

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

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique
Option : Automatismes industriels

Thème

**Commande non linéaire d'une hydrolienne à base
d'une génératrice synchrone à aimants
permanents**

Préparé par :

MEHANAOUI Celia.
ZAOUDI Sabrina.

Dirigé par :

Mr. A. Y. Achour

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Avant toute chose, on remercie Dieu le tout puissant, qui a rendu cet ouvrage possible

On tient à remercier Monsieur A.Y. Achour, pour nous avoir encadré et en particulier pour son soutien, ses conseils et sa patience. Son expérience et sa connaissance ont contribué à notre formation scientifique.

On remercie les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant d'évaluer ce mémoire et d'être dans ce jury. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Enfin, on remercie toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail

Dédicaces

Je dédie ce travail ;

A mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études, ainsi pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Ils se sont beaucoup sacrifiés pour m'offrir toutes les conditions nécessaires afin que je puisse devenir ce que je suis;

A ma grande mère ;

A mes frères et ma sœur ;

A tous mes cousins ;

A tous mes camarades de la promotion d'électrotechnique 2019/2020.

M. Celia

Dédicaces

Je dédie ce travail ;

A toute ma famille qui m'a soutenu le long de mon cursus,

A tous mes amis,

Et à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Z. Sabrina

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles et abréviations

V_m : Vitesse de la marée.

V_{me} : Vitesse des vives eaux.

V_{ve} : Vitesse des mortes eaux.

c : Coefficient de marée.

P_m : Puissance mécanique de la turbine marine.

C_p : Coefficient de puissance.

λ : Vitesse spécifique.

β : Angle de direction des pâles β .

ρ : Masse volumique de l'eau (1024 kg/m³).

r : Rayon de la turbine.

ω_m^* : Vitesse de la turbine.

C_m : Couple moteur (mécanique) de la turbine appliqué à la génératrice.

$[v_s]$: Vecteur des tensions statoriques.

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

$[i_s]$: Vecteur des courants statoriques.

$[\Psi_s]$: Vecteur des flux statoriques.

$[\Psi_{abs}]$: les flux des axes (a,b,c).

ϕ_f : Amplitude du flux des aimants permanents.

L_s : Inductance propre des phases statoriques.

$[P(\theta)]$: Matrice de Park.

$[P(\theta)]^{-1}$: Inverse de la matrice de Park.

i_d, i_q : Courants statoriques dans le repère (d, q).

i_{abc} : Courants statoriques dans le repère (a, b, c).

v_d, v_q : Tensions statoriques dans le repère (d, q).

v_{abc} : Tensions statoriques dans le repère (a, b, c).

Ψ_d, Ψ_q : Flux dans les axes (d,q).

ω : Pulsation électrique de la machine.

L_d, L_q : Inductances statoriques dans le référentiel (d, q).

C_{em} : Couple électromagnétique.

n_p : Nombre de paires de pôles.

J : moment d'inertie total (turbine plus machine).

F_{VF} : coefficient de frottement visqueux.

ω_m : Vitesse mécanique de la machine.

V_a, V_b, V_c : Les tensions à l'entrée du redresseur côté génératrice.

S_a, S_b, S_c : Les fonctions de commutation des interrupteurs du redresseur côté génératrice.

V_{ag}, V_{bg}, V_{cg} : Les tensions du réseau.

V_{aO}, V_{bO}, V_{cO} : Les tensions de sortie de l'onduleur côté réseau.

R_f : La résistance de ligne du réseau.

L_f : L'inductance de ligne du réseau.

I_{ag}, I_{bg}, I_{cg} : Les courants de réseau.

W_a, W_b, W_c : Les fonctions de commutation de l'onduleur côté réseau.

V_{dr}, V_{qr} : Les tensions du redresseur dans le repère (d,q).

V_{ondd}, V_{ondq} : Les tensions de l'onduleur dans le repère (d,q).

V_{gd}, V_{gq} : Les tensions du réseau dans le repère (d,q).

V_{dc} : La tension du bus continu.

K_{dp}, K_{di} : Coefficients des actions intégral et proportionnel du régulateur du courant d'axe d.

K_{qp}, K_{qi} : Coefficients des actions intégral et proportionnel du régulateur du courant d'axe q.

CBPC : Commande basée sur la passivité du courant.

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents.

GSAP : Génératrice synchrone à aimants permanents.

FMM : Force magnétomotrice de la GSAP.

IGBT : Insulated-gate bipolar transistor (transistor bipolaire à grille isolée).

PWM : Pulse width modulation (MLI : Modulation de largeur d'impulsions)

MCC : Machine à courant continu.

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 : Composants d'un générateur hydrolienne.....	5
Figure I.2: Hydrolienne à axe horizontal ou à flux axial.....	6
Figure I.3 : Hydrolienne à axe vertical ou à flux transverse.....	7
Figure I.4: Hydrolienne à aile battante ou oscillante.....	7
Figure I.5 : Hydroliennes utilisant des roues à aubes flottantes.....	8
Figure I.6 : Structure de la chaîne de conversion utilisant une MSAP couplée au réseau.....	11
Figure II.1 : Structure de la chaîne de conversion hydrolienne en boucle ouverte	12
Figure II.2 : Coefficient de puissance de la turbine.....	14
Figure II.3: Représentation symbolique de la machine synchrone.....	15
Figure II.4 : Représentation d'une GSAP dans le repère de (dq).....	16
Figure II.5 : Topologie de convertisseur « Back to Back ».....	18
Figure II.6 : Schéma redresseur côté génératrice.....	19
Figure II.7 : Schéma de l'onduleur côté réseau.....	20
Figure III.1 : Schéma bloc de CBPC.....	28
Figure III.2 : Digramme vectoriel spatial des courants et tensions triphasées du réseau..	30
Figure III.3 : Commande de l'onduleur côté réseau.....	30
Figure III.4 : Réponse du système en boucle fermée.....	34

Liste des symboles**Liste des figures**

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les hydroliennes	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Energie hydrolienne.....	3
I.3. Courants marins.....	3
I.3.1. Courants de surface.....	3
I.3.2. Courants profonds.....	4
I.4. Courants de marée.....	4
I.5. Concepts et fonctionnement de l'hydrolienne.....	4
I.5.1. Définition d'une hydrolienne.....	4
I.5.2. Composants d'une hydrolienne.....	5
I.5.3. Principe de fonctionnement	5
I.6. Classification des hydroliennes.....	6
I.6.1. Classification selon la technologie.....	6
I.6.2. Classification suivant le mode de récupération.....	8
I.7. Les exigences pour l'implantation d'hydrolienne.....	8
I.8. Avantages et inconvénients des hydroliennes.....	9
I.9. Convertisseurs électromécaniques.....	10
I.10. Conclusion.....	11
Chapitre II : Modélisation du générateur hydrolien	
II.1. Introduction.....	12
II.2. Présentation de la chaîne de conversion hydrolienne.....	12
II.3. Modélisation des composants de la chaîne de conversion hydrolienne.....	12
II.3.1. Modélisation de la marée.....	12
II.3.2. Modélisation de la turbine hydrolienne.....	13
II.3.3. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents	14
II.3.3.1. Equations électriques dans le repère fixe (abc).....	15
II.3.3.2. Equations électriques dans le repère de Park (dq)	16
II.3.3.3. Equations magnétiques.....	17
II.3.3.4. Equations mécanique et du couple électromagnétique	17
II.3.4. Modélisation des convertisseurs statiques.....	18
II.3.4.1. Modélisation du redresseur côté génératrice.....	19
II.3.4.2. Modélisation de l'onduleur côté réseau.....	20
II.3.4.3. Modélisation du bus continu	21
II.3.4.4. Modèle d'état du convertisseur « back-to-back » dans les axes dq.....	22
II.4. Conclusion.....	23
Chapitre III : Commande de la chaîne de conversion hydrolienne	
III.1. Introduction.....	24
III.2. Commande de la génératrice synchrone à aimants permanents	24
III.2.1. Commande basée sur la passivité en courant (CBPC).....	24
III.2.2. Asservissement de la GSAP en courant.....	24
III.2.3. Conception de la CBPC.....	26

III.2.3.1. Calcul des flux désirés.....	27
III.2.3.2. Calcul du couple désiré C_{em}^*	27
III.3. Commande vectoriel de l'onduleur côté réseau.....	28
III.4. Résultats de simulation.....	31
III.5. Conclusion	34
Conclusion générale.....	36
Bibliographie	37
Annexe	

Introduction générale

Face au problème de la gestion des déchets nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre, les énergies renouvelables occupent une place avancée parmi les énergies d'avenir grâce à leur faible impact sur l'environnement ; d'autant plus que ces énergies jouent un rôle important dans la lutte contre le changement climatique et dans le développement économique de certains pays. Une de ces énergies renouvelables, l'énergie hydrolienne, suscite depuis quelques années un intérêt particulier du fait de ses nombreux avantages. En effet, la force et la vitesse des courants de marée, généralement phénomène prédictible, peuvent être connues des décennies à l'avance.

En effet, l'immersion des machines, les forts courants et des conditions météorologiques qui peuvent être défavorables rendent les systèmes inaccessibles et donc la maintenance impossible pendant de longues durées. Les périodes où il est possible d'opérer sur les machines sont courtes et peu fréquentes, vu l'immersion de l'hydrolienne dans des sites offshore. Les opérations de maintenance sont, de plus, associées à des moyens lourds et spécifiques et requièrent du personnel spécialisé. Réduire les causes des opérations de maintenance et de réparation est de ce fait un point particulièrement important pour rendre économiquement rentable la production d'énergie par les hydroliennes.

L'amélioration du rendement de la conversion électromécanique et réduction de la maintenance de l'hydrolienne, font que les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) à entraînement direct peuvent se révéler très intéressantes. Le multiplicateur mécanique est dans ce cas éliminé. Ainsi, le rendement de la chaîne de conversion est amélioré et les besoins en maintenance causés par le multiplicateur (problèmes mécaniques, lubrification...etc.) sont éliminés. La MSAP est un actionneur électrique très robuste et présente de faibles moments d'inertie ce qui lui confère une dynamique caractérisée par de très faibles constantes de temps et permet de concevoir des commandes de vitesse, de couple ou de position avec une précision et des performances dynamiques très intéressantes (actionneurs de robotique, servomoteur, entraînement à vitesse variable...etc.). Mais le modèle du MSAP correspond à un système multi-variable et fortement couplé, c'est pour cette raison que sa commande est plus complexe que celle d'une machine à courant continu (MCC).

Le développement de l'informatique industrielle et de l'électronique de puissance met à notre disposition des moyens de commande qui permettent d'implanter des lois de commande (de position ou de vitesse) pour la machine MSAP de plus en plus performantes et robustes. Ces lois de commande sont traditionnellement conçues sur la base de boucles imbriquées (asservissement en cascade), ou bien, sur la base de techniques modernes de l'automatique, à savoir la commande par « backstepping », la linéarisation par rétroaction ou les méthodes basées sur la passivité.

La commande basée sur la passivité (CBP) est une méthode d'élaboration de commandes pour l'asservissement des systèmes non-linéaires en général et les machines électriques en particulier.

Le fonctionnement de la MSAP en mode génératrice (GSAP) à une vitesse variable reste un atout nécessaire pour capturer la puissance maximale des courants marins de manière

optimale. Mais cependant, la GSAP ne peut pas être directement raccordée au réseau électrique, puisque la puissance est générée à tension variable, à la fois en fréquence et en amplitude. L'interface d'électronique de puissance est donc nécessaire pour convertir cette tension et fréquence variables, en une tension à fréquence égale à celle du réseau électrique. Alors, différentes structures de convertisseurs de puissance peuvent être employées pour cette machine. La topologie classique la plus communément utilisée reste un convertisseur AC/DC et DC/AC, généralement appelé « back-to-back » (en Anglais), (dos à dos en Français).

