclairées en matière de planification et d'investissement dans l'énergie éolienne, en maximisant le rendement énergétique et la rentabilité des installations.

### ***1.5.3.3 Capacité de production de l'énergie éolienne installée en Algérie***

La première éolienne qui a été installée en Algérie revient à la période en 1953 par « le Service de la Colonisation et de l'Hydraulique » relevant des militaires, qui contrôlaient les territoires du sud algérien. Actuellement, elle existe à l'intérieur de la station de l'Institut National de Recherche Agronomique d'Adrar. Constitué d'un mat de 24 m surmonté d'une hélice à trois pales d'un diamètre de 15 m [42].



**Figure I.11:** Photo de la première éolienne installée en Algérie [42].

Jusqu'à maintenant, la puissance extraite à partir des énergies renouvelables installée en Algérie est insignifiante, au moins par rapport à ses voisins. L'énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le programme est lancé à la fin de l'année 2011 et supposé générer 22 GW en 2030. Dans ce cadre, la wilaya d'Adrar a bénéficié, à la faveur d'un partenariat algéro-français, d'un projet de ferme de 12 éoliennes de 850 kW chacune, localisée dans la zone de Kabertene. Les éoliennes fournies par l'Espagnol Gamesa délivrent leurs 10 MW de puissance à la vitesse de 8 m/s du vent. Ces éoliennes sont connectées au réseau de transport.



**Figure I.12** : La ferme éolienne à Adrar [29].

L'Algérie a fixé des objectifs ambitieux pour l'intégration des énergies renouvelables dans son mix énergétique. Au cours de la première phase du programme, l'objectif est d'atteindre un taux d'intégration de 50%. Cela signifie que 50% de la capacité de production d'électricité proviendra de sources d'énergie renouvelable. Cependant, sur la période de 2021 à 2030, l'Algérie vise à augmenter ce taux d'intégration à plus de 80%. Cela permettra de réduire la dépendance aux importations et de favoriser le développement de l'industrie éolienne locale. En parallèle, l'Algérie s'efforce de développer un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements de la nacelle, qui est une partie essentielle des éoliennes. En encourageant la production nationale des composants clés des éoliennes, le pays vise à renforcer sa souveraineté énergétique et à créer des emplois dans le secteur des énergies renouvelables. Ces initiatives visent à accélérer la transition énergétique de l'Algérie vers des sources d'énergie plus propres et durables, tout en stimulant la croissance économique et en créant des opportunités d'emploi dans le secteur des énergies renouvelables [29].

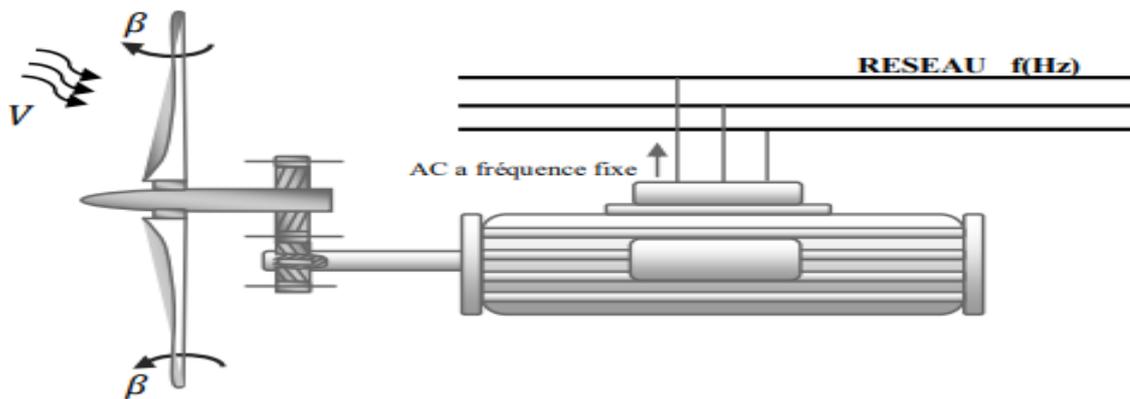
### ***1.6 conversion électromécanique***

Dans cette section, la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique sera présentée. Les technologies d'éoliennes les plus couramment utilisées seront ensuite discutées en se focalisant sur celles utilisant la machine synchrone à aimants permanents.

Selon le mode de fonctionnement, il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles à vitesse fixe et l'autre à vitesse variable. La partie suivante décrit le fonctionnement de ces deux technologies et les différentes structures.

#### ***1.6.1 Les Eoliennes à Vitesse Fixe***

Ces éoliennes sont les premières à utiliser la technologie développée. Les générateurs sont généralement des machines asynchrones à cage d'écureuil qui fonctionnent à des vitesses légèrement plus élevées à celle du synchronisme et sont connectées directement au secteur sans convertisseur de puissance. Sa vitesse machine fixe est déterminée par la fréquence du réseau et le nombre de paires de pôles. Le contrôle des performances de ce type de système se fait au niveau de la turbine par pas variable des pales de l'éolienne pour obtenir un décrochage aérodynamique ou un fonctionnement synchrone. Il a un multiplicateur vitesse pour s'adapter à la vitesse de la turbine et de la générateur [43-45].



**Figure I.13 :** Eolienne à vitesse fixe.

1. Les principaux avantages de ce type d'éoliennes sont [46-48]:
  - Facile à installer.
  - Absence de convertisseur de puissance pour le contrôle.
  - Haute fiabilité.
  - Faible coût.
2. Ce système possède beaucoup d'inconvénients lors de l'exploitation de l'énergie extraite à savoir [46-48]:
  - Puissance d'extraction non optimisée (maximum théorique manquant).
  - Très faible performance dans les vents légers et moyens.
  - Un entretien régulier de la boîte de vitesses est nécessaire.
  - Perte de contrôle de la puissance réactive.
  - Manque de contrôle du système de magnétisation du générateur.

### ***1.6.2 Les Eoliennes à Vitesse Variable***

Dans le deuxième cas **Figure I.14**, une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la génératrice électrique [49].

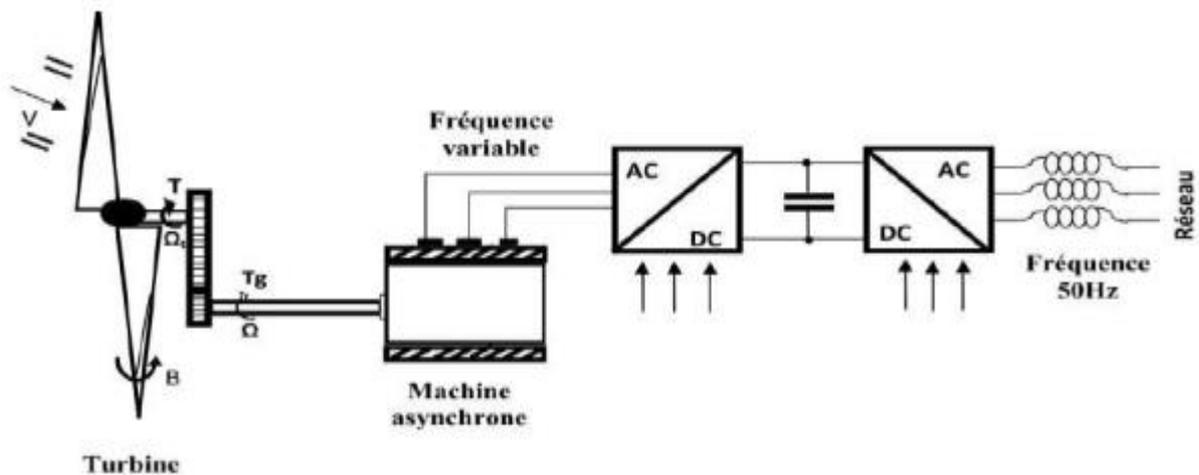


Figure I.14 : Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage [49].

Une série de courbes indiquant la puissance disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent est illustrée à la Figure I.15. Il ressort de ces courbes que le maximum théorique de la courbe de puissance n'est pas utilisé lorsque le générateur est entraîné à vitesse constante. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement par rapport à la puissance consommée, il est nécessaire de pouvoir régler la vitesse de l'arbre du générateur en fonction de la vitesse du vent.

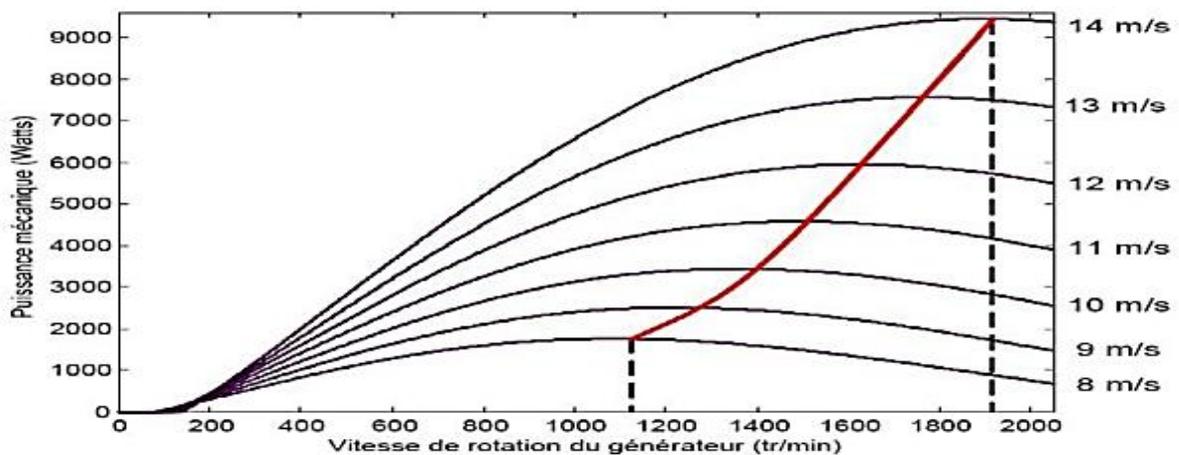


Figure I.15 : Puissance produite par la turbine [49].

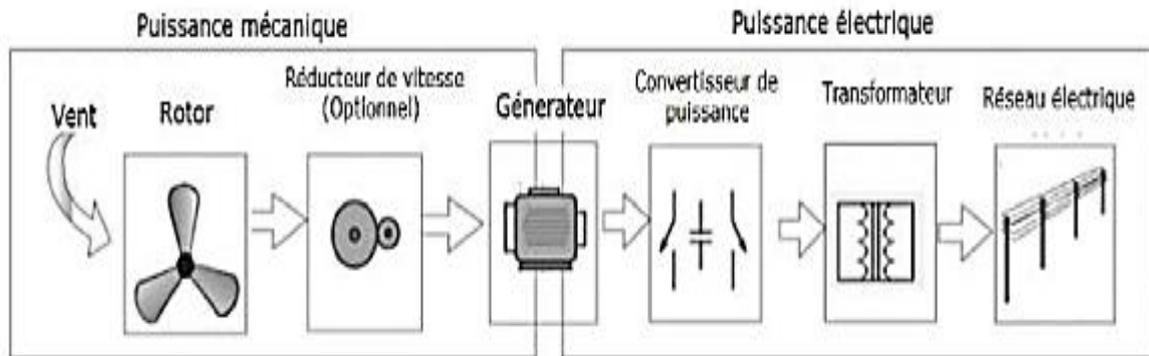
Compte tenu de ces caractéristiques, il devient clair que le maximum théorique de la courbe de puissance n'est pas utilisé lorsque l'éolienne et le générateur fonctionnent à une vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure I.15). Pour optimiser le transfert de puissance et obtenir des maxima théoriques pour chaque vitesse de vent, le générateur de cet exemple doit pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min [33].

### I.7 Différents systèmes utilisés pour la conversion électromécanique

La technologie des éoliennes a évolué au fil du temps avec les progrès de l'électronique de puissance. Par conséquent, il existe différents types de machines électriques qui agissent comme des générateurs dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Ces machines nécessitent

des propriétés spécifiques dont les spécifications dépendent du type et des dimensions géométriques.

Le schéma ci-dessous montre les différentes étapes de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique utilisable par le réseau électrique [50].



**Figure I.16:** Chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électriques

Pour les petites puissances ( $< 20$  kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ [51], le générateur asynchrone est plus courant et économique [23]. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans les paragraphes suivants :

### ***1.7.1 Génératrice synchrone à rotor bobiné***

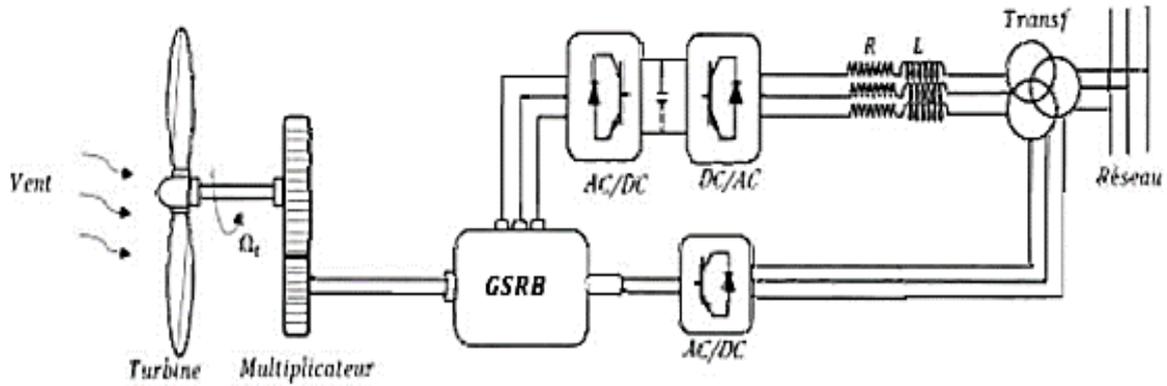
Dans ce type, les enroulements du stator ne peuvent pas être connectés directement au réseau, car la fréquence de la tension générée fluctue en fonction de la vitesse du rotor et donc de la vitesse du vent. Pour ce faire, le stator doit être connecté au réseau via un convertisseur dos-à-dos séparé par un bus CC (voir Figure I.17). Un convertisseur côté rotor convertit la tension générée par le générateur en une tension continue, ce qui permet également de contrôler la vitesse. Le bus DC agit comme un régulateur de tension DC et se comporte normalement comme une source de tension. Un convertisseur côté rotor permet de convertir la tension continue en une tension alternative avec une amplitude et une fréquence similaire à l'alimentation secteur. Il récupère également la puissance maximale pour alimenter le réseau et compense la puissance réactive [52, 53].

Ce type de génératrice présente plusieurs avantages par rapport à d'autres types tels que :

- Efficacité supérieure par rapport aux générateurs asynchrones car il utilise le courant du stator pour générer un couple électromagnétique.
- Fonctionnement sur une large plage de vitesse [52, 53].

Cependant, ce système à base de GSRB nécessite une maintenance régulière du système de contact glissant et nécessite un circuit d'excitation externe sécurisé par un redresseur en

réseau.



**Figure I.17 :** Système d'éolienne avec une génératrice synchrone à rotor bobiné

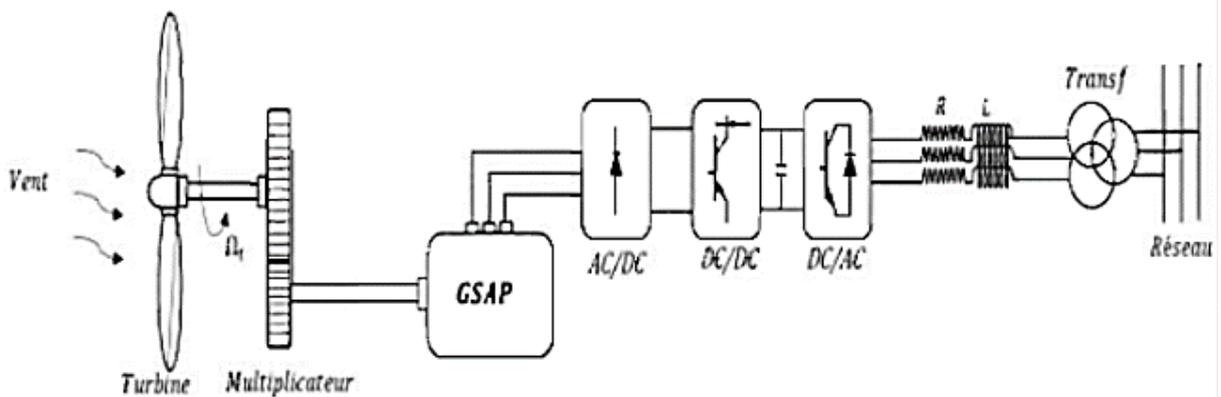
### 1.7.2 Génératrice synchrone à aimant permanent

Le rotor de ce type est construit à partir d'un aimant permanent, ce qui donne plusieurs avantages par rapport à d'autres types de génératrices, tel que le faible coût d'entretien, la possibilité d'éliminer le multiplicateur, et par conséquent d'éliminer les perturbations, le bruit et les pertes d'énergie causées par ce dernier avec l'utilisation d'un nombre important de paires de pôles [52, 53].

Selon le système de conversion utilisé pour l'injection de l'énergie produite au réseau, on peut citer deux types [52].

#### 1.7.2.1 Système de conversion unidirectionnel

La **Figure I.18** montre un système éolien à base d'une GSAP connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur unidirectionnel qui se compose d'un redresseur à base de diodes contrôlant le couple électromagnétique, suivi par un hacheur élévateur permettant l'augmentation de la tension continue et qui alimente un onduleur MLI, ce dernier assurant le contrôle de la tension continue et permettant d'injecter un maximum de puissance au réseau tout en s'assurant qu'un meilleur facteur de puissance est maintenu [52, 54].

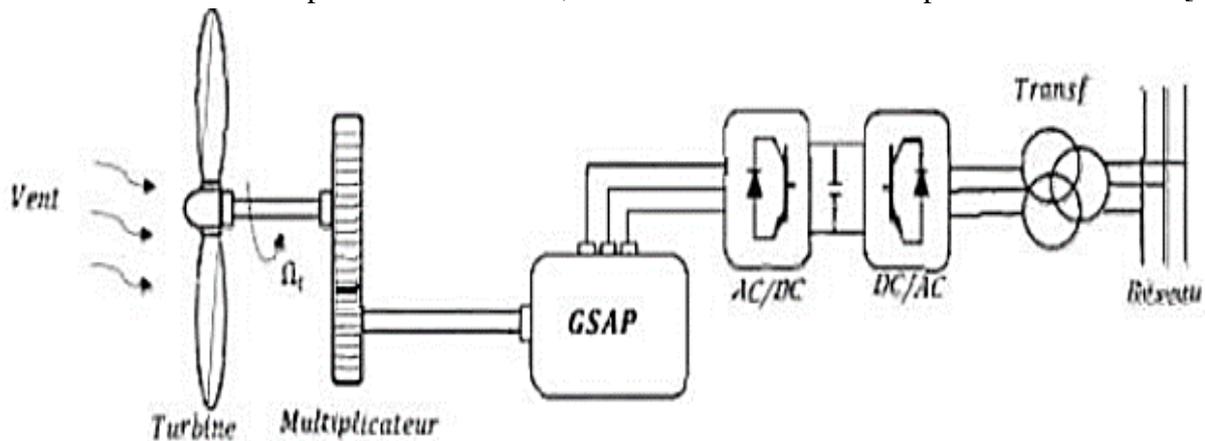


**Figure I.18 :** Couplage unidirectionnel d'une GSAP au réseau

L'inconvénient de ce type est la déformation de la forme d'onde du courant statorique causée par l'utilisation d'un redresseur à base de diodes, ce qui entraîne la production des harmoniques et des ondulations de couple et augmente les pertes d'énergie [54].

### 1.7.2.2 Système de conversion bidirectionnel

Dans ce type, l'énergie circule dans les deux sens, de la génératrice vers le réseau ou bien du réseau vers la turbine éolienne qui agit comme une charge consommatrice dans ce cas; la connexion des enroulements statoriques au réseau est assurée par un convertisseur dos à dos avec un bus continu au milieu, comme il est présenté sur la **Figure I.19** dans cette configuration, les deux convertisseurs sont à IGBT, ce qui donne l'avantage à cette configuration par rapport à la précédente en termes de commande optimale de la GSAP, avec une minimisation des pertes dans le stator [52].



**Figure I.19** : Couplage bidirectionnel d'une GSAP au réseau

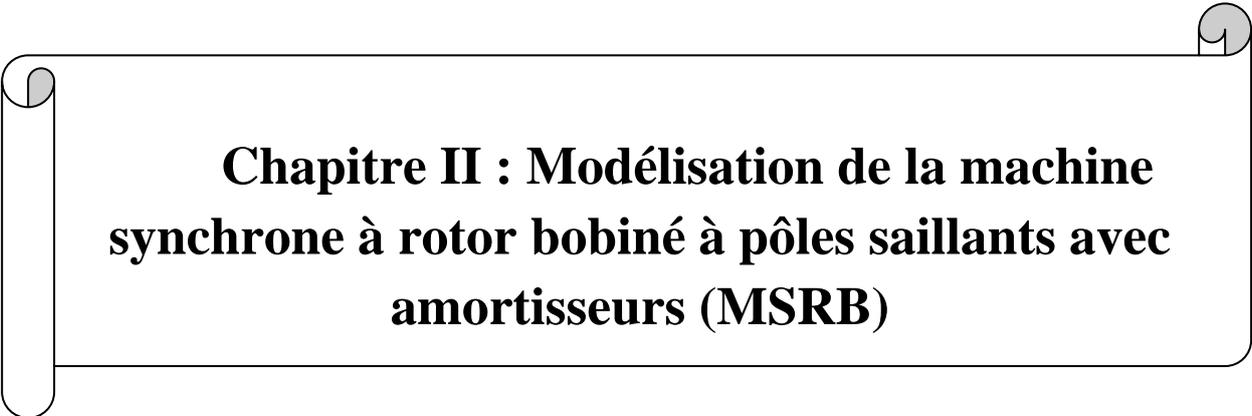
## 1.8 Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre aux dernières technologies en matière de systèmes de conversion de l'énergie éolienne avec un aperçu complet des solutions électrotechniques possibles pour produire de l'électricité à partir d'éoliennes. Après un rappel des notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes et leur fonctionnement sont décrits. Les machines électriques et les convertisseurs correspondants adaptables au système éolien ont ensuite été présentés. Dans notre étude, nous avons concentré sur les machines synchrones à rotor bobiné.

Ces derniers présentent l'avantage de pouvoir optimiser au mieux la production d'énergie et permettent, grâce à leur électronique de puissance, de réguler l'échange de puissance réactive avec le réseau.

Nous avons conclu l'importance du générateur pour pouvoir fonctionner à des vitesses variables. Le chapitre suivant est consacré à la modélisation d'une machine synchrone avec un rotor bobiné à pôles saillants avec amortisseurs (MSRB).





**Chapitre II : Modélisation de la machine  
synchrone à rotor bobiné à pôles saillants avec  
amortisseurs (MSRB)**

### II.1 Introduction

La machine synchrone est principalement utilisée comme générateur dans les systèmes thermiques et hydrauliques, où elle n'a presque pas de concurrence, mais elle est également utilisée comme moteur dans de nombreux domaines.

Cette machine est très fiable et efficace pour la conversion d'énergie, son fonctionnement est, comme tous les dispositifs électromécaniques de conversion d'énergie est basés sur la loi de Faraday de l'induction électromagnétique, Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation [55].

La modélisation est une étape importante dans l'analyse et la conception des systèmes. Elle aboutit souvent à un modèle mathématique qui contient plusieurs paramètres inconnus. Des essais expérimentaux sont nécessaires pour identifier ces paramètres [56].

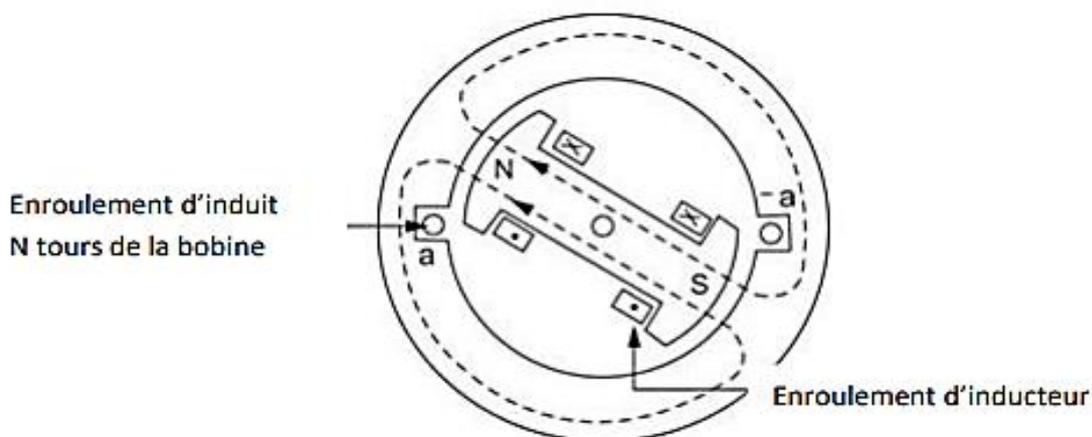
Dans ce chapitre, nous présentons les modèles mathématiques des machines synchrones à rotor bobinés, nous nous intéresserons à la modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants avec et sans amortisseurs.

Les performances obtenues doivent correspondre aux conditions de fonctionnement, notamment les protections de la machine synchrone elle-même et éventuellement les protections du réseau électrique auquel elle est raccordée.

La simulation du générateur synchrone à rotor bobiné est ensuite présentée par MATLAB SIMULINK dans des conditions à vide, en court-circuit et en charge avec et sans amortisseurs.

### II.2 Description de la machine (MSRB)

Le terme machine synchrone comprend toutes les machines où la vitesse de l'arbre de sortie est égale à la vitesse du champ tournant. Pour réaliser un tel mouvement, le champ magnétique du rotor est généré par des aimants ou un circuit d'excitation. La position du champ magnétique du rotor est fixe par rapport au rotor et, en fonctionnement normal, la vitesse entre les champs magnétiques rotatifs du rotor et du stator doit être la même. L'enroulement d'induit d'une machine synchrone se trouve sur le stator et l'enroulement inducteur sur le rotor (voir Figure II.1).



**Figure II.1** : Croquis simplifié d'une machine synchrone [57].

L'enroulement d'induit de la machine synchrone à rotor bobiné peut contenir une ou plusieurs spires de cuivre. Ces spires sont généralement enroulées autour des pôles du rotor et sont

connectées aux bagues collectrices. Les bagues collectrices servent de liaison entre l'enroulement du rotor et l'alimentation en courant continu provenant de la machine excitatrice.

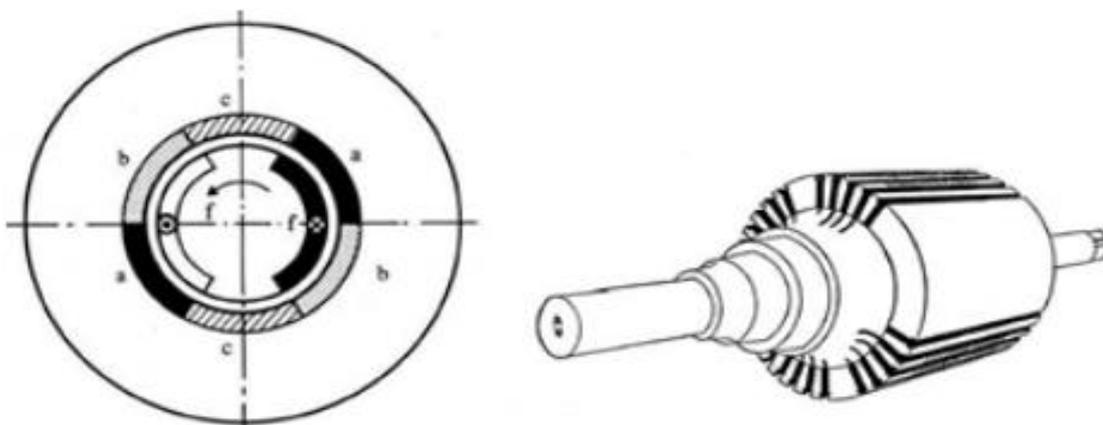
Lorsque le courant continu est fourni aux enroulements du rotor via les bagues collectrices et les balais, un champ magnétique est créé dans le rotor. Ce champ magnétique interagit ensuite avec le champ magnétique tournant du stator, généré par les bobines alimentées en courant alternatif du stator. Cette interaction permet de transférer de l'énergie entre le stator et le rotor, ce qui permet à la machine synchrone à rotor bobiné de fonctionner en synchronisme avec le réseau électrique. La figure II.1 montre des bobines diamétralement opposées (a, -a) sur la circonférence intérieure du stator, avec leurs conducteurs parallèles à l'arbre de la machine. magnétique balaie [58].

Il existe deux types de machines synchrones à rotor bobiné. Machines à pôles lisses, machines à pôles saillants. Cette machine a des pôles lisses avec une inductance constante quelle que soit la position du rotor. En revanche, cette machine possède des pôles saillants dont la position modifie l'entrefer et donc l'inductance [59].

### II.2.1 Machines synchrones à pôles lisses (MSRBPL)

Ce mode de construction qui assure une grande robustesse mécanique est systématique adopté pour les alternateurs de fortes puissances, dont la vitesse de rotation est élevée (cette structure correspond aux machines bipolaire ( $p = 1$ ) ou quadripolaire ( $p = 2$ ) 3000 et 1500 tr/min). On les trouve dans les productions d'énergie dans les centrales thermiques et nucléaires, pour cette raison on les désigne couramment de turbo-alternateur.

Il s'agit d'une pièce massive d'acier forgée et solidaire de l'arbre avec des encoches fraisées qui reçoivent les enroulements inducteurs en cuivre. La vitesse de rotation élevée, exige un diamètre limité de l'ordre du mètre (**Figure II.2**) pour réduire les effets des forces centrifuges à la périphérie du rotor. Le diamètre étant réduit il est nécessaire d'augmenter la longueur axiale de la machine pour obtenir des forces électromotrices notables. Cette longueur peut atteindre 15 et 20 mètres pour les machines de très grande puissance. Malgré le diamètre relativement réduit du rotor, les conducteurs de l'inducteur sont soumis à des accélérations radiales considérables, ils sont donc maintenus par des cales [60].

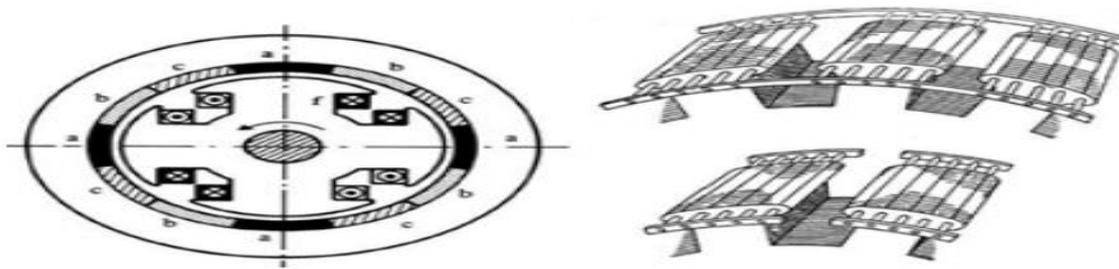


**Figure II.2** : Machine synchrone à rotor à pôles lisses [61]

Ces rotors ne disposent pas en général d'une disposition spéciale d'amortisseurs puisque la pièce de forge en acier crée des circuits à la surface pour les courants de Foucault dont l'effet est équivalent à celui des courants amortisseurs. C'est donc la partie massive du rotor qui joue le rôle d'un amortisseur [61].

### II.2.2 Machines synchrones à pôles saillants (MSRBPS)

Ces machines possèdent un enroulement inducteur constitué de bobines enroulées autour de pôles ferromagnétiques et mises en série de façon à assurer l'alternance des pôles (**Figure I.3**). La forme de l'épanouissement polaire est réalisée pour obtenir une répartition de l'induction dans l'entrefer proche d'une sinusoïdale. Cette structure est ainsi caractérisée par sa simplicité de réalisation, par contre, pour des raisons mécaniques, elle ne prête généralement qu'à des applications où la vitesse ne dépasse pas 1000 tr/min [62].



**Figure II.3** : Machine à pôles saillants et enroulements amortisseurs [63]

La principale difficulté pour l'étude de ces machines est liée à l'anisotropie géométrique (entrefer variable), et donc magnétique du rotor, qui entraîne une dépendance à la position de la plupart des inductances et des différentes inductances mutuelles du rotor par rapport au stator. La réaction d'induit varie alors en fonction de l'état de charge de la machine [59].

### II.2.3 Amortisseurs

Dans les alternateurs à pôles saillants, l'amortisseur est constitué par des barres posées dans des encoches fermées et débouchant sur l'entrefer par une ouverture étroite, ces encoches se trouvent dans les pôles. Les barres sont généralement en cuivre, leurs extrémités sont réunies par deux segments également en cuivre. Les segments des différents pôles sont reliés entre eux pour constituer une cage. Dans les alternateurs à pôles lisses, la partie massive du rotor joue le rôle d'un amortisseur très efficace, en s'opposant aux variations de flux qui la traverse (Figure II.4)

Le rôle des amortisseurs est [64]:

- d'atténuer l'effet des harmoniques et leur génération ;
- de limiter la détérioration, par la réaction magnétique d'induit, de la répartition du flux résultant en charge et la forme d'onde de la f.e.m. résultante ;
- de d'atténuer les perturbations qui apparaissent en cas de débit de l'alternateur sur une charge déséquilibrée ou en cas de brusques variations de la charge ;
- d'étouffer le flux inverse en s'opposant à sa variation.

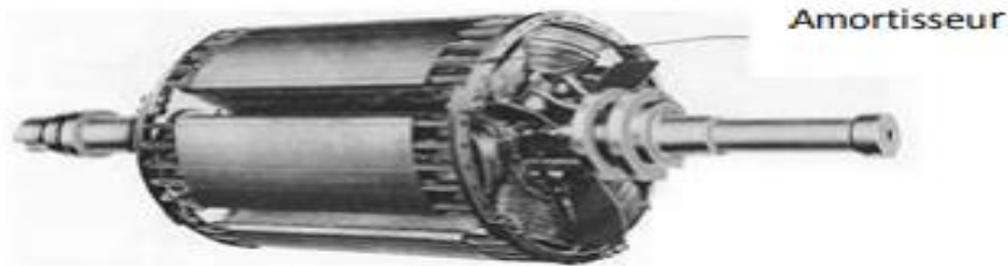


Figure II.4 : Rotor d'une MS avec amortisseurs [65].

