

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° D'ORDRE : ELM-15



FILIERE : ELECTROMECHANIQUE
OPTION : ELECTROMECHANIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

Par : KHIRI Fouzi et BOUCHAREB Akram

THEME

Éclairage public Autonome

Soutenu devant le jury composé de :

HERIZI Abdelghafour
BELOUNIS Ouassila
ROUABHI Riyadh

Université de M'sila
Université de M'sila
Université de M'sila

Président
Encadreur
Examineur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Louange Allah, par Sa grâce s'accomplissent les bonnes actions, et que la paix et les bénédictions soient sur le plus noble des prophètes et des messagers, notre prophète Muhammad, ainsi que sur sa famille et tous ses compagnons.

Je remercie Allah Tout-Puissant pour Son aide et Sa facilité à toutes les étapes de la préparation de ce mémoire.

*Je voudrais exprimer notre profonde gratitude et notre admiration envers notre superviseure, **la Dr BELOUNIS Ouassila**, pour ses conseils avisés et son soutien tout au long de la période de recherche. Ses précieuses observations et orientations ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.*

*Je tiens également à remercier nos honorables professeurs, **Mr BENSLIMANE Tarak**, **Mr MAYOUF Messaoud** et **HALALI Lalouani** à l'université Mohamed Boudiaf de M'sila pour leur soutien continu et tout ce qu'ils nous ont apporté en termes de précieux conseils, de savoir et de connaissance.*

*Un grand merci également aux membres du comité d'arbitrage, nos professeurs **ROUABHI Riyadh** et **HERIZI Abdelghafour**, qui ont gentiment accepté de relire ce travail.*

Enfin, je tiens à adresser mes remerciements spéciaux à nos chères familles pour leur soutien continu, leurs prières sincères et leurs sacrifices inestimables, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire, que ce soit par un soutien intellectuel, moral ou financier.

Dédicace I.

Je dédie ce mémoire à ma mère et à mon père, qui ont toujours été une source de soutien et d'encouragement à chaque étape de ma vie scolaire. Je le dédie également à ma sœur et à mon frère, qui m'ont toujours prodigué des conseils et un soutien moral, ainsi qu'à mes amis qui ont été à mes côtés, partageant avec moi la joie et les défis. Et à toute la famille Bouchareb.

أهدي هذا البحث إلى والدتي ووالدي، اللذين كانا دائماً مصدر دعم وتشجيع في كل مرحلة من مراحل حياتي الدراسية. وأهديه أيضاً إلى أختي وأخي، اللذين قدما لي دائماً النصائح والدعم المعنوي، وكذلك إلى أصدقائي الذين كانوا بجانبني، يشاركونني الفرح والتحديات. وإلى جميع أفراد عائلة بوشارب.

BOUHAREB Akram.

Dédicace II.

*Louange Allah pour l'amour, la gratitude et la reconnaissance du début à la fin. Et après cela, À celui qui a toujours été mon soutien et mon appui, symbole de générosité et de sacrifice, mon modèle, **mon cher père**. Et à la source de l'amour et de la tendresse, celle qui m'accueille avec un sourire et me bénit par ses prières, **ma chère mère**. Je vous dédie ce mémoire en signe de gratitude pour vos sacrifices, vos efforts immenses et tout le soutien que vous m'avez apporté.*

*À **mes chers frères** et sœurs, qui ont toujours été une source de joie et de force pour moi. Vous avez toujours été mon soutien à toutes les étapes de ma vie. Je vous dédie ce mémoire en signe de reconnaissance et d'appréciation pour notre relation inestimable.*

*À **mes amis fidèles**, qui ont partagé avec moi rêves, défis, moments de bonheur et de tristesse. Merci pour votre présence constante à mes côtés et votre soutien continu. Je vous dédie ce mémoire en signe de notre amitié forte et des beaux moments passés ensemble.*

*À ceux qui nous ont quittés trop tôt, **Ibrahim Demmane, Laichaoui Rachid, Badr Eddine Ouadah**. Votre souvenir reste vivant dans nos cœurs et nos esprits. Vous étiez plus que de simples amis ; vous étiez des frères et des modèles de soutien et de force dans ma vie. Votre présence signifiait beaucoup pour moi et votre départ a laissé un vide incommensurable. Je dédie ce mémoire à vos âmes pures, en demandant à Dieu de vous couvrir de Sa vaste miséricorde et de vous accorder une place dans Ses vastes paradis. Vos souvenirs resteront toujours gravés dans mon cœur, et peu importe le temps qui passe, je ne vous oublierai jamais.*

الحمد لله حيا وشكرا وأمتنانا على البدء والختام أما بعد :

إلى من كان دوماً سندي ودعوي رمز العطاء والتضحية مثلي الأعلى أبي الغالي وإلى مصدر الحب والحنان من تستقبلني بابتسامته وتودعني بدعاء أمي الحبيبة، أهديكما هذه المذكرة تعبيراً عن شكري وامتناني على تضحياتكما وجهودكما الجبارة وعلى كل ما قدمتموه لي من دعم.

إلى إخوتي وأخواتي الأعزاء، الذين كانوا دائماً مصدر الفرح والقوة لي. كنتم دائماً دعوي وسندي في كل مراحل الحياة. أهديكم هذه المذكرة عربون تقدير واعتزاز لعلاقتنا التي لا تُقدّر بثمن.

إلى أصدقائي الأوفياء، الذين شاركتموني الأحلام والتحديات واللحظات السعيدة والحزينة. شكراً لوجودكم الدائم بجانبني ودعمكم المستمر. أهديكم هذه المذكرة تعبيراً عن صداقتنا القوية وأيامنا الجميلة معاً.

إلى الذين غادرونا مبكراً، إبراهيم دمان، العيشاوي رشيد، بدر الدين واضح. ذكراكم ما زالت حية في قلوبنا وعقولنا. كنتم أكثر من أهدى هذه. مجرد أصدقاء؛ كنتم إخوة ونموذج للدعم والقوة في حياتي. لقد كان وجودكم يعني لي الكثير ورحيلكم ترك فراغاً لا يُملأ.

المذكرة إلى أرواحكم الطاهرة، سائلاً المولى عز وجل أن يتغمدكم بواسع رحمته ويسكنكم فسيح جناته. فذكراكم ستظل دائماً محفورة في قلبي، ومهما طال الزمن لن أنساكم.

KHIRI Fouzi.

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| Notation et Symboles | I |
| Liste des figures..... | V |
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| CHAPITRE I Notions sur Eclairage Public | |
| I.1. Introduction | 3 |
| I.2. Définition de l'éclairage public..... | 3 |
| I.2.1. But de l'éclairage public | 4 |
| I.2.2. Historique..... | 4 |
| I.3. Types d'éclairage public..... | 5 |
| I.3.1. Éclairage public non autonome (connecté au réseau électrique) | 5 |
| I.3.2. Éclairage public autonome | 6 |
| I.3.2.1. Éclairage public hybride PV-EOLIEN..... | 6 |
| I.3.2.2. Éclairage public PV | 7 |
| I.3.2.3. Éclairage public éolien | 8 |
| I.3.2.3.1. L'énergie éolienne..... | 8 |
| I.3.2.3.2. Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique | 8 |
| I.3.2.3.3. Différents types d'éoliennes selon l'axe de la turbine..... | 9 |
| I.3.2.3.4. Eolienne à axe horizontal (HAWT)..... | 10 |
| I.3.2.3.5. Eolienne à axe vertical (VAWT)..... | 10 |
| I.3.2.3.6. Le Type Darrius | 11 |
| I.3.2.3.7. Le Type Savonius..... | 11 |
| I.3.2.3.8. Les Avantages et les inconvénients de la turbine Savonius | 12 |
| I.3.2.3.9. Le choix d'un système d'éclairage public autonome | 12 |
| I.4. Description des composants d'un Éclairage public autonome basé sur générateur éolien a axe vertical type Savonius..... | 13 |
| I.4.1. Le rotor Savonius | 13 |
| I.4.1.1. Principe de fonctionnement d'une éolienne de type Savonius | 14 |
| I.4.2. Le multiplicateur de Vitesse | 15 |
| I.4.3. Machine électrique dans les aérogénérateurs | 15 |
| I.4.3.1. Présentation et description de la machine synchrone à aimants permanents..... | 16 |
| I.4.3.2. Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents..... | 17 |
| I.4.3.3. Fonctionnement en mode génératrice (GSAP)..... | 17 |
| I.4.4. Redresseur triphasé à diode | 17 |
| I.4.4.1. Définition d'un redresseur..... | 17 |
| I.4.4.2. Principe de fonctionnement | 18 |
| I.4.5. L'onduleur triphasé..... | 19 |
| I.4.5.1. Onduleur de tension a deux niveaux..... | 19 |
| I.4.5.2. Techniques de commande de l'onduleur triphasé | 20 |
| I.4.5.3. Commande MLI | 20 |
| I.4.5.3.4. Principe de base de la commande MLI..... | 20 |
| I.4.5.3.5. Les avantages de la commande MLI | 21 |
| I.4.6. Les hacheurs..... | 21 |

| | |
|---|----|
| I.4.6.1. Principe de fonctionnement | 22 |
| I.4.6.2. Les différents types d'hacheur | 23 |
| I.4.6.2.1. Hacheur abaisseur « Buck » | 23 |
| I.4.6.2.2. Hacheur élévateur « Boost » | 23 |
| I.4.6.2.3. Hacheur abaisseur-élévateur « Buck- Boost » | 24 |
| I.4.7. Les Batteries..... | 24 |
| I.4.7.1. Caractéristiques de la batterie..... | 25 |
| I.5. Conclusion..... | 25 |
| CHAPITRE II Modélisation des composants d'un Eclairage Public | |
| II.1. Introduction..... | 26 |
| II.2. Structure de la chaine de conversion éolienne..... | 26 |
| II.2.1. Modélisation de la turbine éolienne..... | 27 |
| II.2.1.1. Etude théorique d'une turbine éolienne..... | 27 |
| II.2.1.1.1. Energie fournie par le vent..... | 27 |
| II.2.1.1.2. Energie théoriquement récupérable (La Puissance absorbé par l'aérogénérateur) | 28 |
| II.2.1.1.3. Energie théoriquement récupérable (La Puissance absorbé par l'aérogénérateur) | 29 |
| II.2.1.1.4. La vitesse spécifique ou Ration de vitesse | 30 |
| II.2.1.1.5. Coefficient de puissance de l'éolienne : | 30 |
| II.2.1.1.6. Coefficient de Le couple | 31 |
| II.2.1.1.7. Production d'énergie mécanique | 31 |
| II.2.1.1.8. Rotor Savonius | 31 |
| II.2.1.1.9. Caractéristique | 33 |
| II.2.1.1.10. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine | 33 |
| II.2.1.1.11. Modèle du multiplicateur | 34 |
| II.2.1.1.12. Modèle de l'arbre mécanique..... | 34 |
| II.2.2. Modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent..... | 36 |
| II.2.2.1. Equations électriques..... | 36 |
| II.2.2.2. Equations magnétiques..... | 37 |
| II.2.2.3. Equation mécanique | 37 |
| II.2.2.4. Transformation de PARK..... | 38 |
| II.2.2.5. Equations des tensions et des flux dans référentiel de PARK..... | 39 |
| II.2.2.6. Expression du couple électromagnétique..... | 40 |
| II.2.2.7. La GSAP alimentée une charge | 41 |
| II.2.3. Modélisation de redresseur triphasé à diode..... | 42 |
| II.2.4. Modélisation d'Onduleur triphasé | 45 |
| II.2.4.1. Hypothèses simplification..... | 45 |
| II.2.5. Modélisation Buck-Boost (abaisseur-élévateur)..... | 47 |
| II.2.6. Modélisation de la batterie | 49 |
| II.3. Conclusion | 50 |
| CHAPITRE III Simulation et interprétation des résultats | |
| III.1. Introduction | 51 |
| III.2. Simulation du modèle de la génératrice synchrone à aimant permanent | 51 |
| III.2.1. Les résultats de la simulation obtenus | 52 |
| III.2.3. Interprétation des résultats | 53 |

| | |
|---|----|
| III.3. Simulation de l'association GSAP - turbine éolien | 53 |
| III.3.1. Les résultats de la simulation obtenus | 53 |
| III.3.2. Interprétation des résultats | 54 |
| III.4. Simulation globale du système complet | 55 |
| III.4.1. Les résultats de la simulation obtenus | 55 |
| III.4.2. Interprétation des résultats | 59 |
| III.5. Conclusion | 59 |
| CONCLUSION GENERALE | 60 |

Notation et Symboles

| | |
|--------------------------|---|
| LED | Light-emitting diode |
| PV | Photovoltaïque |
| HAWTs | Horizontal Axis Wind Turbine |
| VAWTs | Vertical Axis Wind Turbines |
| GSAP | Génératrice à aimants permanents synchrone |
| MSAP | Machine synchrone à aimants permanents |
| w_r | Vitesses de rotation de synchronisme du champ tournant |
| w | Pulsation des courants statoriques [rd/s] |
| p | Nombre de pair de pôles |
| f-é-m | Les forces électro motrices |
| AC | Alternating current |
| DC | Direct current |
| AC/DC | Conversion Alternative/Continue. |
| PD3 | Les montages parallèles double (ou montage en pont de graëtz) |
| $D_1 D_2 D_3$ | Diodes pour l'aller |
| $D_4 D_5 D_6$ | Diodes pour retour |
| V_a, V_b, V_c | Les tensions des phase (a, b, c) |
| i_a, i_b, i_c | Les courants des phase (a, b, c) |
| V_{bus} | Tension du bus continue |
| I_{dc} | Courant continu |
| θ | L'angle d'amorçage naturel |
| U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} | Les tensions composées |
| V_m | La tension maximale |

| | |
|-----------------------|---|
| V_{eff} | La tension efficace |
| MLI | Modulation de largeur d'impulsion (PWM : Pulse Width Modulation) |
| IGBT | Transistor Bipolaire à Port Isolé (Insulated Gate Bipolar Transistor) |
| DC/DC | Hacheur Courant Continu/Courant Continu |
| d, u, α | Le rapport cyclique |
| T_{on} et T_{OFF} | Durée de conduction et Durée de blocage de l'interrupteur |
| T | Période de commutation. |
| MCC | Mode de Conduction Continue |
| MCD | Mode de Conduction Discontinue |
| MOSFET | Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor |
| C_p | Coefficient de puissance de l'éolienne |
| λ, TSR | Vitesse spécifique ou ration de vitesse, Tip-Speed-Ratio |
| E_c | Energie cinétique |
| ρ | Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C) |
| m | Masse d'air traversant le rotor éolien en une (1) seconde |
| S | Surface balayée par le rotor de l'éolienne |
| V_1, V_2 | Vitesses du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne |
| P_v | Puissance extraite par le rotor éolien |
| Q_m | Débit massique |
| $P_{aéro}$ | La Puissance absorbé par l'aérogénérateur |
| R_t | Rayon de la surface balayée en |
| Ω_t | Vitesse de rotation de la turbine éolienne |
| C_{pmax} | Coefficient de puissance optimale de la turbine |
| η | Rendement |
| V_1^3 | Vitesse du vent |
| C_t | Couple de la turbine éolienne |
| $P_{méc}$ | La puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur |
| e | Désignant l'écartement des bords intérieurs |
| d | Le diamètre des deux demi-cylindres constituant le rotor |
| P_{max} | Puissance maximale susceptibles |

| | |
|------------------------------|---|
| H | Hauteur |
| λ_{opt} | La vitesse réduite optimale |
| $C_{aéro}$ | Couple aérodynamique de l'éolienne |
| C_g | Couple d'entraînement de la génératrice |
| $\Omega_{méc}$ | Vitesse mécanique de la génératrice |
| Ω_{tur} | Vitesse angulaire de la turbine |
| J_g | Inertie de la turbine |
| J_{tur} | Inertie de la turbine |
| C_g | Le couple issu du multiplicateur |
| J_g | Inertie du multiplicateur |
| C_{em} | Le couple électromagnétique développé par la génératrice |
| FMM | Force magnétomotrice |
| $[U_a, U_b, U_c]^t$ | Vecteur tension statorique |
| $[I_a, I_b, I_c]^t$ | Vecteur courants statoriques |
| $[\psi_a, \psi_b, \psi_c]^t$ | Vecteur flux statoriques |
| $[R_s]$ | Matrice de la résistance équivalente d'un enroulement statoriques |
| $[L_s]$ | Matrice d'inductance propre d'une phase statorique |
| M_s | L'inductance mutuelle entres phases du stator |
| $[\psi_f]$ | Vecteur flux des aimants |
| C_m | Le couple moteur appliqué sur la génératrice |
| ω_r | Vitesse électrique du rotor |
| J | Moment d'inertie totale de la machine |
| F | Coefficient de frottement visqueux |
| (d, q) | Indice du repère de Park lié au rotor |
| L_d | Inductance statorique directe |
| (U_d, U_q) | Composantes de la tension au stator dans le repère de Park |
| L_q | Inductance statorique quadratique |
| (ψ_d, ψ_q) | Composantes du flux statorique dans le repère de Park |
| (I_d, I_q) | Composantes du courant statorique |
| Ω | Vitesse de rotation mécanique du rotor |
| P(t) | La puissance absorbée par la machine |

| | |
|------------|--|
| R_{bat} | Resistance interne de la batterie |
| I_{Load} | Courant de la charge (désigne aussi le courant du bus continu) |
| V_{Bat} | Tension aux bornes du module des batteries |
| SOC | Etat de charge (State of Charge) |
| I_{Bat} | Courant du module des batteries |

Liste des figures

| | |
|--|----------------------------------|
| Figure (I.1) : Eclairage public..... | 3 |
| Figure (I.2) : Histoire de l'éclairage résumé en images..... | خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة. |
| Figure (I.3) : l'éclairage conventionnel (connecté au réseau électrique) | خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة. |
| Figure (I.4) : Schéma de principe de l'Éclairage public PV-EOLIENNE..... | خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة. |
| Figure (I.5) : Schéma de principe de l'Éclairage public photovoltaïque autonome..... | 7 |
| Figure (I.6) : Schéma de principe de l'éclairage public éolien autonome..... | خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة. |
| Figure (I.7) : Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne | خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة. |
| Figure (I.8) : Les différents types d'éoliennes..... | خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة. |
| Figure (I.9) : Eolienne à axe horizontal | خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة. |
| Figure (I.10) : Les trois types de rotor Darrieus | خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة. |
| Figure (I.11) : Éolienne Savonius..... | خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة. |
| Figure (I.12) : Le principe d'exploitation de l'énergie éolienne perdue par les véhicules ... | خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة. |
| Figure (I.13) : Composants d'un Éclairage public autonome..... | 13 |
| Figure (I.14) : Le rotor Savonius :(a) deux demi-cylindres, (b) ou trois demi-cylindres | خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة. |
| Figure (I.15) : Principe de fonctionnement d'une éolienne de type Savonius | خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة. |
| Figure (I.16) : Le multiplicateur de Vitesse..... | 15 |
| Figure (I.17) : Représentation de la machine synchrone à aimants permanents..... | 16 |
| Figure (I.18) : Structure de la machine synchrone à aimant permanent | 16 |
| Figure (I.19) : Redresseur triphasé double alternance pont tout diodes montage PD3 pont de Graëtz. | 18 |
| Figure (I.20) : Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux..... | 19 |
| Figure (I.21) : Principe de base de la commande MLI | 21 |
| Figure (I.22) : Le schéma de principe de l'hacheur..... | 21 |
| Figure (I.23) : Schéma de principe d'un hacheur parallèle..... | 22 |
| Figure (I.24) : Le schéma d'un hacheur abaisseur..... | 23 |
| Figure (I.25) : Le schéma d'un hacheur élévateur | 24 |
| Figure (I.26) : Le schéma d'un hacheur abaisseur élévateur | 24 |
| Figure (I.27) : Batterie au plomb 12V 65 Ah pour l'énergie éolienne | 25 |
| Figure (II.1) : Structure de la chaîne à modéliser. | 26 |
| Figure (II.2) : Colonne d'air animée d'une vitesse v | 27 |
| Figure (II.3) : le tube de courant..... | 28 |
| Figure (II.4) : Eoliennes à axe vertical modèle Savonius..... | 32 |
| Figure (II.5) : Courbe de puissance d'une éolienne de 3.0 MW..... | 32 |
| Figure (II.6) : Modèle simplifié de la turbine éolienne | 34 |
| Figure (II.7) : Organigramme de simulation de la turbine éolienne..... | 35 |

| | |
|--|----|
| Figure (II.8) : Schéma représentatif de la GSAP..... | 36 |
| Figure (II.9) : Représentation de la MSAP dans le repère de Park (d, q)..... | 38 |
| Figure (II.10) : Transition du repère naturel du stator au repère (d, q) de Park..... | 38 |
| Figure (II.11) : Schéma d'un pont de diodes..... | 43 |
| Figure (II.12) : Représentation simplifiée de l'onduleur..... | 45 |
| Figure (II.13) : Schémas du convertisseur buck –boost..... | 48 |
| Figure (II.14) : circuit équivalent du convertisseur buck-boost : (a) K ouvert (b) K fermé..... | 48 |
| Figure (II.15) : Circuit équivalent de la batterie..... | 49 |
| Figure (III.1) : Schéma Bloc de simulation de la GSAP en charge..... | 51 |
| Figure (III.2) : Résultats de Simulation de la GSAP en charge..... | 52 |
| Figure (III.3) : Schéma Bloc de simulation de la GSAP monté avec turbine éolien..... | 53 |
| Figure (III.4) : La Vitesse de Vent..... | 53 |
| Figure (III.5) : Résultats de simulation de l'association GSAP avec turbine éolien..... | 54 |
| Figure (III.6) : Schéma Bloc de Simulation globale du système complet..... | 55 |
| Figure (III.7) : La Vitesse de Vent..... | 55 |
| Figure (III.8) : Le Couple mécanique C_m | 56 |
| Figure (III.9) : La Vitesse de rotation..... | 56 |
| Figure (III.10) : Les Tensions statorique ABC..... | 56 |
| Figure (III.11) : Les Courons statorique ABC..... | 57 |
| Figure (III.12) : La Tension redressée..... | 57 |
| Figure (III.13) : La Tension d'hacheur buck –boost..... | 57 |
| Figure (III.14) : Le Courante de batterie..... | 58 |
| Figure (III.15) : La Tension d'onduleur..... | 58 |
| Figure (III.16) : Le Courant d'onduleur..... | 58 |

INTRODUCTION
GENERALE

L'énergie électrique est fondamentale pour toutes les activités humaines. Actuellement, une part importante de la demande énergétique mondiale est satisfaite par les ressources fossiles, tandis que dans les pays développés, l'énergie nucléaire joue également un rôle important.

En effet, la demande mondiale croissante en énergie et l'exploitation intensive des ressources fossiles ont entraîné une augmentation significative de la pollution environnementale associée à ces sources d'énergie. Cela a encouragé le développement de nouvelles sources d'énergie et l'utilisation d'énergies propres et renouvelables. Par conséquent, réduire l'utilisation de combustibles fossiles épuisables permet d'assurer la durabilité et la protection de l'Environnement, qui est désormais un enjeu crucial. [1]

Plusieurs sources d'énergies renouvelables sont en cours d'exploitation et de recherche, dont le but est de développer des techniques d'extraction de puissances visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage, et de recyclage), et d'augmenter l'efficacité énergétique, Parmi ces énergies, celle provenant du vent et transformée en électricité par l'intermédiaire des turbines éolienne

L'utilisation la plus importante de l'énergie électrique est l'éclairage général. La lumière joue également un rôle essentiel dans la vie humaine. Pendant la journée, le soleil nous apporte une lumière naturelle, mais lorsque la nuit tombe, nous avons besoin d'une source de lumière artificielle. Aujourd'hui, l'éclairage artificiel n'est plus seulement un moyen d'obtenir de la lumière, mais est devenu un élément essentiel de la vie quotidienne, notamment dans les zones urbaines et sur la voie publique. [2]

Le but de ce projet est de concevoir un système d'éclairage indépendant en intégrant une éolienne à axe vertical de type Savonius avec un générateur synchrone à aimant permanent, un système de conversion d'énergie et des dispositifs de stockage pour exploiter l'énergie éolienne naturelle et celle perdue par les véhicules pour faire fonctionner les éoliennes et produire de l'énergie électrique pour éclairer la route et les lieux publics.

