

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Thème

***Commande basée sur la passivité d'un système
de conversion d'énergie hydrolienne***

Préparé par :

BOUKALA Yacine

BENSIKHALED Hazam

Dirigé par :

Mr ACHOUR Abdelyazid

Mr BELKHIER Youcef

Examiné par :

Melle MEZZAH S

Mr HADDAR H

Année universitaire : 2020/2021

Remerciement

« Nous remercions Dieu qui nous a offert la vie et seul capable de nous offrir la joie, le bonheur, la prospérité et la santé. »

Tout d'abord il faut souligner que ce mémoire n'aurait pas vu le jour sans l'aide de nos encadreurs Mr A.Y. Achour et Mr Y. Belkhier envers qu'ils nous sont agréable de présenter nos profondes gratitudes et reconnaissances. Ils ont été toujours disponibles pour nous assister dans les différentes situations auxquelles nous nous sommes confrontés.

Leurs conseils et remarques depuis les orientations initiales ont été pour nous un encouragement décisif, qu'ils trouvent ici notre remerciement les plus humbles et sincères.

Nos vifs remerciements vont aux membres de jury madame MEZZAH.S et monsieur HADDAR.H 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.

Nos remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail, qu'ils trouvent tous ici d'expression de notre gratitude et notre parfaite considération.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail qui aurait pu aboutir et voir la lumière avec l'aide de dieu le tout puissant.

Á ma très chère honorable et aimable mère qui représente pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi..

Á mon très cher père. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

Ensemble vous avez su m'encourager et me soutenir tout au long de mes études. Je dirai donc qu'aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me faire depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Vous représentez la lumière de mon existence et l'étoile brillante de mon réjouissance. Que dieu vous protège.

Á mes Chère sœurs et mes frères et à mes nièces et neveux.

Á toute la famille : Salmi, Touati et Asradj.

Á mon ami Abdrrahim kr et tous les êtres qui me sont chers S.F .

Á tout nôtres promos et à mon binôme Hazam.

A Tous mes amis qui m'ont aidé, encouragé, soutenue et ont été à mes côtés jusqu'au bout.

BOUKALA Yacine

Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail :

❖ *Aux deux êtres qui me sont les plus chères dans ma vie pour, leur générosité, leur soutien et leur patience face aux moments difficiles traversés au cours de ma vie : ma mère et mon père, MERCI.*

❖ *A mes sœurs : Rima et Wissam ;*

❖ *A mes frères, Lyes, Jugurtha, et à tous mes demi-frères, à mes cousins et cousines Lamia, Asma, et tout le reste.*

❖ *A tout la famille Bensikhaled et Medjani, cousins, cousines, oncles et tantes.*

❖ *A ma très chère nièce Hiline, Islam, Deyaa ;*

❖ *A mes amis : Sofiane, Khaled, Benjamin, Houcine, Farhat, Amine, Farouk, Maya et à toutes les filles que je connais.*

❖ *A mon binôme Yacine (Lyes).*

❖ *A toute la promotion 2021 Automatique.*

❖ *Enfin à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

BENSIKHALED Hazam

Liste des symboles et abréviations

V_m : vitesse de la 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 appliquée 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_{a0}, V_{b0}, V_{c0} : 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_{rd}, V_{rq} : les tensions du redresseur dans le repère (d,q).

V_{ondd}, V_{ondq} : les tensions à la sortie 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.

$L_{\alpha\beta}$: la matrice de l'induction statorique dans le repère ($\alpha\beta$).

$i_{\alpha\beta}$: le vecteur du courant statorique dans le repère ($\alpha\beta$).

$R_{\alpha\beta}$: la matrice de la résistance du stator dans le repère ($\alpha\beta$).

$V_{\alpha\beta}$: le vecteur du stator de tension dans le repère ($\alpha\beta$).

$\Psi_{\alpha\beta}(\vartheta_e)$: le vecteur des liaisons de flux dans le repère ($\alpha\beta$).

ϑ_e : la angulaire électrique.

K_{gp}^d, K_{gi}^d : coefficients des actions intégral et proportionnel du régulateur du courant d'axe d.

K_{gp}^q, K_{gi}^q : coefficients des actions intégral et proportionnel du régulateur du courant d'axe q.

CBP : commande basée sur la passivité.

CBPT : commande basée sur la passivité en tension.

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

Figure I.1 : mécanisme de formation des courants de profondeur	4
Figure I.2 : Ferme d'hydroliennes (projet Hammerfest Strom AS).....	5
Figure I.3 : Hydrolienne à axe verticale (projet Ponte Di Archimede)	6
Figure I.4 : Composants d'un générateur hydrolienne (Source : Alstom)	8
Figure I.5 : Structure de la chaîne de conversion hydrolienne	10
Figure I.6 : Représentation de la MSAP.....	11
Figure I.7 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park	12
Figure I.8: Passage de repère naturel du stator au repère (d, q) de Park	13
Figure I.9 :Le convertisseur back-to-back dans la chaîne de conversion hydrolienne	15
Figure I.10 : Schéma du redresseur côté génératrice	16
Figure I.11 : Schéma de l'onduleur côté réseau	17
Figure I.12 - Comparaison d'une éolienne avec une hydrolienne pour une même puissance de 50 KW	20
Figure I.13 Rentabilité des investissements d'une éolienne et d'une hydrolienne	20
Figure II.1 : Modification de l'énergie du système plus l'injection de l'amortissement	23
Figure II.2 : Schéma de principe de la commande basé sur la passivité	25
Figure II.3 : schéma bloc de CBPT	29
Figure II.4 : Digramme vectoriel spatial des courants et tensions triphasées du réseau	31
Figure II.5 : Commande de l'onduleur côté réseau	31
Figure III.1 : Schéma bloc simulation de la chaîne de conversion hydrolienne	35
Figure III.2 : vitesse de la marée	37
Figure III.3 : Couple électromagnétique.....	37
Figure III.4 : Tension du bus continu.....	38
Figure III.5 : Puissance active et réactive.....	38

Figure III.6 Couple électromagnétique avec variation de +50%, +75% de $RRSS$	39
Figure III.7 : Tension du bus continu avec variation de +50%, +75% de $RRSS$	40
Figure III.8 : Puissance active et réactive avec variation de +50%, +75% de $RRSS$	40
Figure III.9 : Couple électromagnétique avec changement de +50% et +75% de J	41
Figure III.10 : Tension du bus continu avec changement de +50% et +75% de J	41
Figure III.11 Puissance active et réactive avec changement de +50% et +75% de J	42
Figure III.12 Couple électromagnétique changement de +50% et de +75% de $RRSS$ et J	42
Figure III.13 Tension du bus continu avec changement de +50% et de +75% de $RRSS$ et J	43
Figure III.14 Puissance active et réactive avec changement de +50% et de +75% de $RRSS$ et J	43

