

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A .Mira – BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du

Diplôme de Master en Electrotechnique

Filière : Électrotechnique Spécialité : Machines Électriques

Filière : Électrotechnique Spécialité : électrotechnique industrielle

Thème



Présenté par :

M^r LAHLAH SAMIR

M^r MERAD DAOUD

Encadré par :

M^r H. BEKKA

Promotion 2018/2019

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions ; dieu le tout puissant; de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes les années d'études.

Nous tenons à remercier très vivement notre promoteur Monsieur **H. BEKKA**, enseignant à l'université de Bejaïa (Algérie), pour avoir dirigé ce travail, pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de sa réalisation, pour sa disponibilité ainsi que pour nous avoir fait bénéficier de sa compétence scientifique et nous avoir supporté pendant toute la durée du travail.

Nous tenons à remercier les membres du jury Mem Belaid et Mem Abedeli, enseignants à l'université de Bejaïa pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de participer au jury.

Nous tenons aussi à remercier tous les membres de nos familles respectives pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Enfin, nous remercions tous nos amis. Notamment nos copains de chambres de cité, nos amis adhérents au sein des associations, nos camarades de la promotion d'électrotechnique de l'année 2018/2019.

Et toute personne ayant apporté un plus; de pré ou de loin ; à l'élaboration du présent travail.

DEDICACES

*Tous d'abord on remercie Dieu le tout Miséricordieux,
On dédie ce modeste travail à nos très chers parents pour
nous avoir apporté support et soutien, et A nos chers grands*

Parents

*À tous nos amis et nos camarades. À tous les gens que
nous connaissons et qui nous ont aidés et soutenus pendant
toute cette période, et aussi à tous nos enseignants pendant*

tous nos cursus universitaires,

À toutes les personnes qui nous ont soutenus et participés

De près ou de Loin à l'élaboration de ce mémoire.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre I: Etat de l'art sur les hydroliennes en générale et l'hydrolienne de rivière en

Particulière

I.1 Introduction

I.2 Notion générales sur les hydroliennes de rivière

I.2.1 Définition d'une hydrolienne de rivière

I.2.2 Conversion de l'énergie hydraulique

I.2.3 Fonctionnement d'une hydrolienne

I.2.4 Facteur de rendement des différentes sources d'énergies renouvelables

I.3 Les fleuves et rivières

I.3.1 Les estuaires

I.3.2 Densité de l'eau

I.4 Les hydroliennes

I.4.1 Les hydroliennes marines

I.4.1.1 Turbines à axe horizontal (classique)

I.4.1.2 Turbines à axe horizontal carénée

I.4.1.3 Turbines à axe horizontal à axe flottante

I.4.1.4 Les hydroliennes à axe vertical

I.4.1.5 Hydroliennes à ailes oscillantes ou ondulantes

I.4.1.6 Hydroliennes à vis d'Archimède

I.4.1.7 Hydroliennes cerf-volant

I.4.2 Les hydroliennes de rivières et fluviales

I.4.2.1 Hydroliennes fluviales : fonctionnement à axe horizontal

I.4.2.2 Hydroliennes fluviales : fonctionnement à axe vertical

I.4.2.3 Hydroliennes domestiques

I.4.2.4 Micro-hydroliennes

I.4.2.5 Mini-hydrolienne portable

I.5 Les avantages et les inconvénients de l'utilisation d'une hydrolienne

I.5.1 Avantages

I.5.2 Inconvénients

I.6 Maintenance des hydrolienne

I.7 Modélisation de la ressource

I.7.1 Puissance maximale extraite

I.7.1.1 Loi de Betz

I.7.1.2 Préliminaire

I.7.2 Coefficient de puissance (C_p) pour les hydrolienne marin (et aussi pour l'éolienne)

I.7.2.1 Le couple hydraulique

I.7.3 Coefficient de puissance (C_p) pour les hydrolienne de rivière

I.8 Modes de fonctionnement

I.8.1 Fonctionnement à vitesse fixe

I.8.1.1 Avantages

I.8.1.2 Inconvénients

I.8.2 Fonctionnement a vitesse variable

I.8.2.1 Avantages

I.8.2.2 Inconvénients

I.9 Point de fonctionnement à puissance maximum MPPT

I.10 Machines synchrones à aimant permanent

I.10.1 Motifs de choix de la (MSAP)

I.11 Conclusion

Chapitre II : Modélisation de la partie mécanique

II.1 Introduction

II.2 présentation du système étudié

II.3 Modélisation de la source (la rivière)

II.4 Modélisation de la turbine

II.4.1 Les caractéristiques de la turbine ACHARD

II.5 Modélisation du multiplicateur

II.6 Modélisation de l'arbre mécanique

II.7 Schéma bloc du modèle de la turbine hydrolienne

II.8 Maximisation de la puissance extraite

II.8.1 Le contrôle sans asservissement de vitesse mécanique

II.9 Conclusion

Chapitre III: modélisation de la machine utilisée (MSAP)

III.1 Introduction

III.2 Machines synchrones à aimants permanents

III.2.1 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents

III.2.2 Fonctionnement de la MSAP

III.2.3 Domaines d'application des MSAP

III.2.4 Classifications des machines synchrones à aimants permanents

III.2.4.1 Les Aimants permanents

III.3 Structure générale d'une MSAP

III.4 Modélisation de la MSAP

III.5 Hypothèses simplificatrices

III.5.1 Mise en équations de la machine dans le repère (abc)

III.5.1.1 Équations électriques

III.5.1.2 Équations magnétiques

III.5.1.3 Équation mécanique

III.6 Transformation de Park

III.6.1 Principe de la transformation de Park

III.6.1.1 Matrice de Park qui conserve les amplitudes

III.6.1.2 Matrice de Park qui conserve les puissances

III.6.2 expression de la puissance et de couple électromagnétique

III.6.3 Passage du repère $\alpha\beta$ au repère dq

III.6.4 Le choix du référentiel

III.6.4.1 Référentiel lié au stator

III.6.4.2 Référentiel lié au rotor

III.6.4.3 Référentiel lié au champ tournant

III.6.5 Application de la transformation de Park à la MSAP

III.7 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents GSAP

III.8 connexion de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) au réseau

III.9 Modélisation des convertisseurs statiques

III.9.1 Modélisation de redresseur MLI

III.9.2 Modélisation du filtre

III.9.3 Modélisation de l'onduleur MLI

III.10 Technique de modulation de largeur d'impulsion MLI

III.10.1 Commande par MLI naturelle

III.11 Conclusion.

Chapitre IV : commande et Simulation du Système globale

IV.1 Introduction

IV.2 Commande de la génératrice synchrone à aimants permanentant

IV.2.1 Commande vectorielle de la GSAP (commande à flux orienté)

IV.2.1.1 commande en couple de la GSAP

IV.2.2 Structure de découplage

IV.2.3 La régulation de courant

IV.3 Schéma de commande du générateur et du redresseur MLI

IV.4 Connexion au réseau et la stratégie de contrôle des puissances injectées

IV.4.1 Schéma global de commande de l'hydro générateur synchrone à aimant permanent

IV.5 Présentation et interprétation des résultats de simulation

IV.6 Conclusion

Conclusion générale et perspectives

Annexes.

Références bibliographiques.

*Liste des Symboles
Et Abréviations*

Liste Des Symboles et Abréviations

- V_l La vitesse du courant d'eau de rivière (m/s)
- ρ La densité volumique de l'eau (kg/m³)
- S La surface balayée par la turbine (m²)
- P_t Puissance de la turbine.
- C_p Le coefficient de puissance de l'hydrolienne.
- λ Rapport de vitesse en bout des pâles.
- β L'angle de calage.
- Ω_t vitesse angulaire de rotation du turbin (rad/s).
- R rayon de la turbine (m).
- C_t Le couple de la turbine.
- $\Omega_{méc}$ La vitesse mécanique de la génératrice.
- G Le gain du multiplicateur.
- $C_{méc}$ Le couple mécanique sur l'axe rapide de la turbine.
- J_t Inertie de la turbine (kg .m²).
- J_g Inertie du rotor de la génératrice.
- J L'inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine (kg. m²).
- f Coefficient de frottement dynamique (kg. m².s⁻¹).
- $C_{ém}$ Couple électromagnétique (N.m).
- C_r Couple résistante.
- $[V_s], [V_r]$ Vecteur tension statorique et rotorique.
- $[i_s], [i_r]$ Vecteur courant statorique et rotorique.
- $[\varphi_s], [\varphi_r]$ Vecteur flux statorique et rotorique.
- R_s Résistance de chaque enroulement du stator.
- R_r Résistance de chaque enroulement du rotor.
- a, b, c : Axe liés aux enroulements triphasés.
- d, q : Axe de référentiel de Park.
- α, β : Axe de référentiel statorique.
- $\vartheta_a, \vartheta_b, \vartheta_c$: tensions statoriques de phase a,b,c.
- ϑ_s : Tension statorique.
- i_a, i_b, i_c : Courant statorique de phase a,b,c.

$[M_{sr}]$, $[M_{rs}]$ Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.

$[L_{ss}]$, $[L_{rr}]$ Matrices d'inductances statorique et rotorique.

l_s , l_r Inductance cyclique statorique et rotorique de la machine.

M_s , M_r Inductances mutuelles entre deux phases du stator et du rotor respectivement

M_{max} La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator-rotor.

P Le nombre de paires de pôles de la MSAP.

$[P(\theta)]$ La matrice de Park

$[P(\theta)]^{-1}$ La matrice inverse de Park

θ Angle d'observation de la matrice de Park

θ_s , θ_r Angle du stator et du rotor.

V_{ds} , V_{qs} Tensions statorique dans le repère (d q).

V_{dr} , V_{qr} Tensions rotorique dans le repère (d q).

φ_{ds} , φ_{qs} Flux statorique dans le repère (d q).

φ_{dr} , φ_{qr} Flux rotorique dans le repère (d q).

ω Pulsation de rotation électrique ($2 = p\Omega$)

ω_s , ω_r Pulsation électrique des grandeurs statorique et rotorique respectivement.

ω_0 la pulsation de résonance

M Inductance magnétisante de la machine.

i_{sd} , i_{sq} Courants statorique dans le repère (d q).

i_{dr} , i_{qr} Courants rotoriques dans le repère (d q).

ϑ_f : vitesse de fluide en (m /s).

ϑ_m : vitesse de fluide dans le sillage au loin en (m/s).

r : rendement.

P_0 : La puissance incidente du courant non perturbé.

P_i : La puissance incidente.

P_{hyd} : La puissance hydraulique.

C_{hyd} : Couple hydraulique.

C_m : Coefficient du couple.

ϑ_i : vitesse du courant en (m /s).

S_t : La surface ballée par les pales.

C_g : Couple de la génératrice.

C_{vis} : Couple de frottement visqueux.

ϑ_{cest} : vitesse du courant d'eau apparaissant au niveau de la turbine.

B_r : Induction rémanente.

H_{cj} : Champ corrective.

$[\varphi_{f abc}]$: Vecteur flux crée par l'aimant à travers l'enroulement statoriques.

M_{s0} : Inductance mutuelle entre deux phases statorique.

L_{s0} : Inductance propre d'une phase statorique.

[C] : la matrice de clark.

$[C]^{-1}$: matrice de clark inverse.

[T] : La matrice de concordia.

$[T]^{-1}$: La matrice de concordia inverse.

$P_{éle}$: La puissance électrique.

L_d, L_q : Les inductances d'axe directe et en quadrature.

$P(t)$: La puissance transmise.

W_e : L'énergie électromagnétique.

U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} : Tensions composées.

S_a, S_b, S_c : Les fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

m : indice de modulation.

F_p : Fréquence de modulation.

$F_{réf}$: Fréquence de référence.

φ_f : Flux rotorique.

$V_{sd\ réf}, V_{sq\ réf}$: Tensions de référence.

$P_{g\ réf}$: Puissance active injectée au réseau.

$Q_{g\ réf}$: Puissance réactive injectée au réseau.

$I_{d\ réf}, I_{q\ réf}$: Les courants de référence.

$C_{em\ réf}$: Couple de référence.

V_{dc} : Tension redressée.

Abréviation

MSAP Machine synchrone à aimants permanents.

MLI Modulation de Largeur d'Impulsion.

GSAP : Génératrice Synchrone à Aimant Permanent

F-é-m : Force Electromotrice

MPPT Maximum Power Point Tracking

FTBO fonction de transfert en boucle ouvert.

FTBF fonction de transfert en boucle fermée.

PD3 pont à diode triphasé

PI correcteur proportionnel intégrale.

IGBT Insulated Gate bipolar Transistor.

*Liste des Figures
et Tableaux*

LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX

Chapitre I

Figure I.1 Turbine à axe horizontal

Figure I.2 Turbines à axe horizontal carénée

Figure I.3 Turbines à axe horizontal flottante

Figure I.4 Hydrolienne à axe vertical

Figure I.5 Hydrolienne à ailes oscillante

Figure I.6 Hydrolienne à vis d'Archimède

Figure I.7 Hydrolienne cerf-volant

Figure I.8 Hydrolienne à ailes oscillante

Figure I.9 Hydrolienne à vis d'Archimède

Figure I.10 Hydrolienne cerf-volant

Figure I.11 Hydrolienne fluviales P66 installée dans un canal

Figure I.12 hydrolienne à axe vertical

Figure I.13 Hydrolienne domestique IdEnergie Canada

Figure I.14 Micro hydrolienne Cappa 250W

Figure I.15 Schéma de fonctionnement de la mini-hydrolienne

Figure I.16 Veine de courant

Figure I.17 Le rendement en fonction de x

Figure I.18 Coefficient de puissance en fonction de λ

Figure I.19 Structure de la chaîne de conversion utilisant une MSAP couplée au réseau

Chapitre II

Figure II.1 schéma globale d'une chaîne de conversion hydrolienne

Figure II.2 La turbine ACHARD

Figure II.3 schéma de la turbine hydrolienne

Figure II.4 Schéma bloc du modèle des pales

Figure II.5 Modèle mécanique simplifié du multiplicateur

Figure II.6 Schéma bloc du modèle de la turbine

Figure II.7 représente le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

Chapitre III

Figure III.1 : Stator d'une MSAP. a) structure encochée. b) structure lisse

Figure III.2 : Architectures schématiques des machines synchrones à champ radial (Classique) et à champ axial (Discoïde)

Figure III.3 : Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents.

Figure III.4: Courbe de désaimantation

Figure III.5: Schéma d'une machine synchrone a aimant permanent de surface

Figure III.6: Schéma de la MSAP dans le repère abc.

Figure III.7 : Différents couples qui agissent sur le rotor

Figure III.8 : Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d, q)

Figure III.9 : Schéma représentatif de la GSAP

Figure III.10 : Schéma bloc sur SIMULINK de la GSAP

Figure III.11 : Structure de la connexion de la MSAP couplée au réseau.

Figure III.12: Schéma d'un redresseur MLI.

Figure III.13 Schéma du filtre LC

Figure III.14 : Schéma équivalent de l'onduleur

Figure III.15 : MLI trianglo-sinusoïdale

Figure III.16 : Schéma de principe de la MLI naturelle

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Schéma bloc de découplage

Figure IV.2: Boucle de régulation découplée des courants I_d et I_q

Figure IV.3: Schéma de commande du générateur et du redresseur MLI

Figure IV.4 : Schéma global de commande de l'hydro générateur synchrone à aimants permanents

Figure IV.5 : vitesse du courant d'eau

Figure IV.6 : Coefficient de puissance de la turbine

Figure IV.7 : Vitesse de rotation de l'arbre du moteur.

Figure IV.8 : puissance mécanique récupérée par la turbine

Figure IV.9 : Courant I_d

Figure IV.10 : Courant I_q

Figure IV.11 : Couple électromagnétique

Figure IV.12 : Tension du bus continu V_d

Figure IV.13 : Puissance active injectée ou réseau

Figure IV.14 : Puissance réactive injectée ou réseau

Tableau 1.1 Facteur de rendement pour différents centrales d'énergie

Introduction Générale

Introduction générale

La question énergétique est d'envergure mondiale. Elle prend aujourd'hui une acuité particulière avec l'arrivée, dans le circuit des échanges, de pays très peuplés comme la Chine, l'Inde, l'Indonésie, ou le Brésil, très fortement demandeurs. Dans ce contexte, la raréfaction des ressources fossiles non renouvelables, leur inégale répartition géographique et les tensions qui en résultent sur les prix font de la question énergétique un enjeu de développement majeur.

A ces considérations géopolitiques et économiques s'ajoute désormais la reconnaissance de l'impact des activités humaines sur le changement climatique, et notamment des modes de production et de consommation d'énergie fossiles, fortement émetteurs de gaz à effet de serre. Le changement climatique influence fortement la politique énergétique et devient désormais un fondement essentiel de la réflexion, de l'analyse et de l'action. De ce constat résulte un certain nombre d'enjeux stratégiques : maîtrise de la demande en énergie, diversification du bouquet énergétique, développement des énergies renouvelables, réduction des émissions de gaz à effet de serre, etc. [1]

Dans ce contexte, les hydroliennes font partie des énergies innovantes qui intéressent tous les pays du monde pour la diversification de l'origine de la production d'électricité d'origine renouvelable.

L'énergie hydrolienne représente une innovation prometteuse pour exploiter l'énergie des rivières et des marées. Elle est produite au moyen d'une turbine hydraulique immergée sur le lit d'un courant d'eau pour convertir l'énergie de l'eau qui s'y écoule. Par son caractère peu invasif et réversible pour le milieu où elle s'insère, elle constitue une option prometteuse particulièrement pour l'alimentation d'établissements éloignés non reliés au réseau.

Jusqu'ici, aucune solution simple en énergie renouvelable ne permettait l'usage de la rivière au même titre que le soleil et le vent pour fournir de l'électricité à la population. Pourtant l'eau de la rivière est une ressource la plus constante, coulant 24 heures par jour, la moins assujettie aux variations de la météo, fonctionnant la nuit offrant le meilleur potentiel énergétique.

Plus de 1.4 milliard de personnes sur la terre vivent toujours sans électricité. Des centaines de millions de dollars sont investis chaque année par les gouvernement et organismes humanitaires pour permettre à ces populations d'avoir accès à l'électricité. Celle-ci se retrouvent la plupart dans des régions rurales où les rivières sont nombreuses et où les saisons de pluie sont régulières. Les panneaux solaires à eux seuls n'offrent pas toujours la solution escomptée dans ces régions. L'utilisation de génératrice à essence est souvent la seule solution de rechange. Par contre, le carburant est dispendieux sans oublier les complications liées à son transport ainsi que la pollution qu'il génère. La rivière qui coule à proximité, par sa régularité et prédictibilité, est la base idéale pour bâtir un système autonome en énergie renouvelables. [2]

Le présent mémoire décrit une étude sur un système de conversion hydrolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP), cette génératrice permet une production de l'énergie électrique à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources hydrolienne pour les différentes vitesses des courants d'eaux.

L'objectif de ce travail est l'étude et la modélisation d'une hydrolienne particulièrement l'hydrolienne de rivière à base d'une machine synchrone à aimant permanent et d'une turbine de coefficient de puissance fixe. C'est un travail réparti en quatre chapitres :

Le première chapitre est consacré à des généralités à l'état de l'art sur les systèmes hydrolienne. Dans le deuxième chapitre, nous présentons la modélisation de différentes parties mécaniques de l'hydro générateur. Elle concerne essentiellement la turbine, le multiplicateur et l'arbre de transmission. Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation de la partie électrique de l'hydrolienne. Elle est composé d'une génératrice synchrone à aimant permanent et des convertisseurs statique (le redresseur, le filtre LC et l'onduleur). Le quatrième chapitre sera consacré à la commande et simulation du système hydrolienne globale.

CHAPITRE I:

Etat de l'art sur les hydroliennes en générale

et l'hydrolienne de rivière en particulière

I.1 Introduction

L'énergie hydrolienne représente une innovation prometteuse pour exploiter l'énergie des rivières et des marées. Elle est produite au moyen d'une turbine hydraulique immergée sur le lit d'une rivière pour convertir l'énergie cinétique de l'eau. Par son caractère peu invasif et réversible pour le milieu naturel ou elle s'insère, elle constitue une option prometteuse particulièrement pour l'alimentation d'établissements éloignés.

L'hydrolienne est donc une solution logique, relativement simple d'utilisation, efficace et respectueuse de l'environnement. Elle pourra être utilisée en complémentarité avec des panneaux solaires ou des éoliennes pour offrir une source d'électricité diversifiée et abondante. Elle offrira enfin aux usagers une gamme complète de solution en énergie renouvelable pour répondre à leur besoins.