Dans ce contexte on a divisé notre manuscrit en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous étudierons l'éclairage des rues et ses types, ainsi que les énergies utilisées pour obtenir un éclairage dans les routes et les installations publiques. Nous aborderons également la source d'énergie utilisée, qui est l'énergie éolienne, ainsi que le type de générateur intégré à l'énergie éolienne. De plus, nous traiterons des généralités sur les convertisseurs d'énergie utilisés et l'unité de stockage.

Dans le second chapitre, nous avons examiné les aspects liés à l'énergie dans le contexte de l'énergie éolienne à axe vertical, spécifiquement le Rotor Savonius, ainsi que le générateur associé, qui est une Génératrice synchrone à aimants permanents. En outre, nous avons discuté des composants nécessaires à la conversion et au stockage de cette énergie, notamment un redresseur à diodes pour convertir une tension alternative en tension continue, un hacheur buck-boost pour ajuster la tension continue à un niveau inférieur ou supérieur, l'utilisation de batteries pour le stockage d'énergie, et enfin un onduleur triphasé pour convertir la tension continue en tension alternative, permettant ainsi de l'alimenter les éclairages.

Dans le troisième chapitre, à l'aide de Logiciel MATLAB Simulink, nous avons effectué la simulation du système : éolienne à axe vertical, générateur synchrone à aimant permanent, pont redresseur de diodes, booster abaisseur, batterie et onduleur PWM triphasé, après quoi nous avons simulé tous les composants du système.

Et dans la dernière partie de cette mémoire, nous avons présenté une conclusion générale qui comprend ce que nous avons étudié dans les trois chapitres. Cela inclut l'analyse, la proposition de solutions ainsi que les perspectives en termes de développement et d'amélioration du système d'éclairage public autonome.

CHAPITRE I

Notions sur Eclairage Public

I.1. Introduction

L'éclairage des espaces publics, des routes, des monuments et des sites urbains et ruraux est désormais une priorité pour les fournisseurs d'électricité et les autorités administratives et politiques. L'éclairage public joue un rôle significatif tant sur le plan économique que social au sein des villes [3] [4], Et n'oubliez pas non plus que l'éclairage public donne une esthétique aux lieux urbains comme le montre la Figure (I.1) et l'énergie solaire n'est pas la seule source pour cet éclairage. Il existe une autre source d'énergie, qui est l'énergie éolienne, que nous utiliserons pour l'éclairage.

Dans ce chapitre, nous étudierons l'éclairage public et ses types, ainsi que les différents composants de base de l'éclairage public, Ainsi que la source d'énergie utilisée, qui est l'énergie éolienne.



Figure (I.1) : Eclairage public

I.2. Définition de l'éclairage public

Dans les rues, les parcs ainsi que dans les zones périphériques des villes où circulent des piétons et des véhicules, divers dispositifs tels que des lampadaires, lanternes ou éclairages de façade sont installés pour éclairer les espaces publics, aussi appelés éclairages extérieurs. Ces divers moyens d'éclairage ont pour objectif commun d'améliorer la visibilité et de promouvoir un sentiment de sécurité pour les usagers. Il est crucial que l'éclairage soit bien conçu pour offrir un confort visuel optimal tout en garantissant la sécurité. De plus, la facilité de maintenance de ces équipements d'éclairage joue un rôle essentiel. [5]

I.2.1. But de l'éclairage public

L'éclairage public joue un rôle essentiel à plusieurs niveaux [6]:

- ❖ Sécurité routière : Il renforce la sécurité sur les routes, facilite la circulation et réduit les accidents de nuit, certains chiffres indiquant une baisse de 30 % des accidents routiers nocturnes grâce à l'éclairage public.
- ❖ Activité économique : Il est essentiel pour la vie nocturne, stimulant ainsi l'économie locale et facilitant la vie quotidienne des résidents.
- ❖ Confort des usagers : Il garantit le confort et la sécurité des conducteurs, des piétons et des riverains.

I.2.2. Historique

Depuis des millénaires le mot éclairer présente un problème pour l'humanité. Mais l'éclairage public n'effectue qu'en l'an 1000 en Cordoba, Al-Andalous. [7]

Pendant longtemps, l'éclairage public n'existait pas, jusqu'à ce que les premières installations voient le jour à Cordoue, en Andalousie, au 10^{ème} siècle. Par la suite, l'éclairage a connu de nombreuses avancées, depuis les simples lampes à huile jusqu'aux technologies modernes comme les lampes à gaz, à pétrole, à incandescence, à décharge et, plus récemment, les LED. [8]

Les lampes à huile ont évolué, passant d'un simple bol avec une mèche flottante à des modèles plus élaborés avec une ouverture réduite et une anse verticale, permettant de stabiliser la flamme. Les lampes à gaz se sont ensuite développées grâce à la production industrielle de gaz. Puis les lampes à pétrole ont connu un grand succès suite à la découverte de gisements importants aux États-Unis. [9][10][5]

L'invention de la lampe à incandescence par Edison en 1879 a marqué une étape clé, permettant à l'électricité de s'installer dans les foyers et les commerces. Plus tard, les lampes à décharge, sans filament mais avec deux électrodes dans une enveloppe de gaz ou de vapeur métallique, ont fait leur apparition. [10]

Enfin, les LED se sont développées industriellement à partir des années 1970, d'abord pour la signalétique, avant de se généraliser dans l'éclairage depuis les années 2000-2010. [11]

La figure (I.2) représente Histoire de l'éclairage :



Figure (I.2) : Histoire de l'éclairage résumé en images.

I.3. Types d'éclairage public

En pratique, il est bien établi que l'énergie conventionnelle (provenant des centrales électriques thermiques, nucléaires, etc.) est la principale source d'énergie pour l'éclairage public. Cependant, avec l'émergence des énergies renouvelables jouant un rôle de plus en plus important dans la production d'énergie, [12] l'éclairage public commence à prendre sa part. Pour ce faire, deux systèmes d'éclairage sont distingués : l'éclairage conventionnel (connecté au réseau électrique) et l'éclairage autonome solaire, soit seul, soit combiné avec des éoliennes (hybride). Ce dernier système produit son énergie de fonctionnement de manière autonome, sans nécessiter de raccordement à un réseau électrique. [5]

I.3.1. Éclairage public non autonome (connecté au réseau électrique)

Il fait référence aux systèmes d'éclairage public qui sont alimentés en électricité par le réseau électrique principal comme le montre la Figure (I.3), où l'énergie électrique leur est fournie directement depuis le réseau électrique principal.

Le principe de fonctionnement d'un système d'éclairage non autonome est basé sur l'alimentation en électricité à partir du réseau électrique principal. L'électricité est fournie directement aux luminaires de l'éclairage public via des câbles électriques connectés au réseau. Les luminaires peuvent être contrôlés et réglés à distance pour ajuster l'intensité lumineuse ou les horaires d'éclairage en fonction des besoins.

Ce type de système nécessite une infrastructure électrique fiable et une alimentation continue pour assurer un fonctionnement efficace de l'éclairage public. [5] [13]



Figure (I.3) : l'éclairage conventionnel (connecté au réseau électrique)

I.3.2. Éclairage public autonome

L'éclairage public autonome fait référence à des systèmes d'éclairage qui fonctionnent de manière indépendante du réseau électrique principal. Ces systèmes utilisent généralement des sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire ou éolienne pour générer l'électricité nécessaire à l'éclairage des espaces publics. Les luminaires autonomes intègrent des panneaux solaires, des batteries de stockage et des dispositifs de contrôle de l'éclairage pour fournir une illumination efficace tout en étant écologiquement durables et économiques. Ils sont souvent utilisés dans des zones isolées ou éloignées où l'accès au réseau électrique est limité ou coûteux.[14]

Les types d'éclairage public autonome sont les suivants :

I.3.2.1. Éclairage public hybride PV-EOLIEN

Le principe d'un système hybride PV-Éolien repose sur l'intégration de deux sources d'énergie renouvelable comme illustré dans Figure (I.4) :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) et l'énergie éolienne. Ce système combine des panneaux solaires pour capter l'énergie solaire et des éoliennes pour capter l'énergie éolienne.

Lorsque le soleil brille, les panneaux solaires convertissent la lumière solaire en électricité, et lorsque le vent souffle, les éoliennes utilisent la force du vent pour générer de l'électricité, Ces deux sources d'énergie peuvent être complémentaires, car elles peuvent fonctionner à différents moments de

la journée ou dans des conditions météorologiques différentes, Par exemple, les panneaux solaires peuvent produire de l'électricité pendant la journée, tandis que les éoliennes peuvent produire de l'électricité la nuit ou lorsque le ciel est couvert. En combinant ces deux sources d'énergie, un système hybride PV-Éolien peut fournir une alimentation électrique plus stable et fiable. [15]



Figure (I.4) : Schéma de principe de l'Éclairage public PV-EOLIENNE

I.3.2.2. Éclairage public PV



Figure (I.5) : Schéma de principe de l'Éclairage public photovoltaïque autonome.

Un système photovoltaïque autonome est un système d'énergie solaire qui fonctionne de manière indépendante comme illustré dans Figure (I.5), sans connexion au réseau électrique principal. Il utilise des panneaux solaires pour convertir la lumière du soleil en électricité, qui est ensuite stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure. Ce type de système est souvent utilisé dans des endroits éloignés ou isolés où l'accès à l'électricité du réseau est limité ou inexistant. [16]

I.3.2.3. Éclairage public éolien

Un système éolien est un système qui utilise l'énergie cinétique du vent pour produire de l'électricité. Il se compose généralement d'une ou plusieurs éoliennes, également appelées turbines éoliennes, qui captent l'énergie du vent et la convertissent en électricité, Cette électricité est utilisée pour l'éclairage public ou d'autres besoins. [17]

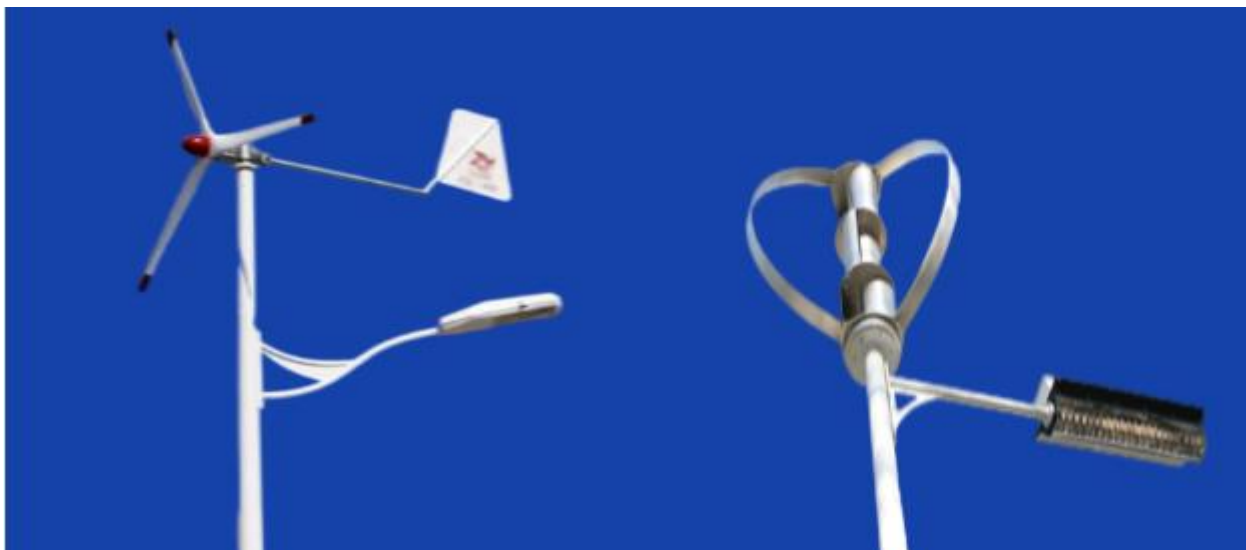


Figure (I.6) : Schéma de principe de l'éclairage public éolien autonome.

I.3.2.3.1. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne, issue du mouvement des masses d'air, est une conséquence indirecte de l'irradiation solaire sur la Terre. Le réchauffement de certaines zones et le refroidissement d'autres entraînent une variation de pression atmosphérique, ce qui engendre un mouvement continu des masses d'air. [18]

I.3.2.3.2. Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

L'énergie cinétique du vent est captée par des pales qui la convertissent en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique grâce à un générateur électrique, qui peut être de type synchrone ou asynchrone (Figure I.7). [19]

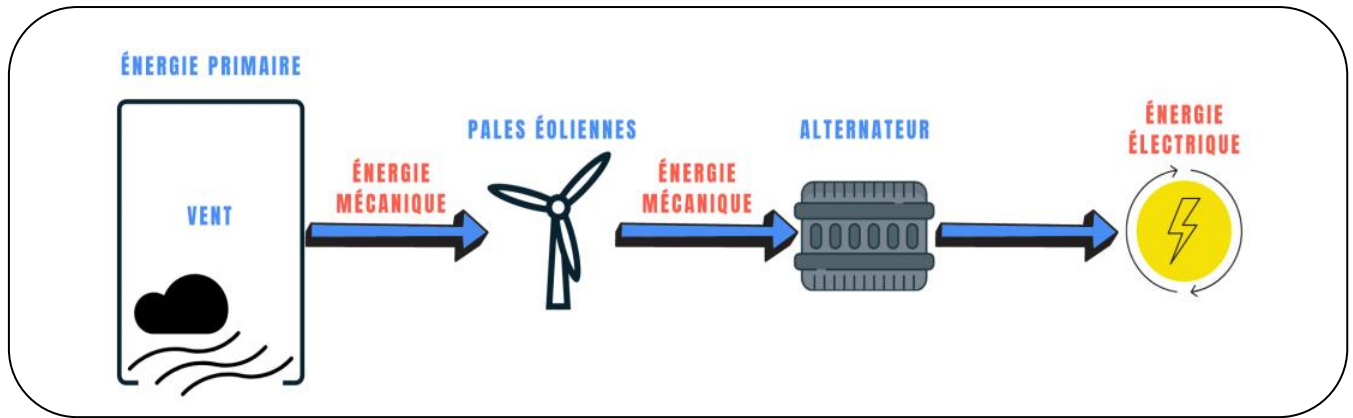


Figure (I.7) : Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne

I.3.2.3.3. Différents types d'éoliennes selon l'axe de la turbine

Il existe deux types d'éoliennes : les éoliennes à axe horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine " HAWTs ") et les éoliennes à axe vertical (Vertical Axis Wind Turbines" VAWTs ") comme illustré dans la figure (I.8) : ci-dessous.



Eolienne "on-shore" populaire à axe horizontal



Eolienne "off-shore" d'axe horizontal



Eolienne à pompage d'eau d'axe horizontal



Eolienne hélicoïdale "Windside" d'axe vertical



Eolienne type "Savonius", d'axe vertical



Eolienne type "Darrieus", d'axe vertical



Eolienne hélicoïdale d'axe vertical

Figure (I.8) : Les différents types d'éoliennes

La plupart des parcs éoliens, qu'ils soient terrestres ou en mer, utilisent des HAWTs à deux ou trois pales. Les HAWTs sont connues pour leur vitesse élevée et leurs performances exceptionnelles.

En revanche, les VAWTs sont moins rapides mais offrent une meilleure stabilité dans des conditions de vent complexes. Bien que les VAWTs soient plus lentes, elles produisent un couple de démarrage important [20]. Le choix d'une éolienne dépend principalement de sa capacité à extraire le maximum d'énergie du vent. [18]

I.3.2.3.4. Eolienne à axe horizontal (HAWT)

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur l'ancienne technologie des moulins à vent et ont démontré leur efficacité. Cependant, elles fonctionnent mal dans des vents instables ou lorsque la direction du vent est incertaine. Ces éoliennes utilisent des profils aérodynamiques et exploitent la force de portance. Pour la production d'électricité, le nombre de pales varie généralement entre 1 et 3, le rotor à trois pales étant le plus couramment utilisé. Ce choix représente un compromis optimal entre le coefficient de puissance le coût et la vitesse de rotation du rotor éolien. Figure (I.9) [21]



(a) Éoliennes en mer (offshore)



(b) Éoliennes terrestres (onshore)

Figure (I.9) : Eolienne à axe horizontal

I.3.2.3.5. Eolienne à axe vertical (VAWT)

Les éoliennes à axe vertical sont mieux adaptées à un usage en milieu urbain, car elles fonctionnent indépendamment de la direction du vent, qui est souvent imprévisible dans cet environnement. De plus, elles sont généralement plus robustes et moins bruyantes que les éoliennes à axe horizontal. La forme idéale des éoliennes à axe vertical pour les zones urbaines n'a pas encore été clairement déterminée, car aucun modèle n'a encore prouvé sa supériorité en termes de performance.

De nombreuses variantes technologiques ont été expérimentées, mais seulement deux structures ont atteint le stade de l'industrialisation : le rotor de Darrieus et le rotor de Savonius. [21]

I.3.2.3.6. Le Type Darrieus

Les éoliennes de type Darrieus sont composées de deux ou trois pales avec des profils aérodynamiques et fonctionnent grâce à la force de portance. Ces pales peuvent être droites, en forme de troposkein (en C) ou hélicoïdales. Le moteur de ces éoliennes est situé à leur base, ce qui les rend plus économiques que les éoliennes classiques, bien qu'elles soient moins productives [21]. Figure (I.10)



Figure (I.10) : Les trois types de rotor Darrieus

I.3.2.3.7. Le Type Savonius

Les éoliennes de type Savonius sont composées de deux ou trois aubes, généralement en forme de demi-cylindres légèrement désaxés, et fonctionnent grâce à la force de traînée. Ces aubes peuvent être droites ou torsadées. Le moteur de cette éolienne est situé au sommet de la tour [21]. Figure (I.11) :

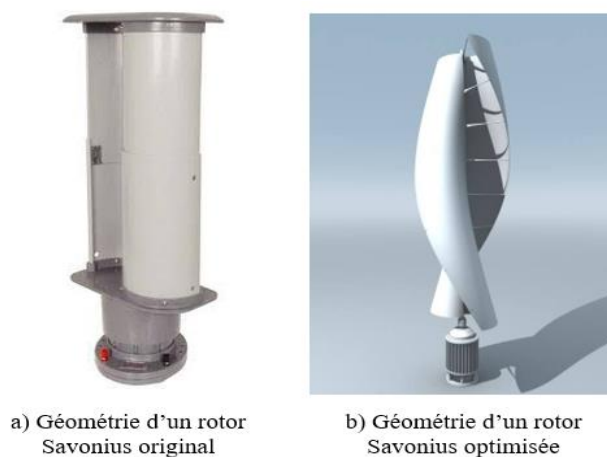


Figure (I.11) : Éolienne Savonius.

I.3.2.3.8. Les Avantages et les inconvénients de la turbine Savonius [22]

Avantage :

- ✚ La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- ✚ Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- ✚ Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.
- ✚ Faible encombrement.
- ✚ Démarrer à de faible vitesse de vent.
- ✚ Système peu bruyant.
- ✚ Pas de contraintes sur la direction du vent

Inconvénient :

- ✚ Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- ✚ La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- ✚ Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

I.3.2.3.9. Le choix d'un système d'éclairage public autonome

Dans ce projet, nous choisirons un système d'éclairage public qui sera indépendant du réseau électrique et fonctionnera uniquement grâce à l'énergie éolienne (autonome). La figure (I.12) montre la forme finale du projet.

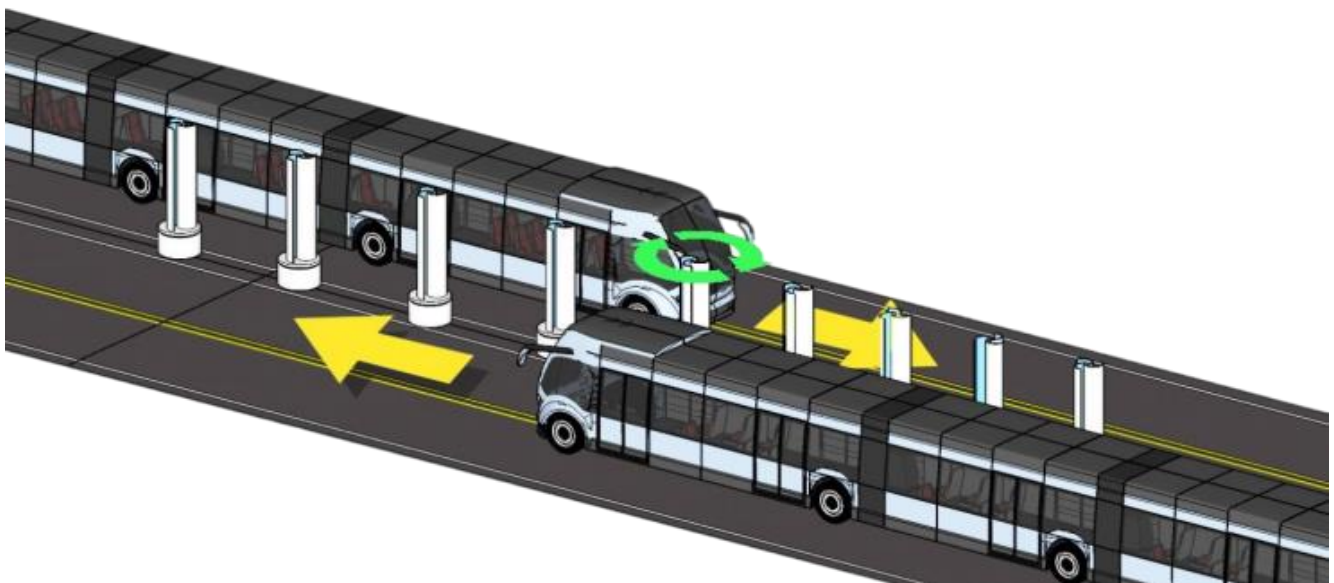


Figure (I.12) : Le principe d'exploitation de l'énergie éolienne perdue par les véhicules

Nous avons choisi d'utiliser les turbines Savonius en les plaçant sur les autoroutes, les lignes de métrobus et autres lignes de transport ainsi que sur les immeubles de grande hauteur, et elles produiront de l'énergie à partir du vent généré par les véhicules ainsi que du vent naturel, comme le montre la figure (I.12). L'énergie produite nous permettra de l'exploiter pour l'éclairage public et l'usage quotidien.

I.4. Description des composants d'un Éclairage public autonome basé sur générateur éolien a axe vertical type Savonius

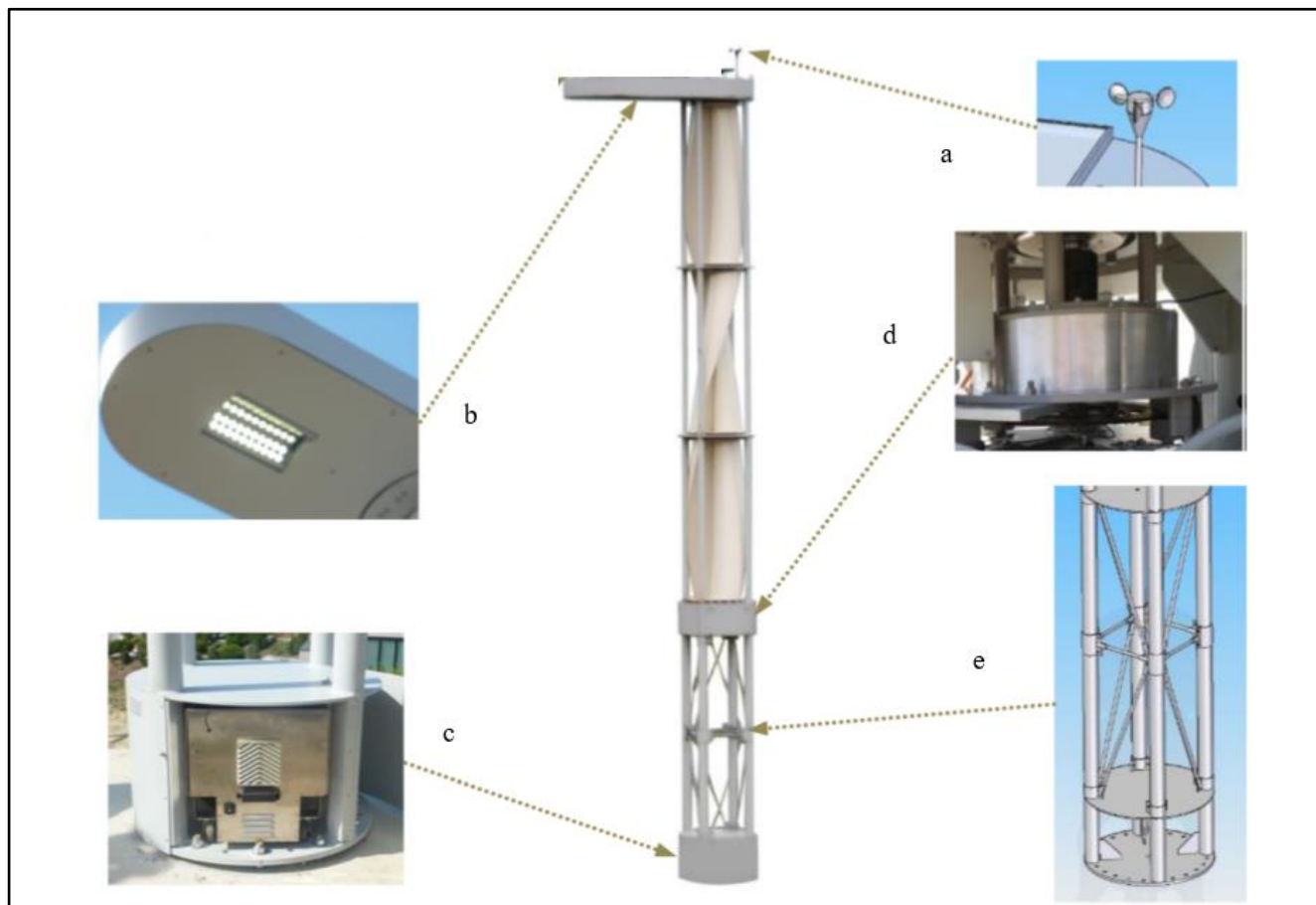


Figure (I.13) : Composants d'un Éclairage public autonome

(a) Anémomètre, (b) Lampe LED, (c) Batterie, (d) Générateur, (e) Structure en treillis de base.