Le travail réalisé consiste à commander chaîne de conversion hydrolienne à base d'une GSAP. L'extraction de la puissance maximale disponible sur l'arbre de la turbine est assurée par la CBP de la GSAP à travers un convertisseur à base d'IGBT, en mode redresseur. Le transfert d'une puissance propre au réseau est garanti par une commande classique (PI).

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre porte sur les différentes généralités des hydroliennes et leurs fonctionnements.

Les modèles mathématiques de la chaîne de conversion hydrolienne sont présentés au deuxième chapitre.

Le troisième chapitre, évoque le calcul et l'application de la commande basée sur la passivité en courant sur la GSAP ainsi que le contrôle vectoriel du convertisseur coté réseau. Une validation du système en boucle fermée par des simulations est faite sur Matlab/Simulink afin de montrer les performances de la stratégie adoptée.

Enfin, on termine notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

I.1.Introduction

Comme la mer est répartit sur les deux tiers de la terre, elle transporte, prélève et accumule des grandes quantités d'énergies renouvelables d'origine mécanique et thermique. Leur production n'engendre pas de gaz à effet de serre.

Dans ce premier chapitre, on s'est intéressé à apporter une vue globale sur le sujet de cette étude qui est l'hydrolienne, pour cela on a donné un aperçu générale sur les courants marins et les courants de marées qui constituent la source de l'énergie hydrolienne. Ensuite, on a présenté la composition et le fonctionnement de l'hydrolienne.

I.2. Energie hydrolienne

C'est l'exploitation de l'énergie cinétique des courants de marée suivant le même principe de base que les éoliennes. Ces courants de marée sont totalement prédictibles et leur potentiel énergétique est très supérieur à celui des systèmes à barrage ayant des impacts environnementaux contestés. Un des avantages est que les hydroliennes sont installées près des côtes (environ 20 km) et à quelques dizaines de mètre de profondeur, ce qui comparativement aux éoliennes offshore facilite l'exportation de l'énergie électrique sur la terre ferme.

Vue le potentiel énergétique, le faible impact écologique et la prédictibilité de la ressource, il s'avère que l'énergie hydrolienne (énergie des courants de marée) est particulièrement intéressante et révolutionne aujourd'hui le monde énergétique. Par conséquent elle fera l'objet de cette étude [1].

I.3. Courants marins

Un courant marin est un déplacement d'eau, caractérisé par sa direction, sa vitesse et son débit. Il se déplace sur de très longues distances (plusieurs milliers de kilomètres), à la surface ou en profondeur des mers et des océans du globe terrestre. Il existe aussi d'autres gammes de courants tels les courants de rivière ou de fleuve, mais puisqu'il est difficile et peu rentable d'installer une hydrolienne dans une rivière, nous ne nous intéresserons qu'aux courants des mers et océans.

Ces courants sont donc divisés en deux groupes : les courants de surfaces et les courants profonds.

I.3.1. Courants de surface

Les courants de surface concernent environ 10 % de l'eau des océans. Ils concernent les 400 premiers mètres de profondeur. Le mouvement de ces courants est tout d'abord dû à la différence de densité qui les sépare des courants profonds. La différence de densité varie en fonction de la température et de la salinité. En effet, le sel de mer réchauffe l'eau et induit les différences de températures.

Mais cette salinité n'agit pas seulement sur la température de l'eau mais aussi sur sa densité ; l'eau douce étant moins dense que l'eau salée, un mouvement se crée entre ces différentes densités qui sont les courants.

Ensuite interviennent les différents vents qui soufflent à la surface des mers et des océans entraînent les eaux de surface dans leur direction. L'effet direct du vent se fait ressentir jusqu'à une profondeur d'environ 800 mètres.

Les vents à l'origine des courants de surface sont principalement les vents dominants : ceux d'Est subtropicaux (les Alizés), ceux d'Ouest, ou encore ceux d'Est polaires. Les courants marins, peuvent être extrêmement rapides (jusqu'à environ 3 mètres par seconde) [2].

I.3.2. Courants profonds

Passés les 800m de profondeur, les vents n'ont plus aucune influence sur les courants. Les courants profonds (plus de 400m de profondeur) sont donc issus de différents phénomènes dont certains communs aux courants de surface.

Ils sont d'abord basés sur des différences de température (l'eau froide est plus dense que celle chaude) et de salinité (l'eau salée est plus dense que celle douce), entre les différentes couches de l'océan. Les plus profonds portent le nom de courant « thermohalin » et ceux qui vont un peu moins en profondeur portent le nom de circulation « thermohaline ». Les eaux chaudes de surface se chargent en sel, à cause de l'évaporation ce qui tend à les rendre plus denses.

Ces deux types de courants sont dépendants l'un de l'autre et interagissent ensemble. La différence de température de l'un par rapport à l'autre permet le déplacement et vice et versa [2].

I.4. Courants de marée

Le courant de marée est un courant marin engendré par les marées. Sa force et sa direction évoluent avec le moment de la marée. Ils sont dus, comme leur nom l'indique, aux mouvements répétitifs des marées. L'origine de ces courants est la force de gravité de la Terre avec la Lune, dont la direction est modifiée en fonction de la rotation de la Terre. L'eau est en quelque sorte repoussée à l'opposé de la lune, et comme la Terre tourne à la fois autour du Soleil et en même temps sur elle-même, cela a pour conséquence de créer des mouvements de marées, qui peuvent être exploitables à certains endroits précis du globe. La force des marées évolue dans le temps suivant le moment de marée mais reste une ressource facilement prédictible. Les courants de mers peuvent être très forts, la vitesse maximale d'un courant est souvent lors du marnage et dépend également de la configuration des fonds. Les courants de marées sont notamment très forts dans les raz [2].

I.5. Concepts et fonctionnement de l'hydrolienne

I.5.1. Définition d'une hydrolienne

L'hydrolienne est une machine ou un groupe hydro-électrique constitué, d'une part, d'une turbine hydraulique ou « hélice » ; et d'autre part, de générateur électrique et d'équipements de transmission et de régulation destiné à fonctionner dans l'eau [3].

Les hydroliennes sont conçues dans le but de récupérer l'énergie cinétique des courants d'eau. Elles peuvent être utilisées en milieu fluvial (canal, rivière, fleuve), comme en milieu marin (courants marins et courants de marées) [4].

I.5.2. Composants d'une hydrolienne

L'hydrolienne est composée des éléments suivants :

- **Le mât ou ancre** : Il permet de fixer l'hydrolienne sur le fond marin.
- **La turbine** : Portant plusieurs pales (deux à dix), elle capte l'énergie cinétique et se met en rotation sous l'effet des courants.
- **Le générateur** : Il est composé des parties suivantes :
 - **Le rotor** : C'est l'axe sur lequel sont fixées les pales. Il est conçu de manière à tourner toujours dans le même sens.
 - **L'alternateur** : C'est le générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique fournie par la turbine au rotor en énergie électrique.
 - **Le flotteur** : C'est un élément réglable permettant d'obtenir un meilleur rendement.
 - **Le stabilisateur** : C'est le système qui permet à l'hydrolienne d'extraire l'énergie dans les deux sens.

Ces éléments constitutifs de l'hydrolienne sont illustrés sur la figure I.1 ci-dessous.

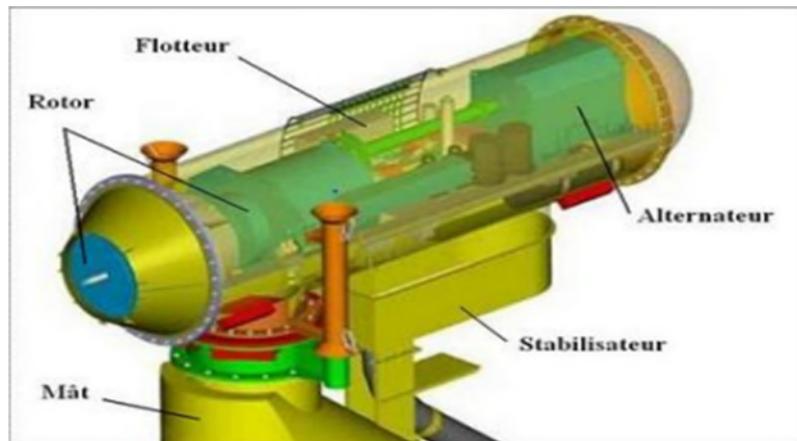


Figure I.1 : Composants d'un générateur hydrolien [5].

I.5.3. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une chaîne de conversion hydrolienne est semblable à celui d'une chaîne de conversion éolienne avec l'existence de quelques différences. La densité de l'eau est 800 fois plus grande que celle de l'air, pourtant, la vitesse des vents est généralement supérieure à celle des courants marins. De plus, à dimensions égales, la production d'électricité obtenue par les hydroliennes est plus importante que celle obtenue par les éoliennes. Le

fonctionnement se déroule comme suit : les pâles de la turbine transforment l'énergie cinétique des courants marins en énergie mécanique sur l'arbre du générateur. L'arbre principal dans la nacelle entraîne un alternateur pour générer de l'énergie électrique. L'utilisation d'un multiplicateur permet d'augmenter la vitesse du rotor (de 12 à 15 tr/mn) jusqu'à atteindre une vitesse de l'ordre de 1500 tr/mn. Les convertisseurs de puissance permettent l'adaptation de la fréquence du courant généré par l'hydrolienne à celle du réseau électrique (50 Hz). La tension générée par l'alternateur est augmentée en utilisant un transformateur de puissance, installé à l'intérieur de la nacelle ou du mât, afin d'obtenir une tension dont la valeur est de l'ordre de 20 ou 30 kV [5].

I.6. Classification des hydroliennes

Suivant la technologie et le mode d'extraction, on peut classer les hydroliennes en deux grandes catégories.

I.6.1. Classification selon la technologie

➤ Hydroliennes à axe horizontal

La technologie utilisée est proche de celle de l'éolienne. Ces hydroliennes sont généralement bipales ou tripales (figure I.2). Elles sont fixées sur le fond marin à l'aide d'un pieu et leur profondeur d'implantation est estimée à quelques dizaines de mètres (inférieure à 100m). L'atout majeur de cette technologie est son meilleur rendement de conversion par rapport aux autres.



Figure I.2 : Hydrolienne à axe horizontal ou à flux axial [1].

➤ Hydroliennes à axe vertical

Elles sont constituées d'une plateforme flottante contenant un générateur entraîné par une turbine tripale (figure I.3). L'avantage d'un tel système est son indépendance vis-à-vis du sens du courant et son inconvénient réside dans le phénomène de cavitation qui agit sur toute la pale.

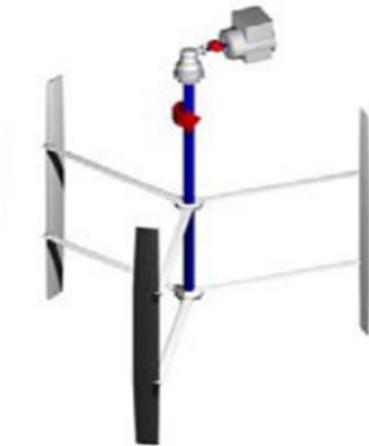


Figure I.3 : Hydrolienne à axe vertical ou à flux transverse [1].

➤ Technologie à aile battante

C'est généralement un trépied fixé sur le fond marin dont les pales font face aux courants (figure I.4). Les oscillations du bras entraînent le pompage du fluide pour générer de l'énergie. Le principal avantage de ce système est l'absence quasi-totale du risque de cavitation dû à la forme des pales. Le pompage du fluide alimente un moteur hydraulique qui est couplé au générateur électrique, par conséquent, l'inconvénient d'un tel système est qu'en plus du générateur il faut obligatoirement un moteur hydraulique.



Figure I.4 : Hydrolienne à aile battante ou oscillante [1].