I.2 Notion générales sur les hydroliennes de rivière

À côté des centrales de très fort puissance (installation sur des fleuves de plusieurs dizaines de MW) qui nécessitent de grands barrages complexes et coûteux et dont les impacts écologique et humains sont très importants (modification des cours d'eau, ensablement, inondation de vallées et déplacement de population...), il est possible de produire de l'électricité à partir de l'exploitation de la rivière. [3]

I.2.1 Définition d'une hydrolienne de rivière

L'hydrolienne de rivière est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du courant d'eau en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

I.2.2 Conversion de l'énergie hydrolienne

Une hydrolienne est une turbine qui utilise l'énergie cinétique des cours d'eau, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique de l'air. Cette énergie est transformée en énergie mécanique qui, elle est transformée en énergie électrique. Il existe plusieurs sortes d'hydroliennes, certaines sont totalement sous l'eau, d'autres à la surface de l'eau.

I.2.3 Fonctionnement d'une hydrolienne

Le principe de fonctionnement d'une hydrolienne est simple on place des hélices ou des turbines dans l'axe des courants des marées ou des cours d'eau pour capter l'énergie que ces dernières peuvent fournir. Le courant va faire tourner l'hélice de l'hydrolienne qui va transformer l'énergie mécanique en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Cette électricité est ensuite acheminée par des câbles reliés au rivage jusqu'à différents points de distribution. [4]

I.2.4 Facteurs de rendements des différentes sources d'énergies renouvelables

L'hydroélectricité est largement acceptée comme une énergie propre et compatible avec les contraintes environnementales, mais cela n'a pas toujours été le cas à cause des importants ouvrages d'art que nécessite la mise en place des grands barrages (déviation de cours d'eau, inondations locales, déplacements de population, etc.). Au-delà du potentiel écologique, une comparaison basée sur un facteur de rendement fonction de l'installation montre que l'hydroélectricité reste la forme la plus rentable de production d'énergie. Ce facteur de rendement est le ratio entre la quantité d'énergie produite par l'installation pendant toute sa durée de vie et l'énergie requise pour la mise en place de l'équipement de production, y compris son alimentation. [3]

Installation	Facteur de rendement
Petite hydraulique	80-100
Grand hydraulique	100-200
Photovoltaïque	3-5
Solaire (thermique)	20-50
Energie éolienne	10-30

Tableau I.1 Facteur de rendement pour différents centrales d'énergie [1]

I.3 Les fleuves et rivières

Les conditions nécessaires pour installer des hydroliennes en fleuves et rivières sont une vitesse supérieure à 1,5 m/s et une lame d'eau supérieure à un mètre. Pour bénéficier de l'effet de série (production d'énergie significative et réduction des coûts de fabrication), l'objectif est

d'installer des parcs de plusieurs machines, parfois plusieurs centaines de machines et par conséquent de privilégier les fleuves et rivières avec des sections et débits importants. Pour quantifier le débit, l'analyse des modules est une bonne approximation. Le module correspond au débit moyen inter annuel, c'est à dire à la synthèse des débits moyens annuels d'un cours d'eau sur une période de référence, typiquement une dizaine d'année. Pour les hydroliennes, les fleuves et rivières avec des modules supérieurs à 100 m³/s sont considérés comme les plus intéressants. [1]

I.3.2 Les estuaires

Les estuaires sont très intéressants pour les hydroliennes car les puissants flux, combinant les écoulements fluviaux et les courants de marée, ainsi que les grandes sections traversées, permettent d'installer des parcs très conséquents. [1]

I.3.1 Densité de l'eau

L'énergie cinétique contenue dans un objet en déplacement est proportionnelle à sa masse volumique (ou son poids). Plus l'eau est dense, plus la partie de l'énergie récupérable par l'hydrolienne est importante. A une pression atmosphérique normale et a une température de 15 degrés Celsius, l'eau pesé environ 1000 kg par mètre cube. Cependant, la masse volumique peut varier en fonction de la température, de la salinité et de la teneur en sédiments (mais avec des variations négligeables pour les phénomènes qui nous intéressent). Dans les mêmes conditions de température et de pression, la masse volumique de l'air est de 1,225 kg par mètre cube, c'est-à-dire environ 800 fois inférieure à celle de l'eau. [5]

I.4 Les hydroliennes

I.4.1 Les hydroliennes marines

Les catégories de fonctionnement principal. [6]

I.4.1.1 Turbines à axe horizontal (classique)

Ce sont les hydroliennes les plus utilisées, pour les hydroliennes marines. Elles ressemblent aux éoliennes. Elles ont un rotor muni de plusieurs pales, au moins deux mais parfois jusqu'à six comme la D10 du fabricant français Sabella. Les matériaux utilisés sont l'acier ou des matériaux composites réalisés par des moulages, comme pour la D10 et ont donc une fabrication proche de celle des éoliennes.

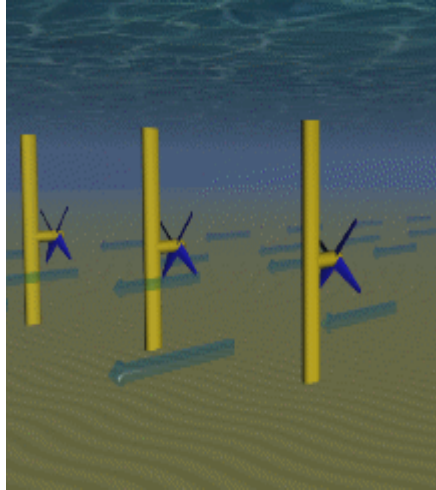


Figure I.1 Turbine à axe horizontal

I.4.1.2 Turbines à axe horizontal carénée

La turbine est installée dans un entonnoir. Ainsi, les courants marins sont accélérés : c'est l'effet venturi.

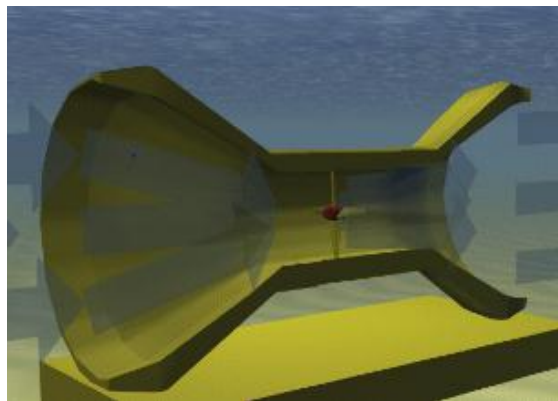


Figure I.2 Turbines à axe horizontal carénée

I.4.1.3 Turbines à axe horizontal flottante

Les hydroliennes à axe horizontal flottantes sont installées sous une barge flottante. Elles ressemblent de la surface à un bateau. Pour l'installation l'hydrolienne est souvent immergée avec un système de vérins par exemple : c'est facile et rapide. Puis la maintenance est faite aisément car il suffit de remonter la turbine pour dépanner.

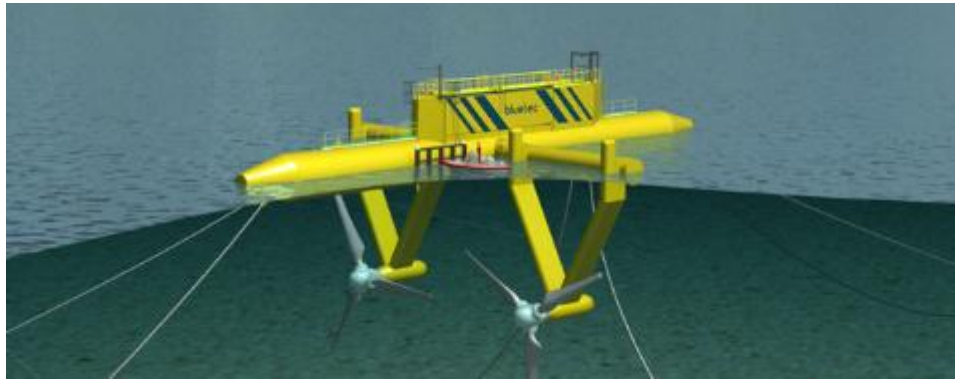


Figure I.3 Turbines à axe horizontal flottante

I.4.1.4 Les hydroliennes à axe vertical

La technologie de fonctionnement est de type Darrieus ou de type Savonius. L'entreprise Française Hydroquest conçoit des hydroliennes fluviales utilisant le type de fonctionnement Darrieus. La société française EcoCinetic fait un modèle hybride Savonius-Darrieus. L'ingénieur Français Darrieus a conçu un modèle d'éolienne à axe vertical que l'on a appelé le type Darrieus: c'est de ce type de fonctionnement que sont conçues les hydroliennes de type Darrieus.

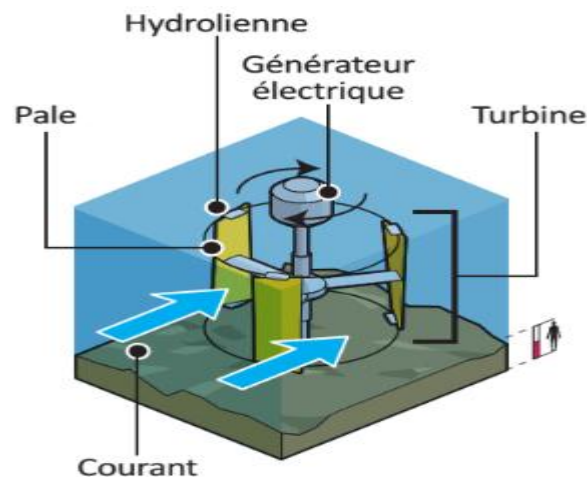


Figure I.4 Hydrolienne à axe vertical

I.4.1.5 Hydroliennes à ailes oscillantes ou ondulantes

L'aile est fixée à un bras et lorsqu'elle est soumise à des courants marins suffisants va monter et descendre. Un fluide circule alors et un système hydraulique permet de convertir cette énergie en énergie électrique.

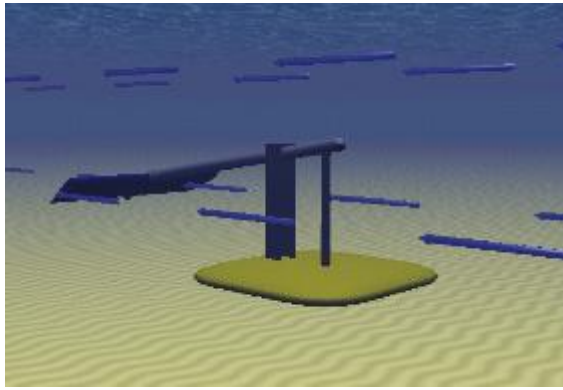


Figure I.5 Hydrolienne à ailes oscillante

I.4.1.6 Hydroliennes à vis d'Archimède

C'est la vis d'Archimède qui sert aussi en hydraulique sur des petites rivières pour produire du courant électrique.

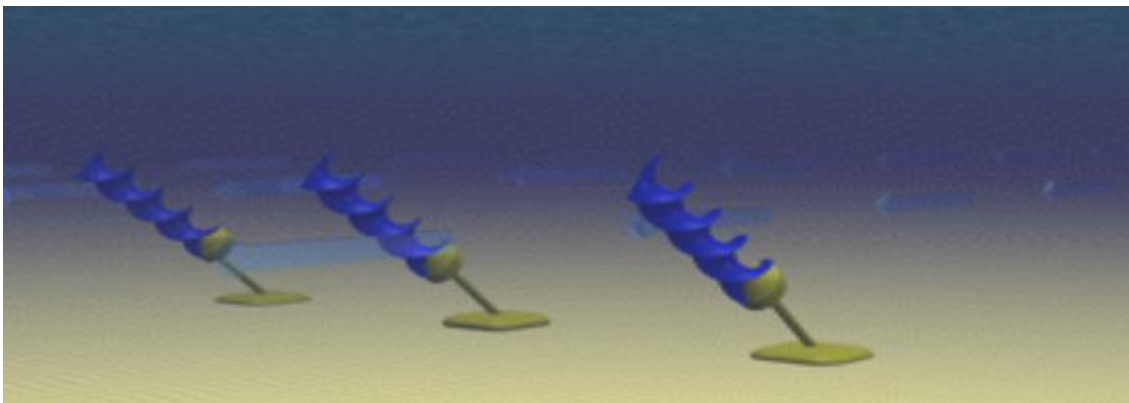


Figure I.6 Hydrolienne à vis d'Archimède

I.4.1.7 Hydroliennes cerf-volant

C'est le principe du fonctionnement du cerf-volant mais dans l'eau avec les courants marins. Minesto a une hydrolienne marine utilisant ce type de fonctionnement. Un câble maintient l'hydrolienne comme pour un cerf-volant classique. Les courants marins font tourner la petite turbine qui produit donc du courant électrique. L'intérêt principal est que la machine capterait des courants plus faibles pour démarrer.

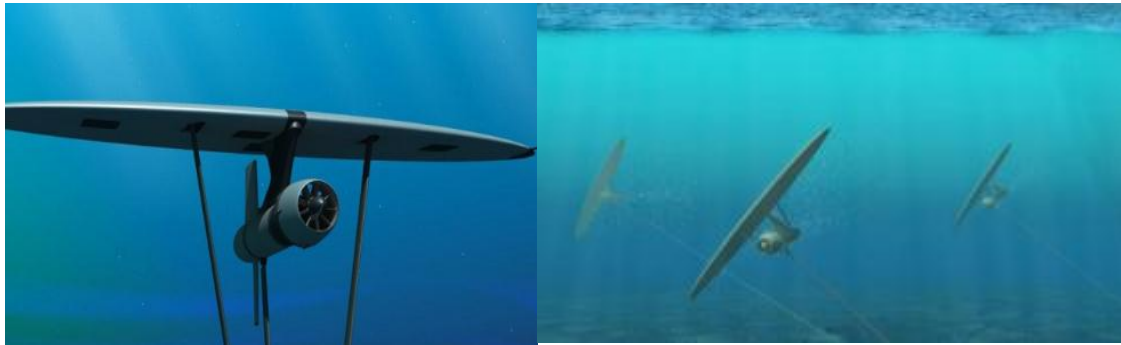


Figure I.7 Hydrolenne cerf-volant

I.4.2 Les Hydrolennes de rivières et fluviales

Le potentiel Mondial est d'environ 50 GW. Cette ressource est en fait répartie dans beaucoup de pays. Il y a notamment un potentiel d'énergie hydrolenne fluviale significatif dans plusieurs pays en voie de développement. Souvent il y a des zones qui ne possèdent pas de courant électrique dans ces pays. L'hydrolenne fluvial de petite puissance qui a un coût faible convient à ces pays. Les micro-hydrolennes s'utilisent souvent pour charger des batteries. Associée à un convertisseur, elles fournissent du courant électrique aux matériels reliés aux réseaux locaux. L'Allemagne a un potentiel d'hydrolenne fluvial important avec 8 GW. [6]

I.4.2.1 Hydrolennes fluviales : fonctionnement à axe horizontal

Elles utilisent l'énergie cinétique de l'eau. Environ cent fois moins puissantes que les hydrolennes marines.

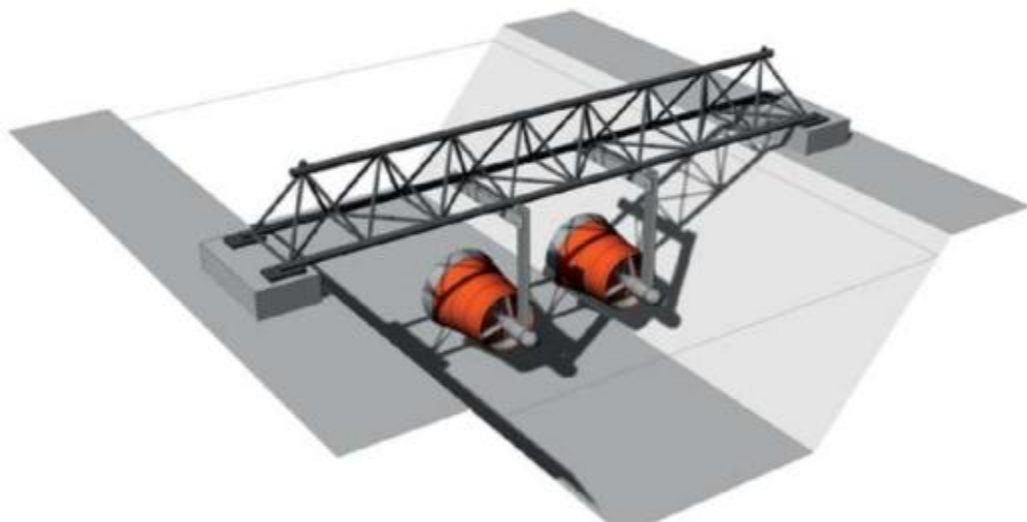


Figure I.8 Hydrolenne fluviales P66 installée dans un canal

I.4.2.2 Hydroliennes fluviales : fonctionnement à axe vertical

L'hydrolienne fluviale utilise la technologie à axe vertical de type Darrieus et à flux transverse. De ce fait, il n'y a pas besoin d'orienter l'hydrolienne ni de régler les pales en fonction de la vitesse des courants.



Figure I.9 hydrolienne à axe vertical

I.4.2.3 Hydroliennes domestiques

C'est une petite hydrolienne fluviale domestique installable par un particulier. En effet, elle est conçue pour alimenter une maison. [7]



Figure I.10 Hydrolienne domestique IdEnergie Canada

Cette hydrolienne domestique fonctionne simplement et est installable par un particulier dans un ruisseau de 60 cm de profondeur au moins. L'installation mobilise deux ou trois personnes pour plus de précautions si le ruisseau est plus important. Il n'y a pas besoin d'expérience. On en met deux qui installent l'hydrolienne et une qui assure en étant sur la berge du ruisseau.

I.4.2.4 Micro-hydroliennes

Les avantages principaux de cette machine sont la régularité de la production d'énergie, la non pollution, la discrétion visuelle et sonore. En effet, cette micro turbine produit en continu, sauf s'il y a une sécheresse qui réduit trop le débit d'eau. C'est pour cette raison qu'il faut approximativement au minimum une vitesse de 1.5 m/s pour qu'elle génère du courant. Immergée, donc silencieuse elle ne gêne donc pas les riverains ou promeneurs. C'est un argument important quand on sait que certains habitants situés à proximité des éoliennes contestent parfois leurs implantations. [6]

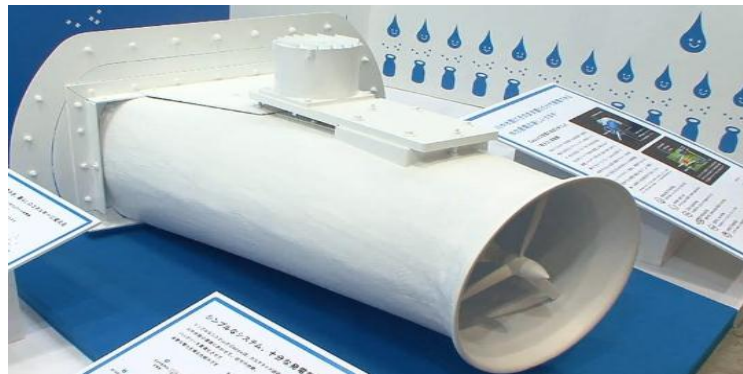


Figure I.11 Micro hydrolienne Cappa 250W

I.4.2.5 Mini-hydroliennes portables

Elle permet de charger une petite batterie située à l'intérieure du boîtier, derrière l'alternateur et ainsi d'alimenter un appareil électrique. Par exemple un mobile par l'intermédiaire d'une prise USB ou un accessoire de camping. Cette mini-turbine produit donc de l'énergie électrique renouvelable avec la vitesse du courant de la rivière qui doit être suffisamment fort. [6]

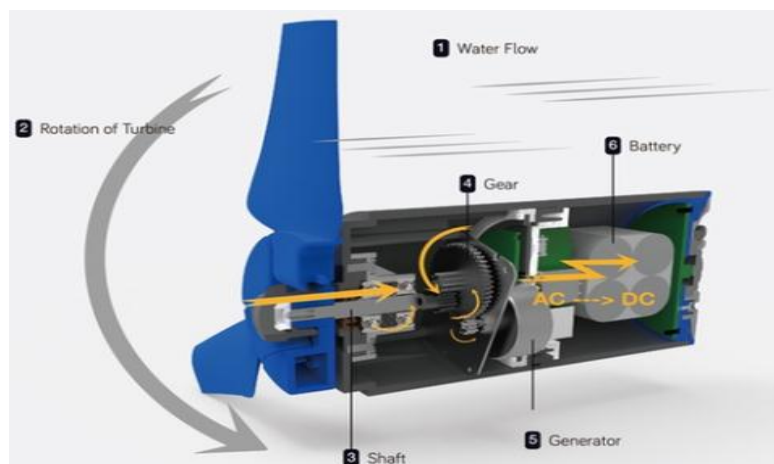


Figure I.12 Schéma de fonctionnement de la mini-hydrolienne

I.5 Les avantages et les inconvénients de l'utilisation d'une hydrolienne

I.5.1 Avantages

- Production fiable et constant.