I.4.1. Le rotor Savonius

Nous avons déjà évoqué ce type d'éolienne, qui constitue un modèle idéal pour les débutants en raison de sa simplicité et de son faible coût de réalisation. L'une de ses applications les plus courantes est la publicité, comme les panneaux en tôle rotatifs. Bien qu'on entende souvent dire que ce type d'éolienne n'est pas adapté à la production d'électricité, cela n'est que partiellement vrai. En effet, des modèles commerciaux récents et des réalisations par des amateurs avertis montrent une grande productivité.

Cette conception présente de nombreux avantages : elle démarre avec des vents très faibles, résiste bien aux vents violents, offre un bon couple et est peu bruyante. Son seul inconvénient est sa vitesse limitée, mais cela ne signifie pas qu'elle doit être écartée. De nombreux bricoleurs expérimentés ont surmonté ce problème en allongeant les pales et en utilisant une bonne démultiplication. Bien qu'on la trouve souvent utilisée pour le pompage de l'eau, domaine où elle excelle, les avancées en aérodynamique et la passion de certains constructeurs amateurs sont en train de changer les choses. Pour une première construction, c'est vraiment le modèle à privilégier. [23]

Le rotor Savonius est composé de deux ou trois demi-cylindres désaxés Comme indiqué dans (Figure I.14) :

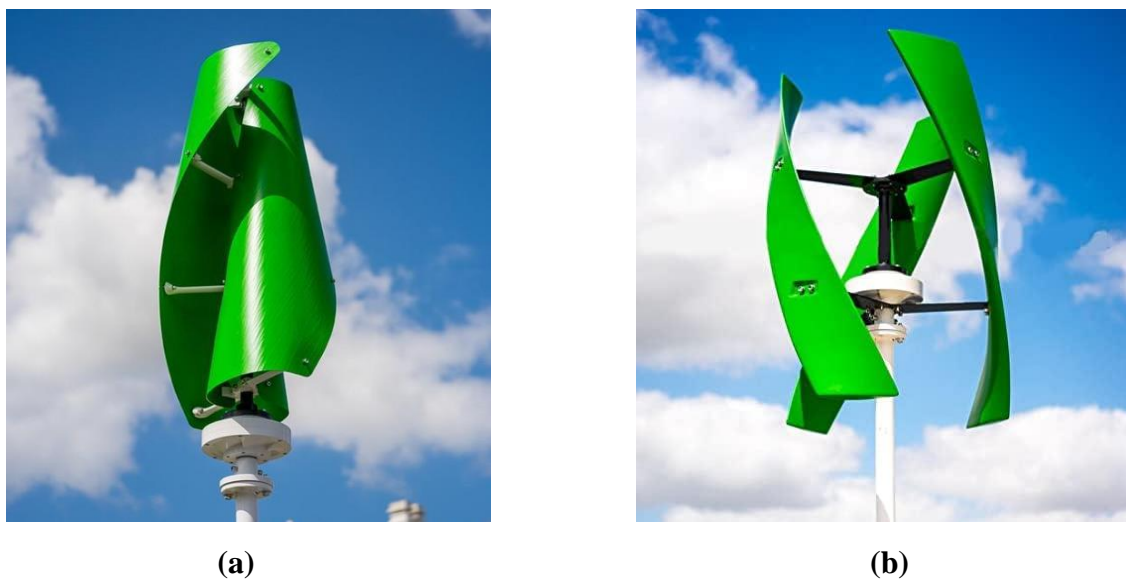


Figure (I.14) : Le rotor Savonius :(a) deux demi-cylindres, (b) ou trois demi-cylindres

I.4.1.1. Principe de fonctionnement d'une éolienne de type Savonius [24]

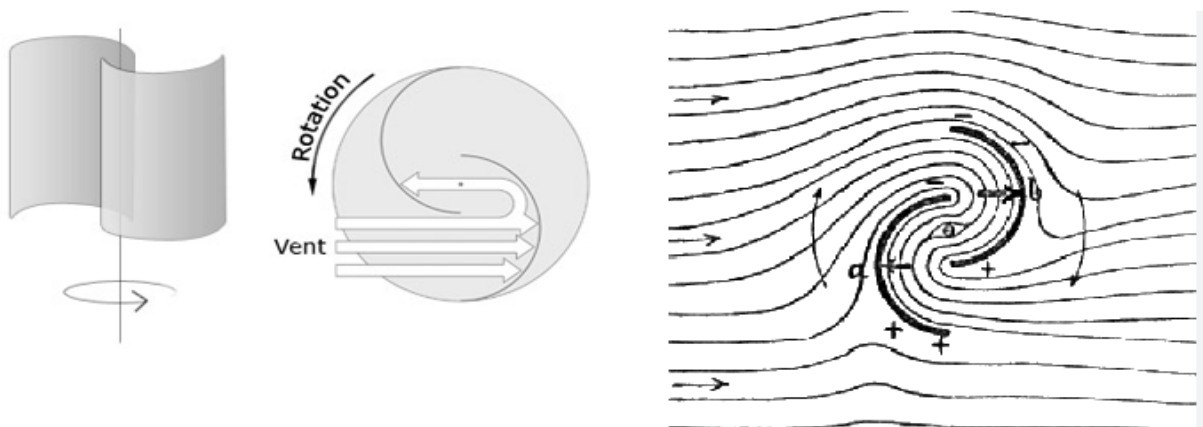


Figure (I.15) : Principe de fonctionnement d'une éolienne de type Savonius

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

❖ Le rotor de Savonius figure (1.15) est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

❖ Au niveau de la génératrice, qui se trouve en haut du mât. La turbine est couplée à un générateur électrique qui génère un courant continu ou alternatif, puisqu'elle est reliée directement au rotor du générateur à travers un arbre. Alors, elle reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite aux réseaux électriques.

Par ailleurs, l'éolienne verticale fonctionne, quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

I.4.2. Le multiplicateur de Vitesse

Un multiplicateur mécanique est un dispositif qui transmet la puissance d'un moteur à une machine (le plus souvent) ou des pales à un générateur (dans notre cas), en augmentant la vitesse. Cette transmission de puissance vise à adapter les caractéristiques du moteur à celles de la machine tout en augmentant la vitesse de sortie. Ainsi, il transforme la puissance à faible vitesse et à couple élevé produite par le rotor de l'éolienne en une puissance à grande vitesse et à faible couple transmise au générateur.[25]



Figure (I.16) : Le multiplicateur de Vitesse

I.4.3. Machine électrique dans les aérogénérateurs

Les systèmes de conversion, basés sur des machines synchrones à aimants permanents à grand nombre de pôles. Ce mode de transformation de puissance (transmission directe), offre un couple massique suffisant pour garantir l'entraînement de la machine.

La machine synchrone à aimants permanents est la plus performante de toutes les machines existantes, elle a une particularité liée à son aimantation permanente à plusieurs pôles qui lui permet d'éliminer plusieurs types de pertes de puissance et de bruit. [26]

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, la turbine et la génératrice sont les éléments les plus importants, puisque la turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de tourner le rotor de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), ce dernier est la composante qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. [27]

I.4.3.1. Présentation et description de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone se compose de deux composantes distinctes : un élément mobile appelé rotor, qui constitue l'inducteur, et un élément fixe nommé stator, sur lequel sont montés des enroulements formant l'induit. L'espace mince et localisé entre ces deux éléments est désigné comme l'entrefer (Figure (I.17) et Figure (I.18)). [28]

La vitesse de rotation du champ tournant dépend du nombre de pôles de la machine et de la fréquence des courants statoriques, comme indiqué par la formule $w_r = w/p$. Le stator, qui est fixe et abrite les enroulements connectés à la source d'alimentation, ressemble au stator que l'on retrouve dans toutes les machines électriques triphasées. Il est constitué d'un empilement de tôles magnétiques avec des encoches où sont positionnés trois enroulements identiques, décalés de $2\pi/3$ les uns par rapport aux autres. [29]

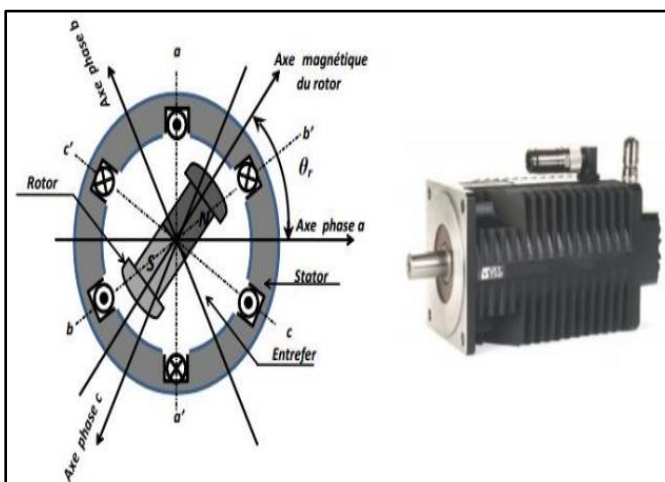


Figure (I.17) : Représentation de la machine synchrone à aimants permanents



Figure (I.18) : Structure de la machine synchrone à aimant permanent

I.4.3.2. Principe de fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents

La machine étudiée fonctionne comme un moteur, convertissant ainsi l'énergie électrique en énergie mécanique. Son stator est alimenté par un réseau triphasé, générant un champ magnétique rotatif qui met en mouvement le rotor. Lorsque le couple sur l'arbre augmente, l'angle de déphasage entre les pôles magnétiques devient plus important. Si cet angle dépasse 90° , le rotor perd la synchronisation avec le champ magnétique rotatif. La vitesse de rotation du rotor correspond à la vitesse de synchronisme et est donc proportionnelle à la fréquence d'alimentation du stator. [30]

I.4.3.3. Fonctionnement en mode génératrice (GSAP)

Les alternateurs à base des machines synchrones sont la source primaire de toute énergie électrique. Entraînés par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. L'inducteur de la génératrice synchrone, entraîné mécaniquement, crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les forces électromotrices (f-é-m) dans ces bobinages provoquent la circulation des courants induits qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer qui tourne à la même vitesse que celui de champ inducteur. [30]

L'un des principaux avantages d'utiliser un générateur à aimant permanent dans une turbine éolienne est son efficacité accrue. Les aimants permanents permettent de produire un champ magnétique constant sans nécessiter d'alimentation électrique externe, ce qui réduit les pertes d'énergie dues à la résistance électrique. En conséquence, les générateurs à aimant permanent ont tendance à être plus compacts, plus légers et moins sujets à l'usure par rapport aux générateurs traditionnels à excitation électromagnétique. C'est ce qui nous a fait choisir GSAP dans notre système. [31]

I.4.4. Redresseur triphasé à diode

I.4.4.1. Définition d'un redresseur

Les redresseurs, composants essentiels de l'électronique de puissance, opèrent la conversion de courant alternatif en courant continu (AC/DC). Ils sont alimentés par une source de tension alternative et fournissent un courant continu à un récepteur connecté à leur sortie. Leur classification dépend principalement de la nature de la source d'alimentation : monophasée ou triphasée, ainsi que du type de redresseur utilisé : non commandé (à diodes) ou commandé (à thyristors). De plus, la commande des thyristors, mesurée par l'angle de retard δ par rapport à la commutation naturelle des diodes, influence également la classification des redresseurs. [32]

La Figure I.19: représente le redresseur PD3. Seul le secondaire du transformateur est représenté. Ce montage est à comparer au pont de Graëtz en monophasé et à ce titre il peut également être appelé triphasé double alternance.

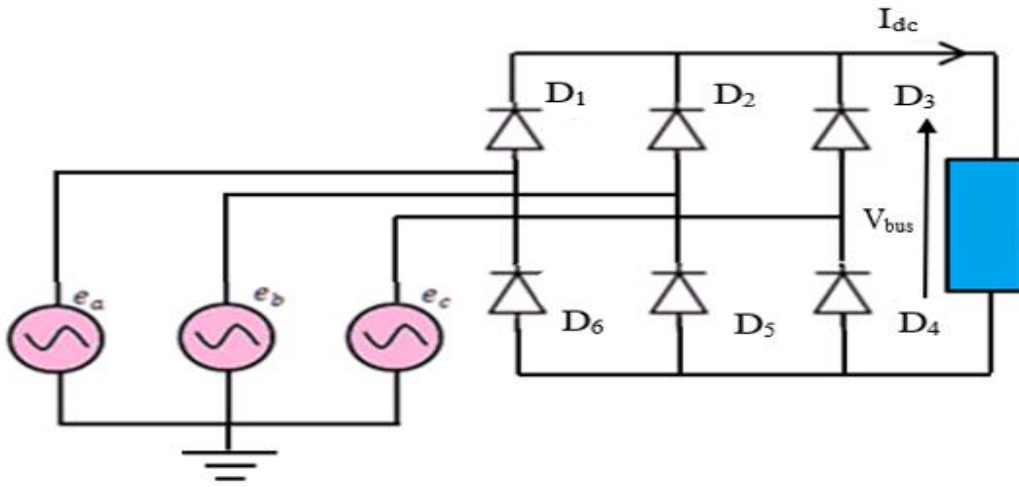


Figure (I.19) : Redresseur triphasé double alternance pont tout diodes montage PD3 pont de Graëtz.

I.4.4.2. Principe de fonctionnement

Le pont redresseur comporte 3 diodes pour l'« aller » $D_1 D_2 D_3$ et 3 diodes pour le « retour » $D_4 D_5 D_6$. La tension $V_{bus} = V(+), V(-)$

On considère un redresseur alimenté par une source de tension, Le réseau de tension secondaire de transformateur sera noté de la façon suivante représentée par la figure (I.1) :

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\theta) \\ V_b = V_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \equiv \begin{cases} V_a = V\sqrt{2} \sin(\theta) \\ V_b = V\sqrt{2} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V\sqrt{2} \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (I.1)$$

Et les tensions composées représentés par la figure (I.2) :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_a - V_b = -U_{ba} \\ U_{bc} = V_b - V_c = -U_{cb} \\ U_{ca} = V_c - V_a = -U_{ac} \end{cases} \quad (I.2)$$

L'existence d'un courant continu dans la charge exige la conduction de deux diodes à tout instant, une de chaque commutateur. [32]

La règle pour déterminer les diodes passantes est la même que pour le montage P3 [32] : Pour le commutateur à cathode commune, la diode dont l'anode est au potentiel le plus élevé conduit, d'où la dénomination « + positif ».

Pour le commutateur à anode commune, la diode dont la cathode est au potentiel négatif le plus faible conduit, d'où la dénomination « - négatif ».

Lorsque $V_a > V_c > V_b$, D_1 et D_5 conduisent : $V_{bus} = V_a - V_b$

Lorsque $V_a > V_b > V_c$, D_1 et D_4 conduisent $V_{bus} = V_a - V_c$

Lorsque $V_b > V_a > V_c$, D_2 et D_4 conduisent : $V_{bus} = V_b - V_c$

I.4.5. L'onduleur triphasé

Un onduleur est un convertisseur électronique de puissance capable de convertir le courant alternatif en courant continu. Il fonctionne en commutation forcée et est généralement basé sur une conception à transistor. Sa commande peut être effectuée via des techniques classiques ou des techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI). L'onduleur convertit une tension continue à son entrée en une tension alternative à sa sortie, il contrôle également l'amplitude et la fréquence de la tension de sortie. La vitesse d'une machine synchrone est modifiée en agissant simultanément sur la fréquence et l'amplitude de la tension. [33]

I.4.5.1. Onduleur de tension a deux niveaux

L'onduleur classique à deux niveaux de tension Il est constitué de trois bras de commutation à transistors [34]. Dans ce travail on a utilisé des IGBT misent en antiparallèle avec des diodes pour assurer la circulation bidirectionnelle du courant.

Le schéma simplifié d'un onduleur triphasé à deux niveaux est montré dans Figure (I.20) :

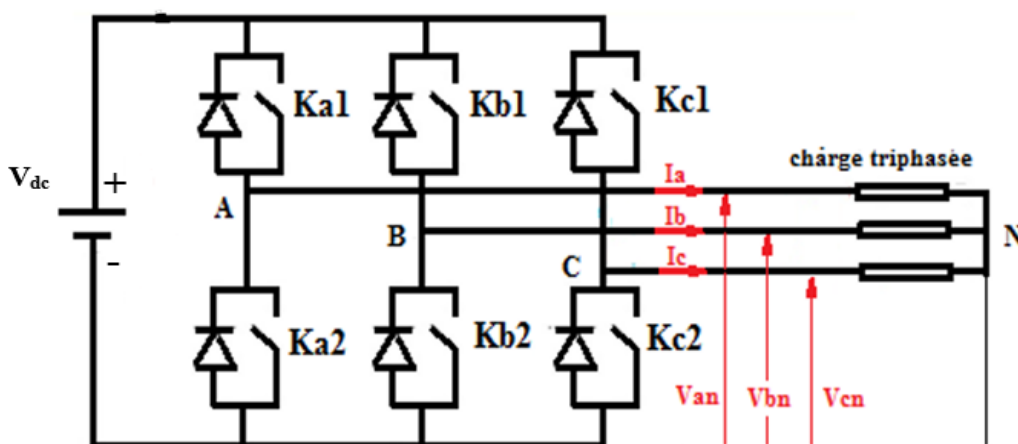


Figure (I.20) : Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux

I.4.5.2. Techniques de commande de l'onduleur triphasé

Les onduleurs de tension peuvent être contrôlés selon diverses stratégies. À basse fréquence, ils sont gérés en mode plein onde, où le signal de commande est ajusté à la fréquence souhaitée en sortie et la source continue doit être adaptable (à travers l'utilisation d'un redresseur à thyristor ou d'un hacheur). À haute fréquence, ils sont contrôlés par modulation de largeur d'impulsion. Cette méthode permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence tout en maintenant la source continue constante (par exemple, à l'aide d'un pont à diodes). Afin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande seront présentées : [33]

1. Commande 180°.
2. Commande 150°.
3. Commande MLI.

Pour ce projet, nous opterons pour la modulation de largeur d'impulsion (MLI) en raison de nos exigences spécifiques.

I.4.5.3. Commande MLI

La modulation de largeur d'impulsion, également connue sous le nom de pulse width modulation en anglais, implique l'utilisation d'une fréquence de commutation plus élevée que la fréquence des grandeurs de sortie. Elle consiste à diviser chaque période de sortie en une succession de créneaux de largeurs appropriées. Cette technique peut être considérée comme une extension du principe de la commande par découpage, où la durée des impulsions n'est plus uniforme, mais est choisie de manière à éliminer le plus grand nombre possible d'harmoniques de bas rang, qui sont difficiles à filtrer. [35]

I.4.5.3.4. Principe de base de la commande MLI

Le principe fondamental de la modulation de largeur d'impulsion repose sur la découpe d'une onde rectangulaire en pleine onde. Ainsi, la tension de sortie de l'onduleur est générée par une série de créneaux ayant tous la même amplitude que la tension d'alimentation (continue), mais avec une largeur variable. La méthode la plus couramment utilisée pour créer un signal MLI consiste à comparer un signal triangulaire, appelé porteuse à haute fréquence, avec un signal de référence, appelé signal modulateur, qui détermine l'énergie du signal obtenu en sortie de l'onduleur Figure (I.21). [33]

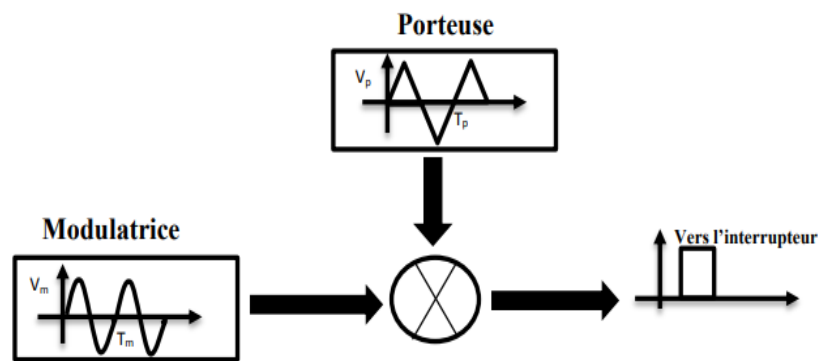


Figure (I.21) : Principe de base de la commande MLI

I.4.5.3.5. Les avantages de la commande MLI [33]

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) est principalement utilisée pour les raisons suivantes :

- ❖ Fournir des courants quasi sinusoïdaux pour alimenter les machines à courant alternatif.
- ❖ Permettre le réglage de l'amplitude du composant fondamental de la tension de sortie.

I.4.6. Les hacheurs

L'hacheur est un convertisseur statique continu-continu utilisant principalement des interrupteurs électroniques unidirectionnels (composés de semi-conducteurs) pour ouvrir ou fermer un circuit électrique de puissance. Il est l'équivalent du transformateur en courant alternatif. Les hacheurs sont utilisés dans les locomotives, les métros, les autobus, et de manière générale, partout où un convertisseur de puissance continu-continu est nécessaire. [36]

La Figure (I.22) présente le schéma de principe de l'hacheur :

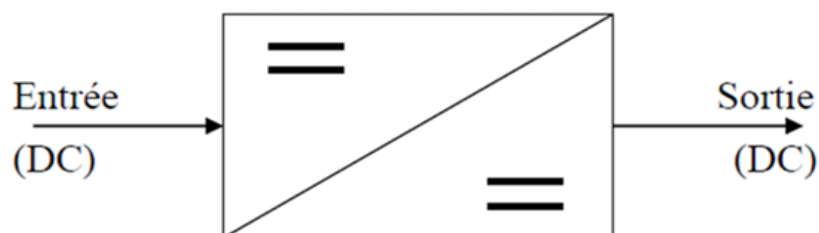


Figure (I.22) : Le schéma de principe de l'hacheur

L'hacheur permet de moduler l'énergie entre une source et une charge continue, Cette source et cette charge peuvent être de nature capacitive (source de tension) ou inductive (source de courant).

Il est constitué d'un interrupteur commande le qui peut être un transistor (pour des faibles puissances) ou un thyristor (pour grande puissance).

Le rapport entre la durée ton de fermeture de l'interrupteur et la période de commutation T s'appelle le rapport cyclique « DUTY Cycle ».

$$d = \frac{t_{on}}{T} \quad \text{ou bien : } T_{on} = dT \quad \text{d'où : } T_{off} = (1 - d)T \quad \text{et aussi } T = T_{on} + T_{off}$$

Pour des raisons expérimentales, on donne toujours la fréquence de commutation f_s « SWITCHINGFREQUENCY » au lieu de la période de commutation. [36]

I.4.6.1. Principe de fonctionnement [36]

Le mode de fonctionnement des hacheurs Comme le montre la figure (I.23) dépend de leur capacité de stockage d'énergie, de la période de commutation et de la charge. Il existe deux types de modes de fonctionnement:

- ❖ Mode de Conduction Continue (MCC) : Dans ce mode, le courant dans l'inductance ne s'annule pas pendant toute la période de commutation, ce qui signifie qu'il est entièrement transféré et reste continu.
- ❖ Mode de Conduction Discontinue (MCD) : Dans ce mode, l'énergie stockée dans l'inductance L est entièrement transférée à la charge avant la fin de la période de commutation, ce qui entraîne une discontinuité du courant dans l'inductance.

