

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



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

SPECIALITE: AUTOMATIQUE

THEME

**Étude et modélisation d'une chaîne de production éolienne
à base d'une machine synchrone à aimant permanent**

Proposé et dirigé par :

- Mr. MESSALTI Sabir

Présenté par :

- MAROUF Adel

Année Universitaire: 2011/2012

N° d'ordre : 14

REMERCIEMENTS

*Au nom du dieu le clément et le miséricordieux
Avant tout, nous remercions dieu tout puissant qui
Nous a donné la foi, le courage et la patience afin d'accomplir
Ce Modeste travail*

*La présentation de ce modeste travail nous offre l'opportunité d'exprimer
notre gratitude*

*et reconnaissance à notre encadreur Mr. Messalti Sabir
pour son suivi et ses judicieux conseils qui nous ont permis
de mener à bien notre mémoire.*

Nous tenons à remercier également :

*Tous les enseignants qui ont participé à notre formation
Messieurs les membres de jury.*

*Nous exprimons notre sympathie et nos vifs remerciements à tous ceux
qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cet ouvrage,
qu'ils soient tous assurés de notre profonde reconnaissance et
trouvent dans ces mots l'expression de nos
sincères remerciements.*

A decorative border with teal and light blue floral and scrollwork patterns framing the text.

DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail
à ma très chère mère, qui grâce à elle,
je suis arrivé à continuer mes études.*

A mon très cher père.

A mes frères et ma sœur.

A ma chère grande mère.

Et à tous mes camarades de l'université

A tous mes amis du quartier Staih

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

SOMMAIRE

NOTATION

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I

I. GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS.....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Différents types d'énergies renouvelables.....	3
I.2.1. Énergie géothermique.....	3
I.2.2. Énergie thermo solaire.....	3
I.2.3. Énergie éolienne.....	4
I.3. Situation de l'énergie éolienne en Algérie.....	4
I.4. Distributions de weibull.....	5
I.5. Domaines d'application des éoliennes.....	7
I.6. Importance de l'énergie éolienne.....	7
I.6.1. Avantages.....	7
I.6.2. Inconvénients.....	8
I.7. Production éolienne.....	8
I.8. Principe de l'éolienne.....	9
I.9. Différents types d'éoliennes.....	10
I.9.1. Éoliennes à axe vertical.....	10
I.9.2. Éoliennes à axe horizontal.....	12
I.10. Constitution d'un aérogénérateur.....	13
I.11. Taille des éoliennes à axe horizontal.....	15
I.12. Bilan des forces sur une pale.....	15
I.13. Caractéristiques du vent et des turbines.....	16
I.13.1. Loi de Betz.....	16
I.13.2. Coefficient de puissance.....	17
I.14. Technologies d'éoliennes.....	18
I.14.1. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne.....	18
I.14.2. Système d'orientation des pales (pitch).....	19
I.14.3. Système à décrochage aérodynamique (stall).....	19

I.15. Modélisation du système (turbine - multiplicateur - arbre).....	20
I .15.1. Modèle de la turbine.....	21
I .15.2. Modèle de multiplicateur.....	23
I .15.3. Modélisation de l'arbre de la turbine.....	23
I .15.4. Le schéma bloc de l'association (turbine - multiplicateur - arbre).....	24
I.16. Les résultats de simulation.....	25
I.16.1. Simulation du coefficient de puissance (Cp).....	25
I.16.2. Simulation de la turbine.....	26
I.16.3. Résultats de simulation de la turbine.....	26
I.17. Conclusion.....	29

CHAPITRE II

II. ETUDE ET SIMULATION DE LA MSAP.....	30
II.1. Introduction.....	30
II.2. Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents.....	30
II. 2.1. Aimants permanents	30
II.2.1.1. Définition.....	30
II.2.1.2. Caractéristiques générales des aimants permanents.....	31
II.2.1.3. Différent types d'aimants permanents.....	32
II.2.2. Principales structures de la MSAP.....	33
II.2.2.1. Structures sans pièces polaires (Pôles lisses).....	33
II.2.2.2. Structures avec pièces polaires (Pôles saillant).....	35
II.2.2.3. Structure à aimants insérés dans l'armature rotorique.....	36
II.2.2.4. Structure à aimants internes.....	36
II.2.3. Principe de fonctionnement de la MSAP.....	37
II.2.4. Les avantages et les inconvénients de la MSAP.....	37
II.2.5. Comparaison entre la machine synchrone classique et la MSAP.....	38
II.3. Modélisation de la MSAP.....	38
II.3.1. Les hypothèses simplificatrices.....	38
II.3.2. Structure général d'une MSAP.....	39
II.3.3. Equation électrique	39
II.3.4. Equation mécanique.....	40
II.3.5. Transformation de PARK.....	41
II.3.6. Modèle de la MSAP dans le repère de Park.....	42

II.3.6.1. Equations des tensions.....	42
II.3.6.2. Equations des flux.....	43
II.3.6.3. Expression du couple électromagnétique.....	44
II.3.6.4. Equations d'état de la MSAP.....	44
II.3.7. Modèle de la GSAP en charge.....	45
II.3.7.1. Equations d'état.....	46
II.4. Simulation de la GSAP.....	47
II.4.1. GSAP à vide.....	47
II.4.2. Simulation de la GSAP en charge.....	49
II.5. Conclusion.....	52

CHAPITRE III

III. LES CONVERTISSEURS ELECTRONIQUES.....	53
III.1. Introduction.....	53
III.2. Structure de puissance des convertisseurs.....	53
III.3. Redresseur à diodes.....	54
III.3.1. La tension redressée.....	55
III.4. L'association GSAP – Redresseur.....	56
III.5. La capacité de filtrage.....	58
III.6. L'onduleur.....	60
III.6.1. Modélisation de l'onduleur.....	60
III.6.2. Commande des onduleurs.....	62
III.6.2.1. La commande plein onde.....	62
III.6.2.2. Onduleur de tension à commande décalée.....	63
III.6.2.3. la commande MLI.....	65
III.6.2.3.1. Stratégie de commande MLI.....	65
III.6.2.4. Onduleur de tension à commande MLI.....	66
III.7. L'association onduleur-redresseur.....	68
III.7.1 Simulation de L'association onduleur-redresseur.....	69
III.8. Conclusion.....	72

CHAPITRE IV

IV. INTÉGRATION DES ÉOLIENNES AUX RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.....	73
IV.1. Introduction.....	73

IV.2. Système d'énergie électrique.....	73
IV.2.1. Architecture du réseau électrique.....	73
IV.3. Description d'un parc éolien	75
IV.4. Limites de variation de la tension	76
IV.5. Participation des éoliennes aux services – système	77
IV.5.1. Participation des éoliennes au réglage de la tension	78
IV.5.1.1. Réglage de tension	78
IV.5.1.2. Participation au réglage de tension.....	79
IV.5.2. Participation au réglage de fréquence	79
IV.6. Description des différents types de raccordement.....	81
IV.6.1. Raccordement des parcs éoliens au réseau haut tension.....	81
IV.6.2. Raccordement des éoliennes au réseau moyen tension.....	82
IV.7. Étude du comportement du système éolien en cas d'un défaut	82
IV.8. Étude du régime permanent.....	83
IV.8.1. Classification des jeux de barres.....	84
IV.8.2. Equations de l'écoulement de puissance en utilisant la matrice admittance.....	84
IV.8.3. Méthode de Gauss-Seidel.....	85
IV.9. Conclusions.....	87
 CONCLUSION GENERALE.....	 88

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

INDEX DES NOTATIONS

S	: Surface balayée par les pales de l'éolienne.
ρ	: Masse volumique de l'air.
m	: Masse d'air traversant le rotor éolien en une(1) seconde.
λ , TSR	: Vitesse spécifique ou ration de vitesse, Tip-Speed-Ratio.
\vec{v}	: Vecteur vitesse du vent.
β	: Angle de calage des pales d'une éolienne à axe horizontal.
i	: Angle d'incidence des pales d'une éolienne à axe horizontal.
\vec{v}_{rot}	: Composante de la vitesse du vent due à la rotation de la turbine.
\vec{v}_{res}	: Résultante des vecteurs \vec{v} et \vec{v}_{rot} .
\vec{F}_{ax}	: Vecteur force représentant la poussée axiale sur une pale.
\vec{F}_{rot}	: Vecteur force représentant la poussée en direction de la rotation sur la pale.
\vec{F}_{res}	: Résultante de \vec{F}_{ax} et \vec{F}_{rot} .
$C_{aér}$: Couple aérodynamique de l'éolienne.
R	: Rayon de la pale.
Ω_{mec}	: Vitesse mécanique de la génératrice.
Ω_{ref}	: Vitesse mécanique de référence.
G	: Gain du multiplicateur.
C_g	: Couple d'entraînement de la génératrice.
$J_{turbine}$: Inertie de la turbine.
C_{mec}	: Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne.
$P_{élec}$: Puissance électrique générée par l'éolienne.
P_{nom}	: Puissance nominale de l'éolienne.
C_p	: Coefficient de puissance de la turbine.
$C_{p\ max}$: Coefficient de puissance optimal de la turbine.
(d,q)	: Indice du repère de Park lié au rotor.
C_{em}	: Couple électromagnétique.

INDEX DES NOTATIONS

C_r	: Couple résistant.
C_m	: Couple moteur.
J	: Moment d'inertie totale de la machine.
	: Vitesse de rotation mécanique du rotor.
B_r	: Induction rémanente.
H_{cb}	: Champ coercitif de l'induction.
H_{cj}	: Champ coercitif qui annule l'aimantation intrinsèque du matériau
w_r	: Vitesse mécanique du rotor.
w_s	: Pulsation des tensions statoriques.
F_{mm}	: Force magnétomotrice.
\bar{B}	: Champ d'induction magnétique.
V_a, V_b, V_c	: Tensions de phases statoriques.
I_a, I_b, I_c	: Courants de phases statoriques.
$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$: Les flux produits par les phases statorique respectivement a, b, c.
R_s	: Résistance d'une phase statorique.
L_s	: Inductance propre d'une phase statorique.
M_s	: Mutuelle inductance entre phase du stator.
f_c	: Coefficient de frottement.
C_f	: Couple de frottement.
P	: Nombre de paires de pôles.
$[P_\theta]$: Matrice de transformation de Park.
U_d, U_q	: Tension statoriques d'axe direct et en quadrature.
I_d, I_q	: Courants statoriques d'axe direct et en quadrature.
φ_f	: Flux crée par les aimants au rotor.
L_d	: Inductance dans l'axe Longitudinal.
L_q	: Inductance dans l'axe transversal.
C	: Capacité de filtrage.
AC/DC	: Continu / Alternatif.

MS	: Machine synchrone.
MSAP	: Machine synchrone à aimants permanents.
GSAP	: Génératrice synchrone à aimants permanents.
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor.
MLI	: Modulation de largeur d'impulsions.
MPPT	: Maximum Power Point tracking.
THT	: Très haute tension.
HT	: Haut tension.
MT	: Moyenne tension.
BT	: Basse tension.
PDT	: Poste de transformation.
PDL	: Poste de livraison.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis des millénaires : navigation, moulins, pompage. Elle a joué un rôle économique relativement important au cours des siècles avant d'être supplantée par les énergies fossiles à partir du début du 19ème siècle. Si quelques prototypes d'éoliennes, génératrices d'électricité, ont vu le jour dès le milieu du 20ème siècle, notamment en France, en Grande-Bretagne et au Danemark, ce n'est que dans les années 80 que l'éolien industriel commence vraiment à se développer et dans les années 90 qu'il connaît un véritable essor dans un certain nombre de pays.

Le développement de l'éolien s'inscrit dans le cadre de la promotion des énergies renouvelables, D'une part c'est un retour aux sources face aux dangers que représente à l'échelle planétaire le recours massif aux énergies fossiles. D'autre part l'énergie éolienne bénéficie d'une façon générale d'une bonne image auprès du public malgré les oppositions locales qui naissent fréquemment autour des projets pour des motifs environnementaux.

De nos jours, les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent une technologie en pleine croissance. La forme la plus connue et usitée dans la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique est faite de différents organes électrotechniques.

Jusqu'à présent, il existe deux catégories d'éoliennes : les éoliennes à vitesse fixe directement couplées au réseau et les éoliennes à vitesse variable commandées par le stator ou le rotor au moyen de convertisseurs électroniques. La deuxième catégorie permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, et ceci par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

La nature motivante de cette énergie, le développement de l'industrie des éoliennes, et l'évolution de la technologie des semi-conducteurs, ainsi que les nouvelles méthodologies de contrôle des turbines à vitesses variables diminuent les problèmes rencontrés, liés d'une part à la complexité des systèmes de conversion éolienne ; à savoir, la nécessité du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice, et l'instabilité de la vitesse du vent d'une autre part.

Afin de maximiser l'efficacité de cette conversion d'énergie, de nombreuses solutions ont été examinées aussi bien au niveau de la génératrice à utiliser que de

l'électronique de puissance. Le recours à des structures éoliennes bien étudiées comme par exemple, la génératrice synchrone à aimants permanents à grande nombre de pôles, rend les systèmes de conversion éolienne à vitesses variables plus attractifs que ceux à vitesses fixes, à cause de la possibilité d'extraction de l'énergie optimale pour différentes vitesses de vent, de la réduction des contraintes mécaniques par l'élimination du multiplicateur, ce qui améliore la fiabilité du système, et de la réduction des frais d'entretien.

La machine synchrone à aimants permanents est caractérisée par une source d'excitation indépendante intégrée dans la machine, un couple volumique élevé, une inertie très faible, et des pertes rotoriques faibles. Toutes ces caractéristiques offrent à la génératrice des performances élevées, un rendement important, et une meilleure contrôlabilité; ce qui rend cette machine comme un vrai concurrent de la génératrice asynchrone [1].

L'objectif de ce mémoire est d'étudier et de simuler les différents éléments d'aérogénérateurs intégrés dans un réseau électrique.

Le premier chapitre est consacré à la situation de l'énergie renouvelable en Algérie, puis une description des différents types d'éoliennes (à axe vertical et horizontal), leurs caractéristiques technologiques, leurs systèmes de régulation mécanique utilisés pour avoir un meilleur rendement, puis nous verrons la modélisation et la simulation du système (turbine – multiplicateur-arbre).

Le second chapitre présentera les génératrices synchrones à aimant permanent utilisées dans la production de l'énergie électrique éolienne, (structure, principe et régime de fonctionnement et leur domaine d'application), enfin la modélisation et la simulation de la GSAP (à vide et en charge)

Le troisième chapitre de ce mémoire est consacré à la modélisation et la simulation du redresseur, filtre et onduleur, puis l'association GSAP/AC/DC/AC.

Au quatrième chapitre, nous verrons l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux électriques, la description des différents types de raccordement, la participation des éoliennes aux services – système.

Finalement, une conclusion générale clôturera ce travail.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

I. GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

I.1. Introduction

La demande mondiale de la consommation d'énergie électrique à coût réduit, crée un développement des technologies d'utilisation de l'énergie éolienne. Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des aéromoteurs a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies, notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique.

Plusieurs technologies sont utilisées pour transformer l'énergie du vent (éoliennes à axe vertical ou à axe horizontal). Leurs structures sont de plus en plus performantes.

Le premier chapitre est consacré à la situation de l'énergie renouvelable en Algérie, puis une description des différents types d'éoliennes (à axe vertical, horizontal), leurs caractéristiques technologiques, leurs systèmes de régulation mécanique utilisés pour avoir un meilleur rendement, puis nous verrons la modélisation et la simulation du système (turbine -multiplicateur - arbre).

I.2. Différentes types d'énergies renouvelables

Il existe plusieurs sources d'énergies renouvelables, dont on peut en distinguer trois grandes familles [2] :

1. L'énergie d'origine mécanique (éolienne, hydraulique).
2. L'énergie solaire (panneaux photovoltaïques).
3. L'énergie sous forme de chaleur (géothermique, solaire et thermique,...).

I.2.1.Énergie géothermique

Les gisements géothermiques (température 150° à 300°C) sont les sources des hautes énergies dans les régions volcaniques, les roches très fracturées favorisent l'utilisation rapide des eaux de pluies, qui se vaporisent lorsqu'elles rencontrent en profondeur une source importante de chaleur. La vapeur extraite par forage du gisement est envoyée directement par des canalisations de surface dans une turbine.

I.2.2. Énergie thermo solaire

Le système contient un capteur à la surface orientée vers le soleil et capte les rayons du soleil traversant la couverture transparente. Ces rayons sont absorbés par la surface pour donner des températures pouvant arriver jusqu'à 80°C. L'avantage de ce type

d'énergie est d'être écologique et peu cher. La durée de vie des capteurs utilisés est élevée. Par contre, leur majeur inconvénient, comme tous les autres types d'énergie renouvelable, réside dans l'impossibilité de transporter l'énergie à grande distance. Parmi les applications les plus utilisées de ce type d'énergie en Algérie est l'alimentation des zones locales ou isolées dans le grand sud.

I.2.3. Énergie éolienne

Le vent connaît depuis environ 30 ans une grande importance comme source d'énergie. En effet, depuis une dizaine d'année, cette énergie connaît une croissance de 30% par an. L'étude de cette énergie sera notre objectif dans ce travail.

I.3. Situation de l'énergie éolienne en Algérie

En l'Algérie, les énergies renouvelables n'ont pas connu le développement que permet leur disponibilité, et qu'impose leur importance pour le développement économique et social. Le potentiel techniquement exploitable en énergies renouvelables en Algérie est considérable.

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année [3]. La distribution de l'électricité connaît depuis quelques années de fortes perturbations du fait d'une augmentation croissante de la demande intérieure. Cette évaluation dans la demande et la consommation d'énergie électrique oblige l'état algérien à penser sur l'exploitation de tous les moyens énergétiques du pays,

L'étude de rentabilité des systèmes éoliens est étroitement liée à la source elle-même, à savoir, le vent. Par exemple en Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés.

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité.

Une étude préliminaire de l'évolution de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées. Cette représentation de la vitesse

sous forme de carte à deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec des bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers la région. En Algérie par exemple tous les Atlas présentent les régions Sud-ouest, à savoir Adrar, Timimoun, In Salah et Tindouf, et les régions du nord-ouest Tiaret et Ain Oussera comme les zones les plus ventées, ils représentent toutes les caractéristiques des sites candidats à l'exploitation de cette énergie comme montrée dans la figure (I.1) [5]:

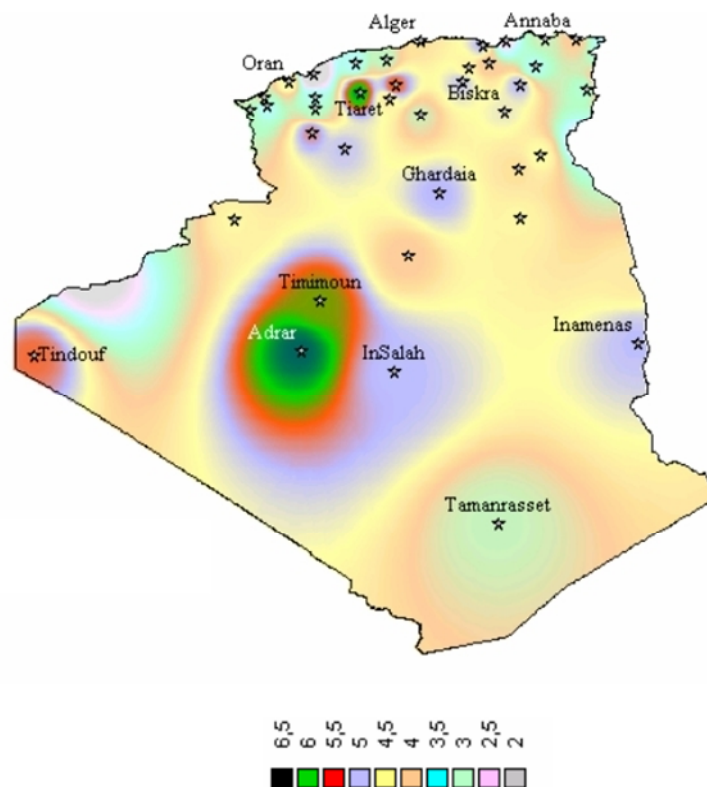


Figure (I.1) : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie

I.4. Distributions de weibull

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent déterminent la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. Pour connaître les propriétés d'un site, des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps, sont nécessaires (jusqu'à dix ans).

En effectuant la caractérisation d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la

hauteur du mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent augmente selon la hauteur et les valeurs de rugosité en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement proche.

$$V_v(h) = V_v(h_{mes}) \cdot \frac{\ln(h/\alpha)}{\ln(h_{mes}/\alpha)} \quad (I.1)$$

V_v : Vitesse de vent à la hauteur mesurée

h : L'hauteur

α : Coefficient de rugosité.

Nature du sol	Coefficient de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0.0002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...).	0.0024
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.	0.03
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies d'une hauteur huit mètres maximum espacées d'environ 1250 m.	0.055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies à la hauteur de huit mètres maximum espacées de 500 m.	0.1
Zone agricole avec de nombreux bâtiments et hautes haies d'une hauteur de huit mètres espacées de 250 m.	0.2
Villages, petites villes, zones agricoles avec de nombreuses haies, forêts et terrains très accidentés.	0.4
Grandes villes avec hauts bâtiments.	0.8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1.6

Tableau (I.1) : L'effet de choix géographique d'un site éolien [6].

I.5. Domaines d'application des éoliennes

Aujourd'hui, ce marché est dominé par deux grands secteurs d'application : la production d'énergie en site isolé, et la production d'énergie couplée directement au réseau électrique par différentes technologies de connexion utilisées dans le domaine.

Dans les sites isolés, la rentabilité étant plus facile à obtenir, des petites éoliennes dans la gamme de quelques 100 W à quelques 10 kW sont commercialisées depuis longtemps. La baisse des coûts des cellules photovoltaïques permet aujourd'hui de construire des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques qui profitent de la fréquente complémentarité vent-soleil (réduction des coûts des batteries de stockage nécessaires en site isolé).

Dans les stations couplées directement aux réseaux, on applique des technologies plus compliquées dans les systèmes de contrôle et de la commande pour assurer la stabilité d'énergie électrique produite à la sortie des parcs éoliens, puisque ce système fonctionne dans les potentiels de vent très élevés.

I.6. Importance de l'énergie éolienne

La croissance de l'utilisation de ce type d'énergie est évidemment liée aux leur avantages, Cette source d'énergie contient des inconvénients comme tous les systèmes énergétiques existants qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.6.1. Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie propre qui respecte l'environnement, par rapport à d'autres centrales électriques (Nucléaire,...). De plus, elle présente les avantages suivants :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'énergie éolienne n'est plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- Elle constitue une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes aux longs transports d'énergie sont moindres.

- L'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement à la plupart des centrales thermique et nucléaire qui possède des procédés continus.
- L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains : Elle est la moins chère parmi les énergies renouvelables.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- Elle crée plus d'emplois par unité d'électricité.

I.6.2. Inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients, dont on cite :

- La qualité de la puissance électrique n'est pas constante et ce du fait que la source d'énergie éolienne étant stochastique, donc la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas toujours très bonne.
- Le bruit mécanique qui pratiquement a disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- L'impact visuel, les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage.
- L'impact sur les oiseaux. Les éoliennes, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel.

I.7. Production éolienne

À l'échelle mondiale, on comptait en 2011 environ 237669 MW de puissance installée, l'industrie éolienne devrait procéder à l'installation de plus de 46000 MW de nouvelle puissance éolienne en 2012. Dans l'ensemble, selon le **Global Wind Energy Council (GWEC)**, le marché de l'énergie éolienne devrait croître à un rythme annuel moyen d'environ 8 % au cours des cinq prochaines années. La nouvelle puissance installée devrait totaliser 255000 MW pour la période 2012-2016. Cette croissance sera en grande partie attribuable à la Chine, à l'Inde et au Brésil, ainsi qu'à de nouveaux marchés de l'Amérique latine, de l'Afrique et de l'Asie qui y contribueront de manière importante [7].

Les 10 chefs de file mondiaux pour ce qui est de la nouvelle puissance installée en 2011 : République populaire de Chine (17631 MW), États-Unis (6810 MW), Inde

(3 019 MW), Allemagne (2 086 MW), Royaume-Uni (1 293 MW), Canada (1 267 MW), Espagne (1 050 MW), Italie (950 MW), France (830 MW), Suède (763 MW).

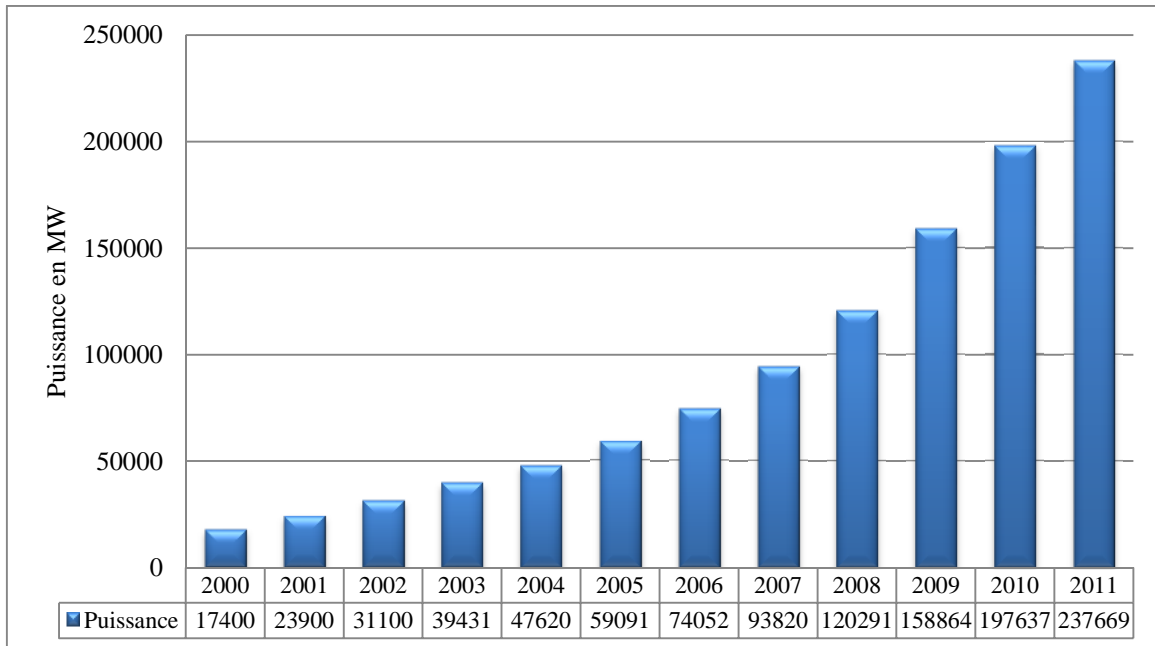
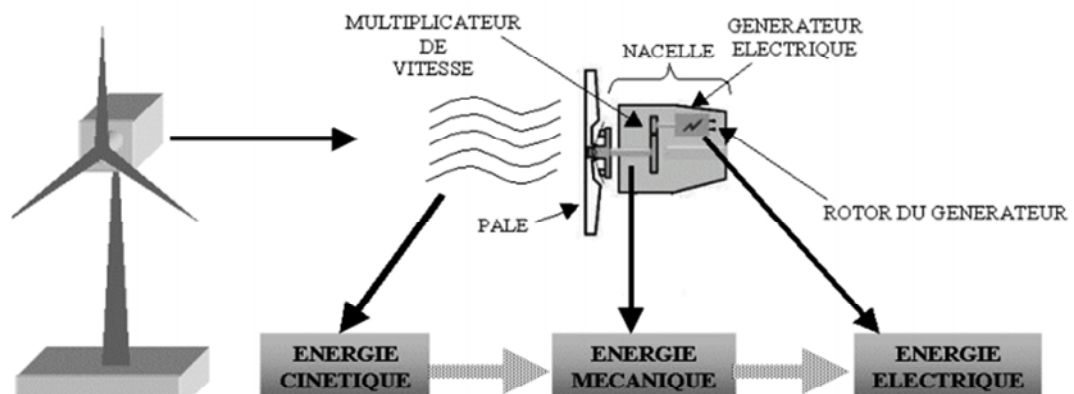


Figure (I.2) : Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW [7].

I.8. Principe de l'éolienne

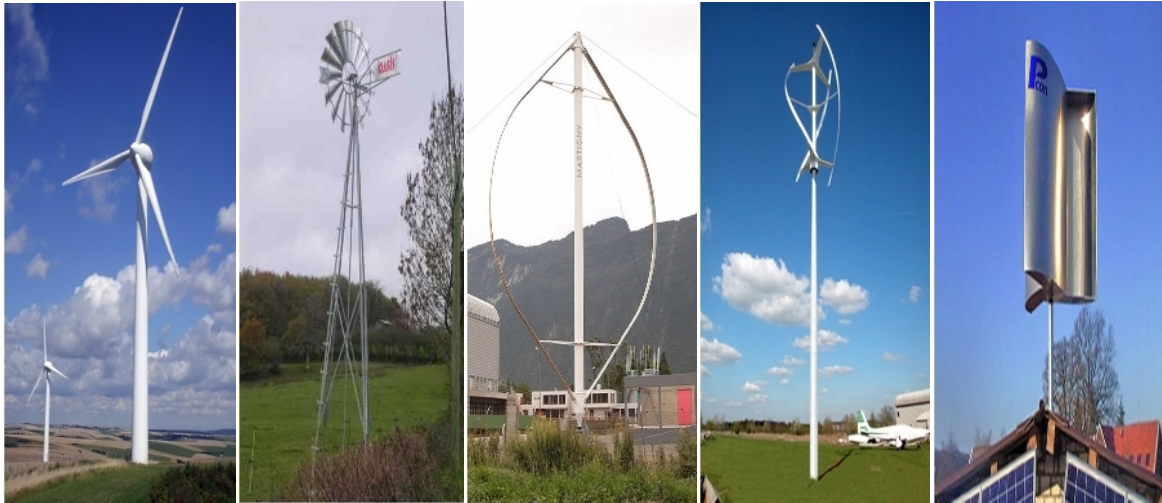
Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.