La rivière coule 24h sur 24. Contrairement au solaire et à l'éolien, elle est la seule source d'énergie prévisible.

- Un potentiel de production élevé.

L'énergie est emmagasinée toute la journée sans interruption dans des batteries. Malgré sa petite taille, elle remplace facilement des systèmes solaires et éoliens demandant plus d'espace.

- Une source d'énergie renouvelable et respectueuse de l'environnement.

L'hydrolienne a été créée dans un souci de minimisation des impacts sur la faune. La vitesse de rotation, le danger pour les poissons et les interactions avec les matériaux ont été vérifiés pour assurer le minimum d'impact de sa présence en plus ne pas altérer son milieu.

- Economies comparativement à une génératrice à essence.

Avec le prix de l'essence qui ne cesse d'augmenter, le retour sur l'investissement d'une hydrolienne est en moyenne moins de deux à trois ans pour la même quantité d'énergie consommée.

- Une source d'énergie insonore, indépendante et propre.

En plus des émanations de CO_2 , les génératrices à essence produisent un vacarme épouvantable. De plus, elles nécessitent le transport de carburant qui a aussi un cout. [8]

I.5.2 Inconvénient

- Il faut qu'il y ait une circulation faible de bateaux sur la zone du fleuve où les hydroliennes fluviales sont installées. [3]
- Prise d'eau pouvant entraîner une perturbation du régime de l'eau et de la relation nappes Aquifères – rivières. [3]
- Installation pouvant constituer un obstacle à la migration des poissons. [3]
- Les problèmes de corrosion des matériaux par l'eau de mer. Cependant, nous disposant aujourd'hui de revêtements antirouille très performant. [3]
- L'hydrolienne doit résister à des conditions environnementales très dures (puissance des courants, sable en suspension...). [9]

- l'entretien doit être très fréquent mais il est plus difficile qu'à l'air libre puisqu'on ne peut pas l'ouvrir sans que l'eau ne pénètre à l'intérieur et n'endommage tout les systèmes. [9]

I.6 Maintenance des hydroliennes

Les principales opérations de maintenance à réaliser sont de plusieurs types. Tout d'abord, il est nécessaire de changer les composants. Pour cela, il faut donc que la construction soit durable. Il faut aussi réaliser des opérations de nettoyage et, de ce fait, il est nécessaire de choisir le design optimal et de trouver les lieux appropriés. Il faut parfois aussi changer les matériaux de consommation.

En plus pour les hydroliennes marines la maintenance et la réparation des hydroliennes nécessitent l'utilisation de bateaux et sont, de ce fait, difficiles et dangereuses. Cependant, quelques changements au niveau du design pourraient être pris pour réduire la difficulté et la fréquence des procédés de maintenance. Une installation levant l'unité de la turbine au-dessus de l'eau permet, par exemple, de faire la maintenance sur une plateforme ou un bateau. Tous les composants importants de la turbine peuvent ainsi être apportés à l'intérieur du bateau.

La maintenance se fait autrement à l'aide de robots spéciaux ou avec des plongeurs qui changent les câbles et assurent la maintenance des fondations. [9]

I.7 Modélisation de la ressource

I.7.1 Puissance maximale extraite

I.7.1.1 Loi de Betz

L'énergie récupérable est inférieure à l'énergie cinétique du flux d'eau en amont de l'hydrolienne, puisque l'eau doit conserver une certaine vitesse résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. Un modèle élémentaire de fonctionnement des hélices, dû à Rankine et Froude, permet d'évaluer le ratio de la puissance cinétique récupérable pour une section perpendiculaire au fluide en mouvement. C'est la limite de Betz, égale à $16/27 = 59\%$. Cette limite peut être dépassée si le courant de fluide est forcé dans une veine de section variable (effet venturi) plutôt que de circuler librement autour de l'hélice. [10]

I.7.1.2 Préliminaire

La puissance d'une turbine de type éolien ou hydrolienne peut être déterminée à partir du calcul de l'énergie cinétique et du calcul de l'énergie potentielle. Les grandes éoliennes sont stoppées quand le vent est trop fort, non parce qu'elles produisent trop,

mais parce que leurs pales subissent des contraintes trop importantes. Ces dernières sont dues à des forces surfaciques. Il est possible de transformer ces contraintes en récupération d'énergie supplémentaire. Albert Betz a défini un coefficient de puissance à partir uniquement du calcul de l'énergie cinétique. Son calcul est exact ; mais ce n'est pas une loi physique, comme beaucoup de monde l'affirme. [10]

Pour un régime stationnaire

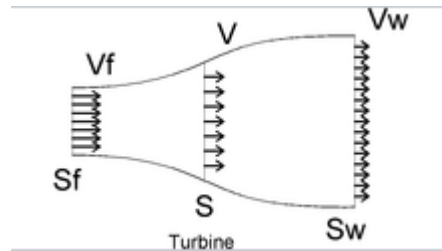


Figure 1.13 Veine de courant [11]

La vitesse du fluide est constante durant le temps : $\frac{dv}{dt} = 0$ (I.1)

Conservation du débit, équation de continuité.

$$S_f v_f = S v = S_w v_w \quad (I.2)$$

v_f : vitesse du fluide en amont (m/s).

v : vitesse du fluide au niveau de la turbine (m/s).

v_w : vitesse du fluide dans le sillage au loin (m/s).

S : la section du flux intercepté.

La vitesse moyenne

$$v_m = \frac{1}{2}(v_f + v_w) \quad (I.3)$$

La masse d'eau en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales est :

$$m = \rho S \frac{1}{2}(v_f + v_w) \quad (I.4)$$

La puissance extraite du courant par le rotor correspond à :

$$P = 0.5m(v_f^2 + v_w^2) \quad (I.5)$$

P : la puissance en W.

Par substitution :

$$P = 0.25\rho S(v_f + v_w)(v_f^2 - v_w^2) \quad (I.6)$$

La puissance incidente du courant est cinétique et dépend de la surface que le capteur hydrolienne propose au l'eau, de la vitesse du courant et de la masse volumique de l'eau. On peut regrouper ces résultats selon ces formules :

$$P_i = P_c = 0.5\rho S\vartheta^3 \quad (\text{I.7})$$

La force exercée par le vent sur le capteur est :

$$F = 0.5\rho S(\vartheta_f^2 - \vartheta_w^2) = 0.5\rho S(\vartheta_f + \vartheta_w)(\vartheta_f - \vartheta_w) \quad (\text{I.8})$$

La puissance développée par cette force sur les pales est :

$$P = F \cdot \vartheta = 0.5\rho S\vartheta(\vartheta_f^2 - \vartheta_w^2) \quad (\text{I.9})$$

Si on exprime cette puissance en fonction de $x = \frac{\vartheta_w}{\vartheta_f}$, du rendement r , et de P_0 la puissance incidente du courant non perturbé :

$$P_0 = 0.5\rho S\vartheta_f^3 \quad (\text{I.10})$$

On obtient :

$$\vartheta = \vartheta_f \frac{1+x}{2} \quad (\text{I.11})$$

$$\text{Et } r = \frac{P}{P_0} = 0.5(1 - x^2)(1 + x) \quad (\text{I.12})$$

On peut alors tracer le rendement r de l'hydrolienne en fonction de x :

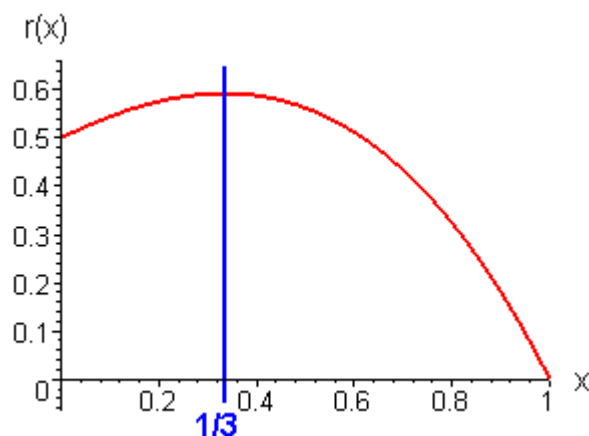


Figure 1.14 Le rendement en fonction de x

Le maximum est atteint pour $x=1/3$, et alors $r=16/27$. D'où la limite de Betz :

$$P_{extraite}^{max} = \frac{16}{27} P_i \quad (\text{I.13})$$

I.7.2 Coefficient de puissance (C_p) pour l'hydrolienne marin (et aussi pour l'éolienne)

La puissance du courant d'eau n'est pas totalement captée par les pales, d'où la puissance hydraulique extraite est inférieure à la puissance incidente, les deux puissances sont liées par l'expression suivante : [11]

$$P_{hydr} = C_p(\beta, \lambda)P_i \quad (I.14)$$

C_p : Coefficient de puissance de l'hydrolienne (valeur maximale théorique 0,593). Il dépend de la vitesse du courant d'eau, du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage β et de leur vitesse de rotation.

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du courant d'eau :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v_f} \quad (I.15)$$

Avec :

Ω_t : Vitesse angulaire de rotation des pales [rd/s].

R : Rayon de la pale [m].

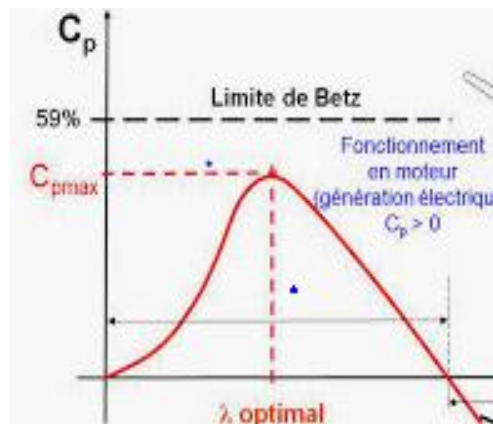


Figure I.15 Coefficient de puissance en fonction de λ

I.7.2.1 Le coefficient du couple

Le couple hydraulique est déterminé par la relation suivante :

$$C_{hyd} = \frac{P_{hyd}}{\Omega_t} = 0.5C_p\rho S \frac{v_f^3}{\Omega_t} \quad (I.16)$$

Le coefficient du couple C_m est donnée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = 2 \frac{C_{hyd}}{\rho S R v_f^2} \quad (I.17)$$

Le coefficient de puissance en fonction du coefficient de couple est donné par :

$$C_p(\lambda) = \lambda C_m(\lambda) \quad (\text{I.18})$$

I.7.3 le coefficient de puissance (C_p) pour les hydroliennes de rivière

La puissance du courant d'eau n'est pas totalement captée par les pales, d'où la puissance hydraulique extraite est inférieure à la puissance incidente, les deux puissances sont liées par l'expression suivante :

$$P_{hydr} = C_p P_i \quad (\text{I.19})$$

C_p : Coefficient de puissance de l'hydrolienne (valeur maximale théorique 0,593). Il ne dépend pas de λ et β . Il est constant et il dépend juste de la turbine. Et une valeur qui doit être donnée par le constructeur. [1]

I.8 Modes de fonctionnements

Il existe essentiellement deux modes de fonctionnements des hydroliennes suivant source d'énergie, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse est variable. [12]

I.8.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Le système hydrolienne se caractérise par une vitesse de rotation pratiquement il emploie des génératrices à induction connectées directement au réseau. La vitesse est réglée par le rapport du multiplicateur de vitesse et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. Ce système présente des avantages et des inconvénients.

I.8.1.1 Avantages

- Pas besoin d'intégration de convertisseurs statiques dans le système.
- Ce système utilise des machines standards.
- Faible coût de revient du système.

I.8.1.2 Inconvénients

- Puissance extraite non optimisée et le maximum théorique de puissance atteint ce qui réduit nettement le rendement du système.

I.8.2 Fonctionnement à vitesse variable

Dans ce mode de fonctionnement l'hydrolienne tourne à vitesse variable. Indispensable d'optimiser et de réguler la puissance captée en fonction de courant marin, ceci par la régulation de la vitesse de rotation de l'hydrolienne nécessite d'utiliser des génératrices à

fréquence fixe et vitesse variable fonctionnant sur une large gamme de vitesse marin pour récupérer la puissance.

I.8.2.1 Avantages

- Meilleur rendement énergétique.
- Meilleure qualité d'énergie électrique.
- Moins d'effets mécaniques subis par le train de puissance.

I.8.2.2 Inconvénients

- Complexité de la commande et de la construction du système.
- Elles sont plus chères que celles à vitesse fixe.

I.9 Point de fonctionnement à puissance maximum MPPT

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

On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum MPPT (Maximum Power Point Tracking) Ces systèmes utilisent différents moyens afin d'obtenir ce point de puissance maximum. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice. [9]

On distingue deux structures de commande :

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

I.10 Machine synchrone à aimant permanent

La Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) est très utilisée dans les applications hydroliennes, notamment, à cause de son bon rendement de conversion (proche de 99%) par rapport à la machine asynchrone. Elle permet aussi un fonctionnement à vitesse variable à condition qu'une interface d'électronique de puissance soit placée entre son stator et le réseau. Si cette machine a un grand nombre de paires de pôles, elle peut être directement entraînée par la turbine, éliminant ainsi le multiplicateur qui est une source de pertes de puissance. L'excitation de cette machine étant assurée par des aimants permanents et comme elle est entraînée par une turbine, on ne dispose d'aucune entrée pour réguler sa tension et sa fréquence nécessaire pour son couplage au réseau électrique. [13]

C'est pourquoi la connexion au réseau électrique des systèmes de production d'énergie cinétique utilisant cette machine exige une interface d'électronique de puissance. La figure illustre la chaîne de conversion du système hydrolienne MSAP connecté au réseau électrique.

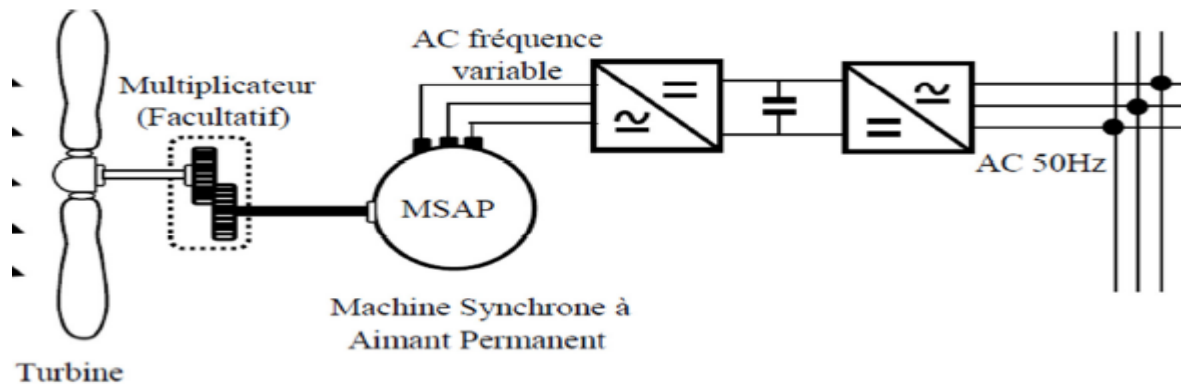


Figure I.16 Structure de la chaîne de conversion utilisant une MSAP couplée au réseau

I.10.1 Motifs de choix de (GSAP)

La MSAP présente beaucoup d'avantages qui peuvent nous pousser à l'utiliser dans le domaine de la conversion de l'énergie : [12]

- Bon couple massique et faible inertie.
- Construction et maintenance plus simple.
- Facteur de puissance et rendement élevé par rapport à ceux des machines asynchrones.
- Meilleures performances dynamiques.
- Pas de pertes résistives au rotor et donc pas d'équipements de refroidissements.

Comme elle souffre aussi de quelques inconvénients, qui ne doivent pas être négligés, tels que :

- Dégradation des performances avec l'augmentation de la température.
- Coût élevé à cause du prix des aimants permanents.
- Possibilité de démagnétisation des aimants.

I.11 Conclusion

Dans cette partie, on a présente quelque généralités sur l'énergie hydrolienne. Nous avons, tout d'abord, introduit quelque notion générales sur la conversion électromécanique de cette énergie pour passer en suit à la présentation des différentes types d'hydroliennes. On a parlé sur les avantages et les inconvénients de l'hydrolienne, puits une bref explication sur la maintenance des hydrolienne, et aussi explique pourquoi l'énergie récupérable est inférieure à l'énergie cinétique du flux d'eau en amont de l'hydrolienne. Ensuit on a cité les avantages et les inconvénients des deux modes de fonctionnement. A la fin on a précisé la machines utilisé dans cette conversion et pour quelle raisons.

CHAPITRE II

Modélisation de la partie mécanique

II.1 Introduction

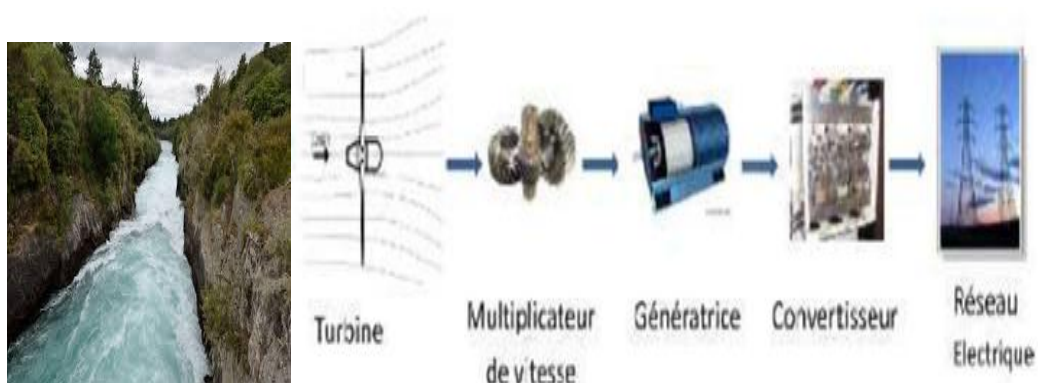
Une turbine hydrolienne permet la conversion d'énergie cinétique des courants d'eau en énergie mécanique transmise à la génératrice, pour cela les différents éléments constituant une hydrolienne sont conçus pour maximiser cette conversion. L'objectif est d'avoir un bon compromis entre la caractéristique couple/vitesse de la turbine et celle de la génératrice. Pour satisfaire cette condition, l'hydrolienne doit comporter deux systèmes qui permettent de la contrôler mécaniquement et électriquement.

Afin d'être capable d'une part de choisir une technologie adaptée à un site particulier et de tester des lois de régulation d'un système hydrolienne d'autre part, il apparaît nécessaire de disposer d'un outil de simulation capable de modéliser l'ensemble de la chaîne de conversion d'énergie et de prévoir ces performances.

Après avoir présenté les différents types d'hydrolienne, et le principe de conversion d'énergie hydrolienne, nous nous attachons dans ce chapitre à modéliser les éléments de la partie mécanique de la chaîne de conversion constituée d'une turbine hydraulique, un multiplicateur et de l'arbre de transmission.

II.2 présentation du système étudié

Le schéma global de la modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie hydrolienne connectée au réseau électrique, est constitué d'une turbine de rayon R raccordée à un arbre de transmission tournant à une vitesse Ω_t . Cet arbre entraîne une génératrice synchrone à aimant permanent, à travers un multiplicateur de vitesse de gain G . [9]



Le courant d'eau

Figure II.1 schéma globale d'une chaîne de conversion hydrolienne

II.3 Modélisation de la source (la rivière)

En hydrographie, une rivière est un cours d'eau au débit moyen à modéré (supérieur à $2\frac{m^3}{s}$), recevant des affluents et qui se jette dans une autre rivière ou dans un fleuve.