Table des matières

Liste des symboles et abréviations

Liste des figures

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur l'Hydrolienne

I.1 Introduction:.....	3
I.2 L'énergie hydrolienne :	3
I.3 Les courants des marées :	3
I.3.1 les courants de surface :	4
I.3.2 Les courants de profondeur :	4
I.4 Les différents types d'hydrolienne :	5
I.4.1 Hydrolienne à axe horizontal :	5
I.4.2 Hydrolienne à axe vertical :	6
I.5 Concepts et fonctionnement de l'hydrolienne :	7
I.5.1 Définition d'une hydrolienne :	7
I.5.2 Composition d'une hydrolienne :	7
I.5.3 Principe de fonctionnement	8
I.6 Avantages et inconvénients de l'hydrolienne	9
I.6.1. Avantages de l'hydrolienne	9
I.6.2 Inconvénients	9
I.7 Chaine de conversion hydrolienne.....	10
I.7.1 La turbine hydrolienne :	10

I.7.2 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents:.....	11
I.7.2.1 Equations électriques dans le repère fixe (abc):.....	12
I.7.2.2 Passage au repère de Park :	12
I.7.2.3 Equations des flux magnétique :	14
I.7.2.4 Equations mécanique et du couple électromagnétique	14
I.7.3 Modélisation des convertisseurs statique :.....	15
I.7.3.1 Modélisation du redresseur côté génératrice.....	16
I.7.3.2 Modélisation de l'onduleur côté réseau :	17
I.7.3.3 Modélisation du bus continu :.....	18
I.7.3.4 Modèle d'état du convertisseur « back-to-back » dans les axes (dq) :	18
I.8 Comparaison entre une éolienne et une hydrolienne	19
I.9 Conclusion :	21

Chapitre II : Etude et application de la commande sur la chaîne de conversion hydrolienne

II.1 Introduction :	22
II.2 Définition de la passivité :	22
II.3 L'origine de la passivité :	22
II. 4 Avantage de la CBP :.....	23
II.5 Concept général de la commande basée sur la passivité :	24
II.6 Commande basée sur la passivité en tension (CBPT) :	25
II.6.1 Conception de la commande :	25
II.6.2 Asservissement de la GSAP en tension :.....	26

II.7 Commande vectorielle de l'onduleur côté réseau :	30
---	----

II.8 Conclusion :	32
-------------------------	----

Chapitre III: Résultat de simulation de la chaîne de conversion hydrolienne

III.1 Introduction :	34
----------------------------	----

III.2 Schéma bloc de simulation global de l'hydrolienne :	34
---	----

III.3 Test initial et interprétation des résultats de simulation :	36
--	----

III.4 Test de robustesse :	39
----------------------------------	----

III.4.1 teste de variation de la résistance statorique:	39
---	----

III.4.2 teste de variation du moment d'inertie:	40
---	----

III.4.3 Teste de variation de la résistance statorique et du moment d'inertie :	42
---	----

III.5 Conclusion :	44
--------------------------	----

Conclusion Générale :	45
-----------------------------	----

Bibliographie :	46
------------------------------	----

Annexe

Introduction générale

Depuis de nombreuses années plusieurs pays affichent une volonté à réduire la consommation des énergies fossiles. Les premières solutions développées sont à base de l'énergie hydraulique, photovoltaïque ou éolienne. D'autres sources sont à l'étude aujourd'hui pour apporter un panel de solutions pour réduire les émissions des gaz à effet de serre.

Récemment, les Energies Marines Renouvelables (EMR) sont apparues comme une solution possible pour produire de l'énergie 'propre'. En particulier, on s'intéresse de plus en plus au potentiel offert par les courants d'eau (ou par l'écoulement continu d'eau) permettant une production d'électricité au moyen de turbines « sans chutes d'eau » qui ne nécessitent aucun barrage. Ces turbines appelées turbines hydroliennes qui sont immergées à la profondeur des mers, produisent de l'électricité en transformant l'énergie mécanique de l'eau courante (courants marins) en énergie électrique, d'une façon similaire à ce que les grandes installations hydroélectriques classiques.

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.

Donc l'objectif principal de notre travail, s'intéressera à l'implémentation d'une commande à la génératrice synchrone à aimants permanents pour commander la chaîne de conversion hydrolienne. Afin d'améliorer le fonctionnement et la robustesse de l'hydrolienne et d'extraire la puissance désirée. Pour cela nous avons élaboré le plan du travail suivant qui est réparti en trois chapitres :

Dans le chapitre 1, on représentera les notions de base du fonctionnement de l'hydrolienne, ses différentes généralités ainsi que les modèles mathématiques de sa chaîne de conversion.

Le chapitre 2 sera consacré à la représentation de la commande basé sur la passivité (CBP) ainsi que son application sur GSAP. On donne aussi le contrôle de la vectoriel du convertisseur coté réseau.

Dans chapitre 3 on va représenter et étudier le schéma global de la chaine de conversion de l'énergie hydrolienne, et nous effectuerons un test de robustesse ainsi que l'interprétation des résultats de simulation.

Chapitre I

I.1 Introduction

L'eau recouvre 71% de la planète terrestre, principalement à travers les mers et les océans ; elle constitue donc une source d'énergie importante, grâce à l'hydrolienne qui nous permet d'extraire et de convertir la force du courant marin en énergie électrique.

Dans ce chapitre on exposera un aperçu général sur la principale source de l'énergie hydrolienne (les courants marins), nous allons également donner la description de la turbine hydrolienne, ces éléments constitutifs et les différents types (axe horizontal et axe vertical) ; En dernier lieu on parlera sur les avantages et les convenions de l'hydrolienne accompagner d'une petite comparaisant avec l'éolienne.

I.2 L'énergie hydrolienne

Une hydrolienne est une structure qui utilise l'énergie cinétique des marées et des courants marins pour créer une énergie mécanique qui est ensuite transformée en électricité. Elle permet d'exploiter la force de l'eau des mers, des océans ou des fleuves, qui est inépuisable, renouvelable et régulière. Une ressource fiable et prévisible

L'hydrolienne peut être comparée à une éolienne, qui utilise la force des vents. Mais contrairement à l'intensité des vents qui n'est pas prévisible longtemps à l'avance, la force des marées et des courants peut quant à elle être déterminée de manière fiable et précise [1].