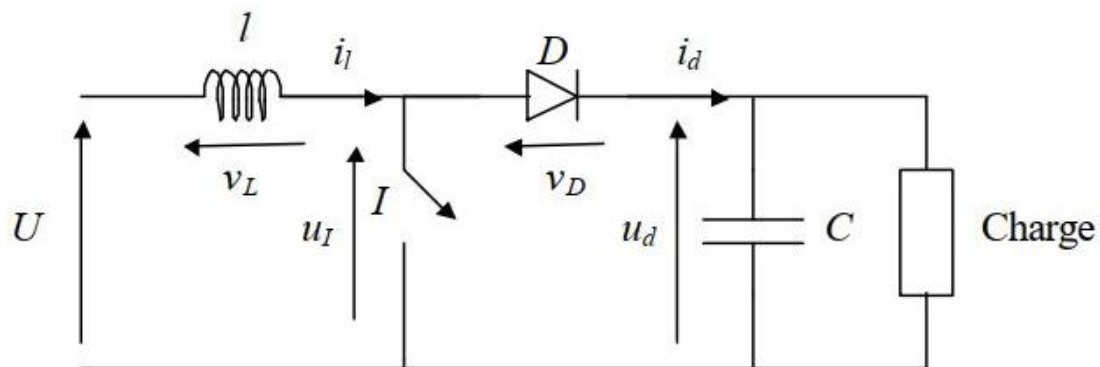


Figure (I.23) : Schéma de principe d'un hacheur parallèle

La différence entre le mode de conduction continue et discontinue est le blocage de la diode D qui n'est plus lié à l'amorçage du transistor, mais à l'annulation du courant dans l'inductance L durant une période de commutation.

Dans ce cas, l'enclenchement du transistor se fait avec l'annulation du courant dans l'inductance ce qui implique également un courant nul dans la diode et dans le transistor.

I.4.6.2. Les différents types d'hacheur

I.4.6.2.1. Hacheur abaisseur « Buck »

Un hacheur abaisseur, également appelé hacheur série, est un dispositif d'alimentation à découpage qui transforme une tension continue en une tension continue de valeur inférieure. Ce type de convertisseur est utilisé dans des applications qui peuvent être classées en deux catégories :

- ✚ Les applications visant à obtenir une tension continue fixe (et parfois régulée) à partir d'une tension continue supérieure.
- ✚ Les applications permettant d'obtenir une tension réglable, toujours inférieure à la tension d'entrée. [37]

Le schéma d'un hacheur abaisseur est illustré à la figure (I.24). Le commutateur H, qui peut être un transistor MOSFET ou un IGBT, bascule rapidement entre deux états :

La tension de la source V_e doit être plus grande que la tension aux bornes de la charge V_s .

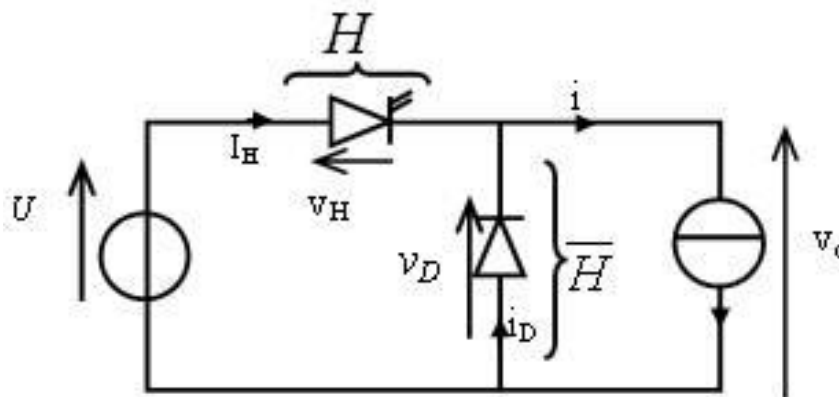


Figure (I.24) : Le schéma d'un hacheur abaisseur

I.4.6.2.2. Hacheur élévateur « Boost »

Un hacheur parallèle est une alimentation à découpage qui transforme une tension continue en une tension continue de valeur plus élevée. On utilise un hacheur élévateur lorsqu'il est nécessaire d'augmenter la tension fournie par une source continue. [38]

Figure (I.25) indique le schéma d'un hacheur élévateur :

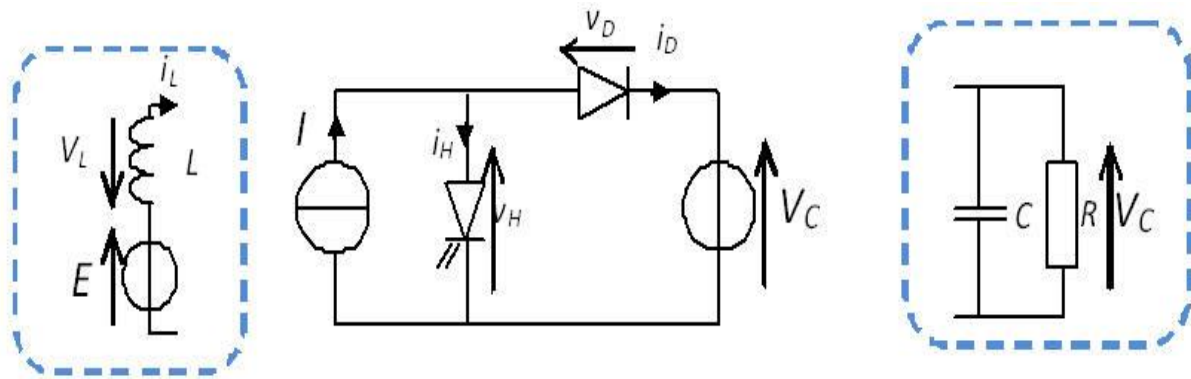


Figure (I.25) : Le schéma d'un hacheur élévateur

I.4.6.2.3. Hacheur abaisseur-élévateur « Buck- Boost »

Un hacheur abaisseur-élévateur est une alimentation à découpage capable de convertir une tension continue en une tension continue de valeur inférieure ou supérieure, mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce type de convertisseur est que son interrupteur n'a pas de borne reliée à la masse, ce qui complique sa commande. [38]

La figure (I.26) indique le schéma d'un hacheur abaisseur élévateur

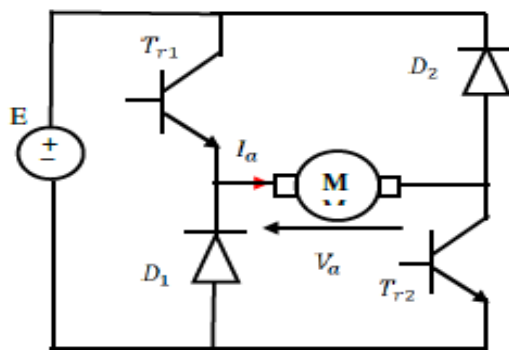


Figure (I.26) : Le schéma d'un hacheur abaisseur élévateur

I.4.7. Les Batteries

Une batterie est un dispositif de stockage d'énergie chimique capable de fournir une quantité limitée d'énergie électrique à la demande, contrairement à l'électricité domestique qui est distribuée en continu via les réseaux des centrales électriques. Elle convertit les produits chimiques qu'elle contient en énergie électrique et peut être utilisée pendant des jours, des semaines, des mois, voire des années, en fonction de son type, de sa taille et de ses applications. [39]

I.4.7.1. Caractéristiques de la batterie

Une batterie se distingue par sa capacité en ampères-heures (Ah), sa tension et son courant de décharge. Par exemple, une batterie au plomb de 12V, 30A, et 0.8Ah peut fournir 12V à 0.8A pendant une heure. Les batteries stabilisent les variations de tension provenant des sources d'alimentation, protégeant ainsi les appareils sensibles et fournissant une réserve d'énergie pour des courants élevés selon les besoins. Lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou à un chargeur, la tension en circuit ouvert d'une batterie indique son état de charge. Une batterie complètement chargée présente une tension variable selon son type. Par exemple, chaque élément d'une batterie au plomb-acide a une tension en circuit ouvert de 2.10V, tandis qu'un élément de batterie au nickel-cadmium affiche 1.25V à 25°C. [40]



Figure (I.27) : Batterie au plomb 12V 65 Ah pour l'énergie éolienne

I.5. Conclusion

L'éclairage public autonome utilisant des turbines éoliennes de type Savonius représente une solution innovante et durable pour répondre aux besoins énergétiques urbains. Ce système tire parti de l'énergie éolienne, une ressource renouvelable et abondante, pour générer de l'électricité de manière fiable et écologique. Les turbines Savonius, avec leur capacité à fonctionner indépendamment de la direction du vent et leur robustesse, sont particulièrement adaptées aux environnements urbains où les conditions de vent peuvent être imprévisibles.

Nous avons présenté dans ce chapitre quelque généralité sur l'éclairage public où on a donné un bref rappel historique sur l'utilisation de l'éclairage public et ses différents types. Nous avons fait l'étude théorique nécessaire des différentes parties constituant l'éclairage public autonome à base d'une éolienne à axe vertical type savonius, leurs principaux composants, les différents types d'éolienne, les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe vertical type savonius. Enfin nous avons étudié les génératrices synchrones à aimant permanent et les convertisseurs statiques utilisés dans le système éolien.

CHAPITRE II

Modélisation des composants d'un Eclairage Public

II.1. Introduction

L'éclairage public autonome représente une solution innovante et durable pour répondre aux besoins croissants en matière d'infrastructure urbaine et de réduction de l'empreinte carbone. La modélisation des composants d'un tel système, basé sur une turbine éolienne de type Savonius, est essentielle pour optimiser son efficacité et garantir une performance fiable. La turbine Savonius, connue pour sa simplicité de conception et sa capacité à capter le vent de toutes les directions, est particulièrement adaptée aux environnements urbains où les vents peuvent être turbulents et changeants.

Cette Chapitre se concentrera sur les aspects fondamentaux de la modélisation des composants clés du système, tels que la turbine éolienne, génératrice synchrone à aimants permanents, les dispositifs de stockage d'énergie, et les convertisseurs statiques utilisés.

II.2. Structure de la chaîne de conversion éolienne

Notre système de conversion d'énergie éolienne comprend une turbine éolienne possédant une caractéristique spécifique ($C_p(\lambda)$), dépendant de ses paramètres de construction. Cette turbine est connectée à une génératrice synchrone à aimants permanents avec un multiplicateur de vitesse pour une attaque indirecte. La génératrice est reliée à un convertisseur de puissance (redresseur à diode). La sortie de ce redresseur est ensuite connectée à un autre convertisseur, un hacheur abaisseur-élevateur, afin d'adapter la tension de sortie du redresseur. Pour stocker l'énergie en courant continu, nous utilisons une batterie, tandis que pour les charges en courant alternatif, la sortie du hacheur abaisseur-élevateur est utilisée, notamment pour l'éclairage public, [41] comme illustré dans Figure (II.1) :

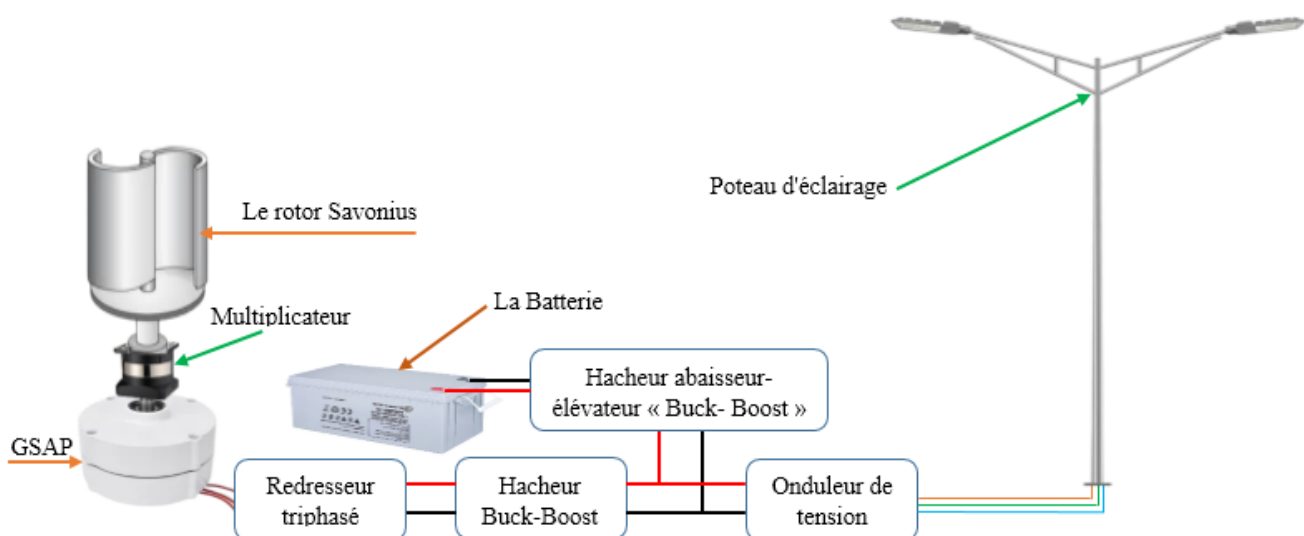


Figure (II.1) : Structure de la chaîne à modéliser.

II.2.1. Modélisation de la turbine éolienne

Une éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Dans ce chapitre, On s'intéresse essentiellement à l'étude et la modélisation de la turbine éolienne. Dans la première partie, une étude aérodynamique de la turbine est présentée, en vue de connaître ces principaux paramètres de fonctionnement, à savoir les coefficients de puissance et de couple, et la limite de BETZ. [42]

La performance d'une éolienne comprend la puissance, le couple et la poussée. D'un point de vue aérodynamique, les VAWT, ont un certain nombre d'aspects qui les distinguent du HAWT. Les pâles d'un VAWT tournent sur une surface de rotation dont l'axe est perpendiculaire à la direction du vent. [43]

Une voile éolienne convertit l'énergie du flux d'air en mouvement en puissance mécanique, caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique. [44]

II.2.1.1. Etude théorique d'une turbine éolienne

II.2.1.1.1. Energie fournie par le vent

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un aérogénérateur. Comme nous le savons, l'énergie cinétique de l'air est donnée par : [42]

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (\text{II.1})$$

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , Figure (II.2) s'écrit :

$$dE_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot dx \cdot V^2 \quad (\text{II.2})$$

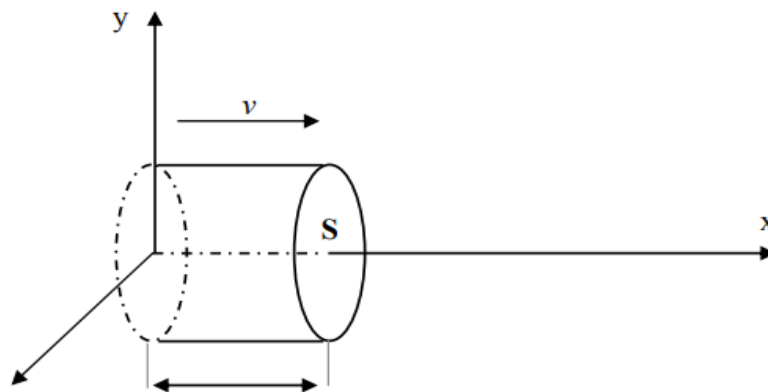


Figure (II.2) : Colonne d'air animée d'une vitesse v

La puissance P_v extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps. En supposant $dx=vdt$, on déduit l'expression de P_v :

$$P_v = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 V^3 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

ρ = Densité [kg/m^3].

S = Surface balayée [m^2].

V = Vitesse du vent entrant [m/s].

E_c : Energie cinétique en joules.

II.2.1.1.2. Energie théoriquement récupérable (La Puissance absorbé par l'aérogénérateur)

Loi de Betz :

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de Betz pour la première fois [45] [46]. Considérons le système de la figure (II-2) qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. V_1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval Figure (II.3). [42]

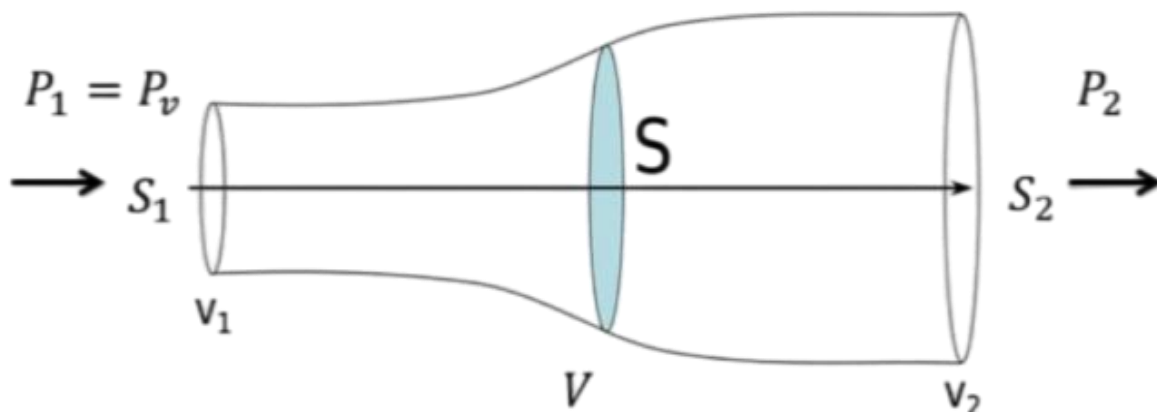


Figure (II.3) : le tube de courant.

II.2.1.1.3. Energie théoriquement récupérable (La Puissance absorbé par l'aérogénérateur)

L'expression du débit massique moyen est donnée par l'équation :

$$Q_m = \rho S V \quad (\text{II.4})$$

Et on a :

$$S_1 V_1 = S_2 V_2 = S V \quad (\text{II.5})$$

Et d'autre part on a la masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne. [46] [47]

$$m = \rho \cdot \text{volum} = \rho S \cdot \text{longeur} = \rho S V \Delta t \quad (\text{II.6})$$

Et on a :

$$V = \frac{(V_2 + V_1)}{2} \quad (\text{II.7})$$

Donc la formule de la masse est :

$$m = \frac{1}{2} \rho S (V_2 + V_1) \quad (\text{II.8})$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval [47].

$$P_{\text{aéro}} = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.9})$$

En remplaçant m par son expression dans (9), la puissance devient :

$$P_{\text{aéro}} = \frac{1}{2} \rho S (V_2 + V_1) (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.10})$$

La puissance totale théoriquement récupérable sur la surface S est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant $V_2=0$ dans l'expression (II.10) :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (\text{II.11})$$

La formule de la puissance théoriquement récupérable par l'éolienne :

Est obtenue à partir de la vitesse de rotation et du couple généré en raison des moments à chaque section de la pale de l'éolienne. [48]

$$P_{\text{aéro}} = \text{vitesse de rotation [rad/s]} \times \text{Couple [N. m]} \quad (\text{II.12})$$

$$P_{\text{aéro}} = \Omega_t C_t \quad (\text{II.13})$$

II.2.1.1.4. La vitesse spécifique ou Ration de vitesse

La vitesse spécifique d'une turbine peut être définie comme la vitesse d'une turbine idéale, géométriquement similaire, qui produirait une unité de puissance pour une unité de hauteur de chute. La vitesse spécifique d'une turbine est donnée par les fabricants (parmi d'autres caractéristiques), et se réfère toujours au point d'efficacité maximale.

Ceci permet de réaliser des calculs précis des performances de la turbine pour une plage de hauteurs de chute de débits. [43]

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (\text{II.14})$$

Telle que :

Ω_t : La vitesse de rotation de rotor (rad/s).

R_t : Le rayon de rotor (m).

V : la vitesse nominale du vent (m/s) et $R_t \Omega_t$ est la vitesse linéaire périphérique de la pôle (m/s).

II.2.1.1.5. Coefficient de puissance de l'éolienne :

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement Aérodynamique de la turbine éolienne

On définit le rapport entre les deux puissances Comme suite :

$$C_p = \frac{P_{aéro}}{P_v} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{II.15})$$

La valeur maximale de C_p qui correspond à la limite de Betz :

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (\text{II.16})$$

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de BETZ ; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique. [45] [46]

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p_{max}} \quad (\text{II.17})$$

II.2.1.1.6. Coefficient de Le couple

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle [49]. En combinant les équations (II.11), (II.14), et (II.15), La Puissance absorbé par l'aérogénérateur $P_{aéro}$ disponible sur l'arbre peut s'exprimer par :

$$P_{aéro} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (\text{II.19})$$

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$C_t = \frac{P_{aéro}}{\Omega_t} = \frac{R_t P_{aéro}}{\lambda V} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} C_p \lambda \rho \pi R_t^3 V_1^2 \quad (\text{II.20})$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_t}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t V_1^2} \quad (\text{II.21})$$

C_t : Couple de la turbine éolienne.

II.2.1.1.7. Production d'énergie mécanique

En tenant compte du rapport du multiplicateur de vitesse G , et à partir des équations (II.18) et (II.19), l'expression de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur peut s'exprimer par:

$$P_{méc} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_t R}{G V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II.22})$$

II.2.1.1.8. Rotor Savonius [43]

Comme nous en avons parlé précédemment dans le premier chapitre, elle s'agit comporte essentiellement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre figure (II.4). Le modèle original était construit avec un rapport :

$$\frac{e}{d} = \frac{1}{3} \quad (\text{II.23})$$

e : Désignant l'écartement des bords intérieurs.

d : Le diamètre des deux demi-cylindres constituant le rotor.

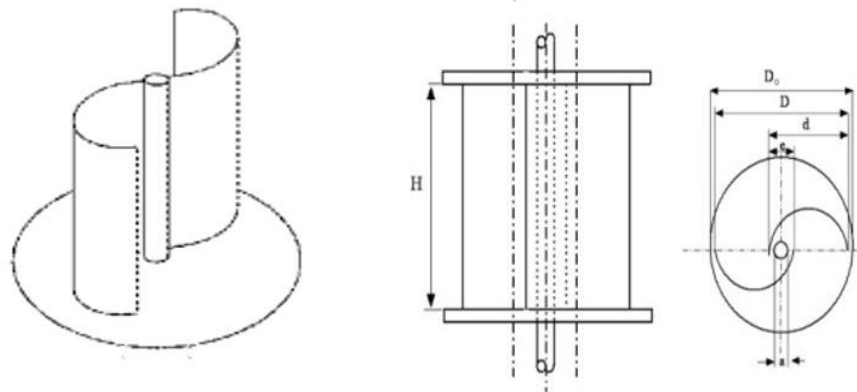


Figure (II.4) : Eoliennes à axe vertical modèle Savonius.

Outre le fait que les forces exercées par le vent sur les aubages diffèrent suivant qu'il s'agisse de la partie convexe ou de la partie concave, le rotor est soumis à un couple aérodynamique supplémentaire du aux deux déviations successives à 180° des filets par les aubages et pour diverses valeurs du rapport $\frac{e}{d}$ en a plusieurs rotors (exemple rotor I, II, III, IV, V ...). Cela dépend de l'évolution de puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent figure (II.5).

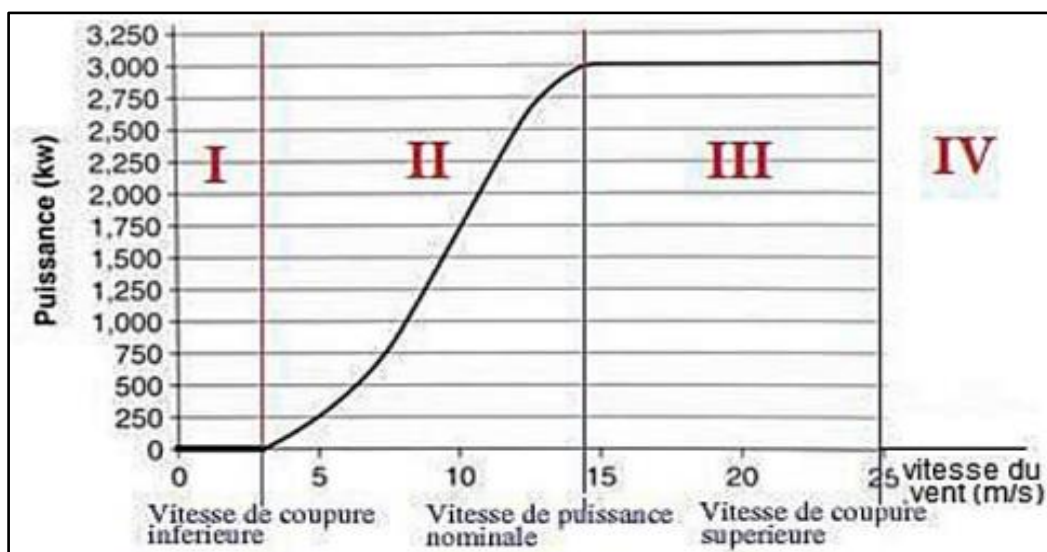


Figure (II.5) : Courbe de puissance d'une éolienne de 3.0 MW.