Une rivière est un cours d'eau d'une certaine importance, inférieure subjectivement à celle d'un fleuve, sans autre égard à son débouché. Pourtant cette affirmation reste bien erronée au regard de la réalité du terrain. En effet, il n'est pas rare de rencontrer des fleuves qui sont plus petits que certaines rivières (à titre d'exemple : la Saône à Lyon, qui présente un lit et un débit importants, reste une rivière. A l'inverse, l'Huveaune, fleuve côtier marseillais, présente un lit et un débit beaucoup plus restreints). [14]

Pour modéliser la rivière, il faut essentiellement connaître la vitesse du courant d'eau, car la puissance hydrolienne dans les conditions évolue au cube de la vitesse du courant d'eau. En observant feuilles, branches et insectes qui dérivent en surface, on réalise très vite que la vitesse du courant est loin d'être homogène. Voici quelque explication. [15]

- La vitesse du courant est plus élevée au centre du lit et plus faible sur la rive, où l'eau est freinée par la berge et la végétation.
- Elle est maximale entre deux eaux et plus grande en surface que près du fond.
- Un obstacle dans le courant crée un ralentissement à l'amont et un contre-courant immédiatement à l'aval.

Une méthode facile pour mesurer le courant :

- Choisissez un secteur rectiligne où l'écoulement paraît homogène en surface.
- Repérez une berge dégagée facile d'accès.
- Mesurez 20 m et marquez chaque extrémité d'un repère.
- Lancez un bâton sec bien visible dans le milieu du lit, au droit du point amont, et déclenchez votre chronomètre dès qu'il touche l'eau.
- Courez vers le point aval et notez le temps au passage du bâton devant vous.
- Divisez 20 par le nombre de secondes pour obtenir la vitesse en mètres par seconde.

La vitesse du courant peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$v_t = f(t)$$

v_t : La vitesse du courant en (m /s).

II.4 Modélisation de la turbine

L'hydrolienne capte l'énergie cinétique de l'eau et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie de l'eau et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'eau, la surface balayée par le rotor et la vitesse des courants d'eaux. La masse volumique de l'eau et sa vitesse sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site.

Pour notre modélisation on a choisi une turbine de type ACHARD.

La turbine ACHARD résulte d'une évolution des turbines Darrieus et Gorlov. Elle correspond à un nouveau type de turbine à flux transverse et fait l'objet d'un brevet déposé en février 2004. [1]

II.3.1 Les caractéristiques de la turbine ACHARD

La turbine Achard a pour première caractéristique d'avoir des pales en forme d'aile volante fixées à l'axe de rotation par des bras centraux profilés. En gardant à l'esprit cette configuration de base, de nombreuses variantes peuvent être imaginées. [1]

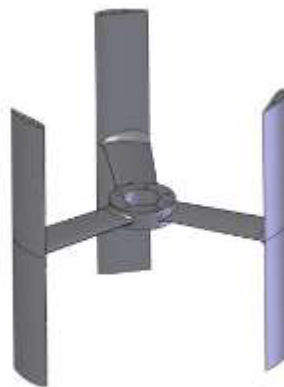


Figure II.2 La turbine ACHARD

Pour une vitesse d'écoulement amont fixée à 2,3 (m/s). Le point de fonctionnement optimal de cette géométrie se trouve au paramètre d'avance ($\lambda = 2$). Dans cette configuration, la turbine Achard à pales droites dispose du meilleur rendement (33%), suivie des turbines Darrieus (31%) et Gorlov (26%).

Donc en prend $C_p = 0.33$.

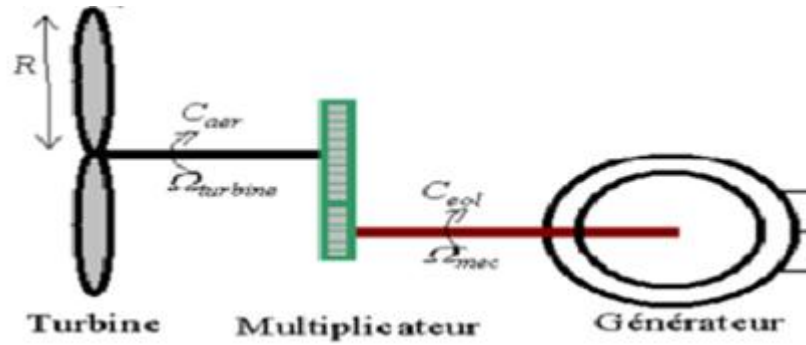


Figure II.3 schéma de la turbine hydrolienne

La puissance extrait par la turbine hydrolienne P_t et calculée par l'équation suivante :

$$P_t = 0.5\rho C_p S_t \vartheta^3 \quad (2.1)$$

C_p : est le coefficient de puissance dont la limite théorique est de 0.59.

ρ : est la masse volumique de l'eau.

ϑ : est la vitesse du courant d'eau.

S_t : est la surface balayée par les pales.

Avec

P_t : la puissance de la turbine hydrolienne, elle est donnée par la relation suivant.

$$P_t = C_{aer} \cdot \Omega_t \quad (2.2)$$

La vitesse spécifique

Le couple aérodynamique de l'hydrolienne est déterminé par la relation suivant :

$$C_{aer} = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2 \cdot \Omega_t} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S_t \cdot \vartheta^3 \quad (2.3)$$

Ω_t : Vitesse de rotation la turbine.

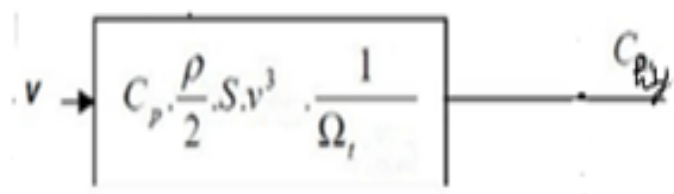


Figure II.4 Schéma bloc du modèle des pales

II.5 Modélisation du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle de la génératrice. Ce multiplicateur est considéré parfait, donc il se réduit à un simple gain G . [11]

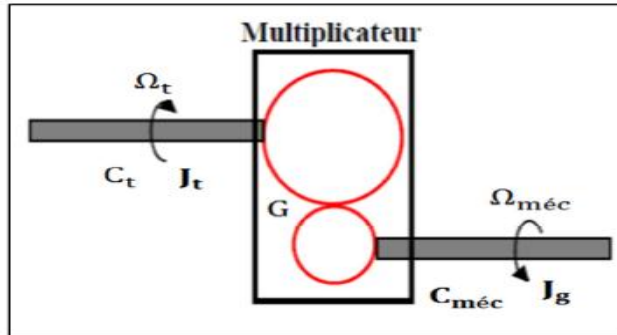


Figure II.5 Modèle mécanique simplifié du multiplicateur

Par le principe de conservation de la puissance mécanique échangée entre la turbine et la génératrice à travers le multiplicateur de vitesse on a :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.4)$$

$$\Omega_{mec} = \Omega_t \cdot G \quad (2.5)$$

C_g : Couple de la génératrice.

C_{aer} : Couple de l'hydro générateur.

G : Le rapport du multiplicateur.

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

II.6 Modélisation de l'arbre mécanique

L'évolution de la vitesse mécanique Ω_t dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice C_{mec} qui est la résultante d'un couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} , d'un couple de frottement visqueux C_{vis} et d'un couple du multiplicateur de vitesse C_g . [12]

$$C_{em} = J \frac{d}{dt} \Omega_t \quad (2.6)$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.7)$$

Le couple issu du frottement et modélisé par le coefficient de frottement visqueux f .

$$C_{vis} = f \Omega_t \quad (2.8)$$

En remplaçant (2.7) et (2.8) dans (2.6), nous aurons :

$$C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega_t}{dt} + f \Omega_t \quad (2.9)$$

II.7 Schéma bloc du modèle de la turbine hydrolienne

Le schéma bloc du modèle de la turbine hydrolienne est représenté sur la Figure. Les entrées sont la vitesse des courants d'eau, la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse de la turbine et le couple respectivement en vitesse mécanique et en couple de la génératrice. Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur et le couple électromagnétique de la génératrice.

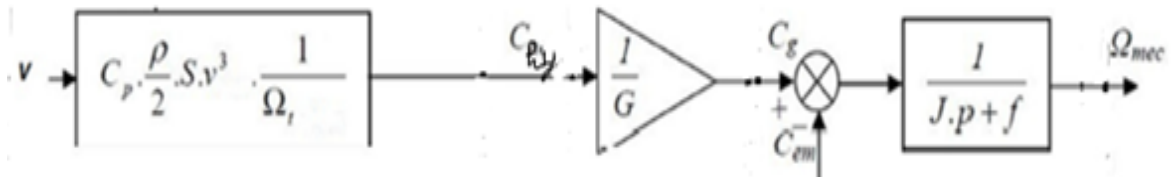


Figure II.6 Schéma bloc du modèle de la turbine

Le schéma bloc, nous montre que la vitesse de rotation de la turbine est contrôlée, par action sur le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du courant d'eau est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

II.8 Maximisation de la puissance extraite

La courbe de puissance typique des hydroliennes, nécessite une adaptation de la charge mécanique afin d'assurer un prélèvement maximal de l'énergie des courants d'eaux. En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux structures de commande.

- Le contrôle par asservissement de vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de vitesse mécanique.

Nous nous intéressons seulement au contrôle sans asservissement de la vitesse. Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse de l'eau varie très peu en régime permanent. [12]

II.8.1 Le contrôle sans asservissement de vitesse mécanique

Pour cette structure de commande on pose l'hypothèse que la vitesse de l'eau varie très peu en régime permanent, alors on obtient la relation.

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{mec} \quad (2.10)$$

Si on néglige l'effet du couple de frottement visqueux, on obtient :

$$C_{mec} = C_G \quad (2.11)$$

On estime le couple hydrodynamique à partir d'une estimation de la vitesse de courant marin et de la mesure de la vitesse mécanique.

$$C_{hyd} = 0.5C_{p-max}S_t\vartheta_{est}^3\rho\frac{1}{\Omega_t} \quad (2.12)$$

Avec le couple hydrodynamique estimé on détermine le réglage du couple électromagnétique.

$$C_{mec-rég} = \frac{C_{hyd}}{G} \quad (2.13)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine Ω_t est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique.

$$\Omega_{t-réf} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.14)$$

L'estimation de la vitesse du courant d'eau apparaissant au niveau de la turbine peut être obtenue à partir de l'équation suivante :

$$\vartheta_{cest} = \frac{R\Omega_{tref}}{\lambda_{opt}} \quad (2.15)$$

$$\text{En suppose } S_t = \pi R^2 \quad (2.16)$$

Ou $C_{p-max} = 0.33$ pour $\lambda = 2$.

En regroupant ces quatre équations on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em-reg} = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \frac{\rho\pi R^2}{2G^3} \Omega_{mec}^2 \quad (2.17)$$

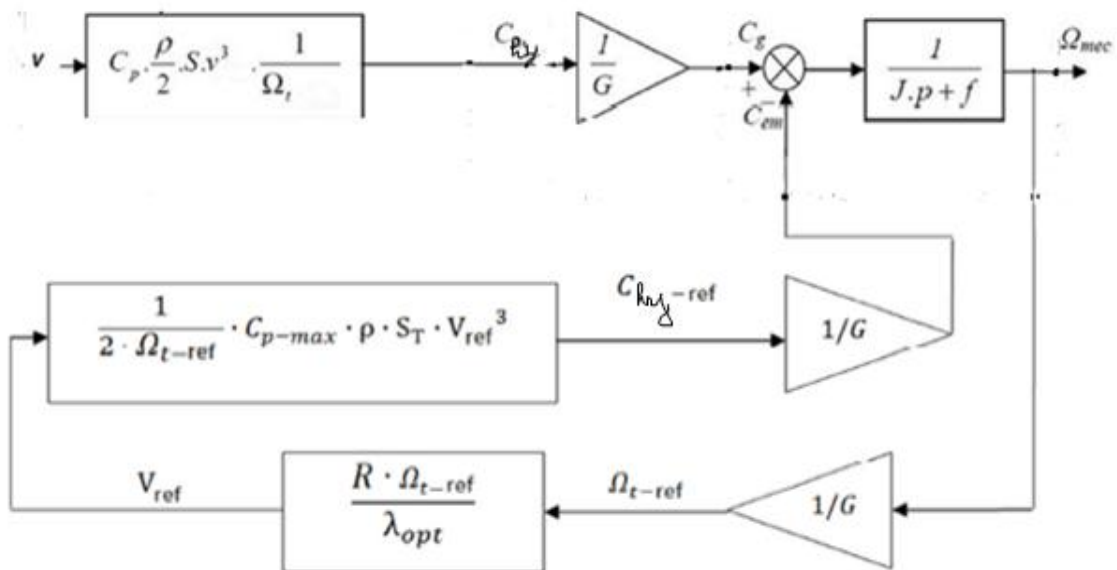


Figure II.7 représente le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la partie mécanique d'une hydrolienne, modèle de multiplicateur de vitesse et de l'arbre de transmission. Et on a expliqué le contrôle sans asservissement de vitesse mécanique a fin de maximise la puissance extraite.

Cette modélisation nous a permet d'établir des schémas bloc qui seront utiliser pour la simulation dans le dernière chapitre.

CHAPITRE III

Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

III.1 Introduction

L'étude du comportement d'une machine électrique est une tâche difficile et nécessite avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire, par voie de simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnement envisagés. [16]

Parmi les machines à courant alternatif utilisés la machine synchrone à aimant permanent reste un bon candidat pour l'utilisation industrielle Son choix devient attractif et concurrent à celui des moteurs asynchrones grâce a l'évolution des aimants permanents. Cela leur a permis d'être utilisés comme inducteur dans les machines synchrones offrant ainsi, non seulement d'augmenter la densité d'énergie de ces machines, mais aussi de réduire leurs dimensions et leurs pertes par rapport aux autres type de machine, alors beaucoup davantage, entre autres, une faible inertie et un couple massique élevé. [16]

Le moteur synchrone à aimants permanents est de plus en plus utilisé dans le domaine des vitesses variables. Son choix dans les entraînements à vitesse variable devient attractif et concurrent de celui des moteurs asynchrone et à courant continu grâce à l'évolution de la technologie des aimants permanents. [17]

Dans ce chapitre, nous allons présenter dans la première partie des généralités sur les machines synchrones à aimants permanents , et dans la deuxième partie la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents et des convertisseurs statiques, on définit les équations électriques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la MSAP toute en spécifiant le modèle à utiliser pour modéliser notre système d'équations cependant on va exploiter le modèle de Park afin d'opérer la synthèse de la simulation de cette MSAP dans le quatrième chapitre.

III.2 Machines synchrones à aimants permanents :

Pour des raisons de compacité et de rendement, des génératrices synchrones à aimants permanents apparaissent (*Jeumont Industrie, 750 kW*) et devraient prendre une place croissante dans les prochaines années [18]

Les aimants permanents sont des matériaux magnétiques durs qui ont la particularité d'avoir une bonne résistance à la désaimantation [19]. Conçus principalement pour transporter de manière rapide et économique des charges ferromagnétiques ; les utilisations majeurs se retrouvent surtout dans le domaine de l'énergie éolienne, la propulsion marine et les automobiles [20].

Comme toutes les machines tournantes, la MSAP est composée essentiellement d'un stator appelé induit et d'un rotor qui est l'inducteur. Le stator est composé de trois enroulements identiques décalés de 120° dans l'espace (Figure III.1).

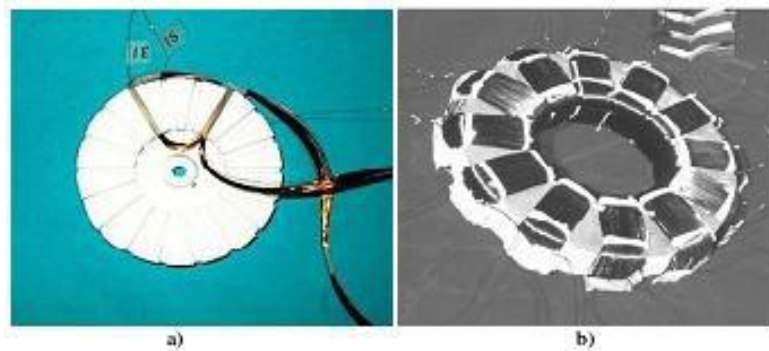


Figure III.1 : Stator d'une MSAP. a) structure encochée. b) structure lisse

Les structures du rotor sont très diverses. Du point de vu mécanique, les machines électriques tournantes (précisément les MSAP) peuvent être distinguées par leur entrefer [6] :

- ✓ Machine à entrefer radial (cycliquement classique), (Figure III.2-a).
- ✓ Machine à entrefer axial (discoïde), (Figure III.2-b).

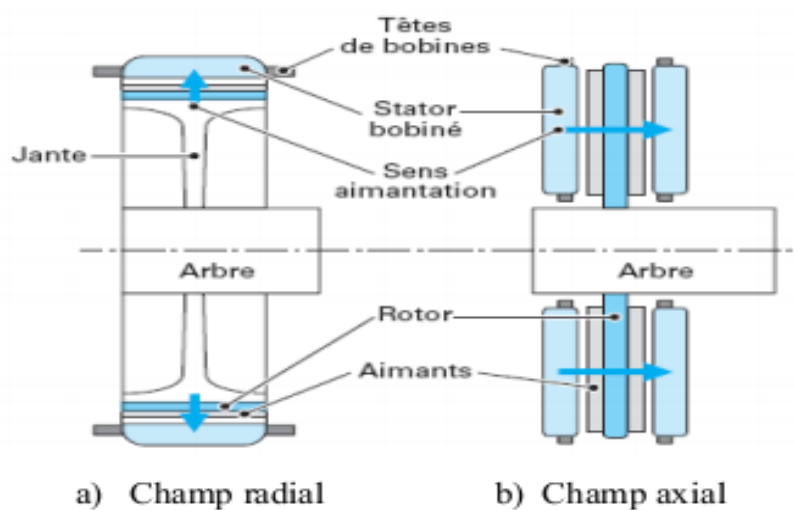


Figure III.2 : Architectures schématiques des machines synchrones à champ radial (Classique) et à champ axial (Discoïde)

III.2.1 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents

Avec l'avènement des matériaux à aimants permanents de haute énergie et les progrès réalisés dans le domaine. Elles ont été adoptées dans de nombreuses applications de hautes performances telles que la robotique, l'aérospatiale, les véhicules électriques, etc. Pour toutes ces applications, les MSAP sont parfois préférables sur les autres machines traditionnelles [21]

III.2.2 Fonctionnement de la MSAP

Le principe de fonctionnement du moteur synchrone à aimants permanents est basé sur l'alimentation des trois bobines statoriques par un système de tensions triphasées équilibrées. Le champ créé par ces enroulements oriente le rotor qui est constitué par des aimants [22].

Le champ tournant du stator peut être vu comme un aimant fictif qui tourne à la vitesse de synchronisme autour du rotor, l'interaction entre le champ tournant et le rotor, qui est équipé d'aimants permanents, permet d'avoir une vitesse de rotation rotorique égale à celle de synchronisme [23].

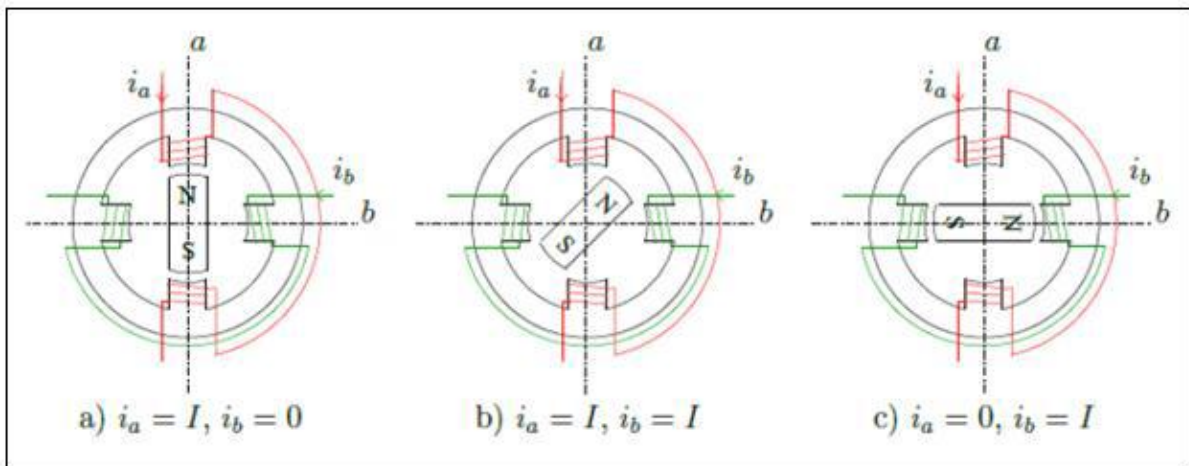


Figure (III.3) : Principe de fonctionnement du moteur à aimants permanents.