➤ Hydroliennes utilisant une roue à aubes flottantes

Elles sont très proches de la forme conventionnelle des moulins à eau (figure I.5). À mi immergées, elles sont équipées d'un cylindre étanche qui tourne sous l'effet des courants. Ce mouvement entraîne un générateur électrique qui peut être placé soit sur le côté, soit à l'intérieur du cylindre. L'atout principal de cette hydrolienne est sa simplicité, son faible coût et sa facilité de maintenance par rapport aux hydroliennes totalement immergées. Le mouvement des eaux de surface est lié en partie au vent, ce qui fait que cette forme d'énergie

est aléatoire et son intégration au réseau devient plus délicate que celle des hydroliennes totalement immergées. De plus cette technologie est moins acceptée car elle gêne la navigation et la pêche et présente des risques en cas de coupure des amarres.

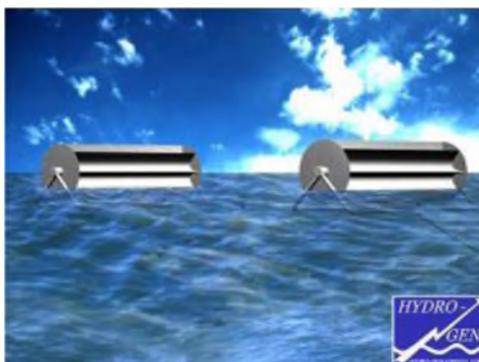


Figure I.5 : Hydroliennes utilisant des roues à aubes flottantes [1].

I.6.2. Classification suivant le mode de récupération

➤ Mode libre

La turbine est placée dans l'environnement marin et elle récupère son énergie cinétique sans l'intervention d'aucun autre dispositif. C'est le cas des technologies citées dans la première classification [1].

➤ Mode canalisé (effet venturi)

Ces hydroliennes exploitent l'énergie marine suivant «l'effet venturi», c'est-à-dire l'accélération d'un fluide dans une conduite dont le diamètre se rétrécit alors, une petite turbine peut être utilisée pour produire une quantité plus grande d'énergie. Les prototypes déjà installés utilisent une turbine hydrolienne à axe horizontale. Ce concept a déjà été utilisé pour la propulsion des navires.

Certains prototypes sont capables de fonctionner d'une manière bidirectionnelle et elles disposent d'un système permettant de faire sortir la turbine de la conduite, minimisant ainsi les difficultés d'entretien [1].

I.7. Exigences pour l'implantation d'hydrolienne

➤ Spécifications d'une hydrolienne

L'hydrolienne est une machine qui répond à plusieurs critères. D'abord, elle doit se maintenir en place et résister aux forces hydrodynamiques du courant. Les structures métalliques et le système d'ancrage doivent résister à la corrosion [3].

➤ Critères d'implantation

Il faut d'abord déterminer les besoins spécifiques correspondants à chaque type d'hydrolienne ensuite, choisir le bon lieu assurant la fixation la plus stable et enfin mettre en évidence les contraintes environnementales.

Le grand défi lancé pour ce type d'énergie est la réduction du coût de réalisation à savoir celui de la fabrication du système tout entier jusqu'à la mise en place définitive et opérationnelle de l'hydrolienne. Mais, jusqu'ici la réalisation de ce type d'installation est coûteuse. Cependant, les recherches sur l'amélioration de l'hydrolienne ne cessent de se développer. Actuellement, il existe, par exemple, des machines exploitables à faible profondeur même de quelques mètres.

Par ailleurs, en ce qui concerne les matériaux constituant le système d'ancrage, il a été prouvé que l'acier est meilleur que le béton. Deux compagnies d'électricité et trois bureaux d'ingénieurs danois ont réalisé ensemble une étude pionnière en 1996-1997 sur la conception et les coûts des fondations installés en mer. L'étude a conclu que, dans le cas de fondations destinées à un parc, l'acier est beaucoup plus compétitif que le béton [3].

➤ Maintenance

La maintenance se présente sous différents types. Premièrement, il est obligatoire de changer les composants de l'hydrolienne lorsque des pièces sont hors d'état de fonctionner. Deuxièmement, à part les réparations, la maintenance consiste aussi à faire un suivi et le contrôle du système tout entier.

Par ailleurs, durant l'opération de suivi et de réparation, il est préférable d'utiliser des lubrifiants dont la viscosité est élevée, des para-huiles de haute étanchéité, des coussinets et des hélices suffisamment résistant pour minimiser la fréquence de maintenance [3].

I.8. Avantages et inconvénients des hydroliennes

➤ Avantages

- La production d'électricité obtenue par les hydroliennes est plus importante que celle obtenue par les éoliennes malgré la réduction de sa taille par rapport à celle d'une éolienne. Ceci est grâce à la densité de l'eau qui est de l'ordre de 800 fois celle de l'air.
- Les courants marins ne sont pas aléatoires mais ils sont généralement prévisibles (en utilisant les éphémérides) alors on peut estimer d'avance la production d'électricité.
- L'énergie obtenue à partir des courants marins est gratuite et n'engendre pas des déchets.
- Existence de nouvelles structures d'hydroliennes écologiques semi-immergés qui ne possèdent aucun effet néfaste sur les poissons.
- Discrète dans les paysages, elles n'émettent pas de bruit audible.

➤ Inconvénients

- Pour assurer un bon fonctionnement d'une hydrolienne, il faut éviter l'évolution des algues et des organismes à son entourage, en utilisant un ensemble des

produits toxiques pour la faune et la flore marine appelé un "antifouling ". L'utilisation régulière de ces produits est inenvisageable puisqu'elle se fait sous l'eau et elle engendre aussi un risque pour l'environnement.

- Dans le cas où les eaux sont turbides, l'érosion par le sable des pâles de la turbine ou des pièces mobiles est très forte. Par conséquent, la présence d'un entretien fréquent est nécessaire, mais, il est difficile puisqu'un tel entretien permet à l'eau de pénétrer et endommager tous les systèmes (électriques et mécaniques).
- Les poissons et les mammifères marins peuvent heurter les pâles de la turbine ce qui provoque leurs blessure.
- Près d'un million de fois plus cher que les éoliennes (3,8 millions d'euro pour un mégawatt installé pour une hydrolienne alors que 2,8 millions d'euro suffisent pour une éolienne), puisqu'il nécessite un type spécial des câbles sous-marins [5].

I.9. Convertisseurs électromécaniques

Deux types de convertisseurs électromécaniques sont généralement utilisés dans l'industrie hydrolienne pour la génération d'énergie électrique. Ces convertisseurs sont des génératrices asynchrones à double alimentation ou des génératrices synchrones à aimants permanents. Dans notre travail on s'intéresse à la génératrice synchrone à aimants permanents (MSAP).

La MSAP est très utilisée dans les applications hydroliennes, notamment, à cause de son bon rendement de 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. Une MSAP a grand nombre de pair de pôles est directement entraînée par la turbine, sans nécessité le multiplicateur de vitesse qui cause des pertes de puissance extraite. 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. La connexion au réseau électrique des systèmes de production d'énergie cinétique à base d'une MSAP exige une interface d'électronique de puissance. La figure I.6 ci-dessous illustre la chaîne de conversion du système hydrolienne-MSAP connecté au réseau électrique [1].

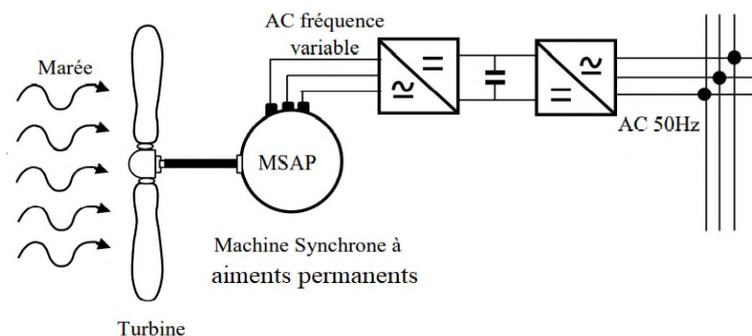


Figure I.6 : Structure de la chaîne de conversion utilisant une GSAP couplée au réseau [1].

I.10. Conclusion

L'hydrolienne est une solution prometteuse, puisqu'elle utilise une énergie renouvelable et gratuite. On s'intéresse de plus en plus à cette énergie, tant qu'elle respecte l'environnement, elle est aussi, plus puissante que les éoliennes. Mais bien, qu'elle ait beaucoup d'avantages, ses inconvénients sont très importants, le coût élevé de cet investissement et sa fragilité ont empêché son bon développement.

Le prochain chapitre est consacré à présenter et à modéliser les éléments de la chaîne de conversion hydrolienne.

Chapitre II

II.1. Introduction

La modélisation est une étape primordiale qui précède tout calcul de commande et les tests de simulation. Généralement pour les systèmes physiques, cette modélisation est la caractérisation de leur comportement par des équations mathématiques. Ces équations sont différentielles si le système évolue de manière continue dans le temps et elles sont récurrentes s'il évolue d'une manière discrète.

Dans ce chapitre, nous développons le modèle mathématique des éléments de la chaîne de conversion hydrolienne à base d'une MSAP.

II.2. Présentation de la chaîne de conversion hydrolienne

Le schéma suivant présente les différents éléments constitutifs de la chaîne de conversion hydrolienne. Cette dernière est composée d'une turbine marine et une machine synchrone à aimant permanent couplée à deux convertisseurs de puissance AC-DC et DC-AC où un bus continu est placé entre ces deux derniers.

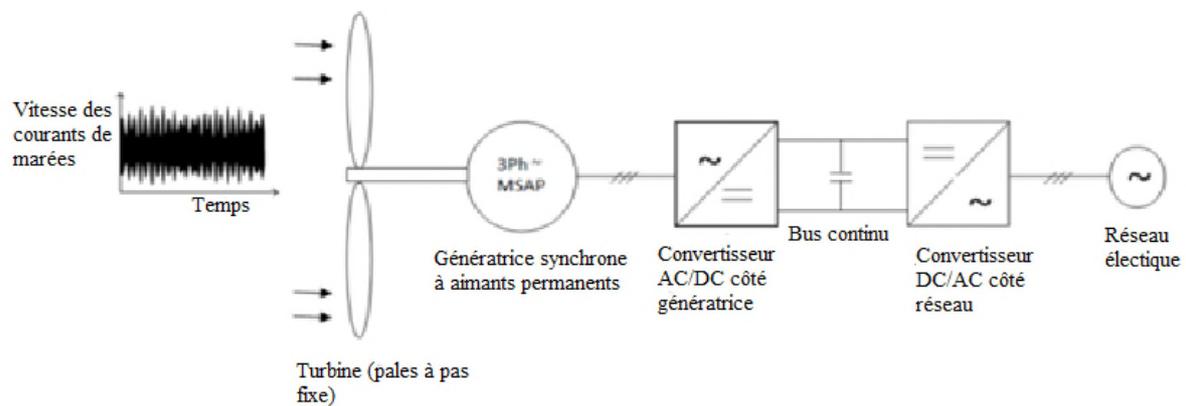


Figure II.1 : Structure de la chaîne de conversion hydrolienne en boucle ouverte [6].

II.3. Modélisation des composants de la chaîne de conversion hydrolienne

II.3.1. Modélisation de la marée

La marée est caractérisée par sa vitesse et les informations pour une zone donnée (valeurs des courants de vives ou mortes eaux, et du coefficient de marée) permettant d'extrapoler son modèle dynamique sous l'approximation suivante [1] :

$$V_m = V_{me} + \frac{(c-45).(V_{ve}+V_{me})}{95-45} \quad (\text{II.1})$$

Où :

95 et 45 : Sont les coefficients de marée moyens correspondant respectivement aux vives et mortes eaux.

V_m , V_{ve} et V_{me} : Sont respectivement les vitesses de la marée, des vives et mortes eaux.

c : Le coefficient de marée.

II.3.2. Modélisation de la turbine hydrolienne

La turbine marine permet la transformation de l'énergie cinétique obtenue à partir des courants marins, en énergie mécanique [5].

Quelques hypothèses sont définies ci-dessous afin de simplifier la modélisation de la turbine :

- Le coefficient de frottement par rapport à l'eau est très faible ;
- Toutes les forces de poussées sont égales grâce à une répartition uniforme de la vitesse des courants marins ;
- Les pertes de frottements côté turbine sont très négligeables devant les pertes par frottement côté génératrice.