Figure(I.3) : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.9. Différents types d'éoliennes

Dans la littérature, on classe les éoliennes en deux types sur le plan de structure, le premier type regroupe les éoliennes à axe horizontal et le second regroupe les éoliennes à axe vertical.



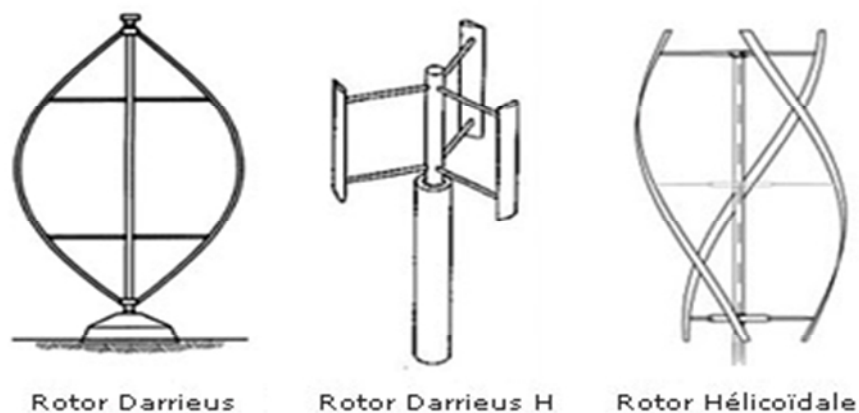
1. Éoliennes à axe horizontal

2. Éoliennes à axe vertical

Figure (I.4) : Technologies d'éoliennes.

I.9.1. Éoliennes à axe vertical

Plusieurs familles de technologies à axe vertical ont été imaginées et réalisées, mais, aujourd'hui, elles sont plutôt marginales. La figure (I.5) montre les principales technologies.



Rotor Darrieus

Rotor Darrieus H

Rotor Hélicoïdale

Figure (I.5) : Technologies d'éoliennes à axe vertical.

Les éoliennes à axe vertical remplacent un peu aux roues hydrauliques. Elles sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

- Le rotor de Savonius;
- Les éoliennes de Darrieus.

Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais elles sont très vite disparues du marché du fait de leur faible rendement et des fluctuations importantes de puissance provoquées [1][5].

Les avantages :

Les avantages théoriques d'une éolienne à axe vertical sont :

- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.
- Elle permet de placer la génératrice, le multiplicateur, ... à terre, et on n'a pas besoin de munir la machine d'une tour.

Les inconvénients :

Les inconvénients principaux d'une éolienne à axe vertical sont :

- Les vents sont assez faibles à proximité de la surface du sol.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. (ainsi, il faut par exemple pousser les éoliennes de Darrieus pour qu'elles démarrent. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).
- Pour remplacer le palier principal du rotor, il faut enlever tout le rotor.

Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur.

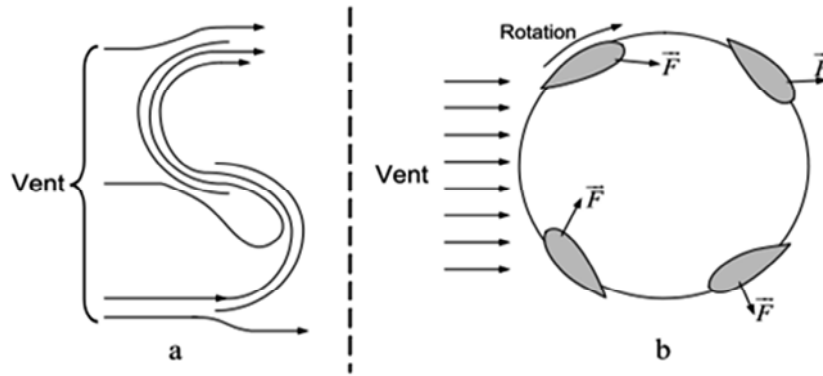


Figure (I.6) : Principe de rotor de savonius et de l'incidence variable.

I.9.2. Éoliennes à axe horizontal

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal. Elles sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de pâles profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant un dispositif mécanique tel qu'un générateur électrique. Ces machines présentent généralement un nombre de pâles compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts).

On classe les éoliennes à axe horizontal selon la vitesse de rotation du rotor en deux types: les éoliennes lentes et les éoliennes rapides.

Les éoliennes lentes sont munies d'un grand nombre de pâles (entre 20 et 40). Leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multi-pâles sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant, elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau.

Les éoliennes rapides ont un nombre de pâles assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pâles. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de

démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible.

En 1990, une nouvelle génération moderne des éoliennes à axe horizontal placées en mer, et furent appelées les éoliennes Offshores figure (I.7).



Figure (I.7) : Éoliennes offshores.

I.10. Constitution d'un aérogénérateur

Une éolienne "classique" se compose de plusieurs éléments principaux : figure (I.8)

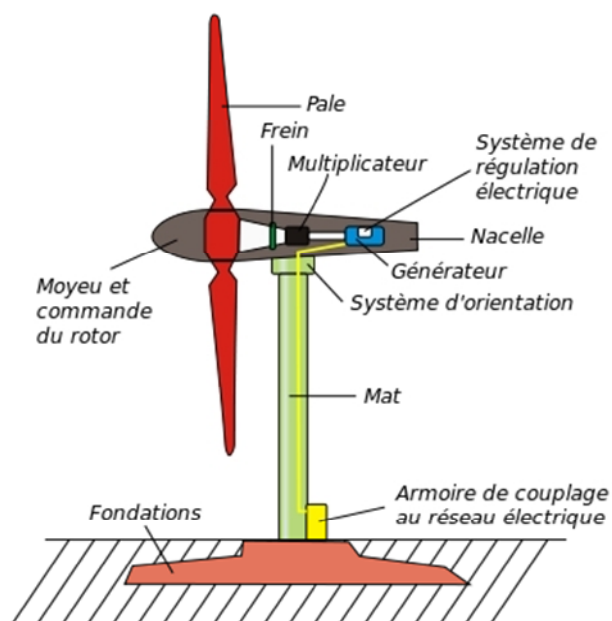


Figure (I.8) : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur.

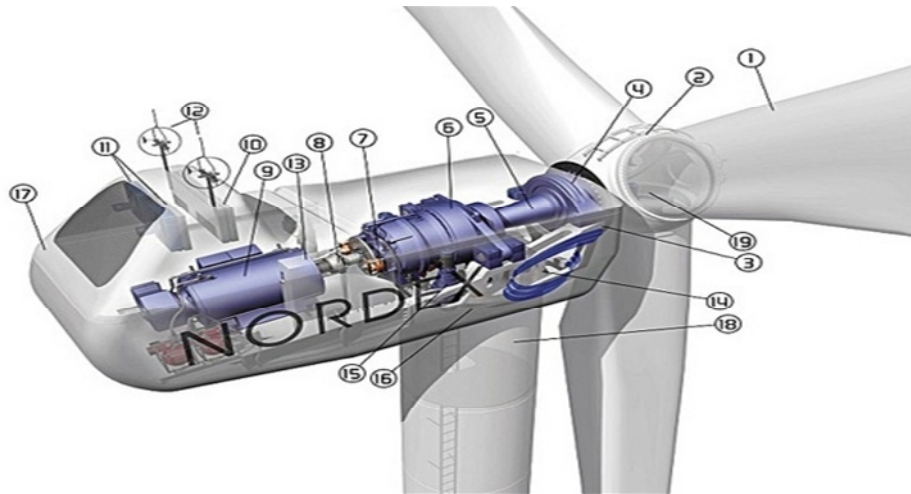


Figure (I.9) : *Éléments constituant une éolienne Nordex [8].*

- 1) Les pales de rotor sont faites de plastique renforcé de fibre de verre.
- 2) Le moyeu du rotor en fonte.
- 3) La structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
- 4) Paliers du rotor à double rangée de billes.
- 5) L'arbre de rotor en acier haute résistance.
- 6) Multiplicateur de vitesse.
- 7) Le frein à disque est équipé de deux étriers de frein et est situé sur la boîte de vitesse.
- 8) Accouplement flexible du générateur.
- 9) Génératrice asynchrone refroidie à l'eau.
- 10) Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur-génératrice.
- 11) Les ventilateurs chargés d'évacuer la chaleur encaissée par le liquide de refroidissement.
- 12) Système de mesure du vent (anémomètre et girouette).
- 13) Système de commande surveillance et pilote la turbine.
- 14) Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.
- 15) Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.
- 16) Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.
- 17) Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.
- 18) Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possible).
- 19) Le moyeu se compose de 3 mécanismes indépendants, dirigés par des moteurs électriques.

I.11. Taille des éoliennes à axe horizontal

La taille des éoliennes augmente avec la quantité de puissance électrique fournie par l'éolienne. Elle est liée directement à l'architecture et la taille des éoliennes. La figure (I.10) montre le développement de la croissance sur la taille des éoliennes en relation avec la puissance électrique délivrée au cours des dernières décennies

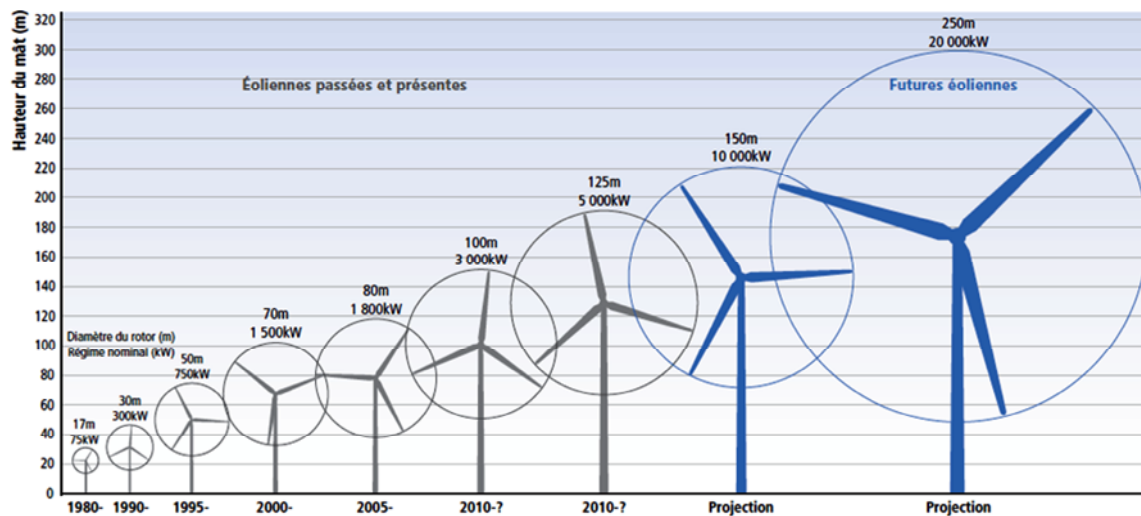


Figure (I.10) : Evolution de la taille des éoliennes avec la puissance fournie.

En effet, les éoliennes ont différentes tailles, Les progrès en science des matériaux ont permis la fabrication de pales plus légères et plus solides ainsi que l'amélioration de la conception des tours et des fondations, ce qui permet la construction d'appareils de plus en plus imposants. En 2005, les éoliennes de 1800 kW étaient la dernière nouveauté. Aujourd'hui, des appareils individuels de 8 et 12 MW sont en production commerciale [2]. Dans ce qui suit, notre étude se portera spécialement sur les éoliennes rapides.

I.12. Bilan des forces sur une pale

La figure (I.11) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représenté par le vecteur V . Le vecteur V_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée V_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force F_{res} qui se décompose en une poussée axiale F_{ax} directement compensée

par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation F_{rot} qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

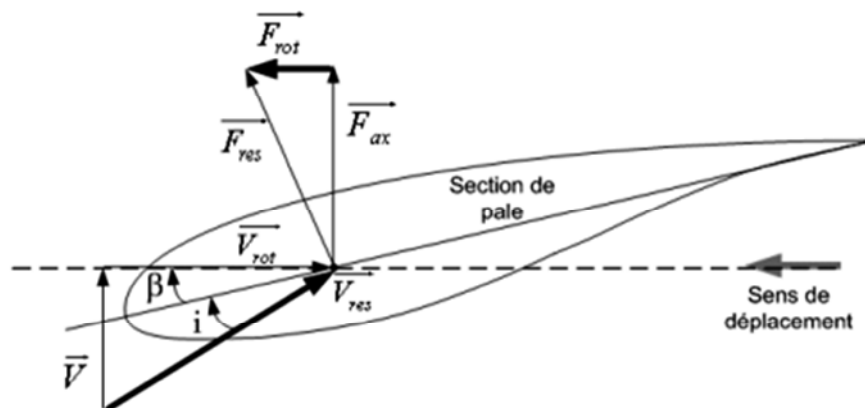


Figure (I.11) : bilan des forces exercées sur une pale.

I.13. Caractéristique du vent et des turbines

I.13.1. Loi de Betz

La théorie globale établie par Betz suppose que l'éolienne est placée dans une aire animée à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini à l'aval d'une vitesse V_2 [1] [2] [3].

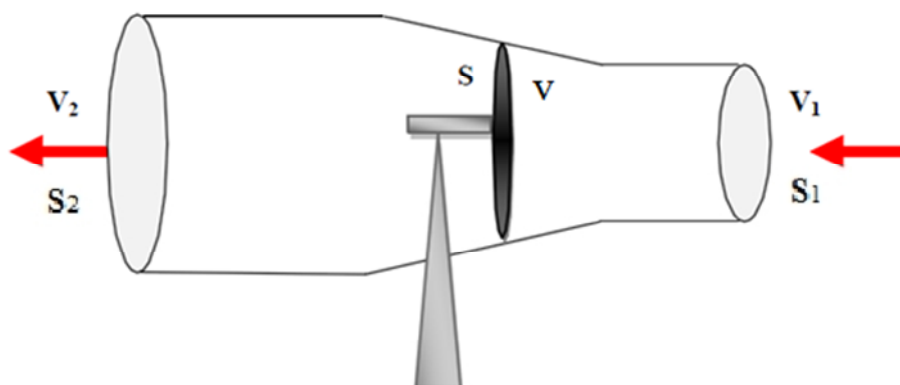


Figure (I.12) : Représentation du tube de courant d'air.

L'écoulement amont est supposé uniforme de vitesse V_0 . Dans le cas d'une éolienne, le flux d'air traversant le disque rotor de surface S est ralenti et lui fournit de l'énergie figure I.12. On a donc naturellement :

$$V_1 > V > V_2$$

La loi de conservation de la quantité de mouvement donne les égalités suivantes

$$S_1 \cdot V_1 = S \cdot V = S_2 \cdot V_2 \quad (\text{I.2})$$

En notant ρ la masse volumique de l'air (en kg/m^3), la puissance absorbée par le rotor s'exprime sous la forme suivante :

$$P_t = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I.3})$$

La variation de l'énergie cinétique de la masse d'air par seconde est donnée par :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{I.4})$$

I.13.2. Coefficient de puissance

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , soit :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{I.5})$$

En dérivant l'expression de la puissance P_t par rapport à la vitesse V_2 et en étudiant sa variation, on obtient alors une seule racine physique correspondant au maximum de la puissance absorbée par le rotor :

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \quad (\text{I.6})$$

$$P_{max} = \rho S \left(\frac{2}{3} V_1 \right)^2 \left(\frac{2}{3} V_1 \right) = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho S V_1^3 \right) = \frac{1}{2} \rho C_p S V_1^3 \quad (\text{I.7})$$

$$C_{p_{\max}} = \frac{16}{27} = 0.593$$

$C_{p_{\max}} = 0.593$, Représente la fraction maximale de l'énergie passant dans le tube de courant théoriquement récupérable.

Etant donné que l'aérogénérateur ne peut extraire qu'une partie de la puissance, il faut définir un coefficient de puissance (C_p) correspondant au rapport de la puissance extraite par le rotor de l'aérogénérateur à la puissance disponible dans l'énergie éolienne [3] :

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3} \quad (\text{I.8})$$

On aboutit à la limite de Betz, qui caractérise la limite maximale de l'énergie, due à la masse d'air en amont, susceptible d'être captée par une éolienne [3].

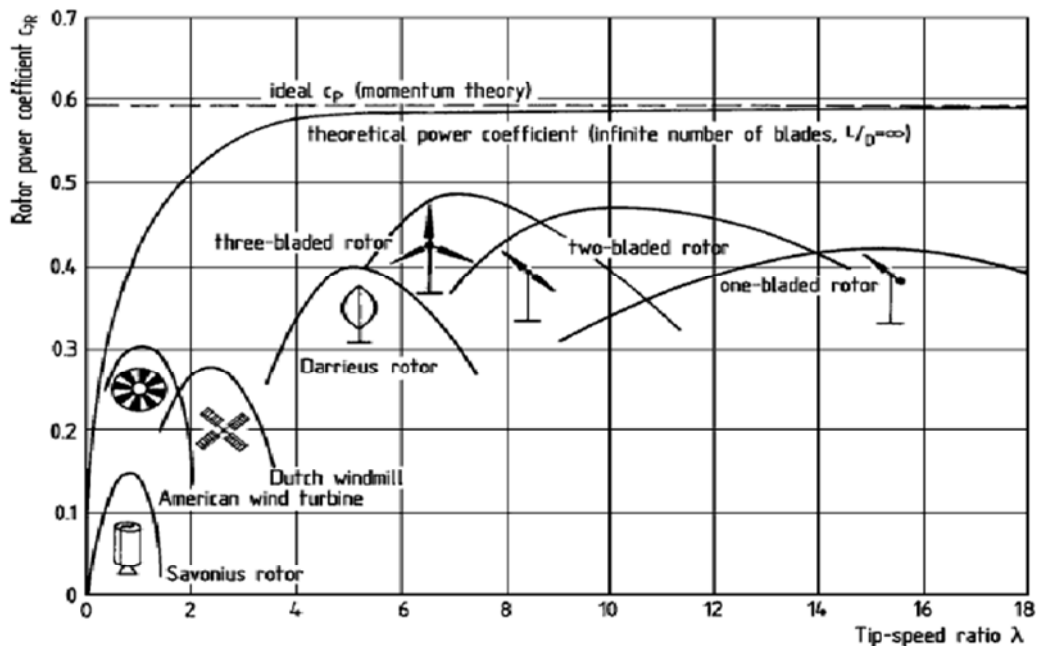


Figure (I.13) : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car, leur coefficient de puissance figure (I.13) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 4 m/s [1][3].

I.14. Technologies d'éoliennes

I.14.1. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

Pour garantir un captage maximal (optimal) de l'énergie incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent et l'angle d'incidence des pales.

La plupart des turbines éoliennes utilisent deux principes de régulation aérodynamique pour contrôler la vitesse de l'éolienne par rapport à la vitesse du vent.

I.14.2. Système d'orientation des pales (pitch)

Le principe de ce système est basé sur la variation de l'angle de calage des pales (variation de l'angle d'incidence). En général, la modification de l'angle de calage de la pale de l'éolienne permet quatre actions distinctes:

- le démarrage à une vitesse du vent plus faible;
- l'optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue entre les limites $[V_D \quad V_N]$;
- la régulation par limitation de la puissance pour $V > V_N$;
- la protection de l'éolienne contre les vents trop violents, par la mise en « drapeau » des pales de l'hélice.

On remarque que ce système intervient dans le fonctionnement de la turbine, par la variation du calage de manière prépondérante depuis le démarrage et dans le régime de régulation de vitesse jusqu'au phénomène de décrochage aérodynamique de la turbine.

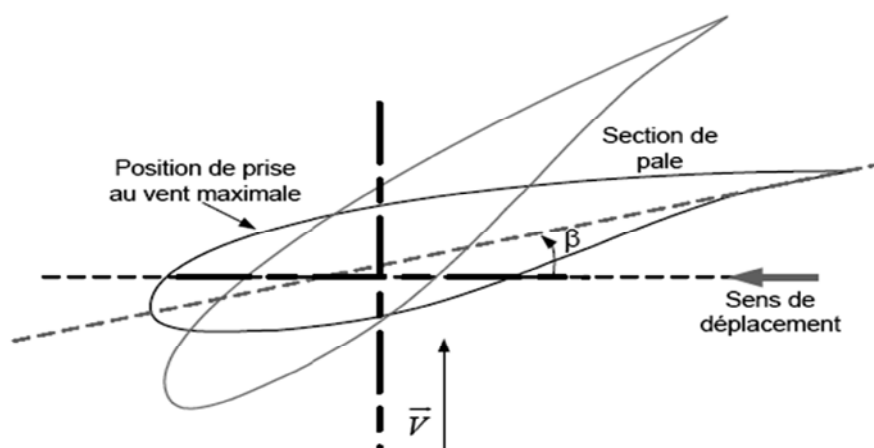


Figure (I.14) : Variation de l'angle de calage d'une pale [2][3].

I.14.3. Système à décrochage aérodynamique (stall)

Il utilise une méthode passive. L'augmentation de la vitesse relative du vent s'accompagne automatiquement d'une diminution de l'angle de calage afin de permettre le décrochage aérodynamique de la turbine aux vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale. En comparaison avec les turbines à angle de calage variable, les avantages sont les suivants :

- Une structure plus simple du rotor.
- Une maintenance plus aisée et un contrôle simple et efficace de la puissance.

Cette solution est utilisée surtout quand la génératrice et le couplage conduisent à une vitesse de rotation peu variable.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante.

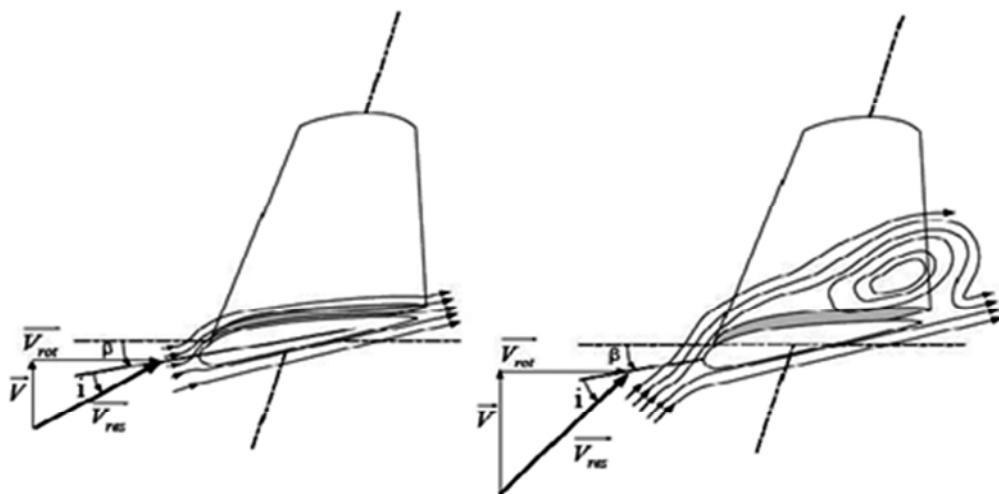


Figure (I.15) Flux d'air sur une pale profile (stall) [1][2].

I.15. Modélisation du système (turbine - multiplicateur - arbre)

Les différents éléments d'un système éolien classique sont présentés à la figure (I.16). Il est donc composé d'une aéroturbine qui transforme l'énergie mécanique, d'un multiplicateur (G) de vitesse qui permet d'augmenter la vitesse de rotation et de diminuer le couple et d'un générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Le dispositif qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G [2],[3].

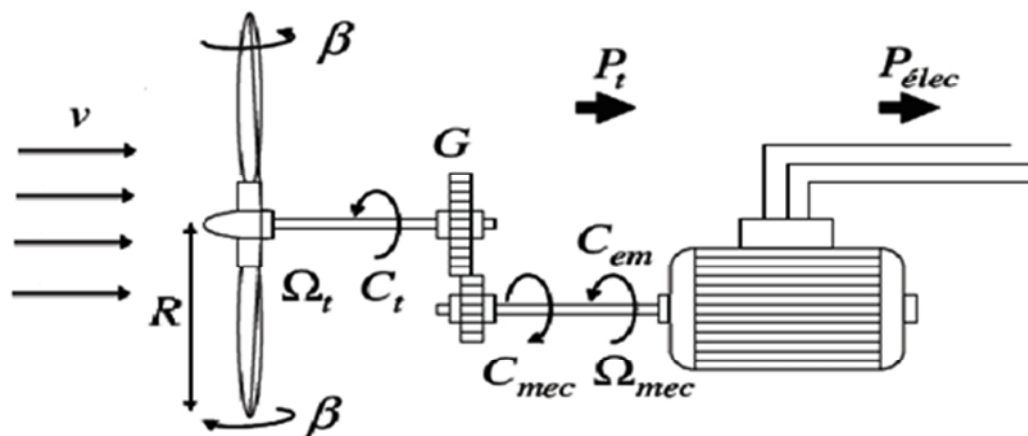


Figure (I.16) : Les différents éléments d'un système éolien.

I.15.1. Modèle de la turbine

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante [3]:

$$p_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (I.9)$$

Où

ρ : la densité de l'air.

S : la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

v : la vitesse du vent.

En combinant les équations (1.8), (1.9). La puissance mécanique P_t disponible devient

$$p_t = C_p(\lambda, \beta) \cdot p_v \quad (\text{I.10})$$

$$p_t = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_t^3 \quad (\text{I.11})$$

Le ratio de la vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V} = \frac{\Omega_{mec} \cdot R}{G \cdot V_1} \quad (\text{I.12})$$

Où

Ω_t : est la vitesse de la turbine.

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. Le modèle donné ci-dessus correspond à la turbine E-40 proposée par le constructeur allemand ENERCON dont la puissance nominale est de 1.5MW

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\left(\frac{-c_5}{\lambda_i} \right)} + C_6 \lambda \quad (\text{I.13})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{I.14})$$

Le couple mécanique sur l'axe de la turbine est donné par la relation suivante:

$$C_t = \frac{p_t}{\Omega_t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot C_p \rho \pi R^2 V^3}{\Omega_t} \quad (\text{I.15})$$

Le schéma bloc qui représente la turbine éolienne est illustré sur la figure (I.20)

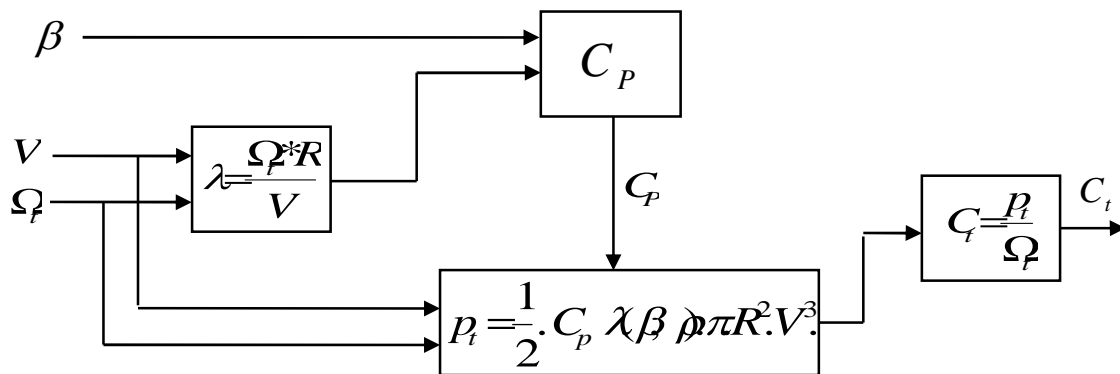


Figure (I.17) : Modèle de la turbine éolienne 1.5MW.

I.15.2. Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

$$C_{mec} = \frac{C_t}{G} \quad (I.16)$$

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur comme ci-dessous

$$\Omega_f = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (I.17)$$

Avec :

Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine.

Ω_{mec} : Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.

I.15.3. Modélisation de l'arbre de la turbine

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivante

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} + C_{em} - f \cdot \Omega_{mec} \quad (I.18)$$

Où :

J : Inertie totale des parties tournantes (Kgm^2).

f : Coefficient de frottements visqueux.

C_{em} = Couple électromagnétique du générateur en ($N.m$).

En fonctionnement générateur le couple électromagnétique C_{em} a un signe négatif.

L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur c'est-à-dire :

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (I.19)$$

Où :

G : Le gain du multiplicateur

J_g : L'inertie de la génératrice électrique.

I.15.4. Le schéma bloc de l'association (turbine - multiplicateur - arbre)

Le schéma bloc suivant représente le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine [3].

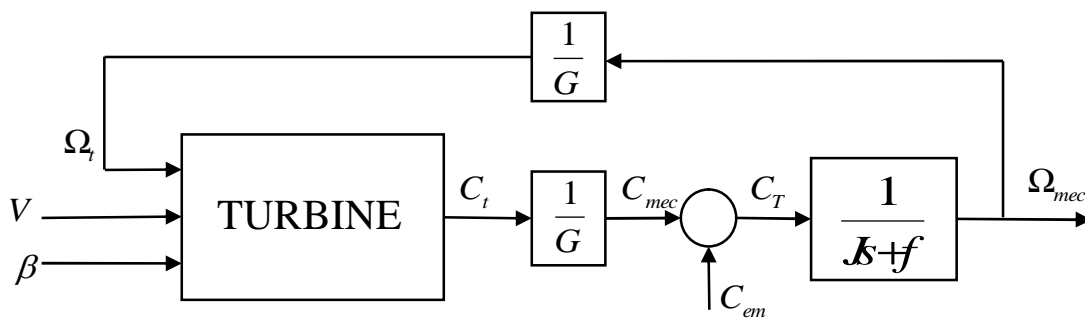


Figure (I.18) : Modèle de l'association (turbine - multiplicateur - arbre).

I.16. Les résultats de simulation

I.16.1. Simulation du coefficient de puissance (C_p)

L'exemple donné ci-dessus correspond à la turbine E-40 proposée par le constructeur allemand ENERCON dont la puissance nominale est de 1.5MW.