I.3 Les courants des marées

On peut en distinguer deux types : les courants de surface et les courants de profondeur. Ils sont déterminés par des différences de température. La différence de densité entre les eaux plus ou moins chaudes (et plus ou moins salées) font que les eaux froides et salées plongent en profondeur, tandis que les eaux chaudes et douces restent en surface. Les courants sont connectés entre eux, et forment une boucle à travers les océans. Comme deux catégories de courants, on distingue les courants marins (situés en plein mer) et les courants de marées (situés, au contraire, près des côtes et à l'embouchure des fleuves). Ce sont des différences qui vont déterminer l'emplacement des hydroliennes.

Les types de courant :

I.3.1 Les courants de surface

Les courants de surface sont de grands mouvements continus d'eau générés par la friction des vents soufflant en surface des océans.

Par friction, les grands courants atmosphériques provoquent les courants marins de surface. Ainsi, la surface des océans suit sensiblement la même trajectoire que les vents dominants. On estime que la portion de l'océan affectée par les vents varie entre les 100 à 400 premiers mètres de la colonne d'eau [2].

I.3.2 Les courants de profondeur

Les courants de profondeur, aussi nommés courants de densité, sont engendrés par des différences de température et de salinité dans l'océan.

Les vents n'ont plus d'influence sur l'eau située en grande profondeur, à plus de 800 mètres. C'est la densité de l'eau qui joue un rôle dans la formation de courants marins de profondeur. L'eau plus dense plonge en profondeur alors que l'eau moins dense remonte en surface. La salinité et la température influencent la densité de l'eau.

Lorsque l'eau part de l'équateur, elle est chaude puisqu'elle est soumise aux radiations solaires. Lorsqu'elle se rapproche des pôles, elle se refroidit, puis elle gèle. Toutefois, l'eau sous forme solide ne contient pas de sel ; tous les sels restent donc dans l'eau. L'eau toujours sous forme liquide devient donc très froide et très salée (lorsque la banquise se forme, la salinité de l'eau augmente), ce qui fait en sorte que l'eau des régions polaires est très dense. Cette eau plonge en profondeur, créant ainsi le courant de profondeur [2].

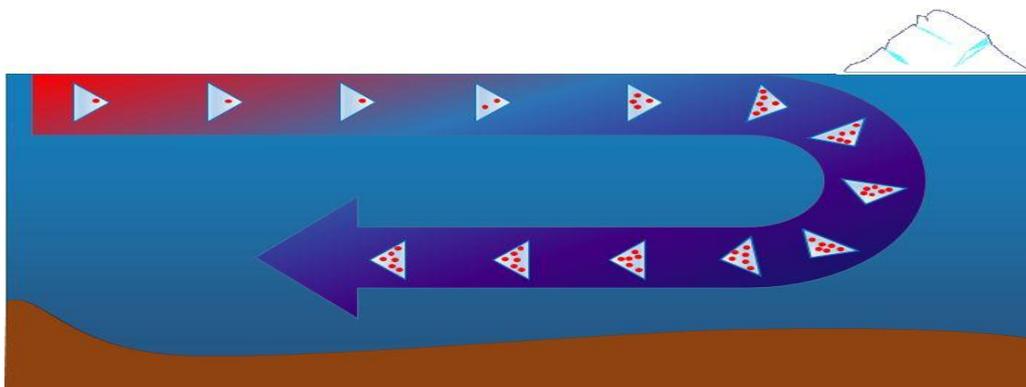


Figure I.1 : mécanisme de formation des courants de profondeur [2].

I.4 Les différents types d'hydrolienne

I.4.1 Hydrolienne à axe horizontal

Ces turbines sont constituées de bi-pales à axe horizontal d'un diamètre avoisinant les 20m et elles peuvent produire une puissance comprise entre 500 et 1000 kW. Leur pieu en Acier est fixé dans le fond marin. Elles comprennent un générateur conventionnel. Un système de contrôle, placé dans une cabine à 7m au-dessus de la mer, permet une surveillance facilitée. Leur rendement énergétique est estimé à environ 27% [3].



Figure I.2 : Ferme d'hydroliennes (projet Hammerfest Strom AS)

❖ Avantages :

L'implantation des turbines à 17 m sous la surface procure à cette installation un net avantage sur ses concurrentes puisqu'elle rend la navigation possible au-dessus des champs d'hydroliennes.

De plus, il est possible de l'installer à proximité des côtes puisque la discrétion visuelle et acoustique est assurée.

❖ Inconvénients :

Il s'agit là d'un système peu compact et dont la profondeur maximale d'implantation n'est que de 50 m. Les experts de Hammerfest Strom AS ont noté des légers mouvements de sédiments observés sur la zone d'essai et des fuites d'huile du multiplicateur sur les prototypes, mais ce risque est commun à toutes les technologies.

I.4.2 Hydrolienne à axe vertical

Ce prototype est constitué d'une plate-forme flottante ancrée en 4 points reliée à une génératrice synchrone 3 phase. Les 3 pales en acier sont recouvertes de résine de carbone et sont portées chacune par 2 bras radiaux en fibre de verre. La puissance obtenue est de 120 kW pour un courant de 3,5 m.s-1, ce qui correspond à un rendement d'environ 23% [3].

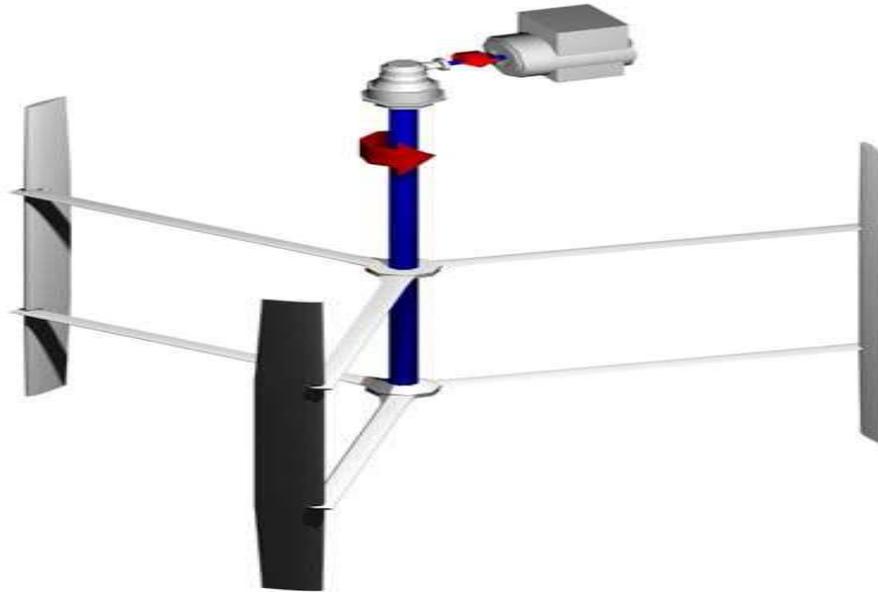


Figure I.3 : Hydrolienne à axe verticale (projet Ponte Di Archimede)

❖ **Avantage :**

Un des plus gros atouts de ce modèle est que le sens de rotation est indépendant du sens du courant. De plus, le couple de démarrage étant très important, le démarrage peut se faire de manière autonome. On notera également la flexibilité de la structure porteuse par rapport à la profondeur du site et la possibilité de placer le générateur hors de l'eau. Enfin, l'impact environnemental reste très faible.