### II.3 Systèmes d'excitation

Le courant d'excitation des machines synchrones, nécessaire à la production du champ magnétique inducteur, est obtenu à partir d'un dispositif appelé système d'excitation. Deux types de systèmes sont utilisés : la technique mettant en œuvre une génératrice à courant continu, appelée "excitatrice" ou l'utilisation d'une technique dite "sans bagues ni balais" avec un pont de diodes tournantes [66, 67].

Dans la première technique, une génératrice à courant continu, appelée excitatrice, habituellement montée sur le même arbre que l'alternateur, fournit le courant d'excitation aux électro-aimants de l'inducteur de la machine synchrones (Figure II.5). L'usure des balais constitue l'inconvénient de ce système [66].

De nos jours, on utilise des systèmes d'excitation sans bagues dans lesquels un alternateur-excitateur et un groupe de redresseurs (diodes tournantes) fournissent le courant continu à l'alternateur principal. Ici, l'excitatrice est remplacée par l'alternateur excitateur qui est en fait un alternateur inversé (Figure II.6). Son circuit d'excitation est sur le stator, son rotor comporte un système d'enroulement triphasé dont les courants sont redressés afin d'alimenter l'inducteur de l'alternateur [68].

L'alternateur-excitateur et les redresseurs sont montés en bout d'arbre et tournent ensemble avec l'alternateur principal. L'alternateur excitateur triphasé possède un nombre de pôles tel que sa fréquence soit deux ou trois fois celle du réseau [66].

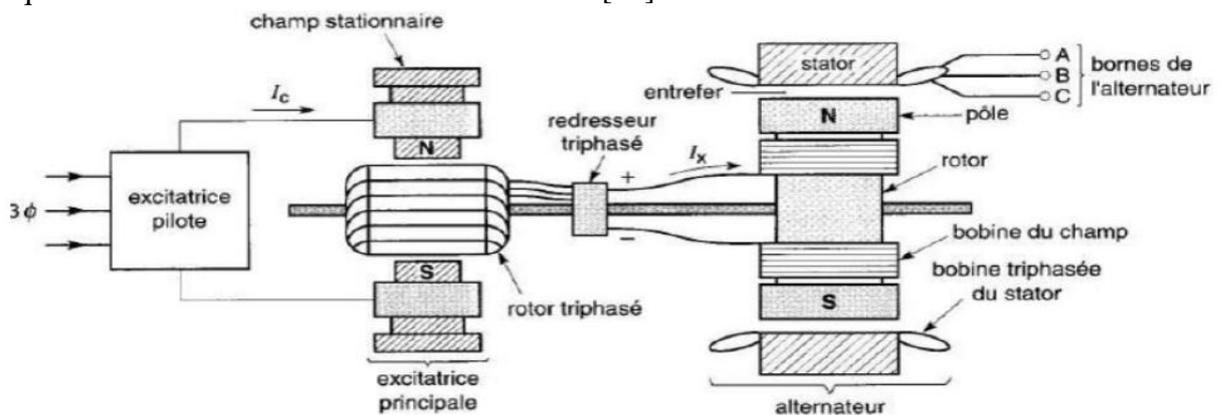


Figure II.5 : Alternateur à inducteur tournant avec système d'excitation équipé d'une excitatrice en bout d'arbre

### II.4 Bilan des puissances et rendement

#### II.4.1 Bilan des puissances actives

La puissance active prélevée sur le réseau par le moteur est de :

$$P = 3 VI \cos\varphi \quad (2.1)$$

Des pertes ferromagnétiques  $p_{fs}$  et des pertes par effet Joule  $p_{js}$  se produisent dans le stator:

$$P_{js} = 3 R_s I^2 \quad (2.2)$$

Si le rotor est bobiné, la puissance reçue par le circuit inducteur de son alimentation continue est :

$$P_e = v_f i_f \quad (2.3)$$

Le rotor est le siège des pertes ferromagnétiques  $p_{fr}$  et des pertes par effet Joule  $p_{jr}$  dans le circuit d'excitation :

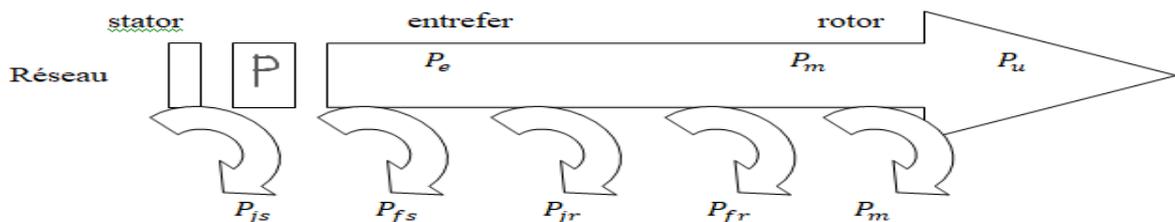
$$P_{jr} = R_f I_f^2 \quad (2.4)$$

Cette dernière puissance est égale à la puissance  $p_e$  obtenue du circuit inducteur. Pour obtenir la puissance utile  $p_u$  c'est-à-dire celle qui est utilisable par la charge entraînée, il reste à retrancher les pertes mécaniques  $p_m$  (frottement, ventilation, balais) :

$$P_u = P_m - P_m \quad (2.5)$$

Avec :

$P_m$  puissance mécanique de la turbine ou du moteur qui l'entraîne.



**Figure II.6 :** Diagramme des puissances d'un moteur synchrone

#### **II.4.2 Rendement**

Le rendement  $\rho$  est défini comme le rapport de la puissance mécanique utile à la puissance électrique totale fournie au moteur :

$$\rho = \frac{P_u}{P + P_e} \quad (2.6)$$

#### **II.5 Principe de fonctionnement**

##### **II.5.1 Alternateur [69]**

Le rotor est entraîné par une turbine ou un moteur diesel de vitesse  $n$ . Un courant continu, également appelé courant d'excitation, traverse l'enroulement de champ et produit une tension magnétique tournante dans l'entrefer avec une fréquence de rotation  $n$ . Le champ magnétique tournant qui en résulte induit un système de force électromotrice triphasé équilibré dans les enroulements du stator. , la fréquence d'une machine à  $p$  paires de pôles est plus élevée, de sorte que :

$$f_s = pn \quad (2.7)$$

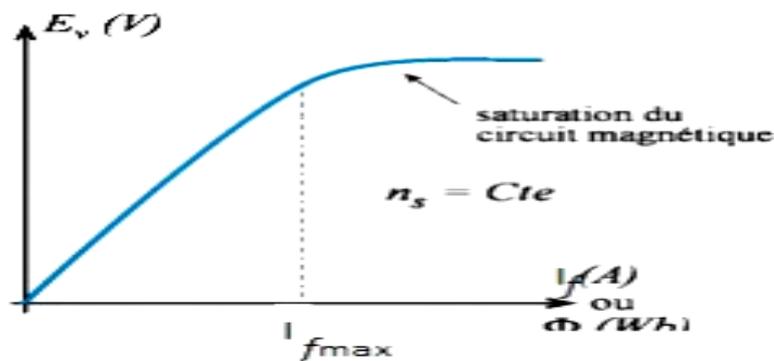
Elle est appelée vitesse synchrone car le rotor et le champ magnétique tournant ont la même vitesse de rotation  $\Omega_s$ , La valeur efficace de la force électromotrice en fonctionnement à vide est proportionnelle au flux effectif  $\Phi$  par pôle, à la fréquence  $f_s$  (ou à la fréquence de rotation  $n$ ) et au nombre de conducteurs effectifs dans la phase :

$$E_v = KNf \Phi \quad (2.8)$$

La constante K spécifiée pour un générateur particulier est appelée coefficient de Kapp. La relation entre le flux magnétique et le courant magnétisant n'est pas linéaire en raison de la saturation du circuit magnétique. La courbe représentant la valeur efficace  $E_v$  de la force électromotrice à vide en fonction de l'intensité du courant d'excitation est appelée caractéristique interne de la machine. Elle n'est linéaire que sur une plage limitée (Fig. II.8).

Lorsque le générateur est chargé, le système de courant triphasé circulant dans l'induit produit une tension magnétique tournante dans l'entrefer à la même vitesse que la tension magnétique produite par l'inductance.

C'est le phénomène de réaction d'ancrage. La contrainte magnétique rotative qui en résulte induit un système de force électromotrice triphasé équilibré dans les enroulements du stator, différent de celui obtenu dans des conditions à vide. Dans les machines à pôles saillants, le problème est compliqué car la réluctance du circuit magnétique dépend du décalage entre la tension d'entrefer magnétique tournant générée par l'induit et la tension générée par l'inductance. Ensuite, nous devons décomposer la force de réaction de l'induit magnétique en composantes longitudinales et transversales.



**Figure II.7 : caractéristique interne**

### **II.5.2 moteur [69]**

L'enroulement statorique, parcouru par un système triphasé équilibré de courants de pulsation  $\omega_s$  crée une tension magnétique tournante d'entrefer à la vitesse synchrone  $\Omega_s$ , soit avec  $p$  paires de pôles :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (2.9)$$

Le champ magnétique engendré par l'enroulement inducteur ou les aimants est fixe par rapport au rotor. L'interaction entre le champ tournant et le champ fixe du rotor crée un couple dont le moment a une valeur moyenne nulle. Le moteur synchrone ne démarre pas spontanément. Par contre, si le rotor est entraîné à la vitesse synchrone, l'interaction entre les champs tournants du stator et du rotor crée un couple dont le moment a une valeur moyenne non nulle. La vitesse d'un moteur synchrone est imposée par la fréquence de son alimentation, elle est indépendante de la charge mécanique.

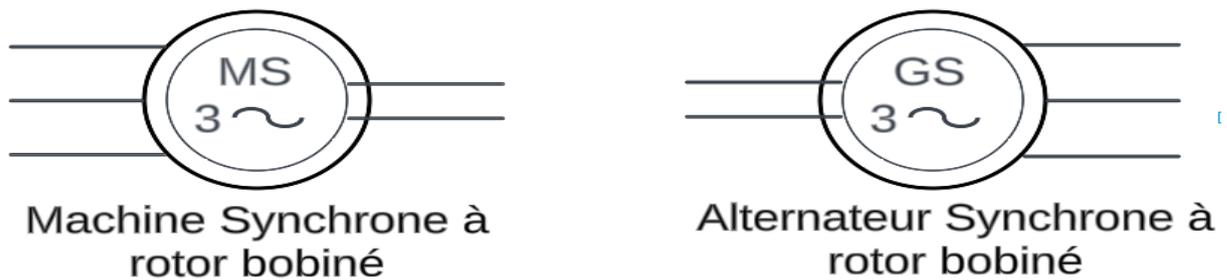


Figure II.8 : Symboles d'une machine synchrone à rotor bobiné

### II.6 Hypothèses simplificatrices

La modélisation des machines électriques exige d'une part la prise en compte de certaines hypothèses simplificatrices usuelles suivantes [70].

- **Hypothèse 1** : la répartition spatiale des conducteurs statoriques est sinusoïdale, la distribution spatiale de la force magnétomotrice (m.m.f) l'est aussi ; les harmoniques spatiales de la distribution du flux sont négligées ;
- **Hypothèse 2** : les pertes par hystérésis et par courant de Foucault sont supposées nulles ;
- **Hypothèse 3** : les circuits magnétiques sont linéaires (non saturés) ;
- **Hypothèse 4** : la composante homopolaire est supposée nulle pour les grandeurs statoriques, c-à-d le système triphasé est équilibré ;
- **Hypothèse 5** : les irrégularités de l'entrefer dues aux encoches statoriques sont ignorées ;

Et d'autres parts se basent sur trois types d'équations :

- Équations magnétiques : il s'agit des équations qui décrivent les flux en fonction des courants qui parcourent les enroulements (théorème d'Ampère).
- Équations électriques : la relation entre les tensions et les courants est décrite par la loi d'Ohm généralisée avec la loi de Faraday.
- Équations mécaniques : la deuxième loi de Newton décrit la variation de la vitesse de l'arbre de la machine en fonction du couple (résultant de la force de Laplace).

#### II.6.1 Modèle de la MSRB sur les axes réels

Figure II.10 représente l'emplacement des enroulements de la MSRBPS pour chaque axe. Le stator (induit) se compose des trois phases (a, b, c) identiques déphasées entre elles de  $120^\circ$ . Le rotor (inducteur) est constitué d'un enroulement, d'indice " $f_e$ ", réparti selon l'axe polaire d. Alors, que chaque pôle du rotor est muni de barres de cuivre, correspondant aux amortisseurs, répartis selon l'axe polaire ou longitudinal et l'axe interpolaire ou en quadrature, respectivement, notés  $k_d$  et  $k_q$  [56].

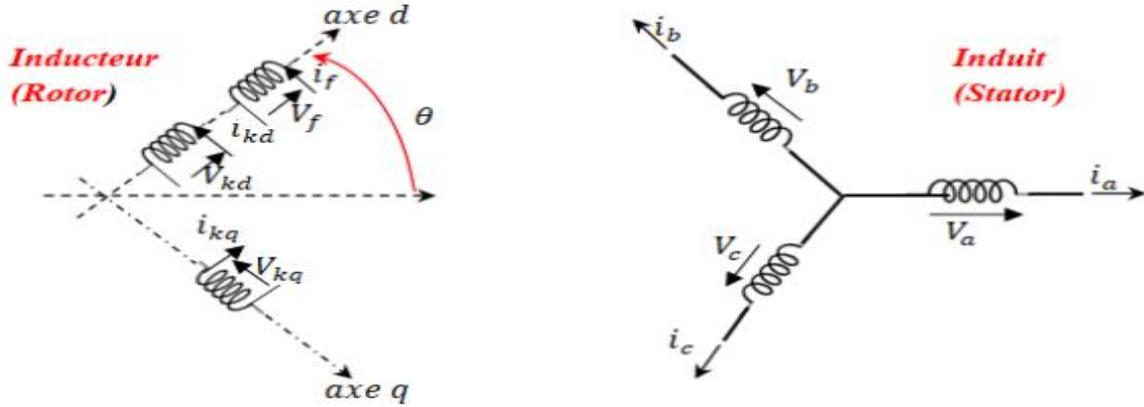


Figure II.9 : Schéma modèle abc de la MSRBPS avec un amortisseur sur chacun des axes

### II.6.1.1 Expressions des inductances propres et mutuelles statorique et rotorique

En considérant la phase a de la machine synchrone prise comme référence, ainsi que l'axe direct d, les inductances mutuelles entre les enroulements statorique et rotorique sont fonction de l'angle électrique  $\theta$  selon les expressions suivantes [56].

$$\begin{cases} M_{af}(\theta) = M_{fs} \cos \theta \\ M_{bf}(\theta) = M_{fs} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{cf}(\theta) = M_{fs} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} M_{akd}(\theta) = M_{kds} \cos \theta \\ M_{bkd}(\theta) = M_{kds} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{ckd}(\theta) = M_{kds} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} M_{akq}(\theta) = -M_{kqs} \sin \theta \\ M_{bkq}(\theta) = -M_{kqs} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{ckq}(\theta) = -M_{kqs} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.12)$$

Avec :

**Maf, Mbf, Mcf** : Inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et l'enroulement d'excitation ;

**Makd, Mbkd, Mckd**: Inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et l'amortisseur de l'axe direct ;

**Makq, Mbqk, Mckq**: Inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et l'amortisseur de l'axe en quadrature ;

$$\begin{cases} L_a(\theta) = L_{s0} + L_{s2} \cos 2\theta + L_{\sigma s} \\ L_b(\theta) = L_{s0} + L_{s2} \cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3}) + L_{\sigma s} \\ L_c(\theta) = L_{s0} + L_{s2} \cos 2(\theta + \frac{4\pi}{3}) + L_{\sigma s} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} M_{ab}(\theta) = M_{s0} + L_{s2} \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{bc}(\theta) = M_{s0} + L_{s2} \cos 2\theta \\ M_{ac}(\theta) = M_{s0} + L_{s2} \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.14)$$

Avec :  $M_{s0} = \frac{1}{2}L_{s0}$

### II.6.1.2 Equations des tensions et des flux magnétiques

Equations des tensions du stator [56] :

$$[V_s] = -[R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (2.15)$$

$$\begin{cases} V_{as} = -R_a i_{as} + \frac{d\Phi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = -R_b i_{bs} + \frac{d\Phi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = -R_c i_{cs} + \frac{d\Phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (2.16)$$

Equations des tensions du rotor [56] :

$$[V_r] = -[r_r] \cdot [i_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} V_{kq} = r_{kq} i_{kq} + \frac{d\Phi_{kq}}{dt} \\ V_f = r_f i_f + \frac{d\Phi_f}{dt} \\ V_{kd} = r_{kd} i_{kd} + \frac{d\Phi_{kd}}{dt} \end{cases} \quad (2.18)$$

Equations de couplage électromagnétique (flux magnétiques) :

$$\begin{cases} \Phi_k = f(i_k); & k = \{a, b, c, k_d, f, k_q\} \\ \Phi_k = \sum M_{kj} i_j; & j, k = \{a, b, c, k_d, f, k_q\} \end{cases} \quad (2.19)$$

En tenant compte des inductances mutuelles et propres établies précédemment, les flux totalisés s'expriment sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = -[L_s] \cdot [i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\Phi_r] = -[M_{rs}] \cdot [i_s] + [L_r][i_r] \end{cases} \quad (2.20)$$

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{af}(\theta) & M_{akd}(\theta) & M_{akq}(\theta) \\ M_{bf}(\theta) & M_{bkd}(\theta) & M_{bkq}(\theta) \\ M_{cf}(\theta) & M_{ckd}(\theta) & M_{ckq}(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_a(\theta) & M_{ab}(\theta) & M_{ac}(\theta) \\ M_{ab}(\theta) & L_b(\theta) & M_{bc}(\theta) \\ M_{ac}(\theta) & M_{bc}(\theta) & L_c(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_f(\theta) & M_{fkd}(\theta) & 0 \\ M_{fkd}(\theta) & L_{kd}(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & L_{kq}(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$[M_{rs}] = \begin{bmatrix} M_{af}(\theta) & M_{bf}(\theta) & M_{cf}(\theta) \\ M_{akd}(\theta) & M_{bkd}(\theta) & M_{ckd}(\theta) \\ M_{akq}(\theta) & M_{bkq}(\theta) & M_{ckq}(\theta) \end{bmatrix} = [M_{sr}]^{-1} \quad (2.24)$$

## II.6.2 Modèle de la MSRB dans le repère de PARK

### II.6.2.1 Transformation de Park

Pour établir les équations simplifiées de la machine synchrone, nous utiliserons dans cette étude la transformation de Park modifiée qui conserve la puissance instantanée vu qu'elle est très utilisée dans l'étude dynamique des machines électriques. Elle permet le passage d'un système triphasé (a, b, c) en un système diphasé équivalent (odq) avec ou sans composante homopolaire (notée : o) [56].

Elle est définie comme suit[56] :

$$[P_1(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

L'inverse de la transformation de Park est la matrice transposée du précédent :

$$[P_1(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

### II.6.2.2 Modélisation et simulation de MSRB sans amortisseurs [71]

Les machines synchrones sont généralement étudiées dans le référentiel d, q ( $\omega_{coor} = \omega_r$ ), la figure suivante représente le modèle électrique du moteur synchrone.

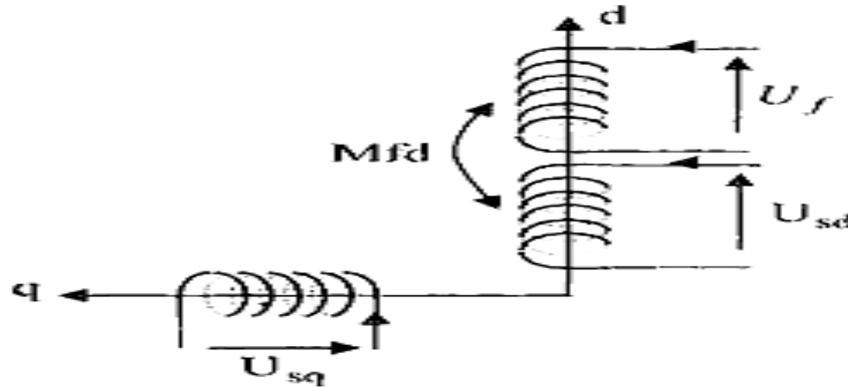


Figure II.10 : modèle de la machine synchrone

Considérons le système d'équations de tensions sous la forme :

$$\begin{cases} -U_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_r \Psi_{sq} \\ -U_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_r \Psi_{sd} \\ U_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \end{cases} \quad (2.27)$$

Les expressions magnétiques :

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_d i_{sd} + M_{fd} i_f \\ \Psi_{sq} = L_q i_{sq} \\ \Psi_f = L_f i_f + M_{fd} i_{sd} \end{cases} \quad (2.28)$$

Sous forme matricielle, on a :

$$\begin{bmatrix} -U_{sd} \\ -U_{sq} \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_q & 0 \\ \omega L_d & R_s & \omega \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{fd} \\ 0 & L_q & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Pour résoudre ce système, il faut le mettre sous forme d'équation d'état :

$$[i] = [L]^{-1}[U] - [L]^{-1}[R][I] \quad (2.30)$$

Où :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{fd} \\ 0 & L_q & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix}; [R] = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_q & 0 \\ \omega L_d & R_s & \omega \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \text{ et } [R] = [R_1] + \omega_r [R_2] \quad (2.31)$$

Avec :

$$[R_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix}; [R_2] = \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 \\ L_d & 0 & M_{fd} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } [Z] = [L]^{-1} \quad (2.32)$$

Pour la machine synchrone triphasée, le couple électromagnétique s'exprime par :

$$C_e = \frac{3}{2}p[\Psi_{sd}i_{sq} - \Psi_{sq}i_{sd}] \text{ Ou } C_e = \frac{3}{2}p[(L_d - L_q)i_{sd}i_{sq} + M_{fd}i_{sq}i_f] \quad (2.33)$$

Et l'expression du mouvement par :

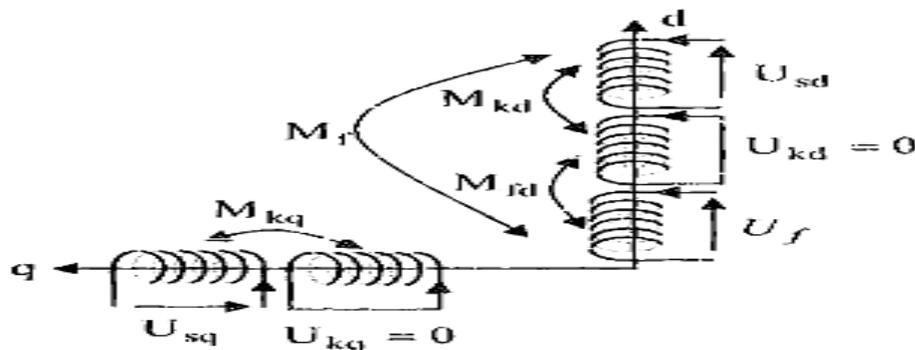
$$\frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = C_e - C_r - F\Omega \quad (2.34)$$

### II.6.2.3 Modélisation et simulation de MSRB avec amortisseurs [71]

Les rotors des machines à pôles saillants sont équipés d'amortisseurs constitués de tiges de cuivre logées dans des encoches des pièces polaires. Ces tiges sont reliées aux extrémités par deux anneaux ou anneaux conducteurs selon le nombre de pôles.

L'amortisseur empêche les changements brusques de débit à travers le rotor. Il joue un rôle important dans la stabilisation de la vitesse de la machine lors des fluctuations de charge. Ils ont les mêmes propriétés mécaniques que les machines asynchrones à cage. Lorsque la vitesse est sur le point d'augmenter après une chute brutale de charge (glissement négatif), un effet inductif se développe dans l'enroulement de l'amortisseur, créant un couple de traînée (couple négatif) sur le mouvement du rotor, et le ralentit, et le rotor est ainsi ramené à la vitesse synchrone.

Dans le cas contraire, si la vitesse tend à chuter (glissement positif) suite à une surcharge brusque de la machine, l'effet d'induction prend naissance et d'enroulement amortisseur produit un couple (positif) additionnel qui s'ajoute au couple moteur pour ramener le rotor à la vitesse synchrone. Dans les machines à pôles lisses, c'est la partie massive du fer rotorique qui joue le rôle d'amortisseur.



**Figure II.11** : Modèle de la machine synchrone avec amortisseurs

La figure ci-dessus représente le modèle de la machine synchrone à pôles saillants avec amortisseurs. Le système d'équations des tensions dans le référentiel rotorique est :

$$\begin{cases} -U_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_r \Psi_{sq} \\ -U_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_r \Psi_{sd} \\ U_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \\ 0 = U_{kd} = R_{kd} i_{kd} + \frac{d\Psi_{kd}}{dt} \\ 0 = U_{kq} = R_{kq} i_{kq} + \frac{d\Psi_{kq}}{dt} \end{cases} \quad (2.35)$$

Où :

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_d i_{sd} + M_{fd} i_f + M_{kd} i_{kd} \\ \Psi_{sq} = L_q i_{sq} + M_{kq} i_{kq} \\ \Psi_f = L_f i_f + M_{fd} i_{sd} + M_{fd} i_{kd} \\ \Psi_{kd} = L_{kd} i_{kd} + M_{kd} i_{sd} + M_{fd} i_f \\ \Psi_{kq} = L_{kq} i_{kq} + M_{kq} i_{sq} \end{cases} \quad (2.36)$$

En tenant compte des expressions du flux, le système d'équations des tensions peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{bmatrix} -U_{sd} \\ -U_{sq} \\ U_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL_d & -L_q \omega_r & sM_f & sM_{kd} & -\omega_r M_{kq} \\ L_d \omega_r & R_s + sL_q & \omega_r M_f & \omega_r M_{kd} & sM_{kq} \\ sM_f & 0 & R_f + sL_f & sM_{fd} & 0 \\ sM_{kd} & 0 & sM_{fd} & R_{kd} + sL_{kd} & 0 \\ 0 & sM_{kq} & 0 & 0 & R_{kq} + sL_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Le système d'équations est mis sous la forme :

$$[L] * \frac{d[I]}{dt} = -[A][I] + [U] \quad (2.38)$$

Où :

$$\frac{d[I]}{dt} = -[L]^{-1}[A][I] + [L]^{-1}[U] \quad (2.39)$$

Avec :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_f & M_{kd} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & M_{kq} \\ M_f & 0 & L_f & M_{fd} & 0 \\ M_{kd} & 0 & M_{fd} & L_{kd} & 0 \\ 0 & M_{kq} & 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} R_s & -L_q \omega_r & 0 & 0 & -\omega_r M_{kq} \\ L_d \omega_r & R_s & \omega_r M_f & \omega_r M_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$[Z] = [L]^{-1} \quad \text{et} \quad [A] = [A_1] + \omega[A_2] \quad (2.42)$$

$$[A_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Et :

$$[A_2] = \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 & 0 & -M_{kq} \\ L_d & 0 & M_f & M_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$[I] = [i_{sd} \quad i_{sq} \quad i_f \quad i_{kd} \quad i_{kq}]^t \quad ; \quad [U] = [U_{sd} \quad U_{sq} \quad U_f \quad 0 \quad 0]^t \quad (2.45)$$

L'expression du couple est de la forme :

$$C_e = \frac{3}{2} p (L_d i_{sd} i_{sq} + M_f i_f i_{sq} + M_{kd} i_{kd} i_{sq} - L_q i_{sq} i_{sd} - M_{kq} i_{kq} i_{sd}) \quad (2.46)$$

L'expression du mouvement est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - F\Omega \quad \text{Avec : } p\Omega = \omega_r \quad (2.47)$$

### II.7 Représentation d'état de la génératrice synchrone

Par rapport à sa structure et sa facilité d'utilisation, la représentation d'état est essentielle dans cette étude car elle permet la modélisation d'un système dynamique quelconque sous forme matricielle en utilisant des variables d'état [56, 72, 73].

Cette représentation peut être continue ou discrète ; elle permet de déterminer l'état du système à n'importe quel instant si l'on sait l'état à l'instant initial et le comportement des variables extérieures (exogènes) qui influent sur le système [56].

Dans cette section, l'ensemble des équations électriques et mécaniques décrites dans la modélisation (2.48) vont être réécrites sous forme de représentation d'état selon l'équation (2.49).

$$\left\{ \begin{array}{l} v_a = -r_a i_a + \frac{d}{dt} \varphi_a \\ v_b = -r_b i_b + \frac{d}{dt} \varphi_b \\ v_c = -r_c i_c + \frac{d}{dt} \varphi_c \\ E_f = r_f i_f + \frac{d}{dt} \varphi_f \\ 0 = r_{kd} i_{kd} + \frac{d}{dt} \varphi_{kd} \\ 0 = r_{kq} i_{kq} + \frac{d}{dt} \varphi_{kq} \\ \phi_d = -L_d i_d + L_{md} i_{kd} + L_{md} i_f \\ \phi_q = -L_q i_q + L_{mq} i_{kq} \\ \phi_f = -L_{md} i_d + L_{md} i_{kd} + L_f i_f \\ \phi_{kd} = -L_{md} i_d + L_{kd} i_{kd} + L_{md} i_f \\ \phi_{kq} = -L_{mq} i_q + L_{kq} i_{kd} \\ J \frac{d\Omega_m}{dt} = -T_e + T_{mec} - f \cdot \Omega_m \end{array} \right. \quad (2.48)$$

Ainsi, la semi \_ Représentation d'état de l'alternateur est donnée par l'équation (2.43) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = A(\alpha) \cdot x + B(\alpha) \cdot u = f(\alpha, x, u) \\ y = C(\alpha) \cdot x = h(\alpha, x, u) \\ J \frac{d\Omega_m}{dt} = -T_e + T_{mec} - f \cdot \Omega_m \end{array} \right. \quad (2.49)$$

Où :  $A \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{N \times L}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{M \times N}$ ,  $D \in \mathbb{R}^{M \times L}$

Les N, L et M sont les dimensions des vecteurs décrivant respectivement l'état de l'entrée et l'état de la sortie.

Où :

$\alpha = [r_a r_f r_{kd} r_{kq} I_d I_f I_{kd} I_{kq} L_{md} L_{mq} \omega]^t$ , vecteur des paramètres.

$x = [\phi_d \phi_f \phi_{kd} \phi_q \phi_{kq}]^t$ , vecteur d'état du modèle.

$u = [v_d E_f v_q]^t$ , vecteur d'entrée ou de commande. Il s'agit de la tension d'excitation de la roue polaire et de la tension dans le repère de Park. Le contrôle de la tension de sortie de la machine s'effectuera alors en ajustant cette grandeur.

$y = [i_d i_f i_q]^t$ , vecteur de sortie correspondant aux courant dans le repère de Park.

$A(\alpha) = -\omega_b (r \cdot C(\alpha) + A_1)$ , matrice d'état.

$$r = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{kd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

$$L = \begin{bmatrix} -L_d & L_{md} & L_{md} & 0 & 0 \\ -L_{md} & L_f & L_{md} & 0 & 0 \\ -L_{md} & L_{md} & L_{kd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_q & L_{mq} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -L_{mq} & L_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

$C(\alpha) = inv(L)$ , Matrice d'observation

$$B(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ Matrice de commande}$$

## II.8 Simulation des génératrices synchrones à rotor bobiné à pôles saillants

### II.8.1 Simulation sans amortisseurs

#### II.8.1.1 Essai à vide

A vide les courants des phases statorique sont nuls ( $I_{sd} = I_{sq} = 0$ ), alors le système (2.27) devient :

$$\begin{cases} U_{sd} = -M_{fd} \cdot \frac{di_f}{dt} \\ U_{sq} = -\omega_r \cdot i_f \cdot M_{fd} \\ U_f = R_f \cdot i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \end{cases} \quad (2.53)$$

Il n'y a donc qu'une seule équation différentielle qui représente l'état à vide du générateur synchrone :

$$\frac{di_f}{dt} = -\frac{R_f \cdot i_f}{L_f} + \frac{U_f}{L_f} \quad (2.54)$$

D'après la Modélisation, on obtient le schéma fonctionnel de la génératrice synchrone à pôles saillants sans amortisseurs fonctionnement à vide.

