

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par

M. OUNNOUGHI Farid

Thème

INTEGRATION D'UNE EOLIENNE AU RESEAU ELECTRIQUE

Mémoire soutenu publiquement le 30/09/2023 devant le jury composé de :

M. OTMANE CHERIF Tahar

Professeur, UMMTO, Président

M. DICHE Arezki

MAA, UMMTO, Promoteur

M. MOUDOUD Mustapha

Professeur, UMMTO, Examineur

Dédicaces

Je didie ce travail à mes parents Larbi et ma mère Zakia, à mes enfants Malek, Aksyl et Fatima, aux enseignants qui mon porté de l'aide dans mon travail, à l'encadreur Monsieur Diche Arezki ainsi que membres du jury Birouche Chafik, Ottamane Cherif Tahar.

Sommaire

Introduction générale.....	1
I.1 Introduction :.....	2
I.2 Notion sur le réseau électrique :.....	2
I.2.1 La production.....	2
I.2.2 La distribution.....	3
I.2.3 La consommation.....	3
I.2.4 Nature de la tension :	3
I.2.5 Courant alternatif :	3
I.2.6 Courant continu :.....	4
I.2.7 L'alternatif sinusoïdale et le triphasé.	4
I.2.8 Réseau réel	4
I.3 Conditions de couplage d'un générateur au réseau.....	5
I.3.1 Couplage d'un alternateur sur le réseau principe :.....	5
I.3.2 Manœuvres de couplage :	6
I.3.3 Couplage et perturbations :	6
I.3.4 Les problèmes induits par l'intégration d'éolienne dans le réseau électrique sont causés par :.....	6
I.4 Contraintes de raccordement de l'éolienne au réseau.....	7
I.4.1 Réglage de la tension :	7
I.4.2 Les types de réglages primaires sont possibles :.....	8
I.4.3 Réglage de la fréquence :	8
I.4.4 Problèmes induits par l'intégration de l'éolien dans le réseau de transport :	9
I.4.5 Prévision de la production :	9
I.4.6 Capacité d'accueil du réseau :.....	9
I.4.7 Déconnexions intempestives :.....	9
I.5 Perturbations mécaniques et électriques	9

I.6 Notions sur la qualité de l'énergie	10
I.6.1 La tension :	10
I.6.2 Fréquence :	11
I.7 Conclusion :	12
II.1 Introduction	13
II.2 Modalisation du système de conversion d'énergie éolienne	13
II.2.1 Définition de l'énergie éolienne :	13
II.2.2 Principe du vent :	14
II.2.3 Principe de conversion :	14
II.2.4 Limite de Batz	15
II.2.5 Cp le coefficient de puissance :	18
II.2.6 La ration ou la vitesse spécifique λ	19
II.2.7 B L'angle de calage :	19
II.2.8 l'énergie du vent :	20
II.3 Modélisation de la partie mécanique d'une éolienne.....	21
II.3.1 Hypothèse simplificatrice pour la modélisation mécanique de la turbine.....	22
II.3.2 Le modèle de la turbine	22
II.3.3 Modèle de multiplicateur.....	23
II.3.4 Modèle de l'arbre mécanique	24
II.4 Simulation de la partie mécanique de l'éolienne.....	25
II.4.1 Les résultats de simulation de la partie mécanique de l'éolienne.....	27
II.5 Modélisation et simulation GSAP	28
II.5.1 Principes des machines synchrones à aimant permanent	28
II.5.2 Les types de génératrices GSAP :	30
II.5.3 Machines synchrones a aimant permanent montés en surface [surface mounted]	30
II.5.4 machine synchrones a aimants permanent insères [MSAPI].....	30
II.5.5 machines synchrone a aimants permanent chapeautes [MSAPC].....	31

II.5.6 Machines synchrones a aimant permanent enterre(MSAPE) :	31
II.5.7 Modélisation de la MSAP.....	32
II.5.8 Mise en équations delà machine synchrone a aiment permanents(MASP).....	32
II.5.9 Le passage ou repère de Park (d,q).....	33
II.5.10 Equations électriques de la MASP	35
II.5.11 Equations magnétiques :.....	35
II.5.12 Equations de couple électromagnétique et l'équation mécanique... ..	35
II.5.13 Simulation de la GSAP	36
II.6 Modélisation des convertisseurs	40
II.6.1 Modélisation des convertisseurs triphasés double alternance à diodes	40
II.6.2 Modélisation du bus continu.....	42
II.6.3 Modalisation l'onduleur de tension	43
II.7 Conclusion	45
III.1 Introduction :	47
III.2Commande vectorielle de la GSAP	47
III.2.1 Principe de la commande vectorielle :	47
III.2.2 Synthèse des correcteurs :	49
III .3 structure de contrôle vectoriel de GSAP	51
III .4 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle.....	52
III.4.1 Les avantages III.(4).....	52
III.4.2 les inconvénients III.(4).....	52
III .5 : Simulation de la commande vectorielle de GSAP	52
III.5.1 Simulation de la GSAP à la vitesse du vent constante	52
III.5.2 Simulation de GSAP pour la vitesse de vent variable.....	55
III.6 Conclusion :.....	56
Conclusion générale	57
Références bibliographiques	

Liste des figures

CHAPITRE I : Problèmes d'intégration d'éolien au réseau électrique

Figure I 1 Organisation globale du réseau électrique

Figure I 2 Le schéma synoptique d'un réseau complet

Figure I 3 domaine de fonctionnement d'une installation

Figure I 4 les lignes (THT)

Figure I 5 réglage primaire de fréquence

CHAPITRE II : Modélisation et simulation du système éolien

Figure II 1 Schéma de la turbine éolienne

Figure II 2 Principe de la conversion de l'énergie éolienne

Figure II 3 Tube de courant autour d'une éolienne

Figure II 4 Vitesse de vent (v) et vitesse tangentielle de l'aube (ΩR)

Figure II 5 schéma global d'une éolienne

Figure II 6 Système mécanique de l'éolienne

Figure II 7 Modèle mécanique simplifié du multiplicateur

Figure II 8 Schéma bloc du model de la turbine éolienne

Figure II 9 Schéma bloc primaire de la partie mécanique d'une éolienne

Figure II 10 Schéma bloc de la partie mécanique d'une éolienne

Figure II 11 STATOR DE LA MSAP

Figure II 12 ROTOR A AIMANT PERMANANT

Figure II 13 MSAP à aimant en surface

Figure II 14 MSAP a aimant insérés

Figure II 15 MSAP a aimant chapeautes

Figure II 16 Machines synchrones à aimants permanents enterrés

Figure II 17: Représentation symbolique de la machine synchrone

Figure II 18 Représentation d'une GSAP dans le repère d q

Figure II 19 Schéma bloc primaire de la GSAP à vide

Figure II 20 Schéma bloc de la GSAP à vide

Figure II 21 Redresseur triphasé double alternance à diode

Figure II 22 Schéma électrique du bus continu

Figure II 23 Le schéma global d'un onduleur à MLI

CHAPITRE III : Commande vectorielle de la GSAP

Figure III 1 Boucle de regulation de courant

Figure III 2 Strategies de commande en couple de GSAP

Figure III 3 Schéma Bloc de commande vectorielle de la GSAP

Figure III 4 simulation de GSAP a vitesse de vent constante

Figure III 5 Simulation de GSAP pour la vitesse de vent variable

Notions des symboles

MS: Machine Synchrone.

MSAP : Machine Synchrone à Aimants Permanent.

GSAP : Génératrice Synchrone à Aimant Permanent.

ρ : Masse volumique de l'air (en Kg/m³).

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ Coefficients dépend de la turbine considérée.

P_m : Puissance mécanique extraite de vent.

V_2 : Représente la vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur.

V_1 : Représente la vitesse du vent en amont l'aérogénérateur.

A : La valeur moyenne de la vitesse du vent.

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k .

ω_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k .

i : Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

C_g : est l'effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice.

G : est le gain du multiplicateur.

f_v : Coefficient de frottements visqueux dans la génératrice.

C_m : Couple de frottement.

V_s : Vecteur des tensions statoriques.

R_s : Matrice des résistances statorique.

I_s : Vecteur des courants statoriques.

φ_s : Vecteur des flux statoriques.

φ_{abc} : Les flux des axes (a, b, c).

φ_f : Flux de l'aimant permanent.

L_s : L'inductance propre des phases statorique.

L_q et L_d : les inductances directe et en quadrature.

φ_f : représente le flux des aimants.

Ω : Vitesse mécanique

J_t : Inertie de la turbine.

J : Inertie de la machine.

p : Nombre de pair de pole.

i_{abc} : Courants des phases statoriques.

v_{abc} : Tensions des phases statoriques.

θ : Position statorique.

i_{dq} : Courant statorique sur les axes d et q.

v_{dq} : Tension statorique sur les axes d et q.

L_{dq} : L'inductance statorique sur les axes d et q.

λ : La vitesse spécifique ou normalisée.

Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicatrice en rad/s.

R : Rayon de la surface balayée en m.

C_p : Le coefficient de puissance.

λ_{opt} : Le coefficient de vitesse réduite optimale.

$P(\theta)$: Transformation de Park.

$P(\theta)^{-1}$: Transformation inverse de Park.

i_1 : Le courant redressé.

i_2 : Le courant à onduleur.

i_{ed} : Le courant de charge du condensateur.

$V_{a,b,c}$: Tensions à la sortie de l'onduleur

$e_{a,b,c}$ Tensions du réseau électrique.

R_t, L_t Filtre triphase.

$i_{1,2,3}$ Courants injectés au réseau électrique.

v_{mq}, v_{md} : Composantes de la tension à la sortie de l'onduleur dans le repère (dq).

e_d, e_q : Composantes de la tension du réseau dans le repère (dq).

i_{tq}, i_{td} : Composantes des courants injectés au réseau dans le repère (dq)

Introduction générale

Introduction générale

La mondialisation, l'industrialisation et la pollution ! Il est temps pour la race humaine d'explorer ou de chercher de nouvelles ressources d'énergie plus propre et renouvelable pour faire face au processus du réchauffement planétaire. Il est de réduire l'utilisation des énergies conventionnelles (fossiles) extraites du pétrole, du gaz naturel, du charbon...etc.

Dans notre projet, nous avons fondé notre étude sur l'éolienne et la force du vent qui se régénère naturellement suite au réchauffement et au refroidissement des couches d'air en haute et basse altitude sous l'effet du soleil.

Une solution parmi d'autres pour cette phase cruciale du bouleversement climatique.

Les éoliennes sont implantées sur les hauteurs des montagnes, des falaises ou offshore dans les mers pour capter plus de vent dans les zones les plus ventiles.

Il y a plusieurs technologies d'éoliennes plus perfectionnées que les autres pour capter plus de vent, l'orientation des pales et de la tour vers le vent.

Sans oublier les parties mécaniques, électriques et électroniques utilisées.

La partie mécanique est composée de la turbine, du arbre de transmission et du multiplicateur mécanique.

La partie électrique est composée du générateur électrique.

La partie électronique est composée des convertisseurs électroniques comme les redresseurs, le bus continu (hacheur) et des L'onduleurs.

Tout cela pour produire une énergie verte afin de satisfaire la demande des consommateurs et réduire les gaz à effet de serre.

Chapitre I

Problèmes d'intégration d'éoliens au réseau électrique

I.1 Introduction :

L'intermittence de l'énergie produite par une éolienne est attachée au vent. Les machines qui utilisent une interface sont liées aux réseaux électriques, pour maintenir une stabilité d'énergie électrique qui dépend du point de raccordement, de la distance entre la production et le consommateur.

La production est reliée aux centrales électriques que chacune utilise des énergies différentes pour produire cette énergie ton utilise dans l'industrie et la vie quotidien.

Après la production Vien le réseau de transport qui relie au grand consommateur aux postes abaisseur HT .MT qui sera suivie par le réseau de distribution MT/BT de son tour sera suivie par le réseau basse tension qui le distribue aux consommateurs.

Durant toutes ces étapes on n'est confronté aux différents problèmes techniques qui freinent le bon acheminement de notre énergie jusqu'au consommateur.

Dans le cas d'énergie éolienne il y a d'autre obstacle a dépassé afin de minimise les pertes est le bon fonctionnement de la distribution.

I.2 Notion sur le réseau électrique :

Les réseaux de production d'énergie électrique sont organisés suivant le schéma ci-dessous :

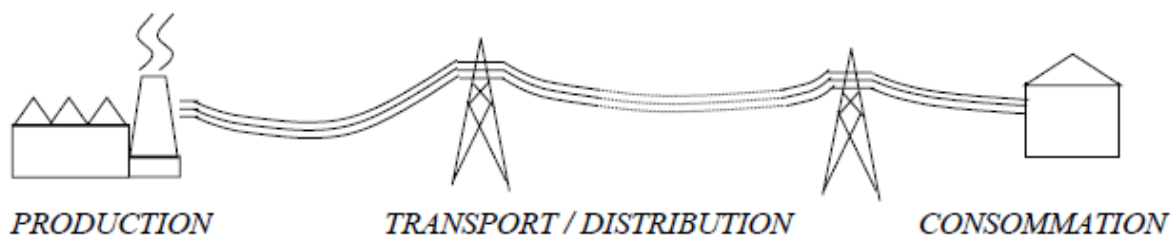
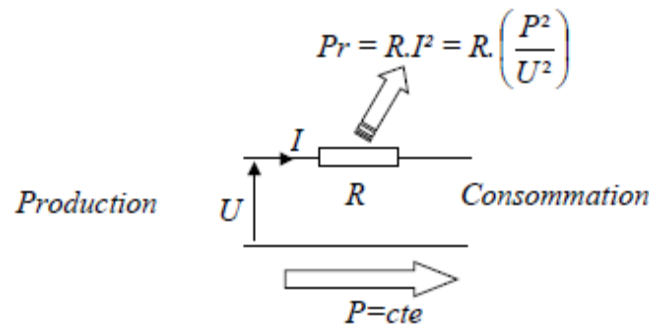


FIGURE I .1 Organisation globale du réseau électrique

I.2.1 La production : on utilise des énergies fossiles hydrauliques géothermiques nucléaires et renouvelables afin de faire tourner des alternateurs qui produisent des tensions et des courants triphasés,

Chaque type d'énergie à Ses avantages et Ses inconvénients est d'où elles proviennent la facilité d'exploitation et d'entretien des ressources de leur renouvelabilités ainsi le rendement de la transformation de ces énergies.

I.2.2 La distribution : c'est d'acheminer l'électricité produite, par des lignes ou des câbles jusqu'au consommateur on minimise les pertes (P_r).



Quand la tension est grande les pertes de puissance sont petites dans les lignes de distribution voilà pourquoi on achemine l'énergie électrique à haute tension et très et très haut tension,

On augmente la tension à chaque fois que les lignes sont longues.

On utilise des transformateurs pour élever et rabaisser la tension.

I.2.3 La consommation : représente l'ensemble des utilisateurs de l'énergie électrique, ils sont répartis selon une échelle de tension et de courant.

I.2.4 Nature de la tension :

Les tensions et les courants sur le réseau sont sinusoïdaux à une fréquence fixe de 50 Hz (60Hz aux USA ou Canada).

La majorité des réseaux électriques les tensions sont sinusoïdales au dépend des tensions continues.

Les raisons de ce choix on va adresser les avantages et les inconvénients relatifs aux régimes alternatifs sinus et continu.

I.2.5 Courant alternatif :

Avantage :

- Permet l'utilisation de transformateurs pour élever et baisser la tension.
- Facilite la coupure des courants par le passage naturel par zéro 2 fois par période c'est-à-dire 100 fois par seconde.
- Production directe par alternateurs.

Inconvénients :

- Difficulté d'interconnexion de plusieurs réseaux (il faut avoir même tension même fréquence même phase.)
- Implique des effets inductifs et capacitifs tout au long du réseau, d'où l'existence de puissance réactive pénalisante pour le producteur.
- Implique un effet de peau, c'est-à-dire la concentration du courant dans la périphérie des câbles, d'où la nécessité de câbles et lignes adaptés et donc plus chers.

I.2.6 Courant continu :**Avantage :**

- Pas d'effets réactifs donc pas de puissance réactive pénalisante pour la production.
- Facilite l'interconnexion de ces réseaux, il suffit d'avoir partout la même tension.
- Pas d'effet de peau, les câbles et les lignes sont plus simples et moins chers.

Inconvénients :

- Difficulté de couper les courants continus, d'où des dispositifs de coupures plus performantes et plus chères.
- Terminaisons très coûteuses
- Impossibilité de produire ou d'élever la tension dans les très hautes tensions d'où des pertes importantes sur les lignes.

I.2.7 L'alternatif sinusoïdale et le triphasé.

- La plus part des alternateurs génèrent des tensions sinusoïdales, cette tension a un faible contenu d'Harmonique.
- Les tensions non sinusoïdales carrées ou triangulaires sont composées d'harmoniques des fréquences multiples de la fréquence fondamentale.

Les harmoniques s'atténuent le long des lignes à cause de l'effet de peau, l'effet de peau concernant le lieu de circulation des courants dans les conducteurs à cause de ce phénomène la conséquence est que plus la fréquence du courant élevée augmente la résistance aussi $R=pL/s$ ce qui crée une chute de tension.

Pour tout ça le réseau électrique a une tension alternative et sinusoïdale.

I.2.8 Réseau réel

- Le réseau électrique est constitué de diverses centrales de productions.

Les tensions produites par les alternateurs sont élevées en haute tension puis sont transformées en très haute tension pour être transportées sur de longues distances.

On rabaisse la tension à la moyenne tension afin d'alimenter les agglomérations ou les industriels à chaque point d'agglomération on implante un poste de transformation abaisseurs qui nous donne une tension domestique BT (Basse tension) [230v].

- Afin d'équilibrer le réseau en réparties l'ensemble des abonnées de façon à éviter le déséquilibre.
- L'absence du neutre sur les lignes HT et THT il faut imposer l'équilibre des courants pour éviter le déséquilibre des tensions.