❖ **Inconvénient :**

L'éventuelle cavitation agit sur toute la pale.

I.5 Concepts et fonctionnement de l'hydrolienne

I.5.1 Définition d'une hydrolienne

Une hydrolienne est un élément de conversion d'énergie cinétique des courants de marée ou de rivière.

Elle permet la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique, qui est alors transformée en énergie électrique par un alternateur. Son concept progresse très rapidement vue la grande similarité qu'elle présente avec la technologie éolienne. Malgré cette grande similarité, les caractéristiques de l'environnement marin font que sa constitution diffère un peu de celle de l'éolienne [4].

I.5.2 Composition d'une hydrolienne

Généralement, une hydrolienne est composée de :

- **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 de rotation.
- **Le générateur** : Il est composé de :
 - **Le moyeu** : C'est l'axe sur lequel sont fixées les pales. Il est conçu de manière à tourner toujours dans le même sens de rotor.
 - **L'alternateur** : C'est le générateur électrique qui convertit l'énergie mécanique 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 ci-dessous

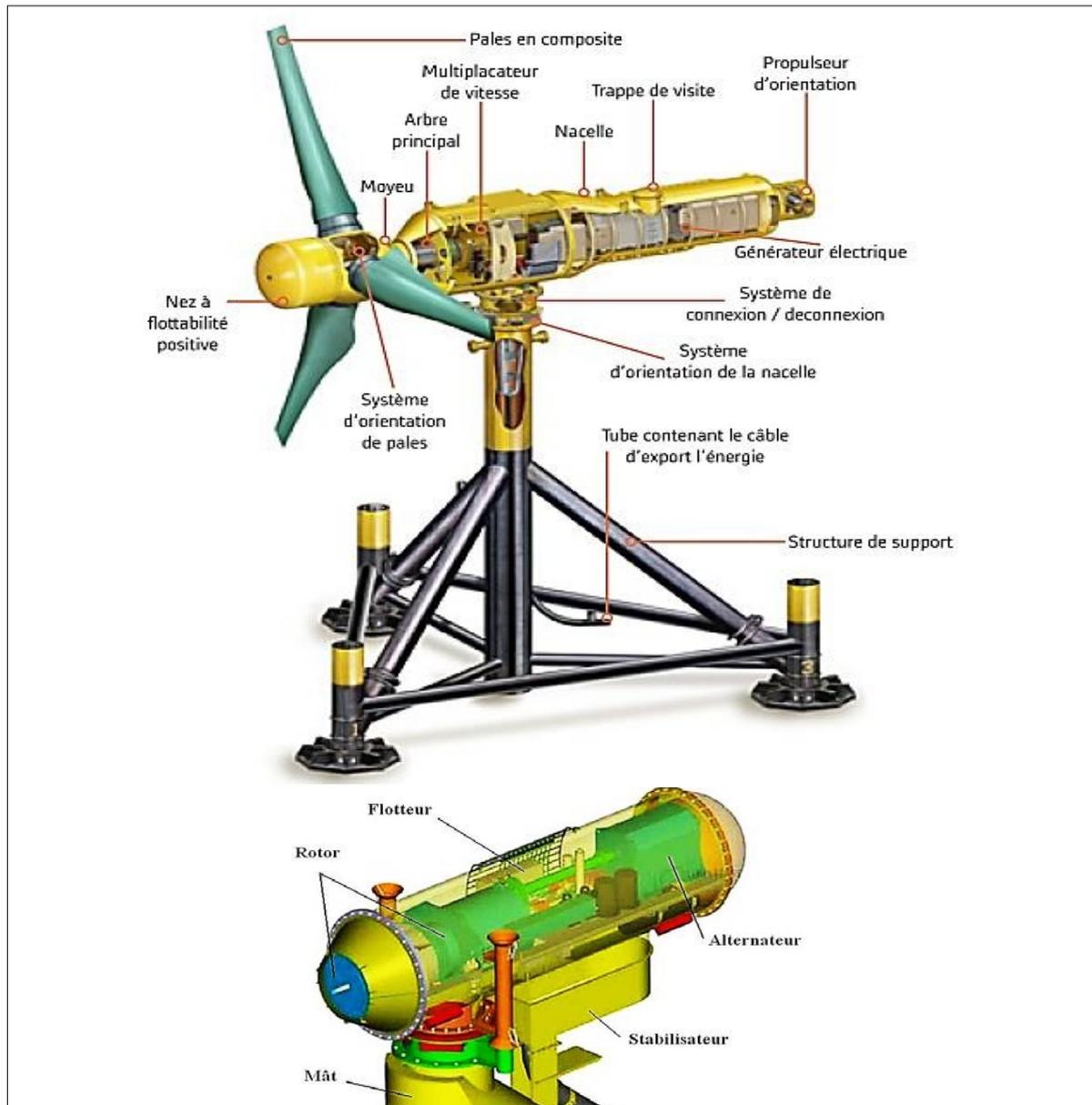


Figure I.4 : Composants d'un générateur hydrolienne (Source : Alstom)

I.5.3 Principe de fonctionnement

Les courants des marées fait tourner les hélices ou les turbines de l'hydrolienne auxquelles est relié le rotor d'une génératrice (partie tournante), cette dernière permet de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Il en fournit un courant de source alternative à qui peut être, soit couplé au réseau soit stocké, mais dans ce cas, on aura besoin d'un convertisseur ou redresseur pour convertir le courant en source continue.

I.6 Avantages et inconvénients de l'hydrolienne

Comme toutes technologies, l'hydrolienne a des avantages et également des inconvénients, qu'il faut étudier, afin qu'ils ne deviennent pas un frein à son développement.

I.6.1 Avantages de l'hydrolienne

- 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

I.6.2 Inconvénients

- La résistance et maintenance : L'hydrolienne doit résister à des conditions environnementales très dures (puissance des courants, sable en suspension...) La maintenance pose problème car l'accès aux champs d'hydroliennes peut être difficile, le personnel doit être formé spécialement pour la maintenance en mer. De plus, certains types d'hydroliennes ne possèdent pas de système leur permettant de remonter en surface, la maintenance doit alors être effectuée sous l'eau par des plongeurs [5].
- Les poissons et les mammifères marins peuvent heurter les pâles de la turbine ce qui provoque leurs blessures.
- L'installations de l'hydrolienne est très chers car il nécessite un type spécial des matériaux sous-marine [6].