III.2.3 Domaines d'application des MSAP

Les MSAP sont employés en plusieurs domaines, ils sont utilisés dans une large gamme de puissance allant de quelques watts comme les entraînements de bandes, les servomoteurs de la robotique (de 100 watts à 10 kW) à l'entraînement de grandes puissances

de quelque mégawatt comme les systèmes de propulsion des navires, les pompes, les générateurs à vitesses variables, traction [17]

Ils sont utilisés en particulier dans :

- Les machines-outils ;
- Les applications de l'énergie de l'éolienne ;
- Les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste) ;
- Les équipements domestiques (machine à laver le linge) ;
- Les automobiles ;
- Les équipements de technologie de l'information (DVD drives) ;
- La propulsion des véhicules électriques et des sous marins ;
- Les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements [24].

III.2.4 Classifications des machines synchrones à aimants permanents

On peut classer les machines synchrones à aimants permanents selon trois critères :

- Sens de l'aimantation ;
- Structure rotor-stator (disposition du rotor par rapport au stator) ;
- Configuration rotorique (disposition des aimants dans le rotor).

III.2.4.1 Les Aimants permanents

Un aimant permanent est un matériau magnétique dur (ferromagnétique) qui a la particularité d'avoir une bonne résistance à la désaimantation, c'est –adire une aimantation rigide que ne varie pas obligatoirement en présence d'un champ magnétique extérieure. [25]

Les aimants permanents sont essentiel puisqu'ils interviennent pour beaucoup dans le couple massique de la machine électrique .Les aimants sont principalement caractérisés par leurs cycles d'hystérésis et plus particulièrement par la courbe des désaimantations du deuxième quadrant du palan B-H (figure III.4)

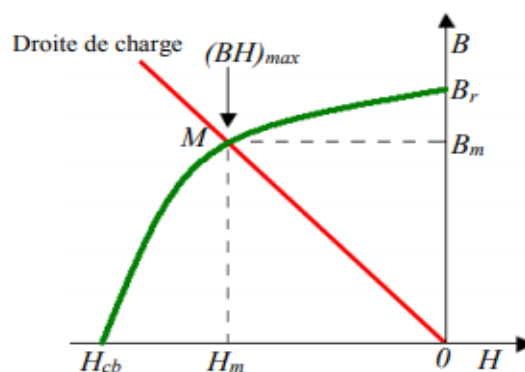


Figure III.4 : courbe de désaimantation

Cette courbe est caractérisé par :

L'induction rémanente B_r , c'est-à-dire L'induction résiduelle en circuit fermé.

le champ correctif de H_{cj} qui est le champ démagnétisant annulant l'induction, plus sa valeur est élevé et plus l'aimant est stable ;

- Le produit d'énergie volumique (B .H) max
- Les valeurs H_m et B_m de point de fonctionnement optimale M correspondant à (BH) max [26].

III.3 Structure générale d'une MSAP

La structure générale d'une machine synchrone bipolaire a aimants permanents est présentée par la figure (III.5)

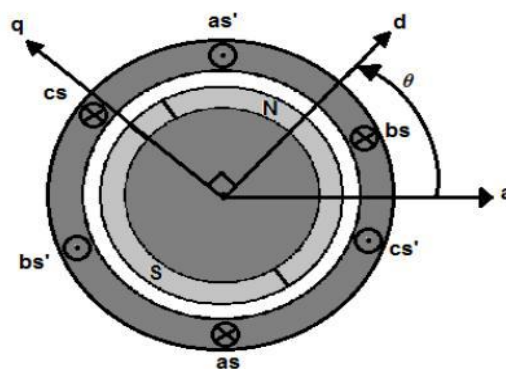


Figure III.5 schéma d'une machine synchrone a aimant permanent de surface

La machine que nous allons étudier par la mise en équations correspond à la structure représentée par la figure (III.5). C'est une machine synchrone triphasée bipolaire (nombre de paires de pôle $p=1$), dont le rotor est muni d'un système d'aimants permanents, assurant une répartition d'induction sinusoïdale dans l'entrefer. Ce rotor ne comporte pas le système d'amortisseurs, ni des pièces polaires. L'absence de ces pièces polaires donne à la machine la structure d'une machine à pôles lisse. Le stator comporte trois axes a, b, c identiques et décalés entre eux d'un angle électrique de $2\pi/3$. Par convention le rotor est lié à deux axes caractéristiques :

- L'axe d'aimantation rotorique, noté (d), il est appelé axe direct ou encore longitudinal.
- L'axe interpolaire (q), appelé axe en quadrature ou transversal. Il est déphasé de $\pi/2$ en avant, par rapport à l'axe d. La position de rotor est repérée par l'angle électrique θ que fait son axe (d) avec l'axe immobile de la phase (a) du stator [27].

III.4 Modélisation de la MSAP

La modélisation de la machine est primordiale pour concevoir des systèmes de commandes performants, ceci consiste à décrire son comportement par un modèle mathématique [28]. La MSAP dans sa configuration exacte est complexe.

Afin de présenter un modèle qui correspond à cette dernière, il est indispensable d'adapter des hypothèses simplificatrices.

III.5 Hypothèses simplificatrices [29]

Nous adaptons pour le MSAP les hypothèses suivantes :

Elle est à aimants permanents de type SmCo ; triphasée ; équilibrée ; à pôles lisse et dont les aimants permanents sont disposés sur la surface du rotor, le neutre est isolé (pas de courant homo polaire) ;

- Le circuit magnétique est non saturé, ce qui permet d'avoir des relations linéaires entre le flux et les courants ;
- Les pertes fer et l'effet d'amortissement sont négligeables ;
- Perméabilité des aimants est considérée comme voisine de celle de l'air ;
- Les inductances de la machine sont constantes et indépendante de la position du rotor ;
- Les ampères-tours sont supposés à distribution sinusoïdale le long de l'entrefer, ou les harmoniques d'espace sont négligeables ;
- L'aimantation est rigide.

III.5.1 Mise en équations de la machine dans le repère (abc) :

La Figure (III.6) donne la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents.

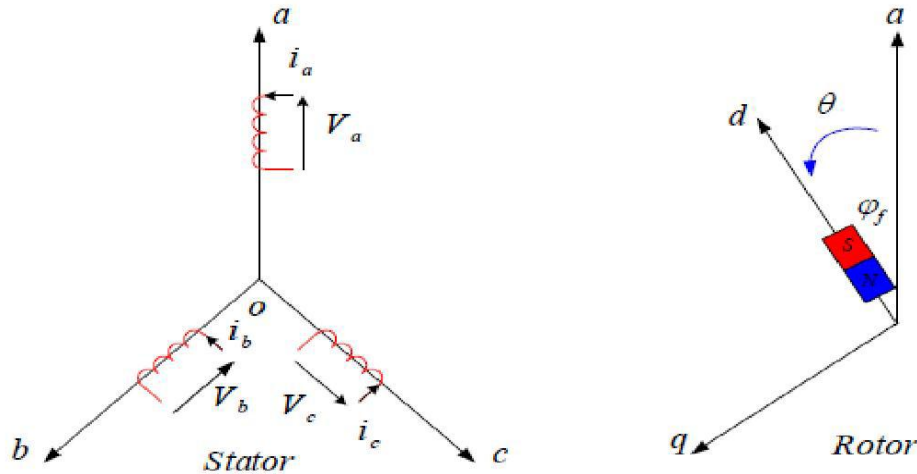


Figure III.6 : Schéma de la MSAP dans le repère abc.

Le comportement de la machine est entièrement défini par trois types d'équations à savoir :

- Équations électriques,
- Équations magnétiques,
- Équations mécaniques.

III.5.1.1 Équations électriques :

Les équations électriques du stator d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents sans amortisseurs s'écrivent :

$$[V_s] = [R_s] [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (III.1)$$

$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^T$: Vecteur des tension statorique;

$[I_s] = [I_a \ I_b \ I_c]^T$

$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

III.5.1.2 Équations magnétiques :

$$[\varphi_s] = [L_s] [I_s] \quad (\text{III.2})$$

$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T$: vecteur flux statoriques.

$[I_s] = [I_a \ I_b \ I_c]^T$: vecteur courants statoriques.

$[\varphi_{fabc}] = [\varphi_{fa} \ \varphi_{fb} \ \varphi_{fc}]^T$: vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique.

La matrice $[L_s]$ est une matrice carrée qui contient des termes constants regroupés dans $[L_{s0}]$

$$[L_s] = [L_{s0}] \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix}$$

M_{s0} : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques,

L_{s0} : Inductance propre d'une phase statorique,

III.5.1.3 Équation mécanique :

La dernière équation importante qui complète le modèle de la machine synchrone à Aimants permanents est l'équation fondamentale de la mécanique décrivant la dynamique du rotor de la machine :

$$J \frac{dw_r}{dt} = C_{em} - C_r - F_c W_r \quad (\text{III.4})$$

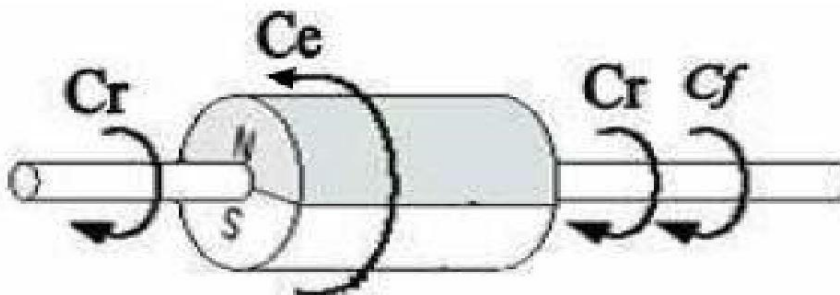


Figure III.7 : différents couples qui agissent sur le rotor

L'étude analytique du comportement des équations (III.1) et (III.2) est relativement laborieuse, vu le grand nombre de coefficients variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. L'une de ces transformations est la transformation de Park [30].

III.6 Transformation de Park

Le système d'équations obtenu dans la base naturelle abc est fortement couplé et compliqué (non linéaires), ce qui rend la commande de cette machine difficile. Une diagonalisation de la matrice inductance permet d'obtenir des relations découplées [31].

On réalise une transformation matricielle pour simplifier ces équations. Cette transformation est celle de Park, elle est couramment utilisée pour obtenir l'expression des variables dans un repère tournant $d-q$, ces variables fictives appelées les composantes $d-q$ ou de Park. Elle rend les équations dynamiques de la machine à courant alternatif plus simple par réduction d'ordre du système ainsi que leurs indépendances de l'angle électrique (θ), ce qui facilite leur étude et leur analyse [24].

Le repère (d, q) peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant. Selon l'objectif de l'application.

La Figure (III.8) présente la MSAP en modèle de Park. Le repère (oa) est fixe. Le repère (d, q) tourne avec la vitesse de synchronisme ω .

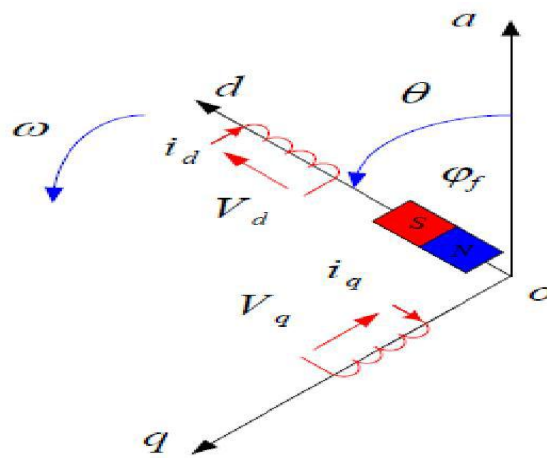


Figure (III.8) : Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d, q).

III.6.1 Principe de la transformation de Park

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la transformation de Park, qui est définie par la matrice $[P(\theta)]$. C'est une transformation mathématique destinée à transformer le circuit triphasé fixe de la machine en un circuit biphasé ou les enroulements statoriques sont fixes au référentiel rotor défini par l'axe d et q , la transformation de Park fait correspondre aux variables réelles statoriques leurs composantes direct d'axe d et transversal d'axe q elle rapporte les équations électriques à un système cartésien d'axes dq . Dans le repère classique il y a trois axes (a, b, c) orientés suivant les axes

des trois enroulements statoriques de la machine. D'habitude, l'axe a est considéré comme référence. Quant au rotor, on a toujours un seul axe pour la machine synchrone à aimants permanents et θ donne la position du rotor par rapport au stator. Les trois enroulements du stator peuvent être remplacés par deux enroulements fictifs à $\pi/2$ dans l'espace et alimentés par des courants à $\pi/2$ dans le temps. Les deux enroulements virtuels sont disposés sur les axes d et q, ou dans le cas de la MSAP l'axe d est orienté suivant le rotor, Pour passer du système triphasé, abc, au système biphasé dq, (réciproquement) il faut utiliser les relations suivantes [16] :

$$\begin{aligned} [X_{dqo}] &= [P(\theta)] \cdot [X_{abc}] \\ [X_{abc}] &= [P(\theta)]^{-1} \cdot [X_{dqo}] \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

Tel que :

$[P(\theta)]$: la matrice de park

On peut distinguer deux types de transformations de Park ; celle qui conserve les amplitudes et celle qui conserve la puissance (dite aussi Park normalisée)

III.6.1.1 Matrice de Park qui conserve les amplitudes

Matrice de Park $[P(\theta)]$ qui conserve les amplitudes est la suivante :

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Cette matrice permet de passer du référentiel (abc) fixe lié au stator au référentiel (dq) mobile avec une vitesse ω

Les sens des axes a, b, c sont obtenus à partir des axes (d, q) à travers la transformation inverse de Park $[P(\theta)]^{-1}$. La matrice inverse est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Cette matrice permet le passage inverse c'est à dire du référentiel (dq) au référentiel (abc)

Dans le cas particulier ou $\theta=0$ cette matrice va-nous donner la matrice de Clark et Clark inverse respectivement qui permet le passage entre les deux référentiel abc et $\alpha\beta$ qui est un repère diphasé orthogonal mais qui est lié au stator

$$[X_{\alpha\beta o}] = [C] \cdot [X_{abc}] \quad (\text{III.8})$$

$$[X_{abc}] = [C]^{-1} \cdot [X_{\alpha\beta o}]$$

Avec

$$[C] = [P(0)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{2}{3}} & -\sqrt{\frac{2}{3}} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad \text{matrice de Clark} \quad (\text{III.9})$$

$$[C]^{-1} = [P(0)]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{2}{3}} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{2}{3}} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{matrice de Clark inverse} \quad (\text{III.10})$$

III.6.1.2 Matrice de Park qui conserve les puissances

La matrice de Park normalisée nous permet de conserver les puissances et elle est comme suit:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

Le cas particulier : $\theta = 0$ cette matrice va nous conduit à la matrice de Concordia et Concordia inverse respectivement qui permettent le passage entre les deux référentiel abc et $\alpha\beta$ qui est un repère diphasé orthogonal mais qui est fixe comme l'indique le système d'équation suivant

$$[X_{\alpha\beta o}] = [T] \cdot [X_{abc}] \quad (\text{III.13})$$

$$[X_{abc}] = [T]^{-1} \cdot [X_{\alpha\beta o}]$$

$$[T] = [P(0)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{3} & -\frac{\sqrt{2}}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{Matrice de concordia} \quad (\text{III.14})$$

$$[T]^{-1} = [T]^T = [P(0)]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{2}}{3} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{3} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{Matrice de concordia inverse} \quad (\text{III.15})$$

III.6.2 expression de la puissance et de couple électromagnétique

Selon park, l'expression de la puissance électrique s'écrit comme suit

$$P_{\acute{e}le} = \frac{2}{3} \left[R(I_d^2 + I_q^2) + \frac{d}{dt} (I_d \Phi_d + I_q \Phi_q) + \omega (\Phi_d I_q - \Phi_q I_d) \right] \quad (\text{III.16})$$

D'où

Le 1^{er} terme représente la chute de tension Ohmiques (pertes par effet joule).

Le 2^{ème} terme représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée.

Le 3^{ème} terme représente la puissance transférée du stator au rotor à travers l'entrefer (puissance électromagnétique).

Sachant que

$$P_e = C_{em} \Omega_m \quad (\text{III.17})$$

D'où

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\Phi_d i_d - \Phi_q i_q) \quad (\text{III.18})$$

En remplaçant Φ_d et Φ_q par leur expressions il vient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) i_d i_q + \Phi_f i_q] \quad (\text{III.19})$$

Avec

P : Nombre de paires de pôles.

L_d, L_q : Les inductances d'axe directe et en quadrature.

Φ_f : Amplitude du flux des aimants.

III.6.3 Passage du repère $\alpha\beta$ au repère dq

Le passage des composantes $\alpha\beta$ aux composantes dq est donné par une matrice de rotation [R] exprimée par :

$$\begin{aligned} [X_{dq}] &= [R(\theta)][X_{\alpha\beta}] \\ [X_{\alpha\beta}] &= [R(\theta)]^{-1}[X_{dq}] \end{aligned} \quad (\text{III.20})$$

Avec

$$[R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

$$[R(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

On remarque que la double transformation appliquant la matrice de Clark ou Concordia suivie par la matrice de rotation va nous donner respectivement la matrice de Park ou Park normalisée

III.6.4 Le choix du référentiel [32]

Pour étudier les différents régimes de la machine synchrones à aimants permanents, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes (d, q) :

III.6.4.1 Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont fixés par rapport au stator, dans ce cas la phase a et d coïncident. Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes de démarrages et de freinages des machines à courants alternatif.

III.6.4.2 Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont fixés par rapport au rotor (tournant à une vitesse ω). L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrages et transitoires dans les machines synchrones et asynchrones.

III.6.4.3 Référentiel lié au champ tournant

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au champ tournant électromagnétique créé par les enroulements du stator. Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de prévoir l'application d'une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue.