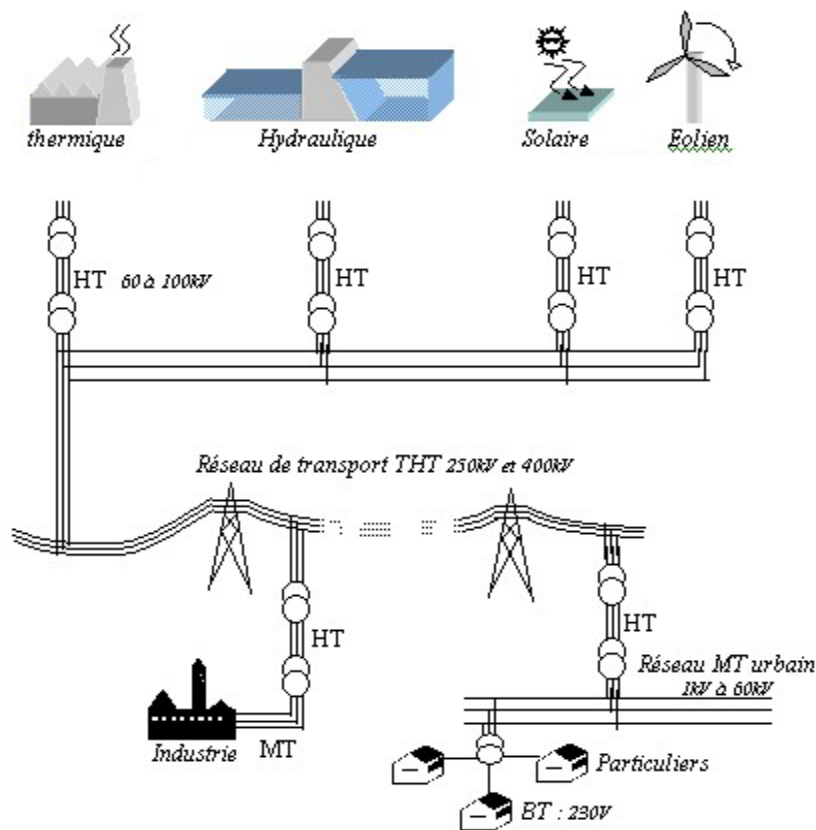


FIGURE I.2 Le schéma synoptique d'un réseau complet

I.3 Conditions de couplage d'un générateur au réseau

I.3.1 Couplage d'un alternateur sur le réseau principe :

Pour coupler un alternateur de tension $e_1 (+)$ en parallèle avec un alternateur de tension $e_2 (+)$ la condition est : $e_1 (+) = e_2 (+)$ même la valeur efficace $E_1 = E_2$, même fréquence $f_1 = f_2$, en triphasé même succession des phases et même déphasage.

I.3.2 Manœuvres de couplage :

Le réseau à une tension V et une fréquence f l'alternateur a une tension E et une fréquence f_a .

- a) Agir sur l'excitation pour avoir $E=V$.
- b) Tout en agissant sur la vitesse de rotation pour avoir $f_a=f$.
- c) Monter trois lampes entre l'alternateur et le réseau.

I.3.3 Couplage et perturbations :

Le couplage de l'installation au réseau doit respecter des contraintes sur la fréquence. L'amplitude et la phase de la tension et ne doit pas affecter la stabilité du réseau, les perturbations produites par l'installation au point de raccordement doivent être limités en ce qui concerne les à-coups de tension, le flicker, les déséquilibres et la harmoniques.

- Contraintes liées au fonctionnement d'une éolienne couplée au réseau.

Problèmes liés à la génération éolienne

I.3.4 Les problèmes induits par l'intégration d'éolienne dans le réseau électrique sont causé par :

- Leur production aléatoire et difficilement prévisible :
- Une absence de réglage puissance-Fréquence.
- Une participation au réglage de la tension limité pour les éoliennes à vitesse variable, et aucune participation à ce réglage pour les éoliennes dont la génératrice est directement couplée au réseau :
- Une sensibilité importante aux variations rapides de la vitesse du vent.
- Une sensibilité aux creux de tension et aux variations de fréquence.
- Vu quant ne pas intervenir au service système amène les éoliennes à se comporter comme des générateurs passifs du point de vue électrique.

Le réglage de la tension et de la fréquence est dès alors reporté sur les alternateurs classiques.

- La puissance que génèrent les éoliennes par rapport à la puissance totale consommée doit alors être limitée afin de pouvoir garantir la stabilité du réseau dans les conditions acceptables.

I.4 Contraintes de raccordement de l'éolienne au réseau.

- En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement.

Les installations de production doivent être conçues pour pouvoir contribuer, pour des durées limitées, au soutien de système électrique lorsqu'il est le siège d'un défaut et doivent avoir des capacités de services auxiliaires nécessaires pour que le fonctionnement du système électrique soit sûr.

Ces services comprennent :

- Les réglages primaires et secondaires de la tension.
- Les réglages primaires et secondaires de la fréquence.
- Le fonctionnement en réseau séparé :
- La participation à la constitution du réseau.

Les installations de production doivent être équipées d'un dispositif qui permet de les coupler au réseau de public de transport et doivent en outre être conçues pour que la stabilité de leur fonctionnement soit assurée compte tenu des caractéristiques de leur raccordement au réseau. Elles doivent être équipées des régulations de tension et de fréquence qui sont nécessaires pour atteindre cet objectif.

Des pertes de stabilité ne doivent pas être à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'électricité sur le réseau public de transport ou de perturbation des conditions de son exploitation. Elles doivent être capables de recevoir et d'exécuter les ordres de conduite du gestionnaire du réseau de transport.

I.4.1 Réglage de la tension :

Toutes les unités de production y compris les éoliennes, doivent pouvoir fonctionner dans un domaine de fonctionnement déterminé par un graphique avec en ordonnée la tension (U) et en abscisse le rapport entre la puissance réactive et la puissance active maximale (Q/P_{max}). Un exemple de domaine de fonctionnement dénommé trapèzes [U, Q] est représenté à la figure

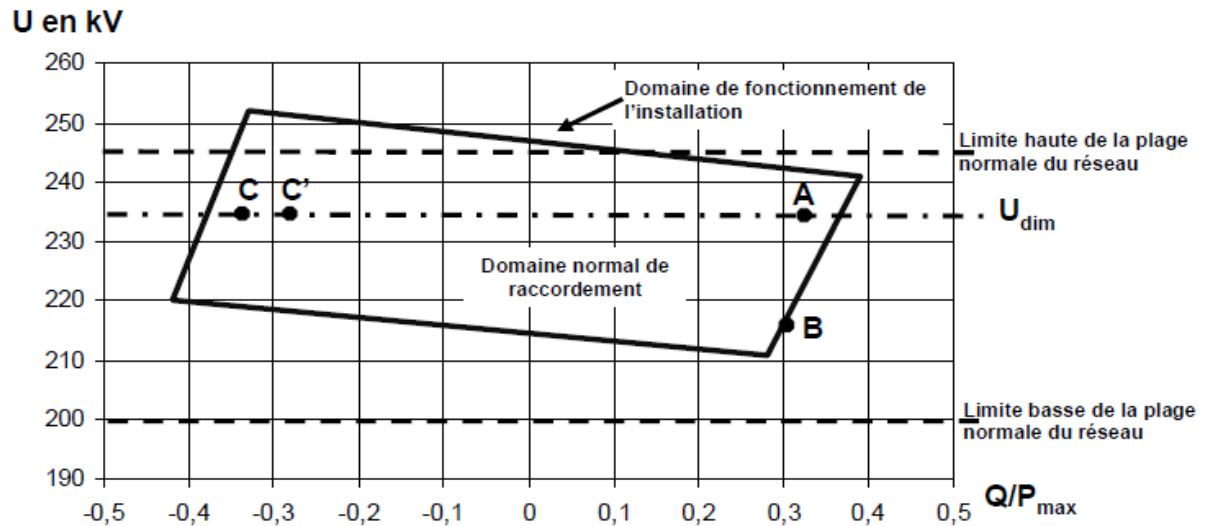


FIGURE I/3 domaine de fonctionnement d'une installation

Les unités de production doivent assurer un contrôle de la tension et/ou de la puissance réactive au point de livraison.

I.4.2 Les types de réglages primaires sont possibles :

- Réglage à puissance réactive constante.
- Réglage de la tension à une valeur variant linéairement en fonction de la puissance réactive avec une pente ajustable.

Réglage de la tension selon une consigne asservie aux ordres provenant du réglage secondaire de la tension.

Les installations raccordées aux réseaux HT doivent pouvoir participer au réglage secondaire de la tension de leur zone.

Ces installations doivent disposer d'un réglage primaire de la tension de type 2 ou 3.

I.4.3 Réglage de la fréquence :

La participation au réglage de la fréquence n'est pas exigée pour des installations de production à partir des fermes éoliennes. Il est néanmoins intéressant de noter les contraintes imposées aux autres installations :

- Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 40 Mw doivent participer au réglage primaire de fréquence.

- Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 120.M.w doivent participer au réglage secondaire de fréquence.

Le fait de ne pas participer au réglage de fréquence limitera à terme le taux de pénétration de l'éolien.

I.4.4 Problèmes induits par l'intégration de l'éolien dans le réseau de transport :

Pour garantir la sécurité du réseau on doit veiller à éviter la surcharge thermique des lignes et la rupture de synchronisme.

Assurer la stabilité de la fréquence et de la tension.

I.4.5 Prévision de la production :

La variation de la vitesse du vent sur les sites éoliens induit une incertitude sur les prévisions de production des fermes éoliennes.

- L'ineffabilité des prévisions dans une journée peuvent être négative au positive [sous-production ou sur production].
- nous amène à des changements rapides des signes.
- Il est nécessaire d'introduire ses capacités de production de réserves contrôlables.

I.4.6 Capacité d'accueil du réseau :

Les lignes et les postes ont une capacité limitée.

Pour les éoliennes constituer un problème aigu, vus l'éloignement entre les lieux de production et de consommation.

Renforcement des postes, modification de la protection, augmentation de la puissance de court-circuit afin d'éviter la congestion des lignes de transport et d'assurer la sécurité du réseau.

I.4.7 Déconnexions intempestives :

Lors d'un creux de tension les générateurs éoliens sont très sensibles aux perturbations du réseau et ont tendance à se déconnecter rapidement.

I.5 Perturbations mécaniques et électriques

- Les oscillations de couple qui se répercutent sur la puissance sont traduites par les contraintes mécaniques au niveau de la turbine et la transmission.

- Les irrégularités du champ de vitesse génèrent des couples pulsatoires.

Ces phénomènes à l'effet de cisaillement, passage d'une pale devant la tour est des imperfections de construction (Asymétrie).

- Les creux de tension ou les variations de fréquence entraîne souvent une déconnexion de la production lors l'incident sur le réseau cette dernière engendrera un déséquilibre entre la production et la consommation.

I.6 Notions sur la qualité de l'énergie

I.6.1 La tension :

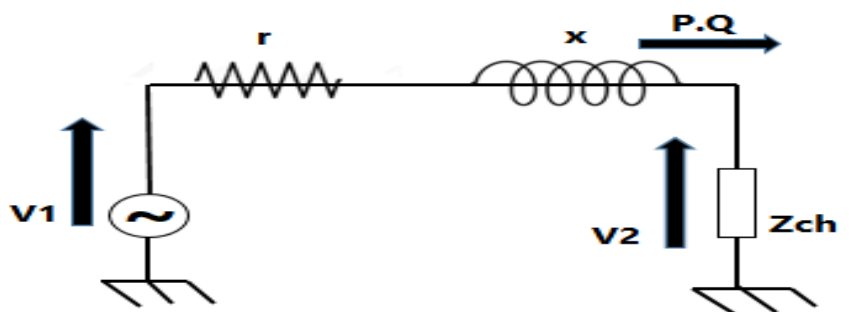
A travers une ligne une charge est alimente par une source de tension complante de façon approchée on peut écrire que la quantité de tension dans la ligne

($\Delta V = V_1 - V_2$) est égale a

$$\Delta V = \frac{rP + xQ}{V_2} \dots\dots\dots | (1)$$

Avec r la résistance des conducteurs en Ω , x la résistance de la ligne en Ω

P et Q les puissances active et réactive transitant dans la ligne.



Les lignes de très haute tension (THT)

FIGURE I.4 les lignes (THT)

$X \geq 10$ l'expression (1) peut donc simplifier

$$\Delta V = \frac{XQ}{V^2} \dots\dots\dots (2)$$

Les éoliennes générées des puissances actives fluctuantes, ce qui induit des fluctuations de tension dans la zone du réseau proche du point de connexion des éoliennes d'après l'expression (1).

Dans le réseau de transport HT et THT L'expression (2) nous donne des variations de tensions qui induites par les transits de puissance réactive contrairement aux réseaux de distribution, pour cela il faut que les éoliennes connectés au réseau de transfert de les dotes des moyennes techniques pour le réglage de la tension via un réglage de la puissance réactive.

On utilise des convertisseurs électroniques puissance ou des condensateurs de compensations dans le cas d'une génératrice asynchrone

Flicker sont les variations régulières de tensions, les variations sont dues aux fluctuations de la vitesse du vent.

Pour limiter l'impact sur le réseau de ces variations on utilise celles qu'ont des interfaces avec le réseau via des convertisseurs d'électroniques de puissance permettant ainsi un certain découplage entre la turbine et le réseau, mais ces derniers génèrent des Harmoniques.

Les convertisseurs commandes équipés de transistor IGBT génèrent des harmoniques de haute fréquence (KHz).

Mais on peut utiliser des convertisseurs commandes équipés de thyristors qui génère des harmoniques de basse fréquence.

Nécessite des filtres conséquents pour les limiter

I.6.2 Fréquence :

Le déséquilibre entre la production et la consommation induit a une variation de fréquence qu'est due à la variation de la vitesse.

Le réglage primaire de fréquence est réalisé automatiquement au niveau de l'installation (groupes de productions).

Ce réglage suit une relation linéaire entre la fréquence imposée par la vitesse et la puissance.

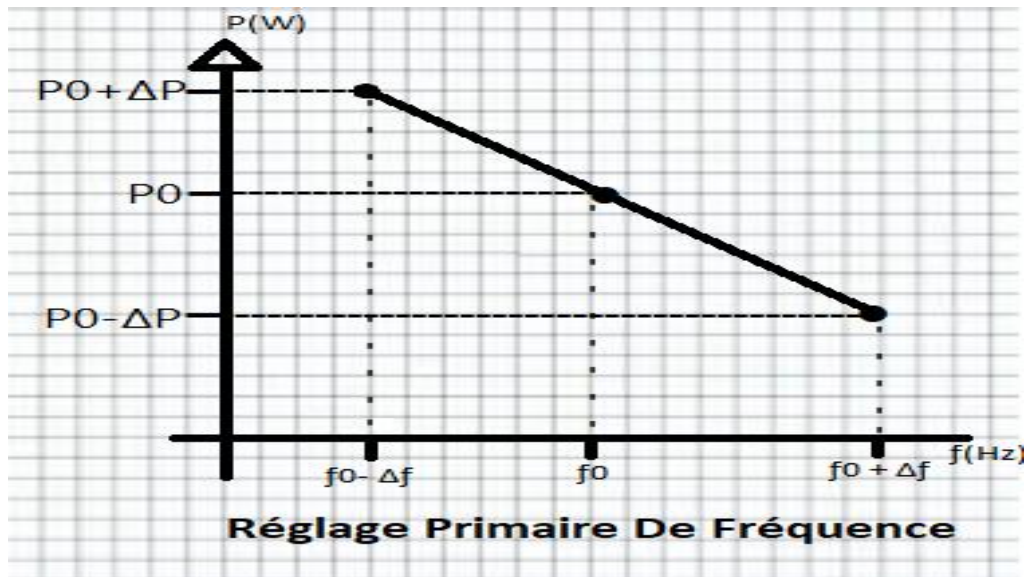


FIGURE I.5 réglage primaire de fréquence

P_0 : est la puissance de consigne à la fréquence de référence.

ΔP et **Δf** : la variation de puissance induite par variation de fréquence Δf .

I.7 Conclusion :

Les problèmes d'intégration d'énergie éolienne au réseau électrique passe par plusieurs étapes afin de dépasser toutes les obstacles techniques et économiques afin d'assurer une stabilité d'énergie et une continuité de service pour les consommateurs.

Cette stabilité d'énergie est bénéfique pour les deux parties, producteurs et consommateurs sans oublier l'impact écologique sur la nature afin de réduire la pollution on choisissent les énergies renouvelables.

Chapitre II

Modélisation et simulation du système éolien

II.1 Introduction

L'industrialisation de la planète et augmentation croissante de la demande d'énergie électrique et la pollution, nous pousse à explorer d'autres horizons plus propres vers des énergies vertes et renouvelables.

L'éolienne est l'un de ces systèmes qui produisent cette énergie. Dans ce chapitre nous allons procéder à la description des différentes composantes de l'éolienne, son mode de fonctionnement et les lois fonctionnelles de ce système.

--la modélisation et simulation de la partie mécanique (turbine et arbre de transmission multiplicateur)

--la modélisation et simulation de la partie électrique MSAP

-modélisation des convertisseurs de la partie électrique

II.2 Modélisation du système de conversion d'énergie éolienne

II.2.1 Définition de l'énergie éolienne :

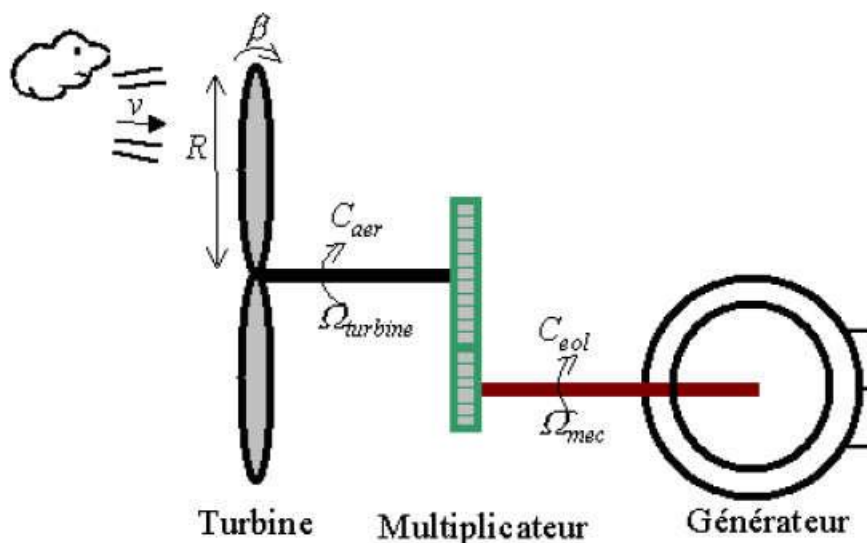


FIGURE II.1 Schéma de la turbine éolienne

L'aérogénérateur ou l'éolienne est un système qui permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, sur un arbre de transmission de la turbine au multiplicateur d'un autre axe à la machine puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur. **II(1)**

II.2.2 Principe du vent :

Le vent c'est de l'air qui se déplace à cause de la différence de température et de la pression dans l'atmosphère en effet l'air chaud est plus léger que l'air froid, c'est pourquoi quand le soleil chauffe la mer et le sol, l'air qui se trouve juste au-dessus se réchauffe s'allège et monte en poussant l'air froid qui est au plus haut. L'air froid plus lourd descend et vient remplacer l'air chaud. Puis il se réchauffe à son tour et ainsi le cycle de l'air se chauffe et se refroidit en plus comme la terre et tourne. Les rayons de soleil ne sont pas également répartis sur la surface du globe et celle-ci n'affecte pas de la même manière la mer et le sol toutes ces différences nous donnent des masses d'air qui se déplacent horizontalement, diagonalement et verticalement c'est pour tout ça qu'il y a des sites moins ou plus venteux. **II.(2)**

Selon leur emplacements et leur dégagement ainsi selon leur incidence sur la pression de l'air par exemple : les crêtes de la montagne, le bord de mer connaissent des vents plutôt violents.