I.7 Chaîne de conversion hydrolienne

L'hydrolienne se compose de plusieurs et différentes parties, c'est ce qui nous permet de bénéficier correctement de cette énergie, l'hydrolienne se compose d'une turbine marine et d'un générateur couplé à deux convertisseurs de puissance AC-DC et DC-AC où un bus placé entre ces deux derniers, la figure suivante nous démontre les éléments constitutifs de la chaîne de conversion hydrolienne.

Turbine de marée

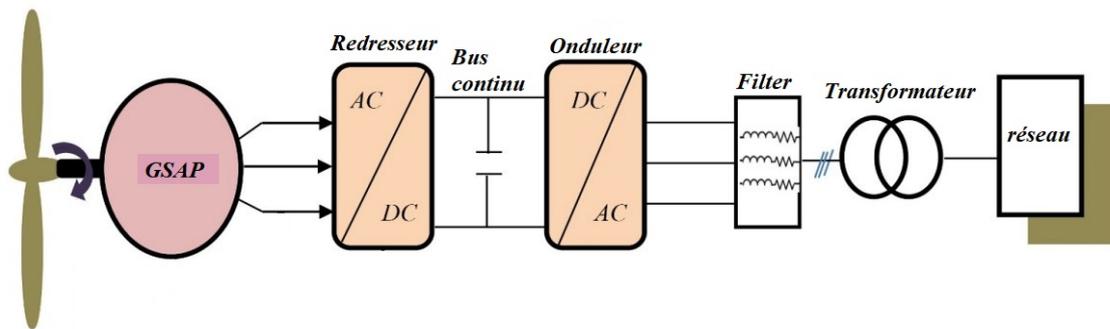


Figure I.5 : Structure de la chaîne de conversion hydrolienne.

I.7.1 La turbine hydrolienne

Portant plusieurs pales (deux à dix), elle capte l'énergie cinétique et se met en rotation sous l'effet des courants de rotation [7].

La puissance théorique appliquée à la turbine est donnée par (I.1), où ρ est la masse volumique de l'eau (1024kg/m^3), S est la surface circulaire balayée par la turbine ; β est l'angle de calage des pales, v est la vitesse de l'eau en $[\text{m} / \text{s}]$,

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot (\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V_m^3 \quad (\text{I.1})$$

Le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse de l'eau est exprimé par (I.2), où ω_m est la vitesse de rotation de la turbine ; R est le rayon des pales.

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_m}{V_m} \quad (\text{I.2})$$

$C_p(\lambda, \beta)$: est le coefficient de puissance, il caractérise la capacité de l'hydrolienne à capter l'énergie des courants marins. On peut être estimé ce coefficient l'aide de (I.3).

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

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

$$\lambda_i^{-1} = (\lambda + 0.008\beta)^{-1} - 0.035(1 + \beta)^{-1} \quad (I.4)$$

I.7.2 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 I.6 suivante :

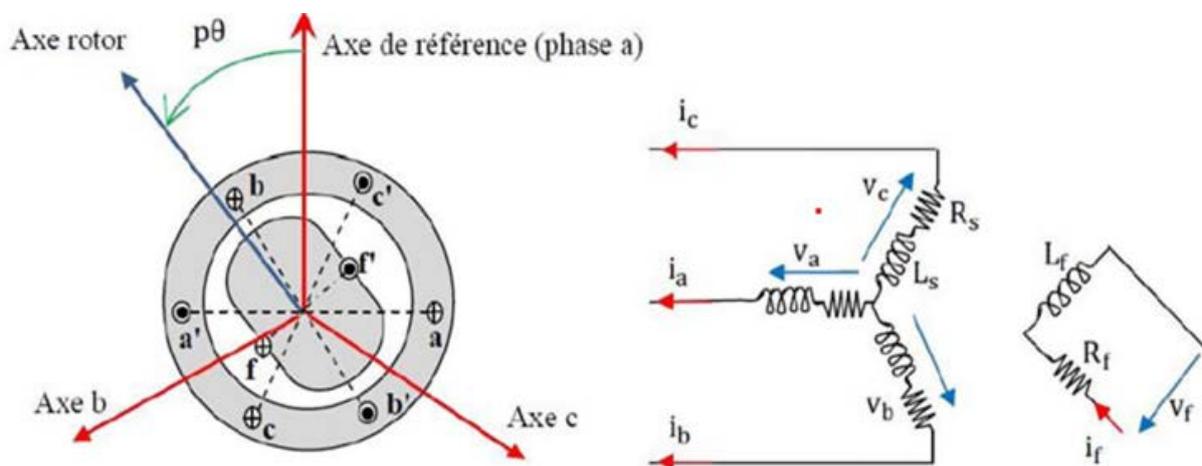


Figure I.6 : Représentation de la MSAP [8].

I.7.2.1 Equations électriques dans le repère fixe (abc)

$$[V_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d}{dt} [\Psi_s] \tag{I.5}$$

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.

$[i_s]$: Vecteur des courants statoriques.

$[R_s]$: Matrice des résistances 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 :

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{4\pi}{3} \\ \cos \frac{4\pi}{3} & \cos 0 & \cos \frac{2\pi}{3} \\ \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{4\pi}{3} & \cos 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \Phi_f \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \tag{I.6}$$

Avec :

$[\Psi_{sa} \ \Psi_{sb} \ \Psi_{sc}]^T$: Vecteur des flux dans les axes (abc).

Φ_f : Amplitude du flux des aimants permanents.

L_s : L'inductance propre de chaque phase statorique.

I.7.2.2 Passage au repère de Park

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

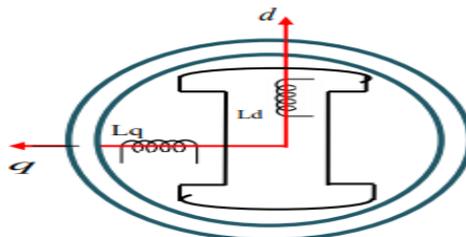


Figure I.7 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park

Les deux bobines d et q, tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [9].