III.6.5 Application de la transformation de Park à la MSAP :

En appliquant la transformation de Park au système d'équations, on peut exprimer tous les vecteurs dans un repère lié au rotor. Après développement des équations, on obtient un système d'équation simplifiée de la machine synchrone, où les équations de tension sont données par :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega \varphi_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega \varphi_d \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

$$\text{Et les flux étant donnés par : } \begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

En remplaçant les expressions des flux φ_d et φ_q dans le système (2.10) nous obtenons :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

III.7 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents GSAP

Cette machine comporte comme toutes les autres machines triphasées un stator bobiné. Mais, dans ce cas-là (MSAP) le rotor est remplacé par des aimants, et ceci présente l'avantage d'éliminer le système balais bague, les pertes rotorique ainsi que la présence d'une source d'alimentation afin de fournir le courant d'excitation. [33]

La figure (III.9) représente le schéma de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

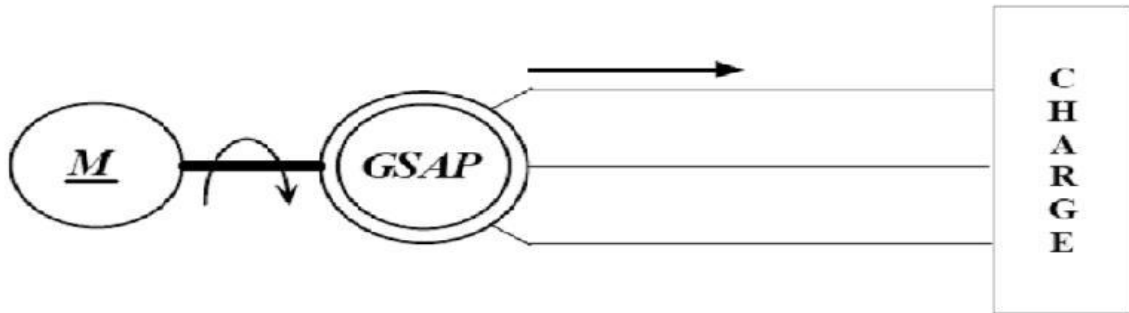


Figure III.9 : Schéma représentatif de la GSAP

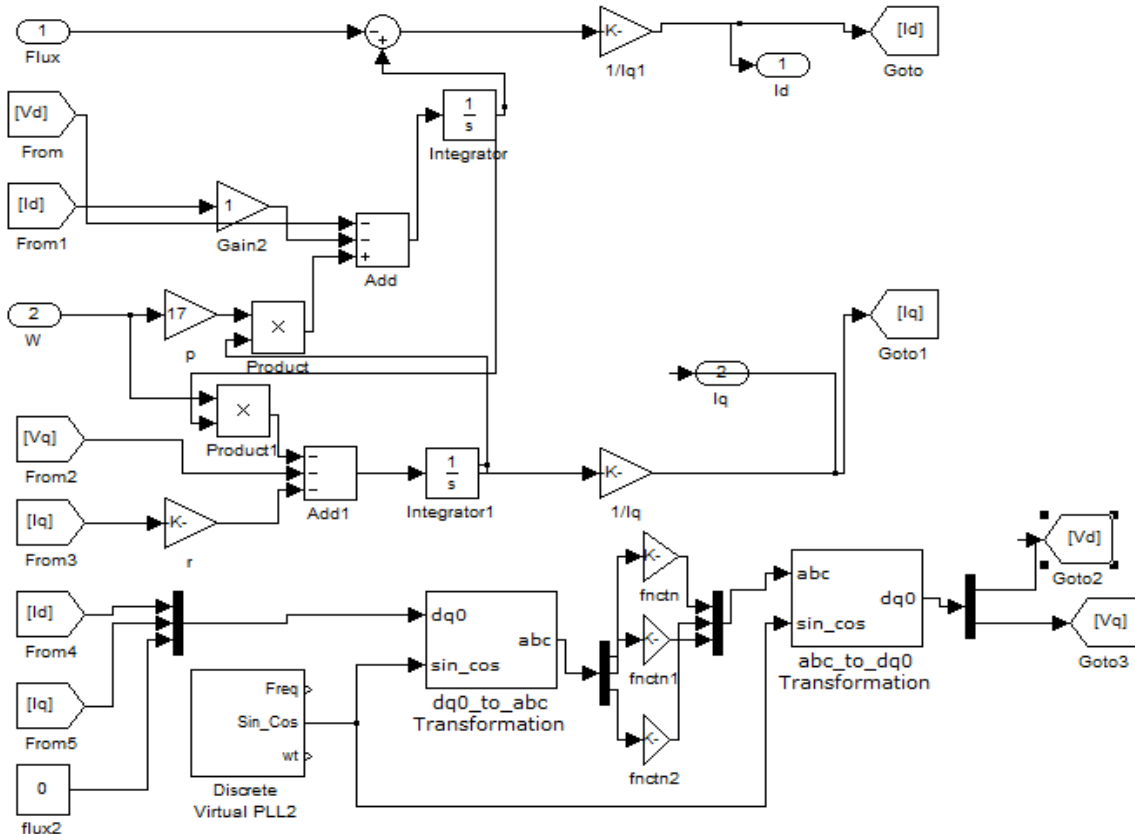


Figure III.10 : Schéma bloc sur SIMULINK de la GSAP dans le repère (dq0)

III.8 connexion de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) au réseau

Le couplage au réseau de la MSAP exige l'utilisation de convertisseurs commandés (redresseur, onduleur). Ces convertisseurs entraînent des pertes de puissance et introduisent souvent des harmoniques indésirables pouvant affecter la qualité de connexion au réseau. De plus, ces convertisseurs sont placés entre le stator de la machine et le réseau électrique, par conséquent ils doivent être dimensionnés pour l'écoulement de toute la puissance produite.

[34]

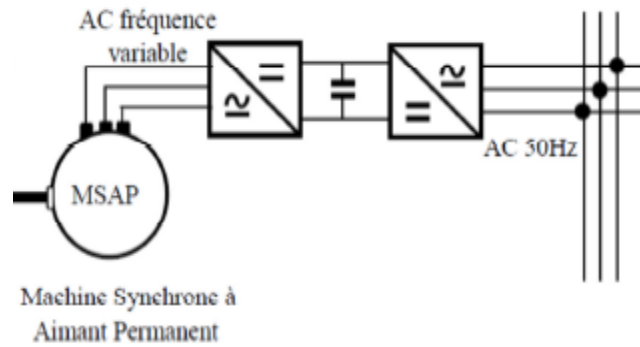


Figure III.11 : structure de la connexion de la MSAP couplée au réseau

III.9 Modélisation des convertisseurs statiques

Les convertisseurs utilisés sont de type parallèle double PD3 et constitués d'IGBT et de diodes antiparallèles commandés par modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour deux raisons principales :

- Permet un transfert bidirectionnel de la puissance de glissement entre le rotor et le réseau, ce qui permet les fonctionnements en hypo et hyper synchrone.
- Générer moins ou pas de perturbations sur le réseau électrique par propagation des courants harmoniques [35].

III.9.1 Modélisation de redresseur MLI

La Figure III.13 représente le schéma d'un redresseur MLI

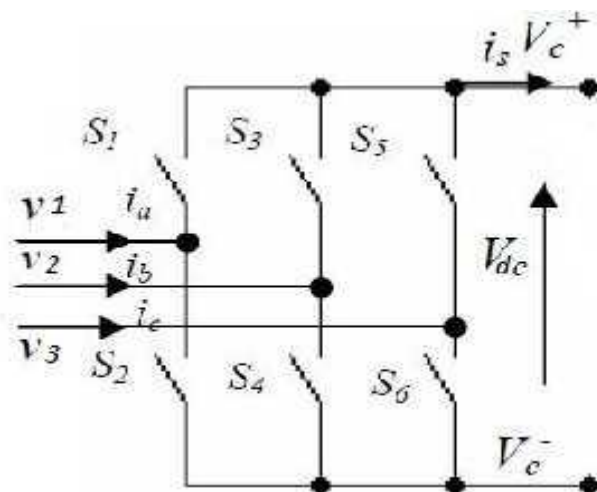


Figure III.12 schéma d'un redresseur MLI.

En utilisant les fonctions de connexion S_i , avec $i=1$ à 6 , pour chaque interrupteur on définit la matrice de transfert de redresseur comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_c^+ \\ V_c^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_3 & S_5 \\ S_2 & S_4 & S_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$

Ou

$$V_{dc} = V_c^+ - V_c^- \quad (\text{III.29})$$

De même on peut exprimer le courant continu i_s en fonction des courants d'entrée :

$$i_s = [S_1 \quad S_3 \quad S_5] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

III.9.2 Modélisation du filtre

Le filtre inséré entre le redresseur et l'onduleur est un filtre LC de type passe bas, son circuit est donné par la figure (III.14) suivante :

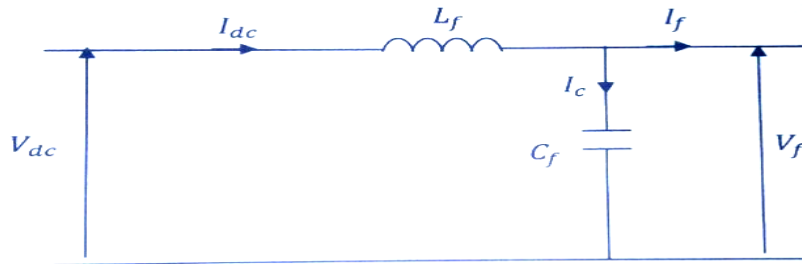


Figure III.13 Schéma du filtre LC

Ce filtre a comme rôle de réduire les courants harmoniques produits par le découplage de l'onduleur, diminue les ondulations de la source et de filtre les perturbations. la relation permettant de déterminer ces paramètres est donné par [36] :

$$\sqrt{L_f C_f} \omega_0 \gg 1 \quad (\text{III.31})$$

Avec

$\omega_0 = 2\pi f_0$ représente la pulsation de résonance.

De la figure (III.14), on peut écrire les équations du filtre :

$$\begin{cases} \frac{dI_{dc}}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_{dc} - V_f) \\ \frac{dV_f}{dt} = \frac{1}{C_f} (I_{dc} - I_f) \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

Pour minimiser les harmoniques d'ordre élevé provoqué, nous utilisons un filtre passe – bas, dont la pulsation ω_0 est nettement supérieure à la pulsation de l'utilisation. D'ou le choix des valeurs L_f et C_f respectant la condition $\omega \gg 1$.

III.9.3 Modélisation de l'onduleur MLI

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 [37]. L'onduleur de tension réalise l'interface entre deux type de source, la première est une source de courant, la deuxième est une source de tension, la présence de ces deux sources impose le respect de certaines règles de fonctionnement, à savoir :

- La source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit donc jamais être court-circuitée, les mêmes bras doivent donc avoir deux commandes complémentaires ;
- La source de courant, ne doit jamais être en circuit ouvert. Le courant circulant doit toujours trouver un chemin libre où la connexion en antiparallèle d'une diode avec les interrupteurs.

On considère l'alimentation de l'onduleur est comme une source parfaite, supposée être constituée par deux générateurs de f.é.m. égale à $\frac{V_f}{2}$ connectés entre eux par un point noté n_0 . L'onduleur est constitué de trois bras, chaque bras est constitué de deux transistors dont la commande est complémentaire. Les transistors sont shuntés par des diodes de récupération, chaque bras de l'onduleur peut être présenté par un interrupteur à deux positions comme l'indique la figure (III. 15). La machine synchrone est connectée en étoile, V_f est la tension continue alimentant l'onduleure de tensityon.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = V_f(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{bs} - V_{cs} = V_f(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{cs} - V_{as} = V_f(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

Les tensions V_{as} , V_{bs} et V_{cs} forment un système de tension triphasée équilibrée alors :

$$\begin{cases} V_{as} = \frac{V_f}{3} (2S_a - S_b - S_c) \\ V_{bs} = \frac{V_f}{3} (2S_b - S_a - S_c) \\ V_{cs} = \frac{V_f}{3} (2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (\text{III.34})$$

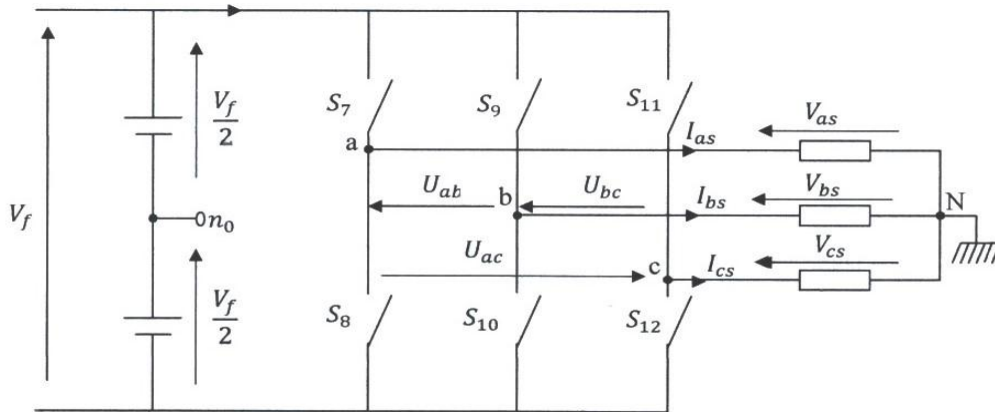


Figure III.13 : schéma équivalent de l'onduleur

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_f \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

Avec

S_a, S_b, S_c : Des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

III.10 Technique de modulation de largeur d'impulsion MLI

Dans le cas où la source d'alimentation a une valeur constante, on peut régler la valeur efficace de la tension appliquée à la machine en utilisant un onduleur commandé par la technique de modulation de largeur d'impulsion. [38]

III.10.1 Commande par MLI naturelle

La Modulation de largeur d'impulsion (MLI) Sinus-Triangle est une technique de commande basée sur la comparaison entre un signal de référence sinusoïdale dite «Modulateur» avec un autre signal, dit « Porteuse » qui est de forme triangulaire.

La modulatrice est une tension de référence au niveau de commande, elle représente l'image de la sinusoïde désirée à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence, il est de basse fréquence.

La porteuse est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence, elle définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur.

Le principe de la MLI sinus-triangle est la conversion de la modulatrice afin d'avoir une tension sous forme de créneaux successifs générés à la sortie de l'onduleur au niveau de Puissance.

Les instants de commutation des interrupteurs sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante.

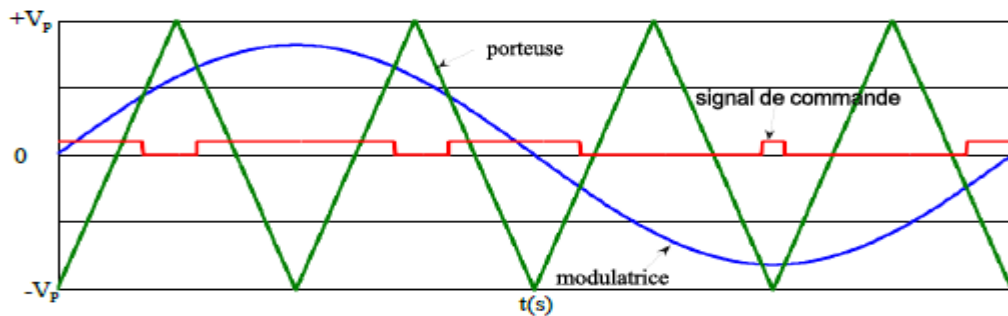


Figure III.15 : MLI trianglo-sinusoïdale

La commande MLI est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- "m" : Indice de modulation qui est égal au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence ($m = \frac{f_p}{f_{réf}}$).
 - "r" : Coefficient de réglage en tension, c'est le rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation ($r = \frac{f_p}{f_{réf}}$).
 - L'avantage principal que présente la MLI est qu'elle repousse vers les fréquences les plus élevées les harmoniques de la tension ce qui facilite le filtrage.
 - L'inconvénient, quelle génère des impulsions dissymétrique par rapport à la période de la porteuse.
- ❖ Nous adoptons à la MLI qui s'adapte à fréquence variable coté rotor de la génératrice toute fois de coté réseau à fréquence fixe, dont sont principe est représenté dans la figure suivant :

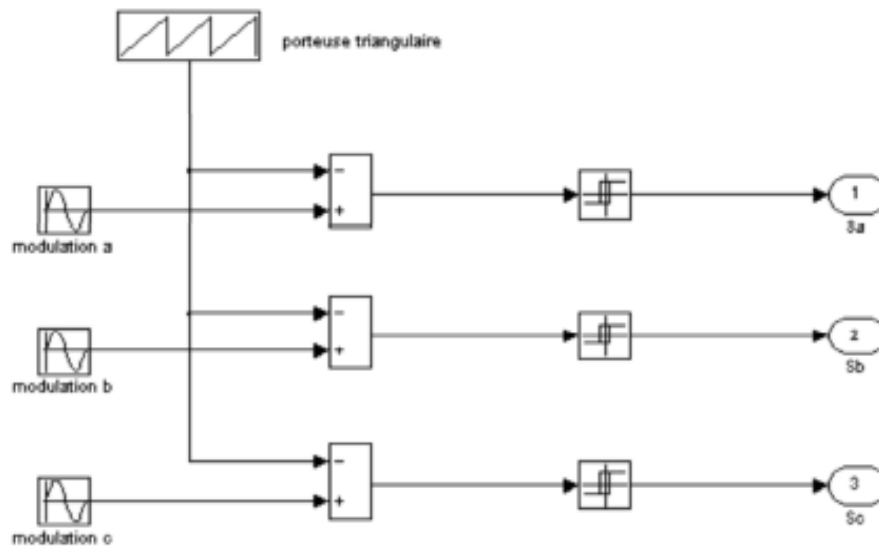


Figure III.16 : Schéma de principe de la MLI naturelle

III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le modèle dynamique et mathématique de la machine synchrone à aimants permanents. Le modèle triphasé est de nos jours rarement utilisé à cause de sa complexité et du fort couplage de ses équations. On a montré qu'à l'aide de la transformation de Park, le modèle devient plus simple et les non-linéarités sont réduites. Les équations obtenues par la transformation de Park sont établies dans le but d'obtenir un système linéaire. Enfin nous avons utilisé ce modèle pour la simplification de ces équations et de représenter le modèle de la MSAP dans le repère d'axe (d-q) pour faciliter l'étude et la simulation de MSAP. On a aussi modélisé les convertisseurs statiques utilisés dans cette conversion d'énergie.

CHAPITRE IV :

Commande et Simulation du système globale

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on propose une commande et simulation de la chaîne de conversion d'énergie du système hydrolienne global. Les résultats de simulation numérique du comportement dynamique du système sont présentés pour justifier d'une part, les modèles mathématiques développés au chapitre précédent, et d'autre part, le bon fonctionnement du système.

IV.2 Commande de la génératrice synchrone à aimants permanent

IV.2.1 Commande vectorielle de la GSAP (commande à flux orienté)

La commande des machines à courant alternatif est difficile car le modèle mathématique du système est fortement couplé du fait de l'existence d'un couplage complexe entre les deux armatures rotoriques et statoriques. Tous les dispositifs de commande modernes sont imaginés dans l'objectif de retrouver la facilité et la qualité du réglage qu'offre naturellement la machine à courant continu. La similitude entre la GSAP et la machine à courant continu est rendue possible par la commande vectorielle; l'objectif de cette dernière est d'assurer le découplage des axes d, q en moyennant des valeurs des courants de référence. [38]

IV.2.1.1 commande en couple de la GSAP

Parmi les stratégies de commande vectorielle appliquées à une machine synchrone, celle qui consiste à imposer une référence du courant direct (I_{ds}) à zéro est la plus répandue. Ce choix est justifié dans le but d'éviter la démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'armature selon l'axe d . [38]

A flux d'excitation émis par les aimants, il est donc possible de réguler le couple électromagnétique en contrôlant le courant (I_{qs}) tandis que le courant (I_{ds}) est asservi à zéro.

Le couple électromagnétique de la machine est donné par la relation :

$$C_{em} = P \frac{3}{2} [(L_d - L_q) I_{ds} I_{qs} + \varphi_f I_{qs}] \quad (IV.1)$$

De la relation précédente on déduit la relation du couple électromagnétique de référence :

$$C_{em_{réf}} = P \frac{3}{2} [(L_d - L_q) I_{ds_{réf}} I_{qs_{réf}} + \varphi_f I_{qs_{réf}}] \quad (IV.2)$$

Pour une machine synchrone à pôle lisse on a :

$$L_s = L_d = L_q \quad (IV.3)$$

Le couple électromagnétique est donné donc par l'expression suivante :

$$C_{em} = P \frac{3}{2} \varphi_f I_{qs} \quad (IV.4)$$

Avec

$$\varphi_f = L_f I_f \quad (IV.5)$$

φ_f : Le flux rotorique.

L'expression du couple électromagnétique est la même que celle d'une machine à courant continu. Les courants (I_f) et (I_q) produisant respectivement les flux rotorique et statorique respectivement.

IV.2.2 Structure de découplage

Les valeurs de $V_{sd\text{réf}}$ et $V_{sq\text{réf}}$ peuvent être écrites sous cette forme :

$$\begin{cases} V_{sd\text{réf}} = V_{d1} + f_{emd} \\ V_{sq\text{réf}} = V_{q1} + f_{emq} \end{cases} \quad (IV.6)$$

Ou :

$$\begin{cases} V_{d1} = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} \\ V_{q1} = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} \end{cases} \quad (IV.7)$$

Et en utilisant les deux nouvelles tensions de commande :

$$\begin{cases} f_{emd} = -\omega L_q I_q \\ f_{emq} = \omega L_d I_d + \omega \varphi_f \end{cases} \quad (IV.8)$$

Avec

$$\omega = P\Omega \quad (IV.9)$$

f_{emd} et f_{emq} représente les *f. e. m* qu'il faut compenser.

Les termes f_{emd} et f_{emq} correspondent aux termes de couplage entre les axes. Dans l'implémentation de la commande vectorielle comme indiqué dans la figure (IV.2), V_{d1} et V_{q1} sont obtenues à la sortie des régulateurs PI de courants. Il suffit d'ajouter les termes de couplage f_{emd} et f_{emq} respectivement pour obtenir les tensions de référence $V_{sd\text{réf}}$ et $V_{sq\text{réf}}$.