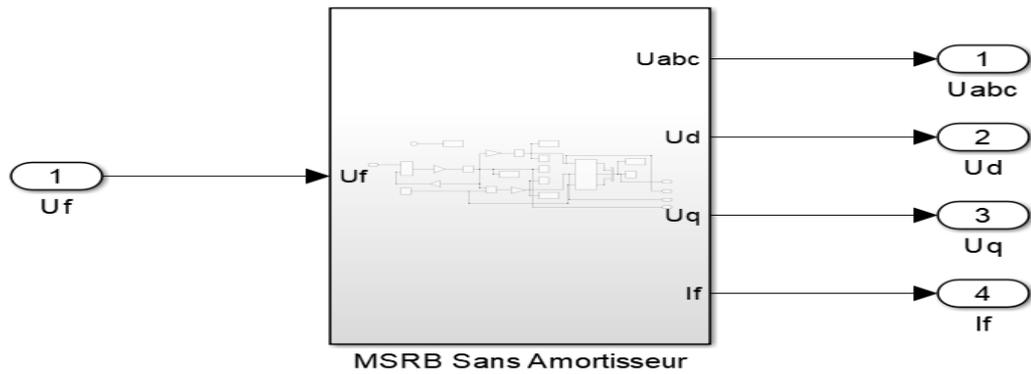


Figure II.12 : simulation de la (GSRB) sans amortisseurs fonctionnement à vide

Les résultats de simulations

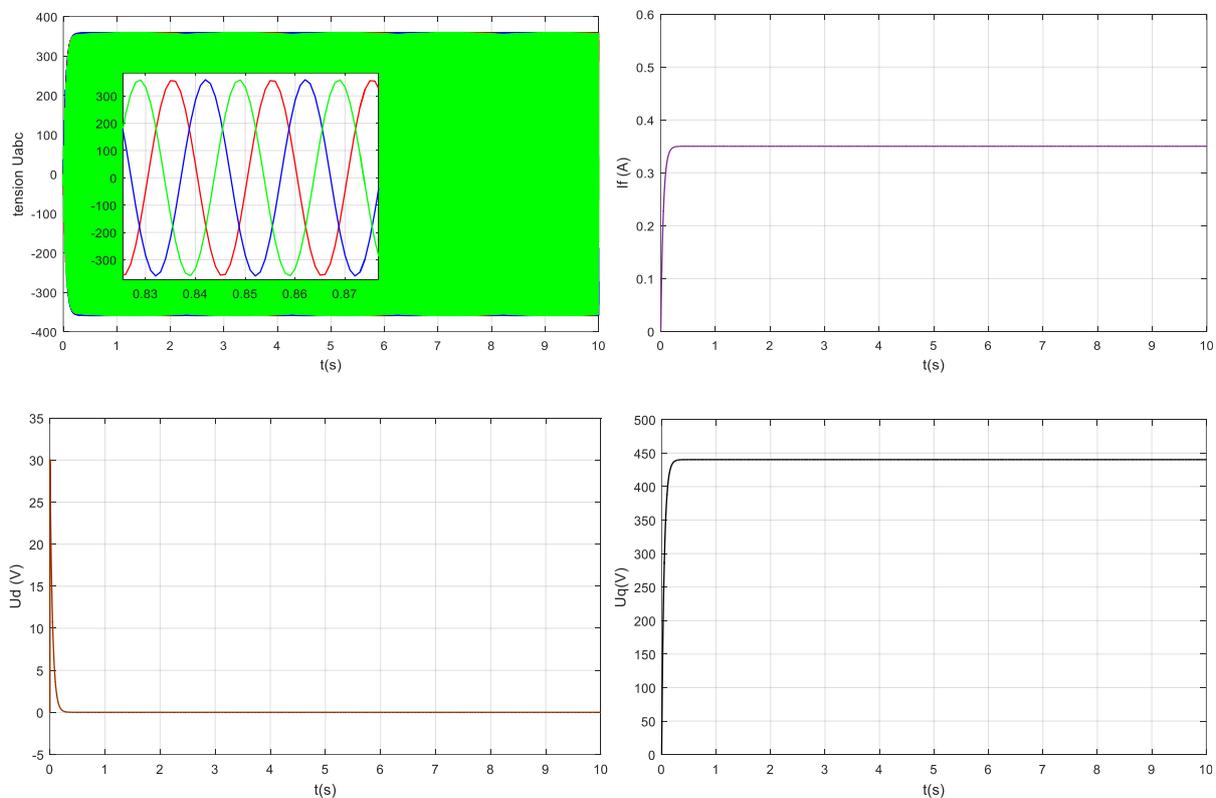


Figure II.13 : résultats de simulations (GSRB) sans amortisseurs fonctionnement à vide

À une vitesse angulaire constante de  $\Omega_m = 314$  rad/s, le courant d'excitation atteint un plateau de 0,35 A après un temps d'établissement de 0,25 s.

Les tensions triphasées sont sinusoïdales avec une amplitude de 360 V en régime établi et une fréquence de 50 Hz. Cela signifie que les tensions varient dans le temps selon une forme d'onde sinusoïdale, avec une amplitude maximale de 360 V et une fréquence de 50 Hz.

La tension  $V_d$  chute à zéro après un pic de 30 V en environ 0,25 s. Cela peut indiquer une forme d'onde transitoire où la tension initiale atteint un pic de 30 V, puis décroît pour finalement atteindre zéro après environ 0,25 s.

Dans le même intervalle de temps,  $t = 0,25$  s, la tension  $V_q$  atteint une valeur fixe de 440 V. Cela peut indiquer une autre forme d'onde transitoire où la tension initiale augmente jusqu'à atteindre une valeur de 440 V et reste constante à partir de ce point.

**II.8.1.2 Essai en court-circuit**

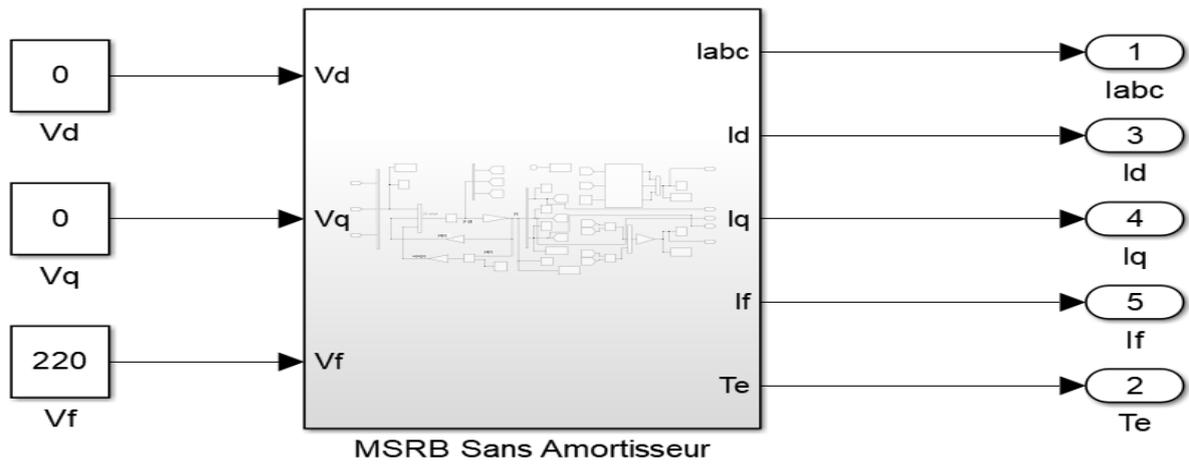
Au moment du court-circuit, les tensions des phases statoriques s'annulent ( $V_d=V_q = 0$ ), le système devient (2.29)

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 & -M_{fd} \\ 0 & -L_q & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 \\ -L_d & 0 & -M_{fd} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

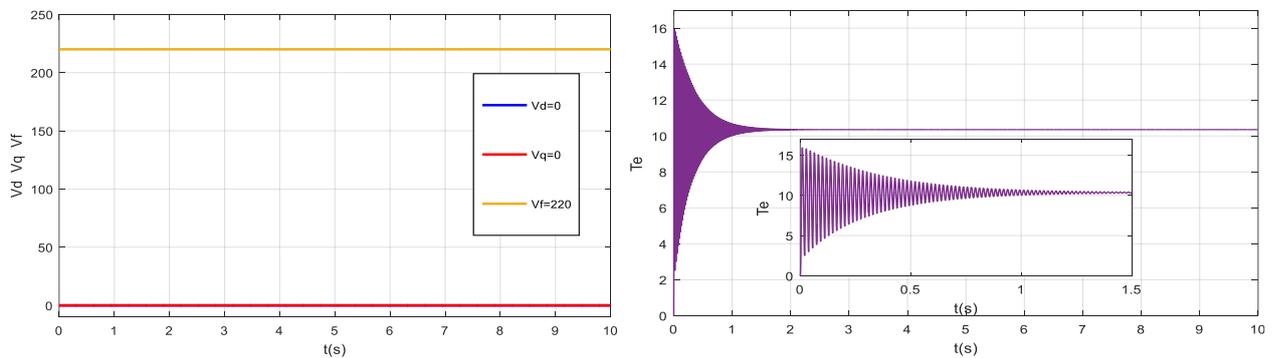
Donc :

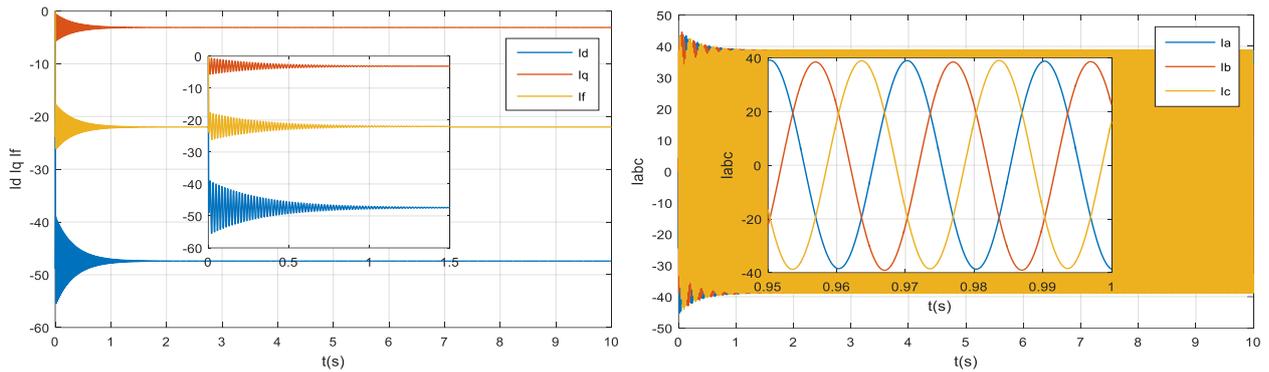
$$[V] = [R][I] + [L] \frac{d}{dt} [I] + \omega [A][I] \quad (2.56)$$

D'après la Modélisation, on obtient le schéma fonctionnel de la génératrice synchrone à pôles saillants sans amortisseurs fonctionnant en court-circuit :



**Figure II.14 :** simulation de la (GSRB) sans amortisseurs fonctionnement en cc  
Les résultats de simulations





**Figure II.15 :** Résultats de simulations (GSRB) sans amortisseurs fonctionnement en cc

Lorsqu'un générateur est en court-circuit, les tensions  $V_d$  et  $V_q$  sont nulles pendant cette phase, tandis que la tension d'excitation est constante à 220 V.

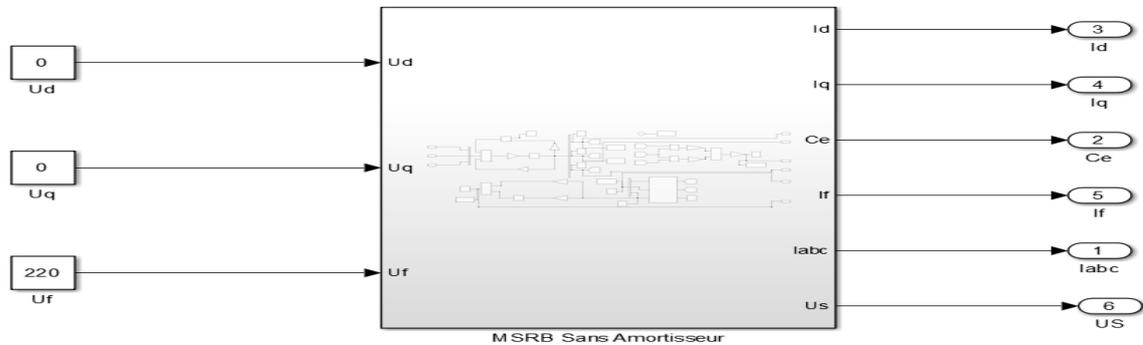
Pour le courant  $i_f$ ,  $i_d$  et  $i_q$  à l'instant 0 s à 1.2 s sont à l'état instable puis stabilisé à la valeur  $I_f = -22$ ,  $I_d = -48$  et  $I_q = -3$ .

Quant au couple, il se présente sous la forme d'un Régime transitoire pendant la phase (0 s à 1,5 s), puis il est fixé à la valeur de 10,2.

De même. Les courants  $I_{abc}$  au début sont l'instabilité du régime transitoire, puis ils sont fixés dans le régime permanent entre la valeur 40 et -40.

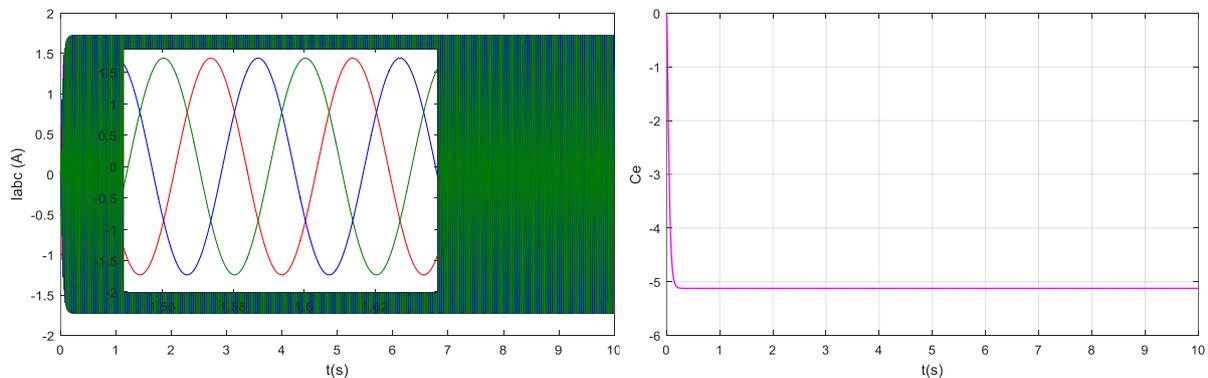
### II.8.1.3 Essai en charge

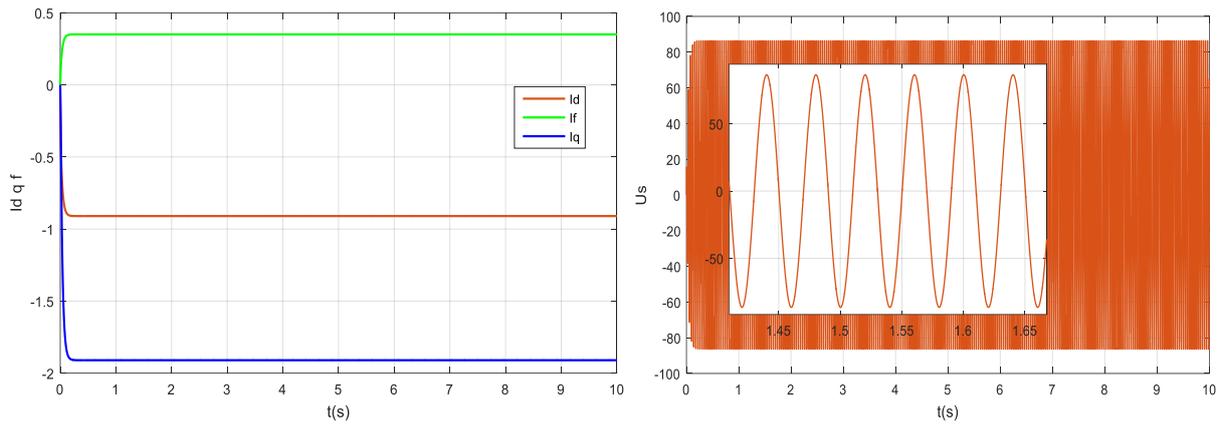
La génératrice alimente une charge R L avec une tension d'excitation  $V_f = 220V$ , D'après la Modélisation, on obtient le schéma fonctionnel de la génératrice synchrone à pôles saillants sans amortisseurs fonctionnant en charge R L :



**Figure II.16 :** Simulation de la (GSRB) sans amortisseurs fonctionnement en charge

Les résultats de simulations





**Figure II.17 :** Résultats de simulations (GSRB) sans amortisseurs fonctionnement en charge  
*Interprétations des résultats*

Le courant d'excitation se stabilise à 0,35 A après un temps transitoire de 0,25 s. tandis qu de mêmes temps le couple remise à -5 N.m

Sous charge, le transitoire dure également 0,25 s. Cela peut indiquer un changement de charge ou une perturbation dans le système. Pendant cette période transitoire, les courants  $i_d$  et  $i_q$  sont respectivement négatifs, -0,91 A et -1,91 A. Ces valeurs négatives indiquent la direction des courants par rapport à une référence spécifique.

Le courant et la tension aux bornes de la machine sont des ondes sinusoïdales réglées respectivement à 1,73 A et 86,4 V. Cela peut indiquer que, en régime établi, le courant atteint une valeur efficace de 1,73 A et la tension aux bornes de la machine atteint une amplitude de 86,4 V. Ces valeurs sont typiquement utilisées pour représenter les grandeurs électriques en régime stable. A l'instant 0s à 0,25s le couple diminue progressivement de 0 à -5 et devient constant par la suite.

## II.8. 2 Simulation avec amortisseurs

### II.8.2.1 Essai à vide

A vide les courants des phases statorique sont nuls ( $I_{sd} = I_{sq} = 0$ ), alors le système (2.27) devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} -U_{sd} = \frac{d\Psi_{ds}}{dt} - \omega_r \Psi_{sq} \\ -U_{sq} = \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_r \Psi_{sd} \\ U_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \\ 0 = U_{kd} = R_{kd} i_{kd} + \frac{d\Psi_{kd}}{dt} \\ 0 = U_{kq} = R_{kq} i_{kq} + \frac{d\Psi_{kq}}{dt} \end{array} \right. \quad (2.57)$$

D'après la Modélisation, on obtient le schéma fonctionnel de la génératrice synchrone à pôles saillants avec amortisseurs fonctionnant à vide.

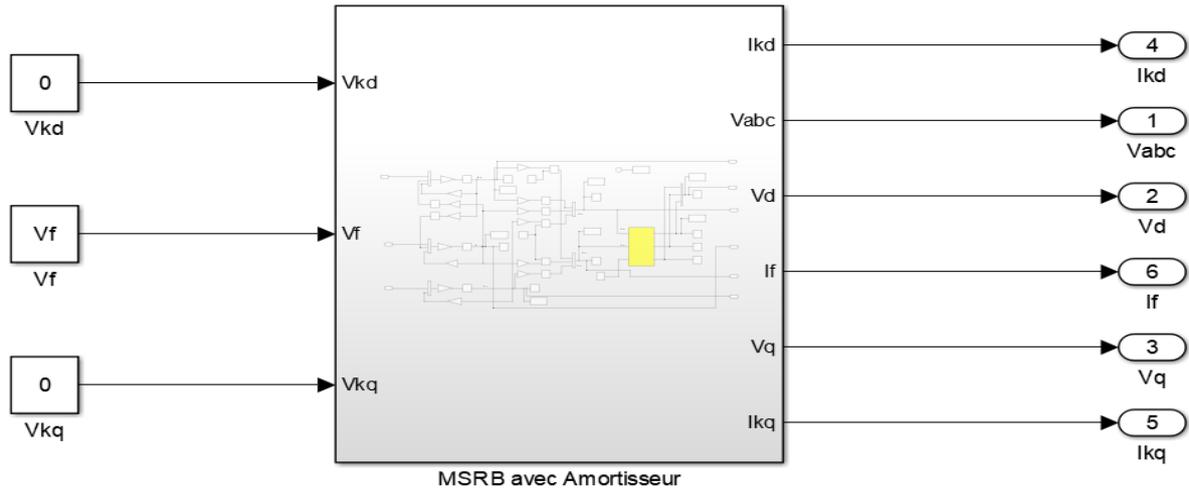


Figure II.18 : simulation de la (GSRB) avec amortisseurs fonctionnement à vide

Les résultats de simulations

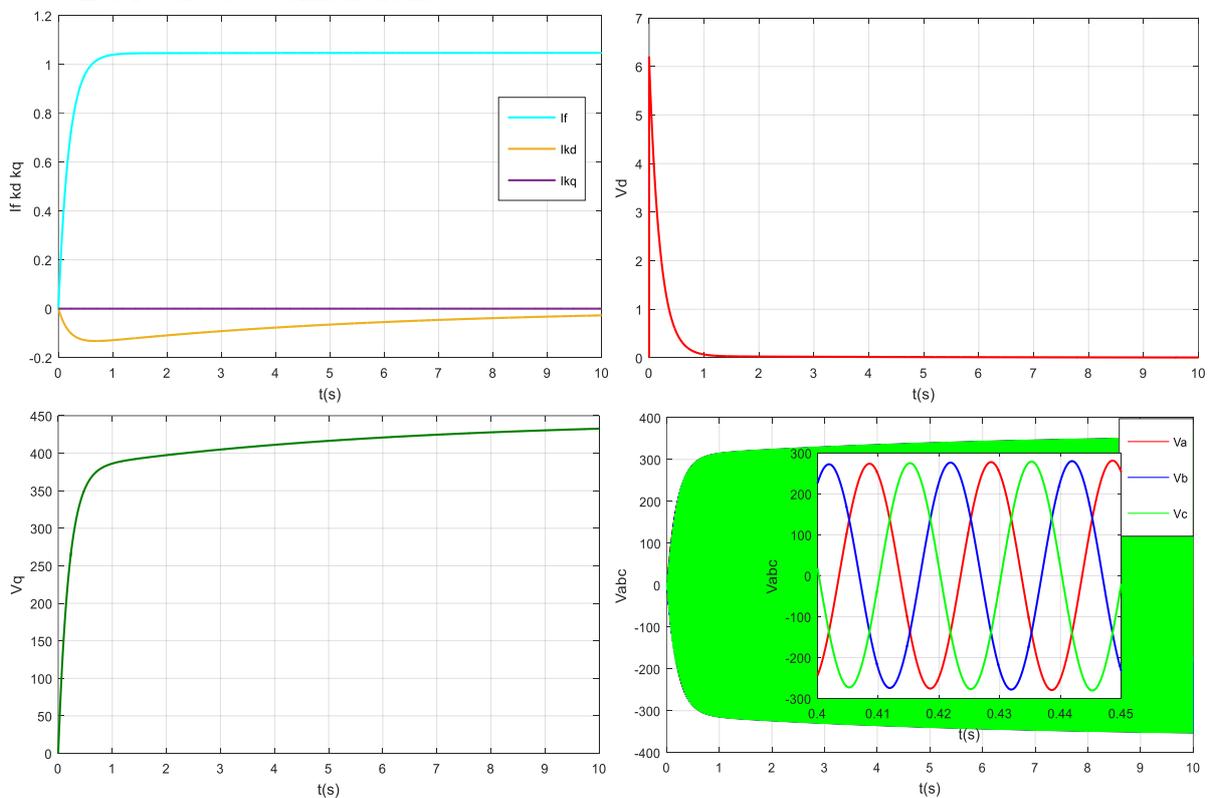


Figure II.19 : Résultats de simulations (GSRB) avec amortisseurs fonctionnement à vide

À une vitesse constante de  $\Omega_m=314$  rad/s, lorsque la machine est à l'arrêt, le courant d'excitation atteint une valeur stable de 1,02 A après un temps de réponse de 1,2 s.

La tension  $V_d$  atteint un pic de 6 V à  $t = 1,2$  s, puis revient à zéro. Cela suggère une variation transitoire de la tension  $V_d$ , où elle augmente jusqu'à un pic de 6 V à  $t = 1,2$  s, puis diminue pour finalement atteindre zéro.

À  $t = 1,9$  s, la tension  $V_q$  atteint une valeur fixe de 400 V. Cela peut indiquer une autre variation transitoire de la tension  $V_q$ , où elle augmente jusqu'à atteindre une valeur constante de 400V à  $t = 1,9$ s.

## Chapitre II : Modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants avec amortisseurs (MSRB)

Les tensions triphasées sont sinusoïdales avec une amplitude de 360 V en régime établi et une fréquence de 50 Hz. Cela signifie que les tensions varient dans le temps selon une forme d'onde sinusoïdale, avec une amplitude maximale de 360 V et une fréquence de 50 Hz.

Le courant  $I_{kd}$  est constant à zéro, tandis que le courant  $I_{kq}$  diminue de 0 à -0.1, (0s à 0.4s) puis augmente progressivement pour devenir proche de zéro.

### II.8.2.2 Essai en court-circuit

Au moment du court-circuit, les tensions des phases statoriques s'annulent ( $V_d = V_q = 0$ ), D'après la Modélisation, on obtient le schéma fonctionnel de la génératrice synchrone à pôles saillants avec amortisseurs fonctionnement en court-circuit :

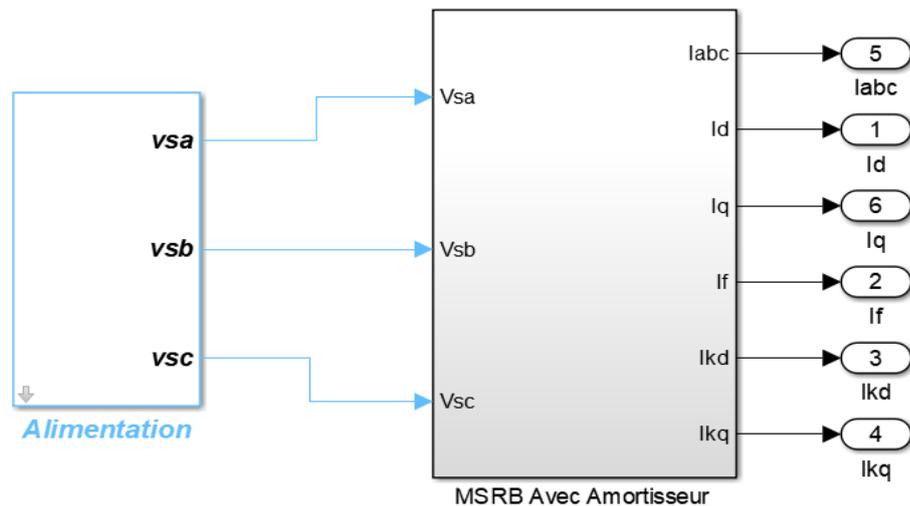
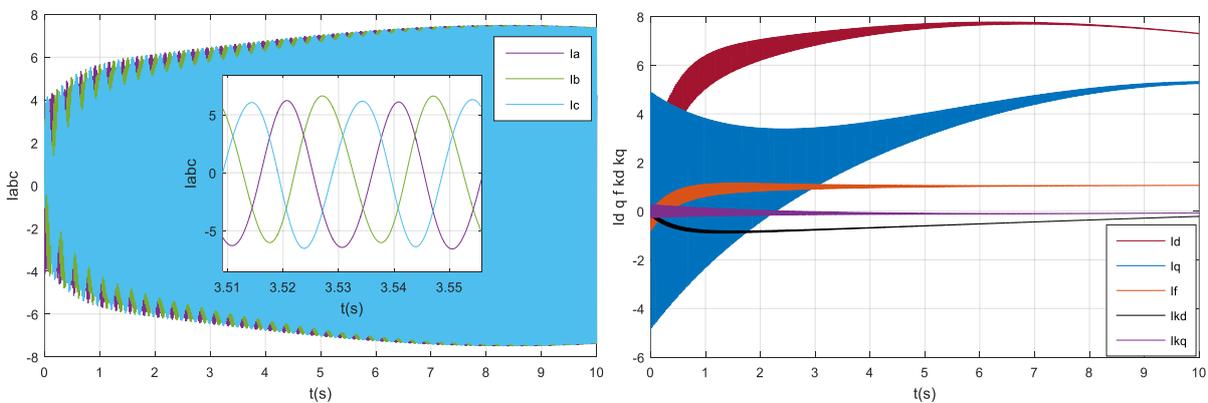
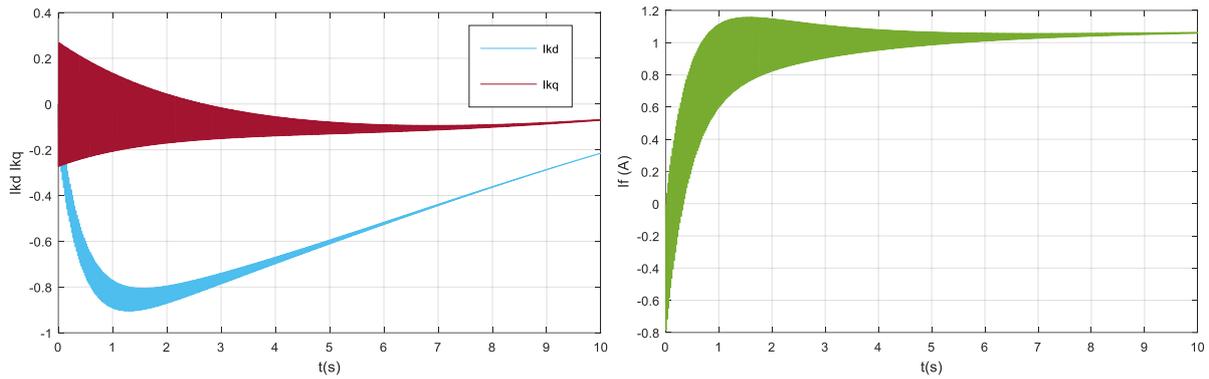


Figure II.20 : Simulation de la (GSRB) avec amortisseurs fonctionnement en cc

Les résultats de simulations

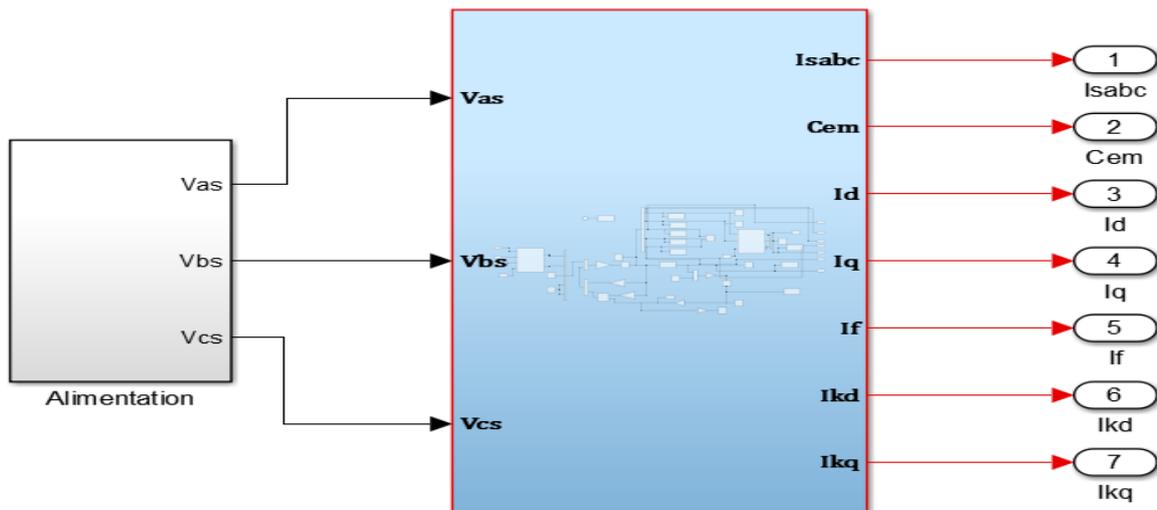




**Figure II.21 :** Résultats de simulations (GSRB) avec amortisseurs fonctionnement en cc  
 Le courant d’excitation se stabilisé à valeur 1.02 A après un temps de réponse 1.2s.  
 Les courants  $I_{abc}$  sont réalité sinusoïdale fixe à valeur entre 7 A et -7A.  
 Le courant  $I_{kd}$  remise à -0.8 A après augmenté presque à zéro, tandis que de mêmes temps le courant  $I_{kq}$  au début se instable du régime transitoire puis fixe à valeur -0.1 A.

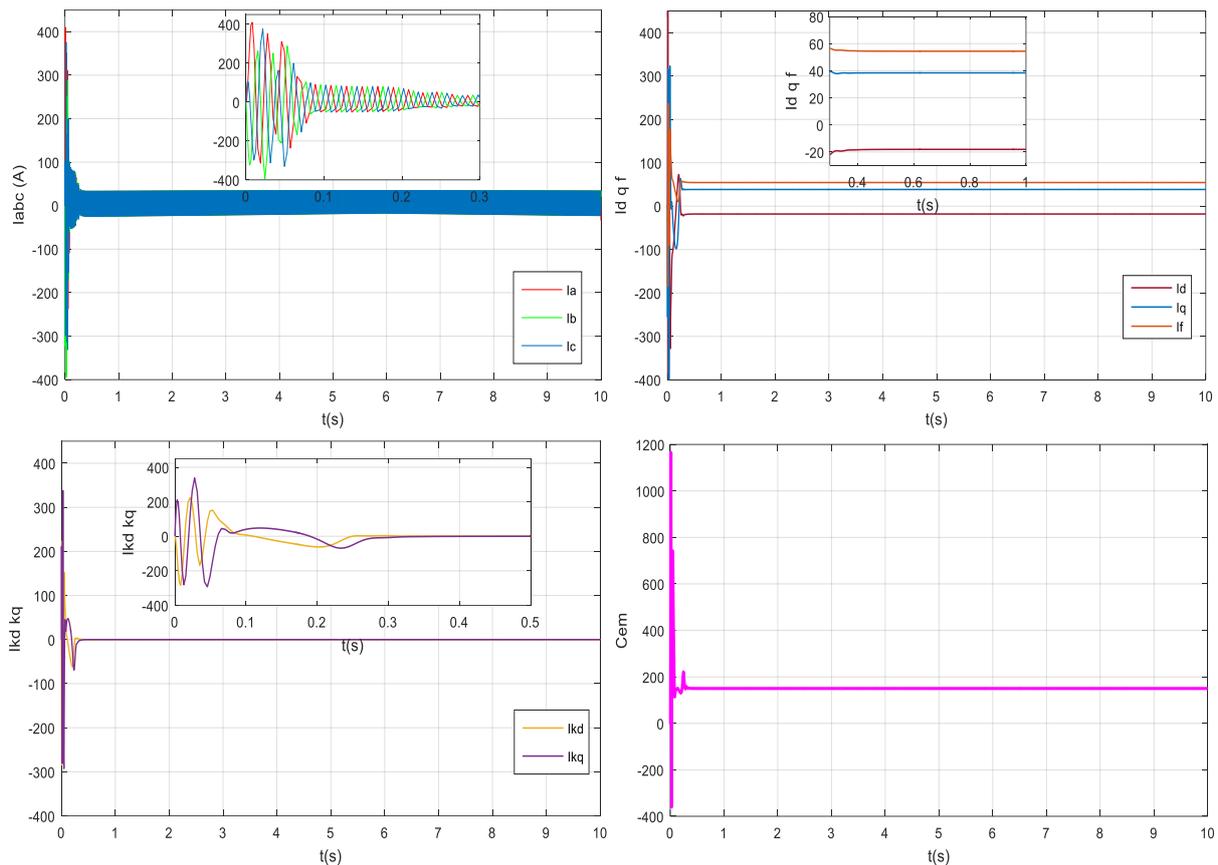
### II.8.2.3 Essai en charge

Dans le cas où la génératrice alimente une charge R-L avec une tension d’excitation  $V_f = 0,35V$ , D’après la Modélisation, on obtient le schéma fonctionnel de la génératrice synchrone à pôles saillants avec amortisseurs fonctionnant en charge R L :



**MSRB\_avec amortisseur**

**Figure II.22 :** Simulation de la (GSRB) avec amortisseurs fonctionnant en charge  
 Les résultats de simulations



**Figure II.23 :** Résultats de simulations (GSRB) avec amortisseurs fonctionnement en charge

Cela signifie que la machine atteint rapidement et maintient la vitesse de synchronisme sans fluctuations indésirables.