En pratique, une éolienne produit quatre fois plus d'énergie si la pôle est deux fois plus grande et huit fois plus d'énergie si la vitesse du vent double. La densité de l'air entre également en jeu : une éolienne produit 3% de plus d'électricité si, pour une même vitesse de vent, l'air est plus froid de 10°C .

La puissance éolienne dépend principalement de l'intensité du vent et de ses variations. L'énergie éolienne est donc une énergie intermittente et aléatoire.

- ✚ La zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas).
- ✚ La zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent.
- ✚ La zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n .
- ✚ La zone IV, la turbine est calée de manière aérodynamique (appelée «mise en drapeau»). Ceci est fait en ajustant l'angle de calage pour rendre C_p proche de zéro, puis des freins mécaniques sont appliqués pour arrêter la rotation des pâles.

II.2.1.1.9. Caractéristique

S'étant la surface du maître-couple balayé :

$$S = h(2d - e) = Hd \quad (\text{II.24})$$

le coefficient de puissance d'une turbine à axe vertical utilisée donné par la formule : [47]

$$C_p = -0.2121\lambda^3 + 0.0856\lambda^2 + 0.2539\lambda \quad (\text{II.25})$$

Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale λ_{opt} et le coefficient de puissance maximal [42]

C_{opt} suivantes : $\lambda_{opt} = 0.78$ et $C_{opt} = 0.15$

II.2.1.1.10. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes : [49] [50] [51]

- ✓ La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pâles, ce qui permet de considérer l'ensemble des pâles comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- ✓ Le coefficient de frottement des pâles par rapport à l'air (δ_b) est très faible et peut être ignoré.
- ✓ Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté générateur. On peut ainsi aboutir à un modèle mécanique plus simple Figure (II.6) : [50]

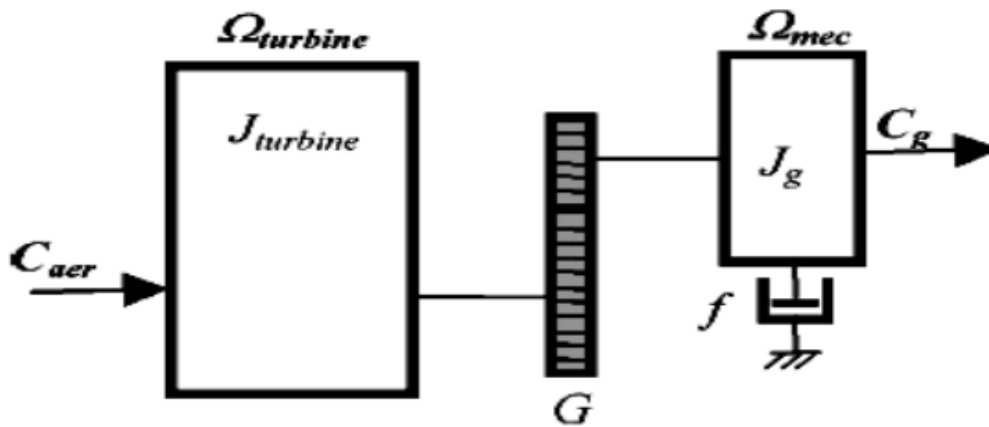


Figure (II.6) : Modèle simplifié de la turbine éolienne

Le système étudié est composé d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

Modèle de la turbine Les variables d'entrée et sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

1. La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
2. Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
3. La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage. Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrée précédentes.

II.2.1.1.11. Modèle du multiplicateur

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur selon les formules mathématiques suivantes :

$$G = \frac{C_{aéro}}{C_g} \quad (\text{II.26})$$

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{tur}} \quad (\text{II.27})$$

II.2.1.1.12. Modèle de l'arbre mécanique

L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice et de la turbine et du multiplicateur donné par la relation suivante :

$$J_{total} = J_g + G^2 J_{tur} \quad (\text{II.28})$$

Et la somme des couples donné comme suite :

$$C_{total} = J_{total} \frac{d\Omega_{méc}}{dt} \Rightarrow C_{total} = C_g - C_{em} - C_f \tag{II.29}$$

Avec :

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements

$$C_f = f\Omega_{méc} \tag{II.30}$$

f : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc : le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} et la sortie est $\Omega_{méc}$.

Donc la formule de Modèle d'un l'arbre mécanique est :

$$C_g - C_{em} - f\Omega_{méc} = J_{total} S\Omega_{méc} \tag{II.31}$$

Avec S : Laplace

L'organigramme de simulation de la turbine peut se représenter comme suit Figure (II.7) :

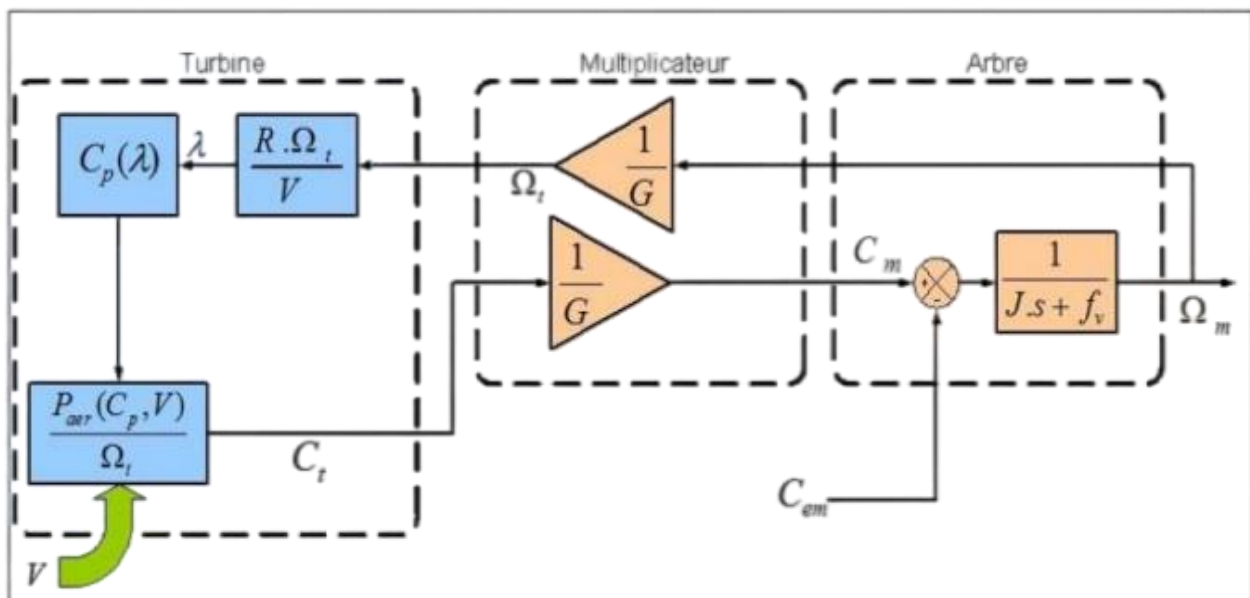


Figure (II.7) : Organigramme de simulation de la turbine éolienne

II.2.2. Modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent

Comme toutes les machines triphasées, cette machine comporte un stator bobiné. Cependant, dans ce cas précis (MSAP), le rotor est remplacé par des aimants, ce qui présente l'avantage d'éliminer le système de balais et bagues, de réduire les pertes dans le rotor, et de supprimer la nécessité d'une source d'alimentation pour fournir le courant d'excitation. [52]

La Figure (II.8) représente le schéma de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

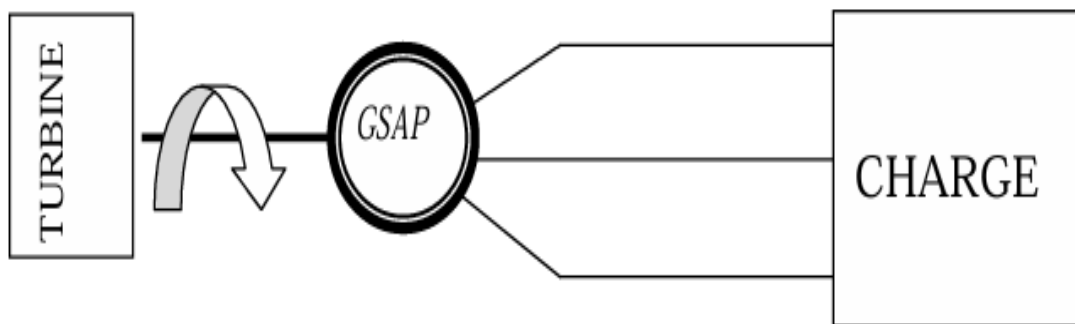


Figure (II.8) : Schéma représentatif de la GSAP.

Le modèle mathématique de la génératrice synchrone à aimants permanents requiert l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices pour faciliter son étude et son exploitation. Ces simplifications se basent sur les propriétés des machines à courant alternatif [53] :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique .
- La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator .
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau .
- L'effet d'encoche est négligeable .
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

II.2.2.1. Equations électriques

Dans la mode génératrice On inverse les sens des courants dans le système d'axes triphasés (réel) et les équations électriques des génératrices dans un repère fixe lié au stator sont décrites : [42] [54]

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = -[R_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

$[U_a \ U_b \ U_c]^t$: Vecteur tension statorique.

$[i_a \ i_b \ i_c]^t$: Vecteur courants statoriques.

$[\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]^t$: Vecteur flux statoriques.

$[R_s]$: Matrice de la résistance équivalente d'un enroulement statoriques.

Avec :

$$-[R_s] = - \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

Les enroulements statoriques de la machine synchrone, connectés en étoile avec un neutre isolé, garantissent que la somme instantanée des courants statoriques est nulle, éliminant ainsi tout courant homopolaire. En conséquence, toute composante homopolaire de tension ou de flux n'affecte pas le couple. Le fonctionnement de la machine est donc décrit par deux variables indépendantes. [30]

II.2.2.2. Equations magnétiques

$$[\psi] = [L_s][i] + [\psi_f] \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

$$[\psi] = [\psi_{af} \ \psi_{bf} \ \psi_{cf}]^t \quad (\text{II.36})$$

$[L_s]$: Matrice d'inductance propre d'une phase statorique.

M_s : L'inductance mutuelle entre phases du stator.

$[\psi_f]$: Vecteur flux des aimants.

II.2.2.3. Equation mécanique

L'équation mécanique est présentée ainsi :

$$C_m - C_{em} - F\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.37})$$

Avec :

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

C_{em} : Couple électromagnétique.

$\Omega = \frac{\omega_r}{p}$: Vitesse mécanique de rotation de la machine.

F : Coefficient de frottement visqueux.

$F\Omega$: Le couple de frottement.

J : Moment d'inertie.

p : Nombre de paires de pôles.

ω_r : Vitesse électrique du rotor.

II.2.2.4. Transformation de PARK

Pour simplifier le modèle dynamique de la machine, on effectue un changement de repère. Cette transformation mathématique convertit les trois bobines statoriques fixes, déphasées de $2\pi/3$, en deux bobines fictives équivalentes, déphasées de $\pi/2$, et situées sur le rotor Figure (II.9). [42]

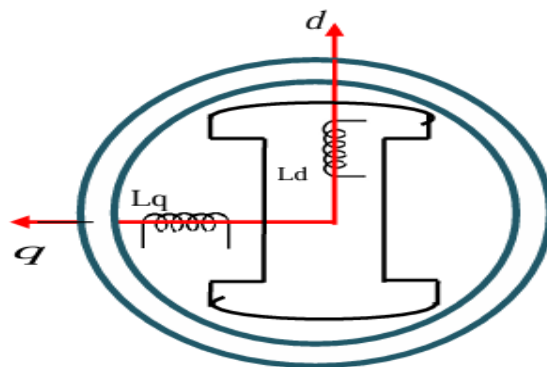


Figure (II.9) : Représentation de la MSAP dans le repère de Park (d, q)

Les deux bobines d et q, en rotation avec le rotor, créent un effet équivalent à celui des trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q) facilitent la transition du repère naturel au repère de Park, permettant ainsi de simplifier le modèle de la machine Figure (II.10). [55]

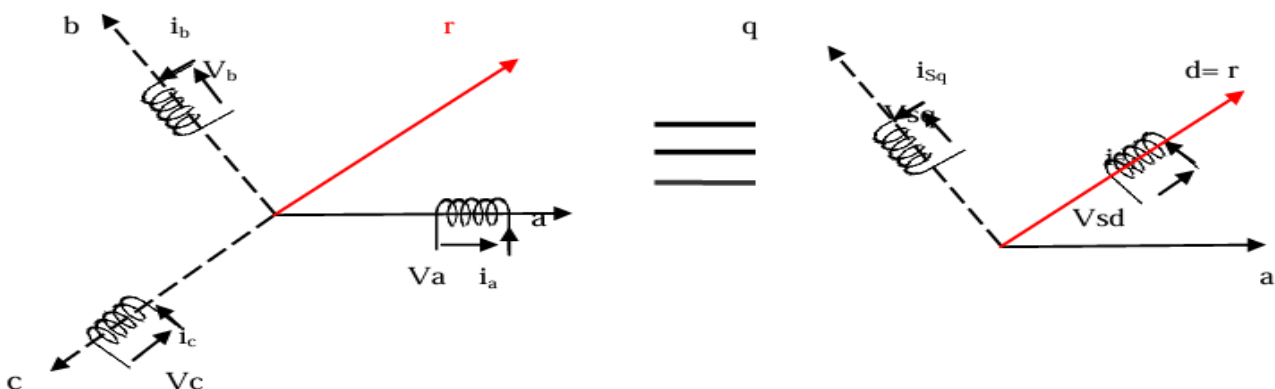


Figure (II.10) : Transition du repère naturel du stator au repère (d, q) de Park

Grâce à la transformation de Park, on convertit les grandeurs réelles (U_a, U_b, U_c) et (i_a, i_b, i_c) a leurs composantes (U_0, U_b, U_c) et (i_0, i_b, i_c) donc L'équation qui traduit de Transformation de PARK est donnée par :

$$[X_{dq0}] = [p(\theta)][X_{abc}] \equiv \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [p(\theta)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

Avec :

$$[p(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Et La transformation inverse de Park et donne par :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [p(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Avec :

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

Où $\theta = \int \omega_r(t) dt$

Avec aussi :

$X_a X_b X_c$: Les valeurs instantanées des grandeurs triphasées

$X_d X_q$: Les valeurs instantanées des grandeurs biphasées

X_0 : La composante homopolaire

II.2.2.5. Equations des tensions et des flux dans référentiel de PARK

Comme nous en avons parlé précédemment en utilisant la convention génératrice ; on inverse le sens des courant i_d et i_q dans les repères de Park Figure (II.10), et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme : [56]

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d + \omega_r L_q i_q \\ U_q = -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \\ \psi_d = -(L_d i_d) + \psi_f \\ \psi_q = -(L_q i_q) \end{array} \right. \quad (\text{II.42})$$

II.2.2.6. Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor : [49]

$$C_{em} = \frac{dw_e}{d\theta_{geo}} = p \frac{dw_e}{d\theta_e} \quad (\text{II.43})$$

Où :

w_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

p : nombre de pair de pôle.

La puissance absorbée par la machine est donnée par :

$$P(t) = U_a i_a + U_b i_b + U_c i_c \quad (\text{II.44})$$

Dans le repère (d, q), cette puissance s'écrit :

$$P(t) = \frac{3}{2} (U_d i_d + U_q i_q) \quad (\text{II.45})$$

En remplaçant les tensions U_d et U_q par leur expression, la puissance électrique absorbée par la machine dans le référentiel de PARK devient :

$$P(t) = \frac{3}{2} [-R_s (i_d^2 - i_q^2) - (i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt}) + \frac{d\theta}{dt} (\psi_d i_q - \psi_q i_d)] \quad (\text{II.46})$$

Cette puissance est composée de :

Puissance perdue par effet Joule : $\frac{3}{2} [-R_s (i_d^2 - i_q^2)]$

La variation d'énergie magnétique : $\frac{3}{2} [i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt}]$

Puissance électromagnétique : $\frac{3}{2} \left[\frac{d\theta}{dt} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \right]$

Le couple électromagnétique est exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (\text{II.47})$$

Après affectation des opérations nécessaires, on peut écrire : [48]

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_q - L_d) i_d i_q + i_q \psi_f] \quad (\text{II.48})$$

II.2.2.7. La GSAP alimentée une charge

La génératrice alimente dans ce cas une charge électrique (R_{ch} , L_{ch}). Pour déterminer les tensions et courants résultant de l'application de cette charge sur la génératrice, on utilise d'une part, les équations fournies par :

$$\begin{cases} U_d = -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d + \omega_r L_q i_q \\ U_q = -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

D'autre part, l'application des tensions U_d et U_q sur la charge donne :

$$\begin{cases} U_d = R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_{ch} i_q \\ U_q = R_{ch} i_q + L_{ch} \frac{d}{dt} i_q + \omega_r L_{ch} i_d \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

En remplaçant les expressions de U_d et U_q dans (II.49), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch}) i_d - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_d - \omega_r (L_q + L_{ch}) i_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch}) i_q - (L_q + L_{ch}) \frac{d}{dt} i_q - \omega_r (L_d + L_{ch}) i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

Ou bien :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{(L_d + L_{ch})} [-(R_s + R_{ch}) i_d + \omega_r (L_q + L_{ch}) i_q] \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{(L_q + L_{ch})} [-(R_s + R_{ch}) i_q - \omega_r (L_d + L_{ch}) i_d + \omega_r \psi_f] \end{cases} \quad (\text{II.52})$$

On cherche à obtenir un système d'équation sous forme d'équation d'état :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{II.53})$$

Avec :

$$[X] = [i_d \quad i_q], \quad [U] = [0 \quad \psi_f]$$

Les équations (II.52) peuvent s'écrire sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & \omega_r \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\omega_r \frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & -\frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_r \psi_f}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.54})$$

On peut écrire les matrices [A] et [B] sous la forme :

$$[A] = [A_1] + \omega_r [A_2] \quad (\text{II.55})$$

Avec :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\frac{L_d+L_{ch}}{L_q+L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.56})$$

$$[B][U] = \omega_r \frac{1}{L_q+L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.57})$$

II.2.3. Modélisation de redresseur triphasé à diode

On considère un redresseur alimenté par une source de tension, et débitant sur une batterie supposée idéale. Dans un premier temps, on considère que l'impédance de la source est nulle.

Dans ce cas, les courants de ligne (i_a , i_b , i_c). prennent à tour de rôle la valeur (et forme) du courant continu I_{dc} . Chaque diode assure la conduction du courant pendant 1/3 de la période.

Avec l'hypothèse d'une impédance de source nulle, le courant s'établit instantanément à sa valeur I_{dc} lorsqu'une diode devient conductrice Figure (II.11). [57]

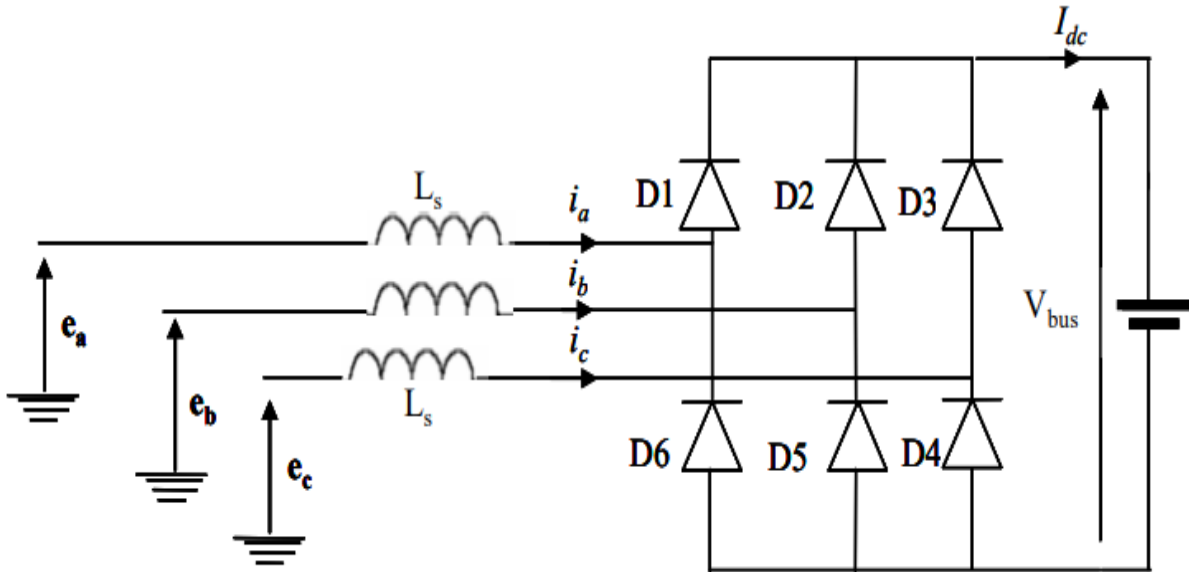


Figure (II.11) : Schéma d'un pont de diodes

A partir du schéma (Figure (II.11)) Lorsque les Diodes en conduction D_1 et D_5 , et en appliquant la loi des mailles et des nœuds, nous pouvons écrire :

$$V_a - L_s \frac{di_a}{dt} - V_{bus} + L_s \frac{di_b}{dt} - V_b = 0 \tag{II.58}$$

A d'autre part on a :

$$I_{dc} = I_a = -I_b \Rightarrow I_b = -I_a \tag{II.59}$$

On remplace le la formule de I_b dans l'équation (II.58) on obtient :

$$V_a - L_s \frac{di_a}{dt} - V_{bus} - L_s \frac{di_a}{dt} - V_b = 0 \tag{II.60}$$

Donc :

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{2L_s} (V_a - V_b - V_{bus}) \tag{II.61}$$

Lorsque les Diodes D_2 et D_4 en conduction nous pouvons écrire :

$$V_b - L_s \frac{di_b}{dt} - V_{bus} + L_s \frac{di_c}{dt} - V_c = 0 \tag{II.62}$$

A d'autre part on a :

$$I_b = I_{dc} = -I_c \Rightarrow I_c = -I_b \quad (\text{II.63})$$

On remplace le la formule de I_c dans l'équation (II.62) on obtient :

$$V_b - \frac{dI_b}{dt} - V_{bus} - L_s \frac{dI_b}{dt} - V_c = 0 \quad (\text{II.64})$$

Donc :

$$\frac{dI_b}{dt} = \frac{1}{2L_s} (V_b - V_c - V_{bus}) \quad (\text{II.65})$$

Lorsque les Diodes D_3 et D_6 en conduction nous pouvons écrire :

$$V_c - L_s \frac{dI_c}{dt} - V_{bus} + L_s \frac{dI_a}{dt} - V_a = 0 \quad (\text{II.66})$$

A d'autre part on a :

$$I_c = I_{dc} = -I_a \Rightarrow I_a = -I_c \quad (\text{II.67})$$

On remplace le la formule de I_a dans l'équation (II.66) on obtient :

$$V_c - \frac{dI_c}{dt} - V_{bus} - L_s \frac{dI_c}{dt} - V_a = 0 \quad (\text{II.68})$$

Donc :

$$\frac{dI_c}{dt} = \frac{1}{2L_s} (V_c - V_a - V_{bus}) \quad (\text{II.69})$$

Donc le modèle final de redresseur est :

$$\begin{cases} \frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{2L_s} (V_a - V_b - V_{bus}) \\ \frac{dI_b}{dt} = \frac{1}{2L_s} (V_b - V_c - V_{bus}) \\ \frac{dI_c}{dt} = \frac{1}{2L_s} (V_c - V_a - V_{bus}) \end{cases} \quad (\text{II.70})$$

II.2.4. Modélisation d'Onduleur triphasé

La figure (II.12) illustre le schéma de l'onduleur. Celui-ci est composé de trois branches de commutation à transistors. Chaque branche contient deux cellules, chacune intégrant une diode et un transistor. Tous les composants sont considérés comme des interrupteurs idéaux. [58]

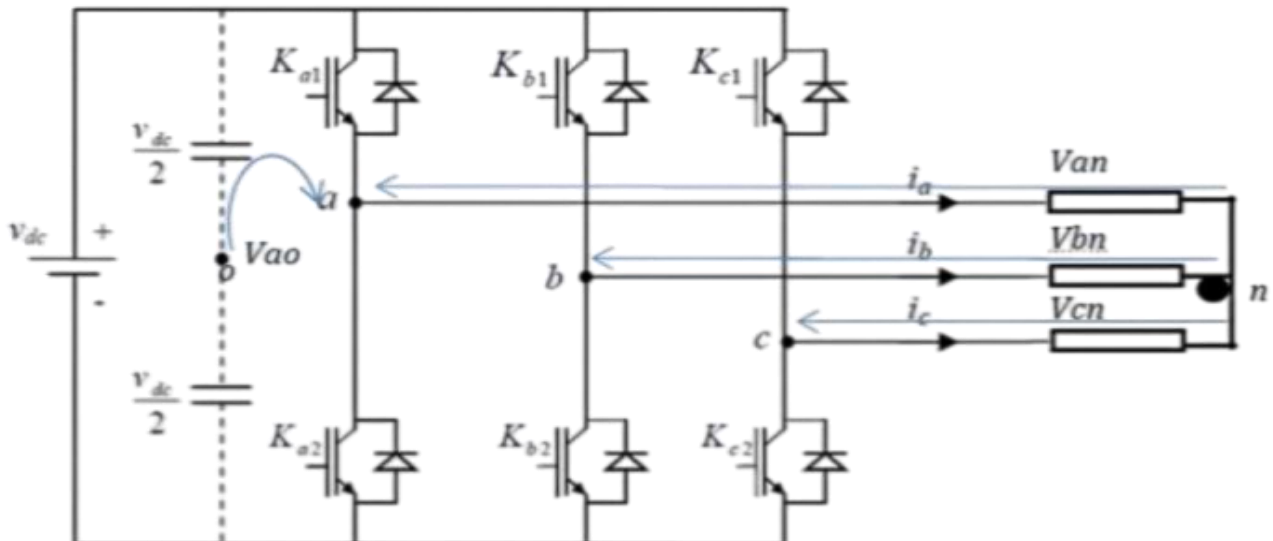


Figure (II.12) : Représentation simplifiée de l'onduleur.