À partir de l'équation (I.13) et (I.14) de coefficient de puissance C_p

Les six coefficients définis $C_1=0.5176$ $C_2=116$ $C_3=0.4$ $C_4=5$ $C_5=21$ $C_6=0.0068$ dépendent de la turbine précédente.

Les caractéristiques de C_p en fonction du ratio de vitesse pour différentes valeurs de l'angle de calage ($0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$), sont illustrées sur la figure (I.20). La valeur maximale de ($C_{p_{max}} = 0.48$) est atteinte pour $\alpha = 0$ et $\lambda = 8.1$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur nominale λ_{nom} [3] [5].

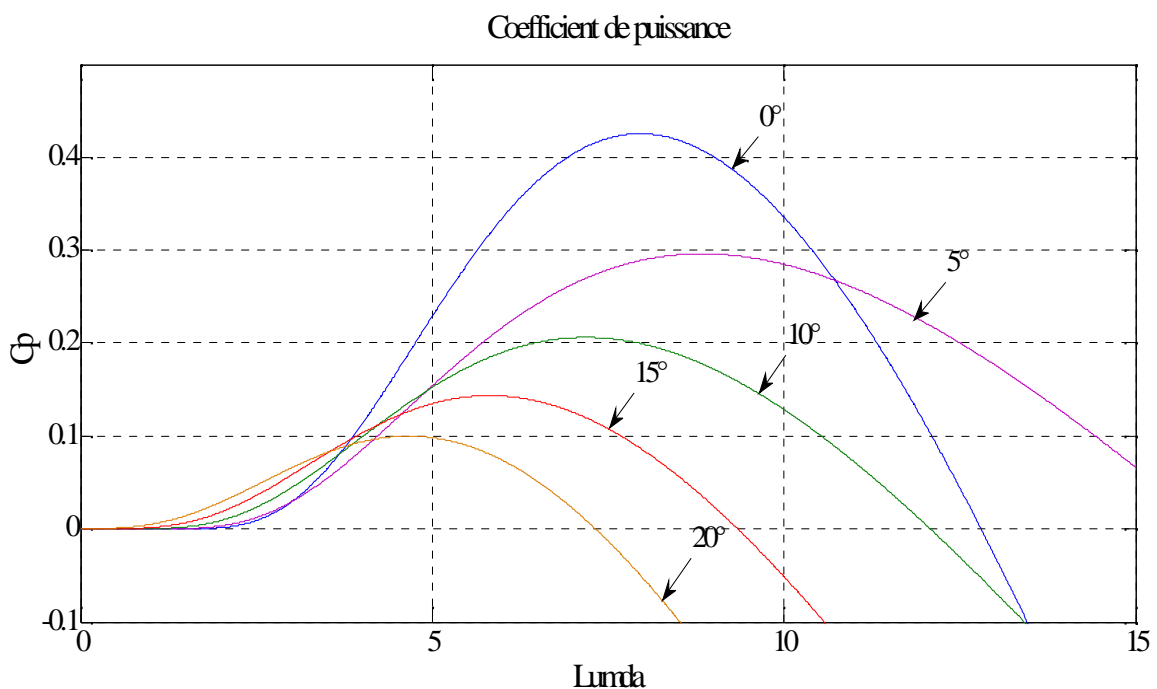


Figure (I.19) : Coefficient de puissance.

Nous remarquons que l'augmentation de α permet de dégrader le coefficient C_p , et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne. Donc le coefficient de puissance consiste à la commande de l'angle de calage α .

I.16.2. Simulation de la turbine

Le schéma bloc suivant représente le modèle de l'association « turbine - multiplicateur - arbre ».

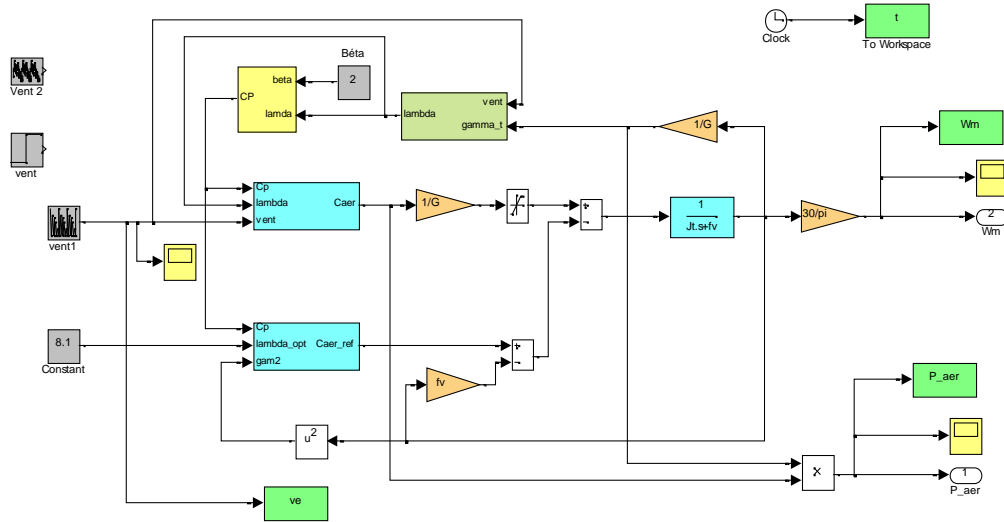


Figure (I.20) : Schéma bloc de la « turbine - multiplicateur - arbre ».

I.16.3. Résultats de simulation de la turbine

Les figures ci-dessous représentent les résultats de simulation de schéma bloc de la turbine figure (I.20) pour une vitesse de vent une fois stable et une autre fois variable.

- *Simulation pour une vitesse de vent fixe*

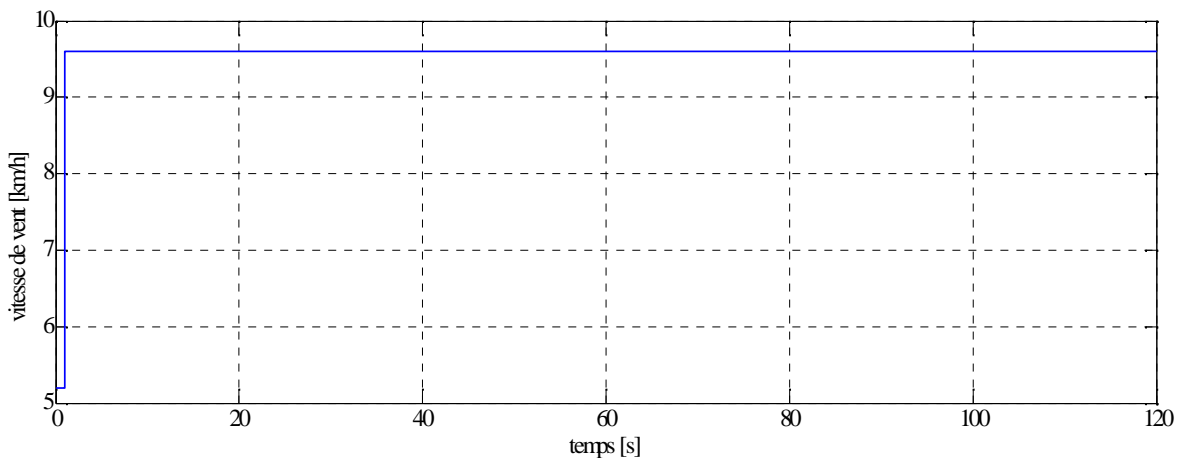


Figure (I.21) : Profil de vent (vitesse fixe).

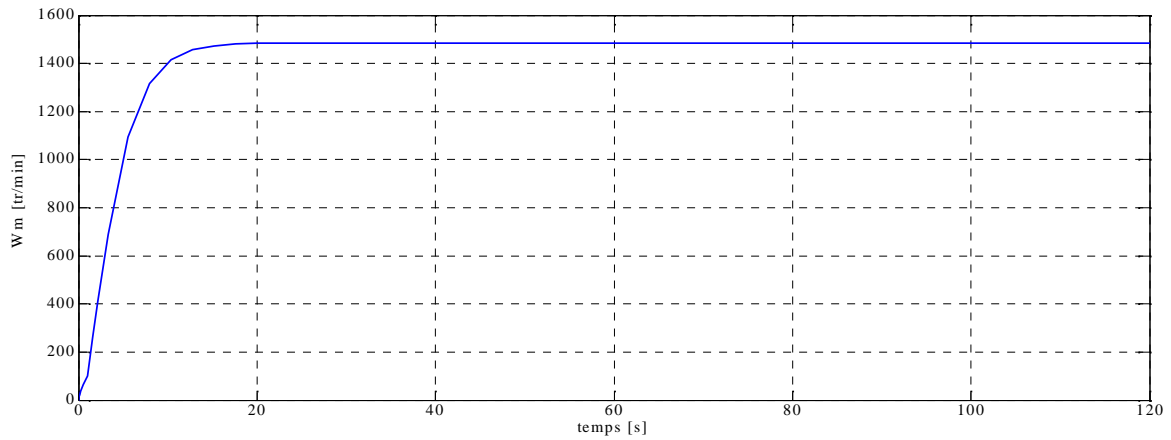


Figure (I.22) : puissance turbine de 1.5MW pour une vitesse fixe.

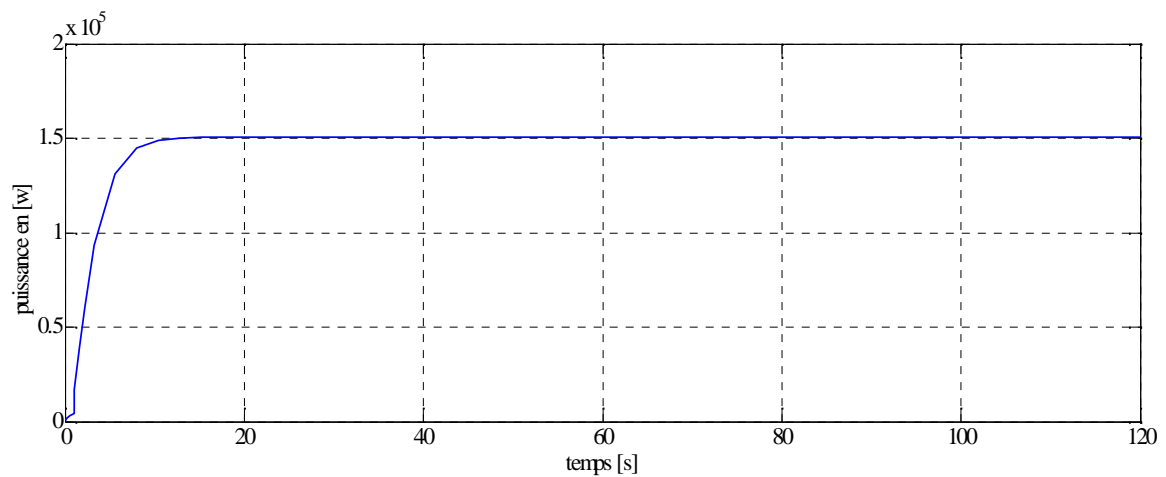


Figure (I.23) Vitesse d'entrainement de la turbine tr /min pour une vitesse fixe.

- **Simulation pour une vitesse de vent variable.**

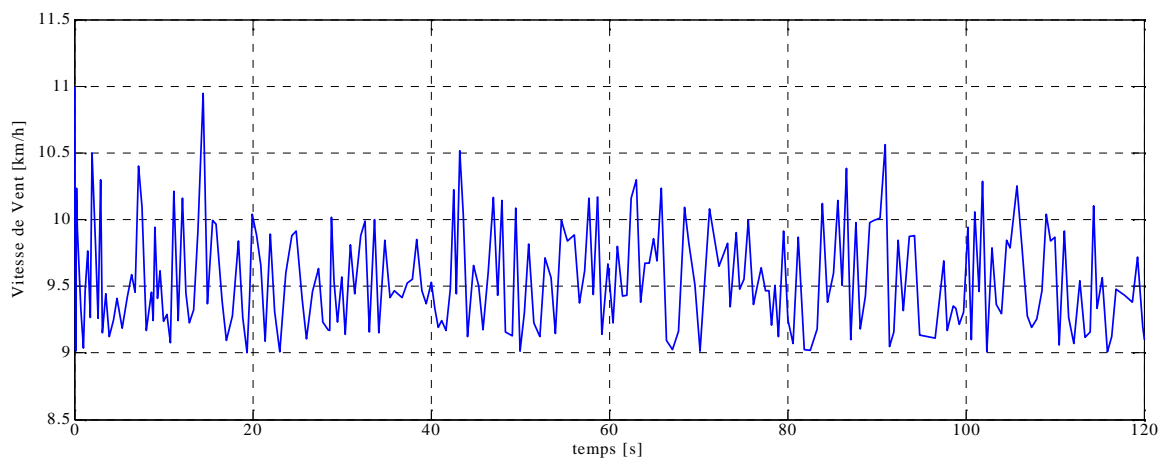


Figure (I.24) : Profil de vent (vitesse variable).

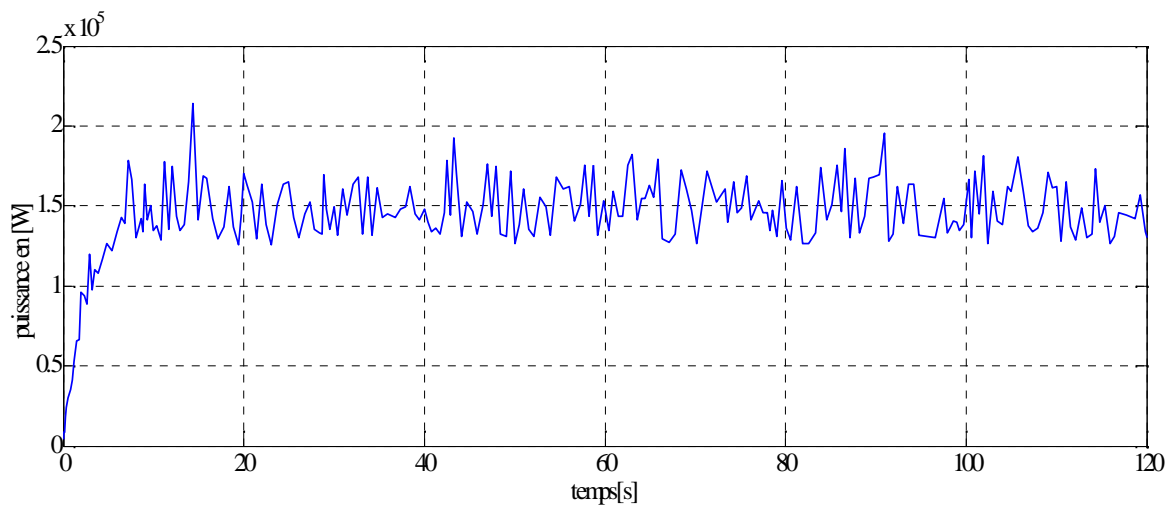


Figure (I.25) : puissance turbine de 1.5 MW, pour une vitesse variable.

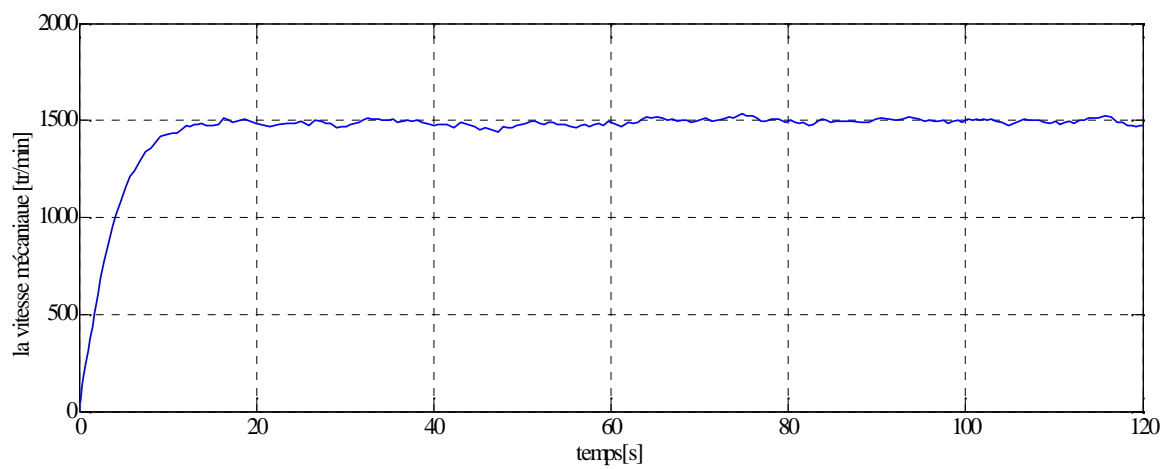


Figure (I.26) : Vitesse d'entraînement de la turbine tr /min pour une vitesse variable.

I.17. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différents types d'énergie renouvelables et particulièrement de l'énergie éolienne, le gisement éolien Algérien a été brièvement présenté. Et nous avons vu également les différents types d'éoliennes utilisées pour la production d'énergie électrique. Nous avons décrit de façon explicite les divers éléments constituant la partie aérodynamique de la chaîne de production éolienne. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz) et aussi les systèmes de régulation mécanique de la vitesse de rotation de l'éolienne "pitch" et "stall". Nous avons établi un modèle mathématique de la turbine, du multiplicateur et de l'arbre à partir de ses équations caractéristiques. Finalement nous avons illustré le modèle de l'association « turbine - multiplicateur - arbre » par un seul schéma bloc.

CHAPITRE II

ETUDE ET SIMULATION DE LA MSAP

II. ETUDE ET SIMULATION DE LA MSAP

II.1. Introduction :

Dans le domaine de la conversion électromécanique d'énergie, les aimants permanents ont depuis longtemps le mérite de constituer une source d'excitation appropriée notamment pour les actionneurs de la robotique et les machines de faible puissance. Les machines à aimants permanents offrent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines électriques à savoir :

- Une source d'excitation indépendante intégrée dans la machine.
- Un procédé de refroidissement généralement moins complexe et moins onéreux qui ne concerne que le stator.
- Une faible inertie.
- Une fiabilité accrue due à l'absence de contact glissant.
- Des pertes rotoriques faibles.

La modélisation de ces machines présente un intérêt primordial aussi bien pour le concepteur que pour l'automaticien. La représentation du processus par les modèles mathématiques constitue une étape très importante dans l'asservissement des systèmes.

Afin d'élaborer une structure de commande, il est important de disposer d'un modèle mathématique représentant fidèlement les caractéristiques du processus. Ce modèle ne doit pas être trop simple pour ne pas s'éloigner de la réalité physique, et ne doit pas être trop complexe pour simplifier l'analyse de la synthèse des structures de commande [8].

Dans ce chapitre, nous présentons un rappel théorique sur les éléments essentiels des matériaux magnétiques utilisés dans l'excitation de certaines structures de machines synchrones. Puis nous verrons la modélisation de la MSAP en simplifiant le modèle à l'aide de la transformation de Park. La validation du modèle proposé est testée à l'aide du logiciel MATLAB-Simulink.

II.2. Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents

II.2.1. Aimants permanents

II.2.1.1. Définition

Un aimant permanent est un matériau ferromagnétique qui possède une aimantation rigide susceptible de créer un champ magnétique extérieur et de maintenir en permanence une force magnétique [3].

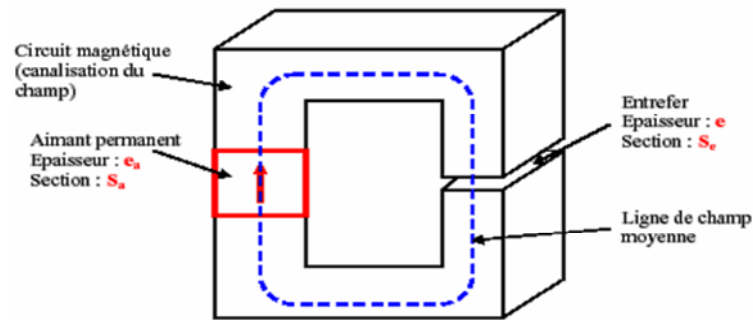


Figure (II.1): Circuit magnétique associé à un aimant.



Figure (II.2): machine synchrone à aimants.

II.2.1.2. Caractéristiques générales des aimants permanents

Les aimants permanents sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe de désaimantation du deuxième quadrant du plan B-H figure (II.3). Cette courbe est caractérisée par :

- L'induction rémanente B_r , c'est-à-dire l'induction résiduelle en circuit fermé, c'est une indication de la puissance potentielle de l'aimant.
- Le champ coercitif de l'induction H_{cb} qui est le champ démagnétisant annulant l'induction résiduelle, plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable.
- Le produit d'énergie volumique $(BH)_{\max}$.
- Les valeurs H_m et B_m du point de fonctionnement optimal M correspondant à $(BH)_{\max}$

On peut classer les différents types d'aimants en fonction de ces paramètres.

En plus de ces propriétés magnétiques, il est indispensable de connaître le point de curie qui représente la température au-delà de laquelle l'aimant perd ces propriétés magnétiques. Il est indispensable de connaître aussi les propriétés mécaniques et physico-chimiques, le prix, la perméabilité réversible, ainsi que la caractéristique magnétique.

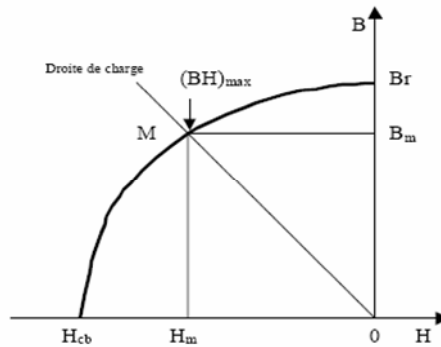


Figure (II.3): Illustration d'une courbe B-H des aimants [3][8].

II.2.1.3. Différents types d'aimants permanents

Les matériaux utilisés au niveau des machines électriques, du point de vue de leurs propriétés magnétiques peuvent se classer en deux grandes familles:

- Les matériaux magnétiques durs qui sont des aimants permanents ;
- Les matériaux magnétiques doux qui ne présentent des propriétés magnétiques qu'en présence d'une excitation extérieure.

Il existe maintenant une grande variété de matériaux pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont très diverses. Ce sont, soit des matériaux céramiques, soit des matériaux métalliques.

Parmi les aimants les plus utilisés, on peut citer deux types :

- Les aimants permanents "terres rares" (SmCO_5 et Sm_2C_{17}), NdFeB ,...
- Les aimants à alliages métalliques, ferrites (aimants robustes et peu coûteuses) Alnicos.

On note que les aimants permanents du type terres rares (SmCo , NdFeB) sont les plus utilisés, car ils présentent une induction rémanente (B_r) et un champ coercitif H_c (kA/m) plus élevés.

Ces aimants sont très appréciés par les constructeurs, car ils permettent une réduction importante du poids et de l'encombrement de la machine pour une même puissance, puisque ils possèdent une puissance massique élevée. En effet, la puissance électrique

d'une machine à aimants permanents est directement proportionnelle à la densité d'énergie emmagasinée dans les aimants.

La courbe ci-dessous présente la courbe désaimantation des différents aimants cités.

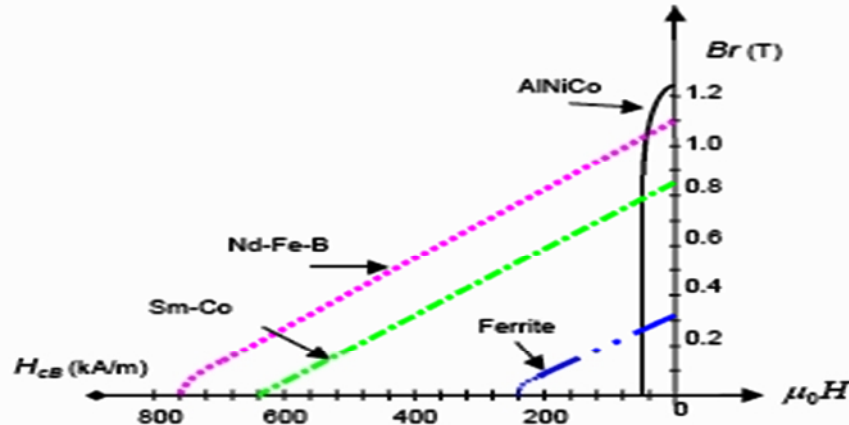


Figure (II.4) : Courbes de désaimantation des principaux types d'aimants [10][11].

II.2.2. Principales structures de la MSAP

Le rotor d'un moteur synchrone à aimant permanent a une conception spéciale pour donner les caractéristiques exigées. Il existe deux structures de la MSAP selon la disposition des aimants avec les matériaux magnétiques : l'une avec pièces polaires et l'autre sans pièces polaires.

Parmi ces deux catégories, un grand nombre de configurations sont envisageables. Ces différentes possibilités dépendent de la nuance, du sens de l'aimantation, des formes géométriques des aimants et de leurs dispositions au niveau du rotor [8].

La différence entre les deux structures citées précédemment réside dans le fait que les inductances synchrones ont des valeurs sensiblement moins élevées et les ondulations du couple sont moins importantes pour des machines sans pièces polaires que celle avec pièces polaires.

II.2.2.1. Structures sans pièces polaires (Pôles lisses)

Les aimants, en forme de barreaux élémentaires juxtaposés, sont directement fixés sur la surface du rotor grâce à des frettes figure (II-5). Le sens d'aimantation peut être radial figure (II.6.1), tangentiel figure (II.6.2) ou mixte figure (II.6.3), les structures à pôles lisses sont caractérisées par un entrefer assez large accentué par l'épaisseur des aimants et par celle de la frette de maintien. De ce fait, l'inductance statorique est plus faible que celle

d'une machine classique à rotor bobiné à pôles lisses. Il est alors difficile d'obtenir un couple massique important.

Ainsi, la réaction de l'induit est plus réduite, ce qui favorise une commande plus simple. De plus, pour une amélioration des performances des machines à aimants, l'utilisation des terres rares est plus recommandée pour cette structure [8][12].

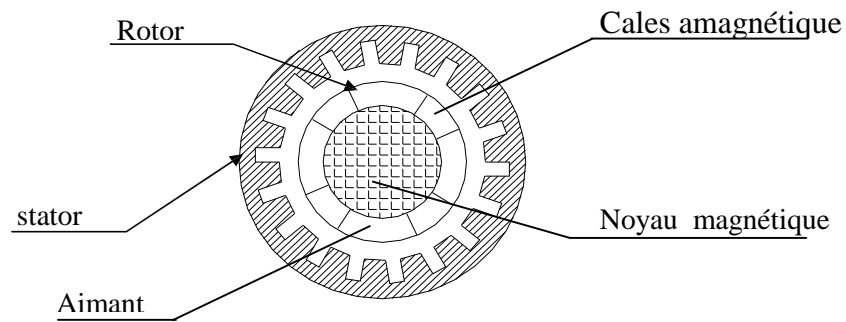


Figure (II.5) : Structures d'une machine à aimants permanents sans pièces polaires.

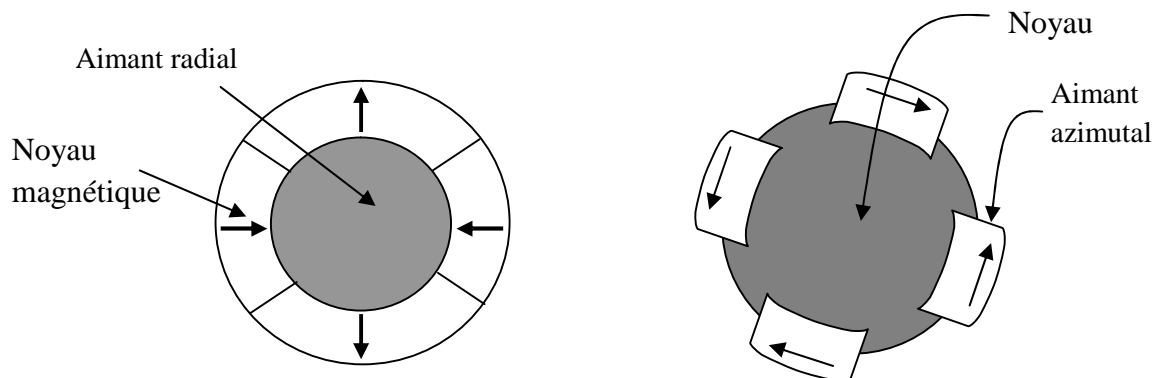


Figure (II.6.1) : Aimantation radiale.

Figure (II.6.2) : Aimantation tangentielle.

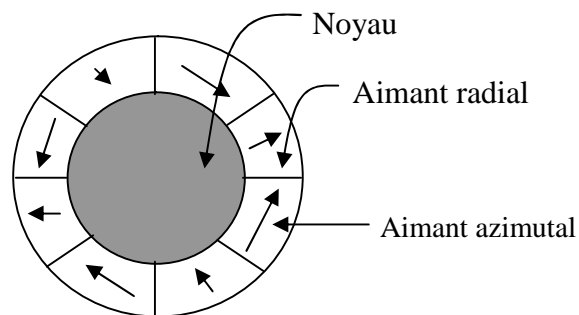


Figure (II.6.3) : Aimantation mixte [11].

II.2.2.2. Structures avec pièces polaires (Pôles saillants)

Comme dans les machines synchrones classiques à pôles saillants, la saillance a pour effet de produire une anisotropie au niveau du rotor dont la conséquence est de produire un couple réductant qui vient s'ajouter au couple d'interaction. A ce principal rôle que doivent assurer les pôles saillants dans les machines à aimants, un autre rôle peut leur être confié, c'est celui de la concentration de flux.

Les pièces polaires permettant également de fixer les aimants sans avoir à utiliser des frettes et de réduire de façon significative l'épaisseur équivalente de l'entrefer ainsi que le volume des aimants par rapport aux structures sans pièces polaires. Les aimants ferrites et à terres rares peuvent être utilisés.

Cependant, dans ce type d'inducteurs, la réaction d'induit est relativement plus importante [12].

- **Structure avec pièces polaires sans concentration de flux**

Généralement les aimants sont à aimantation radiale et placés sous des pièces polaires figure(II.7), afin de diminuer l'entrefer magnétique dans le but d'améliorer les performances de la machine. Par contre la réaction d'induit sera plus importante, et il faut en tenir compte lors du choix du type d'alimentation [8].