Dans la phase transitoire, les courants  $I_{kd}$  et  $I_{kq}$ , qui sont les courants de l'axe direct et de l'axe quadrature, présentent des oscillations prononcées et réagissent à toute perturbation de la vitesse. Cependant, une fois que le moteur atteint la vitesse de synchronisme, ces courants s'annulent.

Le courant statorique  $i_d$  évolue en fonction de la charge appliquée à la machine. À vide, le courant  $i_q$  s'annule rapidement après la fin de la phase transitoire. L'application d'une charge à un moment donné ( $t=1,5s$  dans cet exemple) provoque une légère perturbation, mais grâce à la présence des enroulements amortisseurs, cette perturbation est atténuée.

En résumé, les enroulements amortisseurs dans la machine synchrone permettent de réduire les oscillations indésirables dans la vitesse et le couple. Ils contribuent également à la réduction des perturbations lors de l'application de charges ou de variations de la vitesse, assurant ainsi un fonctionnement plus stable et précis de la machine.

### II.9 Conclusion

Dans cette partie, nous avons pu mettre en évidence des solutions électrotechniques pour produire d'électricité au moyen d'éoliennes.

Ce chapitre consiste par la modélisation mathématique des machines synchrones à pôles saillants avec et sans amortisseurs, Nous avons vu l'importance de la transformation PARK dans la simplification des modèles mathématique sur la machine et dans leur réglage pour la simulation Matlab.

La modélisation et la simulation de la machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants avec amortisseurs sont des étapes essentielles pour comprendre et analyser le comportement de cette machine électrique complexe. En utilisant des équations électromagnétiques et mécaniques, ainsi que l'effet des amortisseurs. La simulation permet d'évaluer les performances de la machine dans différentes conditions de fonctionnement, de prédire son comportement

Le chapitre qui suit sera consacré aux outils liés aux caractéristiques statiques du générateur synchrone à rotor bobiné avec amortisseurs (MSRB).

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right, framing the chapter title.

**Chapitre III : Caractéristiques statiques du  
générateur synchrone à rotor bobiné avec  
amortisseurs (MSRB)**

### III.1 Introduction

Après avoir présenté les modélisations des différentes machines synchrones à rotor bobiné dans le chapitre précédent, le présent chapitre est consacré aux relevés expérimentaux des caractéristiques statiques d'un générateur synchrone à pôles saillants disponible dans le laboratoire automatique Tlemcen LAT.

Pour effectuer une étude expérimentale d'une machine synchrone, une variété de tests pratiques a été réalisés basés sur la mesure des résistances des enroulements du stator et du rotor, les essais à vide, en court-circuit et en charge avec différents récepteurs (résistif, inductif et capacitif).

Le banc d'essais est constitué d'une machine synchrone entraîné par une machine à courant continue. Les deux machines sont réversibles (moteur – générateur). L'intégralité des résultats obtenus sont exposés et commentés.

### III.2 Présentation du banc d'essais

Le banc d'essai d'une machine synchrone triphasée à rotor bobiné et pôles saillants est utilisé pour mesurer les caractéristiques électriques et mécaniques de cette machine. Le banc d'essai est généralement composé de plusieurs parties, notamment :

- Le système d'entraînement : qui est constitué d'une machine à courant continu qui sert à entraîner la machine synchrone. Cette machine à courant continu doit être capable de fournir une puissance suffisante pour faire tourner la machine synchrone à différentes vitesses de rotation.
- Le système de contrôle : qui permet de régler la vitesse de rotation de la machine synchrone et de mesurer les grandeurs électriques telles que la tension, le courant et la puissance active et réactive.
- Les dispositifs de mesure : qui permettent de mesurer les grandeurs électriques et mécaniques de la machine synchrone. Ces dispositifs peuvent inclure des transformateurs de courant, des voltmètres, des ampèremètres, des wattmètres et des compteurs de vitesse.
- Le système de refroidissement : qui permet de dissiper la chaleur produite par la machine synchrone pendant l'essai. Ce système peut être composé d'un ventilateur, d'un échangeur de chaleur ou d'un système de circulation d'eau.
- Une fois que tous les composants du banc d'essai sont assemblés, l'essai peut être effectué en appliquant une tension et une fréquence spécifiques à la machine synchrone. La machine à courant continu est utilisée pour entraîner la machine synchrone à différentes vitesses de rotation, tandis que les grandeurs électriques et mécaniques sont mesurées à l'aide des dispositifs de mesure.

Les résultats des mesures peuvent être utilisés pour déterminer les caractéristiques électriques et mécaniques de la machine synchrone, telles que la puissance maximale, la tension nominale, la fréquence de synchronisation, le facteur de puissance et le rendement. Ces informations peuvent être utilisées pour optimiser la conception de la machine synchrone ou pour déterminer les spécifications d'une machine synchrone pour une application spécifique.

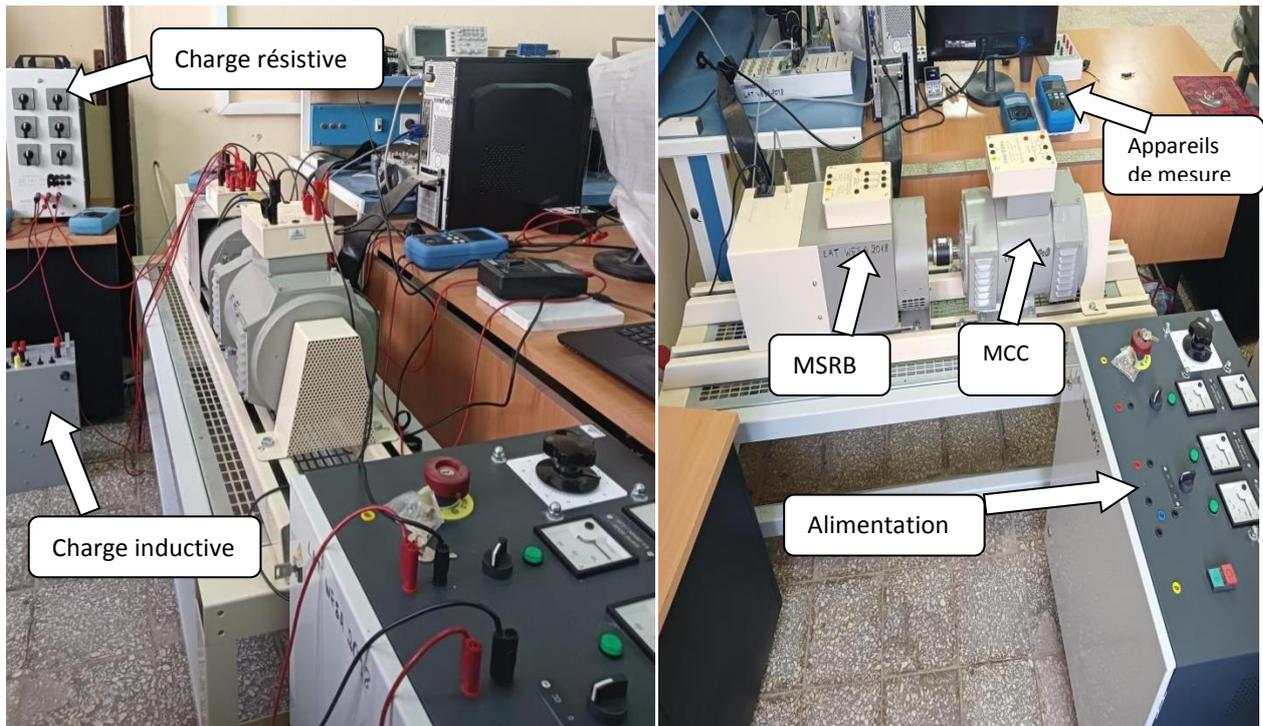


Figure III.1 : Vue globale du banc d'essai

**III.3 Caractéristiques des machines utilisées (Machine Synchrone+ Machine à courant continu)**

*MACHINE SYNCHRONE TRIPHASEE - 1500W (REF. MSM20):*

| <b>L'ALTERNATEUR</b>              |  |
|-----------------------------------|--|
| Puissance Utile                   | 1500 W                                 |
| Vitesse de rotation               | 1500 tr/min                            |
| Tension stator                    | 400 V                                  |
| Intensité stator                  | 2,2 A                                  |
| Tension roue polaire              | 43 V <sub>cc</sub>                     |
| Tension roue polaire max.         | 80 V <sub>cc</sub>                     |
| Intensité roue polaire            | 1,8 A                                  |
| Résistance du stator entre phases | 5,5 Ω                                  |
| Résistance de l'inducteur         | 26 Ω                                   |
| Paires de pôles                   | 2                                      |
| Moment d'inertie                  | 0,024 kgm <sup>2</sup>                 |
| Protection                        | IP2X                                   |
| Refroidissement                   | Auto-ventilé                           |
| Protection thermique              | 1 sonde de température de type PTO130  |
| Hauteur d'axe                     | 112 mm                                 |
| Raccordement électrique           | Sur plaque à bornes de sécurité de 4mm |

Tableau III.1 : Caractéristiques nominales de la machine synchrone

MOTEUR A COURANT CONTINU 1500W A EXCITATION SHUNT / SEPARÉE (REF.CC20) :

| <b>MOTEUR</b>                 |  |
|-------------------------------|--|
| Puissance Utile               | 1500 W   |
| Vitesse de rotation           | 1500 tr/min  |
| Vitesse de rotation Max       | 4500 tr/min  |
| Tension d'induit              | 220 V  |
| Tension d'induit Max          | 400 V  |
| Intensité d'induit            | 9 A  |
| Tension d'inducteur           | 220 V  |
| Intensité d'inducteur         | 0,6 A  |
| Protection                    | IP2X   |
| Refroidissement               | Auto-ventilé   |
| Utilisation avec un variateur | Max 15 min pour une vitesse de rotation inférieure à 1300 tr/min |
| Protection thermique          | 1 sonde de température de type PTO130°C                          |
| Hauteur d'axe                 | 112 mm   |
| Raccordement électrique       | Sur plaque à bornes de sécurité de 4mm                           |

**Tableau III.2** : Caractéristiques nominales de machine à courant continu

### III.4 Identifications paramétriques de la machine synchrone

#### III.4.1 Mesures des résistances du stator et du rotor (Méthode Voltampère-métrique)

La méthode Voltampère-métrique est une méthode couramment utilisée pour mesurer les résistances du stator et du rotor des machines électriques telles que les moteurs à courant continu et les moteurs à courant alternatif. Cette méthode consiste à appliquer une tension connue à l'enroulement de la bobine et à mesurer le courant qui en résulte à l'aide d'un ampèremètre.

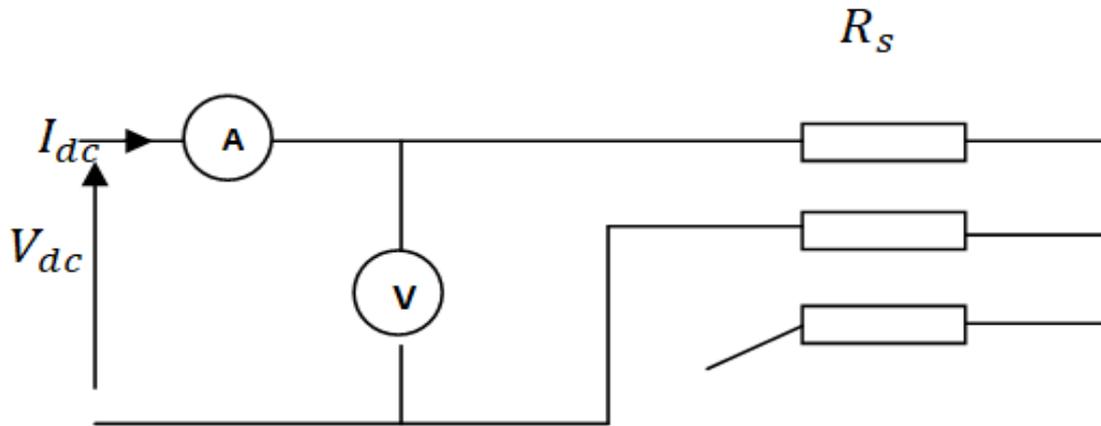
$$R = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (3.1)$$

Pour chaque résistance, qui a été tentée de mesurer par la méthode Voltampère-métrique. Puis, le résultat est obtenu en appliquant la loi d'Ohm en considérant la valeur moyenne, cela permet de minimiser l'importance des erreurs de mesure.

Il est important de noter que la méthode Voltampère-métrique ne mesure que la résistance des enroulements des stators et des rotors, et ne prend pas en compte les pertes d'énergie liées aux champs magnétiques tels que les pertes ferromagnétiques et les pertes par courants de Foucault. Ces pertes doivent être prises en compte dans les calculs de rendement et de puissance.

##### III.4.1.a Mesure de la résistance des enroulements du stator

Pour mesurer la résistance du stator, il est nécessaire de déconnecter toutes les autres connexions de la machine électrique sauf celle de l'enroulement à mesurer (Les enroulements du stator sont couplés en étoile).



**Figure III.2** : Schéma de Montage aval pour la mesure de la résistance apparente statorique  
 Ensuite, une tension connue est appliquée à l'enroulement et le courant qui en résulte est mesuré à l'aide d'un ampèremètre. La résistance est alors calculée en utilisant la loi d'Ohm :

$$R = \frac{V_{dc}}{2 \cdot I_{dc}} \quad (3.2)$$

R est la résistance en ohms, V est la tension appliquée en volts et I est le courant en ampères. la résistance apparente vue entre deux bornes.

Une mesure préliminaire au multimètre numérique a donné :

- à froid :  $R_s = 29.8/2 = 14.9 \Omega$ .
- à chaud :  $R_{sch} = 1,15 \cdot R_s = 17.135 \Omega$

La résistance étant mesurée à température ambiante (25°C), il est nécessaire de majorer sa valeur d'un facteur 1,15 pour obtenir sa valeur à chaud (80°C) [74].

Le tableau ci-après nous donnera les résultats obtenus à partir de Mesure de la résistance apparente de l'enroulement stator :

|          |              |        |      |
|----------|--------------|--------|------|
| $V_{dc}$ | [V]          | 62,7   | 33,4 |
| $I_{dc}$ | [A]          | 2      | 1    |
| $R_{sa}$ | [ $\Omega$ ] | 31,35  | 33,4 |
| $R_s$    | [ $\Omega$ ] | 15,675 | 16,7 |

**Tableau III.3** : Mesure de la résistance apparente de l'enroulement stator

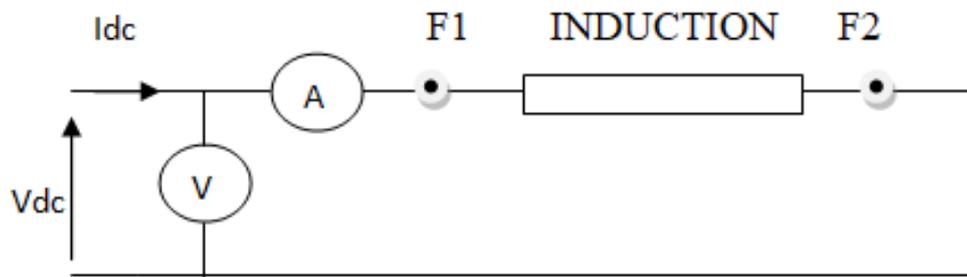
Le calcul de la valeur moyenne donne :  $R_s = 16,1875 \Omega$ .

La valeur à chaud de la résistance statorique  $R_{sch} = 1,15 \cdot R_s = 18.6156 \Omega$

#### III.4.1.b Mesure de la résistance des enroulements du rotor

Pour mesurer la résistance du rotor, il est nécessaire de faire tourner la machine électrique à une vitesse constante connue à l'aide d'une source de puissance externe. Ensuite, une tension connue est appliquée à l'enroulement du rotor et le courant qui en résulte est mesuré à l'aide d'un ampèremètre. La résistance est alors calculée en utilisant la loi d'Ohm.

$$R = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (3.3)$$



**Figure III.3** : Schéma de Montage amont pour la mesure de la résistance rotorique

Une mesure préliminaire au multimètre numérique a donné :

- À froid:  $r = 26.2 \Omega$ .
- à chaud :  $r_{ch} = 1,15.r = 30.13 \Omega$

Le tableau ci-après nous donnera les résultats obtenus à partir de Mesure de la résistance apparente de l'enroulement rotor :

|                |      |      |       |
|----------------|------|------|-------|
| V [V]          | 25,4 | 38   | 49,7  |
| I [A]          | 1    | 1,52 | 2     |
| r [ $\Omega$ ] | 25,4 | 25   | 24,85 |

**Tableau III.4** : Mesure de la résistance apparente de l'enroulement rotor

Le calcul de la valeur moyenne donne :

- $r = 25,0833 \Omega$ .
- La valeur à chaud de la résistance rotorique  $r_{ch} = 1,15.r = 28.8458 \Omega$ .

### III.5 Tous les essais faits dans laboratoire

#### III.5.1 Essais à vide et caractéristique interne à vitesse constante

Les essais à vide, également appelés essais de circuit ouvert, sont réalisés pour mesurer la tension produite par le générateur synchrone lorsqu'il est alimenté en courant continu mais que les bornes du générateur sont laissées ouvertes. Dans cette configuration, il n'y a pas de charge connectée au générateur, et donc aucun courant ne circule dans le circuit.

On étudie l'influence du flux magnétique, créé par le seul courant d'excitation parcourant l'enroulement inducteur du rotor, sur la f.e.m obtenue aux bornes de l'enroulement induit du stator. La vitesse du générateur est maintenue constante pendant l'essai, et on trace la caractéristique interne de la machine fonctionnant à vide.

$$E_v = f(i_{ex}) \quad \text{avec} \quad n_s = 1500 \text{ tr/min} = \text{cste} \quad \text{donc} \quad f = fN = \text{cste} \quad \text{et} \quad I = 0$$

Faire varier  $i$  de 0 à  $1,2 \times i$  nominal par valeurs croissantes puis de  $1,3 \times i$  nominale par valeurs décroissantes.

III.5.1.a Schéma de montage

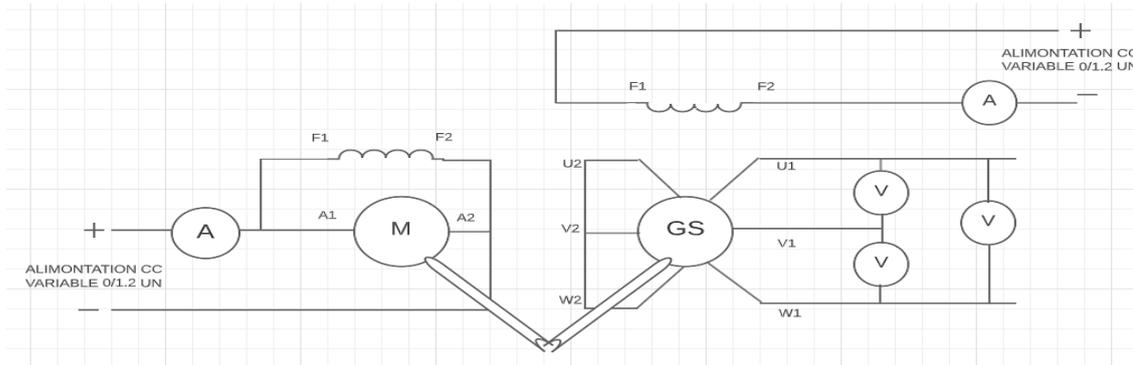


Figure III.4 : Schéma de montage pour l’essai à vide

La machine testée est entraînée en rotation par un moteur à excitation shunt alimenté à la tension nominale et l'excitation contrôlée par un rhéostat d'excitation pour contrôler la vitesse de l'ensemble [moteur shunt + génératrice synchrone].

III.5.1.b Procédure du teste [74]

- Câbler la machine selon le schéma de la Figure III.4 et positionner soigneusement les calibres en choisissant les calibres appropriés en fonction des mesures à effectuer.
- Vérifier que tous les dispositifs de changement de tension sont en position minimum.
- Alimenter l'inductance du moteur à courant continu avec la tension nominale, puis augmenter progressivement la tension d'induit jusqu'à atteindre une vitesse constante de 1500 tr/min.
- Fermer le circuit d'excitation en agissant sur la résistance de champ, faire varier le courant d'excitation par des valeurs croissantes sans jamais reculer, noter les intensités  $i_{ex}$  et les valeurs f.e.m.
- De la même manière, sans jamais retirer, diminuer le courant d'excitation et augmenter les intensités correspondantes  $i_{ex}$  et f.e.m  $E_v$ . Remarquez la nouvelle valeur de la f.e.m. Résidu.
- Complétez le tableau d'évaluation ci-dessous.

III.5.1.c Résultats expérimentaux

| Essai à vide à vitesse constante: $n = nN = 1500 \text{ tr/mn}$ $f = fN = 50 \text{ Hz}$ $I = 0 \text{ A}$ |     |      |      |        |       |     |       |       |     |     |                      |
|--|-----|------|------|--------|-------|-----|-------|-------|-----|-----|----------------------|
| $E_v$  | [V] | 2.11 | 92.8 | 180    | 325.6 | 436 | 493   | 543   | 554 | 565 | $i_{ex}$ croissant   |
| $i_{ex}$   | [A] | 0    | 0.2  | 0.4    | 0.8   | 1.2 | 1.6   | 2     | 2.2 | 2.4 | /                    |
| $E_v$  | [V] | 2.37 | 92   | 176.15 | 327.4 | 432 | 504   | 544   | 560 | 565 | $i_{ex}$ décroissant |
| Caractéristique interne moyenne  |     |      |      |        |       |     |       |       |     |     |                      |
| $E_{vmoy}$   | [V] | 2.24 | 92.4 | 178.07 | 326.5 | 434 | 498.5 | 543.5 | 557 | 565 | /                    |
| $i_{ex}$   | [A] | 0    | 0.2  | 0.4    | 0.8   | 1.2 | 1.6   | 2     | 2.2 | 2.4 | /                    |

Tableau III.5 : Mesure de l’essai à vide à vitesse constante

### III.5.1.d Courbe

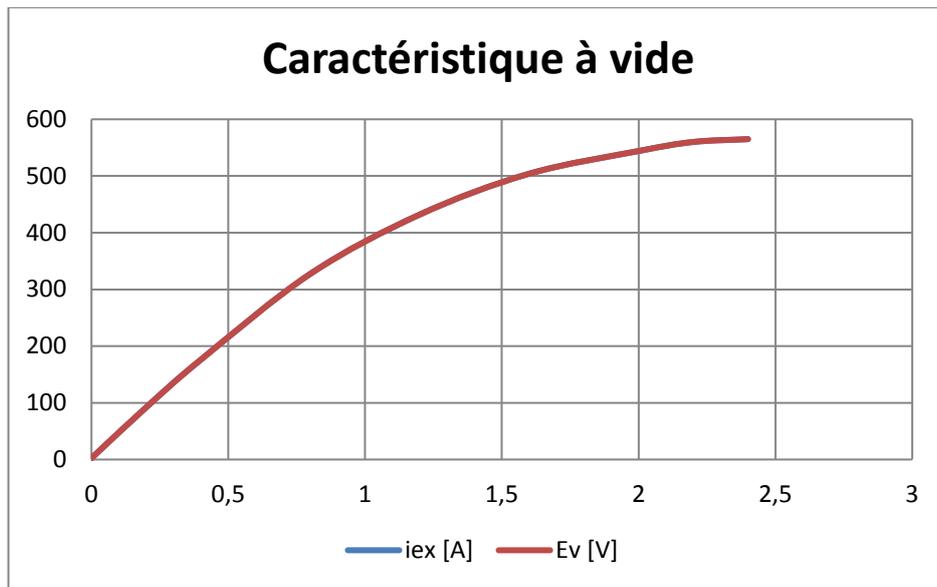


Figure III.5 : Caractéristique à vide (Croissante et décroissante)

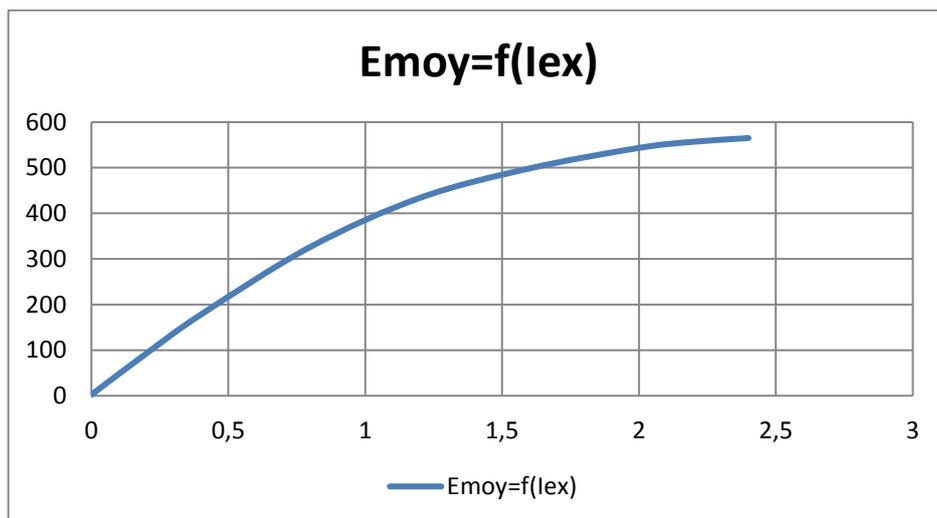


Figure III.6 : Caractéristique à vide moyenne

### III.5.1.e Interprétation des résultats

Les caractéristiques mentionnées nous fournissent des informations sur la qualité du circuit magnétique de la machine. La courbe à vide reflète la courbe d'aimantation réelle, qui est influencée par des facteurs tels que l'hystérésis. Grâce au choix judicieux du matériau, le circuit magnétique présente une bonne circulation du flux magnétique, ce qui réduit les pertes liées à l'hystérésis.

Un phénomène de rémanence se produit lorsque le courant d'excitation est nul, et dans ce cas, la valeur moyenne de la force électromotrice à vide ( $E_{vmoy}$ ) est de 2,24 V. Cette observation est similaire à celle de la courbe moyenne.

La courbe moyenne présente deux zones distinctes. La première zone est linéaire, entre 0 et 1,75 A, où le circuit magnétique n'est pas saturé. La force électromotrice à vide et le flux magnétique sont proportionnels au courant d'excitation.

Dans la deuxième partie de la courbe, nous constatons que cette proportionnalité n'est plus respectée. La force électromotrice est maintenant fonction du flux inducteur, qui doit augmenter avec l'excitation. Cependant, le circuit magnétique atteint sa saturation, ce qui explique que le flux induisant le stator n'est plus une image proportionnelle du flux côté rotor.

Pour un fonctionnement optimal, le point nominal de la machine, indiqué sur la plaque signalétique, se situe au niveau de la saturation. Cela correspond à un courant d'excitation de 2 A et une tension à vide de 543,5 V entre phases. En considérant la tension entre phases et neutre, cela équivaut à 313,789 V.

En résumé, l'analyse de ces caractéristiques nous permet d'évaluer la qualité du circuit magnétique de la machine, d'identifier les phénomènes de saturation et de proportionnalité, et de déterminer le point de fonctionnement optimal en termes de courant d'excitation et de tension à vide.

### III.5.2 Essais en court-circuit permanent

Lors des essais en court-circuit permanent d'un générateur synchrone associé à un moteur cc shunt, et alimenté sous sa tension nominale.

D'étudier l'influence du courant d'excitation, circulant dans le circuit inducteur, sur le courant d'induit délivré par la génératrice synchrone en régime de court-circuit permanent, Pour cela, on trace la caractéristique de court-circuit.

$$I_{cc} = f(i_{ex}) \quad \text{avec} \quad n = nN = \text{constante} \quad \text{et} \quad U = 0 \text{ Volt}$$

#### III.5.2.a Schéma de montage

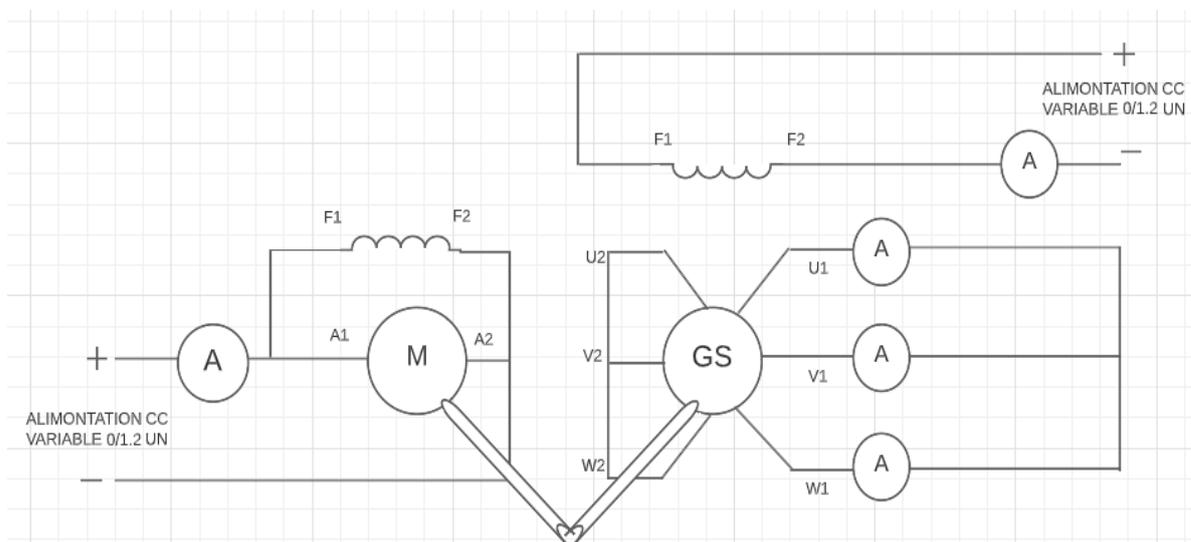


Figure III.7 : Schéma de montage pour l'essai en court-circuit permanent

#### III.5.2.b Procédure du teste [74]

Câbler la machine selon le schéma figure III.7.

- Ouvrir le circuit d'excitation et régler la résistance du rhéostat de champ sur sa valeur maximale.
- Démarrer le moteur d'entraînement, puis ajuster la vitesse de rotation à la valeur nominale, que l'on devra maintenir constante pendant tout l'essai.
- Fermer le circuit d'excitation, puis en agissant sur le rhéostat de champ faire varier le courant d'excitation pour des intensités du courant d'induit comprises entre 0 et sa valeur nominale. Relever les intensités  $i_{ex}$  et  $I_{cc}$  des courants d'excitation et d'induit.
- Avant d'arrêter le groupe, ramener le courant  $i_{ex}$  de la génératrice à son minimum avant la coupure de l'excitation.
- Couper la tension d'alimentation du moteur d'entraînement.

### III.5.2.c Résultats expérimentaux

| <i>Essai en court-circuit</i>             | $n = nN = 1500tr/mn$ |      |     | $f = fN = 50Hz$ |     |     | $U = 0V$ |  |
|---|----------------------|------|-----|-----------------|-----|-----|----------|--|
| Courant d'excitation ( $i_{ex}$ ) [A]     | 0                    | 0.2  | 0.3 | 0.5             | 1   | 1.5 | 2        |  |
| Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) [A] | 0                    | 0.32 | 0.5 | 0.82            | 1.7 | 2.5 | 3.1      |  |

Tableau III.6 : Essai en court-circuit

### III.5.2.d Courbe

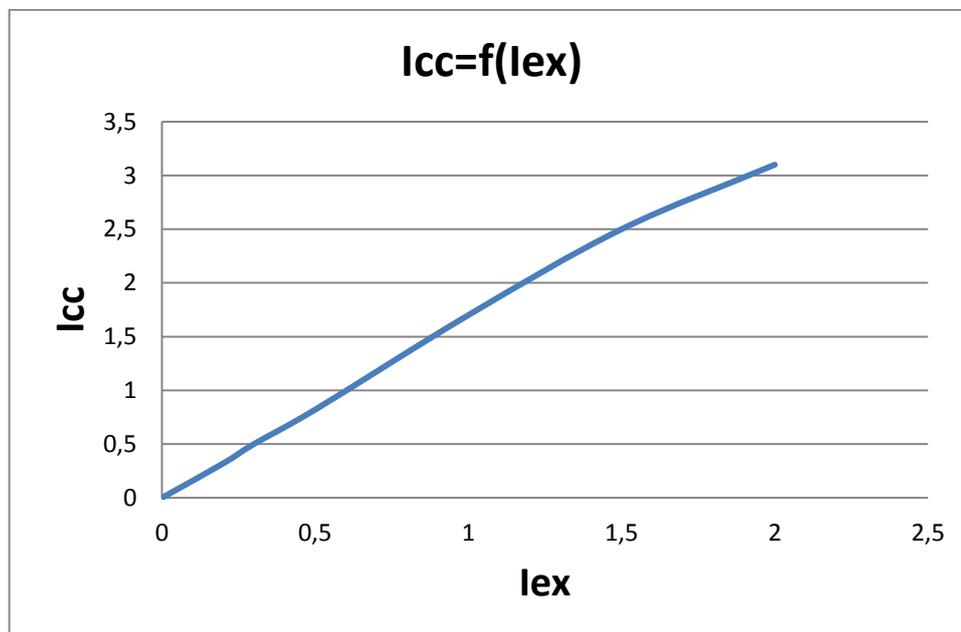


Figure III.8 : Caractéristique de court-circuit.

### III.5.2.e Interprétation des résultats

Comme la tension est nulle lors d'un court-circuit, le courant de court-circuit est directement lié à la force électromotrice (FEM). Puisque la force électromotrice est proportionnelle au courant

d'excitation, on peut dire que le courant de charge est proportionnel au courant d'excitation, ce qui donne une relation linéaire entre les deux variables.

La courbe de mesure se rapproche de cette forme linéaire, bien que des écarts puissent se produire en raison des incertitudes de mesure des appareils et des valeurs mesurées. Cependant, en raison de la faible ampleur de ces erreurs, nous pouvons considérer les caractéristiques comme linéaires jusqu'à la fin de notre analyse.

En supposant l'équation  $I_{cc} = k_{cc} * i_{ex}$ , où  $I_{cc}$  est le courant de court-circuit,  $i_{ex}$  est le courant d'excitation et  $k_{cc}$  est le facteur de court-circuit (linéarité), on peut trouver ce facteur à partir de deux mesures consécutives.