Offshore à l'intérieur des mers avec des plateformes.

II.2.3 Principe de conversion :

L'aérogénérateur permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique cette conversion se fait en deux étapes.

1-la conversion d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ce dernier se fait au niveau de l'éolienne.

2-la conversion de cette énergie mécanique en énergie électrique, selon les caractéristiques et la technologie de l'aérogénérateur utilise la transmission de l'énergie électrique au réseau soit directement soit par l'intermédiaire total ou partiel d'une interface de l'électronique de puissance

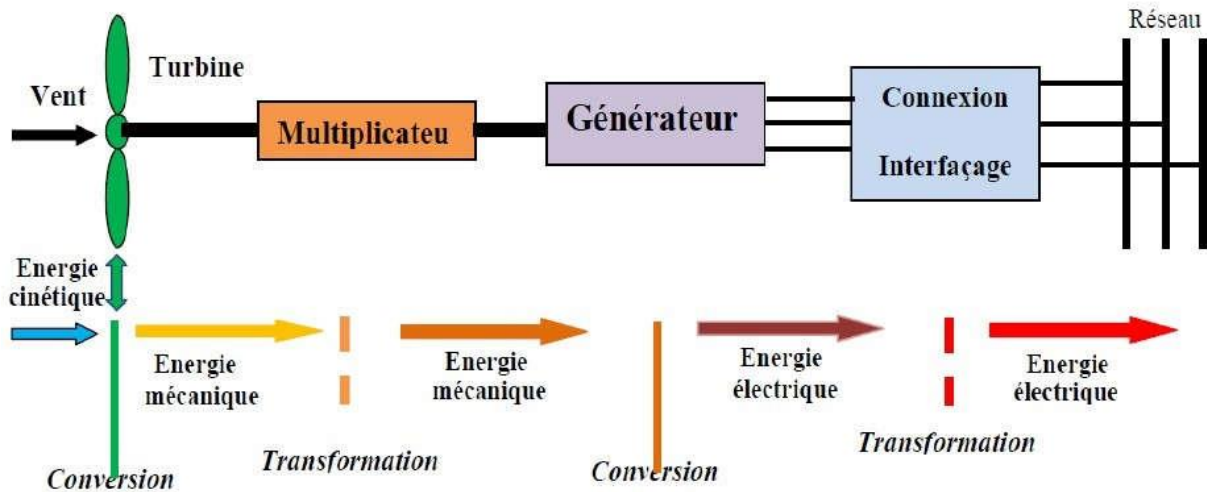


FIGURE II.2 Principe de la conversion de l'énergie éolienne

Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

II.2.4 Limite de Betz

La limite de Betz également connue sous le nom de limite de puissance de Betz ou limite de rendement de Betz est un concept en aérodynamique qui définit la limite maximale de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par une éolienne.

Elle établit que dans une configuration idéale une éolienne ne peut pas capturer plus de 59.3 % de l'énergie cinétique du vent qui traverse cette limite découle des lois de conservation de l'énergie et des contraintes aérodynamiques empêchant une conversion totale de l'énergie du vent en énergie mécanique **II(3)**

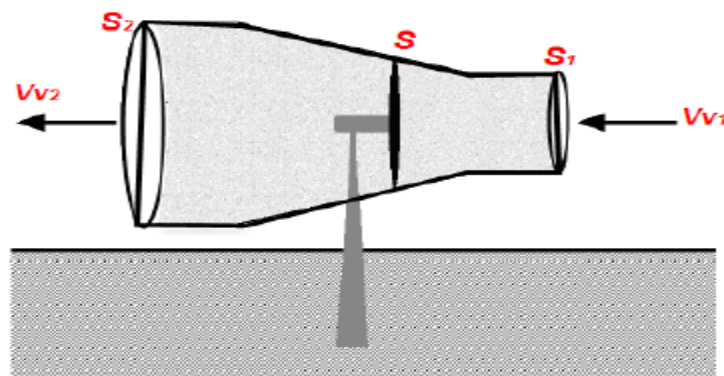


FIGURE II.3 Tube de courant autour d'une éolienne

La vitesse moyenne 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 le passage a travers le rotor v_2 Soit :

$$v_m = \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \dots \dots \dots \text{II.1}$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traverse la surface S balayée par les pales en une seconde **II.(4)**

$$m = \rho \times V_{LU}; \dots \dots \dots \text{II.2}$$

$$V_{LU} = S \times L; \dots \dots \dots \text{II.3}$$

$$L = v \times t; \dots \dots \dots \text{II.4}$$

Donc $m = \rho \times v \times S \times t;$

De la formule 1 et 2

On a

$$m = \rho \times S \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \times t; \dots \dots \dots \text{II.5}$$

Avec :

m = la masse de l'air.

ρ = la densité de l'air donné 1.292kg/m²air.

S = la surface balyé par les pales m² .

t = temps donné 1s.

V = la vitesse du vent ms.

La puissance du vent théorique ou entrante dans une éolienne : L'expression de l'énergie cinétique d'une masse d'air en mouvement peut être donnée par la relation

$$E_C = \frac{1}{2} \times m \times V^2 \dots \dots \dots \text{II.6}$$

$$E_C = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3 \times t \dots \dots \dots \text{II.7}$$

$$E_C = P \times t \dots \dots \dots \text{II.8}$$

$$P_{en} = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3 \dots\dots\dots \text{II.9}$$

La puissance du vent extraite ou récupérée dans une éolienne

$$E_c = \frac{1}{2} \times m(v_1^2 - v_2^2) \dots\dots\dots \text{II10}$$

$$E_c = \frac{1}{2} \rho S v_m (v_1^2 - v_2^2) t = p \times t \dots\dots\dots \text{II.11}$$

$$p_{ex} = \frac{1}{2} \rho S v_m (v_1^2 - v_2^2) \dots\dots\dots \text{II12}$$

Une autre méthode pour trouver la puissance extraite

$$p_{ex} = P_{en} \times C_p \dots\dots\dots \text{II.13}$$

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.593 \dots\dots\dots \text{II14}$$

En vas récupérer 60% d'après la limite de Betz

$$p_{ex} = 0.593 \times \frac{1}{2} \times \rho \times S \times v^3 \dots\dots\dots \text{II.15}$$

$$p_{ex} = 0.3 \times D^2 \times v^3 \dots\dots\dots \text{II.16}$$

D et le diamètre de rotor

D= section des pales + longueur des pales

Ou bien en utilise la loi de newton

$$P = F \times V \dots\dots\dots \text{II.17}$$

$$F = m(v_1 - v_2) \dots\dots\dots \text{II.18}$$

$$P = \rho S v (v_1 - v_2) v \dots\dots\dots \text{II.19}$$

$$P = \rho S v (v_1 - v_2) \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \dots\dots\dots \text{II.20}$$

$$p_{ex} = \frac{1}{2} \rho S v_m (v_1^2 - v_2^2) \dots\dots\dots \text{II.21}$$

Quelque valeur pour les éoliennes domestique.

P	D	H
0.25 KW	1.2 m	3 m
5 KW	4 m	6 m
15 KW	8 m	12 m
25 KW	10 m	18 m

II.2.5 Cp le coefficient de puissance :

Représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne **Cp** (λ, β) qui dépend de λ et β

Cp est défini par le rapport entre les deux puissances entrante et extraite de l'éolienne **II.(4.5)**

$$C_P = \frac{P_{en}}{P_{ex}} \dots\dots\dots II.22$$

$$C_P = \frac{\frac{1}{2}\rho S \frac{v_1+v_2(v_1^2-v_2^2)}{2}}{\frac{1}{2}\rho S v^3} \dots\dots\dots II.23$$

$$C_P = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_1}{v_2} \left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^2 \right) \right) \dots\dots\dots II.24$$

En suppose que $\lambda = \frac{v_1}{v_2}$; $\dots\dots\dots II.25$

$$C_P = \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \dots\dots\dots II.26$$

Ce coefficient de puissance **Cp** varier par la variation de v_1 et v_2 et de l'efficacité (λ, β)

λ : la vitesse spécifique le ratio.

β : l'angle de calage.

Il varier aussi suite au paramètre des pales de la turbine la largeur et la longueur (diamètre des pales) de la hauteur de la nacelle

La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelé limite Betz et de $\frac{16}{27}$ soit 0.593

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et les meilleures machines à axe horizontale bipales ou tripales se situent 60 à 65% de la limite de Betz on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent en déduit alors le rendement aérodynamique

$$\eta = \frac{16}{27} C_{P_{\max}} \dots\dots\dots \text{II.27}$$

$C_{P_{\max}}$ Étant la valeur maximale qui peut prendre le coefficient de puissance C_p cette valeur et associée à une vitesse spécifique nominale λ et pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale v_n et une vitesse de rotation nominale Ω_{ref}

II.2.6 La vitesse spécifique λ

Est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent **II.(5)**

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v}$$

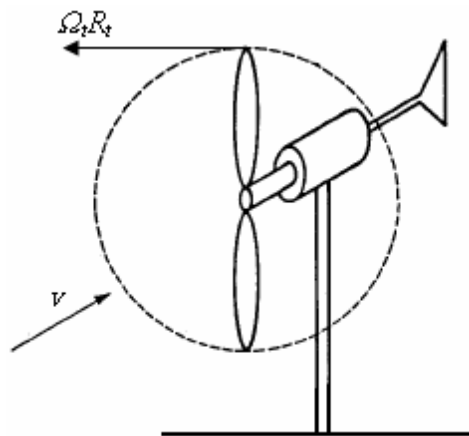


FIGURE II.4 Vitesse de vent (v) et vitesse tangentielle de l'aube (Ω R)

R_t = Rayon des pales (m)

Ω_t = Vitesse de rotation de la turbine

v = Vitesse moyenne du vent (m/s)

II.2.7 B L'angle de calage :

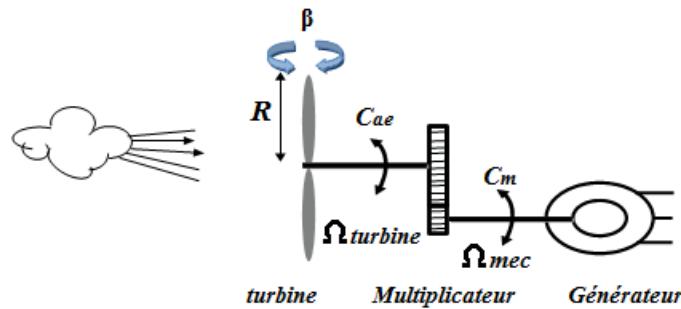


FIGURE II.5 schéma global d'une éolienne

L'aire incidenté sur la turbine est une force s'exerce sur la surface des pales quand cette dernier et verticale sur cette surface la puissance de poussé sera au max de sa valeur donc la vitesse de rotation augmente.

Quand l'angle B est incliné a un certain degré la force de l'air incidenté sur la surface des pales la puissance de poussé diminué alors elle capte moins de poussé d'air et la vitesse de rotation diminué avec

Donc la vitesse baisse ou diminué.

En peu utiliser la variation de l'angle de calage B comme frein quand elle est en position drapeau la force incidenté du vent sur les pales sera nul.

En peut aussi l'utiliser comme variateur mécanique de vitesse. **II.(6)**

II.2.8 l'énergie du vent :

L'aérogénérateur est un convertisseur d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et de la en énergie électrique. **II.1**

Cette énergie est inépuisable, renouvelables, non polluante et non dégradable.

La variabilité de la vitesse du vent et caractérisé selon l'emplacement de de l'aérogénérateur Géographique et saisonnière sur tout pendant l'hiver et au niveau de la mer (offshore).

Le vent est défini par sa vitesse et sa direction. **II.7**

La vitesse du vent sera modélisée sous forme

Déterminée par une somme de plusieurs harmoniques.

$$v_v(t) = A + \sum_k^i \Delta a_k \sin(w_k t) \dots \dots \dots \text{II.28}$$

Soit

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k

w_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k

i : Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profile du vent

II.3 Modélisation de la partie mécanique d'une éolienne.

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause la multiplicité des domaines existant à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique et électrique. et les facteurs déterminant la puissance mécanique comme la vitesse du vent, la dimension et la forme de la turbine.

Un modèle dynamique rassemble toutes ces paramètres et nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine, et le recours à la modélisation est devenu une nécessité pour contrôler ces performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues.

Les systèmes mécaniques de l'éolienne sont composés de quatre organes et peuvent être représentés comme illustré sur la FIGURE II.5 II.8

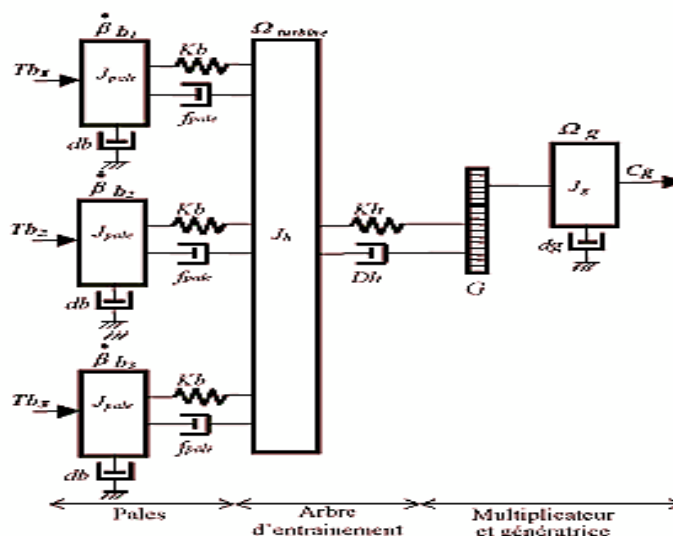


FIGURE II.6 Système mécanique de l'éolienne

1 _ trois pales considérées de conception identique et ayant les mêmes paramètres à savoir l'inertie J_{pale}

Elasticité K_b et coefficient de frottement d_b .

Ces pales sont orientable et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support F_{pai} les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées Bb_1, Bb_2, Bb_3 . chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse du vent qui lui est appliquée **II.8**

2_ l'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par

_ Son inertie J_h

_ Son élasticité K_h

_ Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h

3_ le multiplicateur de vitesse de gain G

4_ le rotor de la génératrice possède

_ Une inertie J_g

_ un coefficient de frottement d_g

Ce rotor transmet un couple C_g à la génératrice électrique et tourne à une vitesse Ω_{mec}

II.3.1 Hypothèse simplificatrice pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modules les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simple et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes :

*la vitesse du vent est supposée à répartition uniforme surtout les pales ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.

*le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air (d_b) est très faible et peut être ignoré

*les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté génératrice.