L'expression de la puissance mécanique pour la turbine marine est la même que celle d'une éolienne, elle est donnée par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi r^2 V_m^3 \quad (\text{II.2})$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'eau (1024 kg/m³).

r : Rayon de la turbine.

$C_p(\beta, \lambda)$: Coefficient de puissance, il caractérise la capacité de l'hydrolienne à capter l'énergie des courants marins.

La valeur maximale de C_p est estimée entre 0.35 et 0.5 pour le fonctionnement normal de l'hydroliennes. En effet, sur la base des résultats expérimentaux et pour une turbine donnée, ce coefficient peut être approximé par une équation qui dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle de direction des pâles β . La figure II.2 illustre la courbe de C_p en fonction de λ [3].

$$C_p(\beta, \lambda) = \frac{1}{2} \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 0.5 \right) e^{-\left(\frac{21}{\lambda_i}\right)} \quad (\text{II.3})$$

$$\lambda = \frac{r \cdot \omega_m^*}{V_m} \quad (\text{II.5})$$

$$C_m = \frac{P_m}{\omega_m^*} \quad (\text{II.6})$$

Tel que :

ω_m^* : Est la vitesse de la turbine.

C_m : Le couple de la turbine.

Le paramètre λ_i^{-1} est défini comme suit :

$$\lambda_i^{-1} = (\lambda + 0.008\beta)^{-1} - 0.035(1 + \beta^3)^{-1}$$

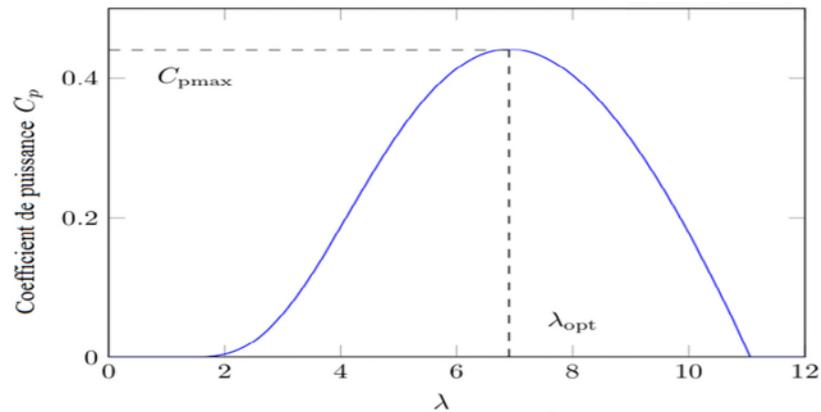


Figure II.2 : Coefficient de puissance de la turbine [3].

II.3.3. Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

L'inducteur de la MSAP est remplacé par des aimants permanents. L'utilisation de ces derniers présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques. La MSAP est utilisée largement dans plusieurs applications comme les machines à outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique... etc.

La MSAP est un système complexe alors sa modélisation est conçue, en considérant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La bobine du stator est connectée en étoile alors l'élément homopolaire des courants est éliminé ;
- La saturation du circuit magnétique est négligée alors les expressions des flux magnétiques sont des fonctions linéaires des courants des phases ;
- La distribution de la FMM dans l'entrefer est sinusoïdale donc les harmoniques d'espace sont négligés.
- Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont négligées.
- L'effet de peau et celui de la température sont négligés.

Mise en équation de la machine synchrone à aimants permanents

Le schéma représentatif de la MSAP est donné par la figure II.3 suivante :

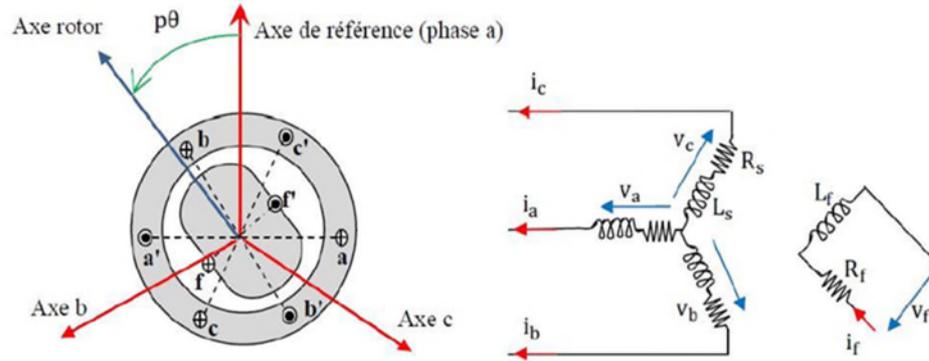


Figure II.3 : Représentation de la MSAP [7].

II.3.3.1. Equations électriques dans le repère fixe (abc)

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\Psi_s] \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; [\Psi_s] = \begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \end{bmatrix}$$

Où :

$[V_s]$: Vecteur des tensions statoriques.

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

$[i_s]$: Vecteur des courants statoriques.

$[\Psi_s]$: Vecteur des flux statoriques.

En vertu de l'hypothèse d'une répartition spatiale sinusoïdale de l'induction, les flux induits par les aimants dans les trois phases statoriques (abc) sont donnés comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{4\pi}{3} \\ \cos \frac{4\pi}{3} & \cos 0 & \cos \frac{2\pi}{3} \\ \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{4\pi}{3} & \cos 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \phi_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Avec:

$[\Psi_{as} \ \Psi_{bs} \ \Psi_{cs}]^T$: Vecteur des flux dans les axes (abc).

ϕ_f : Amplitude du flux des aimants permanents.

L_s : L'inductance propre de chaque phase statorique.

II.3.3.2. Equations électriques dans le repère de Park (dq)

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques, fixes et déphasées de $2\pi/3$, en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et elles sont liées au rotor.

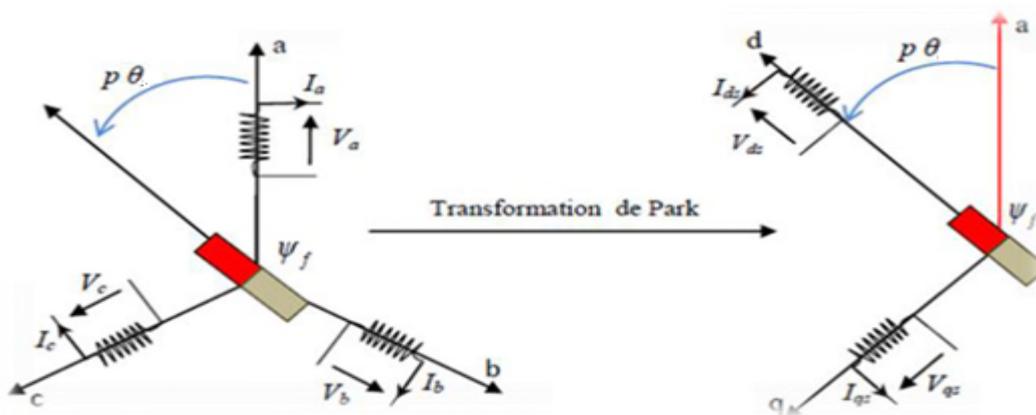


Figure II.4 : Représentation de la MSAP dans le repère (dq) [7].

La transformation de Park permet d'obtenir une machine biphasée fictive, équivalente à celle triphasée, en utilisant la matrice $[P(\theta)]$. Cette dernière relie les grandeurs des deux repères (abc) et (dq) par l'équation suivante :

$$X_{dqo} = [P(\theta)].X_{abc}, \text{ où } X_{abc} = [P(\theta)]^{-1}.X_{dqo} \quad (\text{II.9})$$

La matrice de Park est donnée comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

L'inverse de $[P(\theta)]$ est donnée par :

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

Les équations électriques de la MSAP dans le repère (dq) en mode moteur sont données par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} V_d = R_d \cdot i_d + L_d \cdot \frac{d}{dt} i_d - \omega \cdot L_q \cdot i_q \\ V_q = R_q \cdot i_q + L_q \cdot \frac{d}{dt} i_q + \omega \cdot L_d \cdot i_d + \omega \cdot \phi_f \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

En fonctionnement génératrice, on inverse le sens des courants, et on obtient les équations électriques de la GSAP suivantes :

$$\begin{cases} V_d = -R_d \cdot i_d - L_d \cdot \frac{d}{dt} i_d + \omega \cdot L_q \cdot i_q \\ V_q = -R_q \cdot i_q - L_q \cdot \frac{d}{dt} i_q - \omega \cdot L_d \cdot i_d + \omega \cdot \phi_f \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

(R_d, R_q) : Sont les résistances statoriques dans le repère (dq).

(L_d, L_q) : Sont les inductances statoriques dans (dq).

(i_d, i_q) et (V_d, V_q) : Sont les courants et les tensions direct et en quadrature.

ω : Pulsation électrique.

II.3.3.3. Equations des flux magnétiques

Les flux magnétiques dans le repère (dq) sont exprimés par le système suivant :

$$\begin{cases} \Psi_d = -L_d \cdot i_d + \phi_f \\ \Psi_q = -L_q \cdot i_q \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

II.3.3.4. Equations mécanique et du couple électromagnétique

Le modelé électromécanique de la GSAP est complété est composé aussi de l'expression du couple électromagnétique ainsi que l'équation mécanique.

L'expression du couple électromagnétique dans le repère (dq) est comme suit :

$$C_{em} = \frac{3}{2} n_p [(L_q - L_d) i_q i_d + i_q \phi_f] \quad (\text{II.15})$$

Avec :

n_p : Nombre de paire de pôle.

La dynamique de la partie mécanique de la GSAP est donnée par l'équation suivante [7] :

$$C_m - C_{em} = J \frac{d\omega_m}{dt} + f_{VF} \cdot \omega_m \quad (\text{II.16})$$

Où

C_m : Couple moteur (mécanique) appliqué sur la génératrice.

J : Moment d'inertie total (machine et hydrolienne).

f_{VF} : Coefficient des frottements visqueux.

ω_m : Vitesse mécanique.

II.3.4. Modélisation des convertisseurs statiques

L'interface d'électronique de puissance utilisée dans notre étude sont deux convertisseurs de puissance AC-DC et DC-AC généralement appelés convertisseur « Back to Back » (dos à dos), celui du côté génératrice est un redresseur par contre celui côté réseau est un onduleur, où ils sont reliés entre eux par un bus continu (capacité). Le redresseur et l'onduleur ont une structure à interrupteurs de puissance (commandables), constituée des IGBT.

Le rôle du convertisseur côté machine est de réguler la vitesse de rotation de la génératrice et donc du couple (en fonction de la vitesse des courants marins). Tandis que le convertisseur côté réseau, garantit le contrôle de la puissance active et réactive injectée dans le réseau.

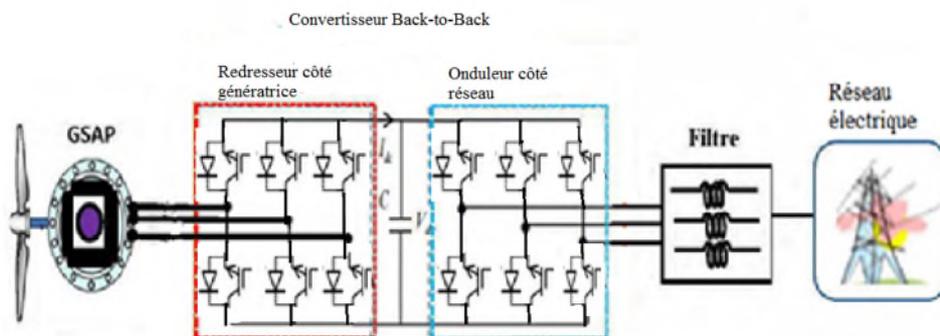


Figure II.5 : Topologie du convertisseur « Back to Back » [8].