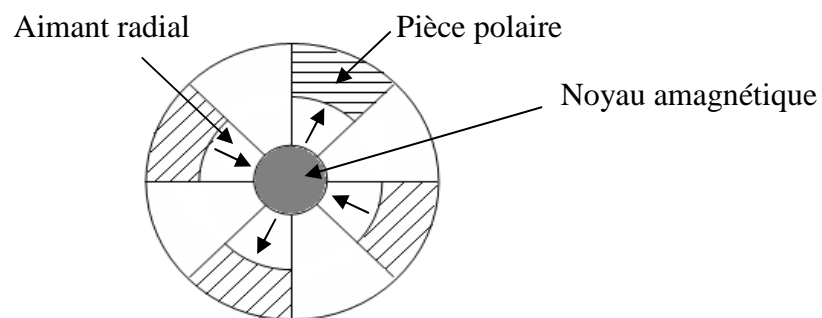


Figure (II.7) : Structure de rotor avec pièces polaires sans concentration de flux.

- **Structure avec pièces polaires et concentration de flux**

Elles permettent d'améliorer, le niveau de l'induction dans l'entrefer, donc le flux à vide et par conséquent le couple, grâce aux pièces polaires surtout pour les moteurs constitués d'aimants présentant une faible induction rémanente' ferrite [12] .

Il existe plusieurs catégories que l'on peut distinguer par l'existence des pièces

polaires et la disposition des aimants à l'intérieur du rotor (figure (II.8.1), figure (II.8.2)).

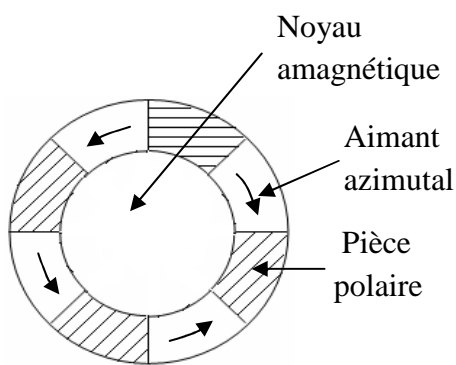


Figure (II.8.1) : Structure à aimantation azimutale.

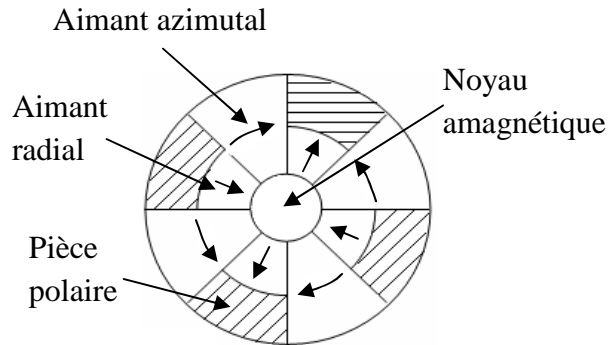


Figure (II.8.2) : Structure à aimantation mixte.

II.2.2.3. Structure à aimants insérés dans l'armature rotorique

Les aimants à aimantation radiale sont insérés entre les dents rotoriques (figure II.9). En plus de la simplicité de leur réalisation, ce type de structure permet d'augmenter le couple tout en diminuant le volume d'aimants en acceptant toutefois un certain taux d'ondulation.

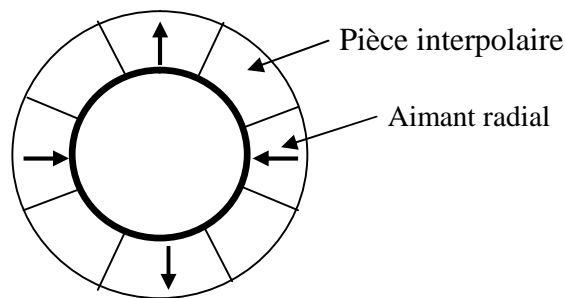


Figure (II.9) : Structure à aimants insérés dans l'armature rotorique [12].

II.2.2.4. Structure à aimants internes

La structure des inducteurs de ce type de machines est à géométrie complexe. Les aimants sont inclus dans le rotor (figure (II.10)). La robustesse mécanique de ces rotors permet d'atteindre de grandes vitesses de rotation pour des puissances importantes. Toutefois, une saturation apparaît dans les régions où sont encastrés les aimants.

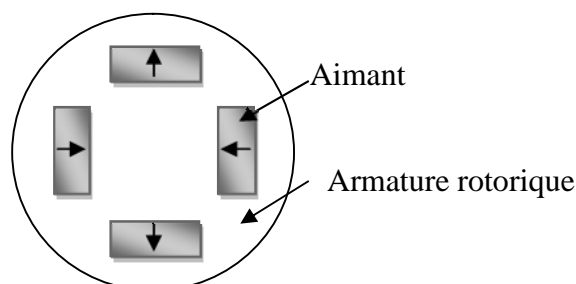


Figure (II.10) : Structure à aimants internes dans l'armature rotorique.

II.2.3. Principe de fonctionnement de la MSAP

Le fonctionnement de la machine synchrone à aimants permanents est beaucoup plus simple que celui du moteur à courant continu : le stator muni d'un enroulement polyphasé, triphasé dans la plus part des cas, est alimenté par un système de tensions et courants créant dans l'entrefer un champ d'induction tournante B_{ri} .

Le champ d'induction B_{ri} a tendance à attirer le rotor, lequel est muni d'aimants permanents produisant le champ d'induction B_r . De ce fait, les champs d'induction créés par le stator et le rotor ont tendance à s'aligner, raison pour laquelle un couple d'origine électromagnétique prend naissance [8][12].

Comparativement à la machine à courant continu, on voit que c'est le rotor qui joue le rôle d'inducteur (excitation), l'induit étant alors au stator. Le rotor se met à tourner à une vitesse angulaire ω_r correspondant à la pulsation ω_s de l'alimentation triphasée, ce qui justifie la désignation du moteur synchrone.

II.2.4. Les avantages et les inconvénients de la MSAP

Par rapport aux moteurs asynchrones, les machines à aimants présentent un facteur de puissance plus élevé.

La commande vectorielle du moteur asynchrone est sensiblement plus complexe que celle du moteur synchrone à aimants. En effet, dans le moteur à aimants, le flux rotorique est engendré par les aimants, alors que dans le cas du moteur asynchrone il doit être imposé à partir des grandeurs statorique.

Comparées aux machines synchrones classiques, c'est au niveau du volume de rotor que les machines à aimants sont privilégiées. En effet, elles sont capables d'apporter rusticité et compacité. De ce fait, les moteurs à aimants s'imposent dans des applications

nécessitant des performances dynamiques élevées dans la gamme des faibles et de moyennes puissances.

Le principal inconvénient de la machine à aimants est que son flux inducteur est difficile à régler de ce fait la commande du moteur est effectuée par action extérieure en particulier dans le cas d'inducteur à pôle saillants.

II.2.5. Comparaison entre la machine synchrone classique et la MSAP

Machine synchrone aimant permanent	Machine synchrone classique
<p>La MSAP n'exige pas d'excitation, possède un rendement élevé, grâce à l'absence des pertes par excitation et des contacts frottant.</p> <p>La MSAP n'exige aucun entretien, et se caractérise par une sécurité de fonctionnement plus élevée.</p> <p>L'absence d'inducteur à CC dans la MSAP rend la machine moins chère qu'une machine synchrone classique.</p>	<p>Dans la machine synchrone classique, l'excitation est nécessaire.</p> <p>le rendement est relativement faible, les systèmes balais présentent assez fréquemment des défaillances de plus l'entretien est exigé avec moins de sécurité.</p> <p>Elle possède trois modes de fonctionnement, à excitation optimale, sous excitée, et surexcitée, ce qui permet d'améliorer le facteur de puissance.</p>

Tableau (II.1) : La comparaison entre la MSAP et la machine synchrone classique [8].

II.3. Modélisation de la MSAP

II.3.1. Les hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier l'étude, la modélisation de la machine nécessite un certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'avoir des relations linéaires entre les flux et les courants.
- Nous négligeons l'hystérésis du circuit magnétique et les pertes par courants de Foucault.
- La variation des résistances en fonction de la température est négligeable.

- Nous admettons que les forces magnétomotrices sont à distribution spatiale sinusoïdale [4][8].

II.3.2. Structure générale d'une MSAP

La structure générale d'une machine synchrone à aimants permanents est présentée par la figure suivante [4]:

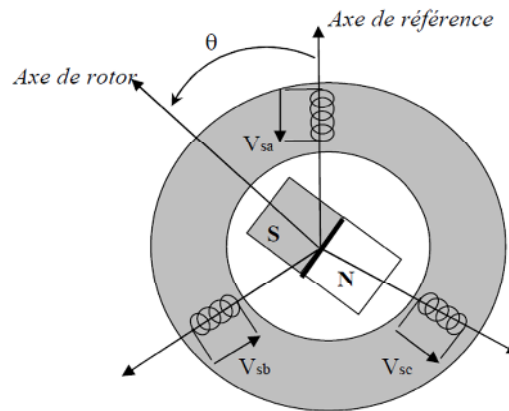


Figure (II.11) : Schéma de la MSAP.

Le stator comporte trois phases a, b et c identiques et décalées l'une par rapport à l'autre par un angle électrique de $(\frac{2}{3})$, par contre le rotor comprend deux axes caractérisés par :

- Un axe d'aimantation rotorique longitudinale (d) ;
- Un axe interpolaire en quadrature (q), déphase de $(\frac{\pi}{2})$ par rapport à l'axe (d) ;
- La position du rotor est repérée par l'angle électrique.

$$= \theta_0 + \omega t$$

θ_0 : L'angle électrique initial ;

ω : La pulsation des grandeurs électriques.

II.3.3. Equations électriques

Avec les hypothèses précédentes, les équations relatives au stator et au rotor dans le cas général d'une MSAP sans amortisseurs s'écrivent :

$$\begin{cases} [V] = [R_s] [i] + \frac{d[\]}{dt} \\ [\] = [L_s] [i] + \varphi_f \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$[V] = [V_a, V_b, V_c]^t$: vecteur tension statorique ;

$[i] = [i_a, i_b, i_c]^t$: vecteur courant statorique ;

$[R_s] = R_s [I]$; $[I]$: matrice identité ;

R_s : Résistance de phase statorique ;

$[L_s]$: Matrice inductance (propre et mutuelle statorique).

Donc le système [II.1] devient :

$$\begin{cases} V_a = R_s i_a + \frac{d \varphi_a}{dt} \\ V_b = R_s i_b + \frac{d \varphi_b}{dt} \\ V_c = R_s i_c + \frac{d \varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

II.3.4. Equation mécanique :

L'équation de la dynamique de la GSAP est donnée comme suite [3] :

$$C_m - C_{em} - C_f = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.3})$$

$$C_f = f_c \Omega$$

Avec :

$\Omega = \frac{\omega}{p}$: vitesse de rotation de la machine ;

C_m : Couple moteur ;

C_{em} : Couple électromagnétique ;

C_f : Couple de frottement ;

J : moment d'inertie de la machine tournante ;

p : nombre de paires de pôles ;

ω_r : Vitesse électrique du rotor ;

f_c : Coefficient de frottement.

II.3.5. Transformation de Park

Afin de supprimer la non linéarité du système d'équations différentielles, on fait des changements de variables qui réduisent la complexité de ce système.

Dans les machines électriques triphasées, ce changement de variable consiste à transformer les trois enroulements relatifs aux trois phases à des enroulements orthogonaux (d, q), tournant à une vitesse ω_r .

L'équation de Park traduit le passage du système triphasé au système biphasé (d, q), donnée par [4]:

$$\begin{aligned} [F_{abc}] &= [P(\theta)][F_{dqo}] \\ [F_{dqo}] &= [P(\theta)]^{-1}[F_{abc}] \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos & - \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(-\frac{2}{3}\right) & - \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(-\frac{4}{3}\right) & - \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Alors P^{-1} devient comme suit :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos & -\frac{2}{3} & -\frac{4}{3} \\ -\sin & -\frac{2}{3} & -\frac{4}{3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

L'angle θ est défini comme suit :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.7})$$

Tel que :

θ : Angle entre l'axe magnétique (a) et l'axe longitudinal (d) ;

ω : Vitesse de rotation du référentiel choisi.

Selon le choix de , on distingue :

• **Référentiel lié au stator**

Tant que le stator est fixe, la vitesse du repère de Park est :

$$\omega_p = \omega_s = 0$$

• **Référentiel lié au rotor**

Dans ce cas la vitesse du repère (d, q) est celle du rotor c'est à dire ω_r :

$$\omega_p = \omega_r$$

• **Référentiel lié au champ tournant**

La vitesse du repère de Park est celle du champ tournant :

$$\omega_p = \omega$$

ω : Pulsation de l'alimentation

II.3.6. Modèle de la MSAP dans le repère de Park

II.3.6.1. Equations des tensions

En prenant l'hypothèse que toutes les grandeurs homopolaires sont nulles, le passage du système triphasé au système (d, q) lié au rotor se fait en utilisant la transformation de Park [4].

$$[V_{dqo}] = [P(\theta)]^{-1} [V_{abc}] \quad (\text{II.8})$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos & -\frac{2}{3} & -\frac{4}{3} \\ -\sin & -\frac{2}{3} & -\frac{4}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Et après calculs, on trouve :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega_r \psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega_r \psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

II.3.6.2. Equations des flux

Le flux total qui traverse chaque bobine du stator peut être décomposé en flux propre de la même bobine et des flux mutuels provenant des autres bobines.

Au système (d, q) :

$$\begin{bmatrix} \lambda_{dqs} \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} \lambda_{abc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Après calculs, nous obtenons :

$$\begin{cases} \lambda_d = L_d i_{ds} + \lambda_f \\ \lambda_q = L_q i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

En remplaçant les expressions des flux λ_d et λ_q dans le système (II.10) nous obtenons le modèle de la MSAP :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_r \lambda_q \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{d}{dt} i_{qs} + \omega_r \lambda_d \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

λ_f : Flux dû aux aimants ;

R_s : Résistance d'une phase statorique ;

L_d : Inductance suivant l'axe d ;

L_q : Inductance suivant l'axe q ;

ω_r : Pulsation des tensions et des courants triphasés.

Pour passer du mode moteur au mode génératrice; on inverse le sens des courant i_d et i_q dans les repères de Park figure (II.12), et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme [4][8].

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s i_{ds} - L_d \frac{d}{dt} i_{ds} + \omega_r \lambda_q \\ V_{qs} = -R_s i_{qs} - L_q \frac{d}{dt} i_{qs} - \omega_r \lambda_d \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

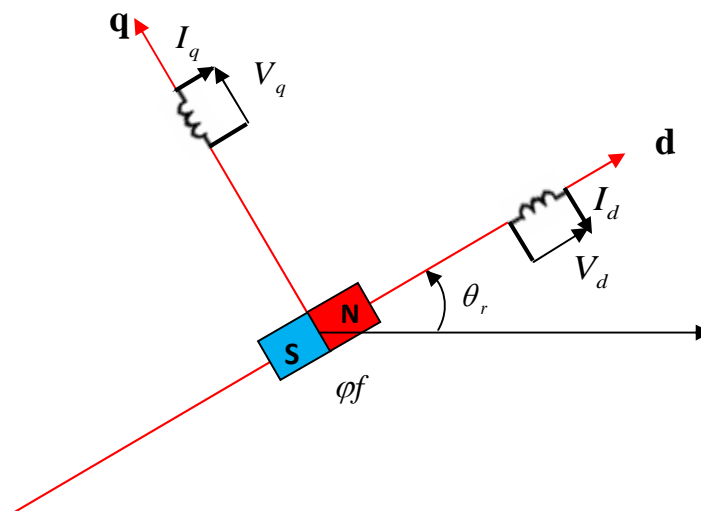


Figure (II.12) : Modèle de Park pour la MSAP.

II.3.6.3. Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{3}{2}P({}_d i_{qs} - {}_q i_{ds})$$

$$C_{em} = \frac{3}{2}P({}_d i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}) \quad (II.15)$$

Avec:

$\frac{3}{2}P {}_f i_{qs}$: Couple que l'on obtiendrait avec une machine à pôles lisses ;

$\frac{3}{2}P(L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}$: Couple supplémentaire dû à la saillance des pôles.

II.3.6.4. Equations d'état de la MSAP

Afin de trouver une résolution analytique et numérique pour le système d'équations du modèle, on peut écrire les équations électriques et l'équation mécanique sous formes d'équations d'état, en rassemblant les équations des courants et de la vitesse, on obtient le système d'état suivant [2] :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{\omega L_q}{L_d} i_q + \frac{1}{L_d} v_{ds} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{\omega L_d}{L_q} i_d + \frac{\omega L_f}{L_q} + \frac{1}{L_q} v_{qs} \\ C_{em} = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q + \omega \varphi_f] \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

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

$$[X^\bullet] = [A][X] + [B][V] \quad (\text{II.17})$$

$$[Y] = [C][X] + [D][V] \quad (\text{II.18})$$

Avec

$$[X] = [i_d \quad i_q]^T \quad \text{et} \quad [V] = [v_d \quad v_q \quad \varphi_f]$$

Les équations (3-36), peuvent s'écrire sous la forme matricielle (3-44).

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_{ds} \\ \frac{d}{dt} i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & \frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ \varphi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

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

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q}{L_d} \\ -\frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

II.3.7. Modèle de la GSAP en charge

La génératrice alimente dans ce cas une charge électrique (R_{ch} , L_{ch}).

Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique d'une part, les équations données par (II.14) :

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s i_{ds} - L_d \frac{d}{dt} i_{ds} + \omega_r \varphi_{qs} \\ V_{qs} = -R_s i_{qs} - L_q \frac{d}{dt} i_{qs} - \omega_r \varphi_{ds} + \omega_r \varphi_f \end{cases}$$

D'autre part, l'application des tensions V_d et V_q sur la charge donne:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_{ch} i_{ds} + L_{ch} \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_r \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_{ch} i_{qs} + L_{ch} \frac{d}{dt} i_{qs} + \omega_r \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q dans (II.14), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} R_{ch} i_{ds} + L_{ch} \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_r \varphi_{qs} = -R_s i_{ds} - L_d \frac{d}{dt} i_{ds} + \omega_r \varphi_{qs} \\ R_{ch} i_{qs} + L_{ch} \frac{d}{dt} i_{qs} + \omega_r \varphi_{ds} = -R_s i_{qs} - L_q \frac{d}{dt} i_{qs} - \omega_r \varphi_{ds} + \omega_r \varphi_f \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Les équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_{ds} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} \left(-(R_s + R_{ch}) i_{ds} + \omega_r (L_q + L_{ch}) i_{qs} \right) \\ \frac{d}{dt} i_{qs} = \frac{1}{L_q + L_{ch}} \left(-\omega_r (L_d + L_{ch}) i_{ds} - (R_s + R_{ch}) i_{qs} + \omega_r \varphi_f \right) \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Considérons le flux d'excitation φ_f comme grandeur de commande, et les courants i_d, i_q comme variables d'état.

II.3.7.1. Equations d'état

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

$$[X] = [i_d \quad i_q]^T \quad \text{et} \quad [V] = [0 \quad \varphi_f]^T \quad (\text{II.25})$$

Les équations (II.24), peuvent s'écrire sous la forme matricielle (II.26).

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_{ds} \\ \frac{d}{dt} i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & \omega_r \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\omega_r \frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_r \varphi_f}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

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

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

$$[B][V] = \frac{\omega}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_f \end{bmatrix} \quad (II.28)$$

II.4. Simulation de la GSAP

Dans cette partie la GSAP sera simulée en deux cas distincts :

1. A vide : la GSAP sera entraînée par un couple moteur d'une valeur de 7.85 N.m durant 0.08S puis on laisse tourner librement.
2. La GSAP alimente une charge (Rch , Lch) monté en étoile, le couple moteur initial est de 7.85 N.m mais à 0.5 S, il sera diminué à 5.38.

II.4.1 GSAP à vide

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (II.29)$$

Les expressions des tensions et couples deviennent:

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega \cdot \phi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (II.30)$$

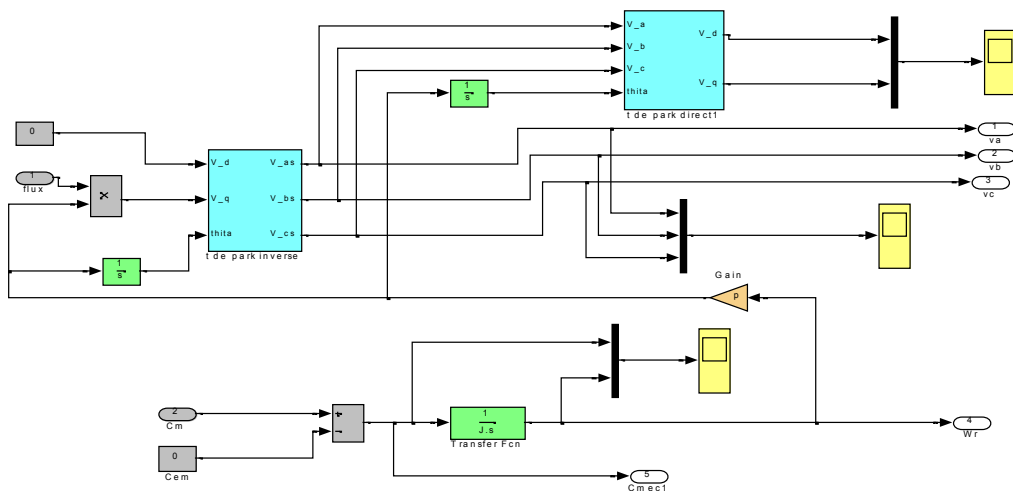
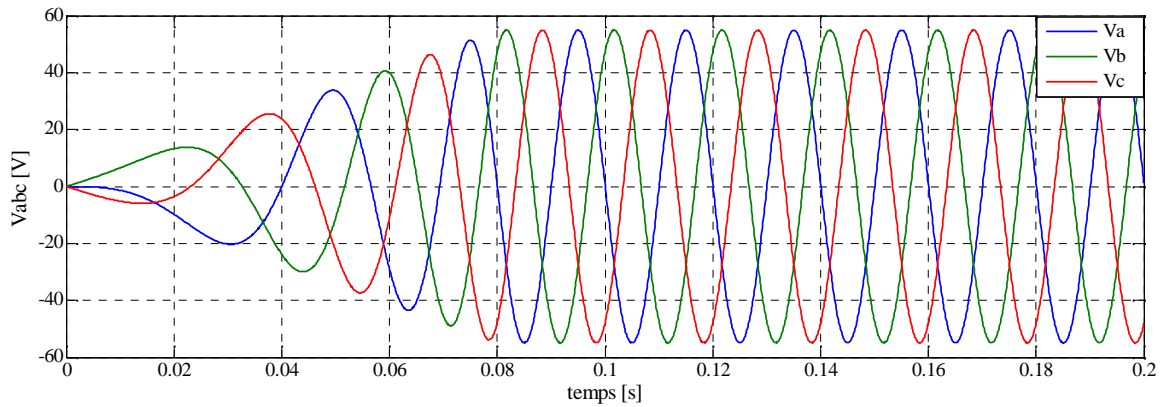
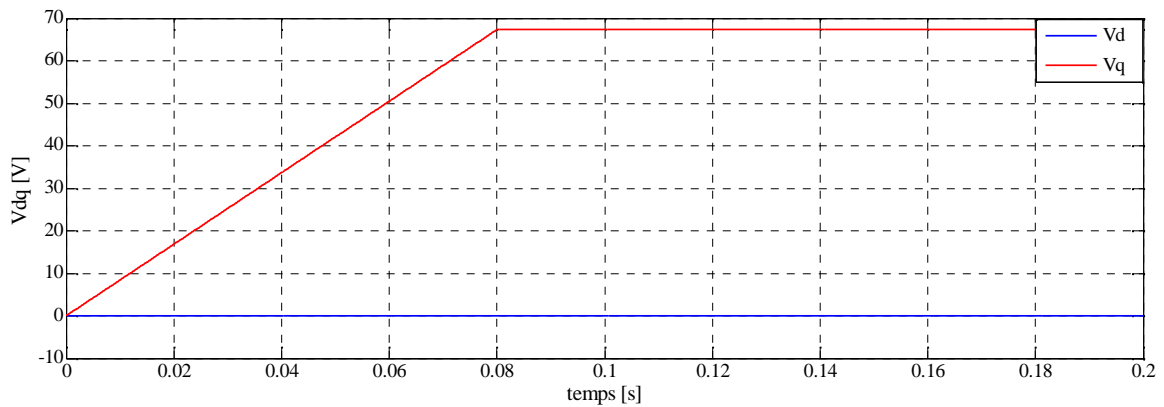
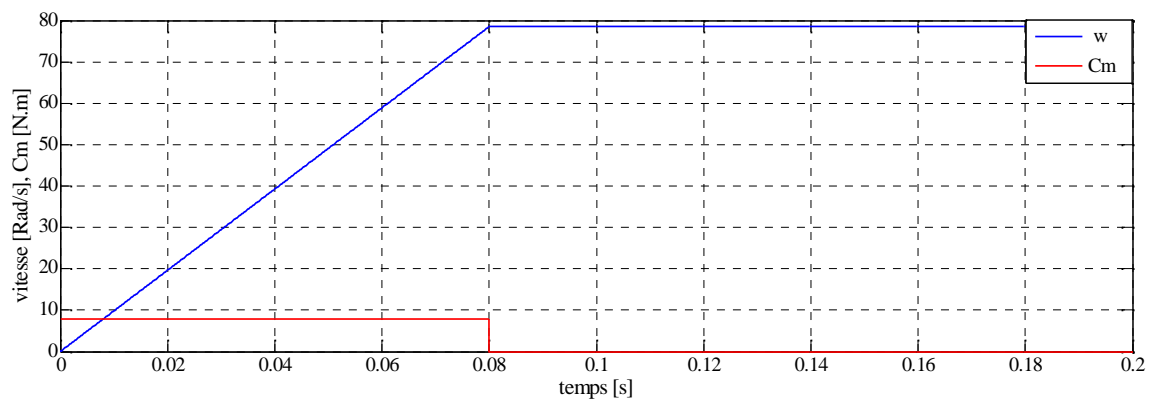


Figure (II.13) : Schéma Bloc de simulation de la GSAP à vide.

• Résultats de simulation GSAP à vide.*Figure (II.14) : tensions statoriques.**Figure (II.15) : Composantes V_d et V_q .**Figure (II.16) : vitesse de rotation et couple moteur.*

• Interprétation

On lance la génératrice par un couple moteur égale à 7.85 N.m pour une durée de 0.08 s, puis, on la laisse tourner librement. Etant donné que le frottement considéré dans ce cas est nul, on constate sur la figure (II.16) que la vitesse est stabilisée à une valeur de 78.5 rad/s, alors que les tensions des phases sont parfaitement sinusoïdales en régime stable, avec une valeur crête de 55V et une fréquence de 50 HZ figure (II.14).

II.4.2. Simulation de la GSAP en charge.

A partir des équations ((II.3). (II.15). (II.27) et (II.28)), on construit le bloc de simulation de la génératrice figure (II.15).

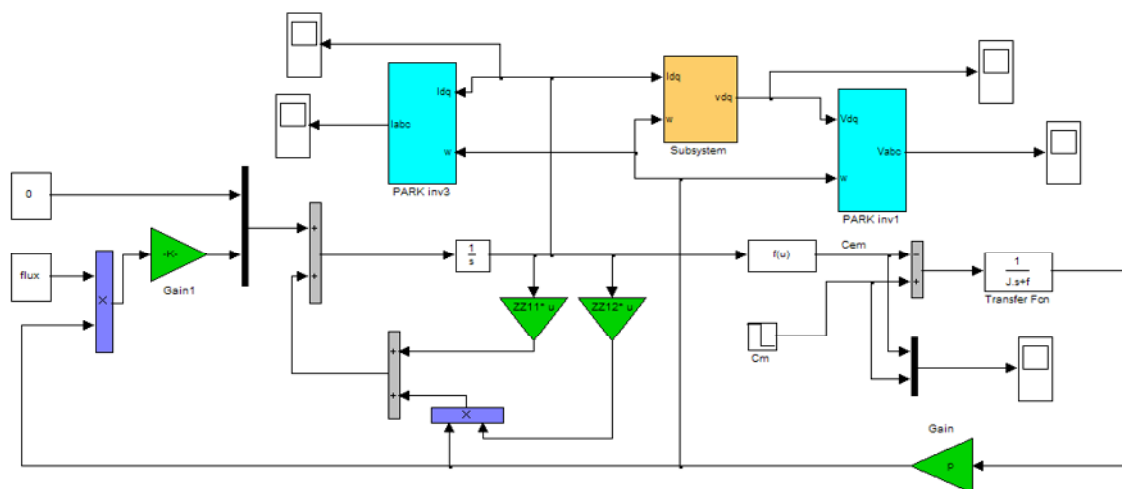


Figure (II.17) : Schéma Bloc de simulation de la GSAP en charge.

• Résultats de simulation GSAP en charge

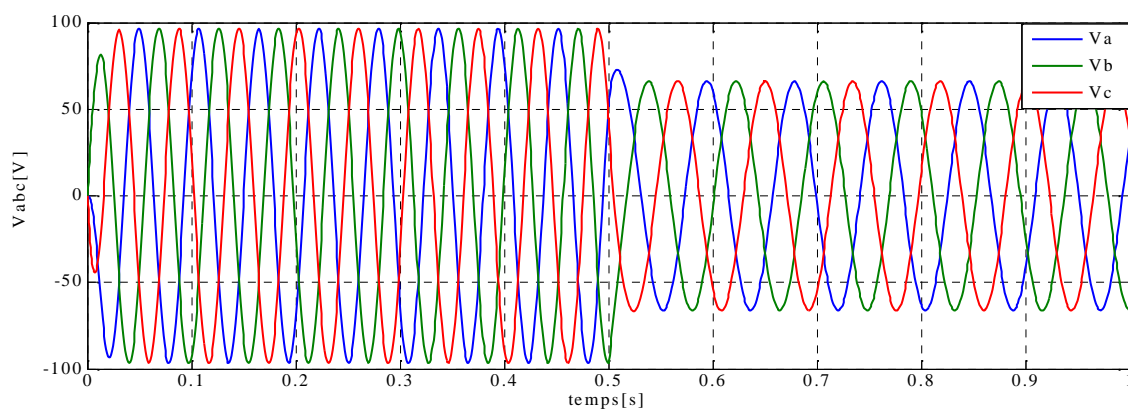


Figure (II.18) : Tensions statoriques V_{abc} .