En analysant les mesures relatives, nous pouvons calculer le facteur de court-circuit ( $k_{cc}$ ) qui est la pente de la caractéristique de court-circuit. Cela permet de quantifier la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant d'excitation de la machine électrique.

En résumé, la caractéristique de court-circuit est généralement linéaire et le coefficient de court-circuit ( $k_{cc}$ ) représente la pente de cette caractéristique. En utilisant des mesures appropriées, nous pouvons déterminer ce coefficient et évaluer la relation entre le courant de court-circuit et le courant d'excitation.

### III.5.3 Essais en charge et caractéristiques externes avec charge résistive ( $\cos \phi = 1$ )

L'entraînement en rotation de l'alternateur se réalise par un moteur à courant continu (CC20) afin de régler la vitesse de rotation avec Tracer la caractéristique en charge  $U = f(I)$  à  $n$ ,  $i$ ,  $\cos \phi$  constants et on fait varier la charge résistive, cette courbe nous donnera un graphe montrant l'évolution de la tension « U » en fonction du courant de charge  $U=f(I)$

$$U = f(I) \quad \text{à} \quad n = nN = \text{constante} \quad (f = fN) \quad \text{et} \quad i_{ex} = \text{constante}$$

#### III.5.3.a Schéma de montage

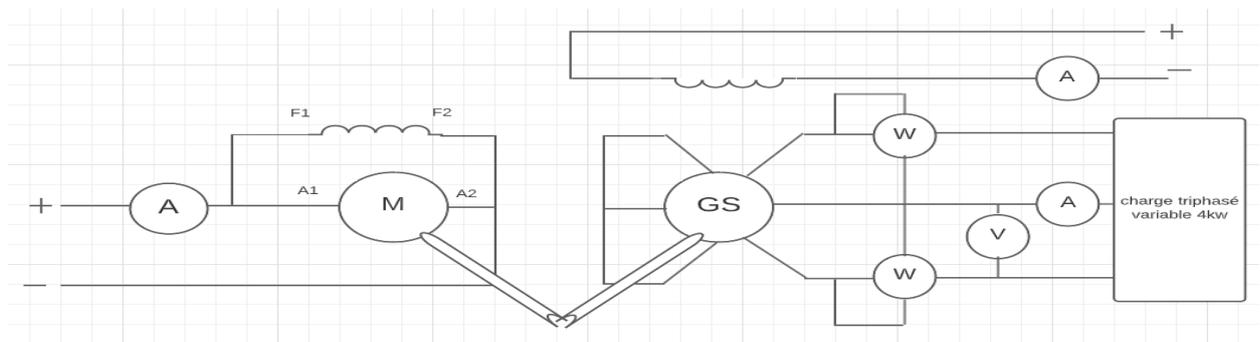


Figure III.9 : Schéma de montage pour l'essai en charge

#### III.5.3.b Procédure du teste [74]

Réaliser les essais en charge, selon la procédure ci-dessous pour les trois cas de charge en vérifiant que les mesures sont effectuées pour un facteur de puissance constant.

- Brancher la charge variable.
- Ouvrir le circuit d'excitation et régler la résistance du rhéostat de champ sur sa valeur maximale.

- Démarrer le moteur d'entraînement, puis ajuster la vitesse de rotation à sa valeur nominale, que l'on devra maintenir constante pendant tout l'essai.
- Charger la machine synchrone à l'aide de la charge variable, puis chercher à obtenir son régime nominal [ $UN$  ;  $IN$  ;  $nN$  ;  $fN$ ] en ajustant successivement la charge, le courant d'excitation et la vitesse de rotation.
- Relever les coordonnées du point de fonctionnement nominal et l'intensité du courant d'excitation correspondante que l'on devra maintenir constante.
- Agir sur la charge variable afin de faire varier l'intensité du courant  $I$  ; relever l'intensité  $I$  du courant débité et la valeur  $U$  de la tension aux bornes de la charge. Noter la valeur de la tension à vide.

### III.5.3.c Résultats expérimentaux

Le tableau ci-après nous donnera les résultats obtenus à partir de l'essai en charge variable : résistive de 4kW

| <i>Essai en charge</i>             |       | $n = nN = 1500tr/mn$ |         |         |         |         | $i_{ex} = cste = 1,362A$ |       | $cos \phi = 1$ |  |
|------------------------------------|-------|----------------------|---------|---------|---------|---------|--------------------------|-------|----------------|--|
| I                                  | [A]   | 2.01                 | 1.98    | 1.92    | 1.77    | 1.46    | 0.83                     | 0.005 |                |  |
| U                                  | [V]   | 290                  | 278     | 288.7   | 318     | 368.2   | 422.8                    | 461   |                |  |
| P                                  | [W]   | 582.9                | 550.44  | 554.30  | 562.86  | 537.57  | 350.92                   | 2.30  |                |  |
| Q                                  | [VAR] | -582.9               | -550.44 | -554.30 | -562.86 | -537.57 | -350.92                  | -2.30 |                |  |
| S                                  | [VA]  | 0                    | 0       | 0       | 0       | 0       | 0                        | 0     |                |  |
| $cos\phi$                          |       | 1                    | 1       | 1       | 1       | 1       | 1                        | 1     |                |  |
| $\Delta U = E_v - U$ [V]           |       | 171                  | 183     | 172.3   | 143     | 92.8    | 38.2                     | 0     |                |  |
| $\delta U = 100. (\Delta U/U)$ [%] |       | 42.75                | 45.75   | 43.07   | 35.75   | 23.2    | 9.55                     | 0     |                |  |

Tableau III.7 : Essai en charge de nature résistive

### III.5.3.d Courbe

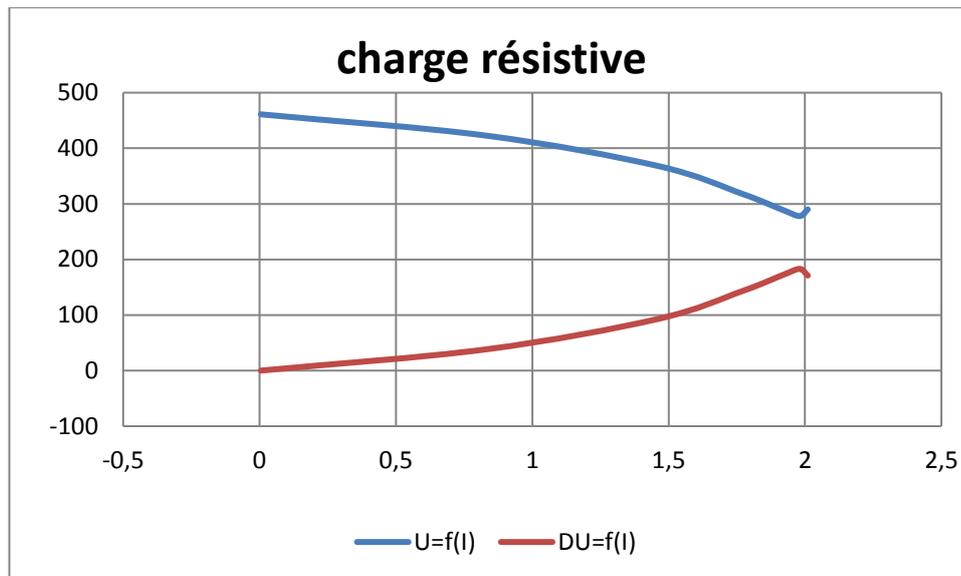


Figure III.10 : Caractéristiques externes avec charge résistive

### III.5.3.e Interprétation des résultats

Il est important de noter que la caractéristique externe  $U = f(I)$ , qui représente la relation entre la tension  $U$  et le courant  $I$ , diminue à mesure que la charge augmente. De même, la caractéristique de chute de tension  $\Delta U = f(I)$  augmente à mesure que la charge augmente.

La chute de tension totale est le résultat de trois phénomènes distincts. Le premier est la chute de tension ohmique, où la tension est proportionnelle au courant. Cette chute de tension est représentée par une ligne droite dans les graphiques.

La deuxième chute de tension est due à l'effet du champ électromagnétique. Lorsque les enroulements du stator sont balayés par les champs statoriques rotatifs, une force électromotrice (FEM) est induite, s'opposant à la cause de ce changement de courant. Cette deuxième chute de tension est directement proportionnelle au courant de charge et est également représentée de manière simplifiée.

La troisième chute de tension est liée à la réaction d'induit, qui se produit lorsque la charge est résistive. Cela entraîne une distorsion du flux rotorique, qui devient plus prononcée à mesure que le courant de charge augmente. Cette troisième chute de tension contribue également à la chute de tension totale.

En résumé, la chute de tension totale aux bornes de la caractéristique extérieure est la somme des trois chutes de tension : la chute résistive, la chute due au champ électromagnétique et la chute due à la réaction d'induit. Ces phénomènes conduisent à une chute de tension lorsque la charge augmente.

### III.5.4 Détermination de la modèle Potier

Cette méthode vous permet de tenir compte de la saturation du matériau de l'aimant. Cette approche suppose que les flux de fuite d'induit sont indépendants de la saturation magnétique.

L'objectif de cet essai est de tracer la caractéristique  $V = f(J)$  pour un courant statorique constant, fourni aux bornes d'une charge inductive ( $\cos \phi = 0$ ) (Figure III.11). Inductance pure à vitesse

nominale, le fonctionnement se fait sur le récepteur Z pour obtenir, pour différentes amplitudes du courant d'excitation J, les valeurs de la tension V correspondant à la réponse en courant partiel I = constante.

Les équations générales du modèle de Potier d'une machine synchrone à pôles lisses pouvant être saturée, sont les suivantes :

$$\underline{V} = \underline{E}_r - R\underline{I} - j\lambda\omega\underline{I} \quad \underline{J}_e = \underline{J}_{e0} - \alpha\underline{I} \quad (3.4)$$

### III.5.4.a Détermination graphique des paramètres de Potier

La méthode que Potier a proposée pour déterminer les paramètres  $\alpha$  et  $\omega\lambda$  est purement graphique. Trois essais à vitesse de rotation constante, sont nécessaires à sa mise en œuvre :

- Un essai à vide qui permet de tracer la caractéristique interne  $E_r = f(J_{e0})$ ,
- Un essai en déwatté relevé à courant d'induit  $I_1$  et permettant d'obtenir le point H ( $J_{e1}, V_1$ ),
- Un essai en court-circuit qui permet de placer le point C. Celui-ci est relevé pour un courant d'excitation  $J_{ecc1}$  tel que le courant de court-circuit  $I_{cc}$  soit égal au courant d'induit  $I_1$  de l'essai en déwatté[75].

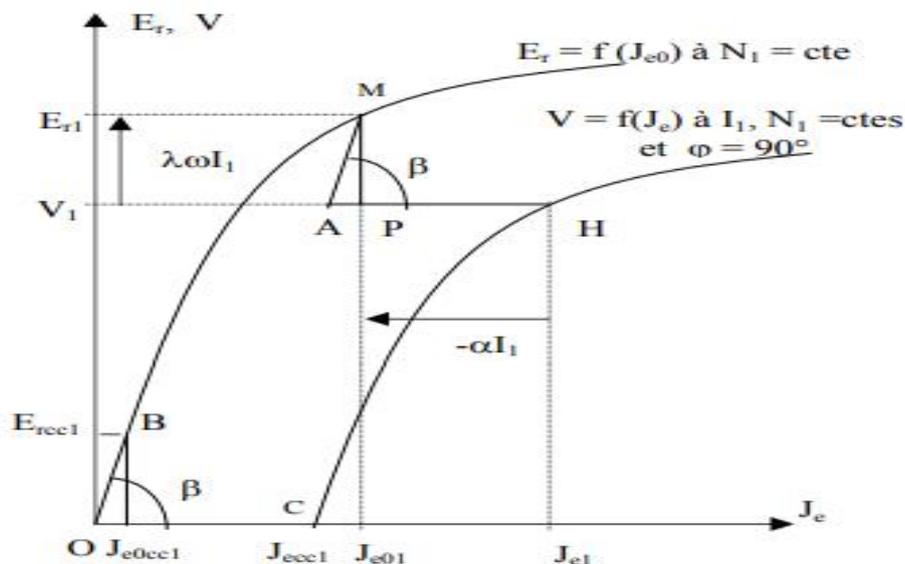


Figure III.11 : Méthode de détermination graphique des paramètres de Potier [75].

Pour un essai en déwatté sur charge inductive, réalisé autour du point nominal, la chute de tension  $RI$  peut être considérée comme négligeable devant  $V$  et les équations vectorielles de (3.5) peuvent se ramener alors aux équations scalaires (3.6) ci-dessous [75].

$$V = E_r - \lambda\omega I \quad J_e = J_{e0} + \alpha I \quad (3.5)$$

III.5.4.b Schéma de montage

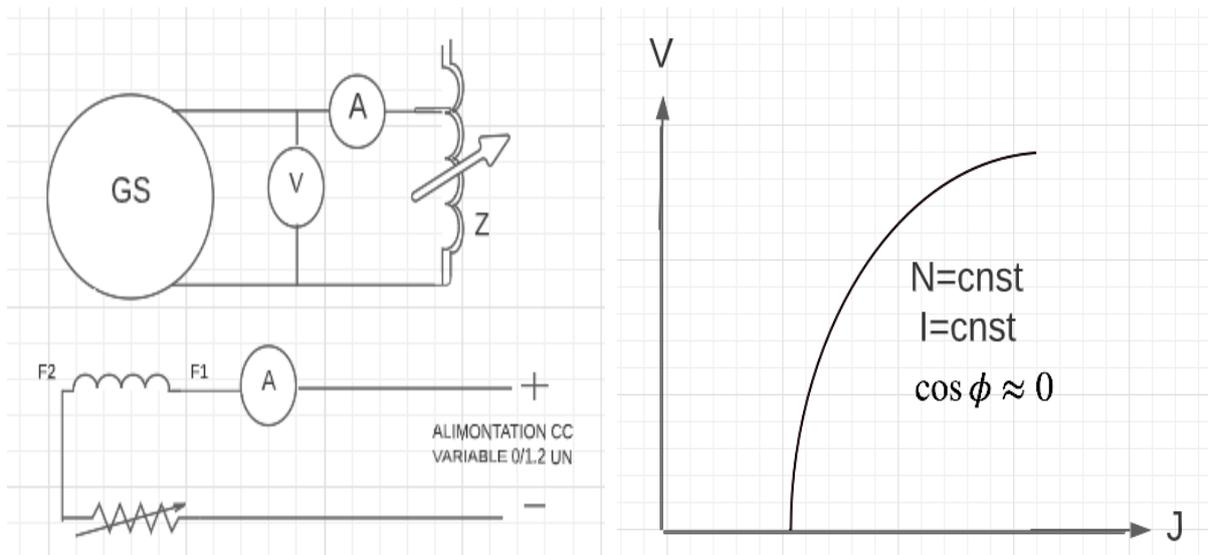


Figure III.12 : Essai sur charge déwatté et caractéristique  $U = f(J)$

III.5.4.c Procédure du teste [74]

Câbler la machine en fonction du schéma du câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.

- Vérifier que tous les dispositifs de changement de tension sont en position minimum (tension d'alimentation de la roue polaire, tension d'excitation du MCC, tension d'induit du MCC).
- Alimenter l'inductance de la machine MCC avec la tension nominale puis augmenter progressivement la tension d'induit du MCC jusqu'à atteindre une vitesse constante de 1500 tr/min (fréquence constante de 50 Hz).
- Nous calibrons notre charge inductive sur une alimentation triphasée puis l'alimentons directement depuis notre alternateur.
- Avec une alimentation en courant continu variable de 0 VDC à 250 VDC, l'inductance de la machine synchrone (roue polaire) est alimentée progressivement jusqu'à atteindre le courant nominal dans le stator.
- En mode excitation, la charge est modifiée par pas fixes afin de maintenir le courant de charge constant.
- Le courant d'excitation est mesuré à partir de la tension machine VL-L.

III.5.4.d Résultats expérimentaux

| Essais en charge inductive diagramme Poitier |      |     |     |     |
|--|------|-----|-----|-----|
| $I_{ex}(A)$                                  | 0.5  | 1   | 1.5 | 2   |
| U (v)  | 3.16 | 155 | 235 | 265 |

Tableau III.8 : Essai en charge de nature inductive

### III.5.4.e Courbe

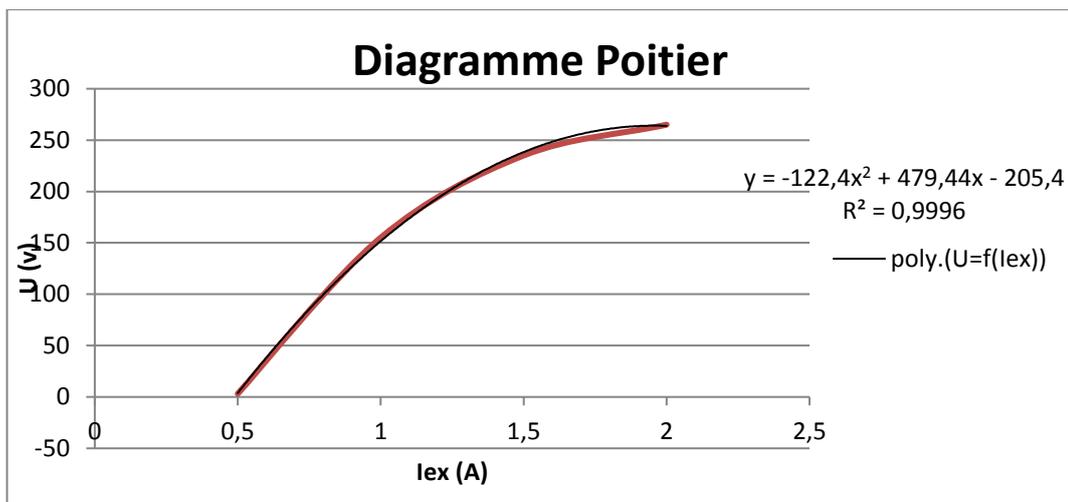


Figure III.13 : Diagramme Poitier U = f (J)

### III.5.4.f Interprétation des résultats

Ce test fournit la courbe de saturation du facteur de puissance zéro. Cette caractéristique est également utilisée avec la caractéristique à vide pour obtenir la réactance de fuite d'induit ou la réactance de Potier (réaction d'induit) d'un générateur synchrone à n'importe quel courant de charge.

### III.6 Conclusion

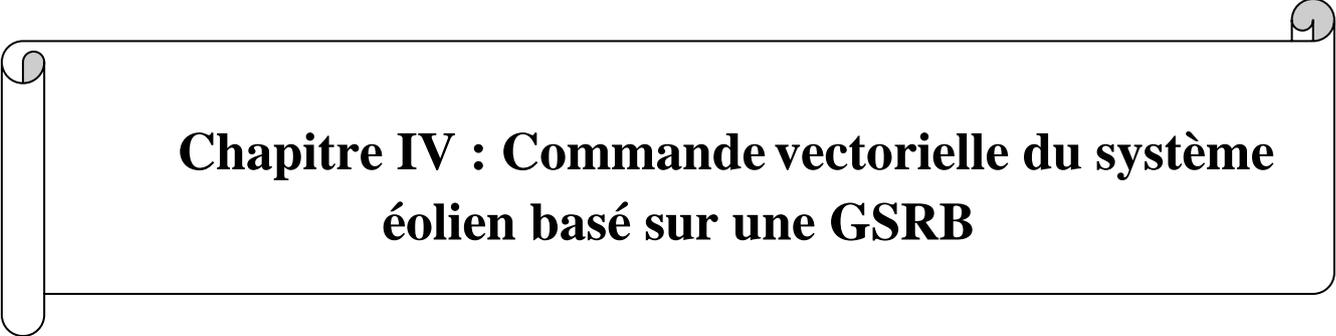
Ce chapitre utilise des essais expérimentaux pour étudier différents phénomènes de champ magnétique se produisant à l'intérieur d'une machine synchrone dans ses deux principaux modes de fonctionnement.

Dans cette étude stationnaire, nous avons mesuré les valeurs de résistance des enroulements du stator et du rotor dans des conditions chaudes et froides. Cette mesure est importante pour tenir compte de la variation de résistance avec la température et pour bien comprendre le comportement de la machine.

En utilisant une machine synchrone comme génératrice, nous avons étudié son comportement en analysant ses propriétés internes entre circuit ouvert et court-circuit permanent à tension réduite. Nous avons également examiné ses caractéristiques externes dans différents modes de chargement et examiné ses capacités de réglage.

Enfin, nous reconnaissons que pour une étude expérimentale stationnaire, il est important de déterminer les paramètres de Poitier. Ces paramètres complètent la modélisation statique de la machine dans les cas non linéaires.

Le chapitre suivant se concentre sur le contrôle vectoriel du système éolien basé sur le modèle GSRB. Globalement, ce chapitre nous a permis d'étudier en profondeur les phénomènes du champ magnétique à l'intérieur d'une machine synchrone et de comprendre son comportement dans différents scénarios. Les tests expérimentaux ont joué un rôle clé dans l'obtention d'informations précieuses et nous ont aidés à modéliser et analyser la machine en conditions réelles.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right, framing the chapter title.

## **Chapitre IV : Commande vectorielle du système éolien basé sur une GSRB**

## IV.1 Introduction

Comme mentionné précédemment, le fonctionnement à vitesse variable nécessite la création d'une stratégie de contrôle globale pour l'éolienne, c'est-à-dire la détermination de la manière d'utiliser les actionneurs disponibles pour répondre aux objectifs de contrôle et aux contraintes de fonctionnement de l'éolienne. Dans ce cadre, nous développerons la stratégie de contrôle adoptée, à savoir le contrôle vectoriel de la chaîne de conversion globale des éoliennes. Notre travail comporte trois étapes :

Dans la première partie de ce chapitre, il analyse les différentes parties de la turbine et les commandes associées, en particulier le principe du Maximum Power Point Tracking (MPPT). Elle consiste à faire varier la vitesse de la turbine en fonction de la vitesse du vent lorsque le générateur est indirectement connecté au réseau afin d'extraire le maximum de puissance du vent.

Dans la seconde partie de ce chapitre nous aborderons le contrôle vectoriel de la GSRB à pôles saillants avec amortisseurs est une technique avancée qui permet un contrôle précis de la machine. Elle consiste à contrôler indépendamment le flux magnétique et le couple électromagnétique de la génératrice en utilisant des algorithmes de contrôle sophistiqués.

Dans la troisième et dernière partie, nous présentons les résultats de simulation obtenus dans l'environnement Matlab/Simulink pour démontrer les capacités de ce système.

## IV.2 Architecture générale (Schéma globale Turbine / Convertisseurs / Génératrice / Commande)

La figure IV.1 illustre l'architecture générale du système de contrôle. La chaîne de conversion électromécanique de l'éolienne repose sur les trois commandes suivantes, qui sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de l'éolienne :

- commande pour extraire la puissance maximale du vent via la commande dite MPPT, en lisant la vitesse du vent en temps réel, ainsi que par la connaissance préalable des caractéristiques de la turbine.
- Contrôle CCM en contrôlant le couple électromagnétique et la puissance réactive du stator GSRB par un redresseur PWM.
- Contrôle du CCR en vérifiant la tension du circuit intermédiaire et la puissance active et réactive échangée par l'onduleur avec le réseau.

De cette conception utilisant un transformateur statique relié par un bus continu, il est possible de faire fonctionner ces éoliennes à des vitesses très différentes.

La tension alternative apportée par l'onduleur côté réseau passe à travers un filtre RL passif pour compenser les harmoniques générées par les différents composants du système.

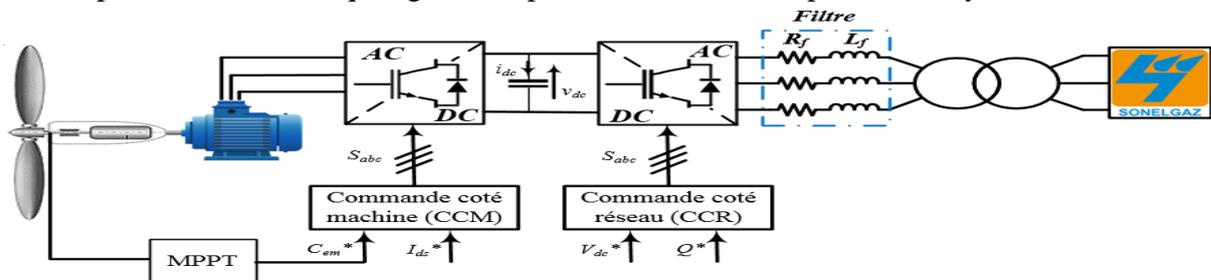


Figure IV.1: Architecture de commande de la chaîne de conversion éolienne connectée au réseau

*IV.3 Modélisation du circuit de puissance*

*IV.3.1 Modèle de la Turbine*

*IV.3.1.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine éolienne*

L'énergie cinétique est convertie en couple grâce aux éoliennes qui font tourner le rotor. La relation entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor est déterminée par trois facteurs : la densité de l'air, la distance parcourue par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatiques qui dépendent de l'emplacement [76].

L'évolution du facteur de puissance est propre à chaque éolienne. A partir des mesures effectuées sur l'éolienne, l'expression du facteur de puissance pour ce type d'éolienne a été approchée [77].

*IV.3.1.2 Energie mécanique transformée*

En supposant une répartition uniforme du vent sur toute la surface balayée par les aubes de turbine, on écrit l'expression de la puissance mécanique absorbée par la turbine en  $P_m$  [78].

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_w^3 \quad (4.1)$$

Le paramètre  $C_p$  est sans dimension, il exprime la capacité de l'éolienne à extraire l'énergie du vent. Ce paramètre caractéristique de l'éolienne est fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  et de l'angle d'inclinaison  $\beta$  et est appelé facteur de puissance.

On définit la vitesse spécifique  $\lambda$  appelé également le ratio de la vitesse de bout de pale comme étant le rapport de la vitesse tangentielle périphérique ( $\Omega_t \cdot R$ ) sur la vitesse instantanée du vent  $V_w$  [79] :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_w} \quad (4.2)$$

$R$  étant le rayon de l'aire balayé par les pâles et  $\Omega_t$  la vitesse de rotation de la turbine.

A partir de l'équation (4.1), on obtient facilement l'expression du couple éolien (aérodynamique)  $C_t$  en fonction de  $\lambda$  :

$$C_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot R \cdot \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \cdot V_w^3 \quad (4.3)$$

On utilise donc le facteur de couple  $C_q$ , qui résulte de la relation suivante :

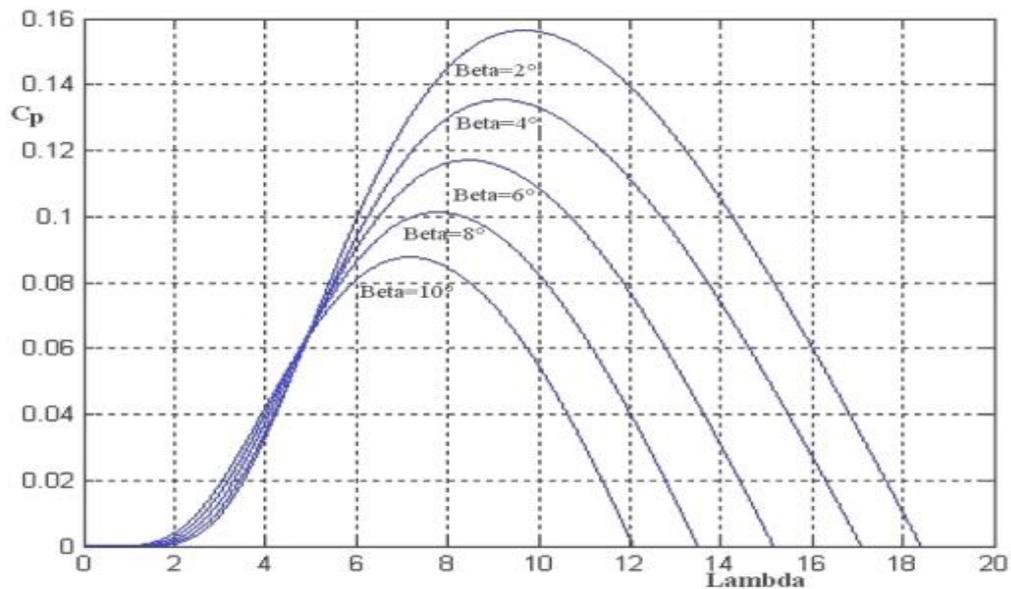
$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (4.4)$$

Ce facteur est utile pour estimer la valeur du couple à différents points de fonctionnement. Il est aussi fonction de la vitesse du vent  $V_w$ , de la vitesse de rotation de la turbine et de l'angle de calage des pales.

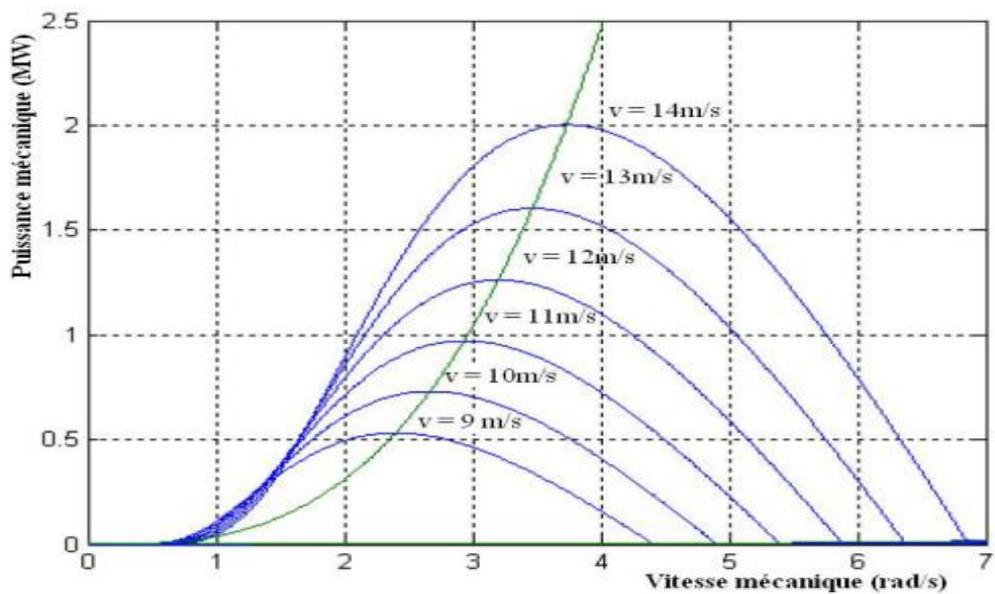
pour ce type de turbine, par l'équation suivante [77]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{1166}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\lambda_i^{-2.1}} \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4.6)$$



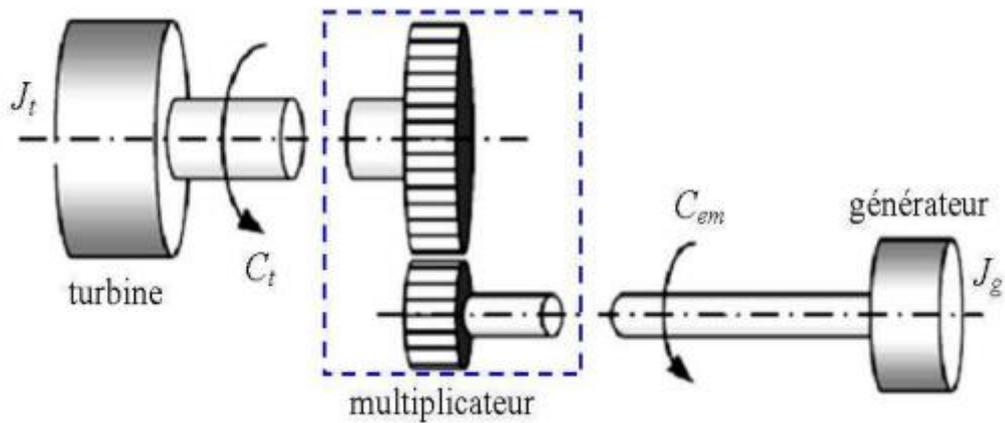
**Figure IV.2:** Coefficient de puissance en fonction du ratio de vitesse ( $\lambda$ ) et de l'angle de calage ( $\beta$ ) [46].



**Figure IV.3:** Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donnée [46]

#### IV.3.1.3 Modèle du Multiplicateur et l'arbre de transmission

Un modèle à deux masses : une masse correspond à l'inertie de la turbine (cette inertie affecte les variations de vitesse en stockant de l'énergie lorsque la turbine accélère et en la restituant lorsqu'elle décélère), et la seconde, plus petite, correspond à l'inertie du générateur. C'est tendance. Il s'est avéré que ce modèle était généralement suffisant pour représenter le comportement en régime dynamique de l'éolienne. [81-83].



**Figure IV.4:** Couplage mécanique entre la turbine et le générateur [84].

Le multiplicateur a pour but de convertir la vitesse mécanique de la turbine en une vitesse supérieure de la génératrice et le couple aérodynamique en un couple multiplicateur inférieur à la valeur précédente, selon les formules mathématiques suivantes :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} = C_g - C_{em} \quad (4.7)$$

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (4.8)$$

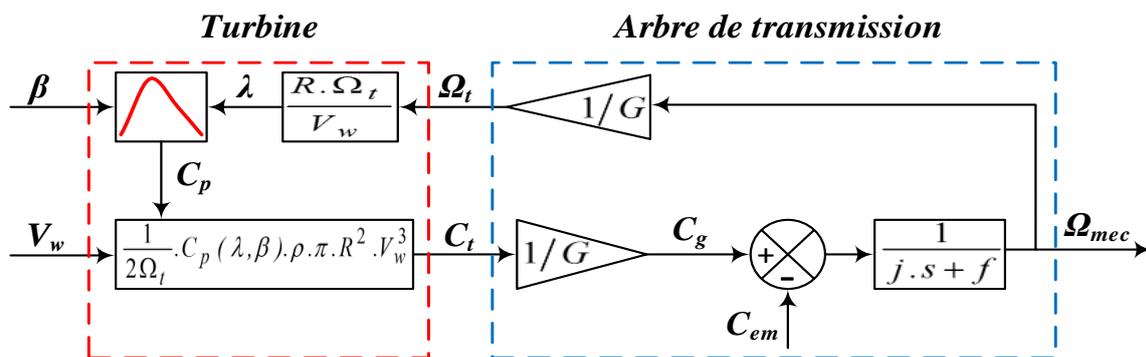
$$f = \frac{f_t}{G^2} + f_g \quad (4.9)$$

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (4.10)$$

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_t \quad (4.11)$$

$J$ ,  $f$ ,  $G$ ,  $C_g$ ,  $\Omega_{mec}$  sont l'inertie totale, le coefficient de frottement visqueux totale, le couple aérodynamique ramenés du côté de l'arbre rapide et la vitesse mécanique de la génératrice.