II.2.4.1. Hypothèses simplification

La modélisation de l'onduleur de tension s'effectue on supposant que : [59] [60]

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge équilibrée et couplée en étoile avec neutre isolé.

On note K_{a1} , K_{b1} , K_{c1} les interrupteurs du haut, et K_{a2} , K_{b2} , K_{c2} les interrupteurs du bas. On suppose que les commandes des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires [61]. L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S (a , b , c) :

- Si $S_a = 1$, alors K_{a1} est fermée et K_{a2} est ouvert.
- Si $S_a = 0$, alors K_{a1} est ouvert et K_{a2} est fermée.

Donc on a :

$$V_{ao} = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{2}, S_a = 1 \\ -\frac{V_{dc}}{2}, S_a = 0 \end{cases} \Rightarrow V_{ao} = K_a \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.71})$$

$$V_{bo} = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{2}, S_b = 1 \\ -\frac{V_{dc}}{2}, S_b = 0 \end{cases} \Rightarrow V_{bo} = K_b \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.72})$$

$$V_{co} = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{2}, S_c = 1 \\ -\frac{V_{dc}}{2}, S_c = 0 \end{cases} \Rightarrow V_{co} = K_c \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.73})$$

Dans une charge triphasée équilibré la somme des courants i_a, i_b, i_c doit être nulle. Même chose pour les tensions des phases. Il existe donc la condition :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.74})$$

On a la somme les tensions de branche avec les tensions de charge :

$$\begin{cases} V_{oa} + V_{an} = V_{on} \\ V_{ob} + V_{bn} = V_{on} \\ V_{oc} + V_{cn} = V_{on} \end{cases} \quad (\text{II.75})$$

On va chercher les tensions de charge :

$$\begin{cases} V_{an} = V_{on} + V_{ao} \\ V_{bn} = V_{on} + V_{bo} \\ V_{cn} = V_{on} + V_{co} \end{cases} \quad (\text{II.76})$$

Donc on obtient :

$$V_{on} = -\frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.77})$$

En remplaçant la formule (II.77) dans (II.76), on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = -\frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) + V_{ao} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) + V_{bo} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) + V_{co} \end{cases} \quad (\text{II.78})$$

On peut simplifier la formule (II.82) :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (\text{II.79})$$

II.2.5. Modélisation Buck-Boost (abaisseur-élevateur)

L'hacheur buck-boost est employé dans les systèmes de stockage utilisant des batteries et des supercondensateurs. Il agit comme un adaptateur, permettant la charge et la décharge grâce à sa réversibilité en courant. Il élève la tension pour la décharge et l'abaisse pour la charge. La nature non linéaire de ce convertisseur nécessite une linéarisation autour d'un point de fonctionnement pour modéliser le système, car la fréquence de découpage reste significativement élevée par rapport à la dynamique des composants physiques du convertisseur. [62]

La description du fonctionnement de ce type de convertisseur à l'aide d'équations mathématiques doit tenir compte de l'état de l'interrupteur K illustré dans Figure (II.13). Quand l'interrupteur est en état passant, alors $T_{on} = \alpha \cdot T$. Comme résultat, l'énergie stockée dans l'inductance augmente. Quand K est bloqué, alors $T_{off} = (1-\alpha) \cdot T$ et l'énergie accumulée dans l'inductance se transfère vers la capacité et la charge Figure (II.14) : [63]

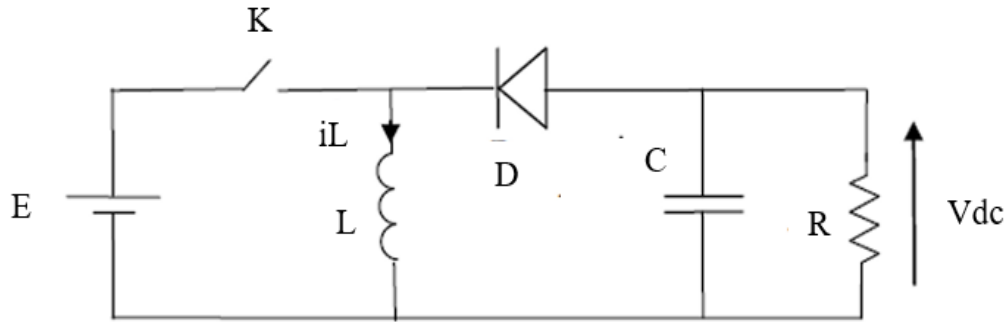


Figure (II.13) : Schémas du convertisseur buck –boost

On a :

$$L \frac{di_L}{dt} = uE + V_{dc} (1 - u) \tag{II.80}$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L(1 - u) - \frac{V_{dc}}{R} \tag{II.81}$$

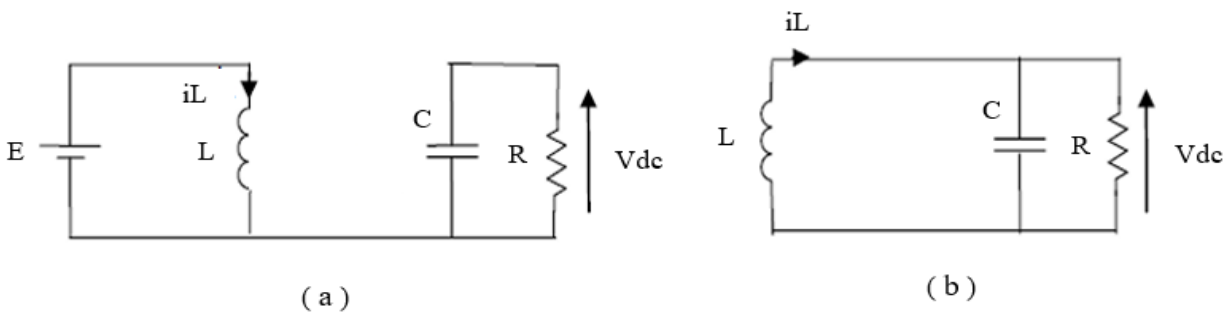


Figure (II.14) : circuit équivalent du convertisseur buck-boost : (a) K ouvert (b) K fermé

La procédure de dérivation des équations dynamiques en régime de conduction continue. En régime interrupteur passant, K est égale à 1, la diode est bloquée et les équations dans ce cas sont : [64]

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{V_{dc}}{R} \tag{II.82}$$

$$L \frac{di_L}{dt} = uE \tag{II.83}$$

Lorsque l'interrupteur est bloqué, K est égal à 0 et la diode conduit. Les équations sont :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{dc} \quad (\text{II.84})$$

$$C \frac{V_{dc}}{dt} = -i_L - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{II.85})$$

L'équation générale qui régit le fonctionnement du convertisseur Buck-Boost est :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1-u}{L} \\ \frac{1-U}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.86})$$

II.2.6. Modélisation de la batterie

Le circuit équivalent de la batterie est formé par une source de tension V_{OC} en série avec une résistance R_{bat} , et une capacité équivalente aux bornes du bloc batterie C_{BAT} . Le courant de charge I_{load} désigne toutes les charges continues raccordées aux bornes de la batterie. [65]

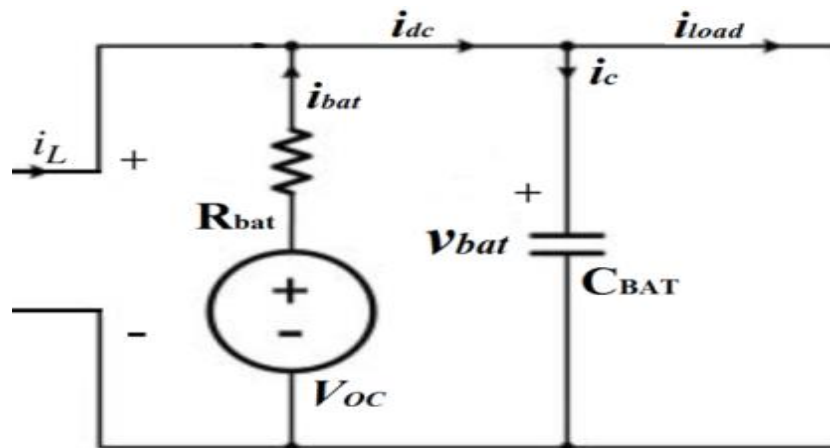


Figure (II.15) : Circuit équivalent de la batterie

La batterie peut être considérée comme une source de tension variable, la valeur en régime permanent étant affectée par l'état de charge (SOC) et le taux de charge ou de décharge. Un modèle simple de la batterie peut être représenté par un circuit équivalent de Thévenin, qui est formé par une source de tension en série avec une résistance. [65]

$$v_{bat} = V_{OC} - R_{bat} \cdot i_{bat} \quad (II.87)$$

Dans le circuit équivalent, le courant d'inductance du convertisseur abaisseur est noté : i_L .

La dynamique du circuit est donnée par les équations :

$$i_L + i_{bat} = C_{BAT} \frac{dv_{bat}}{dt} + i_{load} \quad (II.88)$$

$$R_{bat} C_{BAT} \frac{di_{bat}}{dt} + i_{bat} = i_{load} - i_L \quad (II.89)$$

Avec l'hypothèse d'une tension VOC constante en régime permanent, la dynamique de la liaison batterie peut être représentée par la fonction de transfert :

$$i_{bat}(s) = \frac{i_{load} - i_L}{R_{bat} C_{BAT} s + 1} \quad (II.90)$$

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élaboré la modélisation mathématique de l'ensemble des composants du système, à savoir : la turbine éolienne, le générateur à aimants permanents, les convertisseurs statiques et les batteries. Cette modélisation a été réalisée après avoir présenté les hypothèses simplificatrices adoptées par les chercheurs. Nous avons également fourni un aperçu des principales caractéristiques des turbines éoliennes suite à une étude aérodynamique. La modélisation de ce système est cruciale pour l'application du modèle de simulation proposé dans le troisième chapitre.

CHAPITRE III

Simulation et interprétation des résultats

III.1. Introduction

La simulation des systèmes éoliens est une étape cruciale pour évaluer leur performance et prédire leur comportement dans différentes conditions.

Dans ce chapitre, nous avons simulé le système de l'évaluation d'un système Éclairage public autonome, nous avons choisi le logiciel MATLAB/Simulink qui est largement utilisé dans le domaine de l'énergie renouvelable pour modéliser ces systèmes.

Après la simulation, les résultats peuvent être interprétés pour évaluer les performances du système. Les paramètres clés à examiner incluent la puissance de sortie, la Vitesse de rotation, la production d'électricité prévue, les variations de tension et de courant.

III.2. Simulation du modèle de la génératrice synchrone à aimant permanent

La figure (III.1), représente le schéma bloc de simulation de la GSAP en charge sous Matlab/Simulink

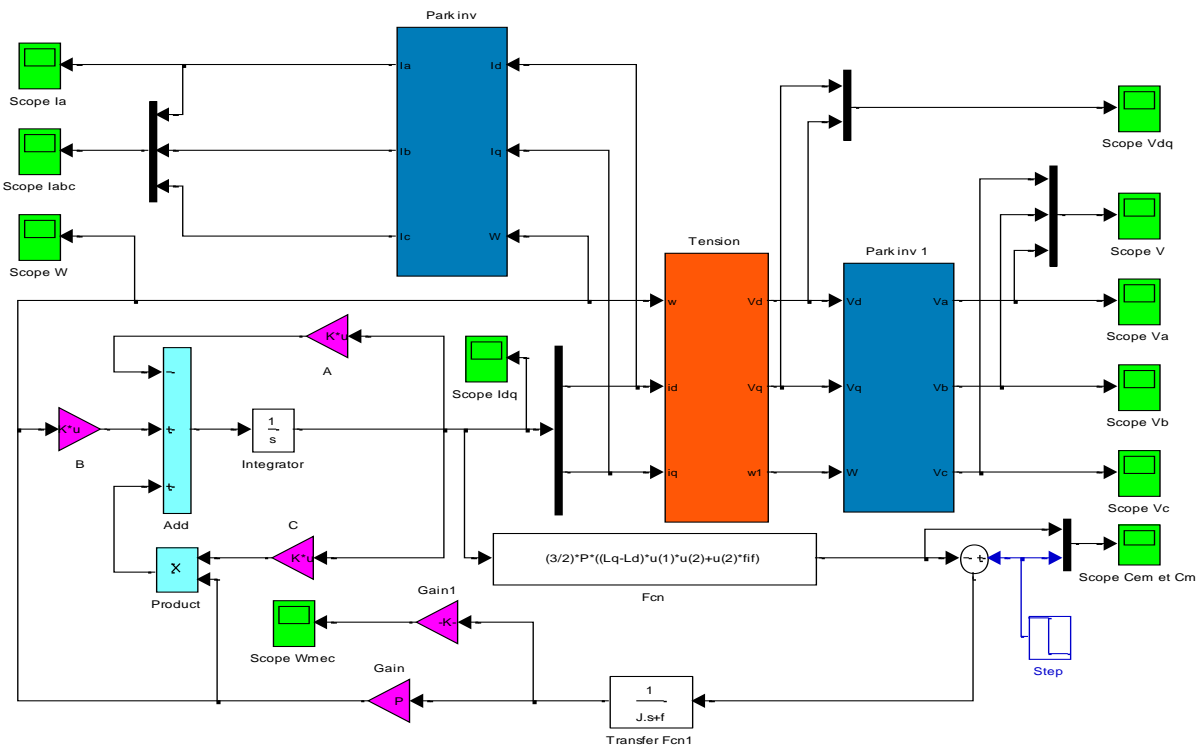
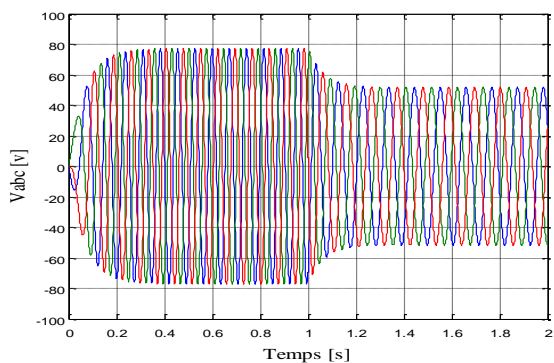
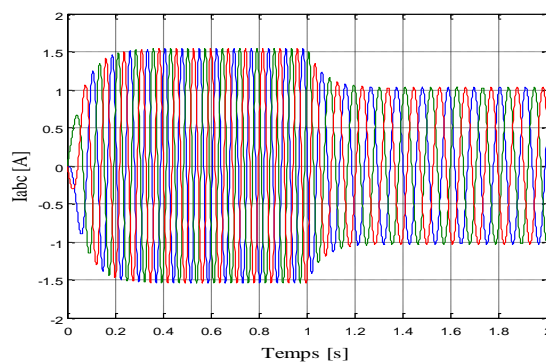


Figure (III.1) : Schéma Bloc de simulation de la GSAP en charge

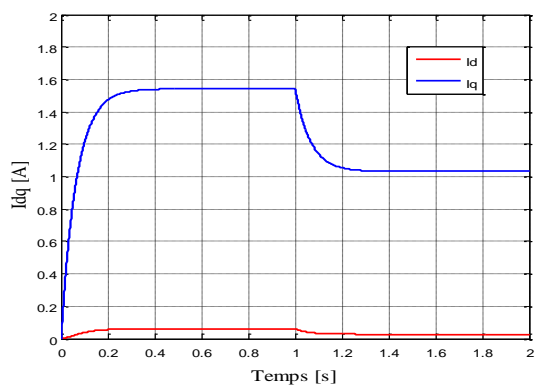
III.2.1. Les résultats de la simulation obtenus



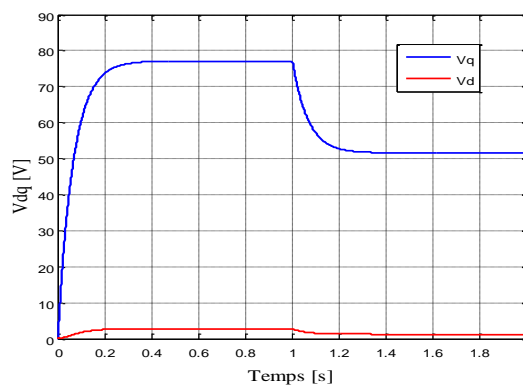
a) Tensions statoriques Vabc



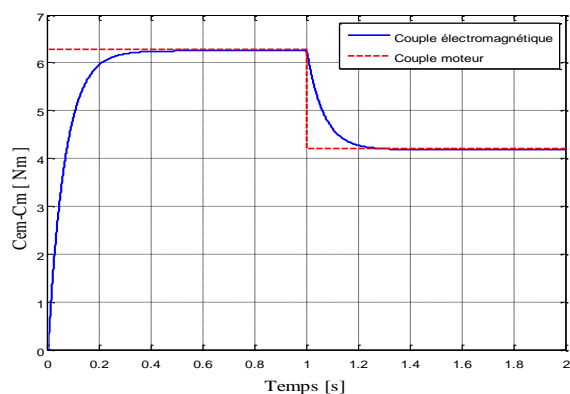
b) Courants statoriques Iabc



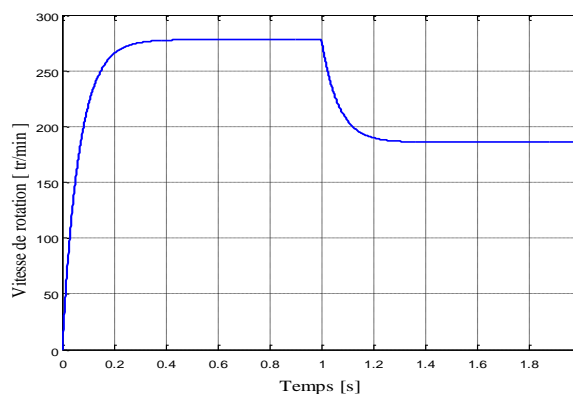
c) Composantes Id ; Iq



d) Composantes Vd ; Vq



e) Couples électromagnétique et moteur



f) Vitesse de rotation

Figure (III.2) : Résultats de Simulation de la GSAP en charge

III.2.3. Interprétation des résultats

Pour évaluer l'impact de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués (Fig. III.2). On observe que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui entraîne de faibles tensions et courants comme illustré dans les figures (III.2a) et (III.2b). Cela s'explique par l'insuffisance du couple moteur appliqué. En diminuant le couple moteur de 6.28Nm, à 4.2Nm, la vitesse mécanique varie de 277 tr/min jusqu'à 185 tr/min. La tension et le courant diminuent respectivement de 77,17 V à 51,6 V et de 1,54 A à 1,03 A. Il est donc clair que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

III.3. Simulation de l'association GSAP - turbine éolien

La figure (III.3), présente le schéma bloc de simulation de la GSAP monté avec turbine éolien sous Matlab/Simulink

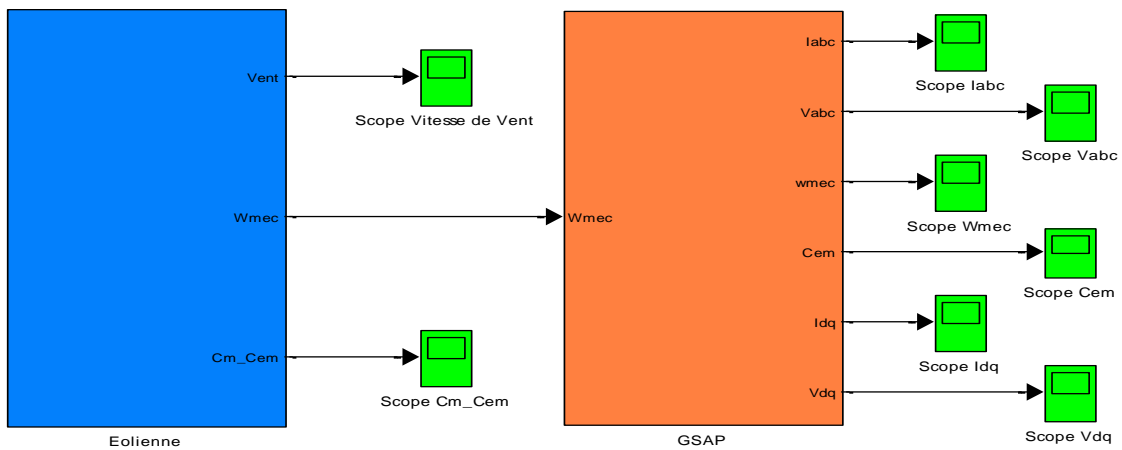


Figure (III.3) : Schéma Bloc de simulation de la GSAP monté avec turbine éolien

III.3.1. Les résultats de la simulation obtenus

La figure (III.5) présente la variation de la vitesse du vent en fonction du temps

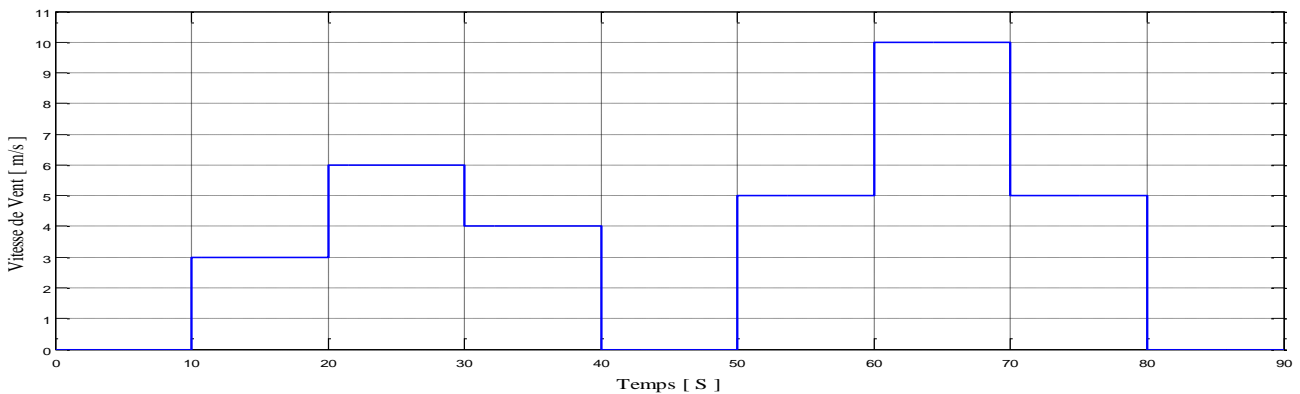
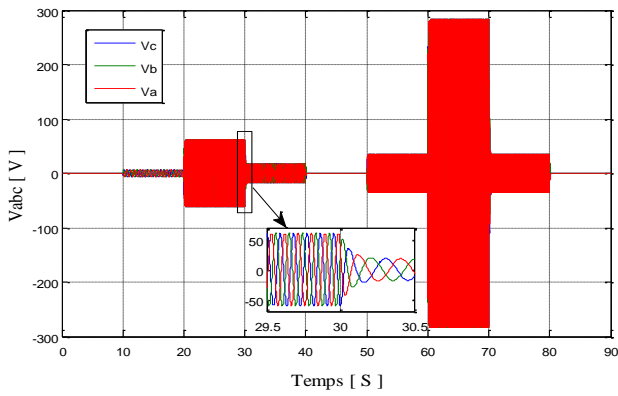
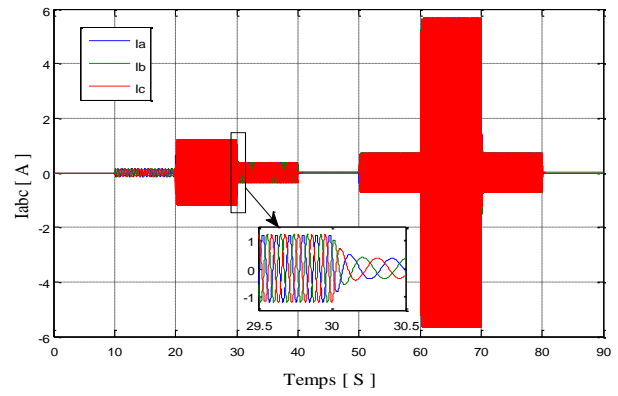