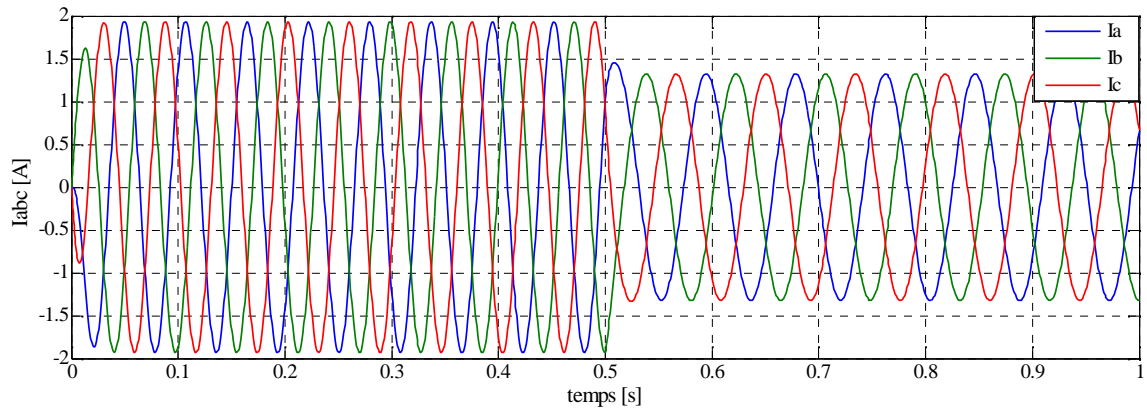


Figure (II.19) : Courants statoriques I_{abc} .

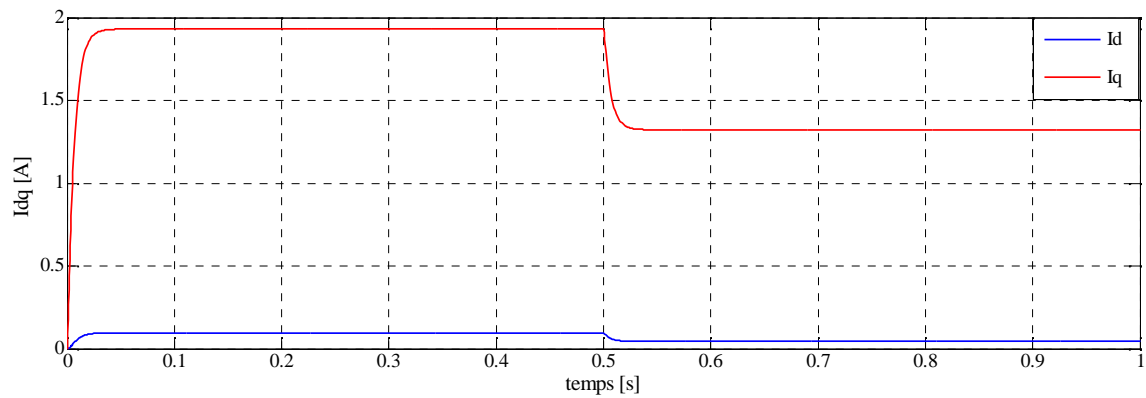


Figure (II.20): Composantes I_d I_q .

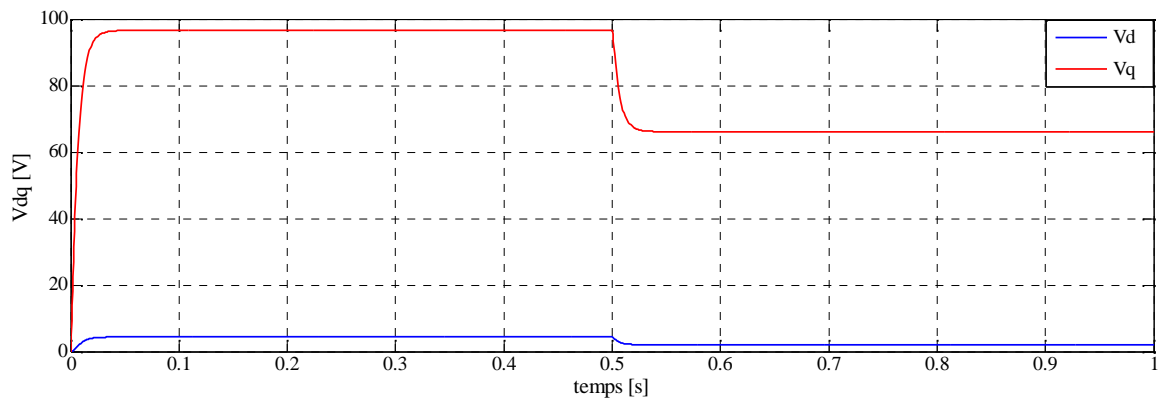


Figure (II.21) : Composantes V_d V_q .

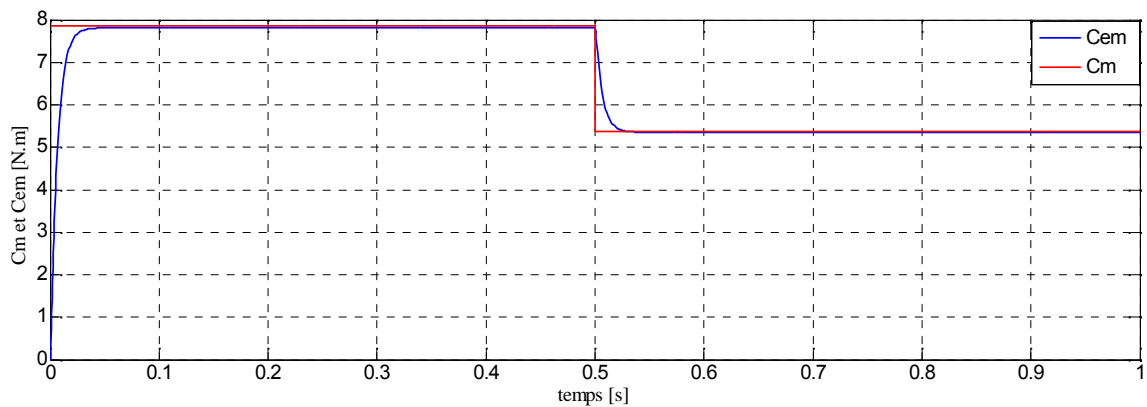


Figure (II.22) : Couple électromagnétique et couple moteur.

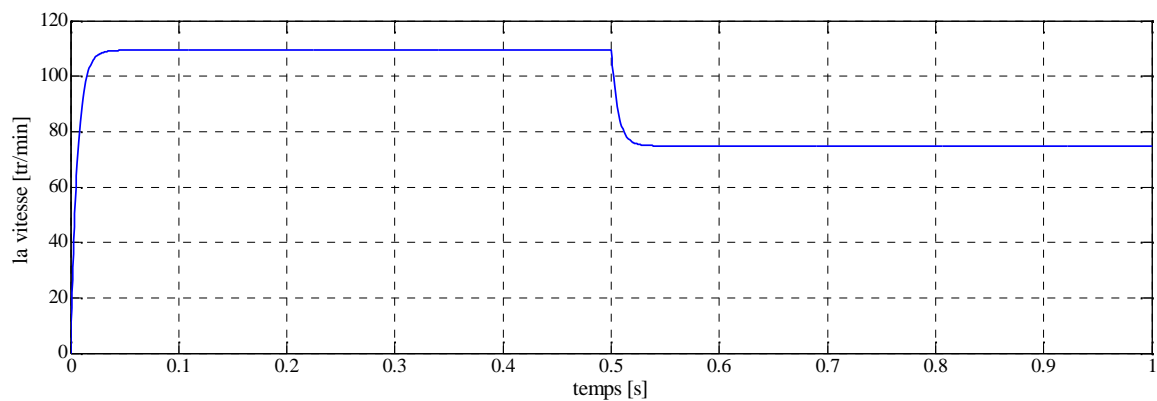


Figure (II.23) : vitesse de rotation.

- **Interprétation**

Deux couples moteurs différents sont appliqués pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice figure (II.22).

En diminuant le couple moteur de 7.85 N.m, à 5.38 N.m, la vitesse mécanique varie de 109.5tr/min jusqu'à 74.85 tr/min. La tension diminue de 96.7 V, à 66.2 V, et le courant 1.93A, jusqu'à 1.32 A. Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

On constate sur la figure (II.23) que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle du synchronisme, ce qui est traduit par des faibles fréquences de tension et courant représentés sur les figure (II.18). Ceci est expliqué par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types d'aimants permanents et les caractéristiques des matériaux utilisés, la structure de la machine synchrone à aimants permanents, ainsi que sa modélisation sous forme d'équations mathématiques, à l'aide de la transformation de Park. La complexité du modèle de la machine a été réduite moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

Le modèle de la GSAP utilisé au cours de ce travail a été validé par les résultats de simulation (à vide, avec une charge).

Dans le chapitre suivant, nous allons établir les modèles analytiques des autres organes utilisés dans la chaîne de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents, à savoir, les convertisseurs de puissance.

CHAPITRE III

LES CONVERTISSEURS ELECTRONIQUES

III. LES CONVERTISSEURS ELECTRONIQUES

III.1. Introduction

Les convertisseurs des électroniques de puissance, sont de nos jours très largement utilisés comme une interface de connexion avec le réseau pour profiter au maximum des capacités de ces machines. Les progrès en matière de semi-conducteurs et l'évolution des techniques de commande, ont permis la réalisation des convertisseurs statiques de plus en plus performants. La fréquence et l'amplitude de la tension, en sortie de la génératrice, sont variables à cause de la variation de vitesse de la turbine. Pour satisfaire aux conditions du réseau, et donc se ramener à la fréquence et l'amplitude de la tension, fixes du réseau, on utilise des convertisseurs de puissance agissant comme des convertisseurs de fréquence, intercalés entre la machine synchrone à aimant permanent et le réseau. Les convertisseurs AC/DC/AC règle la fréquence de la tension, transforme la tension alternative en tension continu, filtre la tension pour le ramener à l'allure de tension alternative à la fréquence du réseau.

Dans ce chapitre nous présentant l'étude et la simulation d'un redresseur triphasé à diodes, relié à travers un bus continu avec un onduleur de tension triphasé commandé par deux types de commande, décalée et MLI. Ces deux convertisseurs sont utilisés dans notre application comme intermédiaire pour raccorder la GSAP avec un réseau électrique.

III.2. Structure de puissance des convertisseurs

Les convertisseurs électroniques, que ce soit redresseur, onduleur de tension ou de courant, sont constitués essentiellement de composants semi-conducteurs. Ces composants électroniques peuvent être commandés ou non pour le redressement mais dans le cas des onduleurs, ils doivent être obligatoirement commandés à l'ouverture et à la fermeture de ces semi-conducteurs.

L'IGBT est un transistor dont la conduction est amorcée et désamorcée en appliquant une tension appropriée sur la gâchette (la base). Comme dans un transistor conventionnel, les trois bornes sont nommées collecteur C, émetteur E et base B [5].

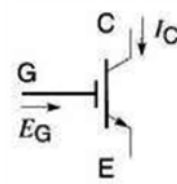


Figure (III.1) : Symbole d'IGBT.

III.3. Redresseur à diodes

Les redresseurs, sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion alternatif-continu. Alimentés par une source alternative monophasée ou polyphasée, ils permettent d'alimenter en continu le récepteur branché à leur sortie.

Les redresseurs à diodes, ou redresseurs non contrôlés, ne permettent pas de faire varier le rapport entre la ou les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie. De plus, ils sont irréversibles, c'est-à dire que la puissance ne peut aller que du côté alternatif vers le côté continu. Mais, plus à leur conception qui est très simple, ils présentent une robustesse et une capacité de travailler à des fortes puissances [12].

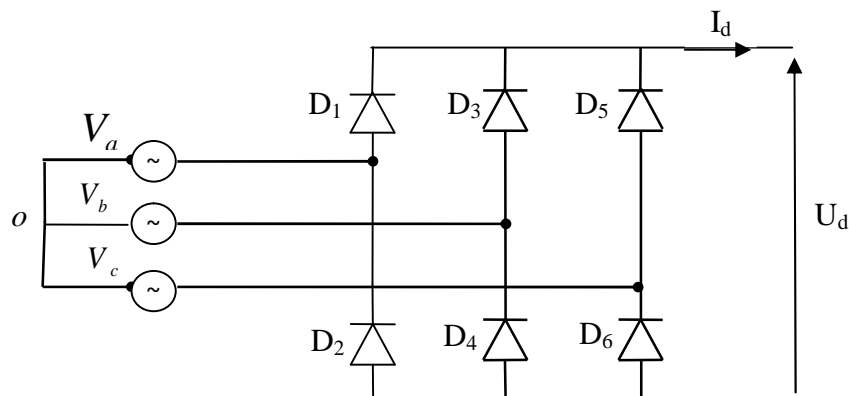


Figure (III.2) : Redresseur à diodes.

Dans le cas général, les q enroulements, sièges des q tensions alternatives V_a , V_b , ..., V_q , on utilise $2q$ diodes.

Le premier groupe, D_1, D_2, \dots, D_q , forme un commutateur "plus positif"

Le second groupe, D_1', D_2', \dots, D_q' , forme un commutateur "plus négatif" Cet ensemble de $2q$ diodes est couramment appelé pont de diodes double [5].

La tension redressée U_d , est égale, à chaque instant, à la plus grande différence entre les tensions d'entrée. Ce montage est à comparer au pont de Graëtz en monophasé et à ce titre il peut également être appelé triphasé double alternance.

La règle pour déterminer les diodes passantes est la même que pour le montage de la figure (III.2) :

- 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 ».

Donc :

- lorsque $V_a > V_c > V_b$, $D1$ et $D2'$ conduisent : $U_d = V_a - V_b$;
- lorsque $V_a > V_b > V_c$, $D1$ et $D3'$ conduisent : $U_d = V_a - V_c$;
- lorsque $V_b > V_a > V_c$, $D2$ et $D3'$ conduisent : $U_d = V_b - V_c$; etc ...

Chaque diode conduit ainsi pendant un tiers de période (on dira que l'indice de commutation de ce montage est $q = 3$) tandis que la tension redressée se compose de six portions de sinusoides par période T (on dira que l'indice de pulsation est $p = 6$).

Sur la figure (III.3), on a représenté l'allure de la tension redressée U_d ainsi que la tension aux bornes de la diode $D1$ (VD1).

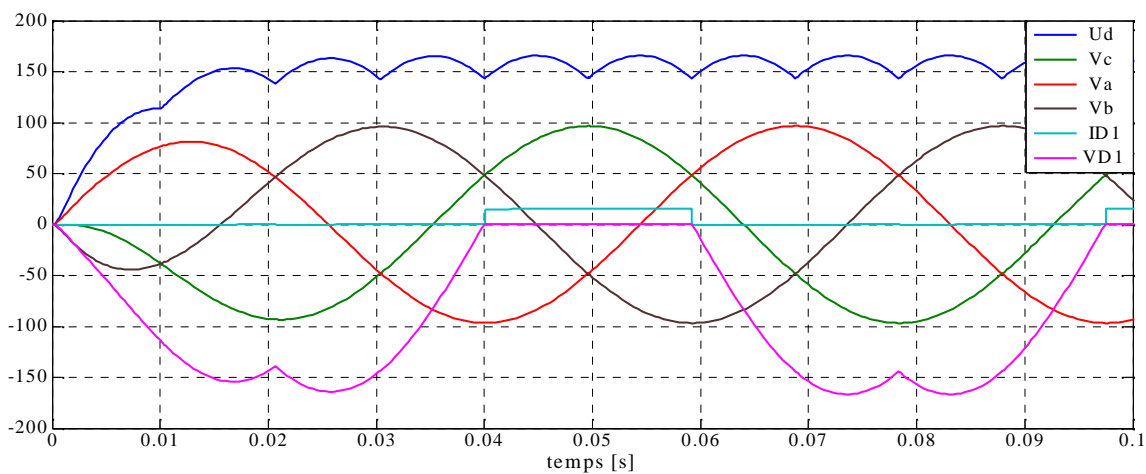


Figure (III.3) : La tension et le courant aux bornes de diode D1.

III.3.1. La tension redressée

La tension redressée U_d est périodique de période T/p ($T/6$).

Entre 0 et T/p ($T/6$), cette tension a pour expression :

$$U_d = U_{d \max} \cos(\omega t) \tag{III.1}$$

$U_{d \max} = U\sqrt{2}$, U étant la valeur efficace des tensions composées.

Avec :

U_{\max} : Est l'amplitude maximale de la tension composée.

T : La période de la tension redressée.

• **Valeur moyenne**

La valeur moyenne de la tension redressée sans capacité de filtrage dans le cas général est [9]:

$$U_{d moy} = \frac{1}{T / P} \int_{-T/2P}^{+T/2P} U_d dt \tag{III.2}$$

On -calcule:

$$U_{d moy} = \frac{6}{T} \int_{-T/12}^{T/12} U_d dt = 0.95U_{d max}$$

• **Valeur efficace**

La valeur efficace de la tension redressée, toujours sans capacité de filtrage dans le cas général est [9]:

$$U_{d eff} = \sqrt{\frac{1}{T / p} \int_{-T / 2p}^{+T / 2p} U_d^2 dt} \tag{III.3}$$

On -calcule:

$$U_{d eff} \sqrt{\frac{6}{T} \int_{-T / 12}^{T / 12} U_d^2 dt} = 0.94U_{d max}$$

III.4. L'association GSAP – Redresseur :

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice - redresseur) figure (III.4). Nous associons les deux éléments et nous verrons les résultats de simulation.

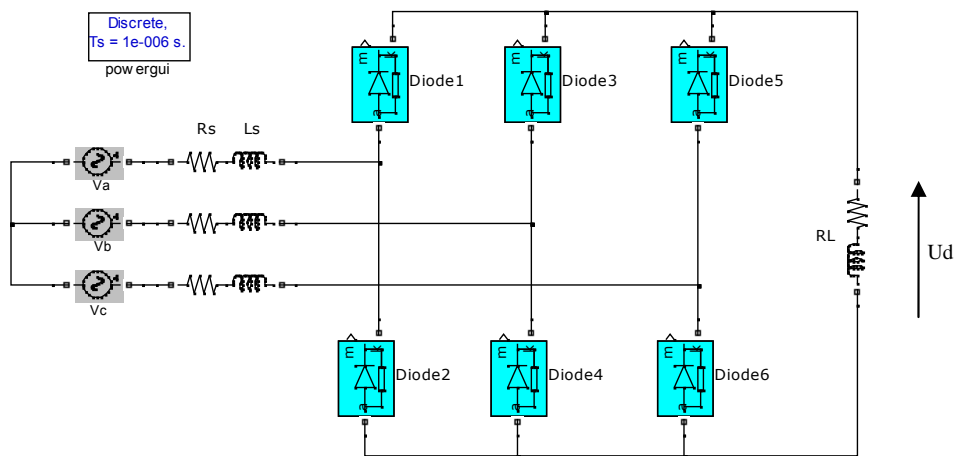


Figure (III.4) : l'assemblage du GSAP et le redresseur.

- **Résultats de simulation du montage dans la figure (III.4)**

Le redresseur de tension alimenté par notre génératrice synchrone à aimant permanent En diminuant le couple moteur de 7.85 N.m à l'instant 0.5S, à 5.38 N.m, le système alimente une charge RL ($R=10\text{ ohm}$, $L=0.1\text{H}$),

Les figure (III.5), (III.6), représente la tension redressée, et le courant côté charge.

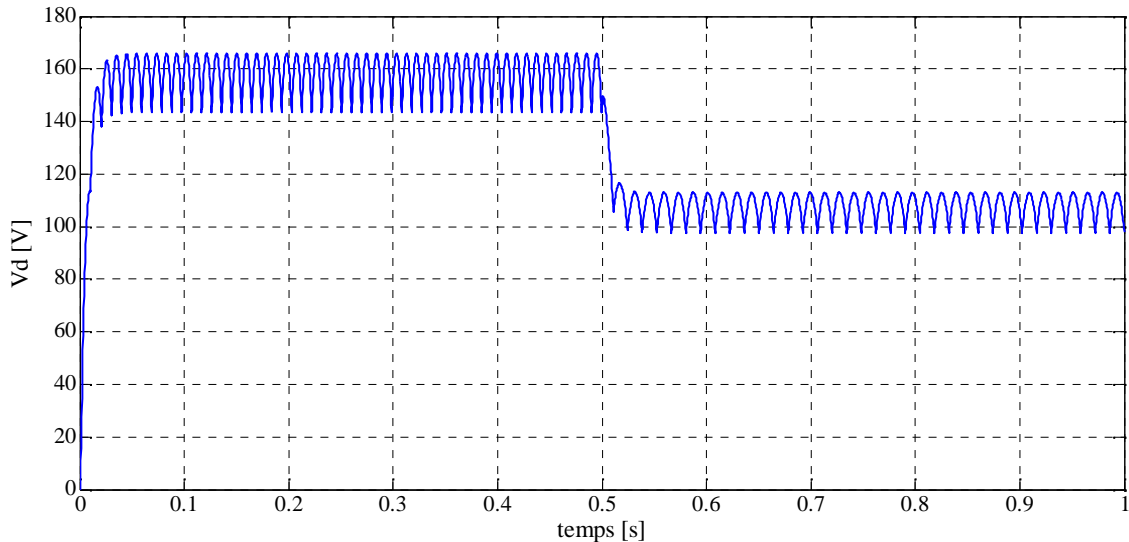


Figure (III.5) : La tension redressée.

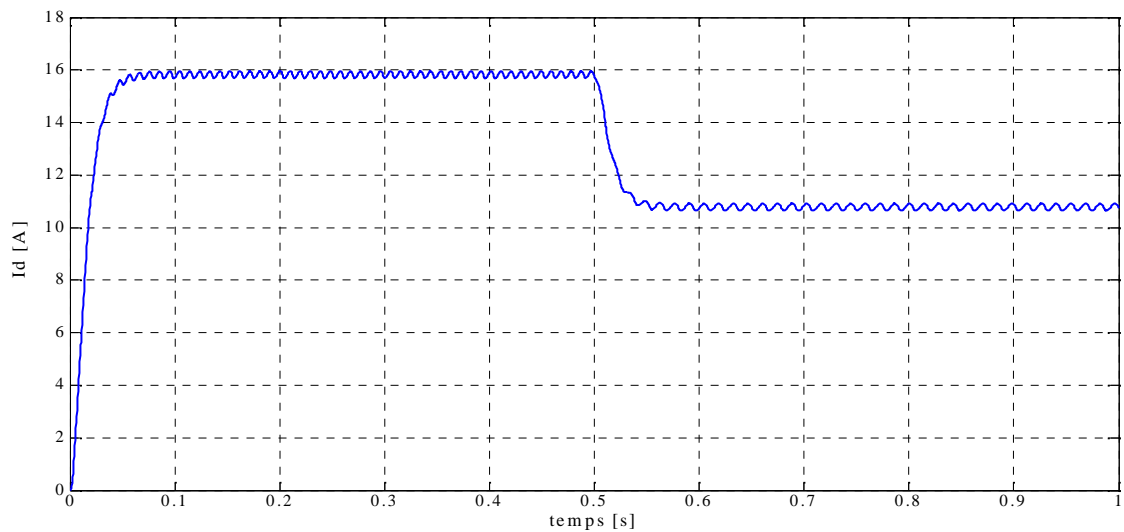


Figure (III.6) : le courant coté charge.

La tension à la sortie du redresseur n'est pas parfaitement continue. Afin d'améliorer la qualité de cette même tension nous insérons une capacité de filtrage.

III.5. La capacité de filtrage

La capacité de filtrage « C » va permettre d’obtenir une tension quasi continue figure (III.11) [5].

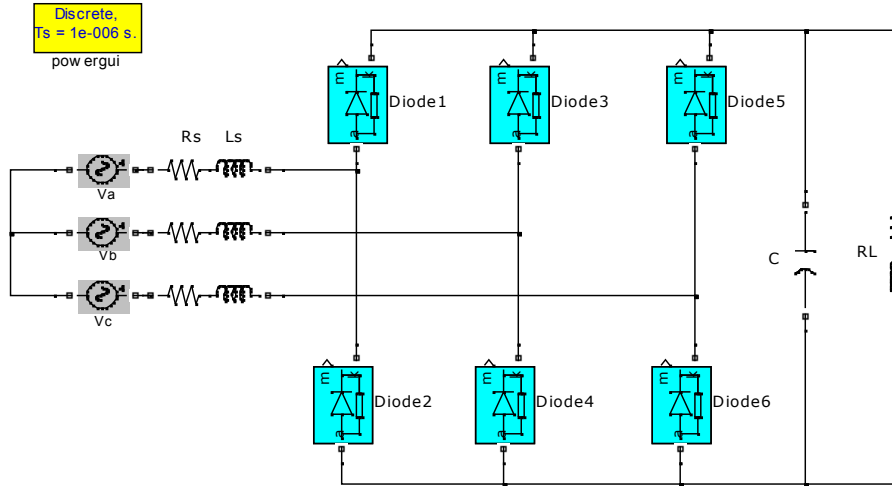


Figure (III.7) : Redresseur avec capacité de filtrage.

La valeur de capacité est déterminée par la méthode suivante

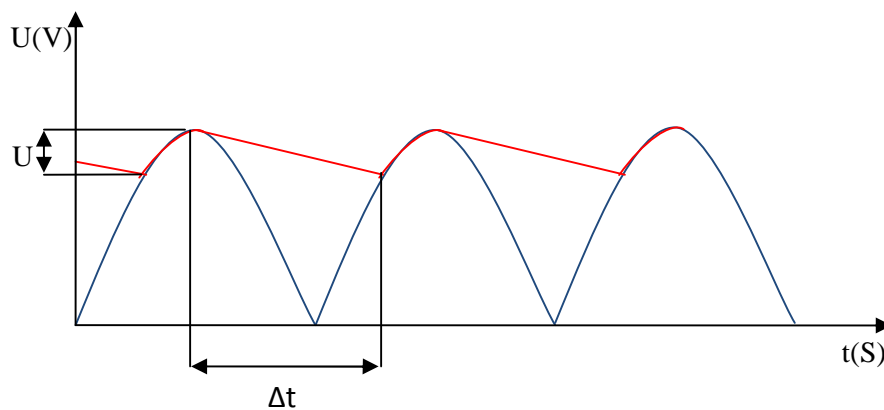


Figure (III.8) : L’effet de la capacité de filtrage sur la tension de sortie [5].

On va calculer la capacité de filtrage pour que la tension à la sortie du redresseur de la figure (III.8) ne descende pas au-dessous de 164 V pour un courant de 15.95A.

Dans un condensateur on a :

$$I = C \frac{\Delta v}{\Delta t} \tag{III.4}$$

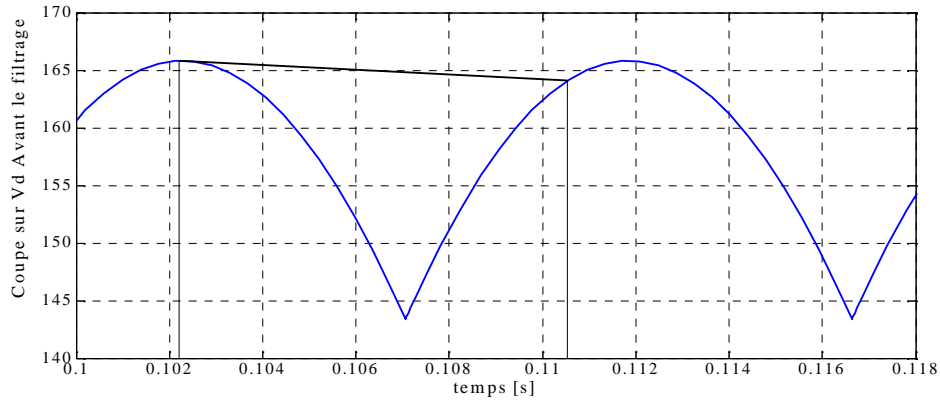


Figure (III.9) : la décharge de la capacité de filtrage.

-D'après la figure (III.9) on a : $V = 1.8V$ et $t = 0.0083$; alors on aura :

$$C = I \frac{\Delta t}{\Delta v} \quad C = 0.0735 \text{ (f)}$$

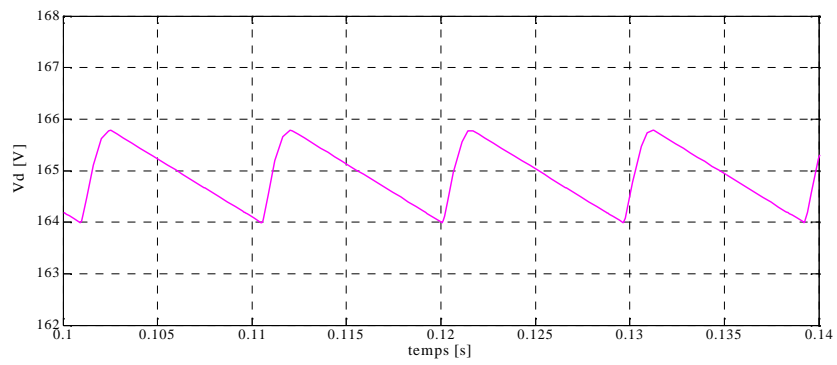


Figure (III.10) : coupe sur la tension Vd après le filtrage.