*on peut ainsi aboutir à un modèle mécanique plus simple (FIGURE II.6)

*le système étudié et composé d'une turbine éolienne comprennent des pales de longueurs entraînent une génératrice à travers un réducteur de vitesse de gain G .II.6

II.3.2 Le modèle de la turbine

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

- *la vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine
- * la qualité spécifique de la machine résultante particulièrement de la géométrie de rotor et de la surface balayée par les pales de la turbine.
- *la vitesse de la turbine l'inclinaison des pales et l'angle de calage.
- * la quantité de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrée précédentes. II.9

II.3.3 Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrices et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur ce dernier est modéliser mécaniquement par les équations suivant : II.10

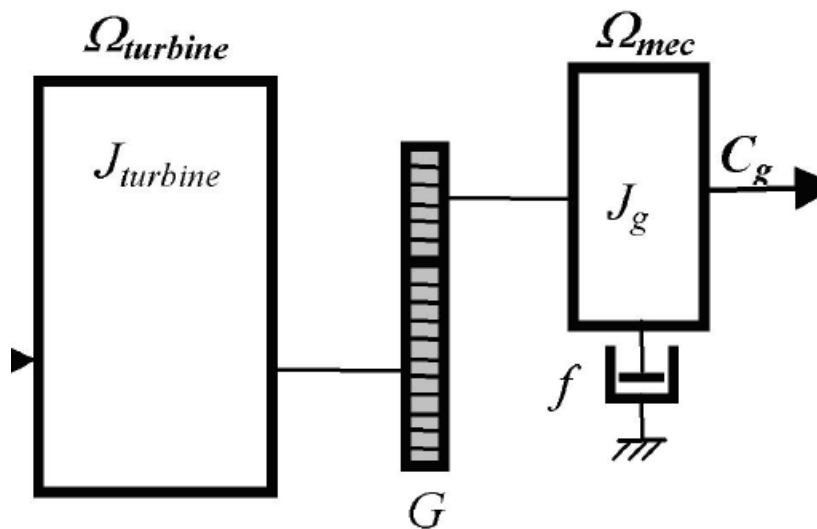


FIGURE II.7 Modèle mécanique simplifié du multiplicateur

$$C_g = \frac{C_t}{G} \dots \dots \dots \text{II.29}$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \dots \dots \dots \text{II.30}$$

Donc

$$\Omega_{mec} = G \times \Omega_t \dots \dots \dots \text{II.31}$$

Avec :

C_g : est l'effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice

G : est le gain du multiplicateur

Ω_{mec} , Ω_t : sont les vitesses angulaire de génératrice et aérogénérateur (rad.s)

II.3.4 Modèle de l'arbre mécanique

La masse de la turbine éolienne et reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie ($J_{turbine}$) et comprend la masse des pales la masse de rotor de la turbine le model mécanique proposé considéré l'inertie Totale (J) constitué de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice

$$J_{total} = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \dots \dots \dots \text{II.32}$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique totale ($C_{mec T}$) appliqué au rotor

$$C_{mec T} = J_{total} \times \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \dots \dots \dots \text{II.33}$$

Ou : J_{total} est l'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice ce couple mécanique prend en compte le couple électromagnétique (C_{em}) produit par la génératrice, le couple des frottements (C_F) et le couple (C_g)

$$C_{mec T} = C_g - C_{em} - C_F = J_{total} \times \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \dots \dots \dots \text{II.34}$$

$$C_{mec T} = C_g - C_{em} - \Omega_{mec} F = J_{total} \times \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \dots \dots \dots \text{II.35}$$

Le couple résistant dû aux frottements et modéliser par un coefficient de frottement visqueux

$$C_F = F \times \Omega_{mec} \dots \dots \dots \text{II.36}$$

En utilisons la loi de Laplace

$$C_T = C_g - C_{em} - \Omega_{mec} F = J_{total} \times \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \dots \dots \dots \text{II.37}$$

$$C_T = C_g - C_{em} - \Omega_{mec} F = J_{total} \times \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \dots \dots \dots \text{II.38}$$

Avec une autre méthode on peut trouver la fonction de Transfer à ce système

$$C_T = C_g - C_{em} - \Omega_{mec} F = J_{totale} \times S \times \Omega_{mec} \dots\dots\dots II.39$$

$$C_g - C_{em} = J_{total} \times S \Omega_{mec} + \Omega_{mec} F \dots\dots\dots II.40$$

$$C_g - C_{em} = (J_{total} \times S + F) \Omega_{mec} \dots\dots\dots II.41$$

$$\Omega_{mec} = (C_g - C_{em}) \times \frac{1}{J_{total} \times S + F} \dots\dots\dots II.42$$

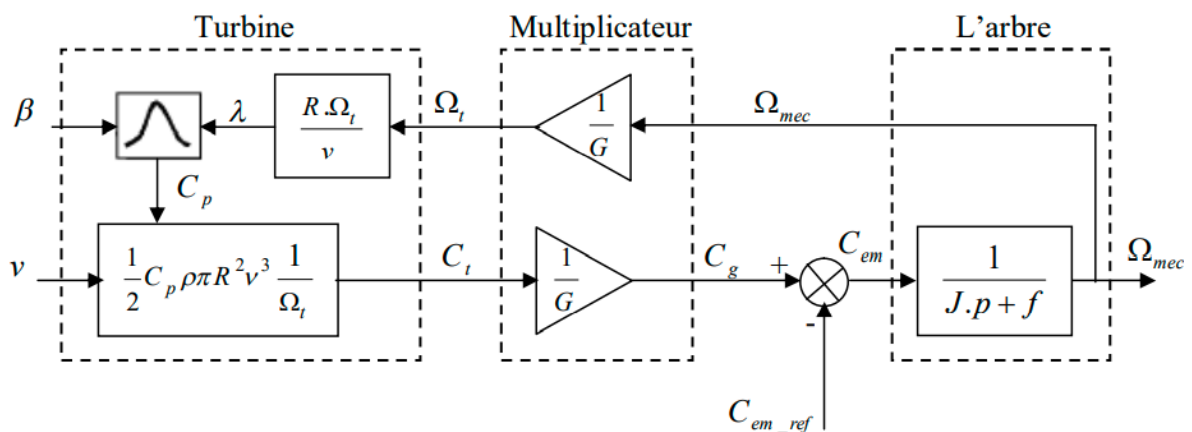


FIGURE II.8 Schéma bloc du model de la turbine éolienne

II.4 Simulation de la partie mécanique de l'éolienne

Dans cette simulation on ne va pas raccorder l'hélice et le multiplicateur a une génératrice mais simplement on va simuler la partie mécanique de l'éolienne

Ainsi on observe le couple produit à la sortie du multiplicateur et la puissance mécanique produite en fonction de l'évolution de la vitesse du vent et la vitesse mécanique de l'éolienne

Paramètre de la turbine

Paramètre	Valeur
Puissance nominale	15 KW
Nombre de pale	3
Rayon de pale	3m
Gain multiplicateur	6.8

Densité de l'air

1.225 kg/m³

A t : 50s

La vitesse du vent passe de 13m/s à 15m/s

Pour t < 40s et t > 65s

$\Omega = 150$ Rd/s

40s < t < 65s

$\Omega = 170$ Rd/s

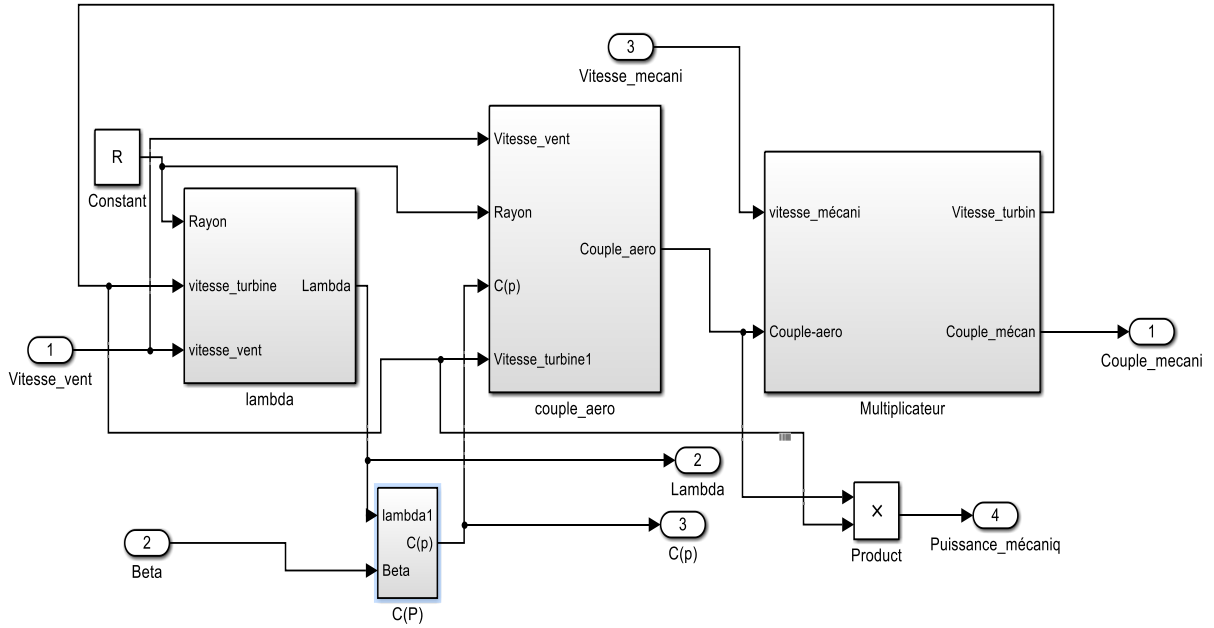


FIGURE II.9 Schéma bloc primaire de la partie mécanique d'une éolienne

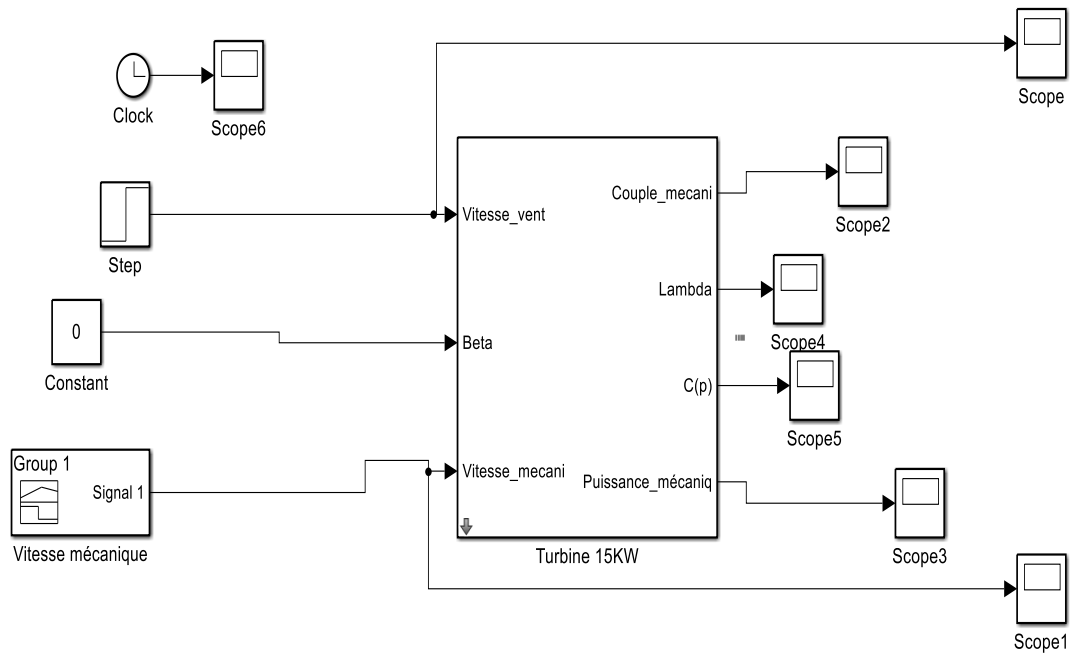
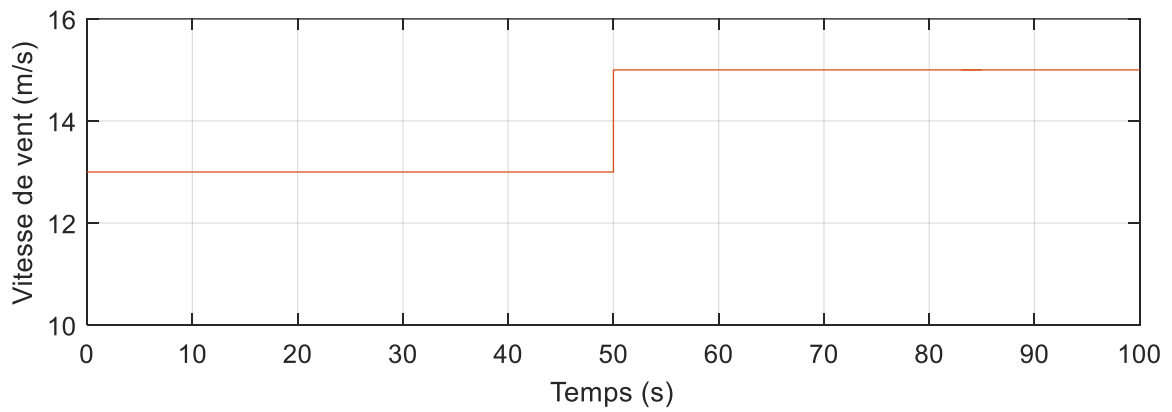
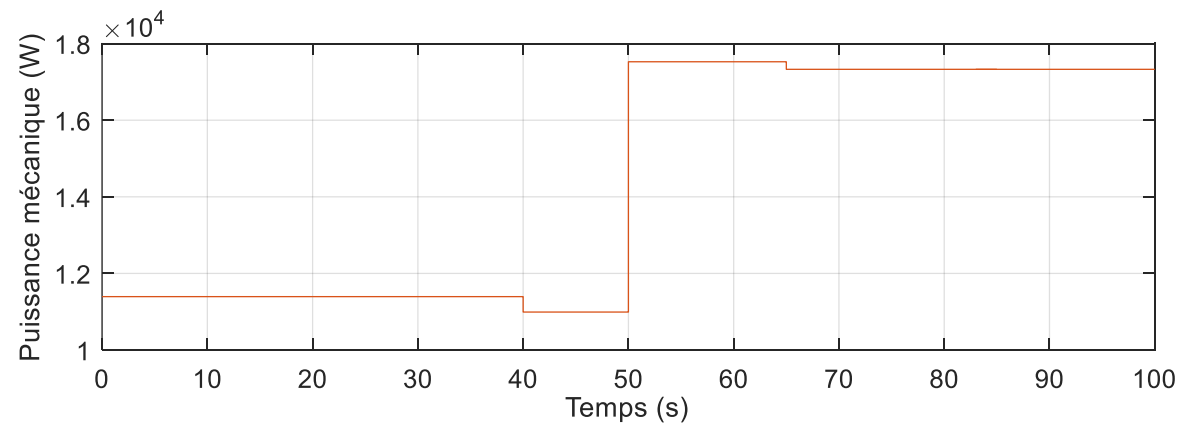
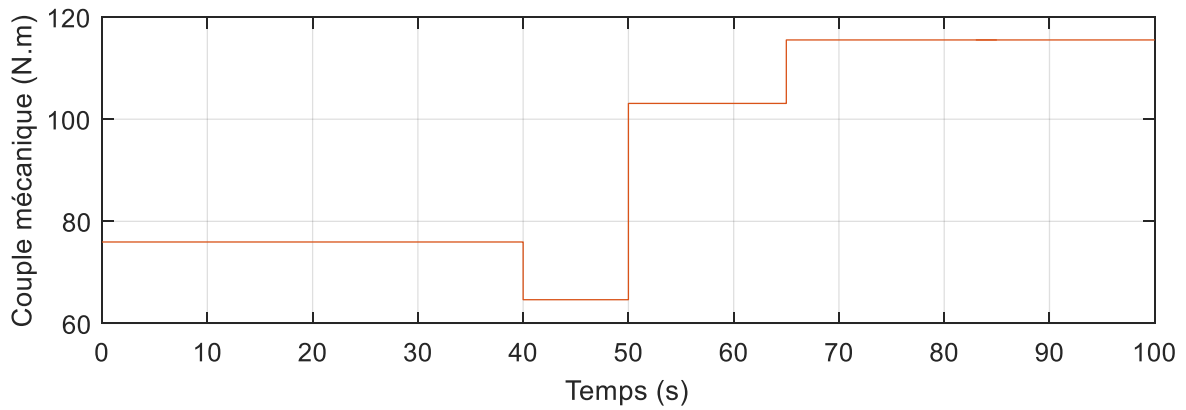
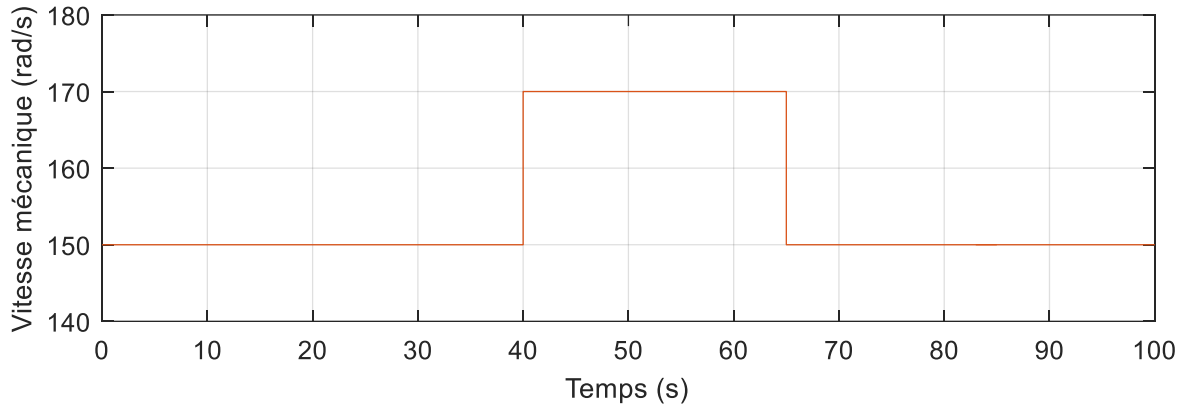


Schéma bloc de la partie mécanique d'une éolienne FIGURE II.10

II.4.1 Les résultats de simulation de la partie mécanique de l'éolienne





Les Schémas de simulation de la partie mécanique de l'éolienne

D'après les résultats obtenus on constate que la variation du vent et la vitesse mécanique influent sur l'évolution du couple et de la puissance mécanique

Ainsi que la variation de l'angle de calage β influence sur le couple et la puissance mécanique

II.5 Modélisation et simulation GSAP

II.5.1 Principes des machines synchrones à aimant permanent :

Ces types de machines synchrones qu'a un rotor qu'est construit à partir d'un aimant dans ce types de machines. la vitesse du rotor est égale à celle du champ tournant c'est ça la synchronisation entre le champ tournant et le rotor. la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique (mode moteur) (MSAP) et dans le sens oppose c'est le mode génératrice synchrones a aimant permanent (GSAP). comme toutes machines électriques ; les MSAP sont constituées de deux éléments principaux le rotor et le stator (cf. Figure) **II.11**.

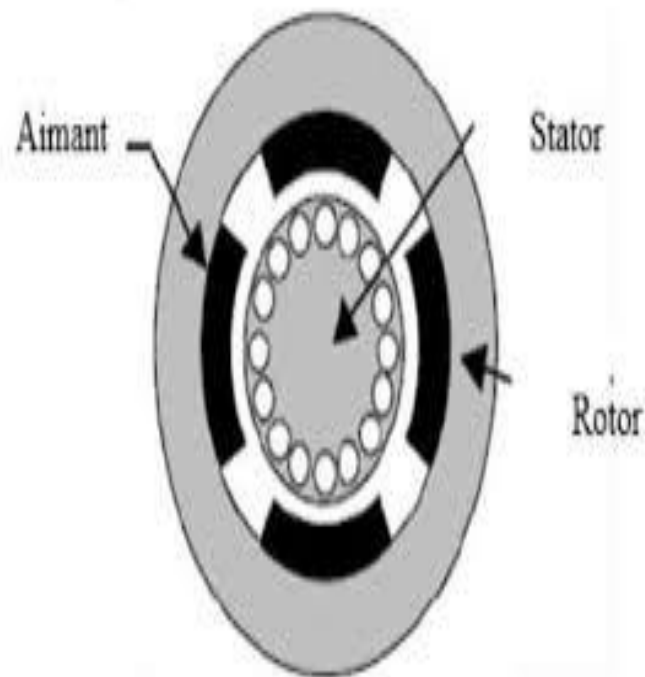


FIGURE II.11 : STATOR DE LA MSAP

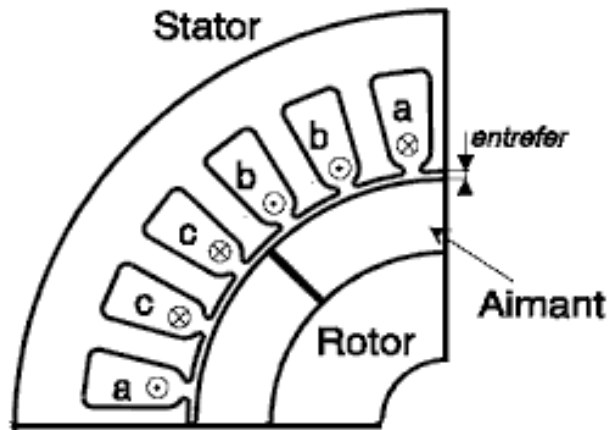


FIGURE II.12 ROTOR A AIMANT PERMANANT

FIGUREII.11.12 Eléments principaux d'une MSAP

L'interaction entre le champ magnétique tournant créé par les enroulements du stator et le champ magnétique de l'aimant permanent crée une force électromotrice qui provoque le mouvement de rotation.