On peut définir un modèle physique qui reflète le comportement dynamique global d'un aérogénérateur à vitesse variable à travers des équations présentées précédemment.



**Figure IV.5:** Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

### IV.3.2 Convertisseur

#### IV.3.2.1 Modèle du Redresseur MLI

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

permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture [4].

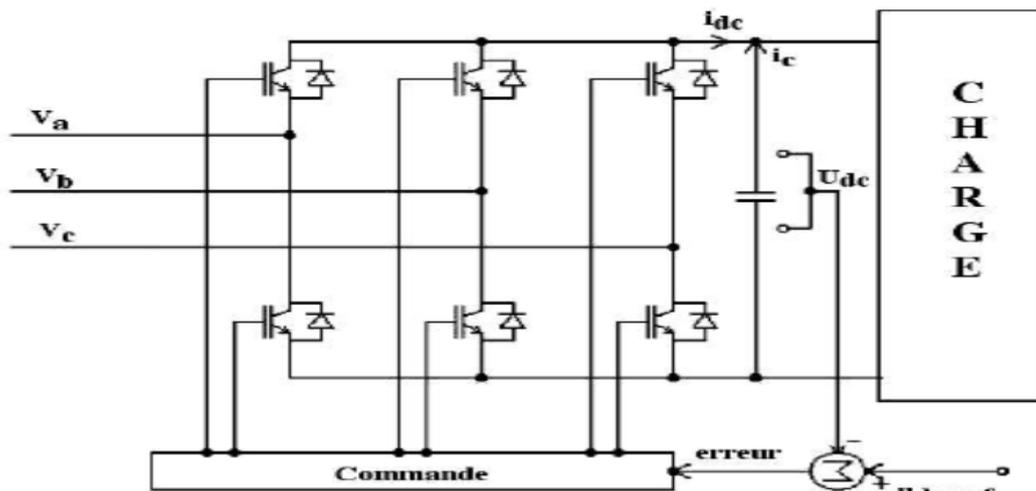


Figure IV.6: Topologies de base d'un redresseur de tension [46].

Le redresseur de tension fonctionne en maintenant la tension du bus CC à une valeur de référence souhaitée à l'aide d'un contrôle en boucle fermée.

La méthode de la bande d'hystérésis est utilisée pour commuter les interrupteurs du redresseur lorsque l'écart entre le signal et son point de consigne dépasse une amplitude spécifiée. Cette amplitude est communément appelée bande ou bande d'hystérésis. Cette technique ne nécessite qu'un seul comparateur à hystérésis par phase [85, 86].

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué en figure 6, l'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à  $-H/2$ , et il se ferme si cette dernière est supérieure à  $+H$ , où  $2H$  représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre  $-H/2$  et  $+H/2$  (c'est-à-dire, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas [87].

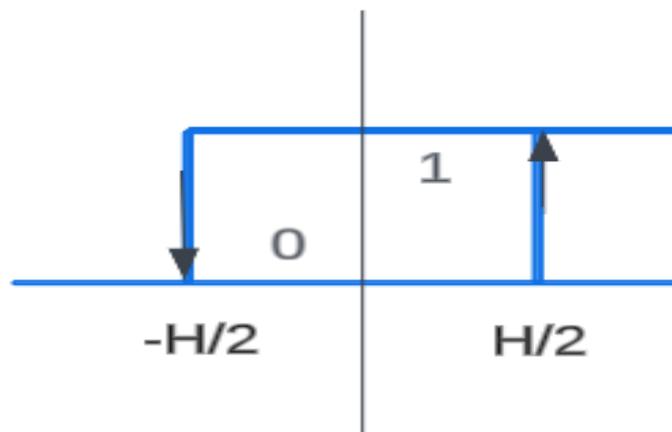


Figure IV.7: Principes de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis.

On peut faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation en modélisant le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux, ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante [88] :

$$S_j = \begin{cases} +1, \bar{S}_j = -1 \\ +1, \bar{S}_j = -1 \end{cases} \text{ pour } j = a, b, c \quad (4.12)$$

Puis les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de  $S_j$ ,  $V_{dc}$  et les courants d'entrée  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ .

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \tag{4.13}$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} u_{sab} = (S_a - S_b) * V_{dc} \\ u_{sbc} = (S_b - S_c) * V_{dc} \\ u_{sca} = (S_c - S_a) * V_{dc} \end{cases} \tag{4.14}$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s * \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + L_s * \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

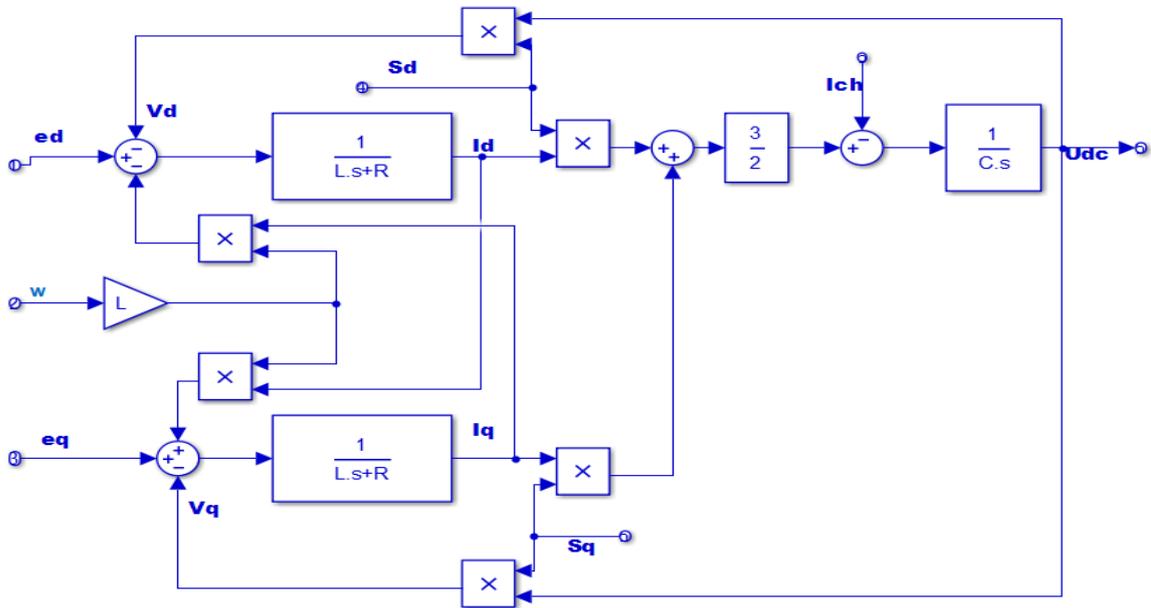
Avec :

$$\begin{cases} u_{sa} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} * V_{dc} \\ u_{sb} = \frac{2S_b - S_c - S_a}{3} * V_{dc} \\ u_{sc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} * V_{dc} \end{cases} \tag{4.16}$$

Enfin, nous dérivons l'équation de couplage pour les côtés AC et DC :

$$C * \frac{dV_{dc}}{dt} = (S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc}) - I_{ch} \tag{4.17}$$

Un schéma fonctionnel dans le repère d – q est présenté dans la **Figure IV.8**

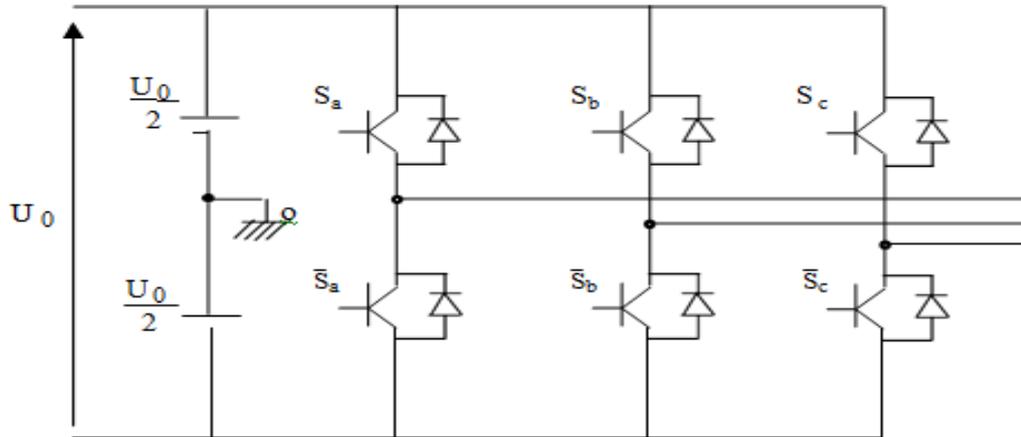


**Figure IV.8:** Schéma fonctionnel du redresseur MLI de tension dans le référentiel tournant d – q [89].

### IV.3.2.2 Modèle de L'onduleur MLI

L'onduleur MLI est un convertisseur statique assurant la conversion continue-alternative (DC/AC) à l'aide d'une séquence adéquate de commande des semi-conducteurs, souvent par Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). La réversibilité de l'onduleur de tension à deux niveaux lui permet de fonctionner en mode redresseur du courant (AC/DC) [89, 90].

L'onduleur de tension triphasé peut être représenté par la **Figure IV.9**, où  $S_i$  ( $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ) sont des transistors MOSFET :



**Figure IV.9:** Schéma d'un onduleur de tension triphasé [91].

Les convertisseurs sont modélisés en exprimant les tensions de ligne en fonction de la tension sur le bus continu et de l'état des interrupteurs. Pour cela, les variables ( $S_1, S_2, S_3$ ) sont définies en fonction de l'état de commutation dans les trois branches. Les commandes de commutation (idéalement supposées) d'un même bras sont complémentaires, ce qui peut être vu comme une quantité logique qui prend l'état (0 ou 1).

Les tensions composées  $u_{ab}, u_{bc}$  et  $u_{ca}$ , sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{ao} + u_{ob} = u_{ao} - u_{bo} \\ u_{bc} = u_{bo} + u_{oc} = u_{bo} - u_{co} \\ u_{ca} = u_{co} + u_{oa} = u_{co} - u_{ao} \end{cases} \quad (4.18)$$

Où,  $u_{ao}, u_{bo}$  et  $u_{co}$  sont les tensions d'entrée de l'onduleur (tensions continues). Ils sont liés au point médian "o" du diviseur fictif d'entrée.

Soit « n » indice du point neutre du côté opposé. On peut écrire les relations de Charles :

$$\begin{cases} u_{ao} = u_{an} + u_{no} \\ u_{bo} = u_{bn} + u_{no} \\ u_{co} = u_{cn} + u_{no} \end{cases} \quad (4.19)$$

Où  $u_{an}, u_{bn}$  et  $u_{cn}$  sont les tensions des phases de la machine et  $u_{no}$  sont les tensions fictives entre le conducteur neutre de la charge et le point fictif d'indice "o".

En supposant que la charge est équilibrée et que le neutre est isolé, procédez comme suit :

$$u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0 \quad (4.20)$$

La substitution de (4.19) dans (4.20) aboutit à :

$$u_{no} = \frac{1}{3}(u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \quad (4.21)$$

En remplaçant (4.21) dans (4.19), on obtient :

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{2}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \\ u_{bn} = -\frac{1}{3}u_{ao} + \frac{2}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \\ u_{cn} = -\frac{1}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} + \frac{2}{3}u_{co} \end{cases} \quad (4.22)$$

Alors :

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{U_o}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ u_{bn} = \frac{U_o}{3}(-S_a + 2S_b - S_c) \\ u_{cn} = \frac{U_o}{3}(-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad (4.23)$$

Donc, l'onduleur peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternatif.

$$[U_{AC}] = [T] \cdot [U_{dc}] \quad (4.24)$$

Tel que :

$$[U_{AC}] = [u_{an} \quad u_{bn} \quad u_{cn}]^T \quad (4.25)$$

$$[U_{dc}] = [u_{ao} \quad u_{bo} \quad u_{co}]^T = U_0[S_a \quad S_b \quad S_c]^T \quad (4.26)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} \\ \frac{-1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} \\ \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

### IV.3.2.3 Stratégie de la commande MLI naturelle (sinus triangle)

Il existe plusieurs types de commande d'onduleurs comme (commande symétrique, Décalée, MLI...). Les différentes commandes ont le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie .et pour chaque commande le principe de fonctionnement se change.

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (PWM) ou de la modulation de largeur d'impulsion (PWM) élimine les premiers ordres d'harmoniques de courant pour améliorer le facteur de puissance. Par contre, cette technique ne résout pas entièrement le problème des harmoniques actuelles[92].

La modulation PWM s'inspire largement des techniques utilisées dans la transmission d'informations. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire (résultant de la fréquence de coupure) au moyen d'une onde sinusoïdale modulante (fréquence) de fréquence beaucoup plus basse [92].

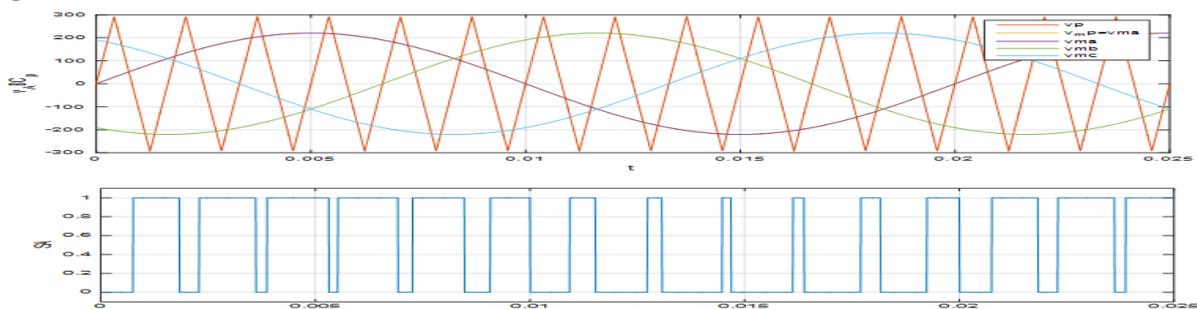


Figure IV.10 : Principe de la commande MLI et les impulsions d'un interrupteur

### IV.3.3 Modèle de bus continu

Le modèle de bus continu, également appelé modèle de barre ou modèle de bus DC, est une représentation simplifiée d'un système électrique en courant continu (DC). Dans ce modèle, tous les éléments du système, tels que les générateurs, les charges et les dispositifs de stockage d'énergie, sont connectés à une barre commune appelée bus continu.

La tension de bus continu doit respecter certaines conditions selon la capacité des convertisseurs utilisés pour assurer le pilotage de la génératrice à vitesse maximale en fonction de la plage de vent exploitable d'une part, et aboutir le maximum de puissance transitée au réseau de l'autre part [76, 93].

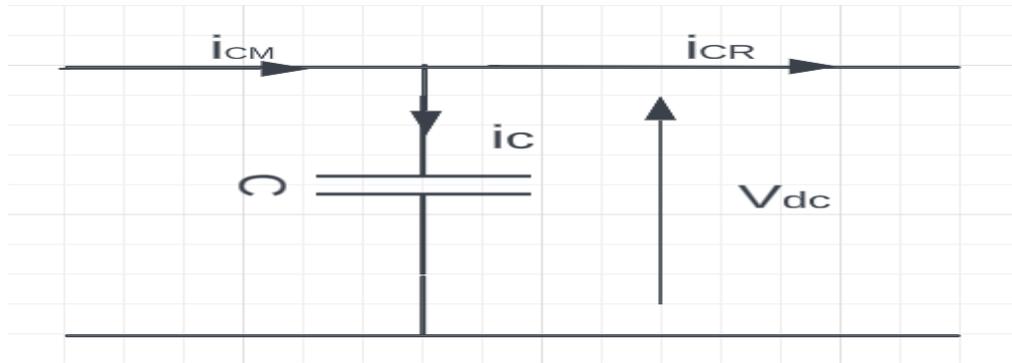


Figure IV.11 : Schéma électrique du bus continu

Le schéma électrique de la (Figure IV.11) permet par la loi des nœuds d'établir la relation suivante.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_c \tag{4.28}$$

$$V_{dc} = \int \frac{dV_{dc}}{dt} + V_{dc}(t_0) \tag{4.29}$$

$$i_{dc} = i_1 - i_2 \tag{4.30}$$

Avec :

- $i_{cm}, i_{cr}$  : respectivement courant modulé par le convertisseur du côté de la machine et celui du côté de réseau.
- $V_{dc}(t_0)$  est la valeur initiale de la tension à l'instant t<sub>0</sub>.
- $V_{dc}, i_c$  tension et courant au niveau du bus continu.
- C valeur de la capacité.

Dans le domaine de la place, l'équation précédente devient :

$$V_{dc} = \frac{1}{C \cdot S} \cdot i_c \tag{4.31}$$

Ou, la boucle de régulation de  $V_{dc}$  dotée d'un correcteur PI, montrée sur la Figure IV.12

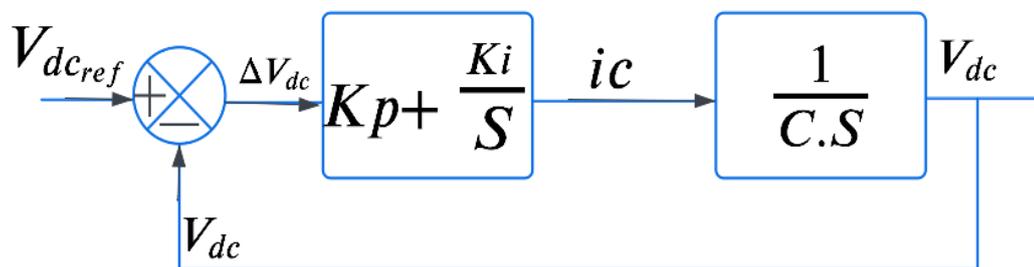
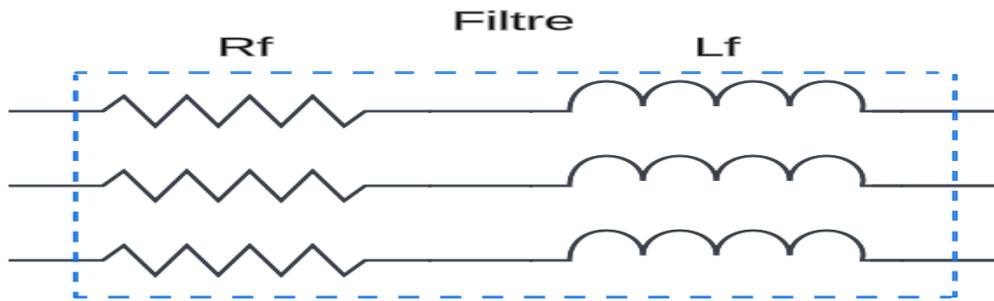


Figure IV.12 : Boucle de régulation de la tension du bus continu

#### IV.3.4 Modèle du filtre RL

Le schéma de Figure IV.13 montre que la liaison au réseau électrique est réalisée via un filtre d'entrée de premier ordre ( $R_f, L_f$ ) raccordé entre l'onduleur et le convertisseur de puissance,

ayant pour objectifs de respecter l'alternance des sources et pour réduire la propagation des harmoniques dans le réseau électrique.



**Figure IV.13** : Schéma électrique du filtre passif

Les courants traversant le filtre sont obtenus par intégration des tensions aux bornes des bobines [76]:

$$\begin{cases} i_{t1}(t) = \frac{1}{L_t} \cdot v_{Lt\_1} + i_1(t_0) \\ i_{t2}(t) = \frac{1}{L_t} \cdot v_{Lt\_2} + i_2(t_0) \end{cases} \quad (4.32)$$

\$i\_{t1}(t\_0)\$ et \$i\_{t2}(t\_0)\$ sont respectivement les courants \$i\_1\$ ; \$i\_2\$ l'instant initial. Le courant dans la troisième phase est déduit à partir des deux premiers :

$$i_{t3} = -(i_{t1} + i_{t2}) \quad (4.33)$$

Les tensions générées par les résistances :

$$\begin{cases} v_{rt\_1} = R_t \cdot i_{t1} \\ v_{rt\_2} = R_t \cdot i_{t2} \end{cases} \quad (4.34)$$

Les tensions aux bornes des bobines peuvent se donner en appliquant la loi des mailles :

$$\begin{cases} V_{Lt\_1} = \Delta V_1 - V_{Rt1} \\ V_{Lt\_2} = \Delta V_2 - V_{Rt2} \end{cases} \quad (4.35)$$

En regroupant les équations précédentes, les équations définissant le filtre peuvent être obtenues :

$$\begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ V_{m3} \end{bmatrix} = R_f \cdot \begin{bmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{g1} \\ V_{g2} \\ V_{g3} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

L'application de la transformation de Park sur le système d'équations nous donne[94]:

$$\begin{cases} v_{md} = R_f \cdot i_{gd} + L_f \frac{di_{gd}}{dt} \cdot L_f \omega_s \cdot i_{gq} + v_{gd} \\ v_{mq} = R_f \cdot i_{gq} + L_f \frac{di_{gq}}{dt} \cdot L_f \omega_s \cdot i_{gd} + v_{gq} \end{cases} \quad (4.37)$$

Les tensions de couplage (\$e\_d\$ et \$e\_q\$) est :

$$\begin{cases} e_d = L_f \omega_s \cdot i_{gd} \\ e_q = L_f \omega_s \cdot i_{gq} \end{cases} \quad (4.38)$$

Il agit également comme un isolant électromagnétique entre les circuits. Ceci est modélisé dans la section suivante.

### IV.3.5 Modèle du transformateur

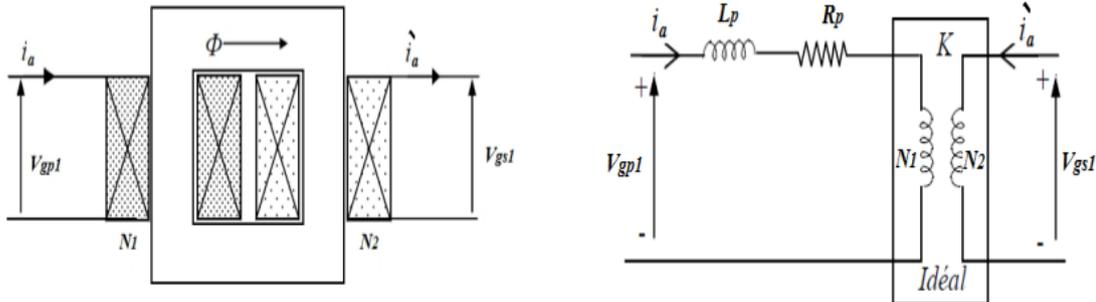
Transformateur élévateur : En règle générale, les éoliennes ont une tension de sortie d'environ 690 V. Le transformateur permet d'augmenter la tension de raccordement au réseau de distribution à « par exemple 20 (kV) ». Aucune éolienne n'est actuellement connectée directement

au réseau de transport.

Le transformateur élévateur se compose généralement d'un enroulement primaire avec un nombre inférieur de spires et d'un enroulement secondaire avec un nombre supérieur de spires. L'enroulement primaire est connecté à une source d'alimentation à une tension plus basse, tandis que l'enroulement secondaire est connecté à la charge à une tension plus élevée. [62], (Figure IV.14).

Le rapport de transformation d'un transformateur monophasé (idéal) est le suivant :

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_{gp1}}{V_{gs1}} = \frac{i_a}{i_a'} \quad (4.39)$$



(a) Schéma de principe d'un transformateur

(b) Transformateur ramené au primaire

**Figure IV.14** : Schéma monophasé équivalent simplifié du transformateur

En négligeant le courant de magnétisation, le modèle du circuit équivalent triphasé peut être exprimé par [62]:

$$[V_{gp123}] = R_p [i_{abc}] + L_p \frac{d[i_{abc}]}{dt} + K [V_{gs123}] \quad (4.40)$$

Après les modélisations faites précédemment, on passe à la commande globale de la chaîne éolienne et aux résultats de simulation.

### IV.3.3 GSRB

Déjà fait dans le chapitre II.

## IV.4 Modélisation du circuit de commande

### IV.4.1 Extraction du maximum de la puissance du vent

L'extraction du maximum de la puissance du vent dans une éolienne implique le contrôle précis de la vitesse de rotation, de l'angle des pales et l'utilisation de systèmes de suivi de la direction du vent pour optimiser la capture de l'énergie éolienne et maximiser la production d'électricité. Cette source éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale  $P_{mn}$  à partir d'une vitesse de vent nominale  $V_{wn}$ . Au-delà de cette vitesse, les paramètres de la turbine doivent modifier afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnant[95].

En régime permanent, la puissance aérodynamique  $P_{aer}$  est convertie directement en énergie électrique moins les pertes représentées par le frottement visqueux

Donc on peut écrire :

$$P_{elec} = P_{aer} - Pertes \quad (4.41)$$

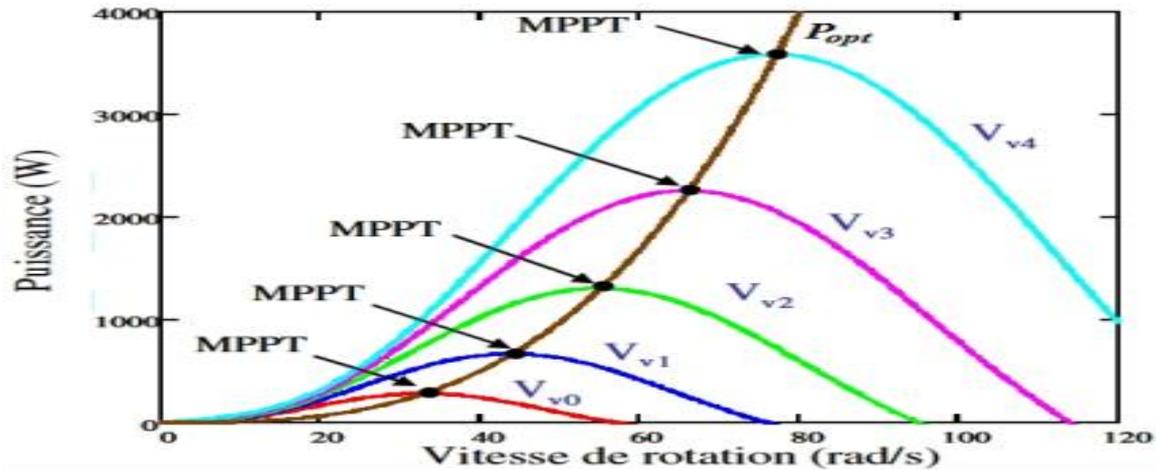
Le système doit déterminer la puissance maximale en utilisant le couple ou la vitesse optimale

pour toutes les vitesses de vent.

L'ensemble des valeurs de crête des caractéristiques de l'éolienne dans le plan de puissance et de vitesse de l'éolienne, qui sont les points optimaux recherchés, détermine la courbe de puissance optimale donnée par l'équation suivante [90] :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \cdot \rho \cdot S V_1^3 \quad (4.42)$$

Le schéma de la **Figure IV.15** illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine pour différentes vitesses du vent ( $V_v$ ).



**Figure IV.15** : caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation [96].

Le fonctionnement optimal d'une éolienne nécessite le suivi parfait de la courbe de  $P_{opt}$ , c'est-à-dire. Le suivi du facteur de puissance jusqu'à sa valeur maximale et de " $\lambda$ " jusqu'à sa valeur optimal  $\lambda_{opt}$ .

On distingue deux familles de structures de commande qui sont maintenant expliquées [15] :

- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique.

#### IV.4.1.1 Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation

La vitesse du vent étant difficilement mesurable, une stratégie MPPT sans cette mesure est présentée. Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [97] :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - f \cdot \Omega_{mec} = 0 \quad (4.43)$$

Si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux ( $f \cdot \Omega_{mec} = 0$ ) par rapport au couple mécanique  $C_g$ , est :

$$C_g = C_{em} \quad (4.44)$$

Alors, la référence du couple électromagnétique de la turbine est obtenue à partir du couple de la turbine :

$$C_{em\_ref} = \frac{G_t}{G} \quad (4.45)$$

Ce qui conduit à écrire :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2\Omega_t G} \cdot \rho \cdot S \cdot C_{p\_max} \cdot V_\omega^3 \quad (4.46)$$

Pour une valeur constante de l'angle d'orientation des pales  $\beta$  et du rapport de vitesse  $\lambda$  égale à sa valeur maximale  $\lambda_{opt}$ , la vitesse du vent peut être estimée :

$$V_{\omega\_est} = \frac{R \cdot \Omega_{t\_est}}{\lambda_{opt}} \quad (4.47)$$

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée  $\Omega_{t\_est}$ , est calculée à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la GSRB :

$$\Omega_{t\_est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (4.48)$$

Le couple de référence est proportionnel au carré de la vitesse de rotation de générateur :

$$C_{em\_ref} = \frac{C_{p\_max} \cdot \pi \cdot \rho \cdot R^5}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (4.49)$$

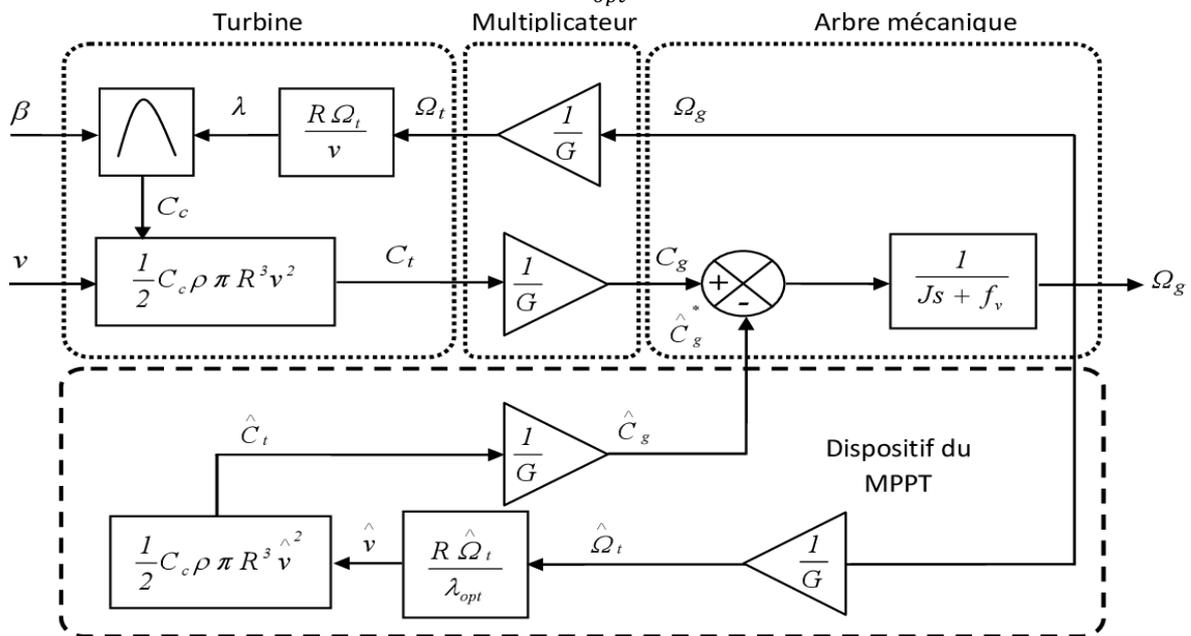


Figure IV.16 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation [98].

#### IV.4.1.2 Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation

Le principe de commande est de réguler le couple électromagnétique sur l'arbre du GSRB pour amener sa vitesse jusqu'à la vitesse de référence. À cette fin, l'asservissement de la vitesse de rotation du GSRB doit être tel qu'illustré à la Fig. IV.17, en utilisant la vitesse du vent mesurée  $V_w$  pour déterminer la vitesse de référence du générateur  $\Omega_{mec}^*$  en fonction du rapport de vitesse optimal  $\lambda_{opt}$ . Cela donne si le coefficient  $C_p$  correspond à sa valeur optimale  $C_{p\_max}$  (pour une constante  $\beta$  égale à  $0^\circ$ )

La vitesse de rotation de référence de la GSRB  $\Omega_{mec}^*$  est obtenue à partir d'équation (4.11) et est définie par :

$$\Omega_{mec}^* = G \cdot \frac{\lambda_{opt} \cdot V_\omega}{R} \quad (4.50)$$

Ce mode de contrôle présente l'inconvénient d'une dégradation de la puissance extraite suite à l'utilisation d'un unique anémomètre sur l'éolienne pour la mesure de la vitesse [53, 99]

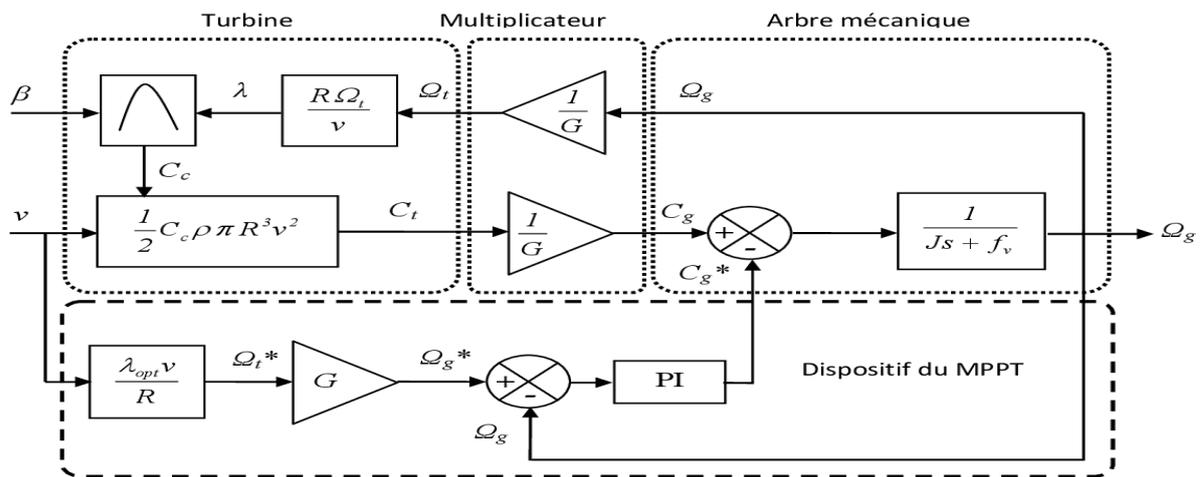


Figure IV.17 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation [98].