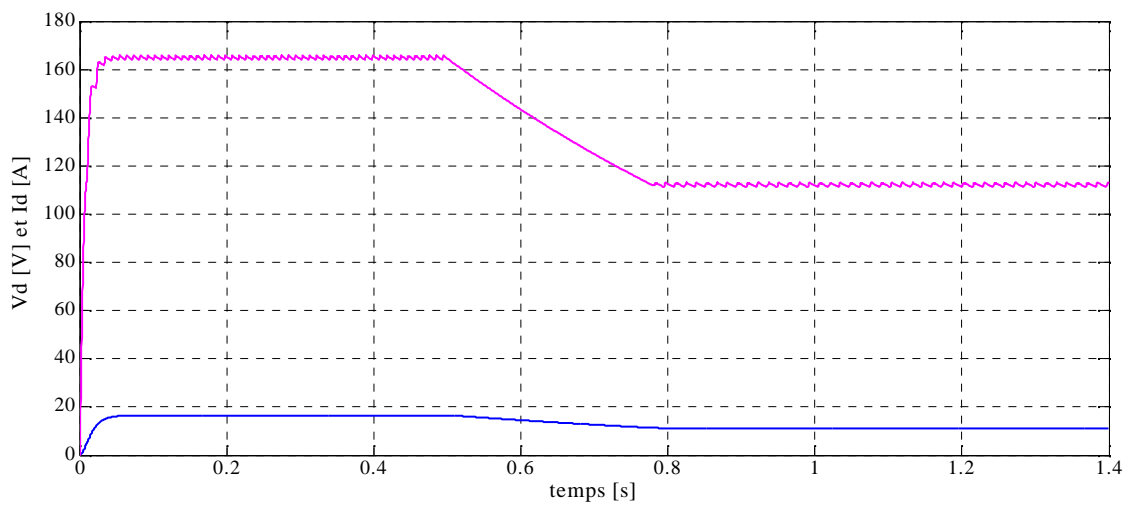


Figure (III.11) : La tension filtrée à la sortie du redresseur.

On remarque que la tension redressée est plus proche d'une valeur constante dont l'amplitude est dans notre cas 165 volt pour une couple moteur 7.85 est appliqué à la génératrice.

III.6. L'onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Si on dispose à l'entrée d'une tension continue, grâce à des semi-conducteurs, on relie chacune des bornes du récepteur une tension tantôt positive, tantôt négative. Par une séquence adéquate de commande des semi-conducteurs, il est donc possible de produire à la sortie du l'onduleur une tension alternative de valeur moyenne nulle. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (Pulse Width Modulation, en anglo-saxon) [12].

III.6.1. Modélisation de l'onduleur

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor-diode par un seul interrupteur bidirectionnel « S_i ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur.

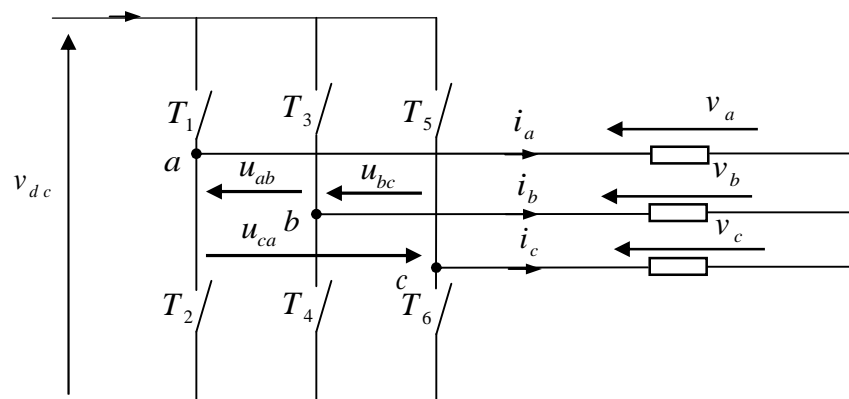


Figure (III.12) : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

L'onduleur de tension peut être représenté selon les figures (III.12), où T_i ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6$) sont des IGBT. On définit pour ça les variables (S_a, S_b, S_c) en fonction de l'état des commutations dans les trois branches [8][10]:

- **Branche1 :**
 $S_a=0$: si l'interrupteur T1 est fermé et T2 est ouvert
 $S_a=1$: si l'interrupteur T1 est ouvert et T2 est fermé
- **Branche2 :**
 $S_b=0$: si l'interrupteur T3 est fermé et T4 est ouvert
 $S_b=1$: si l'interrupteur T3 est ouvert et T4 est fermé
- **Branche3 :**
 $S_c=0$: si l'interrupteur T5 est fermé et T6 est ouvert
 $S_c=1$: si l'interrupteur T5 est ouvert et T6 est fermé

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{DC} (S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{DC} (S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{DC} (S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

On déduit les expressions des tensions simples :

$$\begin{cases} v_a = \frac{1}{3}(u_{ab} - u_{ca}) = \frac{V_{DC}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ v_b = \frac{1}{3}(u_{bc} - u_{ab}) = \frac{V_{DC}}{3}(2S_b - S_c - S_a) \\ v_c = \frac{1}{3}(u_{ca} - u_{bc}) = \frac{V_{DC}}{3}(2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Les expressions des tensions simples sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

III.6.2. Commande des onduleurs

On peut montrer qu'il est possible d'étouffer, par une opération appelée filtrage, les harmonique de courant de rang élevé. Les différentes stratégies de commande que nous allons présenter vont donc tendre vers l'élimination des harmoniques de faible rang qui sont les plus gênants, car difficiles à filtrer.

III.6.2.1. La commande décalée

C'est la stratégie de commande la plus simple à mettre en œuvre, les interrupteurs travaillent à la fréquence des grandeurs électriques de sortie.

Par contre la tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible et donc de fréquence basse. Le filtrage est difficile dans ce mode de commande.

La commande décalée se fait à l'aide des générateurs des impulsions synchronisés, pour créer la tension convenable. Chaque bras de pont est complémentaire. Pour commander les interrupteurs T1, T3, T5 les impulsions sont décalées de 120° et pour T2, T4, T6 nous inversons la commande précédente figure (III.13) [5].

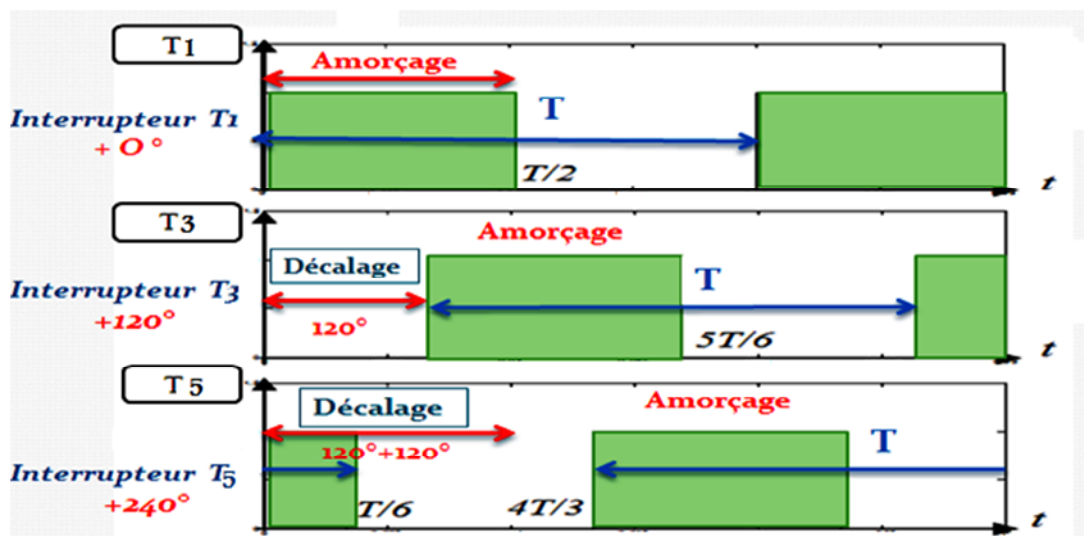


Figure (III.13.1) : Principe de la commande décalée.

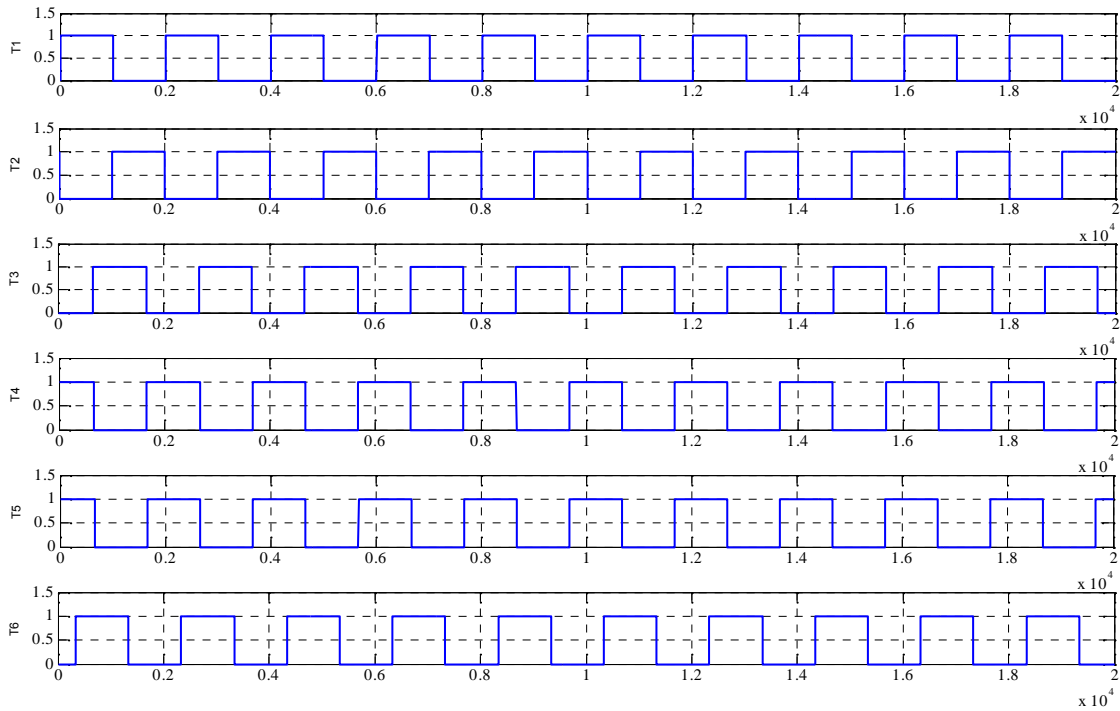


Figure (III.13.2) : les impulsions de commande décalée.

III.6.2.2. Onduleur de tension triphasé à commande décalée

On prend un exemple d'un onduleur de tension alimenté par source de tension continu $E=380V$.

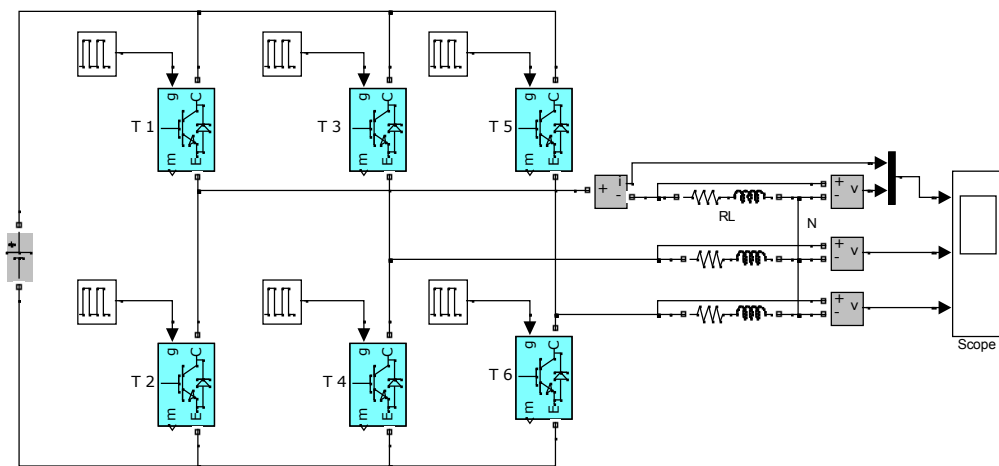


Figure (III.14) : Onduleur de tension triphasé à commande décalée alimente une charge RL.

- **Résultats de simulation du montage dans la figure (III.15)**

Les figures (III.15), (III.16) et (III.17), représentent la tension composée V_{ab} , la tension V_{an} et le courant I_{an} , et aussi le spectre de la tension V_{ab} .

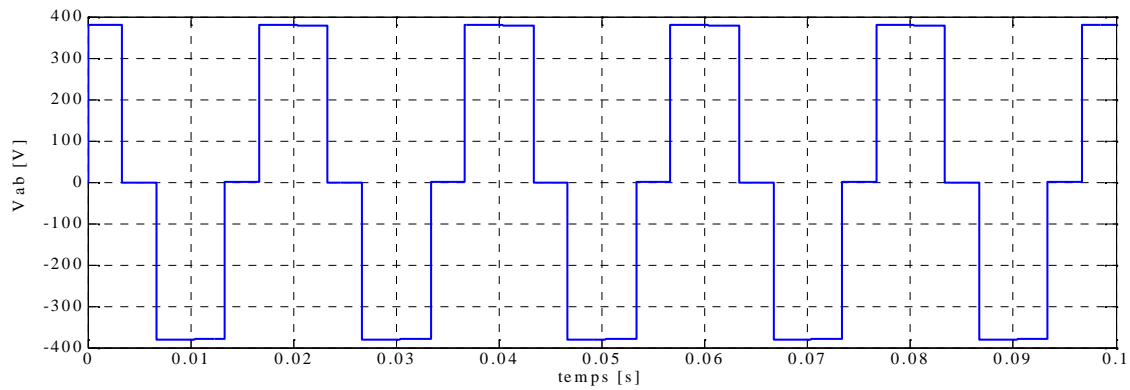


Figure (III.15) : la tension composée V_{ab} .

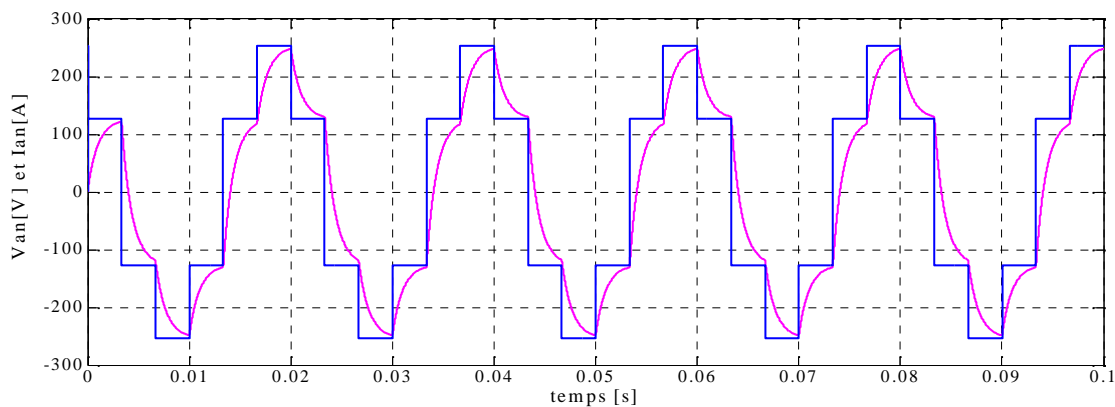


Figure (III.16) : la tension V_{an} et le courant I_{an} .

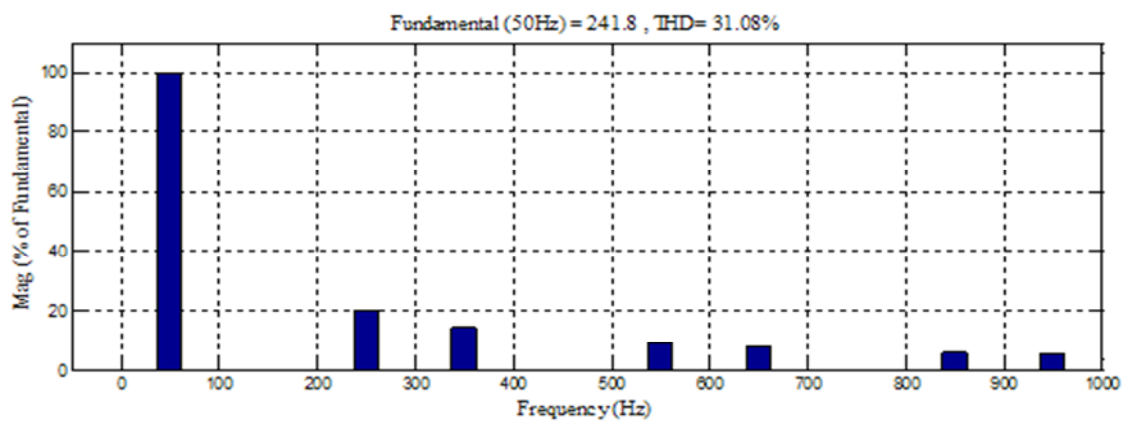


Figure (III.17) : Le spectre de la tension V_{ab} .

On remarque que la tension en sortie de l'onduleur est non sinusoïdale, et les harmoniques sont de rangs multiples.

Pour rapprocher de la forme sinusoïdale et au même temps réduire l'effet des harmoniques, cela nécessite une commande plus efficace, c'est la commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

III.6.2.3. la commande MLI

La technique de modulation de la largeur d'impulsions consiste à multiplier le nombre d'impulsions renvoyées aux interrupteurs de l'onduleur.

Ce procédé présente l'avantage de repousser les harmoniques de rangs faibles à des rangs d'ordre plus élevés ce qui facilite leur filtrage. Il permet aussi la variation à la fois de l'amplitude fondamentale de la tension de sortie et sa fréquence.

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, on fait appel à la technique MLI qui consiste à calculer les instants de commutation des interrupteurs en utilisant l'intersection de trois tensions de références sinusoïdales et une tension de modulation triangulaire.

III.6.2.3.1. Stratégie de commande MLI

Le principe de la stratégie Modulation de Largeur d'Impulsions triangulosinusoïdale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance figure (III.19).

Deux paramètres caractérisent cette stratégie [5]:

- L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{III.8})$$

- Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p)

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{III.9})$$

Pour générer la commande des transistors on utilise le modèle ci-dessous, pour la commande MLI sinusoïdale

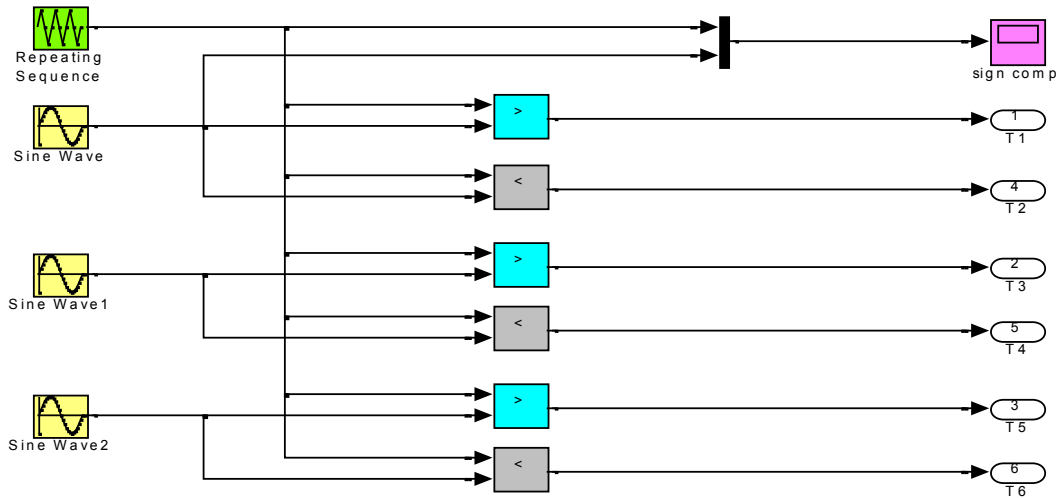


Figure (III.18) : Schéma bloc de la commande MLI.

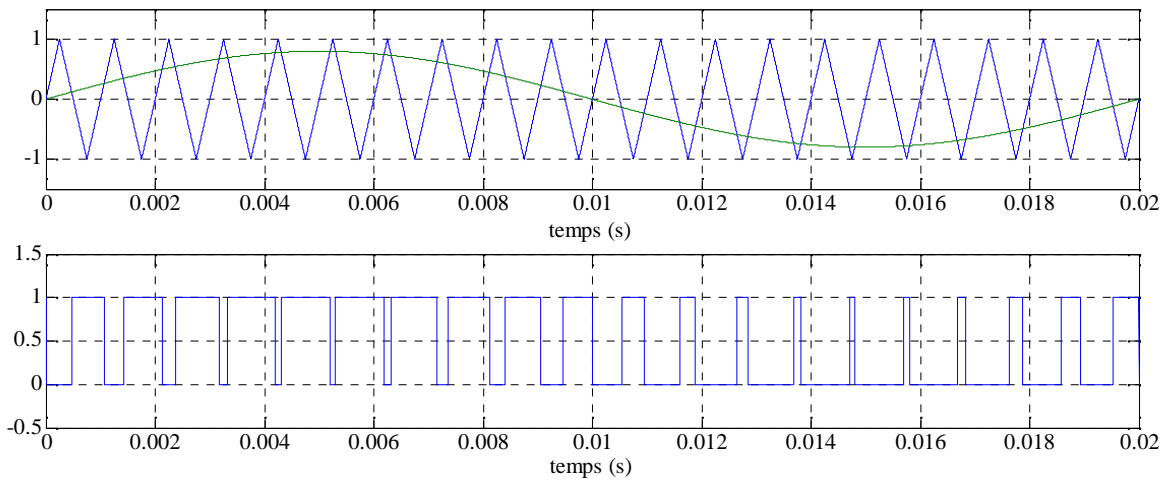


Figure (III.19) : Principe de la commande MLI (sinusoïdale).

III.6.2.4 Onduleur de tension à commande MLI

Le montage ci-dessous représente le schéma bloc d'un onduleur de tension triphasé. Il est commandé par MLI sinusoïdale.

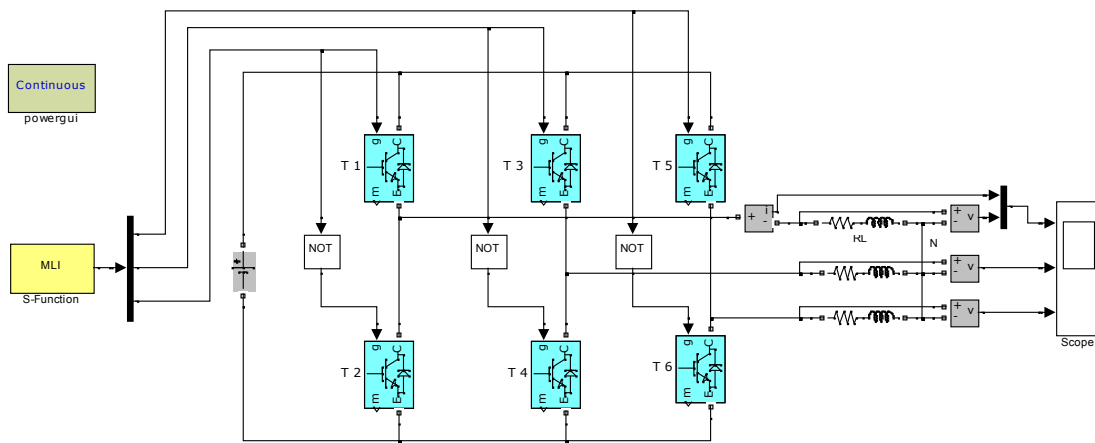


Figure (III.20) : Onduleur de tension triphasé à commande MLI qui alimente une charge RL .

- **Résultats de simulation du montage dans la figure (III.23)**

Les figures (III.21), (III.22), représentent les résultats de simulation d'un onduleur commandé par MLI sinusoidale qui alimente une charge RL .

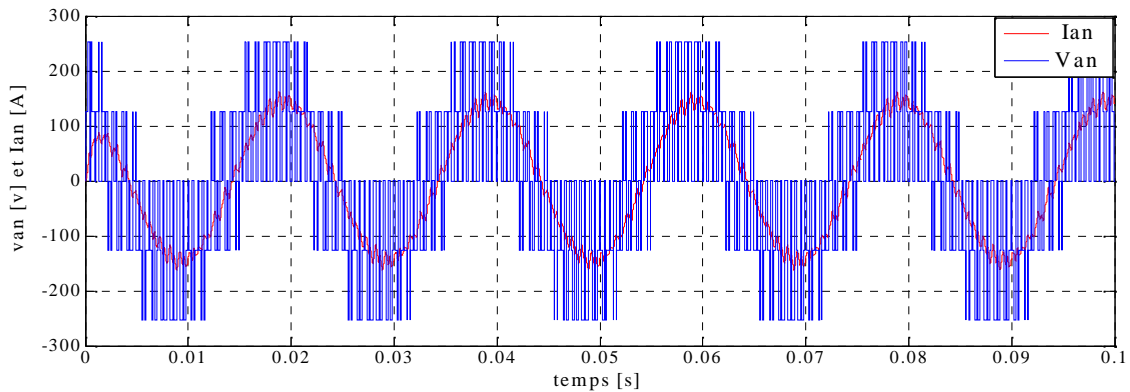


Figure (III.21) : la tension V_{an} et le courant I_{an} avec la commande MLI.

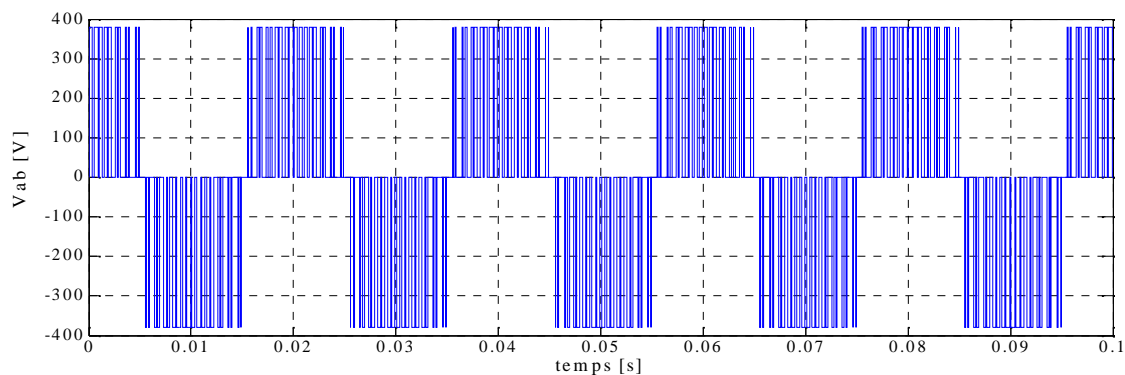


Figure (III.22) : l'allure de la tension composée V_{ab} .

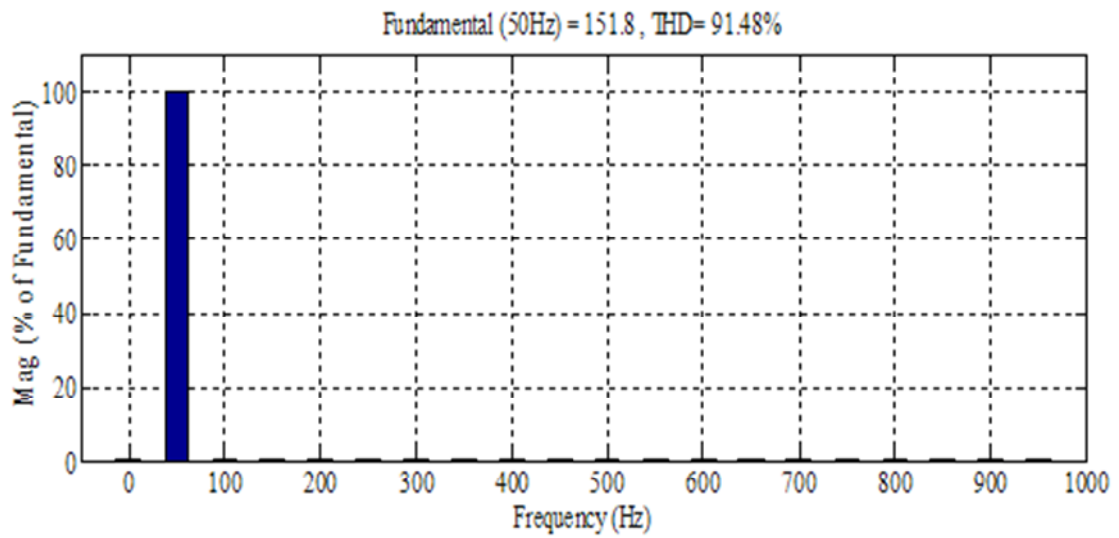


Figure (III.23): Spectre de la tension ondulée par MLI sinusoidale.

III.7. L'association onduleur - redresseur

Dans notre application on utilise un redresseur à diodes et un onduleur de tension triphasé commandé par deux types de commande décalé et MLI.