La vitesse de rotation est liée à la fréquence de la source d'alimentation et au nombre de paires de pôles de la machine ; elle est donnée par la rotation. **II.11.**

$$N_s = 2\pi/P. \dots\dots\dots II.43$$

II.5.2 Les types de génératrices GSAP :

Le stator de la machine synchrone est similaire a d'autre types de machines triphasé. La différence est dans le stator ou on peut distinguer plusieurs types selon la topologie et la construction de ce dernier.

Selon la disposition des aimants sur le rotor. Nous pouvons distinguer quatre types de MSAP
1/16PDF

II.5.3 Machines synchrones a aimant permanent montés en surface [surface mounted]

Cette configuration est la plus facile à réaliser car les aimants sont sous forme de tuiles sont fixes en périphérique du rotor [généralement a pôles lisses].comme le montre la figure II.13 les inductances L_j et L_q sont égales et ne dépendent pas de la position du rotor par contre ce type de machine présente certains inconvénients tels que la démagnétisation des aimants et le risque de détachement du a la force centrifuge **II.12.13**

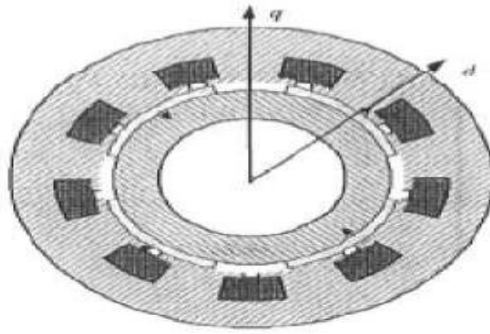


FIGURE II.13 MSAP à aimant en surface

II.5.4 machine synchrones a aimants permanent insères [MSAPI]

Ce type de machines les aimants sont insérés dans des rainures entaillées a la surface du rotor (cf. Figure II.14) par rapport au MSPAS ; ce type donne plus de performance au niveau du couple produit par contre les espaces entre les aimants augmentent l'effet saillant.

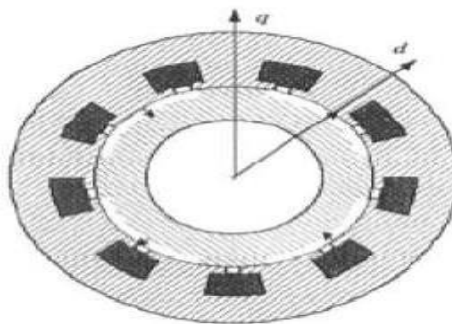
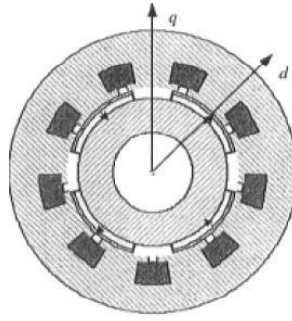


FIGURE II.14 MSAP a aimant insérés

II.5.5 machines synchrones a aimants permanent chapeutes [MSAPC]

LA structure MSAPC est similaire à celle du MSAPS .avec utilisation des pièces polaires en acier doux placées sur les aimants ces pièces permettent de contrôler la forme de la force électromotrice ($f \cdot e \cdot m$) du stator agissant sur le profil de la pièce .pendant l'effet saillant augmente à cause de



La combinaison anisotrope «aimants-pièces-polaires »

FIGURE II.15 MSAP a aimant chapeautes II.12

II.5.6 Machines synchrones a aimant permanent enterre(MSAPE) :

La structure MSAPE les pièces polaires sont utilisées pour canaliser le flux génère par les aimants permanents a aimantation tangentielle dont la surface latérale est supérieure à la demi surface de la pièce polaire prise au niveau de l'entre fer dans le but d'augmenter l'induction magnétique dans l'entre fer par rapport a

L'induction ramené entre les aimants permanents **II.12.13** (cf. Figure II.16)

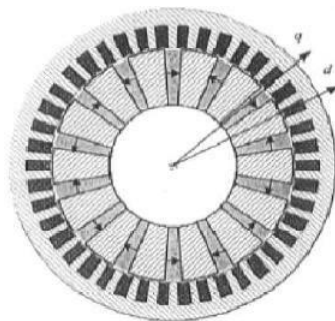


FIGURE II.16 Machines synchrones à aimants permanents enterrés

II.5.7 Modélisation de la MSAP

La modélisation est une méthode mathématique utiliser pour réduire la machine électrique en un simple système d'équation différentielle l'élaboration du modèle mathématique des machines est une étape nécessaire en vue de la commande et la simulation de leur différent régime de fonctionnement l'établissement des équations du modèle reposer sur les hypothèses simplificatrices. **II.8**

La bobine de stator connectée en étoile, neutre dans l'air pour éliminer l'élément homopolaire du courant.

*la saturation du circuit magnétique est négligée elle aboutit à l'expression des flux magnétiques en tant que fonction linéaire des courants des phases.

* la distribution de F_{MM} dans l'entre fer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont alors négligés.

* les pertes hystérésis et par les courants de Foucault sont négliger.

*l'effet de peau et de la température est négligé.

II.5.8 Mise en équations de la machine synchrone à aimant permanents(MASP)

La machines synchrone à aimants permanent est représentée par la figure suivant.

Elle se compose de trois enroulements statoriques décalée entre eux de $(\frac{2\pi}{3})$ et des aimant permanente qui créent l'excitation au rotor

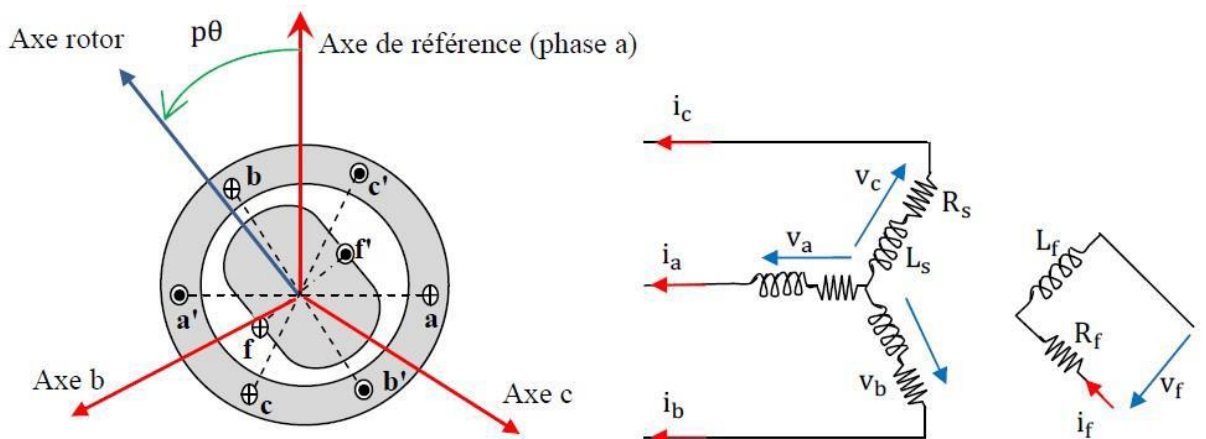


FIGURE II.17: Représentation symbolique de la machine synchrone

Equations de tension et du flux

Expression des tensions statorique

$$[V_{abc}] = [R_s][i_{abc}]_s + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}]_s \dots\dots\dots II.44$$

Expression des flux statorique

$$[\phi_{abc}]_s = [L_s][i_{abc}]_s + [\phi_{F abc}] \dots\dots\dots II.45$$

Avec :

$[V_{abc}]_s = [V_a V_b V_c]^T$: vecteur tension statorique

$[i_{abc}]_s = [i_a i_b i_c]^T$: vecteur courant statorique

$[\phi_{abc}]_s = [\phi_a \phi_b \phi_c]^T$: vecteur flux statorique

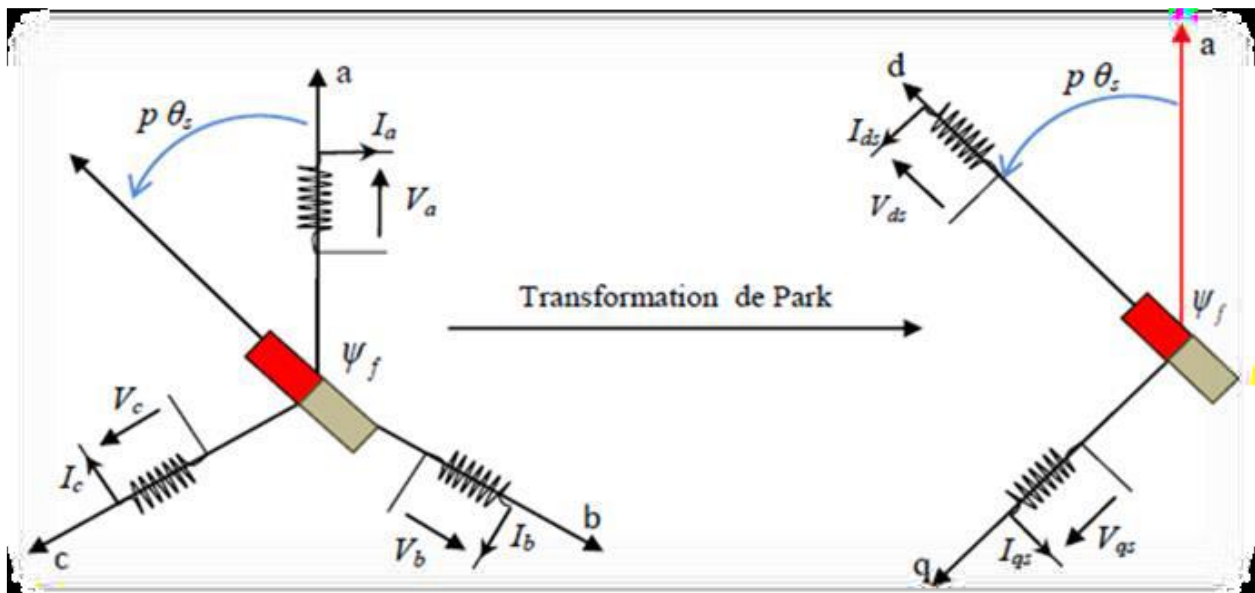
$[R_s]$: Résistance des phases statoriques

Les enroulements statorique de la machine synchrone considérée sont connecter en étoile à neutre isolé d'où la somme instantané des courants statoriques est nulle, il n'Ya pas de courant homopolaire, par conséquent s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux elle n'intervient pas dans le couple.

Le comportement de la machine et donc représente par deux variables indépendantes **II.14**

II.5.9 Le passage ou repère de Park (d,q)

Afin de simplifié le model dynamique de la machine on applique un changement de repaire cette transformation mathématique transforme les trois bobines statoriques fixes de phase de $(\frac{2\pi}{3})$ en deux bobines fictives équivalent de phase de $(\frac{\pi}{2})$ et situées sur le rotor.



Représentation d'une GSAP dans le repère d q **FIGURE II.18**

Deux bobines d et q tournent avec le rotor produisant le même effet que les trois bobines fixe

Les variations exprimées dans ce nouveau repaire (d ;q) nous permettent de passer de repaire naturel au repère de Park et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine. **II.15**

On note que

_(d,q) : indices des composantes de Park directe et en quadrature

P(θ) :matrices de passage de Park

_ la matrice de Park notée P(θ) et la suivante

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{II.45}$$

Le passage de repaire triphasé au repaire biphasé

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] * \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{II.46}$$

La matrice inverse de Park et la suivante

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{II.47}$$

Le passage de repère biphasé au repère triphasé

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} * \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{II.48}$$

X : représente soit le courant la tension ou le flux

II.5.10 Equations électriques de la MASP

Convention moteur sont données par

$$V_d = R_s i_d + L_s \frac{d}{dt} i_d - \omega L_s i_q \dots\dots\dots \text{II.49}$$

$$V_q = R_s i_q + L_s \frac{d}{dt} i_q - \omega L_s i_d \dots\dots\dots \text{II.50}$$

En convention génératrice on inverse le sens des courants on aura donc les équations électriques de la GASP comme suite. **II.16**

$$V_d = -R_s i_d - L_s \frac{d}{dt} i_d + \omega L_s i_q \dots\dots\dots \text{II.51}$$

$$V_q = -R_s i_q - L_s \frac{d}{dt} i_q + \omega L_s i_d \dots\dots\dots \text{II.52}$$

II.5.11 Equations magnétiques :

$$\Phi_d = L_d i_d + \Phi_F \dots\dots\dots \text{II.53}$$

$$\Phi_q = L_q i_q \dots \dots \dots \text{II.54}$$

*($L_q i_q$) : les inductances directe en quadrature

* (Φ_f) : représente le flux des aimants

II.5.12 Equations de couple électromagnétique et l'équation mécanique...

L'expression de couple électromagnétique.

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_q - L_d) i_q i_d + i_q \Phi_f] \dots \dots \dots \text{II.55}$$

Avec (P) et le nombre de pair de pole

La dynamique de la machine GSAP est donnée par l'équation mécanique suivant

$$C_m - C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f_{\Omega} \dots \dots \dots \text{II56}$$

C_m : le couple moteur appliquée sur la génératrice

J : le moment d'inertie totale de la machine

f : le coefficient de frottement

Ω : vitesse mécanique

II.5.13 Simulation de la GSAP

Simulation et interprétation

La figure II.18. présente le modèle de la génératrice synchrone à aimant permanents (GSAP) utiliser pour la simulation en Matlab Simulink

Fonctionnement à vide :

Le fonctionnement a vide est caractérisé par des courants nuls :

$$\begin{cases} I_{sd} = 0 \\ I_{sq} = 0 \end{cases}$$

Les expressions des tensions et celle du couple

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = w\Phi_f \\ C_{cem} = 0 \end{cases}$$

En lance la génératrice à l'aide du couple de la turbine, étant donné que les frottements sont considérés nuls, on constate que la vitesse à atteint une certaine valeur comme il est aperçus sur la figure de vitesse GSAP

Les tensions des phases sont parfaitement sinusoïdales avec une certaine valeur de crête et une fréquence de 50 HZ

Paramètres de GSAP

Paramètres	Valeur
Puissance nominale	600 W
Résistance statorique R_s	1.137 Ω
Inductance direct L_d	0.0027 Hz
Inductance quadrature L_q	0.0027 Hz
Flux de l'aimant ϕ_f	0.15 Wb
Inertie J	0.1 Kg.m ²
Frottement f	0.06 N.m/rad/s
Nombre de pair de pôle	17