La topologie du convertisseur « Back to Back » possède deux convertisseurs à source de tension (redresseur et onduleur) avec des interrupteurs IGBT. En théorie, ces interrupteurs sont considérés comme des commutateurs idéaux. En pratique, ils sont commandés à l'amorçage et au blocage par un modulateur de signaux MLI (PWM en anglais). Les fonctions de commutation (S_a, S_b, S_c) et (W_a, W_b, W_c) ont deux états soit « 1 » ou « 0 ». Habituellement, la valeur de la fonction de commutation prend « 1 » lorsque l'interrupteur est en conduction et « 0 » lorsqu'il est ouvert (ou bloqué).

L'application de la loi de Kirchhoff des tensions à l'entrée du redresseur (figure II.6) et à la sortie de l'onduleur (figure II.7), permet d'écrire les équations régissant leurs fonctionnements [8].

II.3.4.1. Modélisation du redresseur côté génératrice

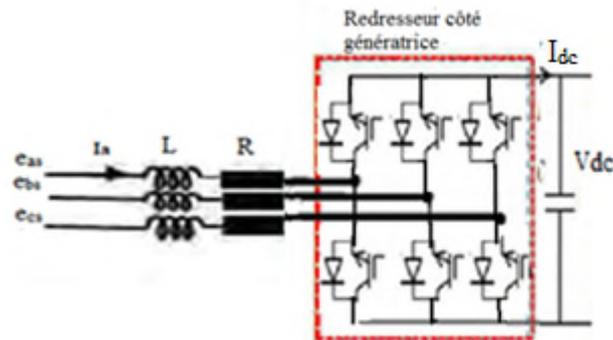


Figure II.6 : Schéma du redresseur côté génératrice [8].

L'application des lois fondamentales d'électricité, nous permet de formuler le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} e_{as}(t) = RI_a(t) + L \frac{dI_a(t)}{dt} + V_a(t) \\ e_{bs}(t) = RI_b(t) + L \frac{dI_b(t)}{dt} + V_b(t) \\ e_{cs}(t) = RI_c(t) + L \frac{dI_c(t)}{dt} + V_c(t) \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

($e_{as}(t), e_{bs}(t), e_{cs}(t)$) : Sont les FEM de la machine.

($I_a(t), I_b(t), I_c(t)$) et ($V_a(t), V_b(t), V_c(t)$) : Sont les courants et les tensions de chaque bras du redresseur.

$R=R_a=R_b=R_c$: Sont les résistances de chaque phase de la machine.

$L=L_a=L_b=L_c$: Sont les inductances de chaque phase de la machine.

Sous forme matricielle, le système (II.17) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} e_{as}(t) \\ e_{bs}(t) \\ e_{cs}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}(t)}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a(t) \\ S_b(t) \\ S_c(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Où $[S_a(t) \ S_b(t) \ S_c(t)]^T$: Est le vecteur des fonctions de commutation des interrupteurs du redresseurs coté génératrice.

$v_{dc}(t)$: Est la tension du bus continu.

II.3.4.2. Modélisation de l'onduleur côté réseau

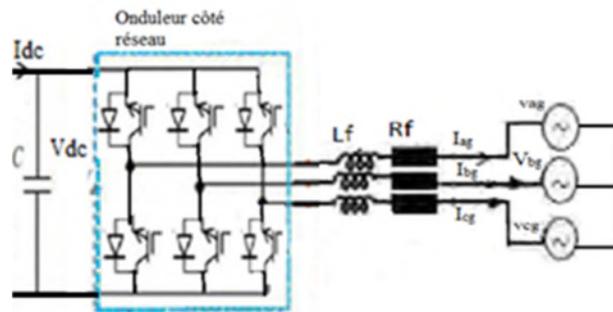


Figure II.7 : Schéma de l'onduleur côté réseau [8].

De la même manière que celle appliquée au redresseur côté GSAP, les équations de tension à la sortie de l'onduleur sont formulées comme suit :

$$\begin{cases} V_{ag}(t) = -R_f I_{ag}(t) - L_f \frac{dI_{ag}(t)}{dt} + V_{a0}(t) \\ V_{bg}(t) = -R_f I_{bg}(t) - L_f \frac{dI_{bg}(t)}{dt} + V_{b0}(t) \\ V_{cg}(t) = -R_f I_{cg}(t) - L_f \frac{dI_{cg}(t)}{dt} + V_{c0}(t) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

($V_{a0}(t)$, $V_{b0}(t)$, $V_{c0}(t)$) : Sont les tensions à la sortie de l'onduleur.

($I_{ag}(t)$, $I_{bg}(t)$, $I_{cg}(t)$) et ($V_{ag}(t)$, $V_{bg}(t)$, $V_{cg}(t)$) : Sont les courants et les tensions de ligne du réseau.

R_f : Est la résistance de ligne du réseau.

L_f : Est l'inductance de ligne du réseau.

Sous forme matricielle, l'équation (II.20) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} V_{ag}(t) \\ V_{bg}(t) \\ V_{cg}(t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ag}(t) \\ I_{bg}(t) \\ I_{cg}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_f \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ag}(t) \\ I_{bg}(t) \\ I_{cg}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a0}(t) \\ V_{b0}(t) \\ V_{c0}(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} V_{a0}(t) \\ V_{b0}(t) \\ V_{c0}(t) \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}(t)}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_a(t) \\ W_b(t) \\ W_c(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Où

$[W_a(t) \ W_b(t) \ W_c(t)]^T$: Est le vecteur des fonctions de commutation de l'onduleur coté réseau.

II.3.4.3. Modélisation du bus continu

En appliquant les lois de Kirchhoff au bus continu, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} I_c = I_{dc} - I_{on} \\ C \frac{dV_{dc}(t)}{dt} = S_a(t)I_a(t) + S_b(t)I_b(t) + S_c(t)I_c(t) - (W_a(t)I_{ag}(t) + W_b(t)I_{bg}(t) + W_c(t)I_{cg}(t)) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

I_c : Le courant du bus continu.

I_{on} : Le courant de l'onduleur.

I_{dc} : Le courant redressé.

C : La capacité du bus continu.

II.3.4.4. Modèle d'état du convertisseur « back-to-back » dans les axes (dq)

En appliquant la transformation de Park aux équations (II.18), (II.21) et (II.23), on obtient les systèmes d'équation réduits suivants :

$$\begin{cases} e_d(t) = RI_d(t) + L_d \frac{dI_d(t)}{dt} - \omega L_q I_q(t) + V_{dr}(t) \\ e_q(t) = RI_q(t) + L_q \frac{dI_q(t)}{dt} + \omega L_d I_d(t) + V_{qr}(t) \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

($e_d(t)$, $e_q(t)$) : Les FEM de la machine dans repère (dq).

($I_d(t)$, $I_q(t)$) et ($V_{dr}(t)$, $V_{qr}(t)$) : Les courants et les tensions du redresseur dans (dq).

$R=R_d=R_q$: Les résistances de la machine dans (dq).

$L_d=L_q$: Les inductances de la machine dans (dq).

ω : Pulsation électrique de la machine.

$$\begin{cases} V_{gd}(t) = -R_f I_{gd}(t) - L_f \frac{dI_{gd}(t)}{dt} + \omega_g L_f I_{gq}(t) + V_{ondd}(t) \\ V_{gq}(t) = -R_f I_{gq}(t) - L_f \frac{dI_{gq}(t)}{dt} - \omega_g L_f I_{gd}(t) + V_{ondq}(t) \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

$$\frac{dV_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C} [S_d(t)I_d(t) + S_q(t)I_q(t) - (W_d(t)I_{gd}(t) + W_q(t)I_{gq}(t))] \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{rd}(t) = S_d(t)V_{dc}(t) \\ V_{rq}(t) = S_q(t)V_{dc}(t) \\ V_{ondd}(t) = W_d(t)V_{dc}(t) \\ V_{ondq}(t) = W_q(t)V_{dc}(t) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Où :

($V_{gd}(t)$, $V_{gq}(t)$) et ($I_{gd}(t)$, $I_{gq}(t)$) : Sont les tensions et les courants de ligne du réseau dans le repère (dq).

($V_{ondd}(t)$, $V_{ondq}(t)$) : Sont les tensions à la sortie de l'onduleur dans le repère (dq).

ω_g : La pulsation électrique du réseau.

($S_d(t)$, $S_q(t)$), ($W_d(t)$, $W_q(t)$) : Les fonctions de commutation dans (dq) du redresseur et de l'onduleur respectivement.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, une modélisation complète du système de production d'énergie hydrolienne a été présentée. Les courants de marée entraînent la turbine. La performance hydrocinétique de cette turbine est caractérisée par son coefficient de puissance qui est extrapolé à partir des courbes expérimentales d'hydrolienne. Ensuite, une attention particulière a été portée sur la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents. Pour réduire la complexité des équations de la GSAP ainsi que du convertisseur, nous avons utilisé la transformation de Park. Le calcul de la commande non linéaire de la GSAP fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre III

III.1. Introduction

Un système non linéaire commandé est modélisé en général par un ensemble d'équations (en général différentielles) non linéaires, décrivant l'évolution temporelle de ces variables constitutives, sous l'action d'un nombre fini de variables indépendantes appelées entrées ou commandes, qu'on synthétise pour réaliser certains objectifs.

Le modèle de la GSAP est multi-variable et fortement couplé alors pour sa commande, on utilise la théorie de la passivité qui est un concept important en l'automatique pour l'analyse et la commande des systèmes non linéaires. La commande basée sur la passivité (CBP) permet de commander la GSAP afin qu'elle extrait le maximum de puissance disponible sur l'arbre de l'hydrolienne.

La commande de l'onduleur côté réseau est réalisée par un contrôleur vectoriel avec découplage des courants.

La vérification des performances du système en boucle fermée, des tests de simulation ont été réalisés sous MATLAB/Simulink.

III.2. Commande de la génératrice synchrone à aimants permanents

Le contrôle de la GSAP peut s'opérer par différentes méthodes exposées dans [9]. La CBP est une commande non linéaire très sollicitée pour la commande des machines électriques. Dans ce paragraphe, on présente les étapes de calcul de CBP en courant (CBPC) [11].

III.2.1. Commande basée sur la passivité en courant

On synthétise une CBP en utilisant le modèle (dq) de la GSAP. L'idée de base est d'asservir d'abord GSAP en courant avec deux boucles PI. Ensuite, le système PI-GSAP constitue celui à commander avec le concept de passivité, où ses signaux de commande sont les courants I_{dq}^* et ces derniers sont les signaux de référence du PI.

III.2.2. Asservissement de la GSAP en courant

Le modèle de la GSAP utilisé pour le calcul de la commande basée sur la passivité en courant (CBPC) est celui représenté dans le référentiel (dq), et il est donné par les relations suivantes [11]:

$$V_{dq} = R_{dq}I_{dq} + L_{dq} \frac{dI_{dq}}{dt} + \omega \Im L_{dq}I_{dq} + \omega \Im \Psi_f \quad (\text{III.1})$$

$$J\dot{\omega} + f_{VF}\omega = C_r - C_{em} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$$C_{em} = \frac{3}{2}n_p((L_d - L_q)I_dI_q + \phi_f I_q) \quad (\text{III.3})$$

Les équations (III.1)-(III.3) peuvent s'écrire en fonction des flux sous la forme suivante :

$$\dot{\Psi}_{dq} + \omega \mathfrak{S} \Psi_{dq} = V_{dq} - R_{dq} I_{dq} \quad (\text{III.4})$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} n_p \Psi_{dq}^T \mathfrak{S} I_{dq} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$\Psi_{dq} = L_{dq} I_{dq} + \Psi_f, L_{dq} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}, I_{dq} = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}, \Psi_f = \begin{bmatrix} \phi_f \\ 0 \end{bmatrix}, \mathfrak{S} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

En général, dans les machines électriques, l'une des sorties à commander est le couple électromagnétique, cette variable constitue l'entrée du sous-système mécanique (qui est linéaire), dont sa constante de temps est largement supérieure à celle du sous-système électrique. Ceci peut conduire à deux échelles de temps pour le problème de commande de la vitesse. D'autre part le sous-système mécanique est considéré comme étant une perturbation passive vue par la CBPC. L'asservissement de la GSAP en courant avec deux boucles PI permet d'obtenir un système dont les entrées sont les courants de référence I_{dq}^* [11].