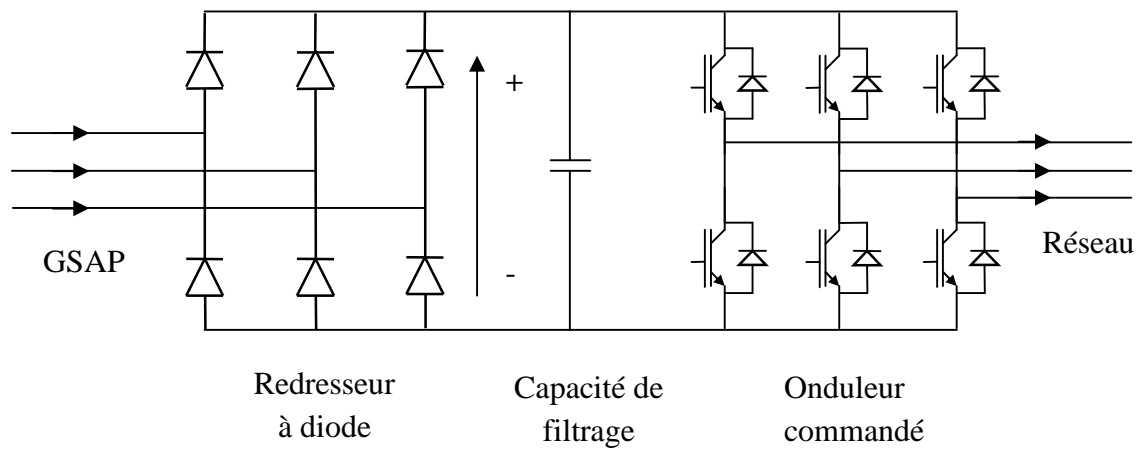


Figure (III.24) : L'association redresseuse a diodes-onduleur.

III.7.1 Simulation de L'association onduleur-redresseur

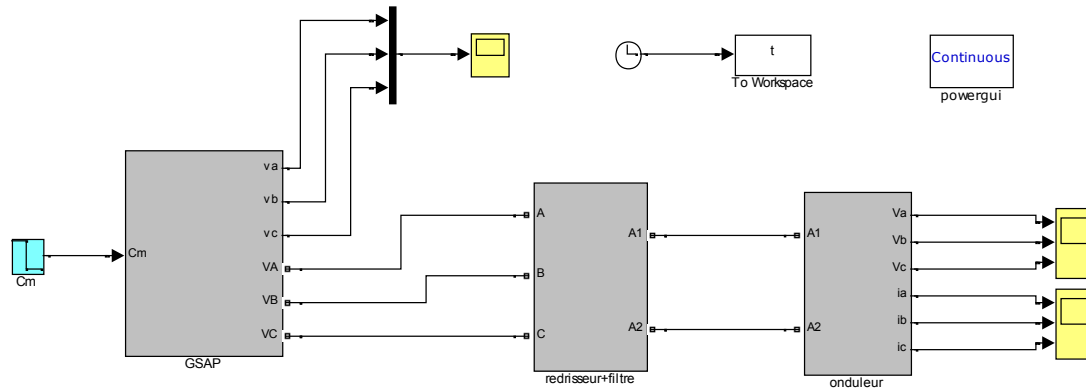


Figure (III.25) : Le modèle onduleur-redresseur avec GSAP.

Nous avons appliqué les deux commandes MLI et décalé dans le but de se rapprocher du signal désiré.

- **Résultats de simulation du montage dans la figure (III.23)**

Les figures (III.26) et (III.27) représente les résultats de simulation du modèle complet, pour commande décalé d'un onduleur.

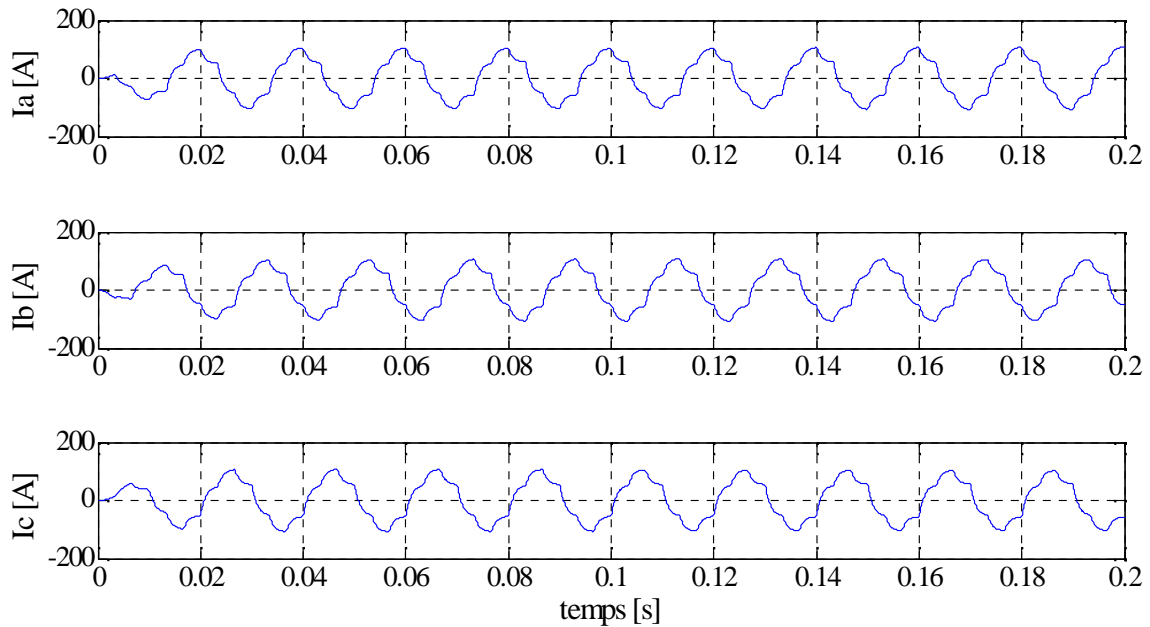


Figure (III.27) : Les courants I_a , I_b , I_c à la sortie de l'onduleur pour commande décalé.

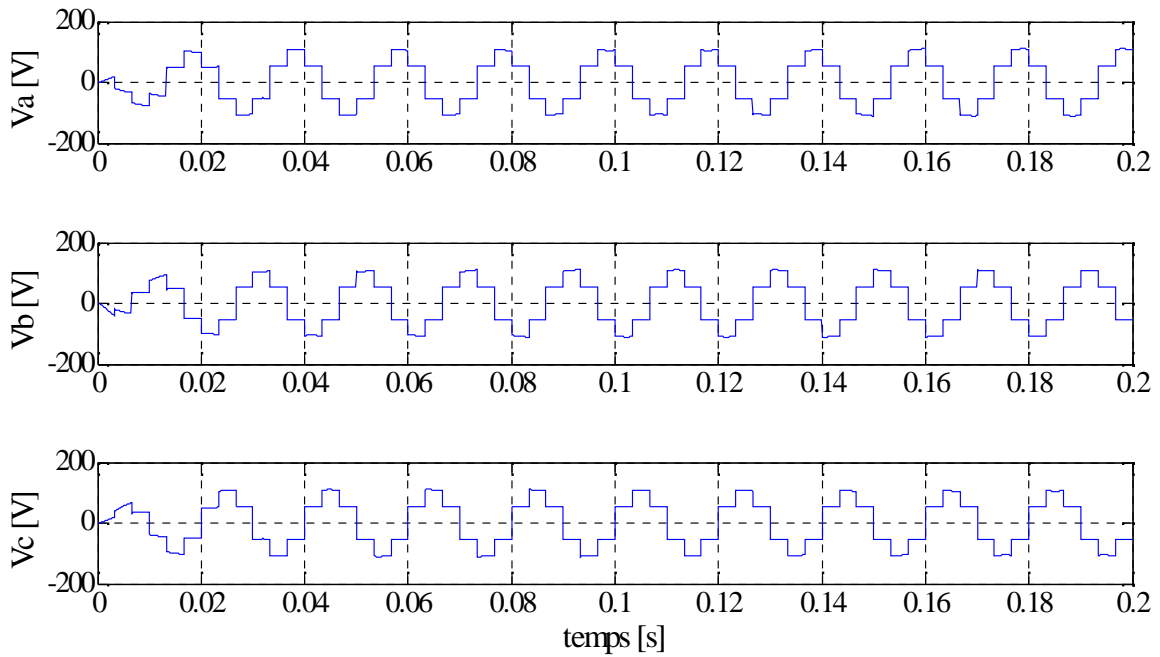


Figure (III.26) : Les tensions V_a V_b V_c à la sortie de l'onduleur pour commande décalé.

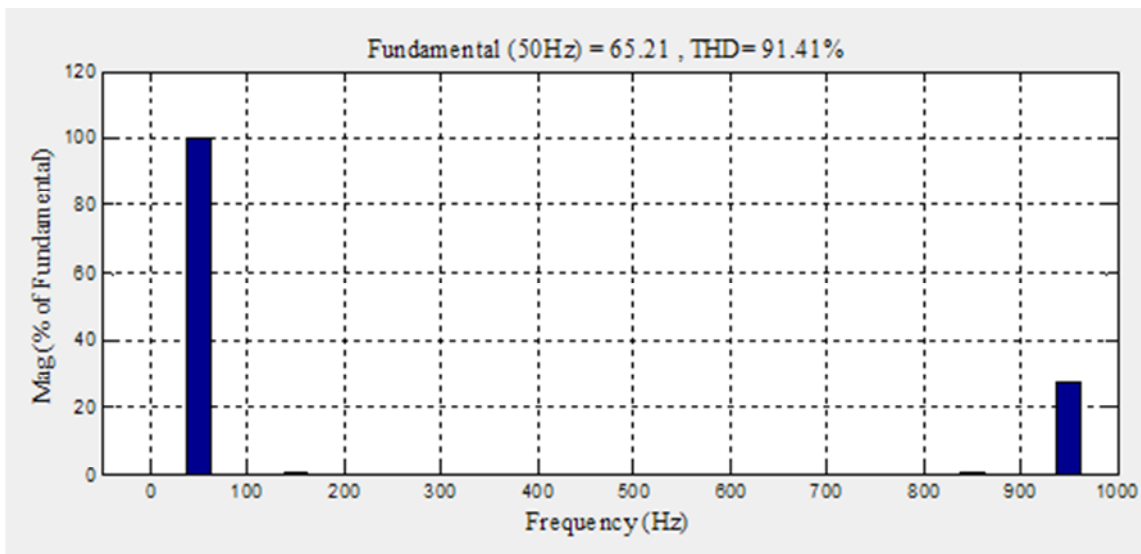


Figure (III.28): Spectre de la tension ondulée par commande décalé.

Les figures (III.29) et (III.30) représente les résultats de simulation du modèle complet, pour commande MLI d'un onduleur.

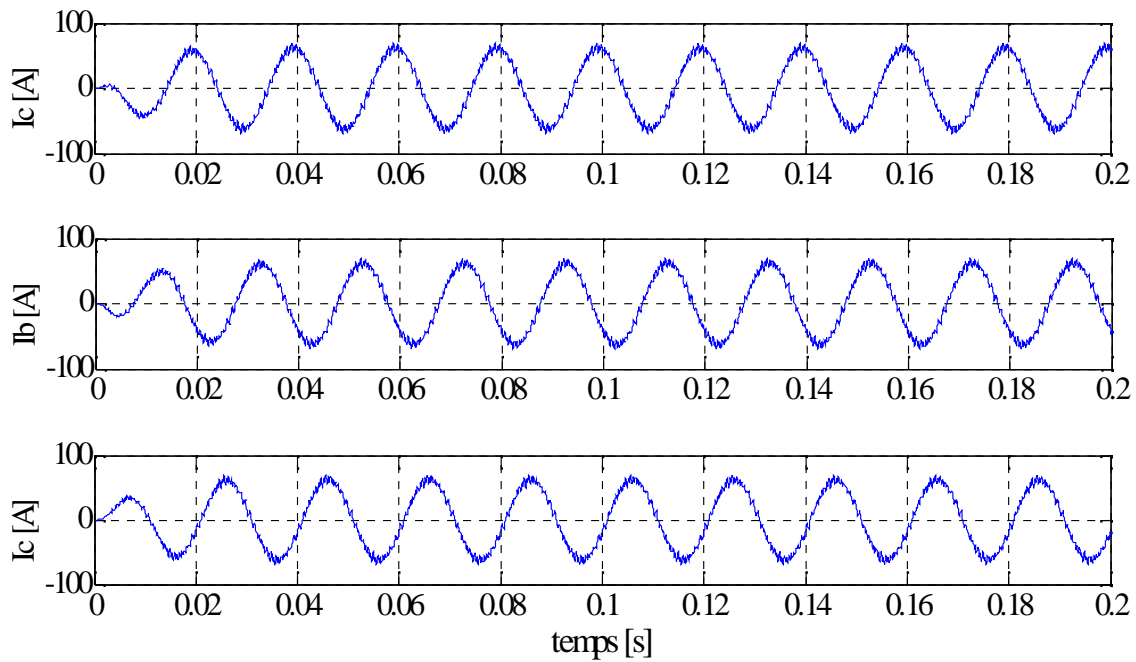


Figure (III.30) : Les courants I_a , I_b , I_c à la sortie de l'onduleur pour commande MLI.

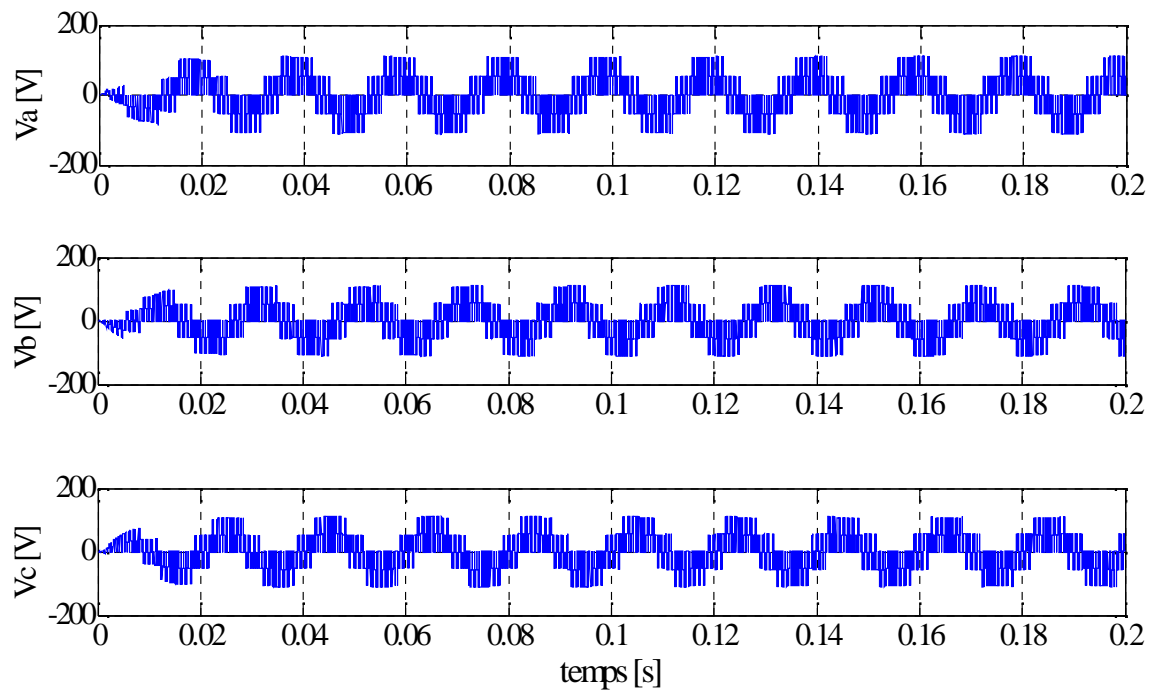


Figure (III.29) : Les tensions V_a , V_b , V_c à la sortie de l'onduleur pour commande MLI.

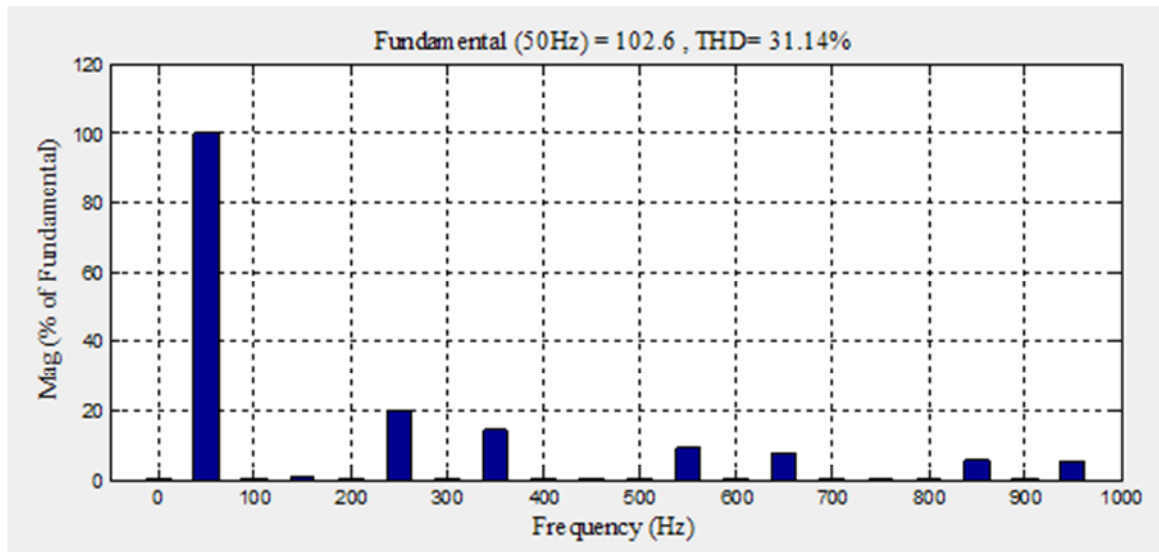


Figure (III.31): Spectre de la tension ondulée par commande MLI.

- **Interprétations des résultats**

Pour la commande MLI nous remarquons que le signal de tension et de courant est plus proche d'une forme sinusoïdale par rapport à la commande décalée, donc moins de THD, ce dernier dépend de l'indice de modulation m .

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé l'association AC/DC/ afin de produire une énergie qui répond aux normes requises.

Nous avons présenté en premier lieu le redresseur à diode puis nous avons présenté l'onduleur triphasé qui est commandé par deux stratégies de commande (décalé et MLI).

Après avoir comparé les deux types de commande décalé et MLI, nous avons constaté que l'on a de meilleurs résultats avec la deuxième commande. Les résultats de différentes simulations réalisées ont permis aussi de valider les modèles mathématiques des convertisseurs.

Dans le chapitre suivant, nous allons voir les conditions de l'intégration d'un éolien dans un réseau électrique, et la participation des éoliennes aux services – systèmes.

CHAPITRE IV

INTÉGRATION DES ÉOLIENNES AUX RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

IV. INTÉGRATION DES ÉOLIENNES AUX RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

IV.1. Introduction

L'énergie électrique est transportée aux consommateurs par des réseaux électriques. La tension produite à la sortie de l'éolienne est de l'ordre de quelques centaines de volts. Il est donc souvent nécessaire de disposer sur le site de production d'un transformateur de puissance élévateur de tension. Celui-ci permet de raccorder aux réseaux de moyennes tensions (MT) pour les fermes éoliennes de petites puissances, ou aux réseaux de haute tension (HT) pour les fermes éoliennes de fortes puissances (fermes éoliennes offshore), où la présence du vent est plus régulière.

Avant l'intégration d'un parc éolien dans un réseau électrique, il faut vérifier les conditions de couplage suivantes :

- L'égalité de valeurs maximales de tension, donc de leurs valeurs efficaces ;
- L'égalité de fréquences ;
- Un déphasage nul entre elles ;
- En triphasé, même succession des phases.

IV.2. Système d'énergie électrique

Un réseau électrique est un système dynamique complexe qui met en œuvre de nombreux acteurs et possède bien entendu ses propres limites physiques. Il a pour objectif de satisfaire l'alimentation des consommateurs tout en garantissant une qualité de l'énergie électrique, et la sécurité des biens et des personnes. Pour cela il doit être correctement dimensionné et contrôlé.

IV.2.1. Architecture du réseau électrique

La plupart des réseaux électriques, ont été conçus pour des raisons techniques et économiques sur une hiérarchie descendante figure (IV.1) [14]. La description qui suit présente le cas du réseau d'énergie électrique Algérien.

Au sommet de cette hiérarchie se trouvent les systèmes de production dits classiques. Ces systèmes de forte puissance sont principalement des centrales thermiques et hydroélectriques. Ces producteurs sont centralisés de par leur connexion au réseau de transport maillé à très haute et haute tension : (de 63-225-400 kV). Ce réseau a une envergure nationale et est dimensionné pour transporter de grande quantité d'énergie

électrique sur de grande distance avec un minimum de pertes. Il est connecté aux autres réseaux nationaux. L'exploitation de ce réseau sous forme maillé accroît la sûreté de fonctionnement puisqu'elle permet d'assurer la continuité de service en cas d'incident sur une ligne ou sur une unité de production. Les liens entre les différents niveaux de tension sont assurés par l'intermédiaire des postes de transformation.

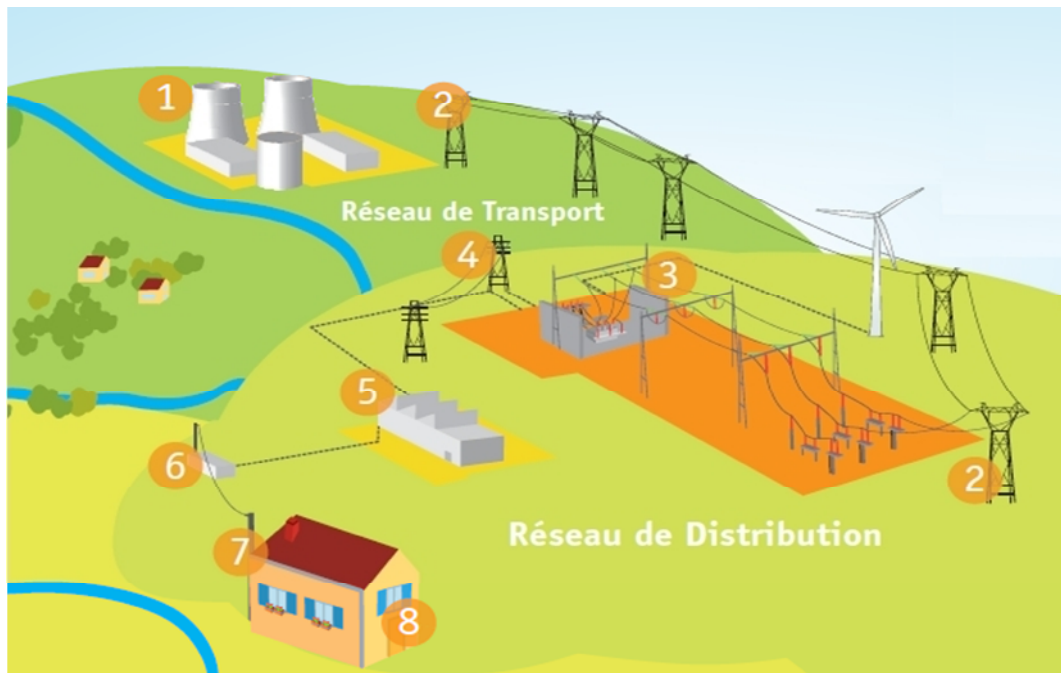


Figure (IV.1) : Architecture des réseaux électriques.

- 1) La centrale électrique
- 2) Le réseau à haut tension (HT)
- 3) Le poste source (transformation HT/MT)
- 4) Le réseau à moyenne tension (MT)
- 5) Consommateurs industriels
- 6) Transformateur (MT/BT)
- 7) Le réseau basse tension (BT)
- 8) Client basse tension (BT)

L'énergie électrique est ensuite acheminée vers les consommateurs raccordés en basse tension (BT) (380/220 V) à travers les réseaux de distribution qui fonctionnent généralement sous une tension de 30-10 kV. Ces réseaux sont raccordés au réseau de transport via des

postes sources et sont principalement exploités sous forme radiale en milieu rural (arborescence) et en coupure d'artère en milieu urbain (boucle ouverte).

IV.3. Description d'un parc éolien

Actuellement, les parcs éoliens sont connectés au réseau de distribution à travers un poste source (transformateur HT/MT). Le nombre maximal d'éoliennes constituant un parc est limité par la législation en vigueur qui limite la puissance installée à 12 MW. Le parc éolien est constitué ainsi de 4 à 6 éoliennes de 2 MW chacune. Chaque éolienne produit son électricité en 690 V et dispose d'un **Poste De Transformation (PDT)** de 0.69/10 kV. Le point commun du parc avec le réseau électrique de distribution est constitué par un **Poste De Livraison (PDL)**.



Figure (IV.2) : Schéma de principe du raccordement des éoliennes au réseau.

Les postes de transformation, dans lesquels il y a les transformateurs élévateurs 0.69/10kV, sont situés au pied des éoliennes. Les caractéristiques d'un tel transformateur sont montrées dans le Tableau (IV.1) [14].

Puissance apparente	2.3 MVA
Connexion	Yn
Tension primaire	20 kV
Tension secondaire	069 kV
$I_{n_{20kV}}$	66.4 A
Pcc	17854 W
Ucc	7.85 %

Tableau (IV.1) : Caractéristiques du transformateur.

Les éoliennes sont reliées au PDT, et les PDT entre eux par des câbles triphasés en cuivre de section 3x240 mm². Un câble en aluminium de section 3x240 mm² fait la liaison entre le poste de livraison et le poste source.

Connexion	Niveau de tension	Section	R (/km)	L (mH/km)	C (µf/km)
MM82-PDT	BT (Cu)	240	0.16	0.33	0.36
PDT-PDL	MT (Cu)	240	0.16	0.33	0.36
PDL-PS	MT (Al)	240	0.088	0.316	0.365

Tableau (IV.2) : Caractéristiques des câbles utilisés dans les parcs de Maia Eolis [14].

La liaison du parc avec le réseau électrique de distribution est constituée par un PDL dans lequel on trouve les appareillages de protection ainsi que le comptage d'énergie. L'objectif principal envisagé pour ce type de raccordement au niveau des services système est de fournir un service de réactif au poste source tout en maintenant la tension à l'intérieur du parc dans les marges admissibles.

IV.4. Limites de variation de tension pour le réseau

Il existe différents matériels dans un parc qui exige d'appliquer des limites sur les grandeurs électriques comme la tension pour garantir leur sécurité. Les limites supérieures de tension sont imposées par la tenue diélectrique des matériels, ainsi que par les limites de saturation des transformateurs. Une tension trop élevée peut réduire la durée de vie d'appareils utilisateurs. Les limites inférieures de tension sont imposées par le fonctionnement correct des appareils. Une tension trop basse induira une surcharge de certains équipements (lignes et transformateurs) par augmentation du courant. Bien évidemment, ce phénomène peut mettre en risque le bon fonctionnement des appareils de protection qui sont sensibles à la variation du courant.

La tension statorique des éoliennes doit être maintenue à tout instant dans les limites imposées par le constructeur. De plus, toujours dans le but de limiter le vieillissement prématuré des divers éléments des éoliennes (machines synchrones, interface d'électronique de puissance, etc.), il est préférable d'éviter les variations brutales de tension supérieure à $\pm 4\%$.

De même que pour les éoliennes, la tension dans un point quelconque à l'intérieur du parc doit être maintenue à tout instant dans les limites contractuelles.

Niveau de tension	Niveau de tension	Plage de variation de tension
BT	690 V	-15% à +10% U_n
MT	10 kV	$\pm 5\%$ U_c

Tableau (IV.3) : Limites de variation de tension à l'intérieur du parc.

Les limites de variation de tension pour les câbles basse/haute tension et le transformateur sont cohérentes avec les valeurs contractuelles imposées pour les nœuds.

Les limites de variation de la tension au point de connexion au réseau dépendent du niveau de tension du réseau [14][17].

Réseaux	Niveau de tension	Plage de variation de tension
THT	400 kV	$\pm 5\%$ U_n
	225 kV	-11% à +9% U_n
HT	90 kV	$\pm 8\%$ U_c
	63 kV	$\pm 8\%$ U_c
MT	30-10 kV	$\pm 5\%$ U_c
BT	690 V	-15% à +10% U_n

Tableau (IV.4) : Limites de variation de tension pour le réseau.

U_c est la tension contractuelle pour les différents réseaux

IV.5. Participation des éoliennes aux services – système

Chaque raccordement au réseau, chaque modification dans la structure opérationnelle d'une unité de production provoque un changement plus ou moins important de l'état dynamique du réseau. La planification des réseaux examine et quantifie l'impact de ces changements selon différents critères techniques [14][15].

Une production classique raccordée est tenue de participer à deux niveaux :

- Au support de tension, évalué en fonction de la capacité d'injection ou d'absorption de puissance réactive (réglage de tension).

- A l'équilibre production-consommation, évalué en fonction de la capacité d'injection ou d'absorption de puissance active (réglage de fréquence).

La pénétration toujours croissante d'énergie d'origine éolienne va pousser ces générateurs à contribuer à ces services-système, en participant au support de tension et à l'équilibre production-consommation. Ces nouvelles dispositions remettent en cause le principe de base des générateurs éoliens, à savoir extraire le maximum de puissance.

Cette étude s'intéresse désormais aux possibilités offertes par les éoliennes en termes de participation au réglage de tension et au réglage de fréquence.

IV.5.1. Participation des éoliennes au réglage de la tension

IV.5.1.1. Réglage de tension

Le réglage de tension est organisé hiérarchiquement en trois niveaux de réglage :

- Réglage primaire de tension (réglage de tension aux nœuds de raccordement des producteurs).
- Réglage secondaire de tension (réglage de tension en diverses zones du réseau en modifiant certaines puissances réactives de consigne de groupes).
- Réglage tertiaire de tension (réglage optimisant le dispatching des puissances réactives suivant des critères économiques).

Le réglage primaire de tension est en général obligatoire pour toutes les unités de production, par ajustement de niveau de puissance réactive absorbée ou fournie.

L'action consiste à régler l'excitation des productions classiques figure (IV.3) :

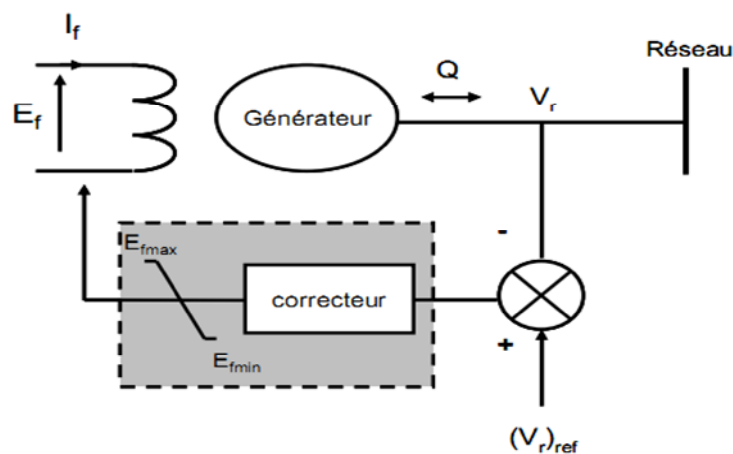


Figure (IV.3) : Réglage primaire de tension [16].