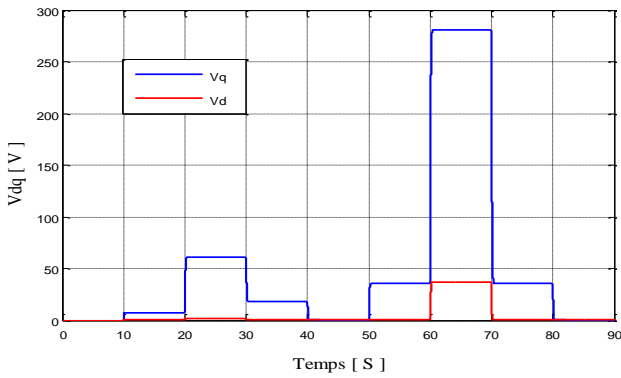
Figure (III.4) : La Vitesse de Vent



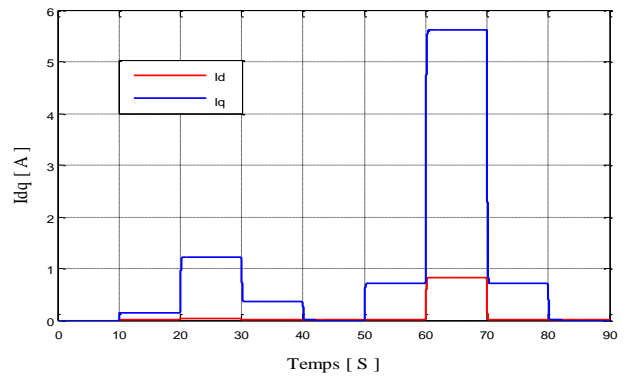
a) Tensions statoriques Vabc



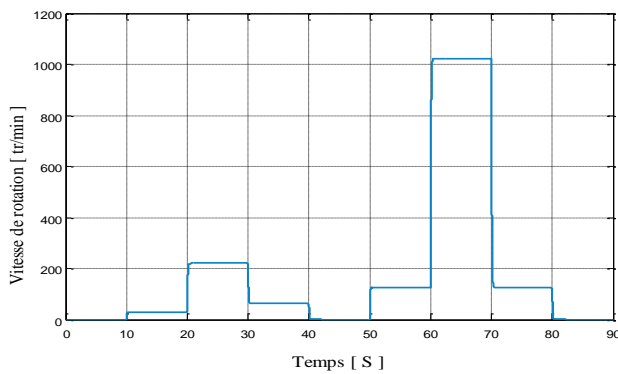
b) Courants statoriques Iabc



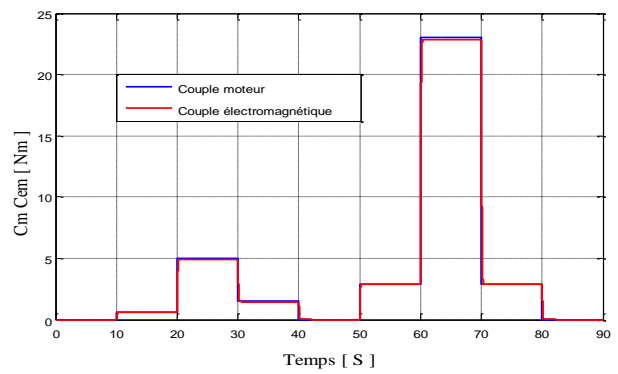
c) Composantes Vd ; Vq



d) Composantes Id ; Iq



e) Vitesse de rotation



f) Couples électromagnétique et moteur

Figure (III.5) : Résultats de simulation de l'association GSAP avec turbine éolien

III.3.2. Interprétation des résultats

Pour évaluer l'impact de la charge électrique sur le comportement du générateur en fonction de l'énergie mécanique fournie, des turbines éoliennes verticales ont été installées avec le générateur (figure III.3). Il convient de noter que la vitesse du générateur augmente et diminue en fonction de la vitesse du vent, ce qui entraîne une diminution et une augmentation de la tension et du courant comme le montrent

les figures (III.6a) et (III.6b). Cela est dû à l'insuffisance du couple du moteur. En faisant varier la vitesse de rotation du vent que nous supposons aller de 0 m/s à 10 m/s, la vitesse mécanique varie de 0 tr/min à 1021,92 tr/min (figure III.6e). La tension et le courant varient respectivement de 0 volt à 283,24 volts et de 0 ampère à 5.66 ampères. Il est évident que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

III.4. Simulation globale du système complet

La figure (III.6), présente le schéma bloc globale de l'association GSAP, turbine éolien, les convertisseurs statiques, batterie et la charge R sous Matlab/Simulink