Nous définissons les courants de référence du GSAP par le vecteur suivant :

$$I_{dq}^* = [I_d^* \quad I_q^*]^T \quad (\text{III.7})$$

Soient les deux boucles de régulation des courants statoriques :

$$v_d = K_{dp}(I_d^* - I_d) + K_{di} \int_0^t (I_d^* - I_d) d\tau \quad (\text{III.8})$$

$$v_q = K_{qp}(I_q^* - I_q) + K_{qi} \int_0^t (I_q^* - I_q) d\tau \quad (\text{III.9})$$

Avec :

$$K_{dp}, K_{di}, K_{qp}, K_{qi} > 0 \quad (\text{III.10})$$

Les deux boucles de régulation proportionnelle et intégrale (PI) sont internes (donc rapides), et elles forcent le vecteur des courants I_{dq} de la GSAP à suivre leurs références I_{dq}^* . La détermination de leurs gains se fait par les méthodes classiques (placement des pôles).

On suppose que les deux boucles PI accomplissent correctement la tâche de poursuite grâce à un choix convenable de leurs gains. En utilisant les équations (III.4)-(III.5) et (III.8)-(III.9), la dynamique du GSAP asservis en courant se réduit au modèle suivant :

$$\dot{\Psi}_{dq} + \omega \mathfrak{S} \Psi_{dq} = -R_{dq} I_{dq}^* \quad (\text{III.11})$$

$$J \dot{\omega}_m + f_{VF} \omega_m = C_m - \frac{3n_p}{2} \Psi_{dq}^T \mathfrak{S} I_{dq}^* \quad (\text{III.12})$$

Le couple développé est :

$$C_{em} = -\frac{3}{2} n_p \Psi_{dq}^T I_{dq}^* \quad (\text{III.13})$$

III.2.3. Conception de la CBPC

La CBP de la GSAP asservis en courant est développée sur le modèle (III.11)-(III.13), dont Les signaux de commandes sont les courants désirés I_{dq}^* . La synthèse de la CBPC utilise le sous-système électrique (III.11) dont celui mécanique (III.12) est considéré comme une perturbation passive [11]. La procédure de synthèse exploite la théorie de Lyapunov.

Soit le vecteur des flux désirés Ψ_{dq}^* , l'erreur de poursuite e_f de cette grandeur est défini par la relation suivante :

$$e_f = \Psi_{dq} - \Psi_{dq}^* \quad (\text{III.14})$$

L'équation dynamique de l'erreur de poursuite du flux est obtenue des équations (III.11) et (III.14). Après calcul, on obtient la relation suivante :

$$\dot{e}_f + \omega \mathfrak{S} e_f = -R_{dq} I_{dq}^* - (\dot{\Psi}_{dq}^* + \omega \mathfrak{S} \Psi_{dq}^*) \quad (\text{III.15})$$

Afin de prouver la convergence de l'erreur de poursuite du flux e_f , on utilise la théorie de stabilité de Lyapunov. Soit la fonction quadratique suivante :

$$V(e_f) = \frac{1}{2} e_f^T e_f \quad (\text{III.16})$$

Après dérivation de V_f le long de la trajectoire (III.15), on obtient l'expression suivante :

$$\dot{V}_f = -e_f^T (\dot{\Psi}_{dq}^* + \omega \mathfrak{S} \Psi_{dq}^* + R_{dq} I_{dq}^*) \quad (\text{III.17})$$

La fonction \dot{V}_f est défini négative si et seulement si, le vecteur de commande I_{dq}^* est choisie sous la forme suivante :

$$I_{dq}^* = -R_{dq}^{-1} (-(\dot{\Psi}_{dq}^* + \omega \mathfrak{S} \Psi_{dq}^*) + K_f e_f) \quad (\text{III.18})$$

Avec :

$$K_f = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \quad \text{où } k_1 > 0, k_2 > 0 \quad (\text{III.19})$$

K_f : Coefficient d'amortissement.

Le vecteur de commande I_{dq}^* dépend du vecteur des flux désirés Ψ_{dq}^* ce qui nécessite sa détermination.

III.2.3.1. Calcul des flux désirés

La GSAP fonctionne à couple maximal si le courant direct I_d est nul, c'est à dire d'après la relation (III.6), le flux Ψ_d suivant l'axe direct se réduit à l'amplitude du flux ϕ_f créé par les aimants permanents. Alors, le flux désiré suivant l'axe direct est choisi ainsi :

$$\Psi_d^* = \phi_f \quad (\text{III.20})$$

Des équations (III.6) et (III.13), le couple désiré est défini par la relation suivante :

$$C_{em}^* = -\frac{3n_p}{2L_q} \Psi_{dq}^{*T} \Im(\Psi_{dq}^* - \Psi_f) \quad (\text{III.21})$$

Le flux désiré suivant l'axe quadratique est calculé en utilisant (III.20) et (III.21), et on obtient l'expression suivante :

$$\Psi_q^* = \frac{2L_q}{3n_p \phi_f} C_{em}^* \quad (\text{III.22})$$

La composante en quadratique du flux désiré Ψ_q^* dépend du couple désiré C_{em}^* alors on doit déterminer cette grandeur.

III.2.3.2. Calcul du couple désiré C_{em}^*

À partir de l'équation mécanique (III.2) et en prenant la vitesse du rotor ω_m égale à sa valeur de consigne ω_m^* , on déduit l'expression du couple désiré qui est donné ci-dessous:

$$C_{em}^* = J\dot{\omega}_m^* + C_m + f_{VF}\omega_m^* \quad (\text{III.23})$$

Où ω_m^* est la vitesse de rotation souhaitée du rotor, qui est la vitesse de la turbine hydrolienne.

Et $\varepsilon_\omega = \omega_m^* - \omega_m$ est l'erreur de suivi de la vitesse du rotor.

Cette expression du couple désiré C_{em}^* présente deux inconvénients : elle est en boucle ouverte et sa convergence est limitée par les paramètres mécaniques (J, f_{VF}). Afin de résoudre ce problème, on introduit un terme de dérivée proportionnelle-intégrale (PID), qui annule l'erreur statique et assure la convergence rapide de l'erreur de poursuite de vitesse ε_ω .

L'expression (III.23) s'exprime comme suit :

$$C_{em}^* = J\dot{\omega}_m^* - k_{cp}\varepsilon_\omega - k_{ci} \int_0^t \varepsilon_\omega d\tau - k_{cd} \frac{d}{dt} \varepsilon_\omega \quad (\text{III.24})$$

Avec :

$$k_{cp} > 0, k_{ci} > 0, k_{cd} > 0$$

Remarque

L'expression (III.18) de la CBPC pour le GSAP peut s'écrire sous la forme suivante :

$$I_{dq}^* = \vartheta - R_{dq}^{-1} K_f \Psi_{dq} \tag{III.25}$$

Avec :

$$\vartheta = -R_{dq}^{-1} (\dot{\Psi}_{dq}^* + (\omega \mathfrak{S} - K_f) \Psi_{dq}^*) \tag{III.26}$$

L'expression (III.26) représente la dynamique désirée.

La figure III.1 ci-dessous représente le schéma bloc la CBPC.

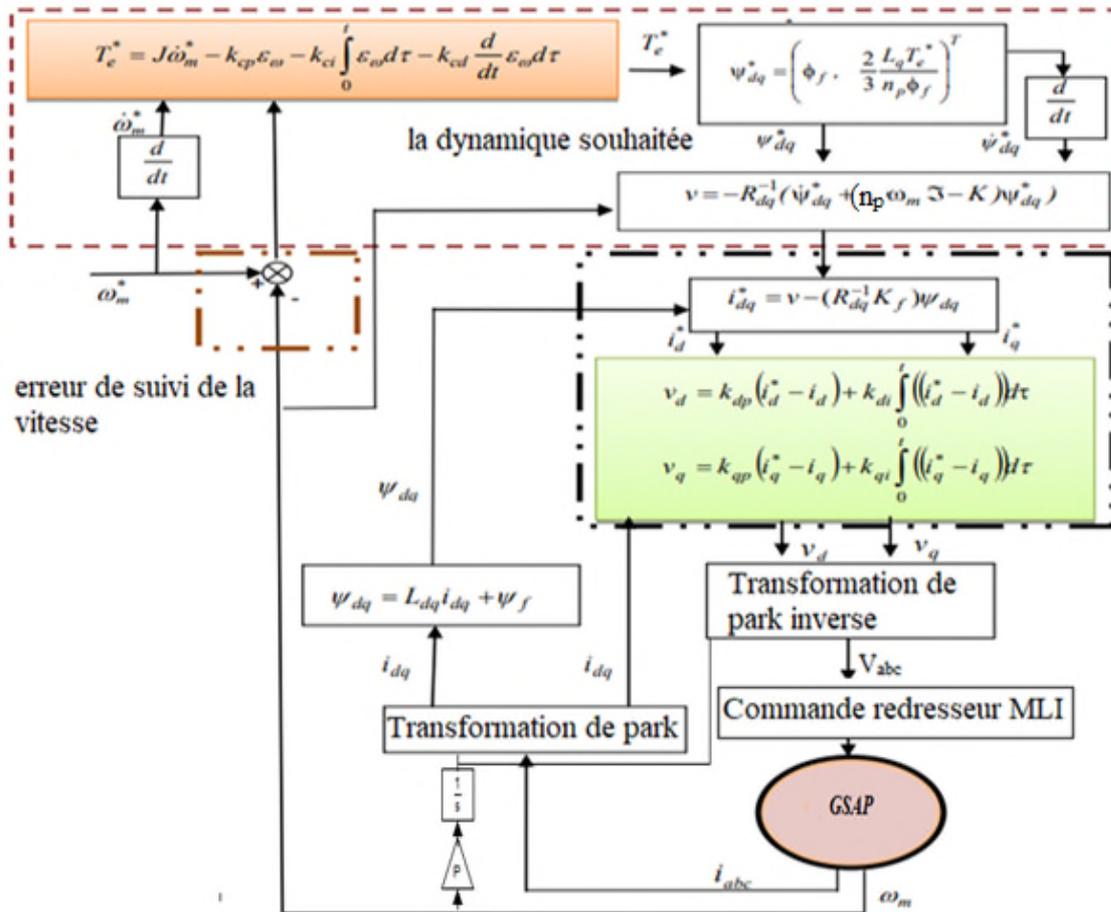


Figure III.1 : schéma bloc de CBPC [11].

III.3. Commande vectorielle de l'onduleur côté réseau

L'onduleur côté réseau est utilisé pour transférer une énergie propre produite par le générateur hydrolien au réseau électrique. La commande de ce convertisseur permet de réguler

la tension du bus continu, tout en ajustant la qualité de flux de puissances active et réactive injectées au réseau pendant la variation de la vitesse des courants marins.

La stratégie de commande de l'onduleur côté réseau est réalisée par deux boucles PI imbriquées. La boucle interne régule le courant de réseau tandis que la boucle externe contrôle la tension du bus continu ainsi que la puissance réactive délivrée au réseau.

Le transfert de la puissance active vers le réseau et l'annulation de celle réactive peut se faire par une commande par orientation de la tension de l'onduleur. L'analyse de cette stratégie de commande découle de l'application de la loi de Kirchhoff à l'onduleur figure (II.5).

En considérant l'équation (II.25) et en négligeant la résistance R_f (car elle a peu d'impact sur la performance du système), on écrit :

$$\begin{cases} V_{gd} = -L_f \frac{dI_{gd}(t)}{dt} + \omega_g L_f I_{gq} + V_{ondd} \\ V_{gq} = -L_f \frac{dI_{gq}(t)}{dt} + \omega_g L_f I_{gd} + V_{ondq} \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

$$\begin{cases} \frac{dI_{gd}(t)}{dt} = \frac{1}{L_f} (\omega_g L_f I_{gq} + V_{ondd} - V_{gd}) \\ \frac{dI_{gq}(t)}{dt} = \frac{1}{L_f} (\omega_g L_f I_{gd} + V_{ondq} - V_{gq}) \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Où les « $\omega_g L_f I_{gq}$ » et « $\omega_g L_f I_{gd}$ » sont des termes de couplage des deux axes (dq). Ces derniers correspondent aux tensions induites de la pulsation dues à la transformation du référentiel fixe vers le synchrone. Le système d'équation (III.28) montre que les dérivées des courants des axes (dq) sont fortement couplées. Ce lien des axes est compensé par un retour non linéaire.