Simulation de la GSAP

Fonction à vide

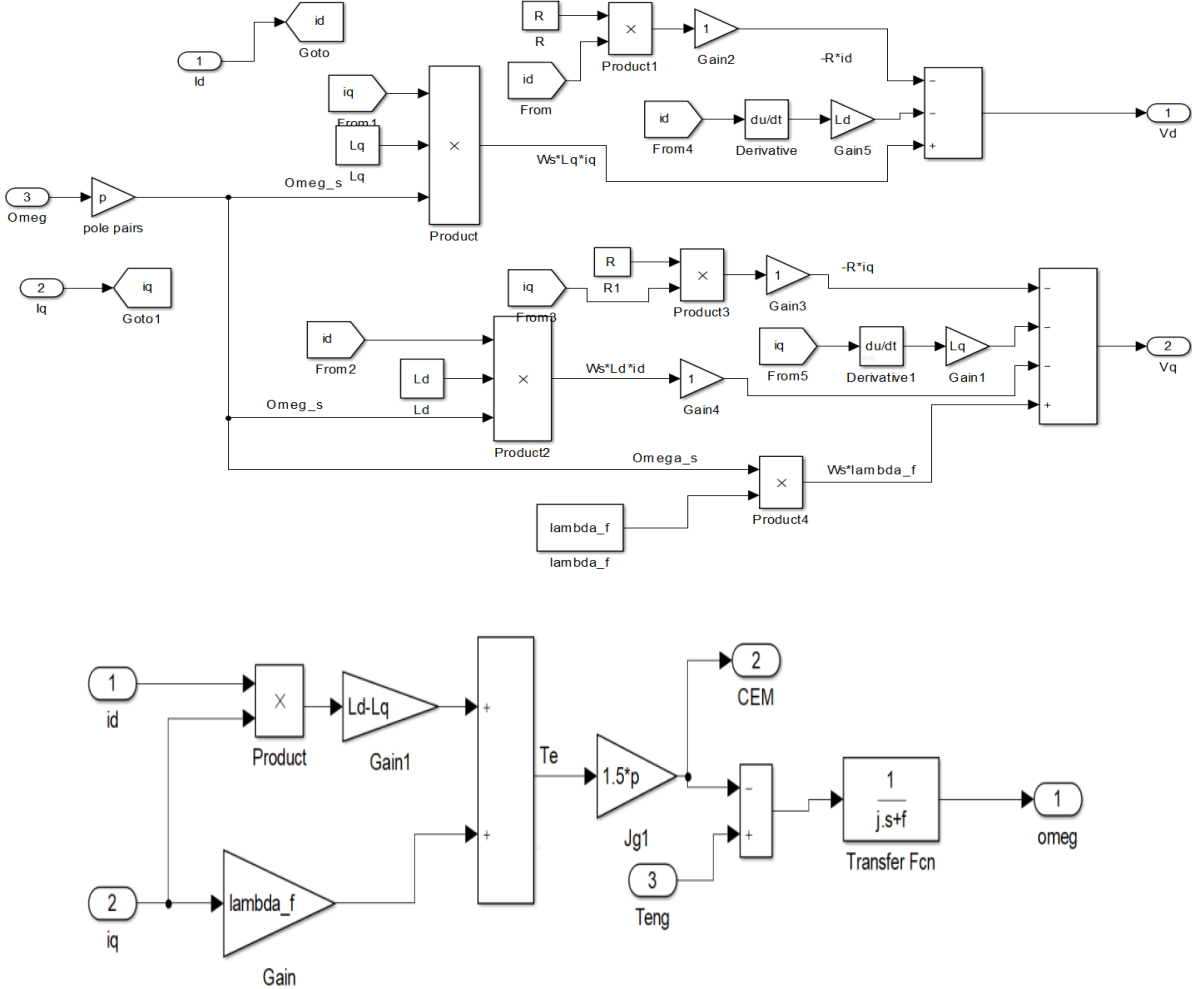


FIGURE II.19 Schéma bloc primaire de la GSAP à vide

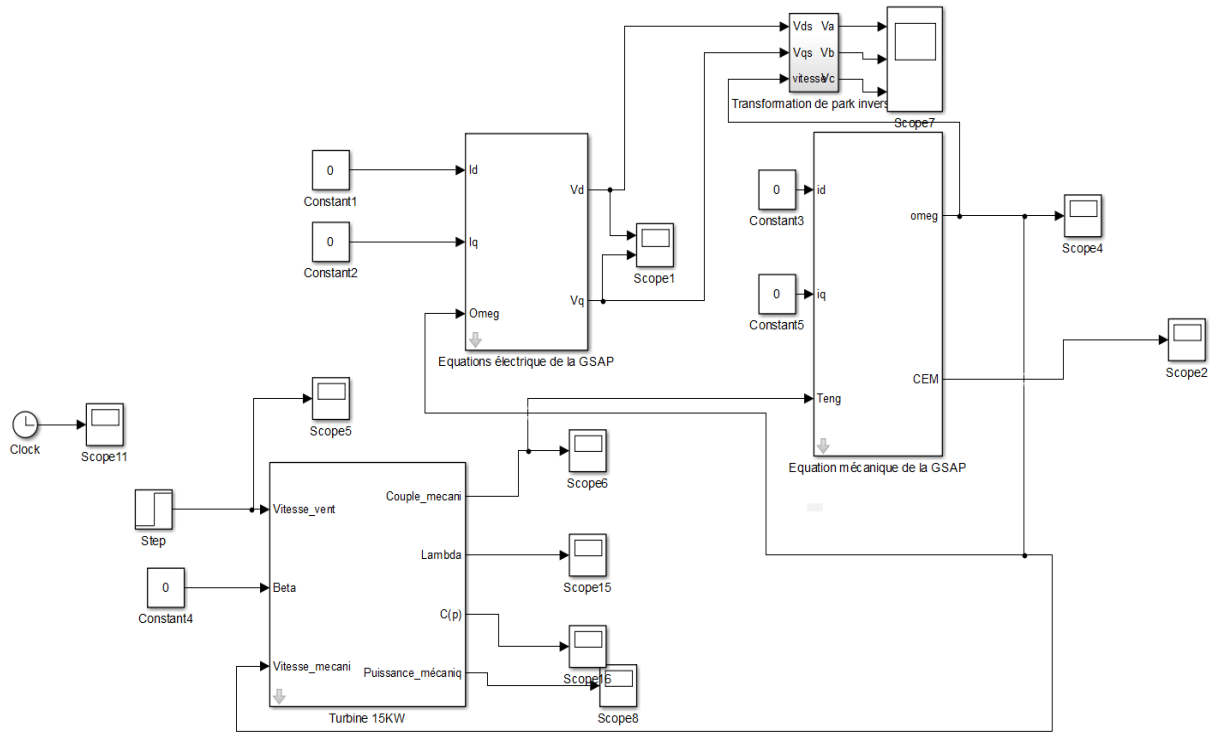
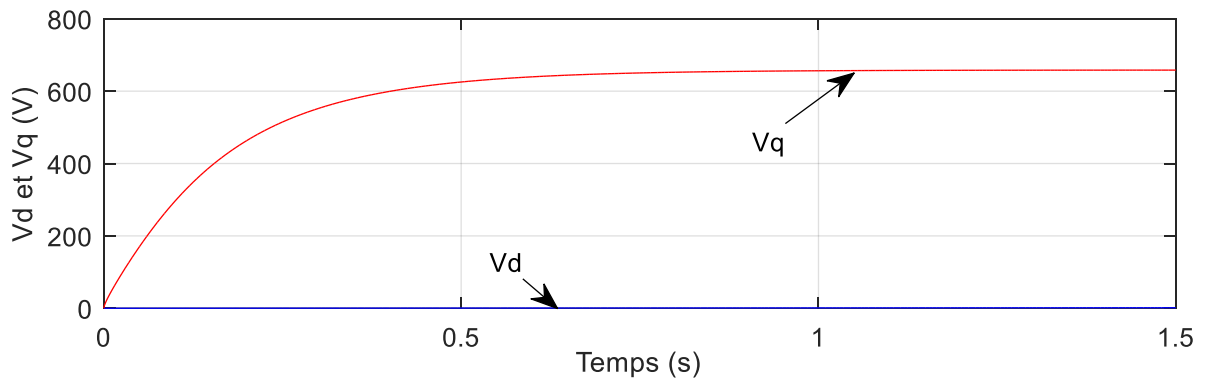
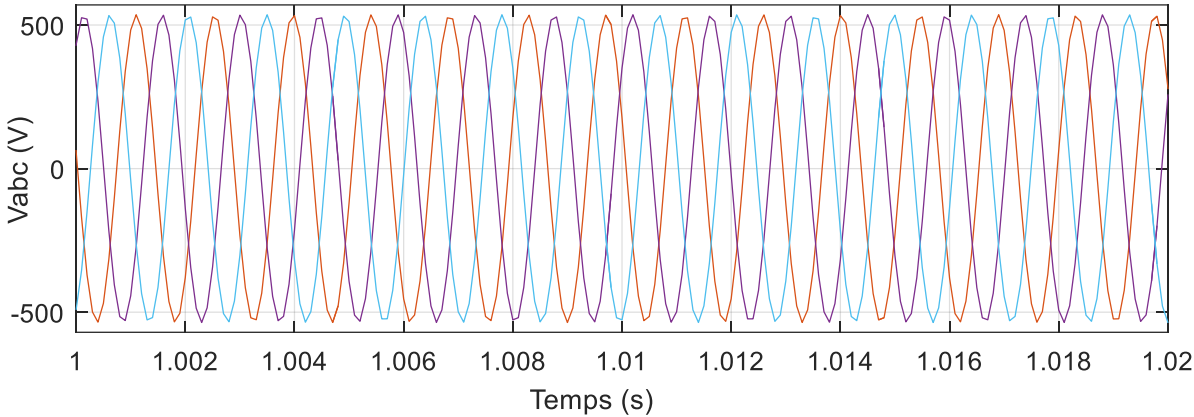
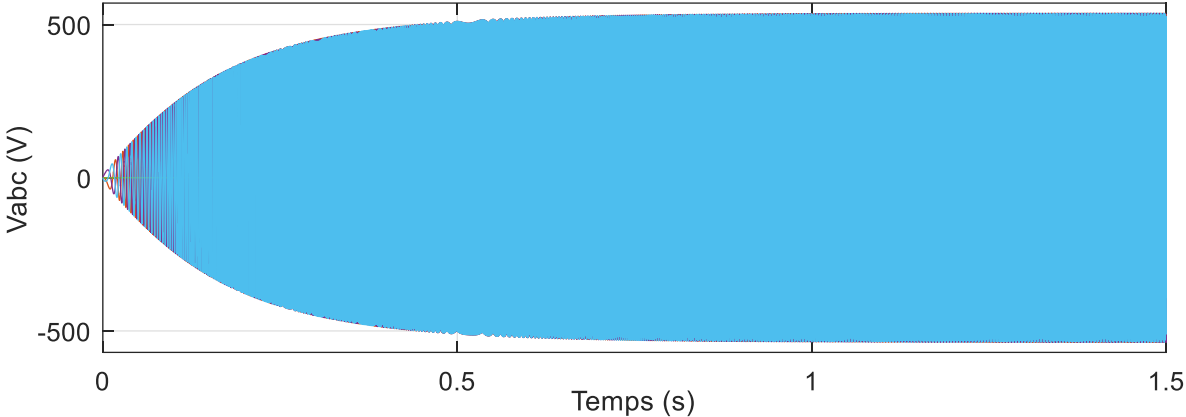


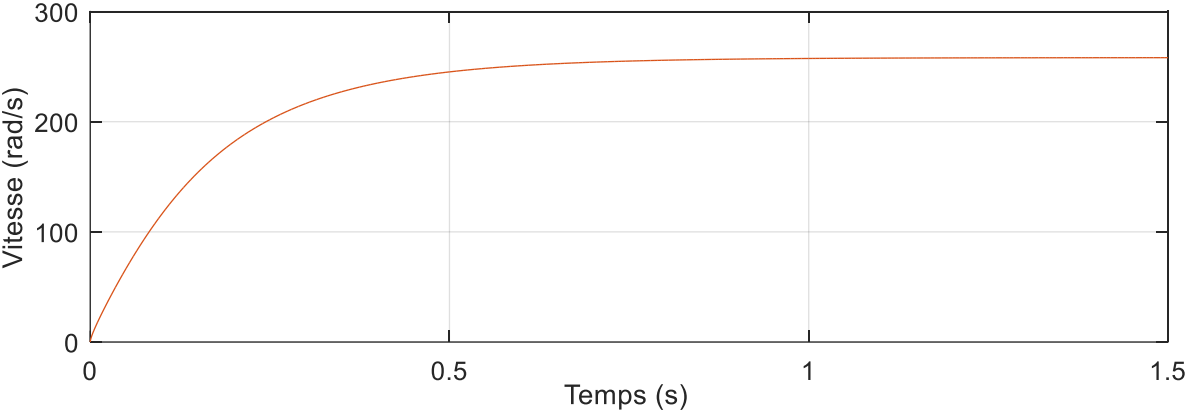
FIGURE II.20 Schéma bloc de la GSAP à vide

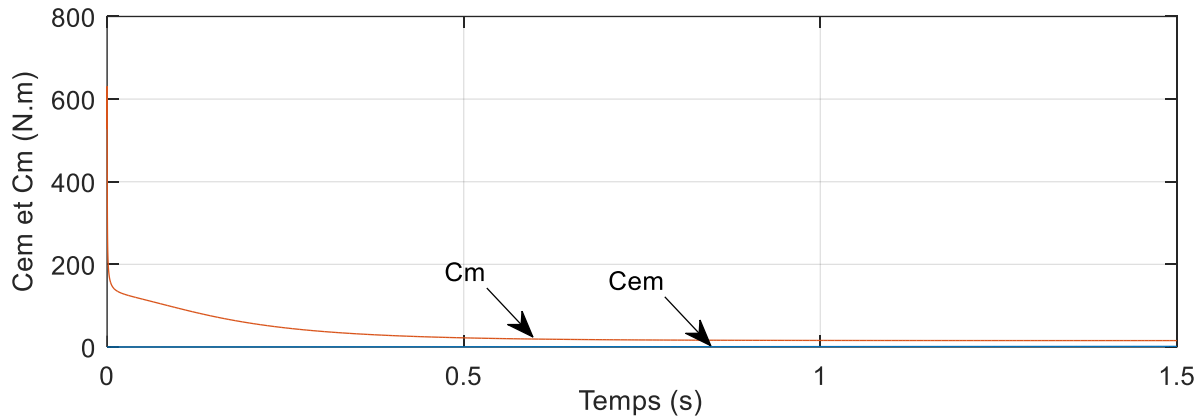
Résultats de simulation





Zoom sur les tensions de la GSAP à vide





Dans notre simulation à vide les courants sont nuls $I_d = I_q = 0$ vu qu'il n'y a pas de charge.

D'après les équations de tension d'une GSAP dans la transformation de Park on trouvera que $V_d = 0$ et $V_q = \Phi_S \omega$ donc le V quadrature égale au flux Φ_S de l'aimant du rotor et la pulsation ω

_le couple électromagnétique est nul vu qu'il n'y a pas de charge d'alimentation

_le couple mécanique est en chute il tombe vers zéro

Le flux $\Phi_{d\text{avide}}$ égal au flux de l'aimant Φ_F

II.6 Modélisation des convertisseurs

II.6.1 Modélisation des convertisseurs triphasés double alternance à diodes

Un redresseur est un dispositif électronique utilisé pour convertir un courant alternatif en courant continu cc.

Il effectue cette conversion en supprimant les alternances négatives du courant alternatif

Ne laissent passer que les alternances positives

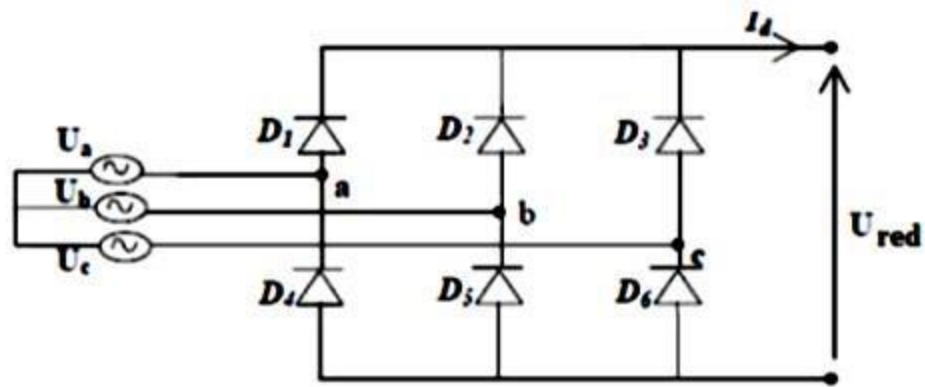


FIGURE II.21 Redresseur triphasé double alternance à diode

Ce type de redresseur comporte trois diodes à cathode comme assurant l’aller du courant $i_d(t)$, (D_1, D_2, D_3) et trois diodes à anode comme assurant le retour de courant (t), (D_4, D_5, D_6) .

Si on suppose que le redresseur soit alimenté par un réseau triphasé équilibre de tension.

Si en l’effet l’empiétement et négliger, la valeur instantanée de la tension redresser peut être exprimé par **II.17**

$$V_a(t) = V_{\max} \times \sin(\omega t) \dots \dots \dots \text{II.57}$$

$$V_b(t) = V_{\max} \times \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \dots \dots \dots \text{II.58}$$

$$V_c(t) = V_{\max} \times \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \dots \dots \dots \text{II.59}$$

La tension redressée à la sortie de redresseur est donnée par :

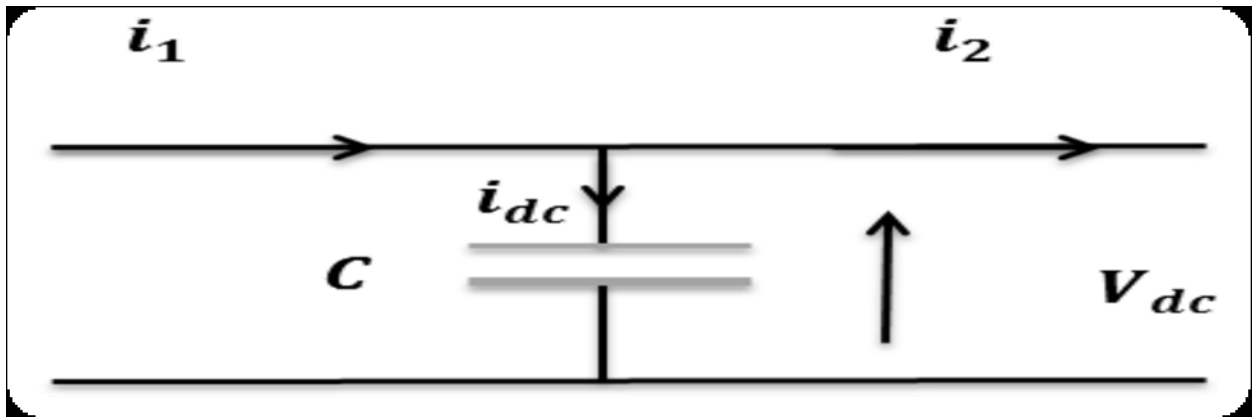
$$U_{\text{red}}(t) = \max[V_a(t), V_b(t), V_c(t)] - \min[V_a(t), V_b(t), V_c(t)] \dots \dots \dots \text{II.60}$$

Sa valeur moyenne est donnée par :

$$U_{\text{red}}(t) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{\max} \dots \dots \dots \text{II.61}$$

II.6.2 Modélisation du bus continu

Le bus continu joue un rôle essentiel en stockant temporairement l'Énergie électrique convertie par le redresseur et ne la fournissant de manière régulée à l'onduleur pour une conversion ultérieure en courant alternatif de haute qualité



: **FIGURE II.22 Schéma électrique du bus continu**

Le schéma électrique de la figure x Permet par la loi des nœuds d'établir la relation suivante

II.18

$$\frac{dV_{d0}(t)}{dt} = \frac{1}{c} i_{dc}(t) \dots \dots \dots \text{II.62}$$

$$i_{dc} = i_1 - i_2 \dots \dots \dots \text{II.63}$$

Avec

i_1 : le courant redressé

i_2 : le courant à onduleur

i_{dc} : le courant de charge du condensateur

A partir de la rotation [x] Après l'intégration on obtient :

$$V_{dc} = \frac{1}{c} \int_{t1}^2 i_{dc}(t) + V_{d0} \dots \dots \dots \text{II.64}$$

$$V_{dc0} = 0v$$

La valeur de la tension a l'instant initial $t=0$

Donc $V_{dc} = \frac{1}{CS} id_c \dots \dots \dots \text{II.65}$

II.6.3 Modalisation l'onduleur de tension

Un onduleur est un convertisseur statique constitue de cellule de commutation généralement à transistor ou des thyristors GTO pour les grandes puissances.

Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs chacun pour assurer la continuité en courant chaque interrupteur est monté en anti parallèle avec une diode de récupération

Les interpréteurs $(F_1, F_4), (F_2, F_5), (F_3, F_6)$ sont contrôler demanière complémentaire pour éviter les court-circuit de la source.

L'onduleur permet de transformer un signal d'entrée continu en un signal de sortie alternatif.

II.18

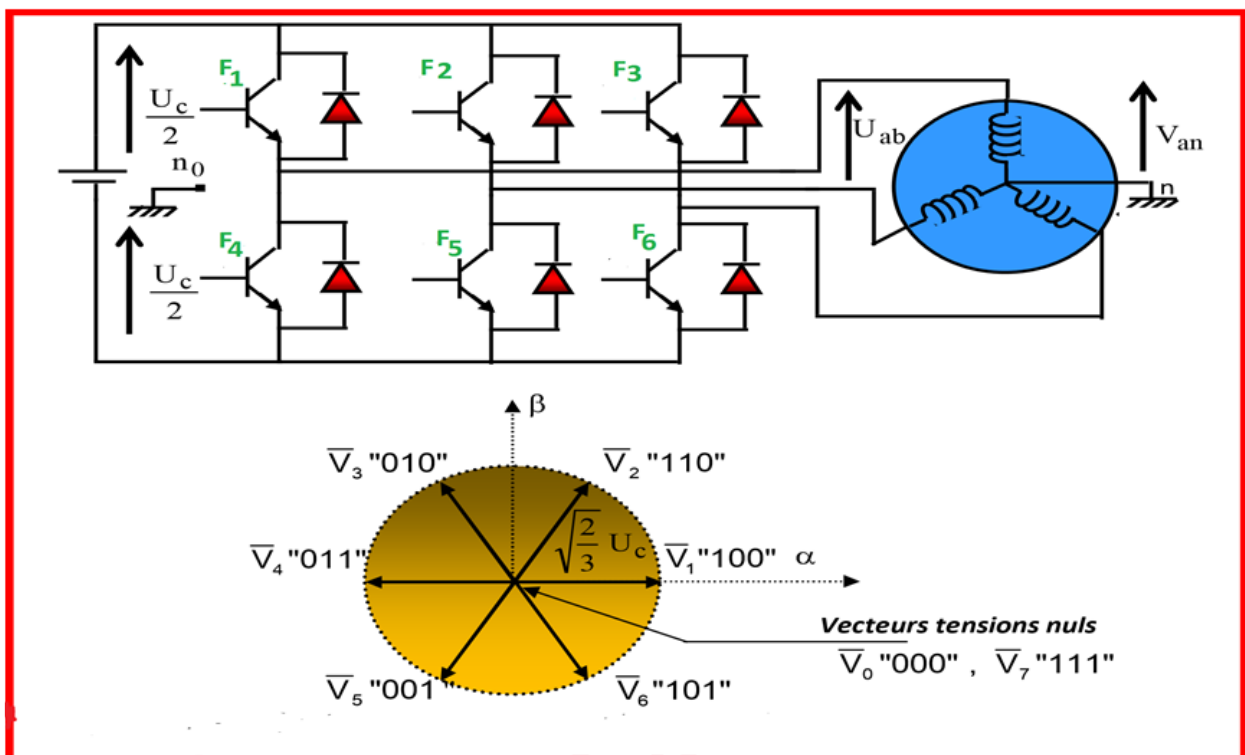


FIGURE II.23 Le schéma global d'un onduleur à MLI.

L'état des interrupteurs supposées parfaits peuvent être défini par trois grandeur booléennes de commande

Si $i = (a b c)$.

****Branche 1**

$F_i = 0$ si F_1 est en position fermée et F_4 est à ouvert

$F_i = 1$ si F_1 est en position ouvert et F_4 est à fermée

****branche 2**

$F_i = 0$ si F_2 est en position fermée et F_5 est à ouvert

$F_i = 1$ si F_2 est en position ouvert et F_5 est à fermée

****branche 3**

$F_i = 0$ si F_3 est en position fermée et F_6 est à ouvert

$F_i = 1$ si F_3 est en position ouvert et F_6 est à fermée

Dans ces conditions on peut écrire les tensions de phase V_{imabc} en fonction des signaux de commande,

Les fonctions de commande F_i sont générées par un bloc de commande en fonction des objectives de la commande du system.

$$V_{inabc} = F_i U_c - \frac{U_{dc}}{2} \dots \dots \dots \text{II.66}$$

Les tensions composées des trois phases sont obtenues à partir des relations suivant :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{a0} - V_{b0} \\ V_{bc} = V_{b0} - V_{c0} \\ V_{ca} = V_{c0} - V_{a0} \end{cases}$$

Soit (n) le point neutre du coté alternatif.

Alors on à

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} - V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} - V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} - V_{n0} \end{cases}$$

La charge est considérée équilibrée, il l'en résulte

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$$

La substitution de (x.) dans (y) nous donnons

$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \dots \dots \dots \text{II.67}$$

En remplaçant (z) dans (x) on obtient

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \\ V_{bn} = -\frac{2}{3}V_{a0} + \frac{2}{3}V_{b0} - \frac{1}{3}V_{c0} \dots \dots \dots \text{II.68} \\ V_{cn} = -\frac{2}{3}V_{a0} - \frac{1}{3}V_{b0} + \frac{2}{3}V_{c0} \end{cases}$$

Les différentes combinaisons des trois grandeurs (F₁, F₂, F₃) permettent de générer huit vecteur tensions dont deux correspondent au vecteur nul comme le montre figure II.23

L'utilisation de l'expression (f) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \dots \dots \dots \text{II.69}$$

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de fonctionnement du système éolienne en suite nous avons abordé la modélisation et simulation des trois parties composante du système.

Dans le prochain chapitre nous allons étudier la commande vectorielle de la GSAP.

Chapitre III

Commande vectorielle de la GSAP

III.1 Introduction :

La commande des machines à courant alternatif est difficile car le modèle mathématique du système dans le repère de Park est non linéaire et il est fortement couplé du fait d'existence d'un comptage complexe entre les deux armatures rotorique et statorique III.(1)

Pour obtenir les résultats voulu dans le système de contrôle on va joindre au système commandé des régulateurs qui ont le rôle du un entier de la quantité règles à la valeur du point spécifié qu'elle que soient les entraves ou trouble en cours d'organisation.

On peut obtenir le comportement requis en boucle fermé, ou donnant ses propres procédures et paramètres ce qui caractérise les performances du système.

Le régulateur PI est une combinaison entre un régulateur proportionnel et un régulateur intégré les deux à justes correctement, combinent leurs avantage l'un compensant les inconvénients de l'autre III.(2)

Dans cette partie en vas exposer la commande vectorielle de GSAP en fonction de la variation de vitesse du vent.

Les deux boucles courant et vitesse sont régulées à l'aide d'un correcteur PI.

III.2 Commande vectorielle de la GSAP

III.2.1 Principe de la commande vectorielle :

Elle est l'une des méthodes qui contrôle et traite techniquement les machines alternative.

Le principe est d'éliminer le couplage entre l'induit et l'inducteur séparément le courant statorique en deux composantes $[I_{ds}-I_{qs}]$ dont le $[I_{qs}]$ commande le couple et $[I_{ds}]$ commande le flux .

Ce que nous donnera un fonctionnement compatible à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée III.(3) Le but de la commande vectorielle des machines est de perfectionner leur comportement statique et dynamique à l'aide d'une structure similaire à celle d'une machine de courant continu III.(2)

- La génératrice ça commande est basée sur un pilotage vectorielle classique avec un capteur de position.

- Dans une machine synchrone la vitesse de rotation électrique égale à la vitesse du champ magnétique d'excitation se dernier produit par le rotor $P\Omega$

Un autre champ magnétique tournant est appelé la réaction de l'induit est produit par les enroulements du statant

La vitesse de rotation est liée à la pulsation du champ terminal par la relation

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \dots\dots\dots \text{III.1}$$

D'où P est le nombre de paires de pôle de la machine. Si on prend un fonctionnement de la machine à vide et sans pertes seul le flux magnétique d'excitation apparait.

La commande vectorielle classique consiste à aligner un des deux axes du repère de Park généralement l'axe direct d selon ce vecteur tournant composé par le champ d'excitation III.(3)

Quand la machine est en charge une réaction d'induit apparait et déplace le flux d'excitation, la vitesse de rotation et le couple électromagnétique dépendent du flux magnétique et des courants statoriques

-Le modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère de Park est donné par les équations différentielles suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d = -R_s i_d - \frac{d\phi_d}{dt} + \omega L_q i_q \\ V_q = -R_s i_q - \frac{d\phi_q}{dt} - \omega L_d i_d + \omega \phi_F \end{array} \right. \dots\dots\dots [\text{III (2)}]$$

Avec

$$\begin{aligned} \phi_d &= L_d i_d + \omega \phi_F \\ \phi_d &= L_q i_q \frac{d\phi_d}{d\phi_q} \end{aligned} \dots\dots\dots [\text{III (3)}]$$

Devient

$$\begin{aligned} V_d &= -R_s i_d - \frac{d\phi_d}{dt} + \omega \phi_q \\ V_q &= -R_s i_q - \frac{d\phi_q}{dt} - \omega L_d i_d + \omega \phi_F \end{aligned} \dots\dots\dots [\text{III (4)}]$$

L'expression du couple électromagnétique est donné par

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \dots\dots\dots [III (5)]$$

La Fm de Génératrice est donnée par :

$$E_0 = P \Omega \Phi_F \dots\dots\dots [III (6)]$$

- L'une des stratégies de commande vectorielle exercée sur la machine synchrone celle la plus répandue qui impose une référence du courant i_d égale à zéro
- Le couple électromagnétique est donné par $C_{em} = \frac{3}{2} p \Phi i_d \dots\dots\dots III (7)$.
- Donc on peut contrôler le C_{em} en contrôlant le courant i_q alors que le courant i_d est asservi à zéro

III.2.2 Synthèse des correcteurs :

On prend des régulateurs de types PI dans la structure de commande.

Les équations du modèle mathématique de la MSAP sont écrites sous la forme

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d (p) + P L_s I_d - w \Phi_d (P) \\ V_q = R_s I_q (p) + P L_s I_q - w \Phi_q (P) \end{cases} \dots\dots\dots D III (8)$$

- Les couplages en $E_{dq} = w \Phi_{dq}$ sont vues comme des perturbations mesurables
- La FT de la machine s'écrit sous la forme

$$G_s (P) = \frac{1}{R_s + L_s p} = \frac{1}{L_s} \cdot \frac{1}{1 + T_s p} \dots\dots\dots III (9)$$

$$G_s (p) = \frac{I_{dq} (p)}{V_{dq} (p) + E_{dq} (p)} \dots\dots\dots III (10)$$

Avec la constante de temps électrique

$$T_c = \frac{L_s}{R_s} \dots\dots\dots P III (11)$$

La boucle de régulation est donnée sous la forme suivante :

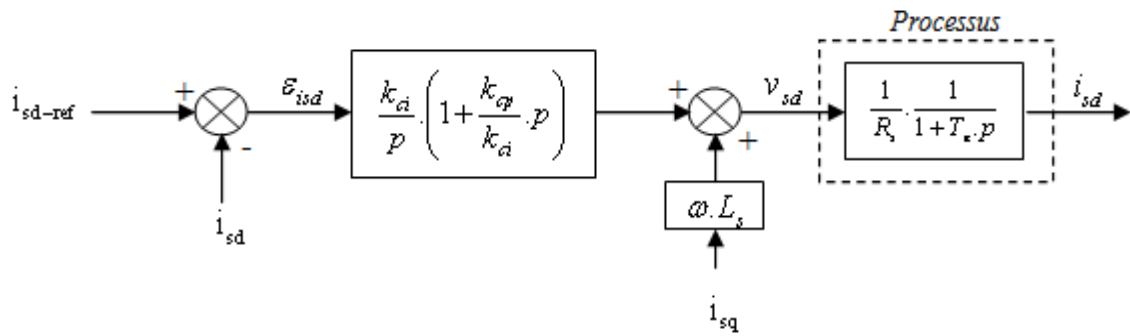


FIGURE III. 1 Boucle de régulation de courant

La FTBO est donnée par

$$G_0(p) = \frac{K_{ci}}{p} \left(1 + \frac{K_{cp}}{k_{ci}} p \right) \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1+T_{cp}} \dots\dots\dots \text{III (12)}$$

Les paramètres de la régulation sont déterminés par la méthode de la compensation du pôle en boucle ouverte alors les constantes de temps sont égales

$$T_o = T_e = \frac{K_{cp}}{K_{ci}} \dots\dots\dots \text{III (13)}$$

La FTBF devient

$$G_s(p) = \frac{G_o(p)}{1+G_o(p)} = \frac{\frac{1}{2}}{1+\frac{2}{k_{ci}}p} = \frac{1}{1+tcp} \dots\dots\dots \text{III (10)}$$

En FTBF la constante de temps T_f est égale

$$T_f = \frac{R_s}{K_{ci}} \dots\dots\dots \text{III (15)}$$

Le coefficient proportionnel K_{cp} du régulateur est

$$K_{cp} = \frac{L_s}{T_f} \dots\dots\dots \text{III (16)}$$

La figure III (2) nous donne la stratégie de commande en couple qui contient les boules de découplage de tension et de régulation de courant

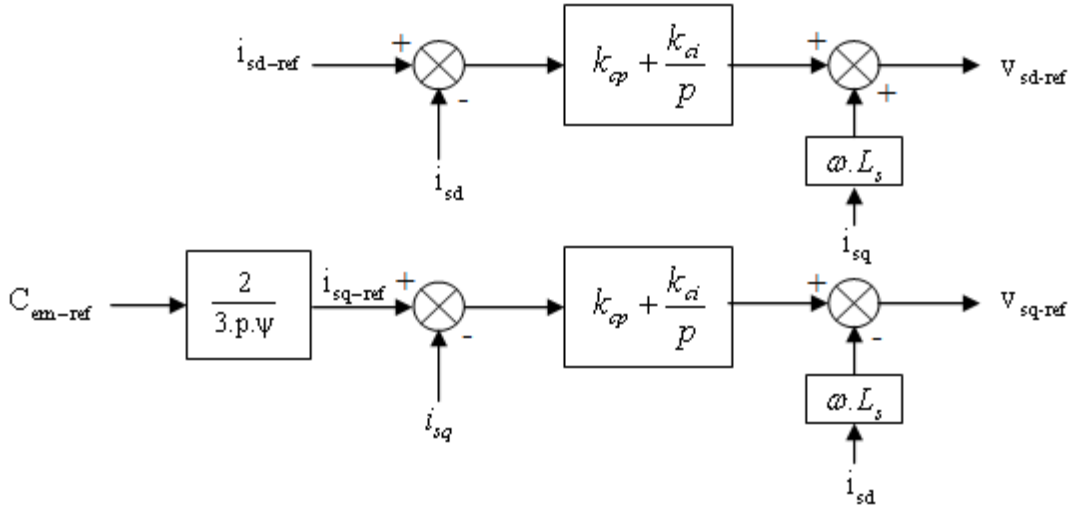


Figure III. 2 Stratégie de commande en couple de GSAP

III .3 structure de contrôle vectoriel de GSAP

L'entrée de référence de la commande de la machine est le couple de référence C_{mref} à l'aide des étapes précédentes de modélisation et des règles d'inversion on propose la structure complète de la commande vectorielle de la GSAP

(Figure III3)

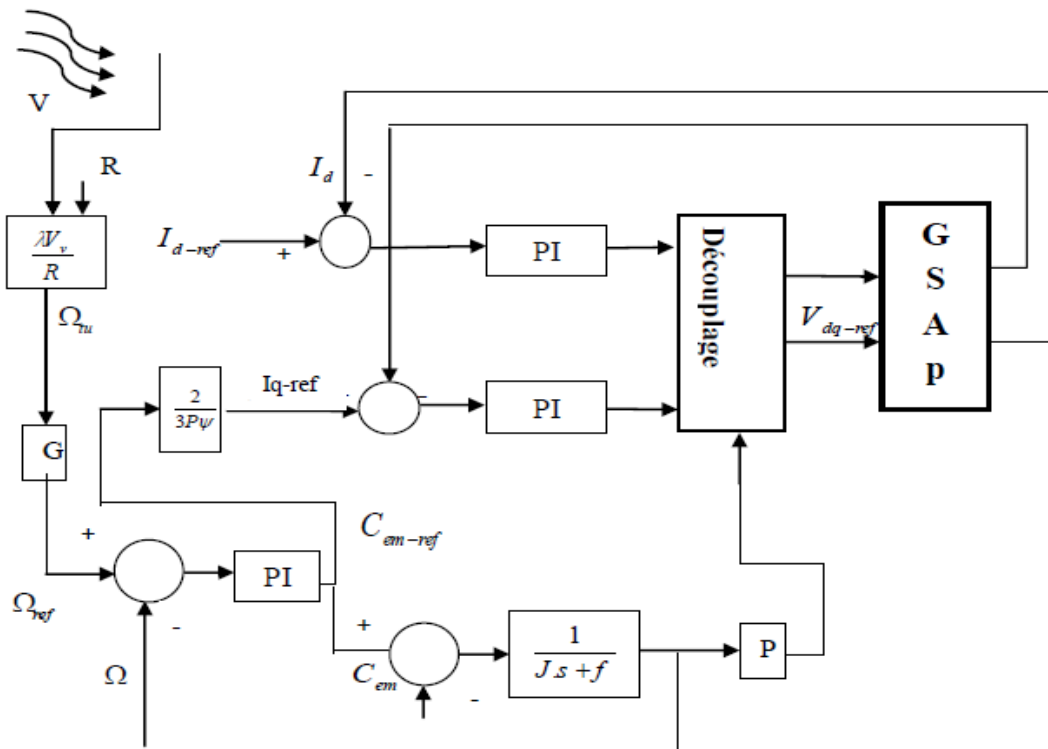


Figure III. 3 Schéma Bloc de commande vectorielle de la GSAP

III .4 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

III.4.1 Les avantages III.(4)

- elle est précise et rapide
- elle est basée sur le modèle transitoire
- le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase

III.4.2 les inconvénients III.(4)

- faible robustesse aux variations paramétriques

III .5 : Simulation de la commande vectorielle de GSAP

Dans notre cas on va appliquer la commande vectorielle de la GSAP on la simule à la vitesse de vent constante et variable.