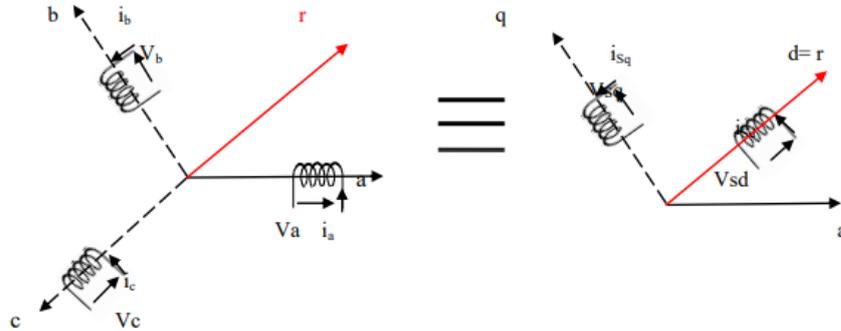


Figure I.8 : Passage de repère naturel du stator au repère (d, q) de Park

A l'aide de transformation de Park on passe de grandeurs réelle (v_a, v_b, v_c) et (i_a, i_b, i_c) à leurs composantes (v_0, v_b, v_c) et (i_0, i_b, i_c)

La matrice de Park s'exprime par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.7)$$

La transformation inverse de Park et donne par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (I.8)$$

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

$$\begin{cases} V_d = R_d \cdot i_d + L_d \cdot \frac{d}{dt} i_d - \omega \cdot L_q \cdot i_q \\ V_q = R_q \cdot i_q + L_q \cdot \frac{d}{dt} i_q + \omega \cdot L_d \cdot i_d + \omega \cdot \Phi_f \end{cases} \quad (I.9)$$

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

$$\begin{cases} V_d = -R_d \cdot i_d - L_d \cdot \frac{d}{dt} i_d + \omega \cdot L_q \cdot i_q \\ V_q = -R_q \cdot i_q - L_q \cdot \frac{d}{dt} i_q - \omega \cdot L_d \cdot i_d + \omega \cdot \Phi_f \end{cases} \quad (I.10)$$

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 courant et les tensions direct et en quadrature.

ω : Pulsation électrique.

I.7.2.3 Equations des flux magnétiques

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

$$\begin{cases} \Psi_d = -L_d \cdot i_d + \Phi_f \\ \Psi_q = -L_q \cdot i_q \end{cases} \quad (I.11)$$

I.7.2.4 Equations mécanique et du couple électromagnétique

Le mode 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 :

$$C_{em} = \frac{3}{2} n_p [(L_q - L_d) i_q i_d + i_q \Phi_f] \quad (I.12)$$

Avec :

n_p : Nombre de paire de pole.

La dynamique de partie mécanique de la GSAP est donnée par l'équation suivante [9] :

$$C_m - C_{em} = J \frac{d\omega_m}{dt} + f_{VF} \cdot \omega_m \quad (I.13)$$

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

J : moment d'inertie totale (machine).

f_{VF} : Coefficient des frottements visqueux.

ω_m : vitesse mécanique.

I.7.3 Modélisation des convertisseurs statique

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.

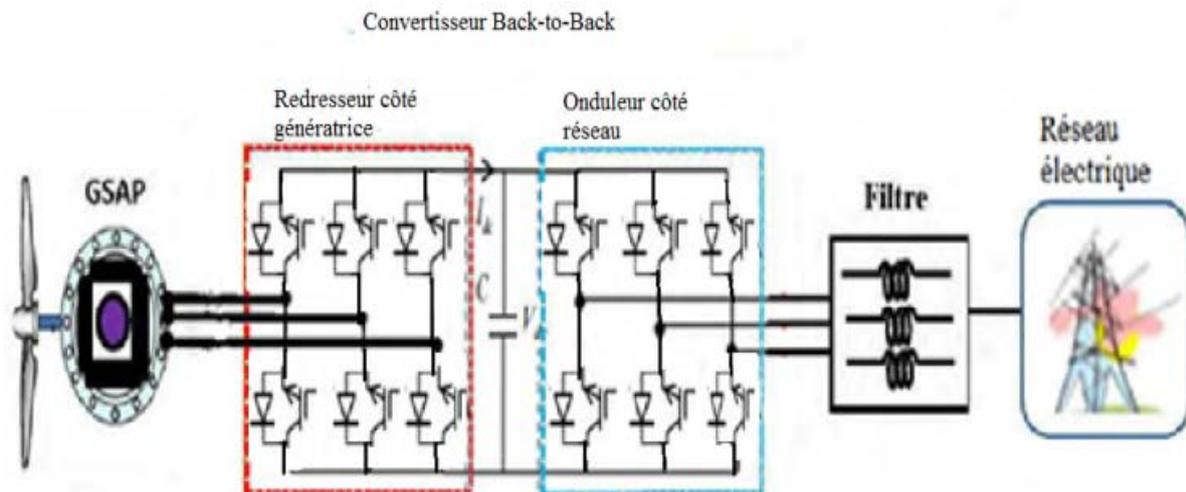


Figure I.9 : Le convertisseur back-to-back dans la chaîne de conversion hydrolienne [10].

I.7.3.1 Modélisation du redresseur côté génératrice

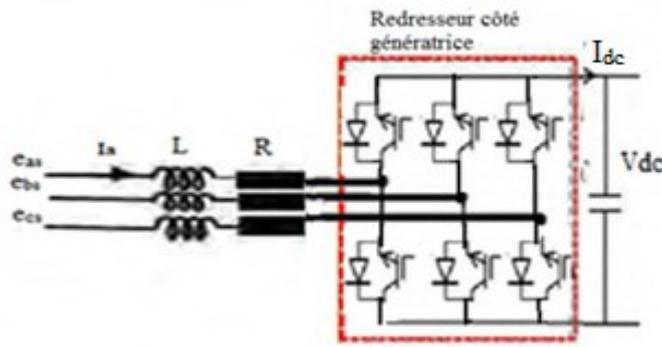


Figure I.10 : Schéma du redresseur côté génératrice [11].

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

$$\begin{cases} e_{as}(t) = RI_a(t) + L \frac{di_a(t)}{dt} + V_a(t) \\ e_{bs}(t) = RI_b(t) + L \frac{di_b(t)}{dt} + V_b(t) \\ e_{cs}(t) = RI_c(t) + L \frac{di_c(t)}{dt} + V_c(t) \end{cases} \quad (I.14)$$

Avec :

$(e_{bs}(t), e_{cs}(t), e_{as}(t))$: 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 (I.14) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} e_{as}(t) \\ e_{bs}(t) \\ e_{cs}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} \quad (I.15)$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}(t)}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a(t) \\ S_b(t) \\ S_c(t) \end{bmatrix} \quad (I.16)$$

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.