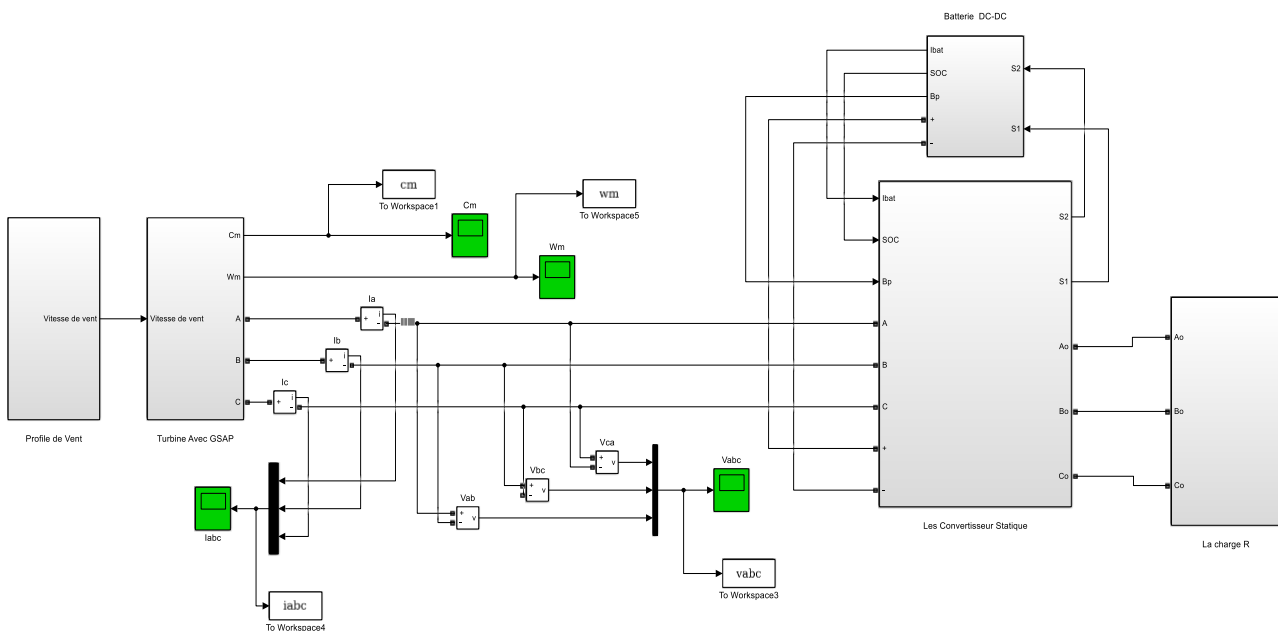


Figure (III.6) : Schéma Bloc de Simulation globale du système complet

III.4.1. Les résultats de la simulation obtenus

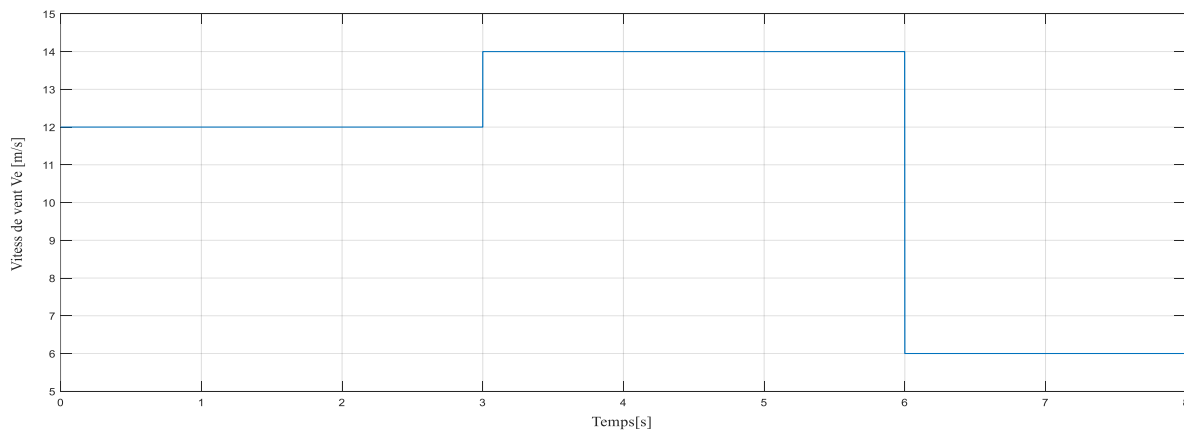


Figure (III.7) : La Vitesse de Vent

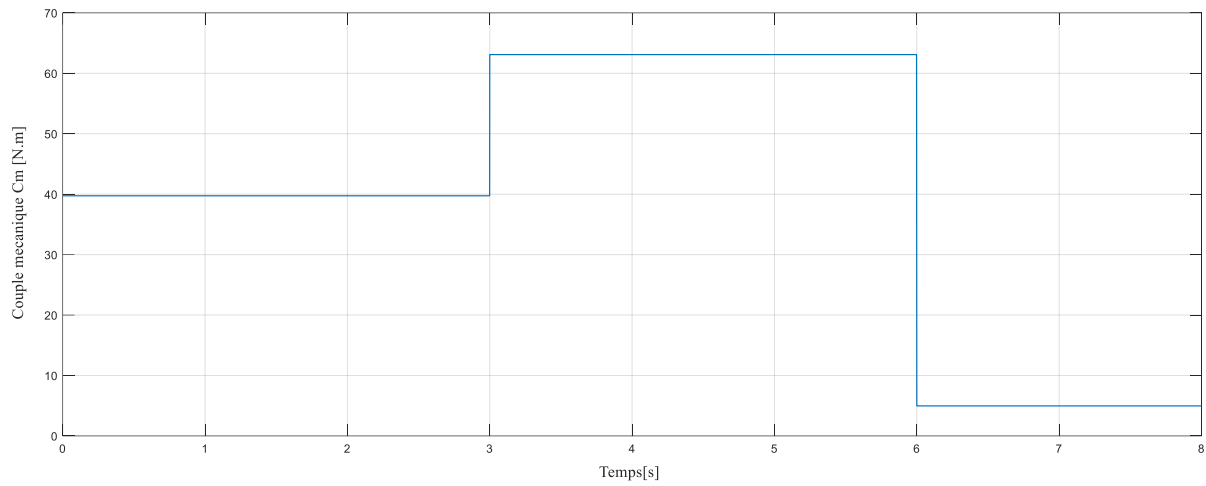


Figure (III.8) : Le Couple mécanique C_m

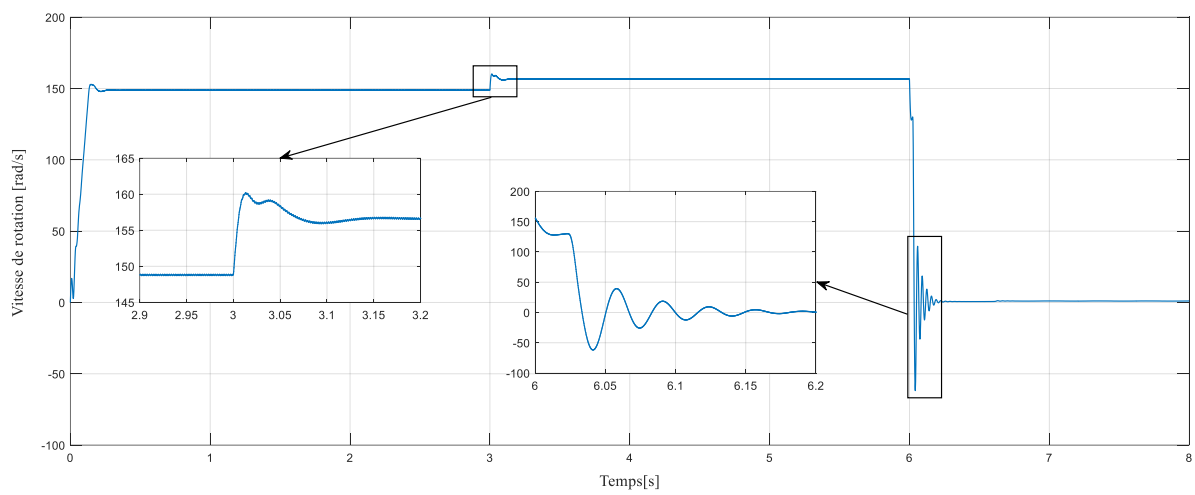


Figure (III.9) : La Vitesse de rotation

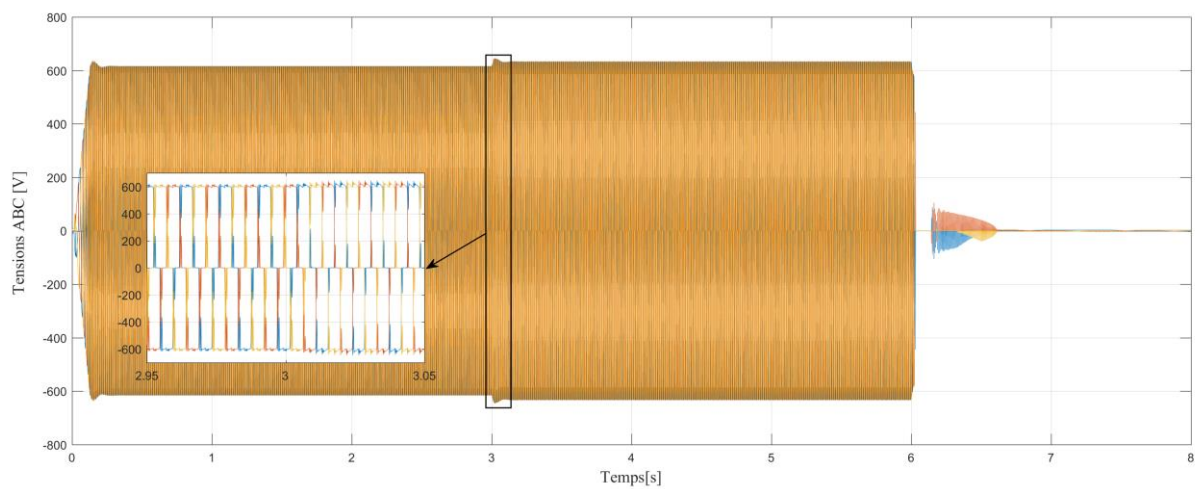


Figure (III.10) : Les Tensions statorique ABC

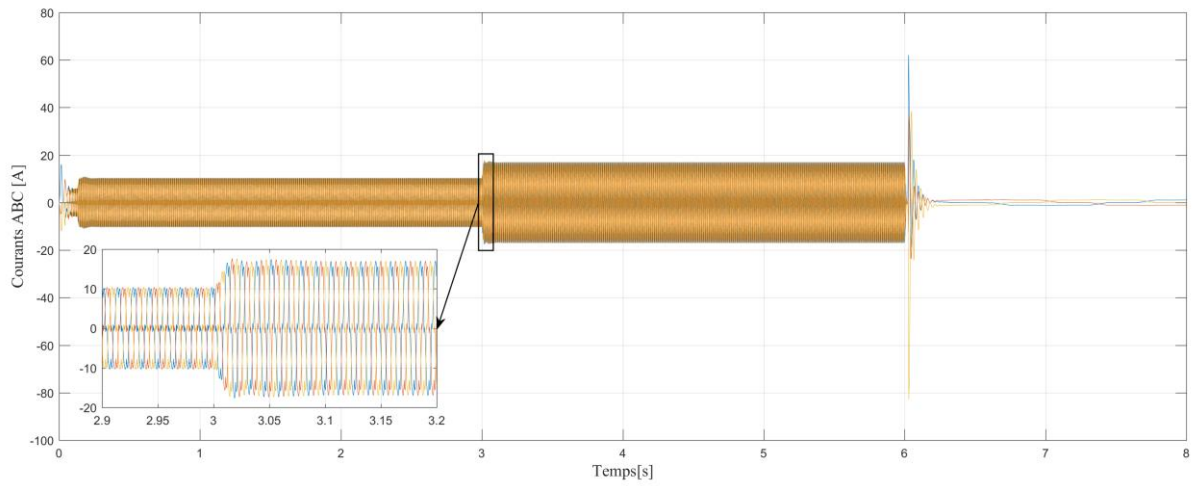


Figure (III.11) : Les Courons statorique ABC

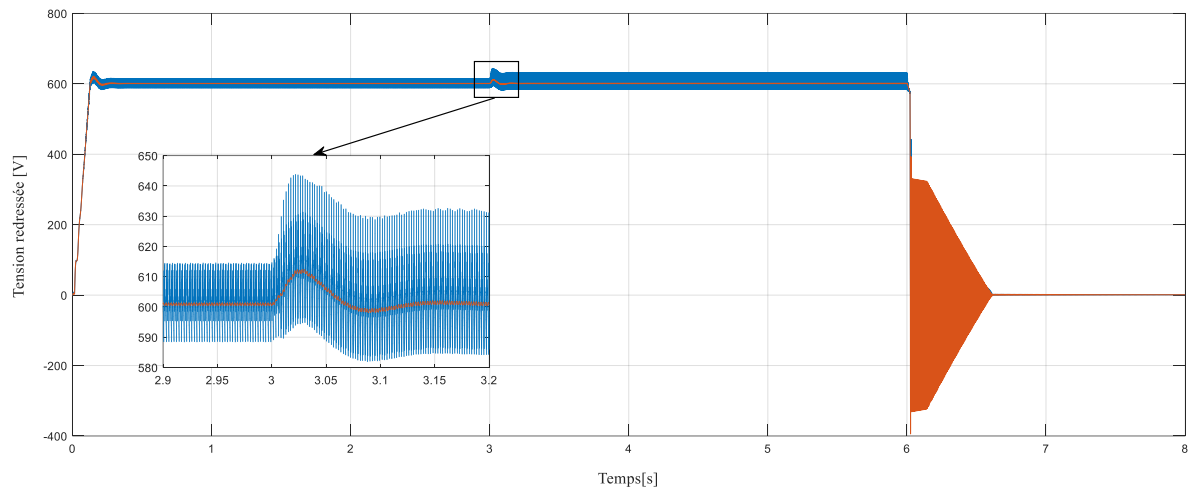


Figure (III.12) : La Tension redressée

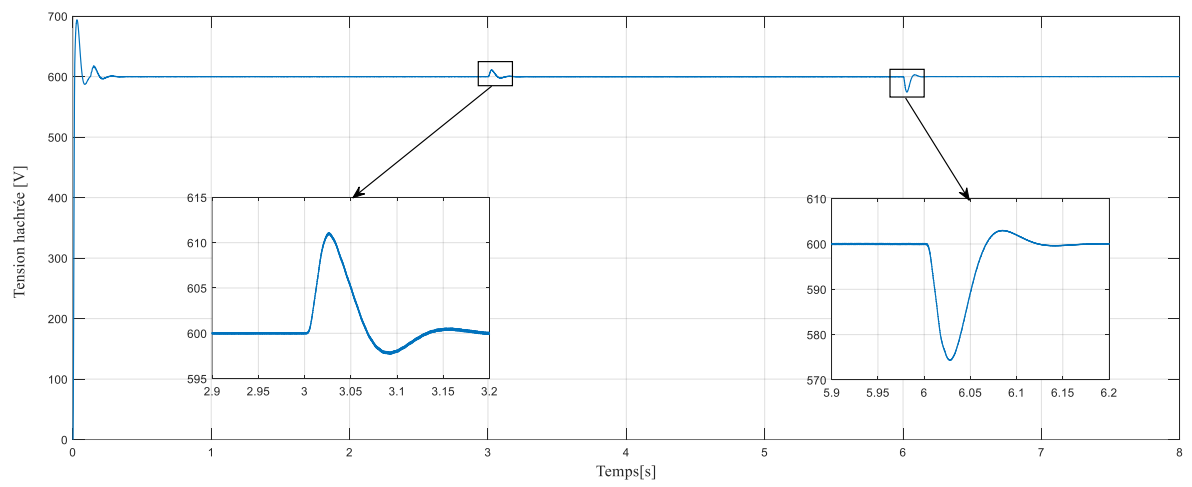


Figure (III.13) : La Tension d'hacheur buck –boost

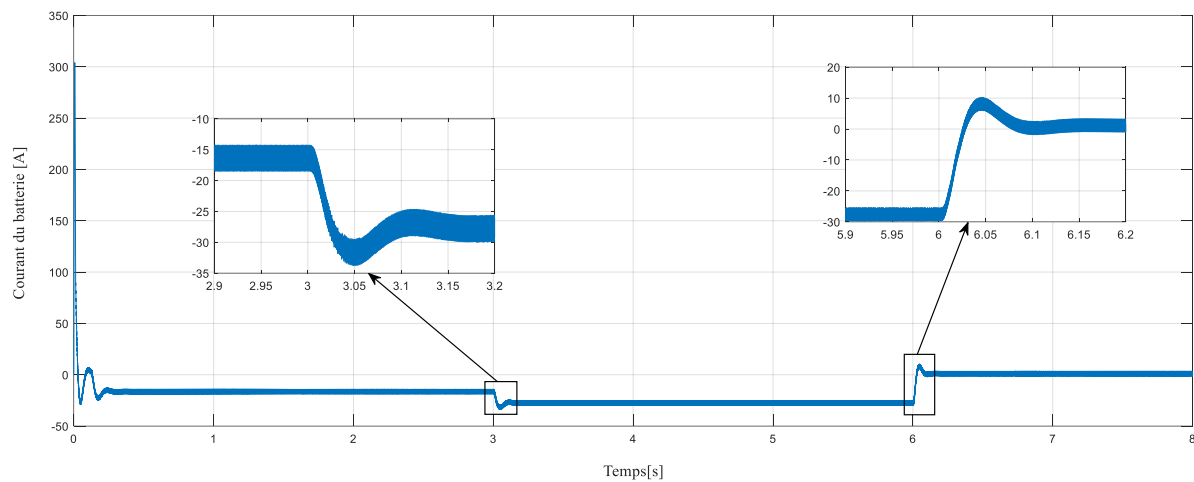


Figure (III.14) : Le Courante de batterie

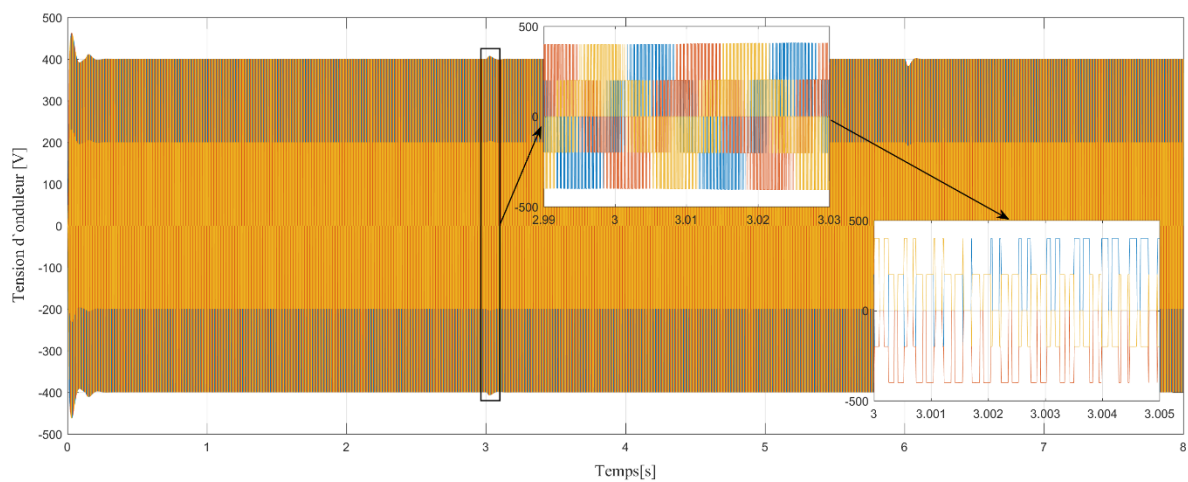


Figure (III.15) : La Tension d'onduleur

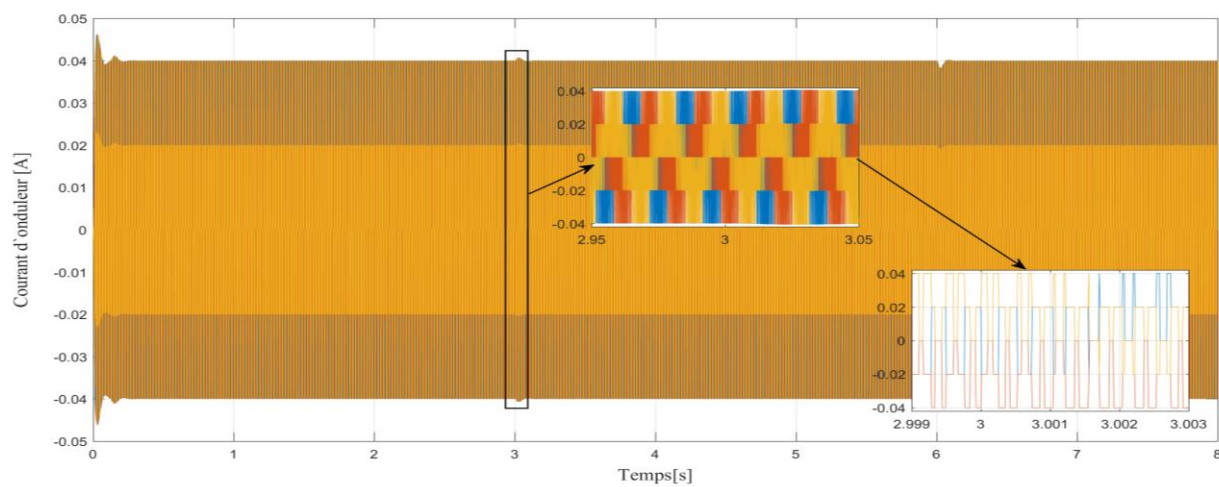


Figure (III.16) : Le Courant d'onduleur

III.4.2. Interprétation des résultats

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté la simulation du système globale (la turbine, GSAP, redresseur, hacheur, onduleur, batterie) à l'aide du logiciel Matlab simulink, et voir l'importance de l'influence de la variation de la vitesse du vent sur le bon fonctionnement de chaîne éolienne et sur les tensions et courants à la sortie des différents composants, et montrent aussi l'efficacité de la conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique.

III.5. Conclusion

La simulation de ce système intégré montre qu'une turbine éolienne couplée à une PMSG, avec un redresseur, un hacheur buck-boost, des batteries de stockage, et un onduleur, constitue une solution efficace pour la production et la gestion de l'énergie éolienne. Ce système permet de maximiser l'utilisation de l'énergie éolienne, de stabiliser l'alimentation électrique, et de répondre aux besoins des charges continues et alternatives de manière fiable et durable. L'intégration de ces composants optimise la performance globale du système et offre une approche viable pour l'adoption généralisée des énergies renouvelables.

CONCLUSION
GENERALE

En conclusion, l'étude et la simulation d'un système d'éclairage autonome utilisant l'énergie éolienne récupérée des véhicules, avec une turbine de type Savonius, représentent une étape importante vers la réalisation de la durabilité environnementale et le développement des infrastructures intelligentes. Au cours de ce mémoire, tous les aspects techniques et économiques de ce système ont été analysés, depuis la compréhension du fonctionnement de la turbine Savonius et la conception du système de contrôle mécanique et électronique de la vitesse de rotation, jusqu'à la modélisation des systèmes composés, y compris la turbine, le générateur à aimants permanents, les convertisseurs statiques et les batteries, ainsi que l'analyse des performances dans diverses conditions de fonctionnement.

Les résultats montrent que l'utilisation de la turbine Savonius pour exploiter l'énergie éolienne générée par le mouvement des véhicules est un choix efficace et économiquement viable. Ce système offre une véritable opportunité de réduire la dépendance aux sources d'énergie traditionnelles et de promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables dans les applications d'éclairage public.

De plus, les résultats tirés de la simulation montrent que la valeur optimale du coefficient de puissance de la turbine était bien adaptée, et que la vitesse de rotation de la génératrice à aimants permanents était stable, démontrant une corrélation avec la vitesse du vent. De même, les convertisseurs statiques, avec leurs différentes stratégies de contrôle permettant d'améliorer la gestion de l'énergie, ont montré les meilleures performances énergétiques. Tous ces résultats confirment l'efficacité de ce système pour générer suffisamment d'énergie pour alimenter les systèmes d'éclairage public de manière durable, contribuant ainsi à atteindre les objectifs environnementaux et à réduire les émissions de carbone.

En fin de compte, cette recherche constitue une contribution précieuse dans le domaine des énergies renouvelables et de leurs applications pratiques, ouvrant la voie à davantage d'études futures et à des applications concrètes de ce système dans diverses régions. Nous encourageons l'adoption et le développement de ces technologies pour réaliser un avenir plus durable et plus propre.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AOIANA Sylla, ALLAM Sabrina « Conception et réalisation d'un système d'éclairage intelligent à base de panneaux photovoltaïques », MASTER Académique–Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou, 2013.
- [2] K. LARBI, A. M'KHADMI « Utilisation De Photovoltaïque En Eclairage Public » MASTER Académique–Université, Adrar, 2014.
- [3] G. GUIE BI, « Economie D'énergie Et Eclairage Public De La Ville De Ouagadougou » mémoire master, institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, 2010.
- [4] F. James, C. Christoph, H. Gordon, « The Time Is Right for Connected Public Lighting within Smart Cities ». Article de journal, Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 08/10/2012.
- [5] BOULHARES Khadidja, TRAKET Chahira « Etude Pratique et Dimensionnement d'un Système d'Eclairage Public Photovoltaïque Autonome Cas d'étude ; Unité de Recherche d'Adrar », MASTER Académique–Université de Ahmed Draïa, Adrar, 13/06/2018.
- [6] SI YAHIAOUI Souad « Etude et dimensionnement d'un système d'éclairage publique PV dans l'université d'Adrar », MASTER Académique–Université de Ahmed Draïa, Adrar, 2021.
- [7] «éclairage public,» wikipédia, 7 mars 2018. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89clairage_public. [Accès le mars 2018].
- [8] BRAHIMI Billal, BOUHAMED Ala Eddine « Etude Comparative entre l'éclairage public classique et l'éclairage solaire photovoltaïque », MASTER Académique–Université Saâd Dahleb, Blida-1, 2021.
- [9] «HISTOIRE DE L'ECLAIRAGE». Disponible. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjww4CocrbAhWHvhQKHcQXCycQFgiPATAI&url=http%3A%2F%2Fekladata.com%2FDZ7ui60SGCVTQ7OV5FWkLzdLZ_c%2Fhistoire-de-leclairage.pdf&usq=AOvVaw2rwok451N64Y-avPgTok2i
- [10] I. Massol, «histoire de l'éclairage,». Article de journal.joomlaArt, 16 february 2007
- [11] «/SOURCE ET LAMPE les lampes,» 04 \10\2004_20 \08\2017. Disponible : www.leclairage.fr/led/. [Accès le 2018 03 12]
- [12] « Renewables 2017 Global Status Report » rapport de REN21, 2017. Disponible : http://www.ren21.net/gsr-2017/chapters/chapter_01/chapter_01/. [Accès le 10 mars 2018].
- [13] Dr. KHELIF Messaoud, « Eclairage Public En Algerie », MASTER Académique–Université Badji Mokhtar, Annaba, 2015.
- [14] <https://www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition/eclairage-public-autonome>
- [15] FERRAH Billel, « Etude d'un système Hybride (photovoltaïque –éolien) », MASTER Académique–Université Badji Mokhtar, Annaba, 2015.
- [16] CHERIFI Farida, GRIM Naima « Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome », MASTER Académique–Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 09/2018.
- [17] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/energie-eolienne-transformer-vent-en-electricite>

- [18] MIREKI Adam « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), 2005.
- [19] DAVIGNY Arnaud « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 11/12/2007.
- [20] Placide Jaohindy « Modélisation des systèmes éoliens verticaux intégrés aux bâtiments : modélisation du couple production / Bâtiment », thèse de doctorat – Université de La Réunion, Français, 20/10/2012.
- [21] KACIMI Meriem, LAMARA MAHAMMED Abdelkrim « Etude et réalisation d'un modèle d'éolienne de type VAWT et prédiction de performances aérodynamiques en soufflerie » Mémoire de projet de fin d'études–Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 22/06/2017.
- [22] BEN AMAR Asma « Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA », Diplôme de MAGISTER–Université Hadj Lakhdar, Batna, 24/04/2016.
- [23] KACHEBI Youcef, HATEM Said « Etude énergétique et réalisation d'une turbine éolienne à axe vertical de petite puissance », MASTER Académique–Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2013.
- [24] KACIMI Meriem « Etude générale d'une éolienne de type Savonius », Mémoire de Master–Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 13/07/2017.
- [25] LOUZRI Hamza, AZIZ Mohamed Amine « Étude de multiplicateur de vitesse d'une éolienne » MASTER Académique–Université Saad Dahlab, Blida 1, 2019.
- [26] CHEKIRED Choayb, ACHOUR Aissam « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent » MASTER Académique–Université Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel, 2020.
- [27] ALLALI Loubna « Commande Vectorielle De La Génératrice Synchrone A Aimants Permanents » MASTER Académique–Université Larbi Ben M'hidi D'oum El Bouaghi, Ain El Beida, 04/06/2016.
- [28] BERRABAH Ahmed Bahaeddine, HAMZA Oussama « Commande par logique floue d'une machine synchrone à aimant permanent » MASTER Académique–Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2018.
- [29] GUERIDA Siham, OUAFI Othmane « Modélisation et contrôle d'un système de pompage d'eau connecté à l'éolienne » MASTER Académique–Université Ahmed Draia, Adrar, 23/06/2019.
- [30] MERZOUGUI Theldja, ABDELKEBIR Khedidja « Commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) », MASTER Académique–Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2019.
- [31] DLIMI Faiza, DJELAILI Zohour « Etude et contrôle d'une turbine éolienne a axe verticale couple a un générateur éolien » MASTER Académique–Université Ahmed Draia, Adrar, 2020.
- [32] BERREHOUMA Ali, ILYAS ZAIZ Mohammad, ZEKRI Yahia, BAN NADJI Ramzi « Etude Et Simulation D'un Convertisseur AC / DC » MASTER Académique–Université Echahid Hamma Lakhdar, El Oued, 2022.
- [33] SADIOU Fateh, DEHMECHE Ibrahim « Réalisation d'un Onduleur de tension triphasé à base d'IGBT » MASTER Académique–Université Mohamed Boudiaf, M'SILA, 2020.

- [34] Chirine Benzazah, Mustapha Ait Lafkih, Loubna Lazrak « Etude comparative entre deux topologies d'onduleurs triphasés, classique à 2-niveaux et NPC à 3-niveaux avec deux différentes méthodes de commande MLI-ST et SWM » Creative Commons Attribution License, 2014
- [35] A. Saad, H. Laterchi, « Réalisation d'un onduleur monophasé et l'optimisation de sa commande MLI » Mémoire d'ingénieur d'état, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2009.
- [36] NASRI Sabrine, BEN HAMIDA Ouissem « ETUDE ET SIMULATION D'UN HACHEUR (BUCK-BOOST) » MASTER Académique–Université Badji Mokhtar, Annaba, 23/06/2019.
- [37] BOUGANDOURA Abdelwahab « Etude sur la Commande du Hacheur Quatre Quadrants », MASTER Académique–Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi, 22/06/2013.
- [38] SARRI Sofiane « Commande en MPPT d'une chaine photovoltaïque à base d'un hacheur multiniveaux », MASTER Académique–Université Mohamed Seddik Ben Yahia, Jijel, 2020.
- [39] SEGHIRI Mohamed Nazim, GUELMINE Abdelbari « Modélisation et implémentation en simulateurs orientés-circuits d'une batterie de stockage solaire », MASTER Académique–Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2021.
- [40] TITRAOUI Bilal, BOUDISSA Fatima Zohra « Modélisation et simulation d'une batterie à usage solaire photovoltaïque », MASTER Académique–Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2021.
- [41] BENALI Tarek, BENOUARET Saâdi « Contribution à l'étude d'un Système Eolien Basé sur une Machine Synchrone à Aimants Permanents », MASTER Académique–Université A .Mira, Bejaia, 2014.
- [42] MAYOUF Messaoud « Etude Comparative Des Architectures Et Stratégies De Contrôle D'un Aérogénérateur Synchrone A Aimants Permanents » doctorat en sciences–université, Batna, 2014.
- [43] CHENITI Dounia, ALILICHE Khawla «Étude Analytique Et Numérique Du Coefficient De Puissance D'une Éolienne Savonius À Axe Vertical À 2 Et 3 Pâles », MASTER Académique–Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2020.
- [44] MEGHLAOUI Issam «Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal », MASTER Académique–Université Badji Mokhtar, Annaba, 2009.
- [45] Prof. Dr. Manfred Stiebler, «Wind Energy Systems for Electric Power Generation» Springer Series in Green Energy and Technology ISSN 1865-3529- 2008, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [46] S.R.Guda, « Modeling and power management of a hybrid wind-microturbine power generation ». Thèse de master de l'université de Bozeman, Monata. Juillet 2005.
- [47] M.Adem, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse. Avril 2005.
- [48] SAOUD Maamar Taki Eddine, SAADI Ammar, KHAMADJ Redouan, GHANEM Fares « Conception et réalisation d'un prototype de turbine éolienne à axe horizontal », MASTER Académique–Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 08/10/2023.
- [49] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'école centrale de Lille (ECL).
- [50] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'école centrale de Lille (ECL), 2005.

- [51] B.Singh, B.P.Singh, S.Dwivedi, «A State of Art on Different Configurations of Permanent Magnet Brushless Machines», IE (I) Journal–EL, Vol 87, June 2006.
- [52] L. Abdelhamid "Contribution à l'Etude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens" Mémoire Magister Université de Batna, 2008.
- [53] Ameer, A. " Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone à aimants doté d'un observateur d'ordre complet à mode glissant". Thèse de magistère en électrotechnique université de Batna, 2003.
- [54] ABDESSEMED Rachid « Modélisation et simulation des machines électriques » Livre
- [55] R.Abdessemed, M.Kadjoudj, « Modélisation des Machines Electriques », Presses de l'Université de Batna 1997.
- [56] R. Bharanikumar, A.N. Kumar, «Analysis of Wind Turbine Driven PM Generator with Power Converters», International Journal of Computer and Electrical Engineering», Vol. 2, No. 4, 1793-8163, August 2010.
- [57] Abdenour ABDELLI, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » Docteur De L'institut National Polytechnique De Toulouse, 2007.
- [58] SADIOU Fateh, DEHMECHE Ibrahim «Réalisation d'un onduleur de tension triphasé à base d'IGBT », MASTER Académique–Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2020.
- [59] B. Boussiala, « Commande vectorielle d'une machine asynchrone polyphasée alimentée par onduleur à trois niveaux. Application sur la machine héptaphasée », Mémoire de Magister, l'école nationale polytechnique, Algérie, 2010.
- [60] L. Hellali, « diagnostique des defaults dans l'association convertisseur machine a induction », Mémoire de Magistère, université de Batna, Algérie, 2016.
- [61] S.A. Ardjoun, « Commande en vitesse par mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation » Mémoire de Magister, université de Sidi Bel Abbès, Algérie, 2006.
- [62] P. Damien, « Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entrainements électriques hybrides », Thèse de Doctorat, Université de Belfort, Montbéliard, 2010.
- [63] SPIROV Dimitar, LAZAROV Vladimir, ROYE Daniel, ZARKOV Zahari, MANSOURI Omar « Modelisation Des Convertisseurs Statiques Dc-Dc Pour Des Applications Dans Les Energies Renouvelables En Utilisant Matlab/Simulink » Université Technique de Sofia, Bulgarie, 25 Septembre 2009.
- [64] ACHOUR Abd erraouf « Analyse et commande d'un hacheur Buck-boost » MASTER Académique–Université Mohamed Khider, Biskra, 23/06/2018.
- [65] MAYOUF Messaoud, BAKHTI Haddi « Optimum Parametric Identification of a Stand-Alone Photovoltaic System with Battery Storage and Optimization Controller Using Averaging Approach » Journal Européen des Systèmes Automatisés, University of Msila, Algeria, 02/ February /2021.

ANNEXE

Paramètres de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents:

| Elément de la chaine de Conversion éolienne | Valeur numérique | Signification |
|---|----------------------|---|
| Turbine éolienne type Savanius | $\rho=1,2$ | Masse volumique de l'air (Kg/m ³) |
| | $R= 0,5$ | Rayon de l'éolienne (m) |
| | $H=2$ | Hauteur de la turbine (m) |
| | $G=10$ | Surface active (m ²) |
| | $\lambda_{opt}=0,78$ | Vitesse réduite optimale |
| | C_p | Coefficient de puissance optimale |
| Générateur synchrone A aimants permanents | $R_s=0.895$ | Résistance statorique (Ω) |
| | $L_d=0.012$ | Inductance statorique selon l'axe d (mH) |
| | $L_q=0.0211$ | Inductance statorique selon l'axe q (mH) |
| | $\Psi_f = 0.9$ | Flux des aimants permanents (Wb) |
| | $P=3$ | Nombre de pair de pole |
| | $J=0.0141$ | Inertie de l'ensemble turbine et génératrice (Kg.m ²) |
| | $f=0.001$ | coefficient de frottement visqueux. |

Polynomial parameters for modeling battery:

| Components | Rating values |
|------------|---------------|
| PS5 | 42.2942 |
| PS4 | -98.3961 |
| PS3 | 88.7769 |
| PS2 | -40.3893 |
| PS1 | 10.2942 |
| PS0 | 11.4802 |

$$V_{OC} = P_{S5}SOC^5 + P_{S4}SOC^4 + P_{S3}SOC^3 + P_{S2}SOC^2 + P_{S1}SOC + P_{S0}$$

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme Master Académique en Electromécanique.

Thème :

Éclairage public Autonome.

Proposé et dirigé par : Dr. BELOUNIS Ouassila.

Présenté par : KHIRI Fouzi et BOUCHARAB Akram.

Résumé :

Ce travail se concentre sur l'étude de l'exploitation et de la conversion de l'énergie éolienne perdue des véhicules et de l'énergie naturelle en électricité pour l'éclairage public, de manière indépendante du réseau électrique traditionnel. Notre étude se focalise particulièrement sur les éoliennes à axe vertical de type Savonius, connues pour leur haute efficacité à convertir l'énergie cinétique du vent en électricité dans des environnements à vitesse de vent faible et variable, comme c'est le cas sur les bords des routes. Notre sujet traite également de l'étude théorique et de la modélisation de ce système autonome. Nous avons simulé tous les composants du système et observé la performance de l'éolienne ainsi que la valeur de son coefficient de puissance, qui s'améliore progressivement et qui est principalement lié à la vitesse du vent. Le générateur à aimant permanent, jouant un rôle essentiel dans notre système, s'est avéré compatible avec ce type d'application grâce à sa vitesse de rotation stable. Nous avons régulé la tension en utilisant des convertisseurs fixes et différentes techniques de contrôle, et nous avons également utilisé un système de stockage pour stocker l'énergie continue.

Mots clés :

Eclairage public Autonome, turbine à axe vertical, Génératrice synchrone à aimant permanent, Modélisation, convertisseurs statiques, simulation.

Abstract:

This work focuses on studying the exploitation and conversion of lost wind energy from vehicles and natural sources into electricity for public lighting, independently of the traditional electrical grid. Our study particularly focuses on vertical axis wind turbines of the Savonius type, known for their high efficiency in converting the kinetic energy of wind into electricity in environments with low and variable wind speeds, such as roadside areas. Our topic also addresses the theoretical study and modeling of this autonomous system. We simulated all the components of the system and observed the performance of the turbine as well as its power coefficient value, which improves gradually and is mainly related to wind speed. The permanent magnet generator, which plays a crucial role in our system, proved to be compatible with this type of application due to its stable rotational speed. We regulated the voltage using fixed converters and various control techniques, and we also employed a storage system to store continuous energy.

Keywords:

Autonomous public lighting, Vertical axis turbine, Permanent magnet synchronous generator, modeling, static convertesrs, simulation.

ملخص:

يركز هذا العمل على دراسة كيفية استغلال وتحويل طاقة الرياح الضائعة من المركبات والطبيعية إلى طاقة كهربائية لاستخدامها في الإضاءة العامة بشكل مستقل عن الشبكة الكهربائية التقليدية. يركز البحث بشكل خاص على توربينات الرياح ذات المحور العمودي من نوع سافونيوس، والمعروفة بكفاءتها العالية في تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية في بيئات ذات سرعات رياح منخفضة ومتغيرة، مثل جوانب الطرق. يتناول الموضوع دراسة هذا النظام بشكل نظري ونمذجته، مع محاكاة جميع مكونات النظام. وقد لوحظ أداء التوربين بقيمة معامل الطاقة الخاص به، والذي يتحسن تدريجياً ويرتبط بشكل أساسي بسرعة الرياح. كما تم دراسة المولد ذو المغناطيس الدائم الذي يلعب دوراً أساسياً في النظام وتبين أنه مناسب لهذا النوع من التطبيقات بسبب سرعة دورانه المستقرة. تم ضبط التوتر باستخدام محولات ثابتة وتقنيات تحكم مختلفة، واستخدم نظام تخزين لتخزين الطاقة الناتجة لضمان توافرها بشكل مستمر.

الكلمات المفتاحية:

الإضاءة العامة المستقلة، توربين ذو محور عمودي، مولد متزامن، ذو المغناطيس الدائم، نمذجة، محولات ثابتة، محاكاة.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE : ELECTROMECHANIQUE

Proposé et dirigé par Mme : BELOUNIS Ouassila

Présenté par : KHIRI Fouzi et BOUCHARAB Akram

THEME

Éclairage public Autonome

Résumé :

Ce travail se concentre sur l'étude de l'exploitation et de la conversion de l'énergie éolienne perdue des véhicules et de l'énergie naturelle en électricité pour l'éclairage public, de manière indépendante du réseau électrique traditionnel.

Notre étude se focalise particulièrement sur les éoliennes à axe vertical de type Savonius, connues pour leur haute efficacité à convertir l'énergie cinétique du vent en électricité dans des environnements à vitesse de vent faible et variable, comme c'est le cas sur les bords des routes.

Notre sujet traite également de l'étude théorique et de la modélisation de ce système autonome. Nous avons simulé tous les composants du système et observé la performance de l'éolienne ainsi que la valeur de son coefficient de puissance, qui s'améliore progressivement et qui est principalement lié à la vitesse du vent.

Le générateur à aimant permanent, jouant un rôle essentiel dans notre système, s'est avéré compatible avec ce type d'application grâce à sa vitesse de rotation stable. Nous avons régulé la tension en utilisant des convertisseurs fixes et différentes techniques de contrôle, et nous avons également utilisé un système de stockage pour stocker l'énergie continue.

Mots clés

Eclairage public Autonome, turbine à axe vertical, Génératrice synchrone à aimant permanent, Modélisation, convertisseurs statiques, simulation.

N° D'ordre : ELM-15