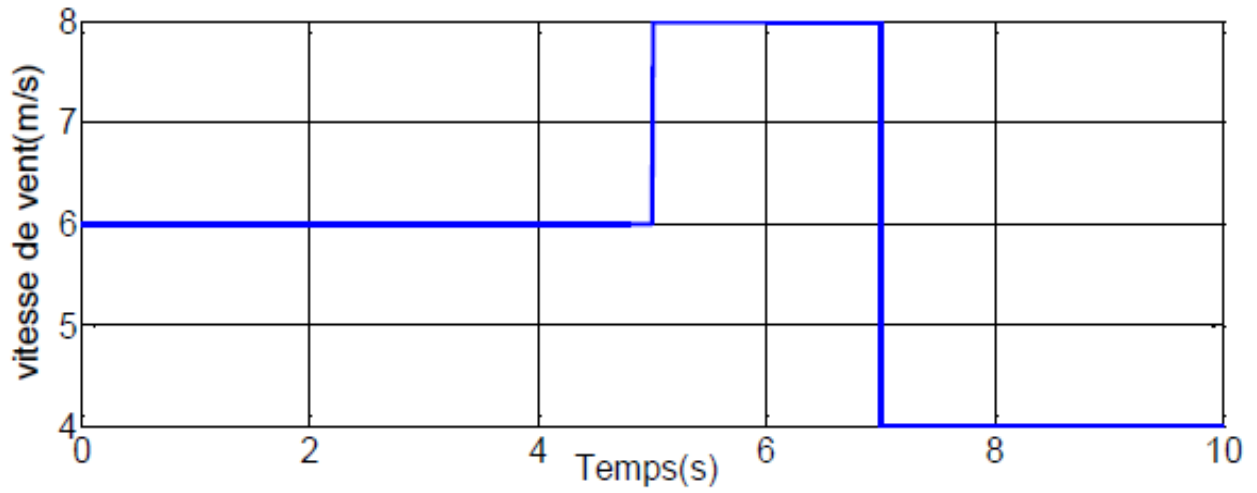
III.5.1 Simulation de la GSAP à la vitesse du vent constante

Dans cette partie la vitesse de vent est constante, nous donnons la valeur sept pour chaque durée on voit sur la figure que le générateur à une vitesse constante est faible et éloignée de la vitesse de synchronisation ce qui nous donne une basse fréquence de tension et de courant qu'est visible sur les figures ce qui implique la vitesse du vent est insuffisante.

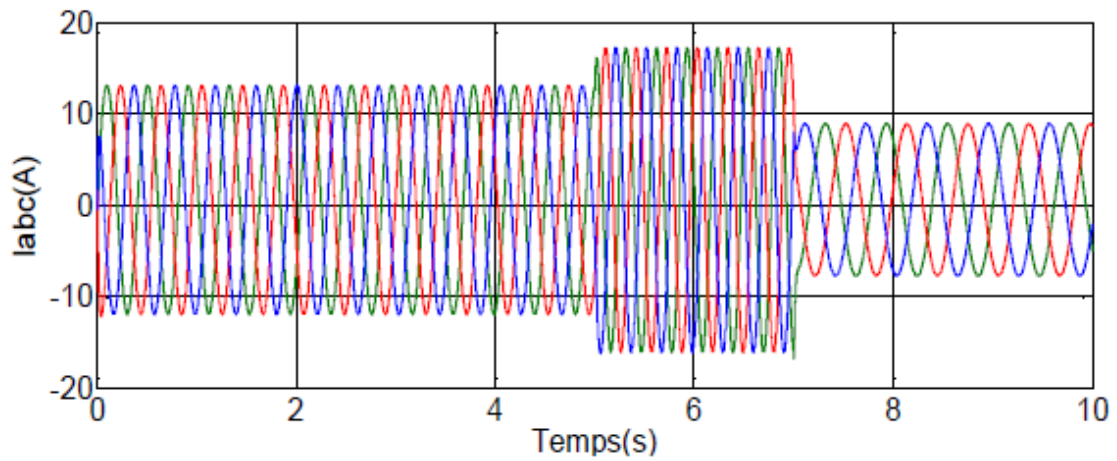
- Dans le cas d'une vitesse du vent inférieure à sept on constate la diminution de la tension et du courant ainsi que la vitesse de rotation.
- Dans le cas d'une vitesse du vent supérieure à sept nous constatons une augmentation de la tension et du courant ainsi que la vitesse de rotation.
- La composante de I_d est maintenue à zéro par le régulateur de courant

Résultats de simulation:

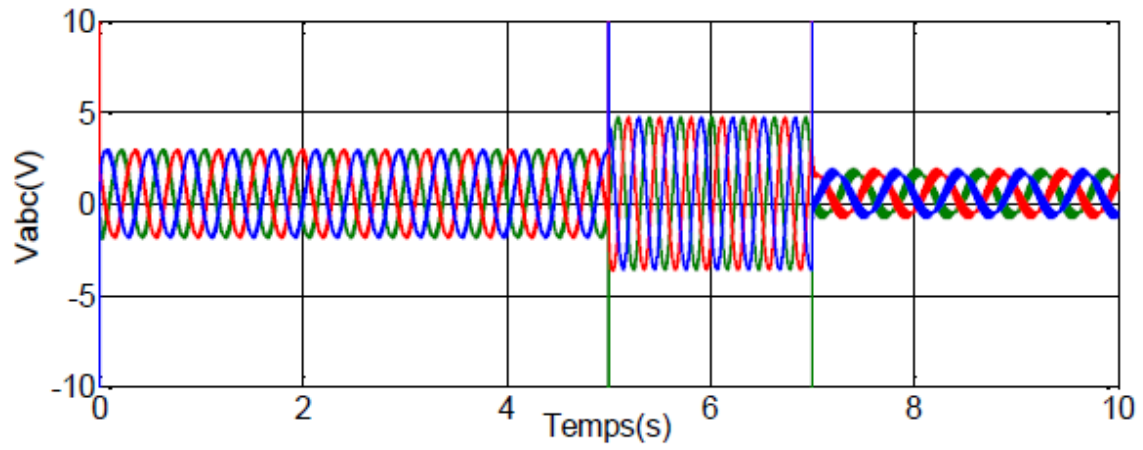
Nous présentons certains résultats de simulation de la commande GSAP



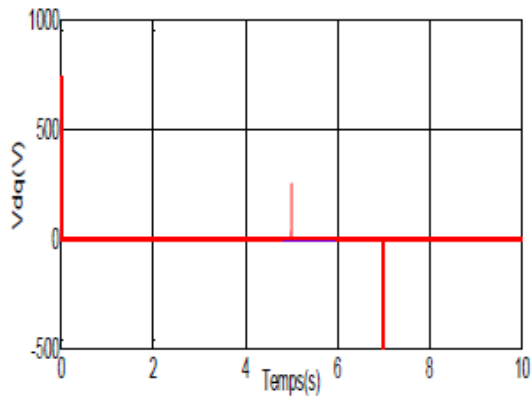
La vitesse de vent



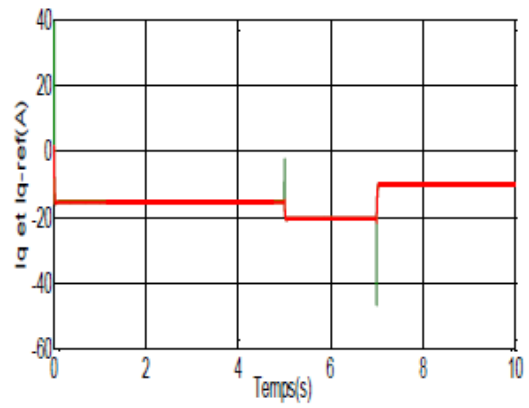
Les courants I_{abc}



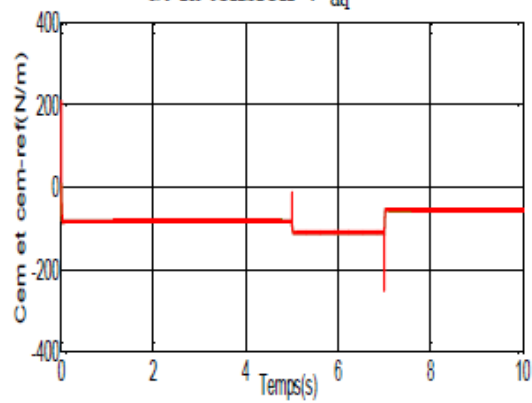
Les tensions V_{abc}



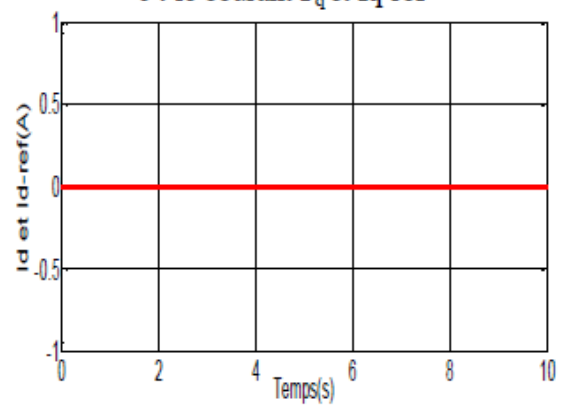
d : la tension V_{dq}



e : le courant I_q et I_{q-ref}



e : les couple C_{em} et C_{em-ref}



f : le courant I_d et I_{d-ref}

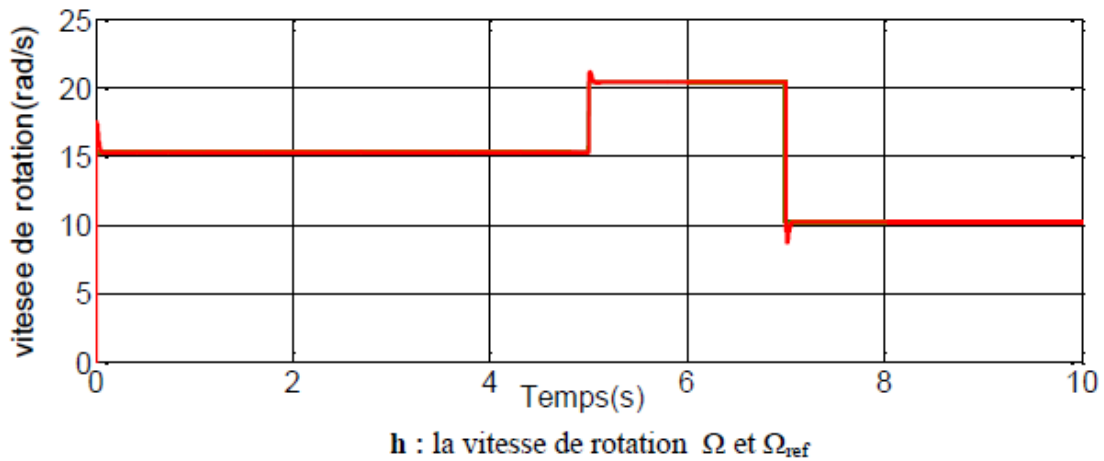


Figure III.4 : simulation de GSAP a vitesse de vent constante

III.5.2 Simulation de GSAP pour la vitesse de vent variable

Dans le cas d'une vitesse de vent variable, nous observons la variabilité de la vitesse du générateur.

-Le changement de la vitesse du vent augmente et baisse la tension et le courant comme il est représenté sur la figure.

-Les tensions et les courants des phases sont parfaitement sinusoïdaux à chaque vecteur de la composante I_a est maintenue à zéro par le régulateur de courant.

Résultats de simulation du vent:

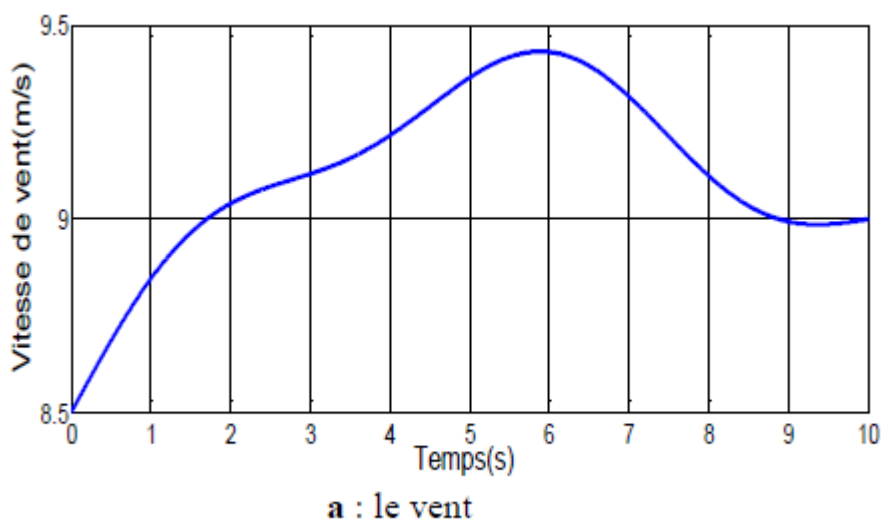


Figure III. 5 Simulation de GSAP pour la vitesse de vent variable

III.6 Conclusion :

Dans cette partie on a appliqué la commande vectorielle sur la GSAP, on a remarqué que les régulateurs classiques (PI) donnent des meilleurs résultats par le réglage de la vitesse.

L'inconvénient principal de ces régulateurs, c'est leur sensibilité pour les changements des paramètres de la machine d'après les résultats obtenu dans l'étude de la robustesse.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude est l'intégration d'une éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent au réseau électrique.

Ce travail est reparti en trois parties.

Le premier chapitre en a abordé les problèmes d'intégration d'une éolienne au réseau électrique.

Les problèmes liés au point de raccordement de cette énergie au réseau électrique.

L'intermittence de l'énergie éolienne qui dépend des variations du vent qui crée des perturbations électriques.

Les interfaces et leurs rôles majeurs dans l'intégration de cette énergie au réseau électrique.

Le deuxième chapitre est reparti en trois parties.

L'énergie du vent, l'éolienne, la modélisation et Simulation de la partie mécanique.

Généralité sur les machines synchrones à aimant permanent, modélisation et simulation de la génératrice à aimant permanent.

Troisième partie est consacré à la partie statique, modélisation des convertisseurs, électronique de puissance.

Troisième chapitre est consacré à la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimant permanent.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1^{ER} CHAPITRE

I.1. Lina Maria Ruiz Gomez, « Intégration de la production éolienne aux réseaux électriques : approches et 00844387/document économiques », <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel>

I/2/Luc Lasne, J.C Gianduzzo, Didier Geoffroy, « Electrotechnique », <http://www.creaa.u-bordeaux1.fr/download/electrotechnique.pdf>

I/3/B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S. Plumel, J. Deuse, « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », http://12ep.univ-lille1.fr/pagesperso/francois/JEEA_2006_papier.pdf

I/4/Nicolas Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00170128/document>

2^{EME} CHAPITRE

II/1/ : Maghsel S, «Contribution à l'amélioration et la commande d'une turbine éolienne» mémoire de magistère, option : Électrotechnique, UNIV du 20 aout 1955 – Skikda, Algérie, 2012.

II/2 /: ROUABHI Riyadh, «Contrôle des puissances générées par un système éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée», Thèse de doctorat, option : Commande Electrique, UNIV de Batna2, Algérie, 2016.

II(3)/: K.GHEDAMSI, Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone, Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.

II(4)/ Dr. Gary L. Johnson « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001

II/(5)/ Guy Cuntly « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », © Edisud, Aixen- Provence, 2001, www.edisud.co

II/6/ P. Leconte, M. Rapin, E. Széchenyi, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.

II/7/ : J. MARTIN « Énergies éoliennes » ; Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie Énergétique pp. B8 585 1- B 8 585 21.

II/8/ Mayouf Messaoud « la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent », thèse de magister de l'université de Batna, 13-02-2008.

II/9/ A.M. El Refaie, T.M. Jahns, D.W. Novotny « Analysis of Surface Permanent Magne Machines with Fractional Slot Concentrated Windings », IEEE Transactions on Energy Conversion 2006.

II/10/ L. Leclercq. « Apport du stockage inertiel associe a des éoliennes dans un reseau électrique en vue d'assurer des services systèmes ». These de doctorat, Laboratoire

- II/11/ H.AID,W. AINA, «Synthèse de lois de commande non-linéaires pour un entraînement électrique à vitesse variable basé sur un moteur synchrone à aimants permanents » Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen 2012 – 2013
- II/12/ N.SENHADJI, A.CHALABI «Commande Du Moteur Synchrone A Aimants Permanents Par Backstepping», Mémoire de Master Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen 2015
- II/13/ S.Mme HAMECHA, Ep.BOUREKACHE« Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents» Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2013
- II/14/ B. N. Mobarkah, « Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification „en ligne“ des paramètres », thèse de doctorat de l'Université de Téhéran, Iran. Décembre 2001
- II/15/ F.Poitier. « étude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne. » thèse de doctorat de l'université de NANTE ,2003
- II/16/Gabriel-Octavian Cimuca, «Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateur éoliens »,Thèse doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, centre de Lille, France, N° ordre: 2005-27
- II/17/ Z. Souhila, « commande par passivité de la machine synchrone a aimants permanent », Mémoire de Master l'Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2015.
- II/18/ B.Merghem, « Étude Et Commande D'une Éolienne À Base D'une Msap Pour La Production D'énergie Electrique », Mémoire De Master, Université Farhat Abbas Sétif, 2016

3^{EME} CHAPITRE BIBLIOGRAPHIE

- III/1]S.ZEGHOUDI,« Commande Par Passivité De La Machine Synchrone A Aimants Permanents », Mémoire de master , Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen,2015.
- III/2] I.Touaimi Med ,A.Douaer Med,« Commande Par Passivité De La Machine Synchrone A Aimants Permanents », Mémoire de master , Université de Djilali BOUNAÂMA Khemis Miliana– Tlemcen,2016/2017.
- III/3] M. MAYOUF «ETUDE comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aimants permanents » Université d'Al Hadj Lakhdar –Batna 2014
- III/4] L. Allali , « Commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents », Mémoire de master, université labri ben m'hidi d'oum el bouaghi,2015/2017.