Le principe de cette stratégie de commande, est de maintenir la tension V_g orientée suivant l'axe d. On a donc $V_{gd} = |V_g|$ et $V_{gq} = 0$. Le digramme vectoriel spatial des courants et tensions triphasées du réseau est donné à la figure (III.2).

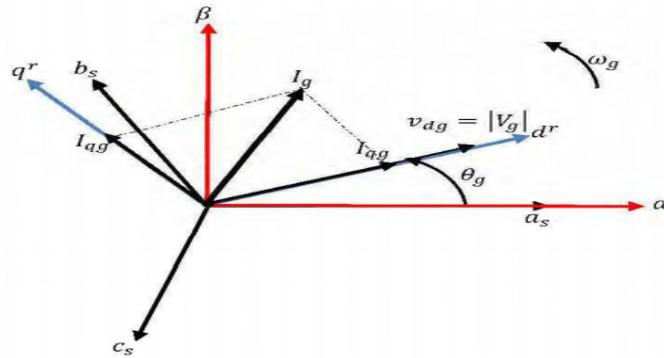


Figure III.2 : Digramme vectoriel spatial des courants et tensions triphasées du réseau [8].

La figure (III.3) présente le schéma synoptique de la commande vectorielle de l'onduleur côté réseau, avec le contrôle des courants découplés. Cette commande possède trois boucles de contrôle, deux boucles internes de régulation des courants (I_{gd} et I_{gq}) du réseau et une boucle externe pour la régulation de la tension (V_{dc}) du bus continu.

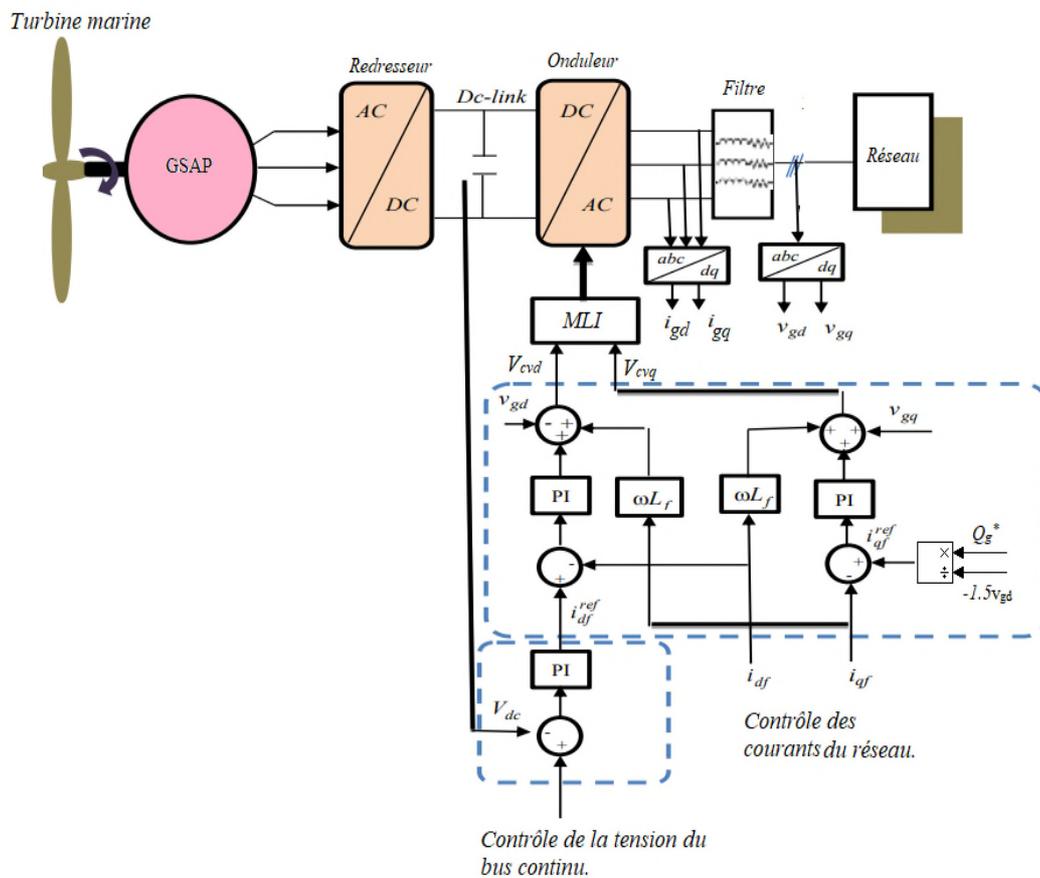


Figure III.3 : Commande de l'onduleur côté réseau [11].

La tension du bus continu est contrôlée par un régulateur PI dont l'expression est donnée par la relation suivante :

$$i_{gd}^{ref} = k_{dcp}(V_{dc-réf} - V_{dc}) + k_{dci} \int_0^t (V_{dc-réf} - V_{dc}) d\tau \quad (III.29)$$

Avec :

$$k_{dcp} > 0 \text{ et } k_{dci} > 0.$$

De même, Les courants de ligne du réseau sont régulés par deux boucles PI, exprimées comme suit :

$$\begin{cases} v_{gd}^{PI} = K_{gp}^d (i_{gd}^{ref} - i_{gd}) + K_{gi}^d \int_0^t (i_{gd}^{ref} - i_{gd}) d\tau \\ v_{gq}^{PI} = K_{gp}^q (i_{gd}^{ref} - i_{gd}) + K_{gi}^q \int_0^t (i_{gd}^{ref} - i_{gd}) d\tau \end{cases} \quad (III.30)$$

Avec :

$$K_{gp}^d > 0, K_{gi}^d > 0, K_{gp}^q > 0 \text{ et } K_{gi}^q > 0.$$

Les puissances active et réactive qui transitent à travers le convertisseur au réseau sont données dans le repère de Park dq par les relations suivantes :

$$P_g = \frac{3}{2} V_{gd} I_{gd} \quad (III.31)$$

$$Q_g = -\frac{3}{2} V_{gd} I_{gq} \quad (III.32)$$

III.4. Résultats de simulation

Aujourd'hui, la simulation numérique est un outil indispensable, permettant de conclure sur le bon fonctionnement d'un système. Elle est une étape indispensable et nécessaire avant tout essai pratique. Elle permet de vérifier et d'analyser le comportement dynamique du système commandé face à des situations normales ou extrêmes. L'avantage des tests de simulation est qu'ils procurent non seulement un gain significatif de temps mais aussi d'argent. Dans la commande des systèmes, ils permettent d'étudier la stabilité et la performance des stratégies de commande développées. Une fois que les résultats de simulation sont satisfaisants et garantissent la stabilité et la sécurité du système commandé, alors ces stratégies peuvent être appliquées sur les systèmes réels.

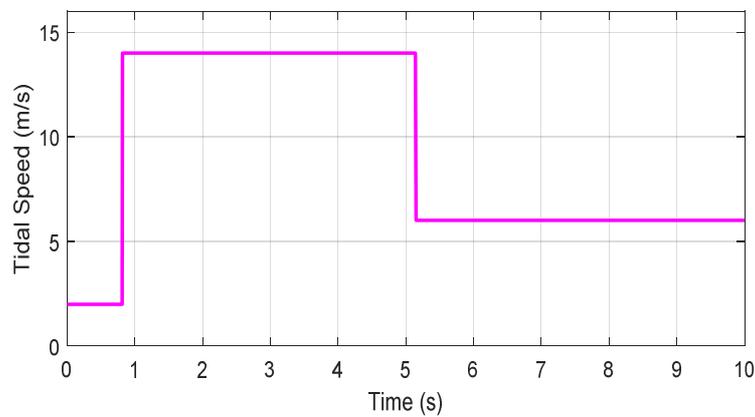
Après avoir décrit la stratégie de contrôle du convertisseur « Back-to-Back », des simulations numériques sous Matlab/Simulink sont réalisées afin de valider les schémas proposés dans les figures (III.1) et (III.3).

Les paramètres utilisés dans la conversion sont indiqués dans l'annexe 1.

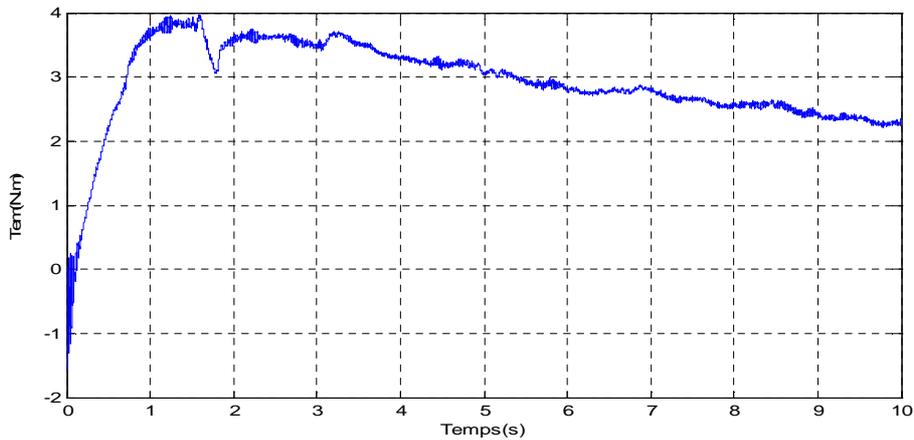
En utilisant la méthode de placement de pôles et des essais de simulations, on a déterminé les gains des différents régulateurs PI ainsi que ceux du PID. Les gains PI des

équations (III.8-9) sont $K_{dp} = K_{qp} = 10$ et $K_{di} = K_{qi} = 8000$. Les gains du PID de l'équation (III.24) sont $K_{cp} = K_{cd} = 0.5$ et $K_{ci} = 500$. Les gains du PI qui régule V_{dc} (équation III.29) sont $K_{acp} = 80$ et $K_{aci} = 9000$. Les gains $K_{gp}^d = K_{gp}^q = 80$ et $K_{gi}^d = K_{gi}^q = 5000$ sont ceux du PI qui contrôle les courants de ligne du réseau. Les valeurs des gains du terme d'amortissement sont $K_1 = K_2 = 100$. Ces derniers sont obtenus par une procédure d'essai avec minimisation d'erreur à partir de valeurs initiales, déterminées en fonction des conditions de stabilité (III.18-19). Les conditions initiales utilisées dans la simulation sont les suivantes : $[I_{dq}(0) \ \omega_m(0)] = [0 \ 0 \ 0]$ pour la GSAP, $V_{dc}(0) = 0V$ et $I_{gdq} = [0 \ 0]$ pour le réseau.