IV.5.1.2. Participation au réglage de tension

La stratégie d'action consiste à utiliser les possibilités offertes par l'interface d'électronique de puissance pour les structures à vitesse variable et par le contrôle associé. On s'intéresse ici seulement au réglage primaire de tension pour les éoliennes, par contrôle de l'énergie réactive échangée avec le réseau.

La présence d'un onduleur de tension connecté au réseau pour les structures MADA et MSAP permet de contrôler l'énergie réactive échangée en jouant sur la composante réactive du courant figure (IV.4). En effet, avec le choix du référentiel, la puissance réactive est directement proportionnelle à la composante réactive I_{ondq} du courant dans le référentiel de la commande de l'onduleur [16].

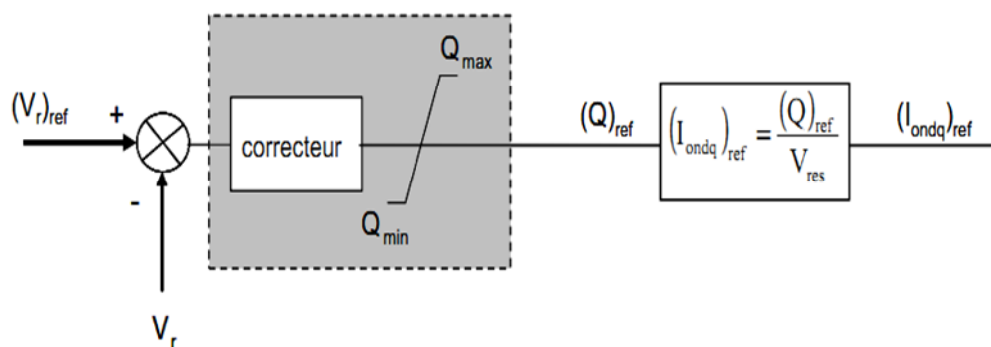


Figure (IV.4) : Réglage de tension par l'onduleur côté réseau.

IV.5.2. Participation des éoliennes au réglage de la fréquence

L'un des objectifs majeurs du contrôle des systèmes de puissance est de maintenir l'équilibre entre la puissance électrique produite par les unités de production et la puissance consommée par les charges, et ce à tout instant. En fonctionnement normal, la fréquence est homogène sur l'ensemble du réseau. En cas d'évolutions (des charges ou des générateurs), pour ajuster la production à la demande, il convient de régler la fréquence. Celle-ci est organisée hiérarchiquement en trois niveaux de réglage, échelonnés dans le temps [16], le réglage primaire, le réglage secondaire, le réglage tertiaire figure (IV.5).

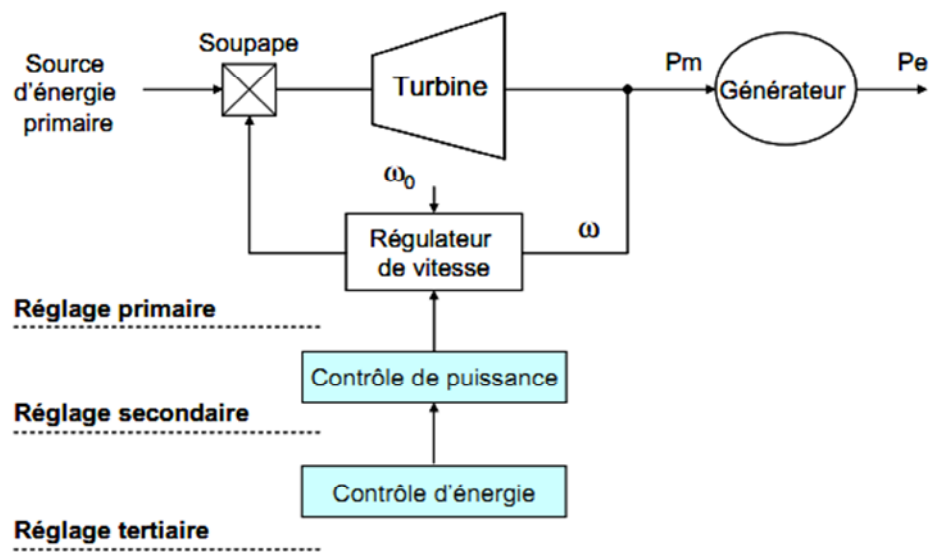


Figure (IV.5) : Régulation hiérarchique de fréquence.

Le réglage primaire (quelques secondes) est un réglage automatique. Il permet d'arriver rapidement à un nouvel équilibre production/consommation. Chaque groupe ajuste sa production en fonction de ses capacités. Le nouveau point de fonctionnement n'est plus nécessairement à la fréquence $f_0 = 50$ Hz. Ce réglage est obligatoire pour tous les groupes de production classiques raccordés au réseau de transport.

La notion de réserve de puissance primaire dans les systèmes éoliens n'est pas une notion « naturelle ». En effet, jusqu'à ces derniers temps, l'ensemble de la communauté éolienne cherchait plutôt à maximiser le rendement en optimisant la puissance produite. La notion de participation des éoliennes au réglage primaire de fréquence met un coup d'arrêt à cette idée reçue puisqu'elle passe nécessairement par une dégradation du rendement pour créer cette réserve de puissance [16].

Le réglage secondaire (quelques minutes) est un réglage automatique ou manuel. Il permet de rétablir la fréquence à la valeur de 50 Hz, et de maintenir les échanges de puissance entre les réseaux interconnectés, en conformité avec les programmes convenus. Le nombre de producteurs participant à ce réglage est plus faible que ceux prenant part au réglage primaire, même si un même générateur peut participer aux deux réglages.

Le réglage tertiaire (quelques dizaines de minutes) est un réglage manuel. Il permet d'adapter le plan de production à la situation réelle, et de répartir la réserve tournante entre

les différents moyens de production. Cette réserve est la puissance quasi-instantanée mobilisable, en supplément de la prévision de consommation moyenne. La répartition de cette réserve est basée sur des critères économiques et techniques.

Le problème de détection de la variation de fréquence ne se pose pas. En effet, les génératrices synchrones étant directement couplées au réseau, une variation de fréquence entraîne une variation de vitesse : la détection est donc naturelle.

IV.6. Description des différents types de raccordement

Nous avons présenté jusqu'ici le mode de connexion actuel de la plupart des éoliennes connectées au réseau en France. Il s'agit d'un départ dédié au niveau d'un poste source (raccordement direct d'un parc au réseau de distribution). Les paragraphes IV.6.1 et IV.6.2 expliquent les autres configurations envisageables [14].

IV.6.1. Raccordement des parcs éoliens au réseau haut tension

Ce mode de connexion s'apparente au mode précédent hormis le fait qu'aucune charge n'est connectée au poste source figure (IV.6). La puissance de ces parcs peut atteindre plusieurs dizaines de MW.

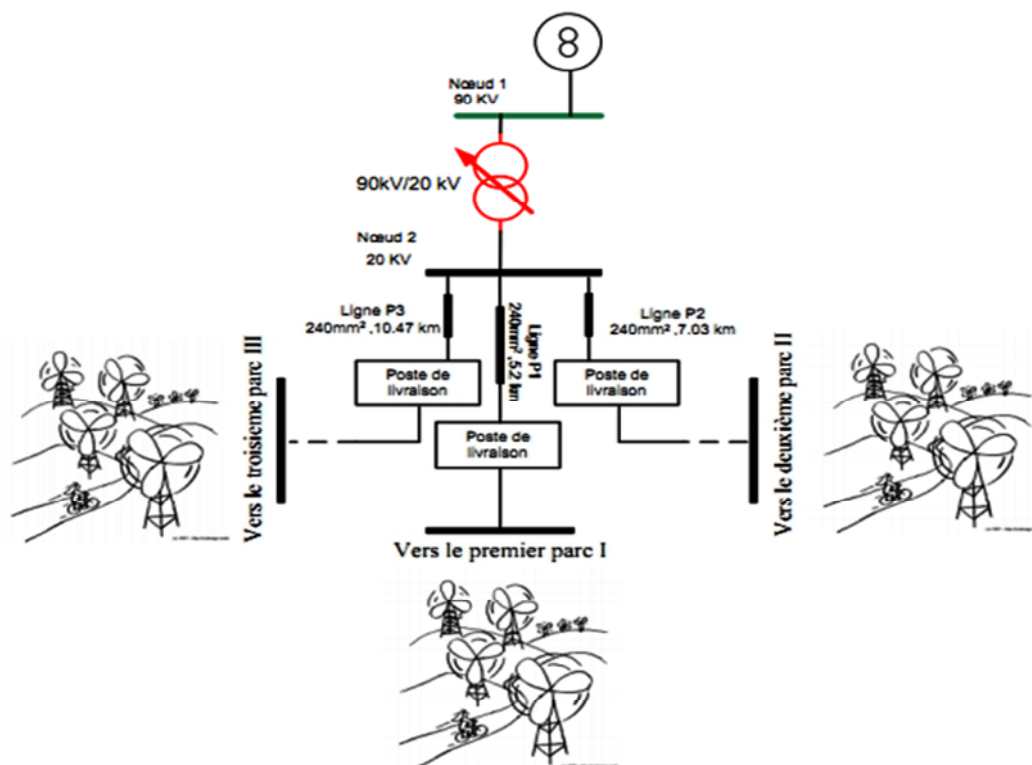


Figure (IV.6) : Raccordement d'un ensemble de parcs éoliens au réseau HT.

IV.6.2. Raccordement des éoliennes au réseau moyen tension

Ce type de raccordement est montré dans la figure (IV.7). Ces éoliennes peuvent participer, en coordination avec le régleur en charge du transformateur du poste source, au contrôle de la tension, dans le nœud de connexion.

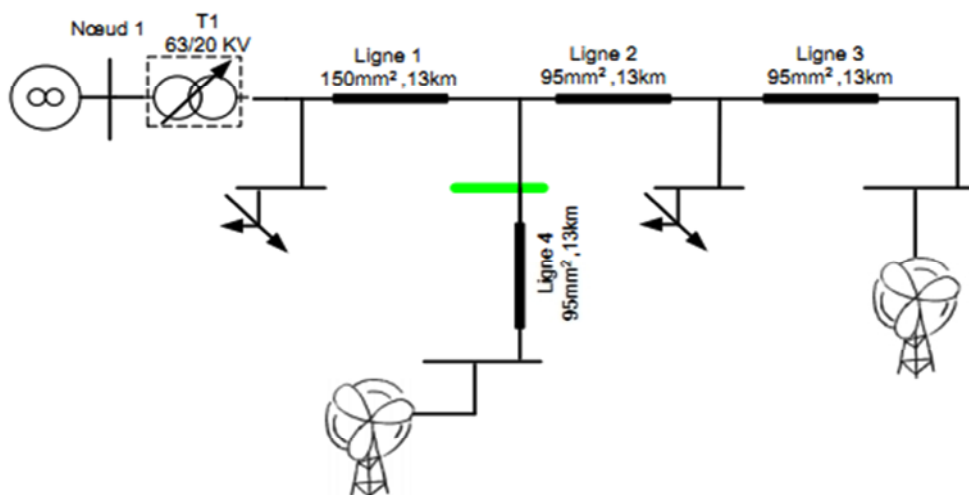


Figure (IV.7) : Raccordement des éoliennes réparties au réseau MT.

IV.7. Étude du comportement du système éolien en cas d'un défaut

Un « défaut » peut provoquer une chute de tension ou creux de tension. Ce dernier est une diminution brusque de la tension de fourniture V à une valeur inférieure à une valeur de seuil (comprise entre 10% et 90% de la tension contractuelle V_c), suivie de son rétablissement après un court instant.

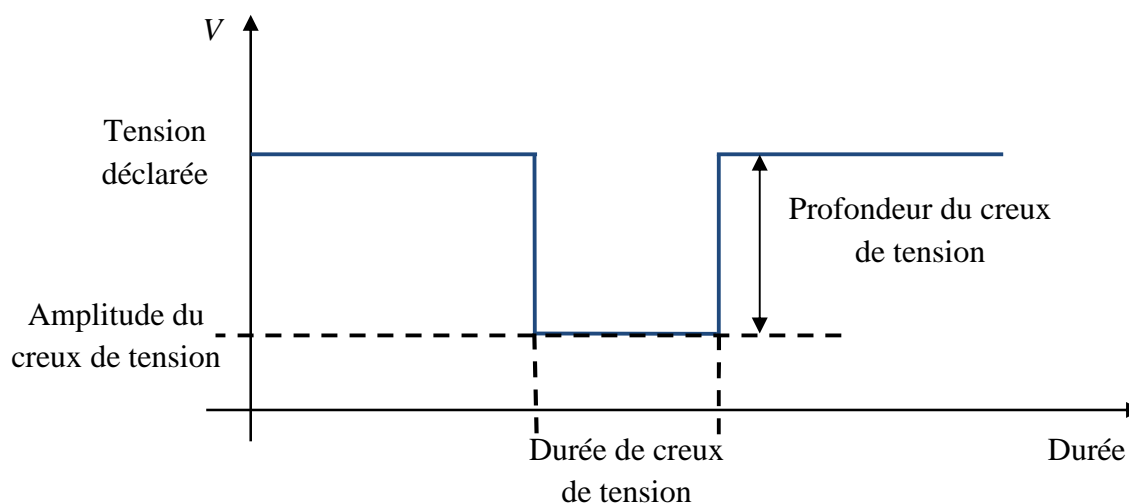


Figure (IV.8) : Caractérisation du creux de tension [1][14].

L'amplitude du creux de tension est conditionnée par la structure du réseau, notamment la puissance de court-circuit et la distance entre le point de défaut et le point où est situé l'utilisateur sur le réseau. Ainsi, plus la puissance de court-circuit en amont de l'utilisateur est élevée ou plus le défaut est éloigné du point de raccordement de l'utilisateur, moins l'amplitude du creux de tension ressentie est importante, ou plus la profondeur est faible figure (IV.8).

Les principaux types de creux de tensions suivent :

- Creux de tension de type A appelé creux de tension triphasé équilibré ;
- Creux de tension de type B appelé creux de tension monophasé ;
- Creux de tension de type C appelé creux de tension biphasé avec saut de phase ;

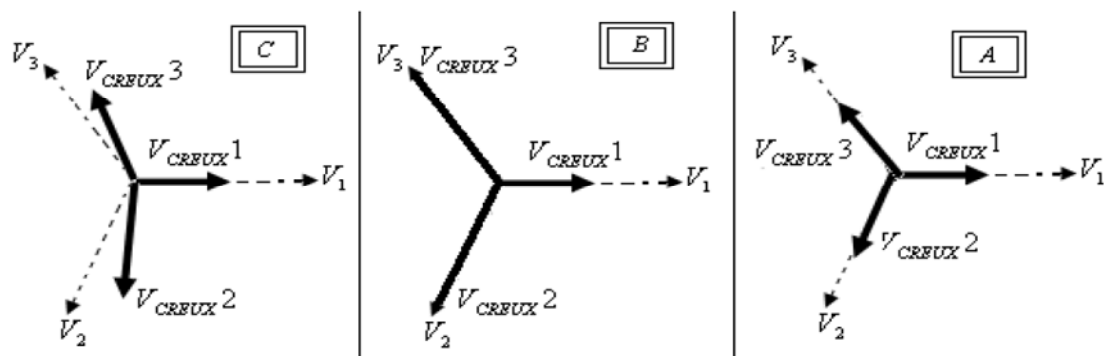


Figure (IV.9) : Classification des creux de tension [1].

IV.8. Étude du régime permanent

Actuellement, le problème d'écoulement de puissance a connu une importance considérable, notamment avec l'apparition de la crise d'énergie. La minimisation du coût du MWH est devenue très importante. La détermination donc des plans ou des stratégies optimales de répartition de puissances dans les réseaux électriques reste un besoin indispensable pour l'exploitation des réseaux électriques.

La résolution du problème d'écoulement de puissance consiste à déterminer les modules et les phases des tensions, les puissances actives et réactives des différents jeux de barres et les charges. Pour cela, le problème d'écoulement de puissances est décrit par un ensemble d'équations non linéaires. Ces équations peuvent être résolus par des méthodes itératives, en utilisant soit la matrice admittance ou impédance caractérisant le réseau électrique (méthodes de Gauss, Gauss Seidel, Newton Raphson,...etc) [13].

IV.8.1. Classification des jeux de barres

Selon les puissances actives et réactives, les tensions, les angles, les jeux de barres sont classés comme suit [17] :

- jeu de barres de référence (slack bus) : où la tension et l'angle sont spécifiés, les puissances actives et réactives sont inconnues.
- jeu de barres de charge (PQ bus) : où les puissances actives et réactives sont spécifiées, la tension et l'angle sont inconnus.
- jeu de barres de génération (PV bus) : où la puissance active et la tension sont spécifiées, la puissance réactive et l'angle sont inconnus.

IV.8.2. Equations de l'écoulement de puissance en utilisant la matrice admittance

La résolution du problème de l'écoulement de puissance est basée sur un processus itératif. Pour un réseau à « n » jeux de barres, l'expression de la puissance apparente est donnée par la relation suivante :

$$S_p = V_p I_p^* = P_p + jQ_p \tag{IV.1}$$

$$S_p^* = P_p - jQ_p = \overline{V}_p I_p^* \tag{IV.2}$$

(p=1, 2, 3..., n)

L'expression du courant est donnée par :

$$I_p^* = \frac{P_p + jQ_p}{V_p} \tag{IV.3}$$

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p} \tag{IV.4}$$

Où :

I_p^* : Courant conjugué.

S_p : puissance apparente au nœud p

P_p, Q_p : puissance active et réactive au nœud p

Y_{pq} : élément de la matrice admittance défini par $Y_{pq} = |Y_{pq}| < -\theta_{pq}$

V_p, V_q : tensions aux jeux de barres p et q respectivement exprimées par :

$$V_{p,q} = |V_{p,q}| < \delta_{p,q} \quad (\text{IV.5})$$

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \quad (\text{IV.6})$$

IV.8.3. Méthode de Gauss-Seidel

On remplace l'équation (IV.6) dans l'équation (IV.4):

$$\frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} = (Y_{p1} V_1 + Y_{p2} V_2 + Y_{pp} V_p + \dots + Y_{pn} V_n) \quad (\text{IV.7})$$

D'où :

$$Y_{pp} V_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} - (Y_{p1} V_1 + Y_{p2} V_2 + \dots + Y_{pn} V_n) \quad (\text{IV.8})$$

Donc l'expression de la tension au nœud p sera donnée par :

$$V_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} - \sum_{\substack{q=1, \\ q \neq p}}^n Y_{pq} V_q \right] \quad (p=1, 2, 3, \dots, n, p \in s) \quad (\text{IV.9})$$

s : désigne le jeu de barres de référence

Pour simplifier l'équation précédente, on pose

$$\frac{1}{Y_{pp}} = L_p \quad (\text{IV.10})$$

$$P_p - jQ_p = K \quad (\text{IV.11})$$

L'équation (IV.9) s'écrit comme suit [13] :

$$V_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} L_p - \sum_{\substack{q=1, \\ p \neq q}}^n Y_{pq} L_p V_q \quad (\text{IV.12})$$

L'équation (IV.12) devient :

$$V_p = \frac{K}{V_p^*} L_p - \sum_{\substack{q=1, \\ p \neq q}}^n Y_{pq} L_p V_q \quad (\text{IV.13})$$

Le calcul des nouvelles valeurs se fait sur la base de (IV.13) par un processus itératif, les étapes de calcul sont les suivantes :

- Estimation des valeurs initiales $V_{(0)}$
- Calcul de nouvelle solution $V_{(0)}$ en utilisant les valeurs estimées
- Teste de convergence $\left| \overline{V}_i^{(L+1)} - \overline{V}_i^{(L)} \right| < \varepsilon$ (: tolérance désirés) pour tous les jeux de barres.
- la solution obtenue sera utilisée pour la prochaine itération.

Dans chaque itération, la tension est déterminée pour tous les jeux de barres sauf pour le jeu de barres de référence. Si les nouvelles valeurs sont utilisées pour calculer les prochaines tensions dans la même itération, ce processus est connu par la méthode de Gauss Seidel.

Si le même ensemble des valeurs des tensions calculées est utilisé dans une itération complète (au lieu de substituer les nouvelles valeurs chaque fois qu'elles sont déterminées pour calculer la tension du jeu de barres suivant) le processus serait appelé la méthode de gauss.

Les deux processus itératifs sont donnés par :

- Méthode de Gauss :

$$V_p^{(L)} = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - jQ_p}{V_p^{*(L-1)}} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} V_q^{(L-1)} \right] \quad (IV.14)$$

-Méthode de Gauss Seidel :

$$V_p^{(L)} = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - jQ_p}{V_p^{*(L-1)}} - \sum_{q=1}^{p-1} Y_{pq} V_q^{(L)} - \sum_{q=p+1}^n Y_{pq} V_q^{(L-1)} \right] \quad (IV.15)$$

Où :

L et L-1 : indiquent les itérations en cours et précédente.

La puissance de transit entre les nœuds p et q est donnée par l'expression (IV.16) [13] :

$$S_{pq} = \overline{V}_p \left(\overline{V}_p^* - \overline{V}_q^* \right) Y_{pq} + \overline{V}_p^* \overline{V}_q^* B_{pq}^* \quad (IV.16)$$

B: désigne la susceptance de la branche p, q

IV.9. Conclusion

Ce chapitre présente les moyens et différentes techniques de raccordement des fermes éoliennes. Nous avons exposé l'impact de l'éolienne pour le réglage de la tension et de la fréquence et l'impact de pénétration de l'éolienne sur la tension et la puissance qui se détermine par le calcul de puissance, ce qui fera certainement l'objet d'un autre mémoire.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent, d'une façon générale, l'étude, la modélisation et la simulation de systèmes de production d'électricité, à partir d'une source d'énergie renouvelable (le vent).

Dans ce cadre nous avons représenté le modèle d'une chaîne de production éolienne : turbine, générateur à aimant permanent, redresseur à diode et onduleur triphasé. Pour la maximisation de l'énergie contenue dans le vent, la technique de recherche du point optimal de puissance MPPT adoptée ici est basée sur l'architecture et la connaissance de la caractéristique de la voilure (via la vitesse réduite).

Dans ce mémoire, nous sommes arrivés à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes et nous avons établi la modélisation de la turbine éolienne car elle constitue un élément fondamental dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Nous avons observé son comportement à travers d'une simulation pour différents profile de vent.

Les machines à aimants permanents apportent une solution intéressante pour l'utilisation des énergies renouvelables ; ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines classiques à savoir : un rendement amélioré par l'élimination des pertes Joules, et une maintenance très réduite, durée de vie élevée, rendement élevé, maintenance réduite....etc.

Le modèle de la GSAP utilisé au cours de ce travail a été validé par les résultats de simulation (à vide, avec une charge).

Nous avons étudié et simulé les redresseurs à diode. Les résultats de simulation ont montré que la tension à la sortie du redresseur n'est pas parfaitement continue, donc elle a besoin de filtrage ; ceci est le rôle de la capacité.

Puis on a pris les onduleurs triphasés. Nous avons comparé et exposé les deux types de commande décalé et MLI ; on a constaté que la deuxième commande est la plus appropriée La dernière étape de ce chapitre est consacrée à l'association du redresseur, filtre et onduleur dans la partie turbine - machine synchrone à aimant permanent.

Enfin, l'intégration de l'éolienne aux réseaux électrique est présente, nous avons vu les conditions de l'intégration d'un éolien dans un réseau électrique, et la participation des éoliennes aux services – systèmes.

L'ensemble de ces travaux peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de l'ensemble de la chaîne de conversion éolienne-réseau électrique. Ces perspectives sont :

- L'amélioration et le développement système de commande de la machine synchrone afin d'améliorer les performances du réseau ;
- L'utilisation d'autres convertisseurs statiques plus développés ;
- La réalisation d'une plateforme expérimentale permettant d'expérimenter en temps réel le comportement d'un générateur éolien à vitesse variable débitant sur un réseau alternatif et par la même, valider les résultats de simulation présents dans ce mémoire.
- Le développement d'un système de commande de l'aérogénérateur qui adapte les variations de l'angle d'attaque de la pale (pitch control) aux variations du vent pour atteindre une puissance générée constante.

BIBLIOGRAPHIE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Mayouf Messaoud "Contribution à la modalisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent" Mémoire de Magister de l'université de Batna, 2008.
- [2] M. Benkhelil Ehlal "Simulation Dynamique des Fermes Éoliennes Intégrées dans un Réseau Électrique Multimachine " Mémoire de Magister de l'université Farhet Abbes, Setif ,2010.
- [3] Bouhedda Ali "Contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne" Mémoire de Magister de l'université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou 2011.
- [4] Benbrahim Amel" Commande Prédictive Généralisée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents" Mémoire de Magister de l'université de Batna, 2009.
- [5] Hassini née Belghitri Houda "Modélisation, simulation, et optimisation d'un système hybride éolienne-photovoltaïque" Mémoire de Magister de l'université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen, 2010
- [6] Bencherif Bilel "Etude et modélisation des différents composants d'une installation éolienne utilisant un générateur synchrone à aimants permanents" Mémoire de Magister de l'université Farhet Abbes, Setif 2011.
- [7] Global Wind Energy Council, Anuall update 2011.
- [8] Chemmouri Boudjema, Gafer Boubekour "Commande non- linéaire d'une machine synchrone à aimant permanent " Mémoire d'ingénieur de l'université de M'sila ,2006.
- [9] Lilia Abdelhamid "Contribution à l'étude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens" Mémoire de Magister de l'université de Batna, 2008.

[10] Aoufi Saliha & Hamdipacha Fatima " Commande par logique floue de la machine synchrone à aimants permanents " Mémoire d'ingénieur de l'université de M'sila ,2010.

[11] Soltane Belakehal"Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables" Thèse de doctorat de l'université Constantine, 2010.

[12] Abada Abdelhalim Zellagui Mahmoud "Commande adaptative par modèle de référence, application sur la machine synchrone à aimants permanents " Mémoire d'ingénieur de l'université de M'sila, 2007.

[13] Delendi Louardi "Contrôle de l'écoulement de puissance active par système facts " Mémoire de Magister de l'université de Batna, 2009.

[14] Amir Ahmidi "Participation de parcs de production éolienne au réglage de la tension et de la puissance réactive dans les réseaux électriques" Thèse de doctorat, Ecole central de lille ,2010.

[15] Vincent Courtecuisse "Supervision d'une centrale multisource à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique" Thèse de doctorat, 2008.

[16] Alexandre Teninge " Participation aux services système de parcs éoliens mixtes : application en milieu insulaire " Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble 2009.

[17] Nicolas Laverdure "l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires" Thèse de doctorat Institut polytechnique de Grenoble, 2005.

[18] Arnaud Davigny "Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie" Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007.

ANNEXE

Les paramètres de La turbine:

L'exemple donné correspond à la turbine E-40 proposée par le constructeur allemand ENERCON dont la puissance nominale est de 1.5MW

Les six coefficients définis $C_1=0.5176$ $C_2=116$ $C_3=0.4$ $C_4=5$ $C_5=21$ $C_6=0.0068$

L'angle de calage prenez les valeurs suivantes (0° , 5° , 10° , 15° , 20°)

Le rayon de la turbine $R_t=14$ m

L'inertie de l'arbre $J_t=50$ Kg. m^2

Le gain du multiplicateur de vitesse $G=28$

Coefficient de frottement de la machine $f_v=7e-3$ Nm/rd/s

La masse volumique $R_o=1.125$

Les paramètres de La machine synchrone à aimant permanent ; utilisée pour les simulations:

À vide :

$R_s=2.875$; $L_d=0.0085H$; $L_q=0.0085H$; $J=0.008$ Kg. m^2 ; $f=0$ Nm/rd/s ; $p=4$;
 $=0.175$ Wb ; $P=1$ KW.

En charge :

$R_s=0.895$; $L_d=0.012H$; $L_q=0.0211H$; $J=0.00141$ Kg. m^2 ; $f=0.001$ Nm/rd/s ; $p=3$;
 $=0.9$ Wb ; $R_{ch}=50$; $L_{ch}=0.002H$; $P=1$ KW.

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DE DIPÔLME
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE : AUTOMATIQUE**

Proposé et dirigé par : Mr. MESSALTI Sabir

Présenté par : MAROUF Adel

Thème :

**Étude et modélisation d'une chaine de production éolienne
à base d'une machine synchrone à aimant permanent**

Résumé :

Le système énergétique étudié dans ce mémoire est un système d'énergies renouvelables (éolienne). Pour une exploitation optimale de cette énergie, il faut utiliser des générateurs fonctionnant à des vitesses variables, cela est le cas dans cette étude en utilisant les machines synchrone à aimants permanents couplées à des convertisseurs d'adaptation et de conversion des formes d'énergie électrique. En effet, ces machines présentent beaucoup avantages par rapport aux machines conventionnelles à enroulements : durée de vie élevée, rendement élevé, maintenance réduite,...etc. Les modèles de simulation ont été utilisées pour étudier le comportement de système d'énergie éolien, ainsi que les différentes stratégies de commande appliquées à l'onduleur pour transférer une puissance maximale au réseau électrique. Les résultats de simulation ont été satisfaisants et décrivent le mode d'emploi de ce type de technologie utilisé pour produire de l'électricité.

Mots clés : Energies renouvelables, Eoliennes, Turbine, Machine Synchrone à Aimants Permanents, Onduleur, Réseau électrique.

N° d'ordre : 14