I.7.3.2 Modélisation de l'onduleur côté réseau

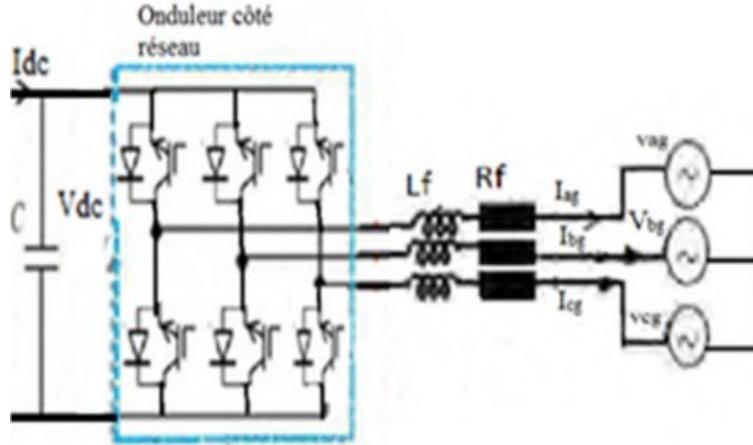


Figure I.11 : Schéma de l'onduleur côté réseau [11].

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 :

$$\begin{cases} V_{ag}(t) = -R_f I_{ag}(t) - L_f \frac{dI_{ag}(t)}{dt} + V_{a0}(t) \\ V_{bg}(t) = -R_f I_{bg}(t) - L_f \frac{dI_{bg}(t)}{dt} + V_{b0}(t) \\ V_{cg}(t) = -R_f I_{cg}(t) - L_f \frac{dI_{cg}(t)}{dt} + V_{c0}(t) \end{cases} \quad (I.17)$$

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, équation (I.17) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} V_{ag}(t) \\ V_{bg}(t) \\ V_{cg}(t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ag}(t) \\ I_{bg}(t) \\ I_{cg}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_f \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ag}(t) \\ I_{bg}(t) \\ I_{cg}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a0}(t) \\ V_{b0}(t) \\ V_{c0}(t) \end{bmatrix} \quad (I.18)$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} V_{a0}(t) \\ V_{b0}(t) \\ V_{c0}(t) \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}(t)}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_a(t) \\ W_b(t) \\ W_c(t) \end{bmatrix} \quad (\text{I.19})$$

Où

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

I.7.3.3 Modélisation du bus continu

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

$$I_c = I_{dc} - I_{on} \quad (\text{I.20})$$

$$\left\{ C \frac{dV_{dc}(t)}{dt} = S_a(t)I_a(t) + S_b(t)I_b(t) + S_c(t)I_c(t) - (W_a(t)I_{ag}(t) + W_b(t)I_{bg}(t) + W_c(t)I_{cg}(t)) \right. \quad (\text{I.21})$$

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

I.7.3.4 Modèle d'état du convertisseur « back-to-back » dans les axes (dq)

En appliquant la transformation de Park aux équations (I.15), (I.18) et (I.21), on obtient les systèmes d'équation réduits suivants :

$$\begin{cases} e_d(t) = RI_d(t) + L_d \frac{dI_d(t)}{dt} - \omega L_q I_q(t) + V_{dr}(t) \\ e_q(t) = RI_q(t) + L_q \frac{dI_q(t)}{dt} + \omega L_d I_d(t) + V_{qr}(t) \end{cases} \quad (\text{I.22})$$

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.

$$\begin{cases} V_{gd}(t) = -R_f I_{gd}(t) - L_f \frac{dI_{gd}(t)}{dt} + \omega_g L_f I_{gd}(t) + V_{ondd}(t) \\ V_{gq}(t) = -R_f I_{gq}(t) - L_f \frac{dI_{gq}(t)}{dt} - \omega_g L_f I_{gd}(t) + V_{ondq}(t) \end{cases} \quad (I.23)$$

$$\frac{dV_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C} [S_d(t)I_d(t) + S_q(t)I_q(t) - (W_d(t)I_{gd}(t) + W_q(t)I_{gq}(t))] \quad (I.24)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{rd}(t) = S_d(t)V_{dc}(t) \\ V_{rq}(t) = S_q(t)V_{dc}(t) \\ V_{ondd}(t) = W_d(t)V_{dc}(t) \\ V_{ondq}(t) = W_q(t)V_{dc}(t) \end{cases} \quad (I.25)$$

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.

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

I.8 Comparaison entre une éolienne et une hydrolienne

L'éolienne et l'hydrolienne ont le même principe de fonctionnement mais elles diffèrent du côté source d'énergie faisant tourner leurs pales, l'éolienne est entraînée par l'énergie aérienne tandis que l'hydrolienne par l'énergie des courants marins.

On peut considérer plusieurs paramètres pour comparer l'hydrolienne à l'éolienne:

- **Dimension** : Pour une même puissance, les éoliennes sont plus grandes que les hydroliennes, bien que l'eau ait une masse volumique considérable par rapport à l'air, soit 800fois plus élevée.

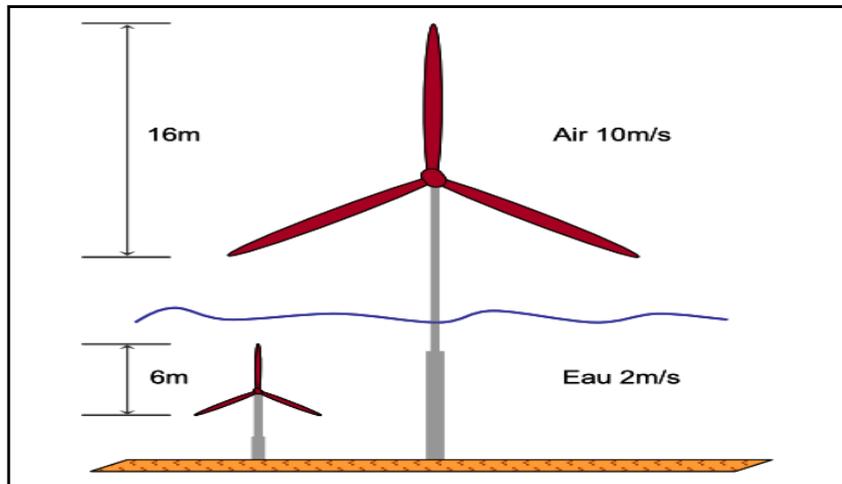


Figure I.12 - Comparaison d'une éolienne avec une hydrolienne pour une même puissance de 50 KW [12].

- **Source** : La force de la marée est facilement prévisible et anticipable contrairement au vent. De ce fait, les estimations de productions peuvent être beaucoup plus fiables dans le cas des hydroliennes et comme les marées sont distribuées différemment le long des côtes, un agencement intelligent permettrait de fournir une quantité d'énergie assez constante contrairement aux éoliennes qui sont soumises aux fluctuations du vent.
- **Coût** : Les éoliennes étant terrestres sont moins coûteuses du point de vue installation et entretien par rapports aux hydroliennes, du fait que ces dernières sont immergées dans l'océan, ce qui entraîne une difficulté d'accès. Mais à une certaine durée, la rentabilité de l'hydrolienne devient plus intéressante que l'éolienne.