#### IV.4.2 Commande côté machine (CCM)

On s'intéresse au contrôle côté machine CCM, deux commandes détaillées par la suite sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de l'éolienne :

- La commande d'extraction du maximum de puissance du vent par une technique dit "MPPT" (Maximum Power Point Tracking).
- La commande vectorielle en contrôlant le couple électromagnétique et la puissance réactive statorique de la GSRB [53].

Le contrôle CCM présente généralement une structure de boucle imbriquée : une boucle de courant interne plus rapide contrôlant les courants de stator sur l'axe d ou q couplée à une boucle de vitesse externe plus lente pour le contrôle du couple et/ou de la puissance réactive.

Dans la stratégie de contrôle du facteur de puissance unitaire, le courant du stator est contrôlé pour avoir deux composantes, d et q, de sorte que la puissance réactive du stator puisse être entièrement compensée.

Si la tension statorique est constante, la tension statorique est contrôlée à la place de la puissance réactive. Grâce à la tension statorique constante, il n'y a aucun risque de surtension et de saturation du convertisseur rapide. L'inconvénient de cette régulation est cependant le besoin en puissance réactive du générateur, qui augmente la puissance nominale du convertisseur.

Au contrôle de couple maximal, le courant du stator est contrôlé pour n'avoir que la composante q. Le générateur délivre ainsi le couple maximum possible. Cependant, comme la puissance réactive n'est pas régulée, la puissance nominale du générateur ou du convertisseur peut être dépassée.

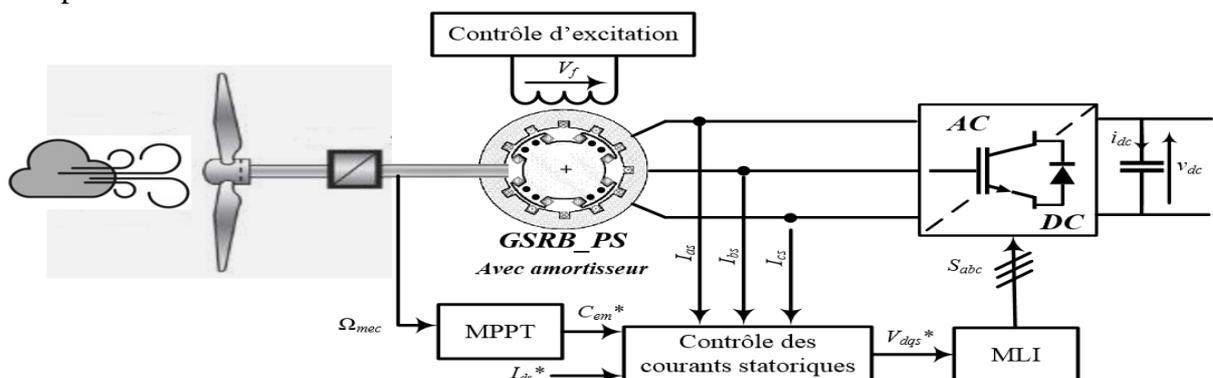


Figure IV.18 : Principe de la commande du CCM

IV.4.2.1 Principe de la commande

En reprenant l'équation (2.46), on constate que lorsque le courant  $i_{sd}$ , est nul, le couple devient proportionnel au courant  $i_{sq}$ , en effet :

$$C_{e\_ref} = \frac{3}{2}p(M_f i_f i_{sq\_ref} + M_{kd} i_{kd} i_{sq\_ref}) \quad (4.51)$$

L'expression du courant de référence iq est donnée donc par :

$$i_{sq\_ref} = \frac{C_{e\_ref}}{\frac{3}{2}p.(M_f.i_f+M_{kd}.i_{kd})} \quad (4.52)$$

Le principe de La commande vectorielle à flux orienté est utilisé pour éliminer ce couplage de manière à obtenir un système linéaire similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée où la commande du flux est assurée par une composante de courant et le couple par l'autre [100, 101].

Cela permet d'envisager une commande en couple de la machine par un asservissement à zéro du courant direct. Le courant quadratique de référence  $i_{qs} - ref$  est obtenu par la boucle de régulation de la vitesse de rotation de la génératrice (par un régulateur PI). Il s'agit d'un pilotage vectoriel de la GSRB qui nécessite la connaissance de la position du vecteur flux rotorique. Elle peut être obtenue grâce à la mesure de la position angulaire du rotor à l'aide d'un capteur de position [76], ou à partir d'une estimation analytique [102, 103]

L'annulation du courant direct, qui correspond à l'alignement du flux d'excitation sur l'axe direct fait que l'angle entre le vecteur force électromotrice  $E_s$  de la machine et son courant  $i_s$  est nul (**Figure IV.19**) [76].

Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique  $r_s$ , ce qui constitue une hypothèse réaliste pour les génératrices de fortes puissances utilisées dans les systèmes éoliens, l'amplitude de la tension de stator devient [104]:

$$v_s = \sqrt{(v_{ds})^2 + (v_{qs})^2} = \sqrt{(\omega_e L_q i_{qs})^2 + (\omega_e \phi_r)^2} \quad (4.53)$$

L'angle du facteur de puissance du stator est défini par :

$$\phi_s = \theta_v - \theta_i \quad (4.54)$$

Où  $\theta_v$  et  $\theta_i$ , sont les angles de la tension de stator et les vecteurs de courant, donnés par :

$$\begin{cases} \theta_v = \tan^{-1} \frac{v_{qs}}{v_{ds}} \\ \theta_i = \tan^{-1} \frac{i_{qs}}{i_{ds}} \end{cases} \quad (4.55)$$

L'angle du facteur de puissance du stator est donné par :

$$\phi_s = \theta_v - \theta_i = \left( \tan^{-1} \frac{v_{qs}}{v_{ds}} \right) - \frac{\pi}{2} \quad \text{pour } i_{ds} = 0 \quad (4.56)$$

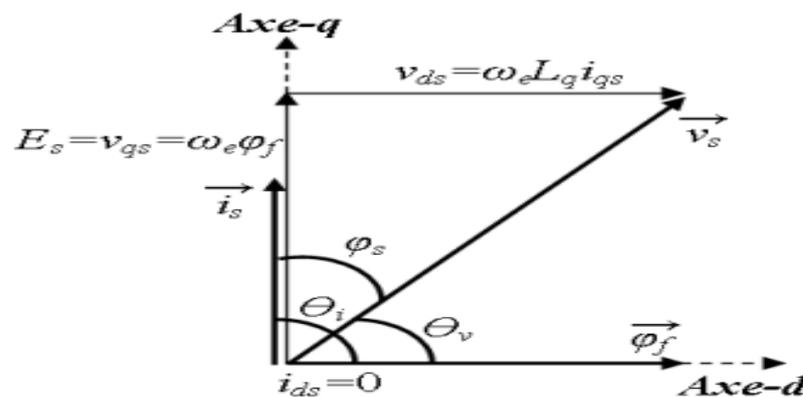


Figure IV.19: Diagramme vectoriel du flux orienté de la GSRB.

**IV.4.2.2 Commande des courants de la GSRB**

Pour l'axe de d et q les tensions de machine est :

$$\begin{cases} v_{ds} = -\left(r_s i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt}\right) + M_f \frac{di_f}{dt} + M_{kd} \frac{di_{kd}}{dt} + L_q \omega_e i_{qs} - M_{kq} \omega_e i_{kq} \\ v_{qs} = -\left(r_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt}\right) + M_{kq} \frac{di_{kq}}{dt} + L_q \omega_e i_{ds} - M_f \omega_e i_f + M_{kd} \omega_e i_{kd} \end{cases} \quad (4.57)$$

Dans le cas d'impulsions du couple de rotation de la machine et changements rapides de charge (changement champ magnétique tournant), L'amortissement se produit avec l'apparition de courants induits dans le dispositif d'absorption, ou un couple est généré qui amortit les vibrations et maintient la synchronisation.

Il n'y a pas de relation entre les amortisseurs et le champ tournant du bobinage, c'est à dire que les courants  $I_{kd}$  et  $I_{kq}$  sont nuls à l'état arrêt (vitesse constante, couple constant).

Les équations (4.57) peuvent être réduites :

$$\begin{cases} v_{ds} = -\left(r_s i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt}\right) + L_q \omega_e i_{qs} - M_{kq} \omega_e i_{kq} \\ v_{qs} = -\left(r_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt}\right) + L_q \omega_e i_{ds} - M_f \omega_e i_f + M_{kd} \omega_e i_{kd} \end{cases} \quad (4.58)$$

Entre les deux axes (d, q) montre l'existence de termes couplés qui induisent une forte interaction  $L_q \cdot \omega_e \cdot i_{qs} - M_{kq} \cdot \omega_e \cdot i_{kq}$  : Est le terme de couplage dans la boucle de régulation de id.

$L_q \cdot \omega_e \cdot i_{ds} + M_f \omega_e i_f + M_{kd} \omega_e i_{kd}$  : est le terme de couplage dans la boucle de régulation de iq.

Nous pouvons obtenir deux équations qui dépendent de  $id$  et  $iq$ :

$$\begin{cases} v_{ds1} = -r_s i_{ds} - L_d \frac{di_{ds}}{dt} = v_{ds} - L_q \omega_e i_{qs} + M_{kq} \cdot \omega_e \cdot i_{kq} \\ v_{qs1} = -r_s i_{qs} - L_q \frac{di_{qs}}{dt} = v_{qs} + L_q \omega_e i_{ds} - M_f \omega_e i_f - M_{kd} \omega_e i_{kd} \end{cases} \quad (4.59)$$

À partir des boucles de régulations  $v_{ds1}$  et  $v_{qs1}$  sont obtenues, après avoir séparé les deux boucles, nous obtenons également  $v_{ds}$  et  $v_{qs}$ :

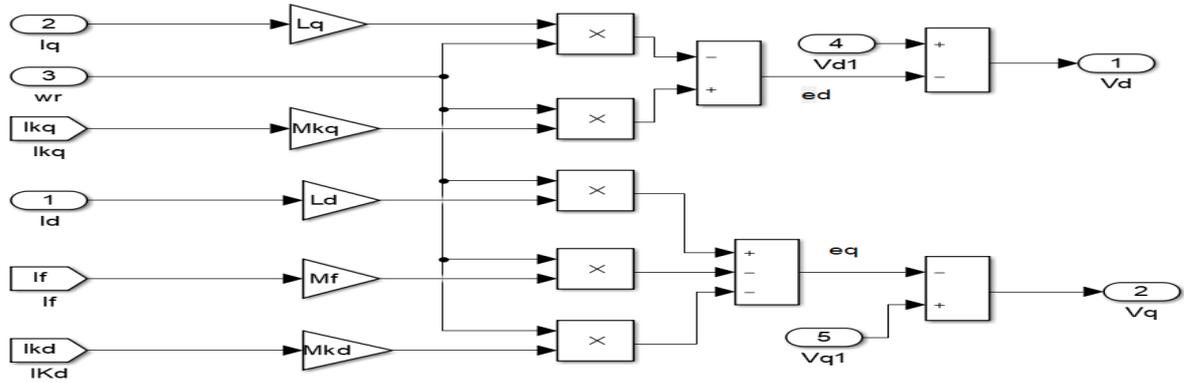
$$\begin{cases} v_{ds} = v_{ds1} - e_{ds2} \\ v_{qs} = v_{qs1} - e_{qs2} \end{cases} \quad (4.60)$$

Avec :

$$\begin{cases} e_{ds2} = -L_q \omega_e i_{qs} + M_{kq} \cdot \omega_e \cdot i_{kq} \\ e_{qs2} = L_d \omega_e i_{ds} - M_f \omega_e i_f - M_{kd} \omega_e i_{kd} \end{cases} \quad (4.61)$$

f.e.m qui est compensé est un  $e_d$  et  $e_q$ . Grâce à la sortie  $v_{d1}$  et  $v_{q1}$  sont identifiés deux transmittances mono variables comme suit :

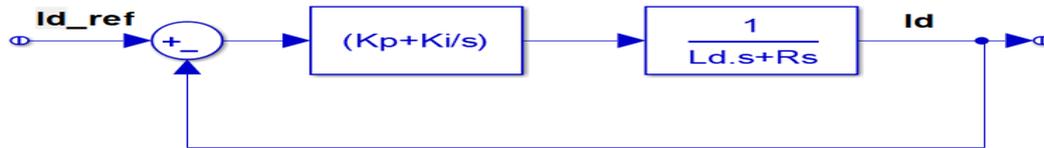
$$\begin{cases} \frac{i_{ds}}{v_{ds1}} = \frac{1}{R_s + S \cdot L_d} \\ \frac{i_{qs}}{v_{qs1}} = \frac{1}{R_s + S \cdot L_q} \end{cases} \quad (4.62)$$



**Figure IV.20 :** Principe du contrôle des courants statoriques de la GSRB

Le courant de stator de référence de l'axe q est obtenu à partir du contrôleur MPPT via le couple électromagnétique de référence (Figure IV.16). Le courant de référence du stator d'axe d est maintenu à zéro.

Pour calculer les paramètres du régulateur. Des modèles linéaires continus sont supposés. Des méthodes de contrôle automatique classiques peuvent être utilisées. La facilité et la simplicité de ces méthodes contribuent au succès de notre travail.



**Figure IV.21 :** boucle de régulation de courant Id

En FTBO est :

$$\begin{cases} F_{BO}(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \cdot \left( \frac{1}{R_s + s \cdot L_d} \right) \\ F_{BO}(s) = \left( \frac{s \cdot K_p + K_i}{s} \right) \cdot \left( \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \frac{L_d}{R_s} s} \right) \end{cases} \quad (4.63)$$

Les paramètres du contrôleur sont déterminés par la méthode de la compensation polaire en BO. Les constantes de temps sont donc égales :

$$\tau = \frac{K_p}{K_i} ; \quad T_{sd} = \frac{L_d}{K_i} ; \quad K_i = \frac{K_p}{T_{sd}} \quad (4.64)$$

En FTBO est :

$$F_{BO}(s) = K_p \left( \frac{s \cdot \tau + 1}{s \cdot \tau} \right) \cdot \left( \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + T_{sd} s} \right) \quad (4.65)$$

On compense le pôle  $\left( \frac{L_d}{R_s} \right)$  par  $\left( \frac{K_p}{K_i} \right)$  ce qui donne la condition :

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{L_d}{R_s} \quad (4.66)$$

Alors :

$$F_{BO}(s) = \frac{K_i}{s \cdot R_s} \quad (4.67)$$

En BF, nous obtenons un système de type 1er ordre avec une constante de temps :

$$\begin{cases} T_f = \frac{R_s}{K_i} \\ F_{Bf}(s) = \frac{1}{s \cdot \frac{R_s}{K_i} + 1} \end{cases} \quad (4.68)$$

Les actions intégrales du PI entières résultent comme suit :  $\left( K_i = \frac{R_s}{T_{BF}} \right)$

Si vous choisissez le temps de réponse  $t_{rep} = 3.T_f$ , on a :

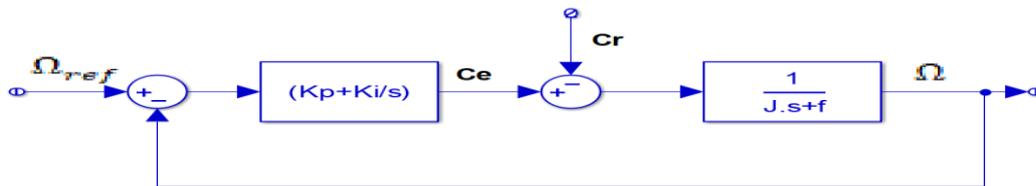
$$\begin{cases} K_i = 3. \frac{L_d}{t_{rep}} \\ K_p = 3. \frac{R_s}{t_{rep}} \end{cases} \quad (4.69)$$

On répété les mêmes opérations sur la boucle de régulation du courant  $i_q$ .

#### IV.4.2.3 Commande de la vitesse de la GSRB

MPPT aide à fournir une référence de vitesse spécifique pour contrôler la vitesse de l'éolienne et atteindre une puissance éolienne maximale.

Le variateur fournit le couple nécessaire pour maintenir un régime constant. La figure ci-dessous montre une boucle de régulation de vitesse avec un régulateur PI :



**Figure IV.22:** Schéma bloc de la régulation de la vitesse.

L'avantage de ce régulateur est qu'il n'introduit pas de valeur nulle dans la FTBF et ne fournit toujours pas d'erreurs statiques. La FT du contrôleur de vitesse est :

$$\left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) = \frac{K_p}{s} \left( s + \frac{K_i}{K_p} \right) \quad (4.70)$$

La FTBO de la vitesse est donnée par ( $Cr=0$ ) :

$$\begin{cases} F_{BO}(s) = \frac{K_p}{s} \left( s + \frac{K_i}{K_p} \right) \cdot \left( \frac{1}{s.J+f} \right) \\ F_{BO}(s) = \frac{\Omega}{\Omega_{ref}} = \frac{K_p \left( s + \frac{K_i}{K_p} \right)}{jS^2(f+K_p).S+K_i} \end{cases} \quad (4.71)$$

La fonction en boucle ouverte de la vitesse a une dynamique du second ordre et l'identifie à la forme canonique du second ordre L'équation caractéristique peut s'écrire comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0} s^2 + \left( \frac{2\zeta}{\omega_0} \right) . s + 1 \quad (4.72)$$

Alors :

$$\begin{cases} \frac{J}{K_i} = \frac{1}{\omega_0} \\ \frac{f}{K_i + K_p} = \frac{2\zeta}{\omega_0} \end{cases} \quad (4.73)$$

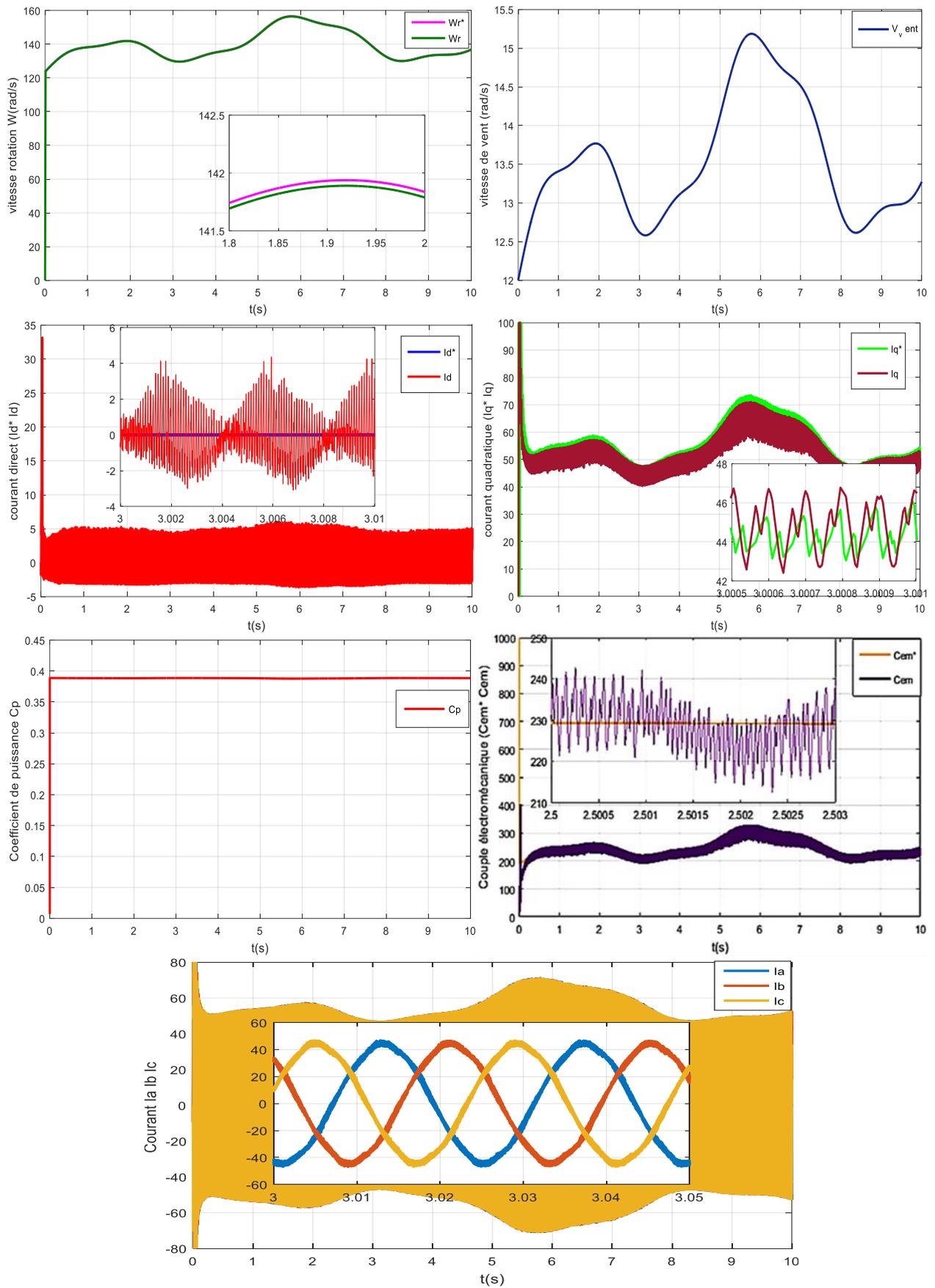
$\zeta$  : est le coefficient d'amortissement.

On déduit les coefficients  $K_i$  et  $K_p$  des coefficients d'amortissement  $\zeta$  et  $w_o$ , Avec :

$$\begin{cases} K_i = J\omega_0^2 \\ K_p = \frac{2.\zeta.K_i}{K_i} - f \end{cases} \quad (4.74)$$

#### IV.5 Résultats de simulation (à vitesse constante / à vitesse variable)

Le profil de vent qui sera appliqué à l'entrée de ce système est réglé à une vitesse moyenne de 12m/s. La mise en application du modèle MATLAB/Simulink est représentée par l'équation suivante :  $v(t) = 12 + 0.2 * \sin(0.1047 * u(1)) + 2 * \sin(0.2665 * u(1)) + 0.2 * \sin(3.6645 * u(1)) + 1 * \sin(1.2930 * u(1))$



**Figure IV.23:** Les résultats de simulations Commande (CCM)

### IV.6 Interprétation des résultats

D'après les résultats de la simulation numérique, on observe que le système de commande présente de bonnes performances pour un profil de vent moyen d'environ 12 m/s. Les courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ , qui représentent respectivement les courants directs et quadratiques, sont découplés et suivent bien leurs références avec un plein dépassement en régime transitoire puisque la (GSRB) une grande puissance, notamment lors du démarrage.

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  est également conforme à l'image du courant quadratique  $i_{sq}$ , qui suit la forme du profil du vent imposé. On peut remarquer que la vitesse mécanique de rotation  $W_{mec}$  suit parfaitement sa référence  $W_{mec}^*$ , qui varie en fonction du profil du vent appliqué.

En outre, la composante du courant statorique quadratique ( $i_{sq}$ ) suit sa référence, tandis que la composante du courant statorique directe ( $i_{sd}$ ) est nulle. Cela est dû au contrôle par orientation du flux rotorique réalisé par le système de commande.

### IV.7 Conclusion

Ce chapitre est consacré au contrôle d'un système éolien à vitesse variable basé sur le GSRB. Dans un premier temps, nous avons brièvement décrit l'architecture globale (schéma global turbine/convertisseur/alternateur/contrôleur).

Ensuite, nous sommes passés au mannequinat. Deux méthodes de contrôle MPPT ont été testées et comparées. Les deux premiers étaient basés sur la connaissance de la courbe caractéristique de l'éolienne (avec/sans contrôle de vitesse) afin d'extraire du vent le maximum de puissance disponible.

Pour l'utilisation de cette machine pour générer de l'énergie éolienne, l'approche de modélisation MSRB a été adoptée, qui a été vérifiée par les résultats de la simulation du générateur déchargé puis chargé.

Le GSRB a été piloté par contrôle vectoriel pour forcer une vitesse de commande optimale de la turbine et donc un couple optimal pour optimiser la capture de l'énergie éolienne. Le redresseur PWM était contrôlé par des références vectorielles de contrôle. L'onduleur triphasé nous a permis de contrôler le bus DC et de fournir une alimentation monophasée ou triphasée à partir de cette source DC, offrant ainsi une plus grande flexibilité dans la distribution de l'énergie électrique en fonction des besoins spécifiques des charges.

Enfin, pour vérifier l'exactitude des modèles mathématiques du système étudié, nous avons effectué quelques simulations. Les résultats obtenus ont montré un bon découplage des courants  $I_{dq}$ .

### *Conclusion générale*

Le contrôle d'un générateur synchrone à rotor bobiné (GSRB) avec amortisseurs et pôles saillants pour les applications éoliennes est un problème complexe mais critique pour assurer le bon fonctionnement et les performances optimales d'un système éolien.

Afin de vérifier chaque pièce et de s'assurer qu'elle fonctionne correctement, nous avons appliqué les stratégies nécessaires : systèmes de conversion de l'énergie éolienne à la pointe de la technologie, modélisation, propriétés statiques du GSRB, analyse des performances et contrôles.

Le premier chapitre être consacré sur l'énergie éolienne et les machines synchrones, telles que les GSRB, jouent un rôle important dans la transition énergétique vers des sources d'énergie plus propres et durables. Elles offrent une alternative verte aux sources d'énergie traditionnelles, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre et contribuant à la lutte contre le changement climatique.

Grâce à leur capacité à exploiter efficacement la puissance du vent, les éoliennes et les machines synchrones contribuent à diversifier le mix énergétique, augmentant ainsi la part des énergies renouvelables dans la production mondiale d'électricité.

Ensuite, la modélisation d'une machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants avec amortisseurs (MSRB) jouant le rôle de génératrice a été étudiée. Avec un modèle mathématique basé sur des hypothèses simplificatrices. La transformation du Park nous a permis de simplifier le modèle du MSRB.

De plus, la présence d'amortisseurs et de pôles saillants dans la conception du GSRB contribue à améliorer la stabilité du système électrique et à réduire les vibrations indésirables et les oscillations indésirables du rotor. Les résultats de la simulation sont présentés.

Le 3<sup>ème</sup> chapitre est consacré aux relevés expérimentaux des caractéristiques statiques d'un générateur synchrone à pôles saillants disponible dans le laboratoire automatique Tlemcen LAT.

En utilisant une machine synchrone comme générateur, son comportement peut être étudié en analysant ses propriétés internes. Nous avons également examiné ses propriétés externes sous différents modes de stress et examiné ses propriétés régulatrices. Enfin, nous sommes conscients que pour les études expérimentales en régime permanent, il est important de déterminer les paramètres de Poitier. Ces paramètres complètent la modélisation statique de la machine dans les cas non linéaires.

Dans le dernier chapitre nous avons présenté le contrôle du système éolien basé sur le GSRB. La commande vectorielle d'une machine synchrone à rotor bobiné commandée par un convertisseur de machine vectorielle PWM est également présentée. Ce convertisseur fonctionne comme un redresseur à transistor à commutation forcée. Cette combinaison électrique a permis la mise en œuvre de la stratégie de contrôle étudiée pour le système éolien étudié, qui consistait à extraire la puissance maximale appelée "MPPT" à l'aide d'un contrôle de vitesse géré par un correcteur PI. L'approche utilisée dans ce test nous a donné un niveau de performance de contrôle acceptable car elle a ramené le système à son point optimal en modifiant la vitesse du vent et la simulation était valide.

### *Les problèmes*

Les problèmes que nous avons rencontrés de la commande d'une génératrice synchrone à rotor bobiné (GSRB) avec amortisseurs et pôles saillants pour une application éolienne peuvent inclure :

Manque de données et de recherches spécifiques : Trouver des informations précises et complètes sur la commande de ce type de génératrice dans le contexte des énergies éoliennes peut être difficile en raison du manque de recherches bibliographiques ou de données expérimentales disponibles. Cela peut limiter votre capacité à analyser et à développer une stratégie de commande efficace.

Complexité de la modélisation et de la simulation : La modélisation précise de la GSRB avec amortisseurs et pôles saillants pour la simulation peut être complexe et requérir une compréhension approfondie de la dynamique électromagnétique et mécanique de la machine. L'obtention des paramètres et des équations appropriés pour la simulation peut constituer un défi.

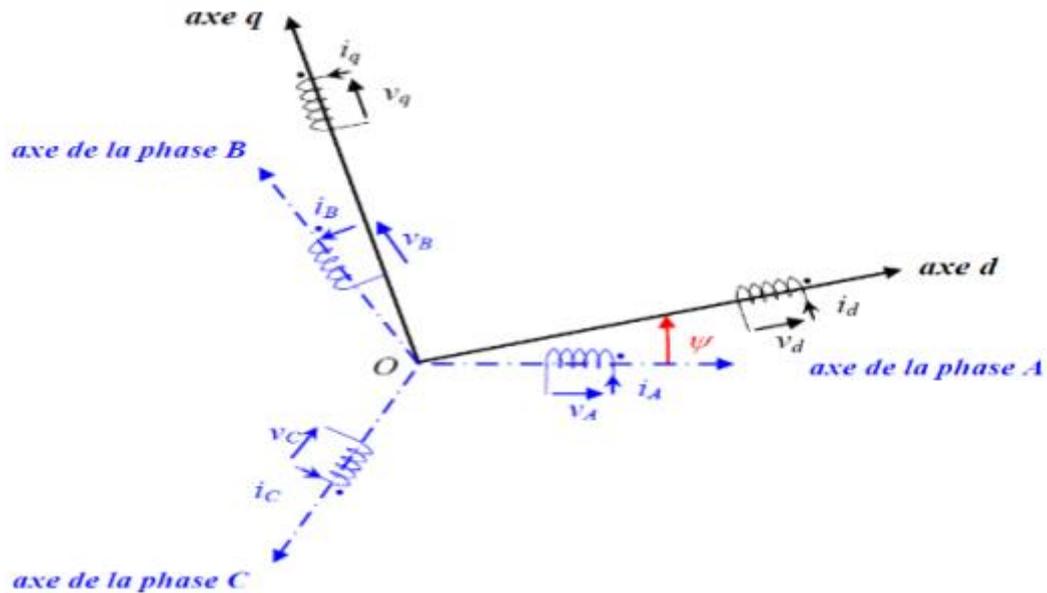
### *Perspectives*

Cependant, bien d'autres questions méritent une réponse. Ces questions peuvent apporter des éclairages qui enrichissent ce travail :

Synthétiser quelques lois de commande linéaires (LQR, RST, Prédictive...), non linéaires (Modes glissants, Backstepping...) et basées sur l'intelligence artificielle (Logique floue, Réseaux de neurones, etc. . .), Gestion du réseau intelligent : Avec l'essor des réseaux électriques intelligents (smart grids), L'utilisation d'un onduleur à plusieurs niveaux pour éliminer d'autres harmoniques.

### Annexe A. Transformations de Park

La transformation de Park est une transformation d'un repère triphasé fixe par rapport au stator dans un repère biphasé. Cette transformation permet de réduire la complexité du système. La transformation de Park est réalisée par une transformation triphasée diphasée suivie d'une rotation d'angle.



La transformation décrite ici conserve l'amplitude des grandeurs mais pas la puissance ni le couple. (On doit multiplier par un coefficient  $3/2$ ).

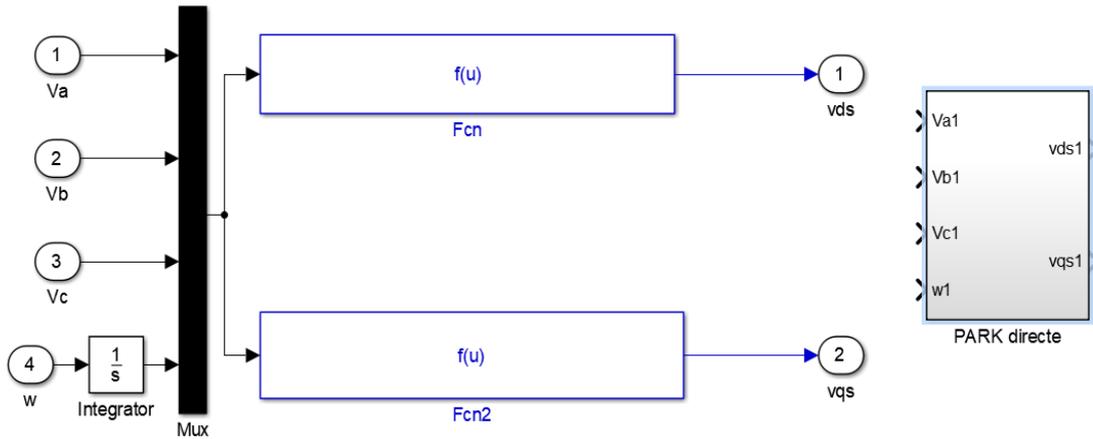
**La transformation directe :** Elle permet le passage d'un système triphasé (abc) fixe vers un système diphasé (dq) tournant :

$$[P_1(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Les équations électriques dans le repère de Park :

$$F(u) = Vd = \text{sqr}(2/3) * (u(1) * \cos(u(4)) + u(2) * \cos(u(4) - 2 * \text{pi}/3) + u(3) * \cos(u(4) + 2 * \text{pi}/3))$$

$$F(u) = Vq = -\text{sqr}(2/3) * (u(1) * \sin(u(4)) + u(2) * \sin(u(4) - 2 * \text{pi}/3) + u(3) * \sin(u(4) + 2 * \text{pi}/3))$$



**La transformation inverse :** Elle permet le passage d'un système diphasé ( $dq$ ) tournant vers un système triphasé ( $abc$ ) fixe.