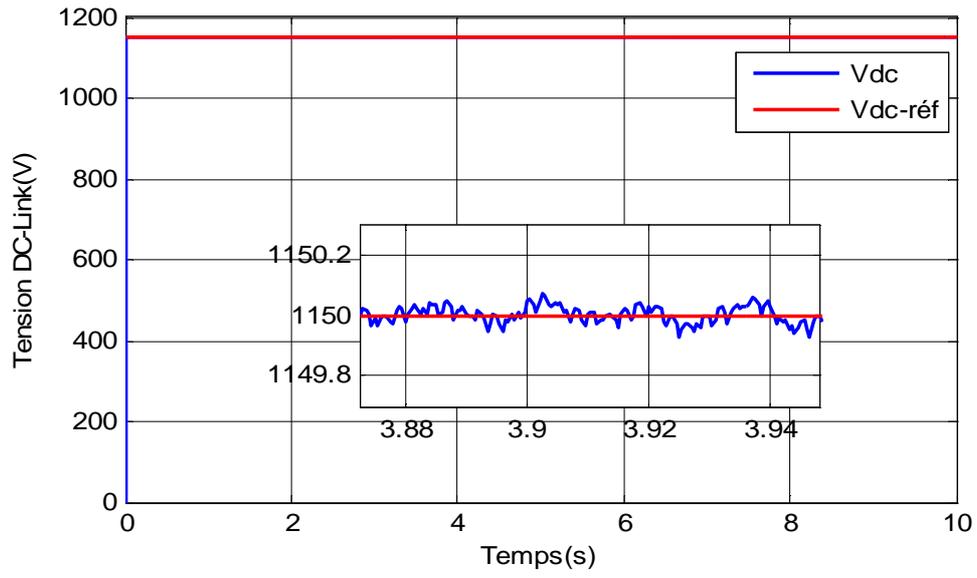
Les résultats de simulations sont donnés sur les figures ci-dessous :



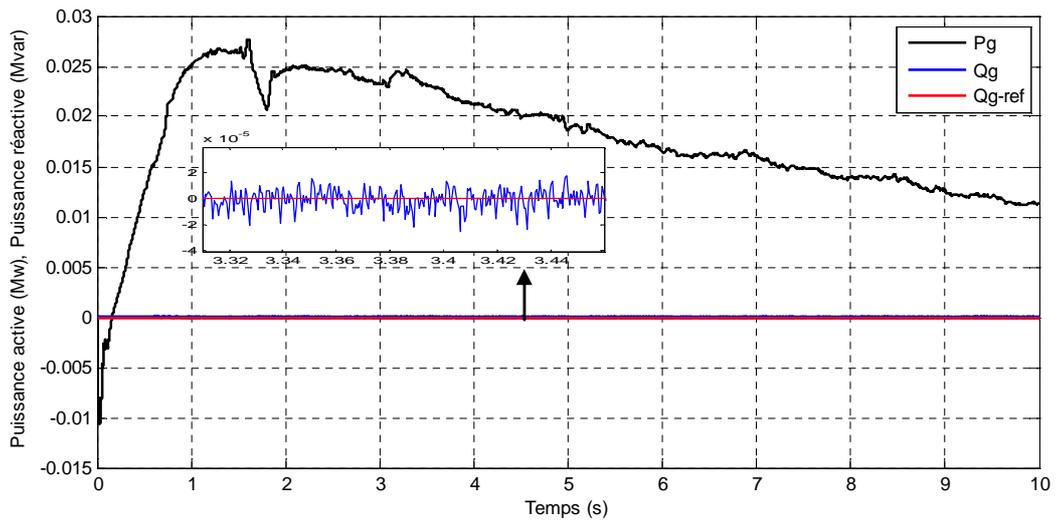
(a)



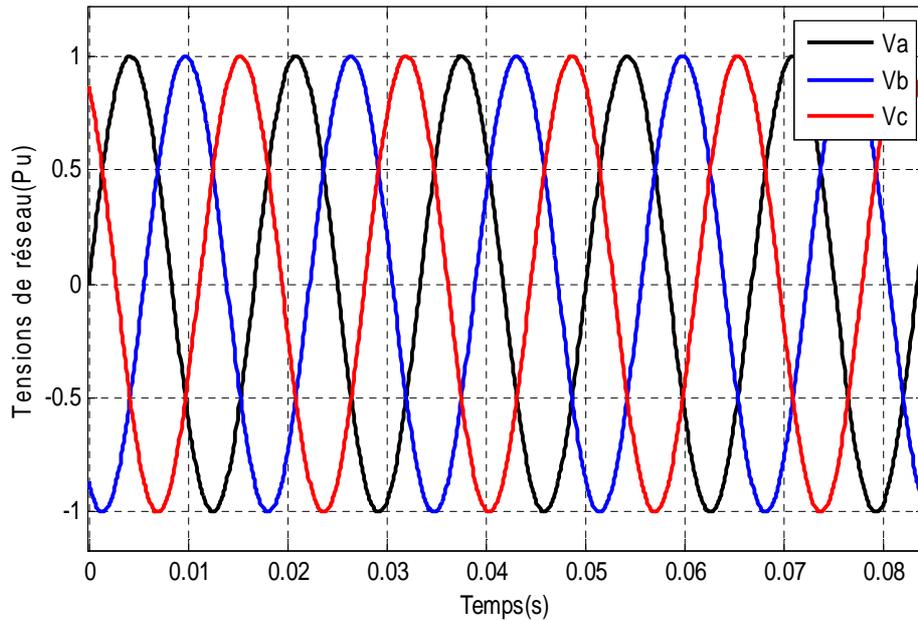
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.4 : Réponse du système en boucle fermée.

(a) Vitesse de la turbine, (b) Couple électromagnétique, (c) Tension du bus continu, (d) Puissance active et réactive, (e) Tensions du réseau.

Dans la Figure (III. 4.a) est illustrée la dynamique de la vitesse de marée utilisée pour tester l'efficacité du système en boucle fermée, avec une variation brusque entre 2 m/s et 14 m/s.

Le couple électromagnétique développé par la GSAP est montré à la Figure (III. 4.b). On remarque que C_{em} se stabilise au régime établi.

La Figure (III. 4.c) présente la dynamique de la tension du bus continu. On constate que V_{dc} est très bien maintenue à la valeur de référence de 1150V, avec une convergence rapide et une erreur statique très faible.

L'évolution des puissances actives et réactives en fonctions du temps sont montrées par la Figure (III.4.d). On remarque que la puissance réactive injectée au réseau est presque nulle, par contre celle active est très importante. Cela montre un bon rendement et une bonne efficacité du système de génération d'énergie.

Dans la Figure (III.4.e), illustre les tensions triphasées du réseau. On remarque qu'elles sont parfaitement sinusoïdales ce qui garantis une énergie transférée au réseau propre.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une stratégie de commande pour le système de conversion de l'énergie hydrolienne à base d'une GSAP.

La stratégie de commande basée sur la passivité en courant pour le convertisseur en mode redresseur coté machine a été étudiée et présentée en détail. Cette commande contrôle la vitesse de rotation de la génératrice et donc du couple en fonction de la vitesse des courants marins variables. Le but majeur de cette commande est d'asservir la vitesse de la génératrice à la vitesse de la turbine hydrolienne, ceux-ci permet d'extraire le maximum de puissance mécanique disponible sur l'arbre de la turbine hydrolienne.

L'analyse détaillée du convertisseur de tension en mode onduleur, côté réseau ainsi que son schéma de contrôle sont présentés. La commande de ce convertisseur est de réaliser trois objectifs à savoir ; réguler la tension du bus continu et maintenir la puissance réactive nulle afin d'injecter une puissance purement active au réseau.

Les résultats de simulation confirment l'efficacité de la stratégie de commande utilisée et montrent de très bonnes performances dynamiques.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et la commande d'une chaîne de conversion d'énergie hydrolienne. Une génératrice synchrone à aimants permanents est associée en entraînement direct à une turbine marine ; ce qui constitue une solution qui permet de réduire très fortement les contraintes de maintenance qui sont parmi les éléments clés qui conditionnent le développement des hydroliennes. Cependant, le choix de la commande à appliquer joue un rôle très important dans le prolongement de la durée de vie d'une hydrolienne et d'empêcher son vieillissement.

La commande globale de ce système a un triple objectif :

L'adaptation de la vitesse de la GSAP à la vitesse de la turbine et la faire tourner à sa puissance maximale, afin de ramener le système à son point de fonctionnement optimal, ce qui veut dire extraire le maximum d'énergie des courants marins, ceci est réalisé par la CBPC,

L'ajustement de la qualité de flux de puissances active et réactive injectées au réseau électrique, pendant la variation de la vitesse des courants marins, ceci par le maintien de la valeur de la puissance réactive à une valeur de référence nulle, ainsi la puissance active injectée au réseau est purement active,

Le contrôle de la tension du bus continu, en fixant une valeur de référence afin que la capacité ne consomme pas l'énergie du système,

Ces derniers sont réalisés par le contrôle vectoriel associé à un PI classique.

Le système en boucle fermée est validé sur l'environnement virtuel MATLAB/Simulink, a donné des résultats qui ont satisfait nos objectifs; car la commande conçue est stable, elle n'est pas influencée par les fluctuations de l'environnement marin, aucune perturbation ne survient dans le réseau électrique, car seule la puissance active est injectée dans ce dernier.

Comme perspectives à ce travail, d'abord une validation sur un banc d'essais du système en boucle fermée. Il sera intéressant d'optimiser tous les gains de l'algorithme de commande synthétisé.

Bibliographie

- [1] M. Dansoko, « Modélisation et commande non linéaire des hydroliennes couplées à un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université Paris 13, 2014.
- [2] <http://sites.google.com/site/tpe2013hydroliennelycéenaval/ii-un-concept-durable-et-environnemental/2-les-courants-marins>, consulté le 27/07/2020.
- [3] R. Miandrisoa, « Conception d'un système de pivotement automatique pour une hydrolienne non réversible », Mémoire d'ingénieur en génie mécanique productique, Université d'Antananarivo, 2013.
- [4] A. M. Andreica, « Optimisation énergétique de chaînes de conversion hydroliennes—modélisation, commandes et réalisations expérimentales », Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, 2009.
- [5] S. Toumi, « Contribution à la commande résiliente aux défaillances des convertisseurs statiques et à la démagnétisation de la génératrice synchrone à aimants permanents d'une hydrolienne », Thèse de doctorat, Université Bretagne Loire, 2017.
- [6] S. Djebbari, F. Scuiller, J-F. Charpentier & M. Benbouzid, « Méthodologie de conception systémique de génératrices à aimants permanents associées avec une hélice à pas fixe : Application aux hydroliennes », Symposium de génie électrique (SGE°14), France, 2014.
- [7] A. Tebbal & M. Sekhri, « Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent », Mémoire de Master en électrotechnique, Université de Jijel, 2019.
- [8] G. P. Nyoumea, « Modèles d'identification et de commande d'un aérogénérateur à machine synchrone à aimants permanents », Mémoire de maîtrise en ingénierie, Université du Québec en Abitibi-temiscamingue, 2018.
- [9] T. A. T. Tameghe, « Modélisation et Simulation d'un Système de Jumelage éolien-diesel Alimentant une Charge Locale », Mémoire de maîtrise en ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue, Canada, 2012.
- [10] Y. Belkhier & A.Y. Achour, « Passivity based current control strategy for PMSG wind turbine », IEEE xplore, ICSRESA, Tebessa, Algeria, 4-5 Dec.2019.

Annexes

Paramètres utilisés dans la simulation :

➤ **La turbine :**

- Rayon de l'hélice : $R = 10 \text{ m}$
- Nombre de pales : $P = 3$
- Inertie totale : $J = 35000 \text{ kg.m}^2$
- Coefficient de frottement visqueux : $f_{VF} = 0.01 \text{ N.m.s/rad}$
- Masse volumique de l'eau : $\rho = 1024 \text{ Kg/m}^3$

➤ **La machine :**

- Puissance nominale : 1.5 MW
- Vitesse nominale : 125 tr/min
- Résistance d'enroulement statorique : $R_s = 0.006 \Omega$
- Inductance cyclique statorique : $L_s = 0.3 \text{ mH}$
- Nombre de paire de pôles : $n_p = 48$
- Flux des aimant permanent : $\phi_f = 1.48 \text{ Wb}$

➤ **Paramètres du bus continu :**

- Valeur de la capacité : $C = 2.9 \text{ F}$
- Tension de bus continue : $V_{dc} = 1150 \text{ V}$
- Valeur de l'inductance de lissage : $R_f = 0.3 \text{ pu}$
- Valeur de l'inductance de lissage : $L_f = 0.3 \text{ pu}$

➤ **Le réseau :**

- Tension d'alimentation : $V_s = 575 \text{ V}$
- Fréquence : 60 Hz