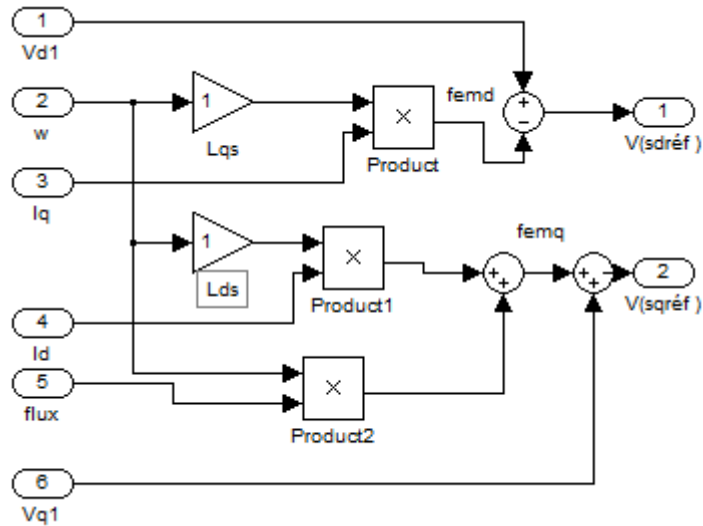


Figure IV.1 : Schéma bloc de découplage

IV.2.3 La régulation de courant

Le régulateur de courant qu'on propose est une action proportionnelle et intégrale. Les deux boucles (I_d, I_q) sont semblable. On présente leurs dimensionnements en se basent sur le schéma bloc suivant, valable pour les deux axe.

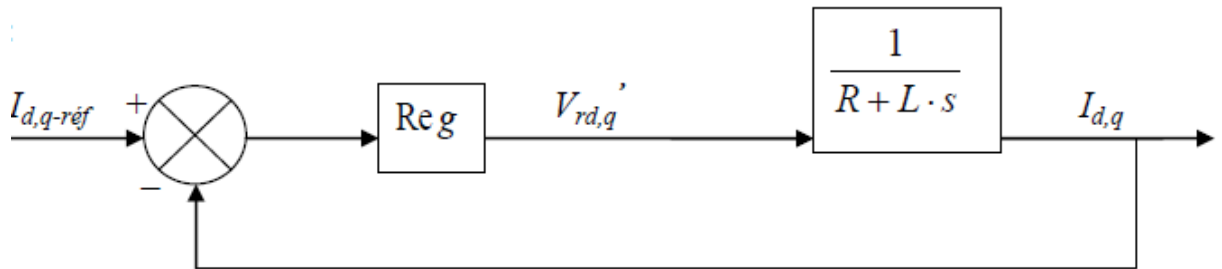


Figure IV.2: Boucle de régulation découplée des courants I_d et I_q

A partir des équations (IV.7) et (IV.8), on peut écrire les fonctions de transfert suivantes :

$$\frac{I_{ds}}{V_{ds}} = \frac{1}{R_s + L_s s} \quad (IV.10)$$

$$\frac{I_{qs}}{V_{qs}} = \frac{1}{R_s + L_s s} \quad (IV.11)$$

Les régulateurs (Reg d) et (Reg q) sont choisis comme étant des régulateurs proportionnels et intégrals, avec des fonctions de transfert de la forme suivante :

$$Reg_d(s) = K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \quad (IV.12)$$

$$Reg_q(s) = K_{pq} + \frac{K_{iq}}{s} \quad (IV.13)$$

Les fonctions de transfert en boucle ouverte sont donnée par :

$$FTBO_d = \left(\frac{1}{R_s + L_s s} \right) \left(K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \right) \quad (IV.14)$$

$$FTBO_q = \left(\frac{1}{R_s + L_s s} \right) \left(K_{pq} + \frac{K_{iq}}{s} \right) \quad (IV.15)$$

La démarche à suivre consiste à procéder à la compensation de la constante de temps du système, en posant :

$$\frac{k_{pd}}{k_{id}} = T_{ds} \quad (IV.16)$$

$$\frac{K_{pq}}{K_{iq}} = T_{qs} \quad (IV.17)$$

Avec :

$$T_{ds} = \frac{L_{ds}}{R_s} \quad (IV.18)$$

$$T_{qs} = \frac{L_{qs}}{R_s} \quad (IV.19)$$

Les fonctions de transfert en boucle fermée :

$$FTBF_d = \frac{1}{\tau_d s + 1} = \frac{I_{ds}}{I_{ds_{réf}}} \quad (IV.20)$$

$$FTBF_q = \frac{1}{\tau_q s + 1} = \frac{I_{qs}}{I_{qs_{réf}}} \quad (IV.21)$$

Avec :

$$\tau_d = \frac{R_s}{K_{id}} \quad (IV.22)$$

$$\tau_q = \frac{R_s}{K_{iq}} \quad (IV.23)$$

Les boucles de courants correspondent donc à un premier ordre, il suffit de fixer la dynamique du système à travers un choix approprié de τ_d et τ_q . Celle-ci est choisie de manière à ce que la constante de temps du système en boucle fermée régulé soit inférieure à la constante de temps en boucle ouverte.

IV.3 Schéma de commande du générateur et du redresseur MLI

Le schéma bloc de la commande est représenté par la figure (IV.2). Le couple électromagnétique $C_{em_{réf}}$ peut être élaboré pour un fonctionnement à puissance fixée qui est de toute façon utilisée pour limiter la puissance de la génératrice près de sa valeur nominale.[39]

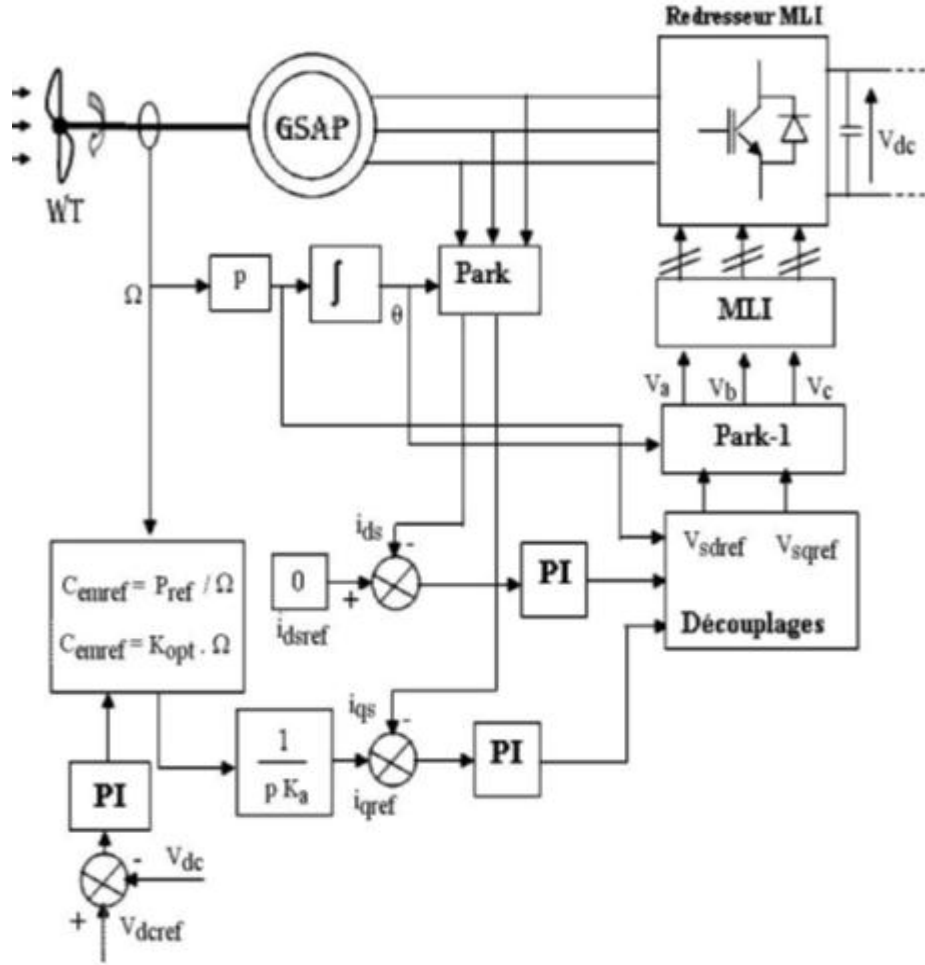


Figure IV.3 : Schéma de commande du générateur et du redresseur MLI

IV.4 Connexion au réseau et la stratégie de contrôle des puissances injectées

L'hydro générateur est connecté au réseau à travers un onduleur de tension, cet onduleur est commandé par hystérésis, la commande va nous permettre de réguler la puissance injectée au réseau et travailler avec de puissance unitaire. Pour cela on doit imposer une puissance active et réactive de référence à la commande du convertisseur. [40]

Les puissances active et réactive injectées dans le réseau sont calculées par les équations suivantes :

$$P_{g_{réf}} = V_d I_{d_{réf}} + V_q I_{q_{réf}} \quad (IV.24)$$

$$Q_{g_{réf}} = V_d I_{q_{réf}} - V_q I_{d_{réf}} \quad (IV.25)$$

IV.5 Présentation et interprétation des résultats de simulation

Nous présentons les résultats de simulation du comportement dynamique de l'hydro-générateur étudié à base de la machine synchrone à aimant permanent, qui sont obtenus avec le logiciel MATLAB /Simulink. Les paramètres de simulation sont donnés en annexe.

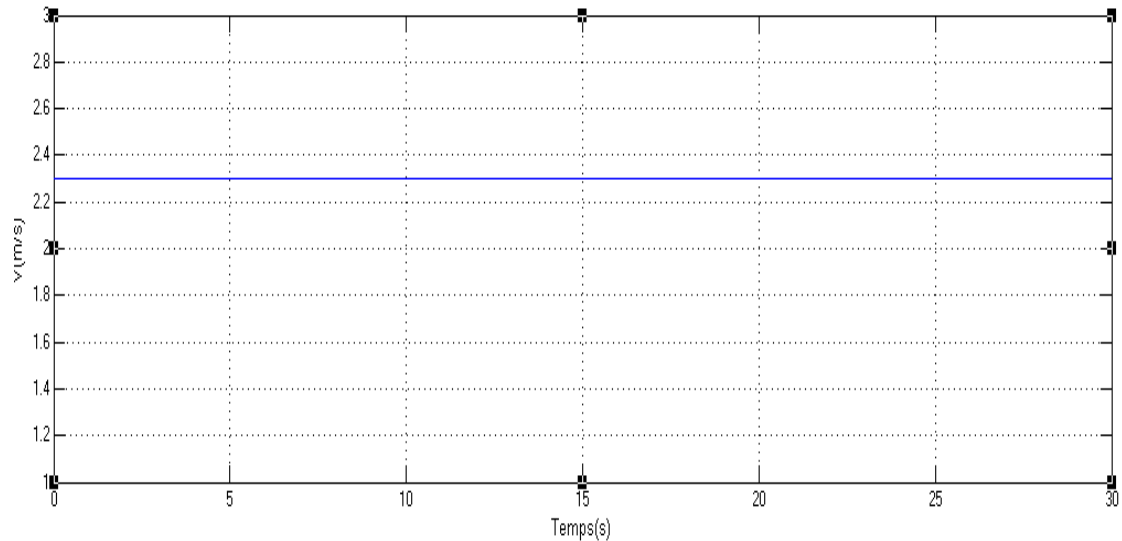


Figure IV.5 : vitesse du courant d'eau

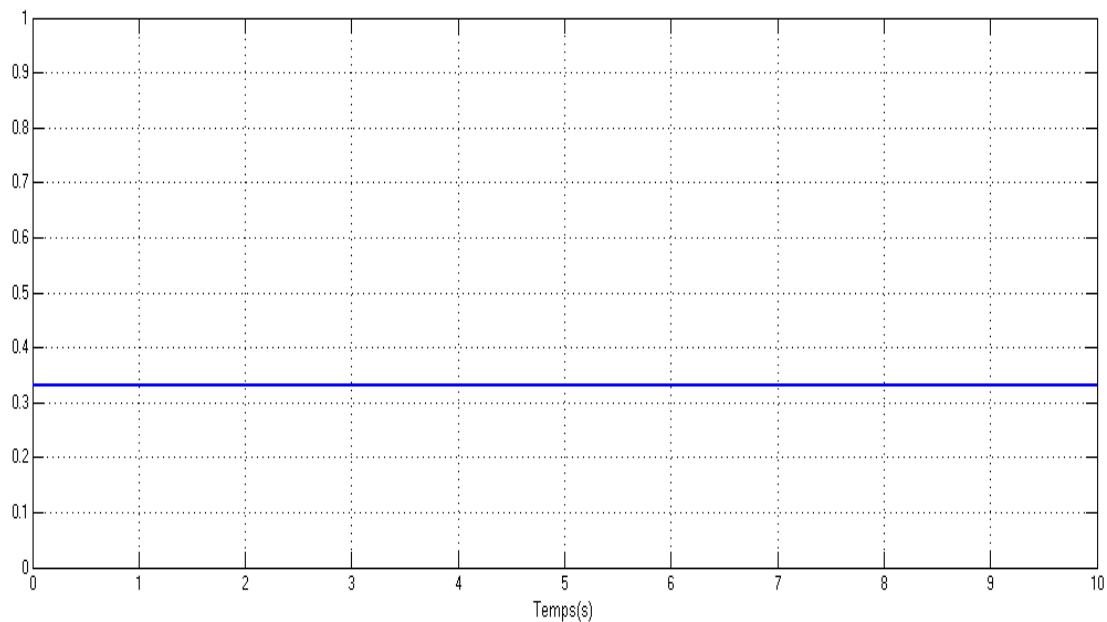
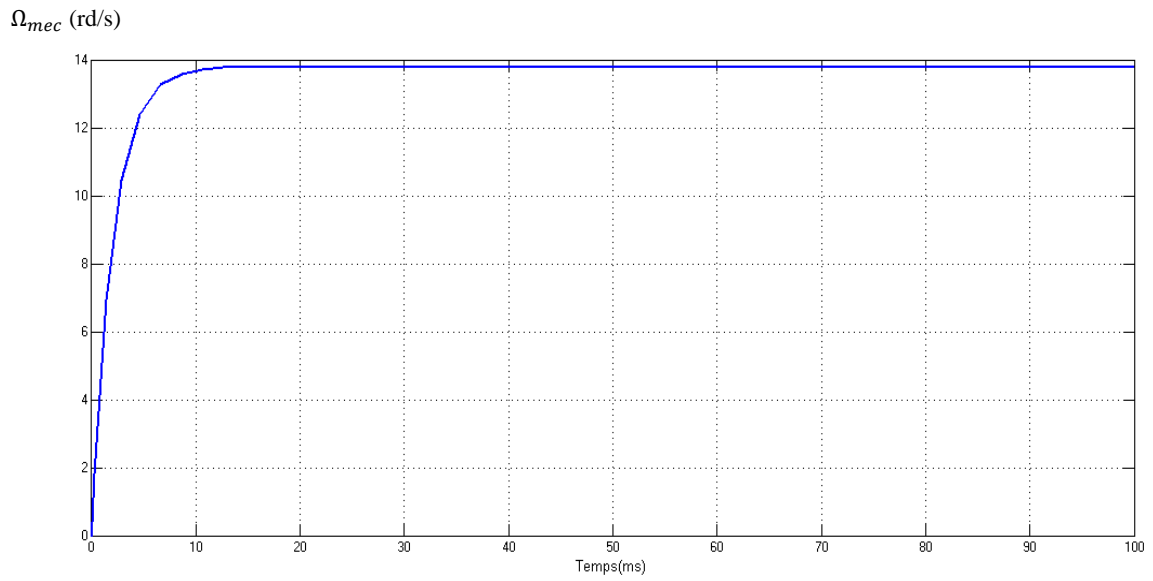


Figure IV.6 : Coefficient de puissance de la turbine



FigureIV.7 : Vitesse de rotation de l'arbre du moteur.

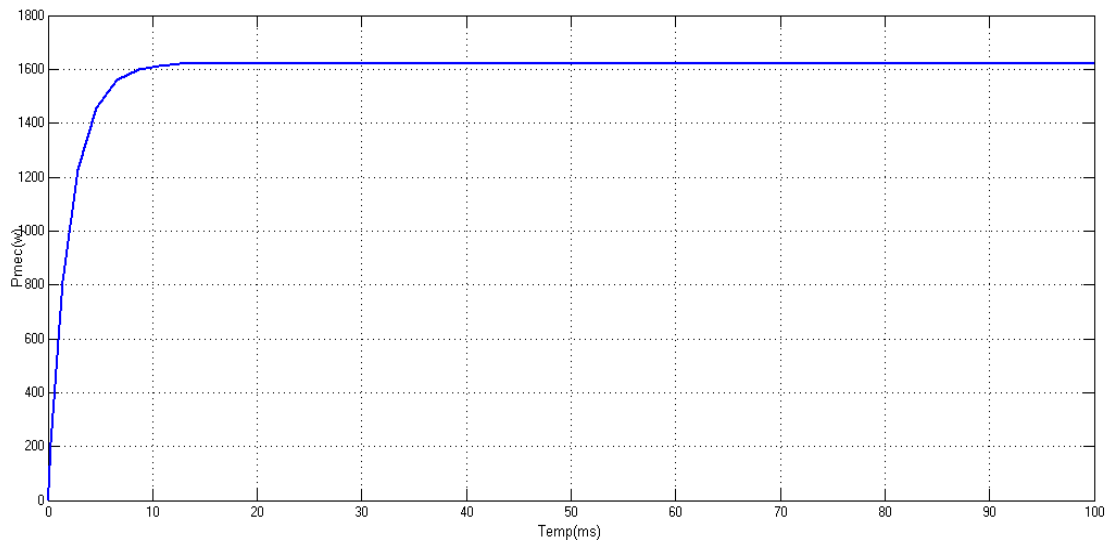


Figure IV.8 : puissance mécanique récupérée par la turbine

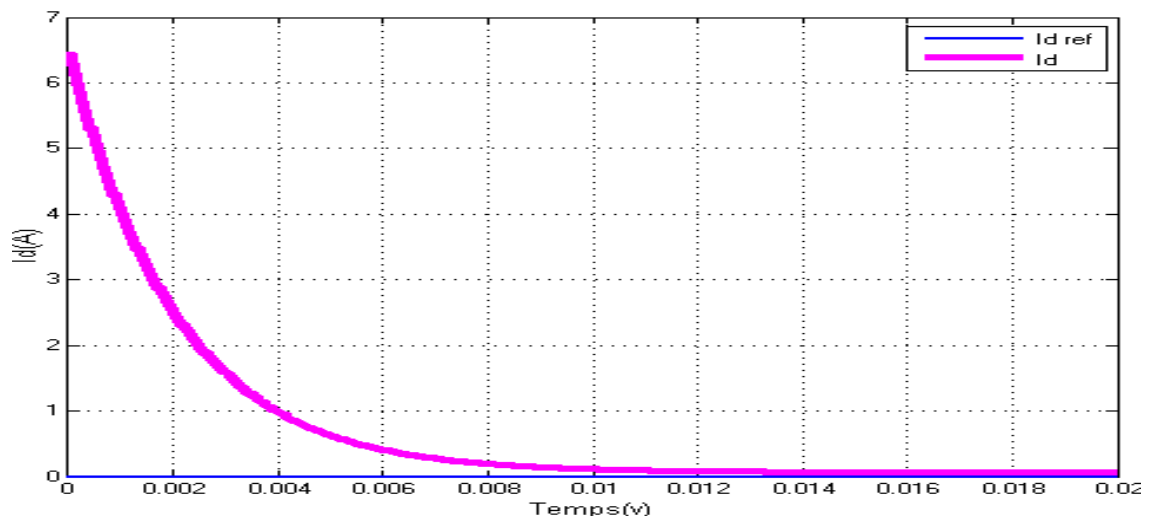


Figure IV.9 : Courant Id

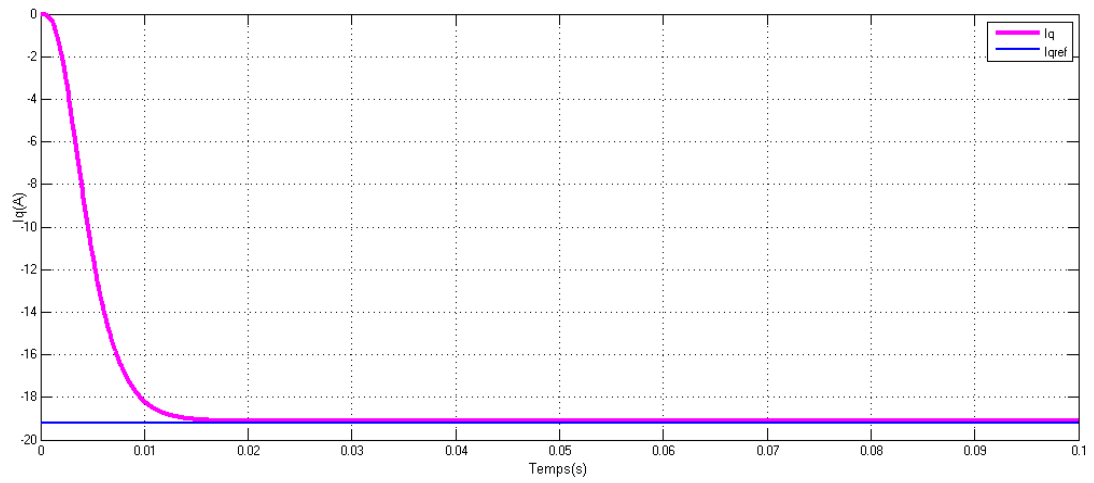


Figure IV.10 : Courant I_q

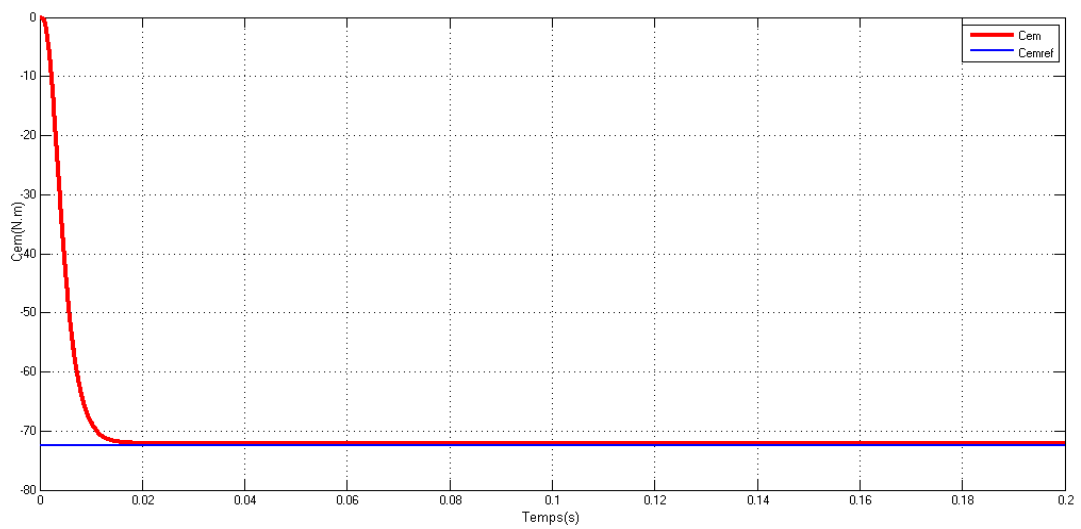


Figure IV.11 : Couple électromagnétique

Vdc(V)