L'inverse de la transformation de Park est la matrice transposée du précédent :

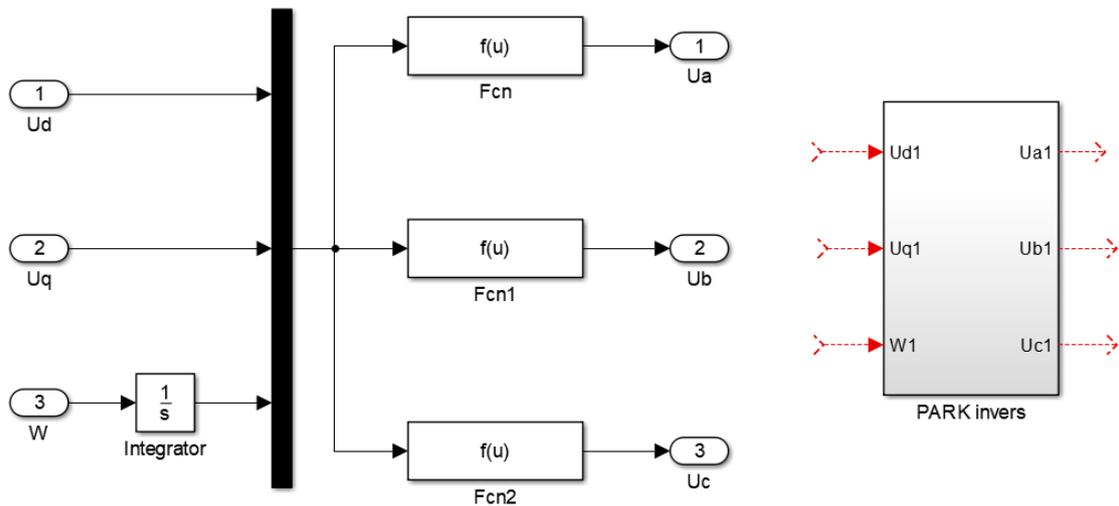
$$[P_1(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Avec :

$$F(u) = Va = \text{sqrt}(2/3) * (u(1) * \cos(u(3)) - u(2) * \sin(u(3)))$$

$$F(u) = Vb = \text{sqrt}(2/3) * (u(1) * \cos(u(3) - 2 * \text{pi}/3) - u(2) * \sin(u(3) - 2 * \text{pi}/3))$$

$$F(u) = Vc = \text{sqrt}(2/3) * (u(1) * \cos(u(3) + 2 * \text{pi}/3) - u(2) * \sin(u(3) + 2 * \text{pi}/3))$$



**Annexe B Paramètres de simulation avec et sans amortisseur**

| Les paramètres de la génératrice synchrone à rotor bobiné à pôles saillants sans amortisseurs   |   |  |
|---|---|--|
| A vide  | En court-circuit  | En charge  |
| $R_s = 9.9 \Omega$ ;<br>$L_f = 29 \text{ H}$ ;<br>$L_d = 0.74 \text{ H}$ ;<br>$L_q = 0.1818 \text{ H}$ ;<br>$R_f = 628 \Omega$ ;<br>$V_f = 220 \text{ V}$ ;<br>$M_f d = 4.003 \text{ H}$ ;<br>$P = 2$ ;<br>$J = 0.001 \text{ Kg/m}^2$ ; | $V_f = 220 \text{ V}$ ;<br>$P=2$ ;<br>$R_f=10$ ;<br>$R_s=0.48$ ;<br>$Mfd=0.05$ ;<br>$L_f=0.0924$ ;<br>$L_d=0.0231$ ;<br>$L_q=0.0231$ ;<br>$[R]=[R_s \ 0 \ 0 ; 0 \ R_s \ 0 ; 0 \ 0 \ R_f ]$ ;<br>$[L]=[-L_d \ 0 \ Mfd ; 0 \ -L_q \ 0 ; -Mfd \ 0 \ L_f ]$ ;<br>$[A]=[0 \ L_q \ 0 ; -L_d \ 0 \ Mfd ; 0 \ 0 \ 0]$ ; | $L_d=0.74$<br>$L_q=0.1818$<br>$R_{ch}=50$<br>$L_{ch}=0.0006$<br>$Mfd=4.003$<br>$P=2$<br>$L_f=29$<br>$R_f=628$<br>$R_s=9.9$<br>$L = [L_d+L_{ch} \ 0 \ Mfd ; 0 \ L_q+L_{ch} \ 0 ; Mfd \ 0 \ L_f]$<br>$B=\text{inv}(L)$<br>$R1 = [R_s+R_{ch} \ 0 \ 0 ; 0 \ R_s+R_{ch} \ 0 ; 0 \ 0 \ R_f ]$<br>$R2 = [0 \ -L_q \ 0 ; L_d \ 0 \ Mfd ; 0 \ 0 \ 0]$ |

| Les paramètres de la génératrice synchrone à rotor bobiné à pôles saillants avec amortisseurs   |   |  |
|---|---|--|
| A vide  | En court-circuit  | En charge  |
| $V_f = 0.350$ ;<br>$L_q = 0.1538$ ;<br>$R_{kd} = 0.0351$ ;<br>$L_{mq} = 0.6637$ ;<br>$M_{kq}$<br>$= 0.01381$ ;<br>$P = 2$ ;<br>$L_{kd} = 0.2026$ ;<br>$R_{kq} = 0.0685$ ;<br>$M_f$<br>$= 0.02889$ ;<br>$J_t = 0.15$ ;<br>$R_f = 0.3340$ ;<br>$L_{kq} = 0.2471$ ;<br>$L_f = 0.0699$ ;<br>$M_{fd}$<br>$= 0.02889$ ;<br>$f_v = 0$ ;<br>$R_s = 0.0779$ ;<br>$L_{md}$<br>$= 1.3509$ ;<br>$L_d = 0.2937$ ;<br>$M_{kd}$<br>$= 0.02889$ ; | $R_f=0.3340$ ;<br>$R_s=0.0779$ ;<br>$R_{kd}=0.0351$ ;<br>$R_{kq}=0.0685$ ;<br>$Mfd=0.2889$ ;<br>$L_f=0.0699$ ;<br>$L_d=0.2937$ ;<br>$L_q=0.1538$ ;<br>$L_{mq}=0.6637$ ;<br>$L_{md}=1.3509$ ;<br>$M_{kq}=0.01381$ ;<br>$M_{kd}=0.02889$ ;<br>$M_f=0.02889$ ;<br>$L_{kd}=0.2026$ ;<br>$L_{kq}=0.2471$ ;<br>$[R]=[-R_s \ 0 \ 0 \ 0 ; 0 \ -R_s \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0 \ R_f ]$ ;<br>$[L]= [-L_d \ 0 \ L_{md} \ L_{md} \ 0 ; 0 \ -L_q \ 0 \ 0 \ L_{mq} ; M_f \ 0 \ L_f \ M_{kd} \ 0 ; M_{kd} \ 0 \ M_{kd} \ 0 ; 0 \ M_{kq} \ 0 \ 0 \ L_{kq}]$ ;<br>$[A]= [0 \ L_q \ 0 \ 0 \ -L_{mq} ; -L_q \ 0 \ L_{md} \ L_{md} \ 0 ; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ ;<br>$B=\text{inv}(L)$ | $R_f=0.3340$ ;<br>$R_s=0.0779$ ;<br>$R_{kd}=0.0351$ ;<br>$R_{kq}=0.0685$ ;<br>$R_{ch}=0.05$ ;<br>$L_{ch}=0.01$ ;<br>$Mfd=0.02889$ ;<br>$L_f=0.0699$ ;<br>$L_d=0.2937$ ;<br>$L_q=0.1538$ ;<br>$L_{mq}=0.6637$ ;<br>$L_{md}=1.3509$ ;<br>$M_{kq}=0.01381$ ;<br>$M_{kd}=0.02889$ ;<br>$M_f=0.02889$ ;<br>$L_{kd}=0.2026$ ;<br>$L_{kq}=0.2471$ ;<br>$[R]=[-(R_s+R_{ch}) \ 0 \ 0 \ 0 ; 0 \ -(R_s+R_{ch}) \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ R_f \ 0 ; 0 \ 0 \ 0 \ R_{kd} \ 0 ; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ R_{kq}]$ ;<br>$[L]= [-(L_d+L_{ch}) \ 0 \ L_{md} \ L_{md} \ 0 ; 0 \ -(L_q+L_{ch}) \ 0 \ 0 \ L_{mq} ; M_f \ 0 \ L_f \ M_{kd} \ 0 ; M_{kd} \ 0 \ M_{kd} \ L_{kd} \ 0 ; 0 \ M_{kq} \ 0 \ 0 \ L_{kq}]$ ;<br>$[A]= [0 \ L_q \ 0 \ 0 \ -L_{mq} ; -L_q \ 0 \ L_{md} \ L_{md} \ 0 ; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ ;<br>$B=\text{inv}(L)$<br>$P=2$ ;<br>$J=0.15$ ;<br>$F=0$ ; |

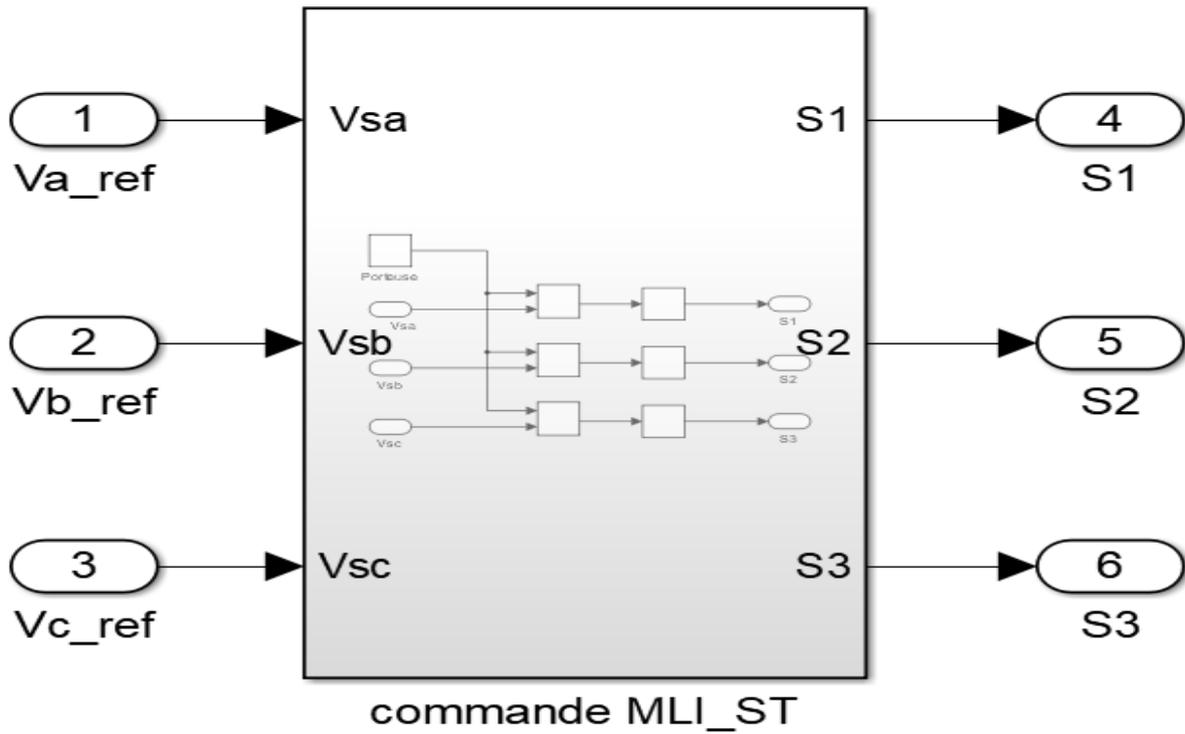
**Annexe C Les paramètres utilisée en MATLAB/SIMULINK**

| Paramètres du GSRB                                    |                  |
|---|------------------|
| Puissance nominale                                    | 52 KW            |
| Tension nominale $U_n$                                | 690 V            |
| Fréquence nominale $f$                                | 50 Hz            |
| Nombre de paire de pole $p$                           | 2                |
| Vitesse nominale $N_n$                                | 1500 tr/min      |
| Résistance $R_s$                                      | 0.2498 $\Omega$  |
| Résistance $R_f$                                      | 0.6433 $\Omega$  |
| Résistance $R_{kd}$                                   | 0.45747 $\Omega$ |
| Résistance $R_{kq}$                                   | 0.41637 $\Omega$ |
| Coefficient d'inductance $L_d$                        | 0.029852 H       |
| Coefficient d'inductance $L_q$                        | 0.01487 H        |
| Coefficient d'inductance $L_f$                        | 0.030981 H       |
| Coefficient d'inductance $L_{kd}$                     | 0.30981 H        |
| Coefficient d'inductance $L_{kq}$                     | 0.015882 H       |
| Coefficient d'inductance mutuelle $M_f=M_{fd}=M_{kd}$ | 0.028895 H       |
| Coefficient d'inductance mutuelle $M_{kq}$            | 0.013813 H       |
| Moment d'inertie $J$                                  | 0.155            |
| Coefficient de frottement $f_v$                       | 0.001            |

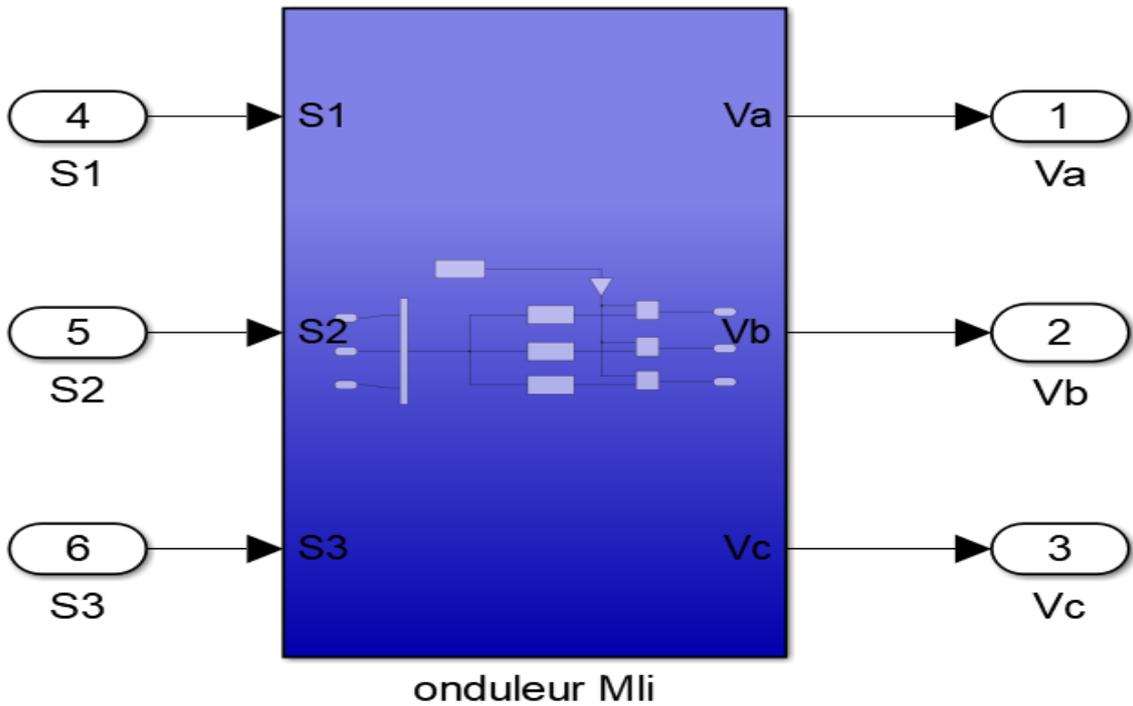
| Paramètres de la turbine                  |                         |
|---|-------------------------|
| Landa Optimal                             | 8.1                     |
| La masse volumique $\rho_0$               | 1.22                    |
| Couple maximale $c_{pMax}$<br>surface $S$ | 0.39<br>$\pi \cdot R^2$ |
| La puissance nominale, $P_t$              | 57 KW                   |
| Le rayon de la turbine, $R$               | 11 m                    |
| Nombre des pales                          | 3                       |
| Gain du multiplicateur, $G$               | 14                      |

| Paramètres de régulateurs PI                          |               |
|---|---------------|
| Régulateur PI du courant $I_d$ de la GSRB             | $K_i=L_d/T_e$ |
|   | $K_p=R_s/T_e$ |
| Régulateur PI du courant $I_q$ de la GSRB             | $K_i=L_q/T_e$ |
|   | $K_p=R_s/T_e$ |
| Régulateur PI de la vitesse $\Omega_{méc}$ de la GSRB | $K_i=F/T_m$   |
|   | $K_p=J/T_m$   |
| Temps électrique $T_e$                                | 2e-4;         |
| Temps mécanique $T_m$                                 | 3e-5;         |

Modèle simulation de commande MLI (sin-triangle) :



Modèle simulation d'onduleur MLI :



## Bibliographies

- [1] G. W. E. Council, "GWEC Global Wind Report 2019," *Global Wind Energy Council: Bonn, Germany*, 2017.
- [2] h. w. r. fr.
- [3] S. M. BOUDIA, "Optimisation de l'évaluation temporelle du gisement énergétique éolien par simulation numérique et contribution à la réactualisation de l'atlas des vents en Algérie," 2013.
- [4] H. Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable," Paris, ENSAM, 2003.
- [5] D. A. Spera, "Wind turbine technology," 1994.
- [6] S. Heier, *Grid integration of wind energy: onshore and offshore conversion systems*: John Wiley & Sons, 2014.
- [7] A. Aloraini and M. Sayed-Mouchaweh, "Graphical model based approach for fault diagnosis of wind turbines," in *2014 13th International Conference on Machine Learning and Applications*, 2014, pp. 614-619.
- [8] L. P. Suresh, "A brief review on multi level inverter topologies," in *2016 international conference on circuit, power and computing technologies (ICCPCT)*, 2016, pp. 1-6.
- [9] B. Houria, "Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multiniveaux à base de GTO et d'IGBT," *Mémoire de Magister, université Badji Mokhtar, Annaba*, 2010.
- [10] O. Bouhali, "Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique," Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [11] <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000113233>.
- [12] N. Hemati, "Strange attractors in brushless DC motors," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 41, pp. 40-45, 1994.
- [13] M. M. A. HAMZA, M. N. KAIS, and M. en Electrotechnique, "Commande de la machine asynchrone à double alimentation—apport des techniques de l'intelligence artificielle."
- [14] J. Martin, "Energies éoliennes," *Techniques de l'ingénieur. Génie énergétique*, vol. 3, pp. B8585. 1-B8585. 21, 1997.
- [15] F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau," Université de Nantes, 2003.
- [16] R. Rouabhi, "Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée," Université de Batna 2, 2016.
- [17] K. Bickerstaff, I. Lorenzoni, N. F. Pidgeon, W. Poortinga, and P. Simmons, "Reframing nuclear power in the UK energy debate: nuclear power, climate change mitigation and radioactive waste," *Public understanding of science*, vol. 17, pp. 145-169, 2008.
- [18] F. J. Asensio, J. I. San Martín, I. Zamora, O. Onederra, G. Saldaña, and P. Eguía, "A system approach to harnessing wind energy in a railway infrastructure," in *IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2018, pp. 1646-1651.
- [19] M. Lenzen and J. Munksgaard, "Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines—review and applications," *Renewable energy*, vol. 26, pp. 339-362, 2002.
- [20] N. K. Marzouk, "Quel avenir pour l'Energie Eolienne en Algérie?," *Bul. Ene. Ren, CDER*, pp. 6-7, 2008.
- [21] [http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/slimane\\_wissem/files/3eolienne331.pptx](http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/slimane_wissem/files/3eolienne331.pptx).
- [22] <https://www.connaissancedesenergies.org/leolien-offshore-futur-pilier-des-transitions-energetiques-220218>.
- [23] M. Lopez, "Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée," Université Paris Sud-Paris XI, 2008.
- [24] <https://www.lemoniteur.fr/article/comment-ca-marche-energie-eolienne.707314>.
- [25] A. Bouzid and R. Redjem, "Etude d'une chaine de conversion d'energie eolienne," 2017.
- [26] O. Benyahia, "Analyse des performances d'éoliennes sur un Banc d'essai; Simulation sous ANSYS et SolidWorks," *Memoir de master de l'université de M'hamed Bougara de Boumerdès*, 2017.
- [27] <https://energieplus-lesite.be/techniques/eolien6/eoliennes/>.

- [28] Z. Tir, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade," 2018.
- [29] F. Z. E. Arama, "Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne," Université Ahmed Draia-Adrar, 2018.
- [30] A. Dendouga, "Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM)," Batna, Université El Hadj Lakhder. Faculté des sciences, 2010.
- [31] M. LOUCIF, "Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur," 2016.
- [32] B. Beltran, "Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation: Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur," Université de Bretagne occidentale-Brest, 2010.
- [33] T. Ghennam, "Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation," 2011.
- [34] S. Pryor and A. N. Hahmann, "Downscaling wind," in *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*, ed, 2019.
- [35] A. Zervos, "Wind power as a mainstream energy source," in *Proc. of the 2009 European Wind Energy Conf*, 2009.
- [36] V. Nelson and K. Starcher, *Wind energy: renewable energy and the environment*: CRC press, 2018.
- [37] A. El-Ali, N. Moubayed, and R. Outbib, "Comparison between solar and wind energy in Lebanon," in *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007, pp. 1-5.
- [38] Y. Himri, A. B. Stambouli, B. Draoui, and S. Himri, "Review of wind energy use in Algeria," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 910-914, 2009.
- [39] S. M. Ibrahim, "Energy in the Arab world," *Energy*, vol. 9, pp. 217-238, 1984.
- [40] H. Bensaid, "The Algerian programme on wind energy," *Proceeding of WEAC*, pp. 21-27, 1985.
- [41] K. Ziane, "Analyse, Évaluation et Réduction des Risques d'un Parc Éolien," Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, 2017.
- [42] O. Guerri, "L'Énergie éolienne en Algérie: Un bref aperçu," *Bulletin des Énergies Renouvelables*, 2011.
- [43] P. Monjean, "Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et onshore équipées de liaisons en continu," Arts et Métiers ParisTech, 2012.
- [44] Y. Wang, "Évaluation de la performance des réglages de fréquence des éoliennes à l'échelle du système électrique: Application à un cas insulaire," Ecole centrale de Lille, 2012.
- [45] V. Courtecuisse, "Supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique," Arts et Métiers ParisTech, 2008.
- [46] H. Benalla and F. Kendouli, "Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique," 2017.
- [47] N. Hamdi, "Amélioration des performances des aérogénérateurs," *Magister en électrotechniques de Constantine*, 2013.
- [48] K. Belmokhtar, M. L. Doumbia, and K. Agbossou, "Novel fuzzy logic based sensorless maximum power point tracking strategy for wind turbine systems driven DFIG (doubly-fed induction generator)," *Energy*, vol. 76, pp. 679-693, 2014.
- [49] G. Abdenour, "Modélisation et commande du système de conversion éolienne basé sur une GADA," Faculté de technologie/Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2017.
- [50] Z. S. Eddine, "Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau," *Mémoire de master*, vol. 2, 2017.
- [51] M.-T. Latreche, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien," 2018.
- [52] M. Boufatah, F. Demiche, and A. Morsli, "Commande d'une chaîne de conversion éolienne à pas de GSAP connecté au réseau via un convertisseur multi niveaux," 2022.
- [53] A. Gaillard, "Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service," Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2010.

- [54] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, *Power conversion and control of wind energy systems*: John Wiley & Sons, 2011.
- [55] B. E. A. Tsamda Abderrahmane, "Etudes expérimentales et simulation des essais d'une machine synchrone," 2017.
- [56] M. Larakeb and A. Bentounsi, "Identification paramétrique d'un générateur synchrone et filtrage en mode perturbé," Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2018.
- [57] <https://www.educreations.com/lesson/view/epaetahtigeneraattorintointapertiaate/20725945/?s=RrGaWA&ref=appemail>.
- [58] M. E. El-Hawary, *Electrical energy systems*: Crc Press, 2018.
- [59] K. Alitouche and N. Ait Amara, "Etude comparative des machines synchrones excitées par aimants et courants électriques," université Abderahmane Mira, 2014.
- [60] J. Chatelain, *Machines électriques* vol. 10: PPUR Presses polytechniques, 1989.
- [61] D. d. d. d. a. d. u. machine, s. p. l. a. d. c. a. e. réactif, and instantanés.
- [62] T. Wildi, *Électrotechnique (4e édition)*: Presses de l'université Laval, 2005.
- [63] <https://www.mccours.net/cours/memoires/ahm3clit399.pdf>.
- [64] F. Bourourou, "Adaptativité de la machine synchrone au filtrage actif des harmoniques de tension," Université du 20 Août 1955 Skikda, 1955.
- [65] [http://www.industrial-electronics.com/electy4\\_20.html](http://www.industrial-electronics.com/electy4_20.html).
- [66] P. Wetzer, "Machines synchrones: Excitation," *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique*, vol. 6, pp. D3545. 1-D3545. 11, 1997.
- [67] A. Fouillé, *Electrotechnique à l'usage des ingénieurs* vol. 1: Dunod, 1947.
- [68] P. Vas, *Electrical machines and drives: a space-vector theory approach* vol. 1: Clarendon press Oxford, 1992.
- [69] O. cherif Anis, "Observation de la Machine Synchrone à Rotor Bobiné Sans Capteurs (Sensorless)," Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [70] A. Benidriss and M. E. Elhella, "Commande Backstepping d'une Machine Synchrone à Rotor Bobiné," UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [71] R. Abdessemed, *Modélisation et simulation des machines électriques: électrotechnique*: ellipses, 2011.
- [72] E. Kyriakides, G. T. Heydt, and V. Vittal, "On-line estimation of synchronous generator parameters using a damper current observer and a graphic user interface," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, pp. 499-507, 2004.
- [73] R. E. Fairbairn and R. G. Harley, "On-line measurement of synchronous machine parameters," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 28, pp. 639-645, 1992.
- [74] F. d. t. p. A. MECHERNENE et M LOUCIF, d'électrotechnique Fondamentale 2 : Machines électriques, Licence LMD, L2, Spécialité Electrotechnique, 2016/2017.
- [75] G. L. Loum and T. C. Haba, "Détermination analytique des paramètres de Potier d'une machine synchrone par la méthode des pentes-Titre court: Calcul des paramètres de Potier," *J3eA*, vol. 8, p. 0002, 2009.
- [76] A. Mirecki, "Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance," 2005.
- [77] D. Aguglia, P. Viarouge, R. Wamkeue, and J. Cros, "Determination of fault operation dynamical constraints for the design of wind turbine DFIG drives," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 81, pp. 252-262, 2010.
- [78] D. Aouzellag, K. Ghedamsi, and E. Berkouk, "Network power flux control of a wind generator," *Renewable energy*, vol. 34, pp. 615-622, 2009.
- [79] D. Ikn. (2014, Production d'énergie marine: Intégration de la production éolienne offshore dans un bouquet énergétique décentralisé.
- [80] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, and C. Buthion, "Eoliennes en milieu urbain-État de l'art," *Paris: ARENE Ile-de-France*, 2006.
- [81] N. Laverdure, "Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires," Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2005.

- [82] A. El-Sattar, N. Saad, and M. S. El-Dein, "Dynamic response of doubly fed induction generator variable speed wind turbine under fault," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 1240-1246, 2008.
- [83] I. Vechiu, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome," Université du Havre, 2005.
- [84] K. Haneesh, "Optimal Control of PMSG Based Wind Energy Conversion System using State-Dependent DRE."
- [85] M. Malinowski, "Sensorless control strategies for three-phase PWM rectifiers," Citeseer, 2001.
- [86] M. Malinowski and M. Kazmierkowski, "Simulation study of virtual flux based direct power control for three-phase PWM rectifiers," in *2000 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2000. 2000 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. 21st Century Technologies*, 2000, pp. 2620-2625.
- [87] H. Djeghloud and H. Benalla, "Harmonics cancellation using SVPWM shunt active power filter," *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 2007.
- [88] S. Belakehal, "Conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables," *universite costantine*, 2010.
- [89] F. Kendouli, K. Nabti, K. Labed, and H. Benalla, "Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation," *Journal of Renewable Energies*, vol. 14, pp. 109–120-109–120, 2011.
- [90] A. Dahbi, N. Nait-Said, M. Hamouda, and F. Z. Arama, "Analysis of different converters used in wind energy conversion system," in *2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2014, pp. 352-359.
- [91] S. S. Yeoh, "Control strategies for the More Electric Aircraft starter-generator electrical power system," University of Nottingham, 2016.
- [92] Y. Touzani, "Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant," Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2006.
- [93] S. El Aimani, "Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension," Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [94] X. Guo and H. Guo, "Simulation and control strategy of a micro-turbine generation system for grid connected and islanding operations," *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 368-376, 2011.
- [95] M. B. Houari, "Contribution à l'étude et la commande d'une éolienne pour la production de l'énergie électrique," Université Mohamed Boudiaf des sciences et de la technologie, 2013.
- [96] D.-H. Tran, "Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne" passive": analyse de robustesse, validation expérimentale," Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2010.
- [97] L. Peng, "Reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension," Ecole centrale de Lille, 2010.
- [98] S. MASSOUM, "Contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation," 2018.
- [99] A. BENLAMOUUDI, "Contribution a la commande de la génératrice asynchrone par compensation de l'énergie réactive," Université de Batna 2-Mustafa Ben Boulaid.
- [100] M. Mayouf, "Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimants permanents," Batna, Université El Hadj Lakhdar. Faculté des sciences de l'ingénieur, 2008.
- [101] Z. Othmane, "Dynamic modeling and control of a wind turbine with MPPT control connected to the grid by using PMSG," in *2017 International conference on advanced technologies for signal and image processing (ATSIP)*, 2017, pp. 1-6.
- [102] B. Nahidmobarakeh, "Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants: méthodes, convergence, robustesse, identification" en ligne" des paramètres," 2001.
- [103] A. Rostami and B. Asaei, "A novel method for estimating the initial rotor position of PM motors without the position sensor," *Energy conversion and management*, vol. 50, pp. 1879-1883, 2009.
- [104] B. Heber, L. Xu, and Y. Tang, "Fuzzy logic enhanced speed control of an indirect field-oriented induction machine drive," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, pp. 772-778, 1997.

**Résumé :**

Ce projet vise à modéliser mathématiquement une machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants équipée d'amortisseurs, dans le but de l'utiliser comme générateur dans une application éolienne. Les principales étapes du projet sont les suivantes : Présentation des génératrices synchrones : Introduction aux différentes génératrices synchrones et à leurs utilisations dans le contexte de la conversion éolienne. Modélisation complète de la machine synchrone : Établissement d'un modèle mathématique complet de la machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants (MSRB) dans le référentiel biphasé de Park, permettant de décrire ses caractéristiques électromagnétiques. Modèle aérodynamique de la turbine et profils de vent : Développement d'un modèle aérodynamique pour la turbine éolienne, prenant en compte l'interaction entre le vent et la machine. Définition de profils de vent significatifs pour les tests de simulation. Étude théorique de l'identification des paramètres du modèle : Approfondissement théorique de l'identification des paramètres du modèle de la MSRB, en utilisant des techniques basées sur des mesures expérimentales ou des données fournies par le fabricant. Synthèse de la commande linéaire avec des régulateurs PI : Conception d'une commande linéaire utilisant des régulateurs de type PI pour optimiser les performances de la MSRB en tant que générateur éolien. Validation par des tests de simulation : Vérification des modèles et des stratégies de commande grâce à des tests de simulation réalisés dans l'environnement Matlab- Simulink. Les tests incluront différents profils de vent significatifs pour évaluer les performances de la MSRB.

**Mots-clés :**

Energie éolienne, Machines synchrones, Pôles saillants, Amortisseurs, Commande linéaire.

**Abstract:**

The aim of this project is to mathematically model a wound rotor synchronous machine with salient poles equipped with dampers, with a view to using it as a generator in a wind turbine application. The main stages of the project are as follows: Introduction to synchronous generators: Introduction to the different synchronous generators and their uses in the context of wind conversion. Complete modeling of the synchronous machine: Establishment of a complete mathematical model of the salient pole wound rotor (SPWR) synchronous machine in the two-phase Park reference frame, making it possible to describe its electromagnetic characteristics. Turbine aerodynamic model and wind profiles: Development of an aerodynamic model for the wind turbine, taking into account the interaction between the wind and the machine. Definition of significant wind profiles for simulation tests. Theoretical study of the identification of model parameters: Theoretical investigation of the identification of MSRB model parameters, using techniques based on experimental measurements or data supplied by the manufacturer. Synthesis of linear control with PI controllers: Design of linear control using PI controllers to optimize the performance of the MSRB as a wind generator. Validation through simulation tests: Verification of the control models and strategies through simulation tests carried out in the MATLAB-Simulink environment. The tests will include various significant wind profiles to assess the performance of the MSRB.

**Keywords :**

Wind power, Synchronous machines, Salient poles, Dampers, Linear control.

**ملخص :**

يهدف هذا المشروع إلى تصميم نموذج رياضي لآلة متزامنة ذات قطب بارز ومزودة بخمدات ، بهدف استخدامها كمولد في تطبيق توربين الرياح. المراحل الرئيسية للمشروع هي كما يلي: عرض للمولدات المتزامنة: مقدمة للمولدات المتزامنة المختلفة واستخداماتها في سياق تحويل طاقة الرياح. النمذجة الكاملة للآلة المتزامنة: إنشاء نموذج رياضي كامل للآلة المتزامنة ذات القطب الجرح الدوار (MSRB) في الإطار المرجعي ذي المرحلتين لـ Park ، مما يتيح وصف خصائصها الكهرومغناطيسية. النمذجة الأيروديناميكية للتوربينات وخصائص الرياح: تطوير نموذج الأيروديناميكي للتوربينات الرياح ، مع مراعاة التفاعل بين الرياح والآلة. تعريف ملامح الرياح ذات المعنى لاختبارات المحاكاة. الدراسة النظرية لتحديد معالم النموذج: التعميق النظري لتحديد معالم نموذج MSRB ، باستخدام التقنيات القائمة على القياسات التجريبية أو البيانات المقدمة من قبل الشركة المصنعة. توليف التحكم الخطي مع منظمات PI: تصميم عنصر تحكم خطي باستخدام منظمات من النوع PI لتحسين أداء MSRB كمولد للرياح. التحقق من صحة عن طريق اختبارات المحاكاة: التحقق من النماذج واستراتيجيات التحكم من خلال اختبارات المحاكاة التي أجريت في بيئة Matlab Simulink. ستشمل الاختبارات ملفات تعريف مختلفة للرياح لتقييم أداء MSRB.

**الكلمات الرئيسية :**

طاقة الرياح، الآلات المتزامنة، الأعمدة الرئيسية، المخمدات، التحكم الخطي