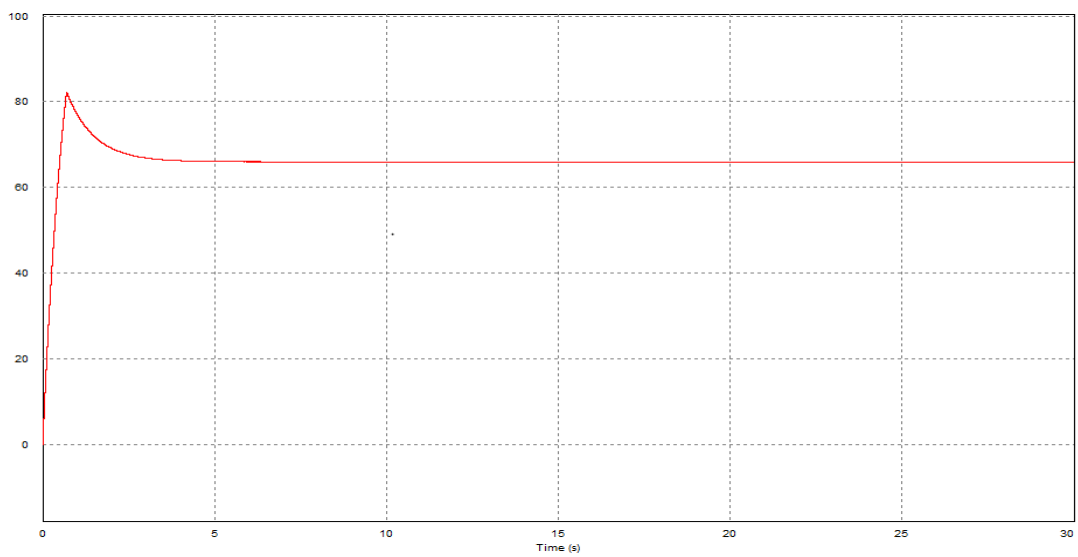


Figure IV.12 : Tension du bus continu V_d

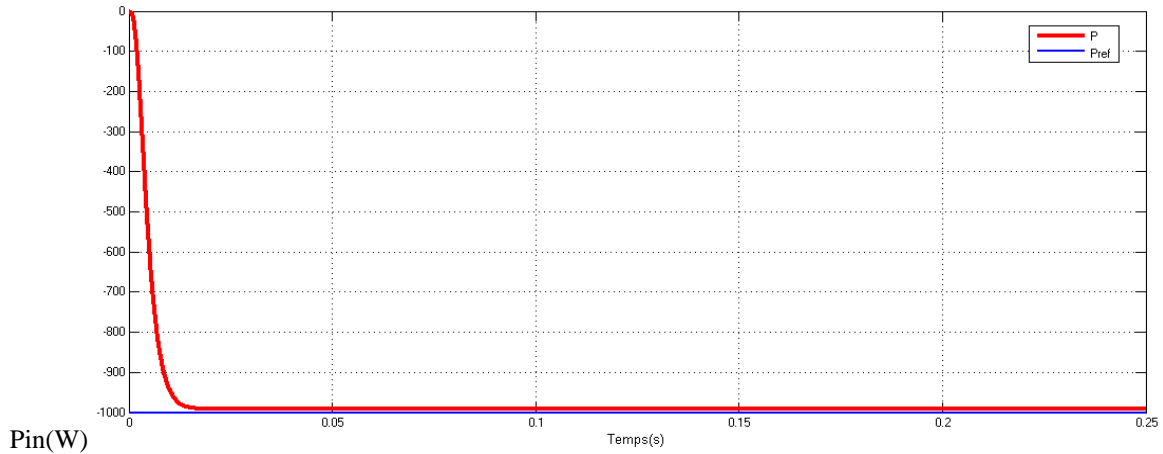


Figure IV.13 : Puissance active injectée ou réseau

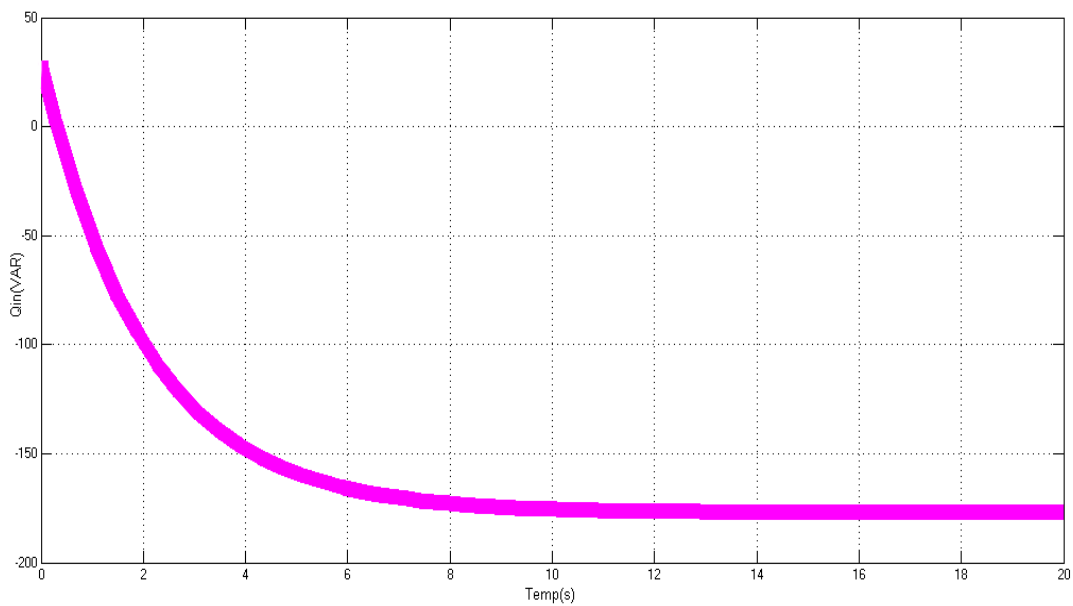


Figure IV.14 : Puissance réactive injectée ou réseau

La vitesse du courant d'eau est représentée par la figure (IV.5) et elle est constante (2.3 m/s), le coefficient de puissance est constant car on a choisi d'utiliser une turbine fixe et il est illustré dans la figure (IV.6). La vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice est représentée dans la figure (IV.7). La figure (IV.8) représente la puissance mécanique captée par la turbine. Les deux figures (IV.9) et (IV.10) représentent les courants I_q et I_d qui évoluent autour de leur valeur de référence. Le couple électromagnétique suit parfaitement la grandeur de référence et il est représenté dans la figure (IV.11). La figure (IV.12) représente la tension de bus continu qui est de la valeur moyenne de 66 (V). Les figures (IV.13) et (IV.14) montrent les puissances active et réactive statorique et celle active est de signe négatif cela justifie que le

stator génère de la puissance active. Les figures (IV.14) et (IV.15) représentent la tension et le courant injecté au réseau, qui sont de la forme sinusoïdale.

IV.5 Conclusion

Dans cette partie du travail, on a proposé une stratégie de commande de l'hydrolienne et simulé le modèle général proposé. On a procédé à des tests de simulations pour une vitesse de courant d'eau constante. Les résultats de simulation sont représentés dans les figures.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de ce présent travail est de modéliser les différents composants d'un hydrogénérateur synchrone à aimants permanents, et de concevoir une stratégie de commande permettant de contrôler le couple électromagnétique et la puissance transmise au réseau.

Pour la réalisation de ce travail nous avons utilisé l'environnement du logiciel MATLAB/SIMULINK.

Dans le premier chapitre on a présenté l'état de l'art sur les hydroliennes, dans ce contexte, quelques notions des différents types d'hydroliennes existant et leur mode de fonctionnement. Puis on a montré pourquoi l'énergie récupérable par la turbine est inférieure à l'énergie cinétique du flux d'eau en amont de l'hydrolienne. Et on a choisi la GSAP comme convertisseur d'énergie.

Le deuxième chapitre a fait l'objet d'une modélisation mathématique des différents composants de la partie mécanique de l'hydrolienne (la turbine, le multiplicateur et l'arbre de transmission). On a choisi de travailler avec la turbine ACHARD avec un coefficient de puissance fixe (0.33) pour une vitesse d'écoulement amont fixée à 2,3 (m/s).

Dans le troisième chapitre nous avons présenté des généralités sur la MSAP, puis sa modélisation en se basant sur la transformation de Park et certaines hypothèses simplificatrices. Cette modélisation met en évidence le couplage qui existe entre la partie magnétique (flux) et la partie mécanique (couple). Ensuite on a modélisé le redresseur et l'onduleur à base d'IGBT commandés en MLI, puis le bus continu.

En quatrième chapitre on a présenté la commande vectorielle de la GSAP avec des régulateurs PI qui permet un contrôle du couple électromagnétique. L'utilisation de la technique MLI pour le redresseur et l'onduleur permettent le réglage de puissance entre la génératrice et le réseau, et on a donné les schémas de commande des convertisseurs a fins de maintenir la tension de bus continu constant et contrôle la puissance réactif transitant le filtre et d'établir des tensions à fréquence identique à celle du réseau.

Les résultats obtenus par la simulation de système hydrolienne globale montre que le réglage pare les régulateurs apporte de bon performance en régime permanent, notamment la poursuite des référence, de plus, la puissance injectée au réseau suit la puissance de référence.

Suite aux résultats obtenus dans ce mémoire, quelques perspectives sont envisageables :

- Faire une étude d'une chaîne de conversion d'énergie de cogénération raccordée au réseau avec prise en compte d'autres paramètres (saturation de la machine, réseau réel, prise en compte de toutes les pertes).
- Utilisation des commandes non linéaires (mode glissant, logique floue, ...).
- Remplacé les convertisseurs à deux niveaux par des convertisseurs multi niveaux.

ANNEXES

Paramètres de la turbine

- Le rayon de la voilure $R=0.8$ m
- La surface active $S=0.8m^2$
- Inertie de la voilure $J= 16$ kg. m^2
- Masse volumique de l'eau $\rho = 1010 \frac{Kg}{m^3}$
- Coefficient de puissance $C_p=0.33$
- Coefficient de frottement visqueux $f=0.1 \cdot 10^{-3}$ N ms/rd

Machine synchrone à aimant permanent

- Tension nominale $V_n= 80V$
- Courant nominale $I_n= 6.5$ A
- Puissance nominale $P_n= 1050$ W
- Nombre de pair de pole $p=17$
- La résistance statorique $R= 1.137$
- Inductance statorique selon l'axe (d) $L_d=0.0027$ H
- Inductance statorique selon l'axe (q) $L_q =0.0027$ H
- Flux des aimants permanents $\phi = 0.15$ Wb
- L'inertie $J= 10^{-3}$ Kg. m^2
- Coefficient de frottement visqueux $f= 0.3 \cdot 10^{-4}$ N ms/rd

Le multiplicateur

Le multiplicateur est considéré parfait, donc il se réduit à un simple gain G.

$$G= 1.25$$

Bus continu

- Capacité du condensateur $C = 180 \mu f$
- Tension initiale du condensateur $V_{dc} = 66$ V
- Inductance du filtre $L_f = 0.02$ H

Références bibliographie

[1] **Thomas JAQUIER** « Hydroliennes à flux transverse: Développement d'un prototype HARVEST en canal », Thèse de doctorat, GRENOBLE, 07 aout 2006

[2] *Introduction* **B. ELGHALI**, « Modélisation et commande d'une hydrolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation » Université de Brest.

[3] **Mohamed NASSER**, « Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/ hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés », thèse de doctorat, école nationale supérieure d'arts et Métiers, Paris Tech, a 05 Mai 2011.

[4] Fonctionnement d'une hydrolienne: Ana Maria ANDREICA «Optimisation énergétique de chaînes de conversion hydroliennes– modélisation, commandes et réalisations expérimentales» T H ESE pour obtenir le grade de DOCTEUR DE L'Institut Polytechnique de Grenoble, le 16 juillet 2009.

[5] **F. BEKOUICHE et N. ZIDANE** « Stratégie de controle d'une hydrolienne en cas de creux de tension », Mémoire de fin d'étude,U. A. MIRA, béjaia,2015/ 2016.

[6] <http://hydrolien.fr/hydrolienne-fonctionnement/>

[7] <http://idenergie.ca/fr/hydrolienne-2/>

[8] **Denis Bastien, Gilles Trottier et pierre Blanchet** « Le développement de l'hydrolienne de rivière domestiques au Québec, les enjeux technologiques, économiques et législatifs », Mémoire présenté à la commission sur les enjeux énergétiques du Québec.

[9] **B. AIDROUS et F. MECHOUCHE** « Intégration de l'énergie hydrolienne dans un réseau électrique », Mémoire de fin d'étude,U. A. MIRA, béjaia,2014 - 2015

[10] https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_de_Betz

- [11] **F. MEGUELLATI et S. YOUS** « Contrôle de puissance au niveau de la turbine éolienne », Mémoire de fin d'étude, U. A. MIRA, Béjaïa, 2013-2014.
- [12] **A. TABTI et Z. AHMEDI** « Commande et modélisation d'une éolienne à base d'une MSAP couplé au réseau », Mémoire de fin d'étude, U. A. MIRA, Béjaïa, 2013.
- [13] **S. tareft** « étude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation », diplôme de magister, Université A/MIRA de Béjaïa, 2008.
- [14] Consulter le 13/04/2019 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Rivière>.
- [15] Consulté le 13/04/2019 <http://www.alertes-meteo.com/geographie/la-riviere.php>
- [16] **A. hamichi et F. benkerrou** « Etude et modélisation d'une machine synchrone à aimant permanent », Mémoire de fin d'étude, U. A. MIRA, Béjaïa, 2014 - 2015
- [17] **Rachid abdssemmed**, « Modélisation et simulation des machines électriques », presse d'université de batna, mai 2011.
- [18] **A. Abdelli** « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », Thèse de doctorat », Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, 2007.
- [19] **F. Tamiti** « Etude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice synchrone à aimants permanent », Thème de master, Université de A. MIRA, Béjaïa, Algérie, 2010.
- [20] **N. Abdel Karim** « Optimisation multicritères et multi-physique d'aérogénérateurs à aimants permanents à flux axial », Thèse de doctorat, Groupe de Recherche en Electrotechnique et Automatique du Havre EA 3220, Université du Havre, France, 2008.
- [21] **H. Lyes, A. Jugurtha** « Etude et simulation de la machine synchrone à aimants permanents », Mémoire En vue l'obtention du diplôme d'étude universitaire appliqué En Electrotechnique à université de Béjaïa.
- [22] **N. BOUNASLA** « Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents ». Mémoire de Magister, université de Ferhat ABBAS Sétif -1 (ALGERIE), 2014.
- [23] **M. KOTEICH** « Modélisation et Observabilité des Machines Électriques en vue de la commande sans capteur mécanique », Thèse de doctorat De L'Université Paris-Saclay, mai 2016.
- [24] **M. EZZAT** « commande non linéaire sans capteur de la machine synchrone à aimants permanents », Thèse de Doctorat, École centrale de Nantes, 2011.

- [25] **S.HAMACHE et D. GHERMARI** « Modélisation par Elément finis d'une machine synchrone à Aimants permanents », Mémoire d'ingénieur, Université de Bejaia, 2005.
- [26] **R. AMMOUCHI et H. KAOU** « Calcul Numérique d'une machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de fin d'étude, U, A, MIRA, Bejaia, 2017/2018.
- [27] **B.Hacéne** «Contribution a la Commande des Machines Synchrones a Aimants Permanents » Thèse de Doctorat, L'institut National Polytechnique de Lorraine.juin 1995.
- [28] **G. Segier** Electronique de puissance : « les applications de base et leurs principales applications », Dunod, paris. P 406.
- [29] **D. Rekioua** « Etude et modélisation des machines synchrones à aimants permanents associées à des onduleurs de tension » thèse de Magister, E. N . P juin 1993.
- [30] **F.Benchabane**, « Commande en position et en vitesse par mode de glissement 'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering », Thèse de magister ; Université de Biskra, 2005.
- [31] **A.DJOUADI** :« Alimentation et commande d'une machine synchrone Polyphasée en régime dégradé : application a la machine synchrone double étoile », Mémoire de Magister à l'université de Hassiba Ben Bouali, Chlef, 2014.
- [32] **Jonathan Goldwasser** « ELEC218 —Machines électriques » juin 2005.
- [33] **T. REKIOUA** « contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents », thèse Doctorat de l'I.N.P.L, Institut national de polytechnique de lorraine 1991.
- [34] **A. Boyette** «contrôle – commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec de système de stockage pour la production éolienne »thèse de doctorat de l'université de Poincaré, Nancy 1,2006.
- [35] **A. AZIB et M. BACHIOUA** « contrôle et modélisation d'une chaine de conversion d'énergie à base d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) dédiée à une hydrolienne », Mémoire de fin d'étude, U, A, MIRA, Bejaia, 2010/2011.
- [36] **A. BENBRAHIM** « Commande prédictive Généralisée d'une Machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de Magister à l'université de Batna, soutenu le 18/06/2009.
- [37] **L. ABDELLI et M.S. CHIBANI** « commande par mode glissement d'ordre supérieure d'un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) », Mémoire de fin d'étude, U, A, MIRA, Bejaia, 2017/2018.
- [38] **A.MIRECKI** « Etude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petit puissance » thèse doctorale, INP TOULOUS, 2005

[39] S. Belakehal A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1 (2010) 149 – 161, « Modélisation et commande d'une génératrice Synchrones à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne » Laboratoire d'Electrotechnique, 'LEC'Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Mentouri de Constantine.

[40] MorlayeSekou CAMARA, Mamadou Baïlo CAMARA, Brayima DAKYO, Hamid GUALOUS, Laboratoire GREAH, Article « Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent pour la production et l'injection des énergies offshore dans un réseau », 8-9 juillet 2014, Cachan. Université Le Havre, Le Havre, France