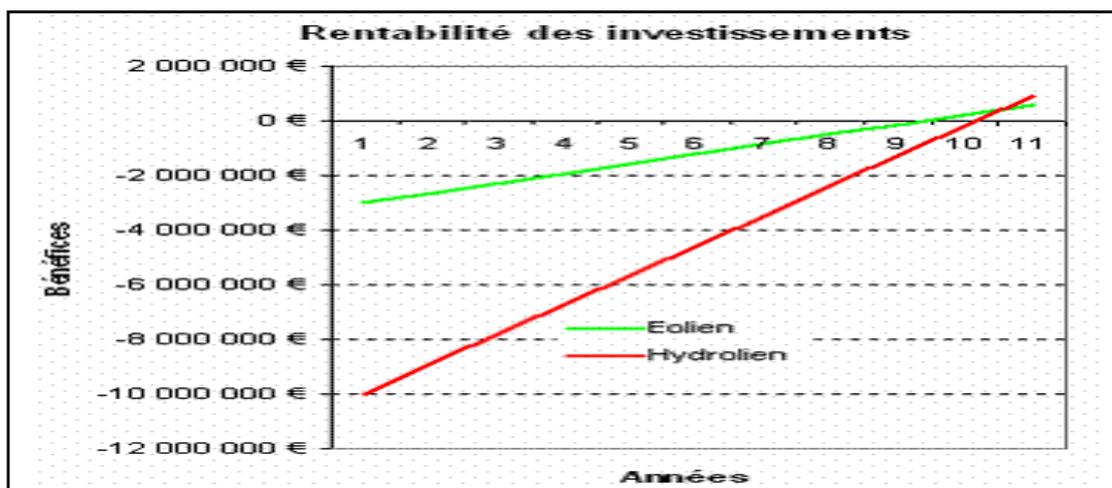


Figure I.13 Rentabilité des investissements d'une éolienne et d'une hydrolienne [13].

- **Maintenance** : L'eau, le sel, les algues et l'environnement marin sont très corrosifs et demandent donc un entretien très régulier des machines. La maintenance des hydroliennes est donc en conséquence beaucoup plus difficile, fréquente et coûteuse que sur l'installation des éoliennes.
- **Social** : Les éoliennes présentent une nuisance visuelle et sonore alors que les hydroliennes, sous l'eau sont discrètes et ne portent aucun inconvénient pour l'entourage.
- **Environnemental** : Les éoliennes tout comme les hydroliennes peuvent être un objet de danger pour la faune, il nécessite néanmoins une étude en détail pour la vie aérienne et la vie sous-marine.

I.9 Conclusion

Ce chapitre est dédié à une présentation de quelques notions principales sur les hydroliennes dans le contexte de la génération électrique ; on a décrit le principe de fonction d'une hydrolienne et ses éléments constitutif ainsi que ses avantages et inconvénients. Ensuite une attention particulière a été portée sur la modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent ; et pour réduire la complexité des équations de la GSAP ainsi que du convertisseur on a utilisé la transformation de Park.

On conclut dans ce chapitre que les courants marins est une source propre, naturelle et inépuisable de l'énergie hydrolienne.

Chapitre II

II.1 Introduction

La passivité est une approche générale utilisée en commande pour l'analyse des systèmes et la synthèse de commandes. Cette caractéristique est étroitement liée à la propriété fondamentale de conservation de l'énergie. La dénomination « Commande Basée sur la Passivité (CBP) » (PBC, Passivity-Based Control) a été introduite pour définir une méthodologie de conception de commandes qui assurent la stabilité des systèmes en les rendant passifs. En effet, cette technique tient compte de la nature physique du système, contrairement aux autres méthodes qui donnent plus d'importance à la partie électrique. Ce chapitre est consacré à l'étude de type de commande utilisé pour contrôler la GSAP et la commande de l'onduleur côté réseau.

II.2 Définition de la passivité

L'idée de base de la passivité réside à façonner l'énergie totale du système puis à ajouter un terme d'amortissement. Après avoir formulé l'énergie totale du système, on la modifie à une valeur désirée (minimum), alors le système converge vers ce minimum. En plus, si cette commande permet d'injecter un terme dissipatif additif au système, la convergence vers l'état désiré sera améliorée par rapport à la convergence obtenue par dissipation naturelle fournie par le système. L'autre caractéristique de la CBP est l'identification des termes non dissipatifs afin d'éviter leurs compensations par la commande, car ils ont aucuns effets sur la dynamique du système. La CBP préserve la passivité du système en boucle fermée ce qui assure une forte stabilité.

II.3 L'origine de la passivité

La passivité est l'aptitude d'un système à dissiper son énergie intrinsèque (en boucle ouverte) ou en extrinsèque (en boucle fermée).

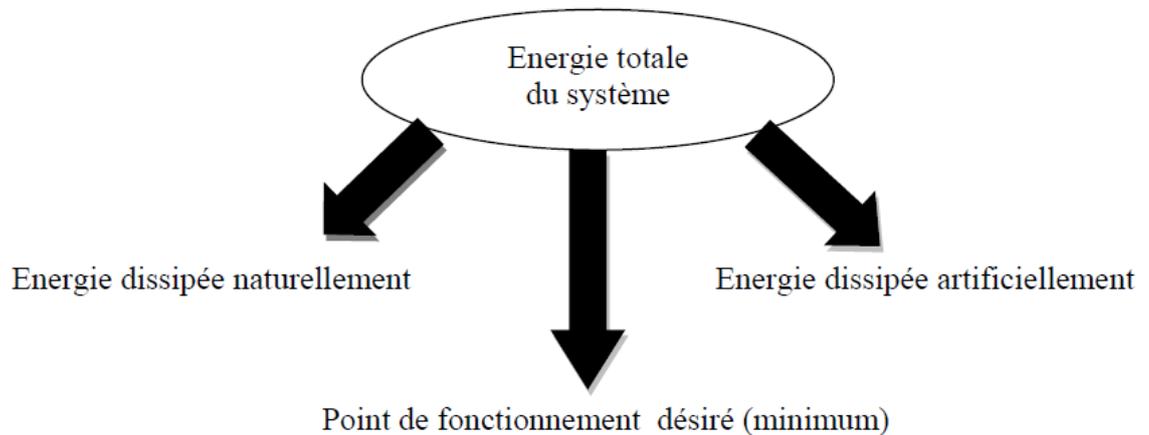


Figure II.1 : Modification de l'énergie du système plus l'injection de l'amortissement.

L'idée de la passivité était motivée par certains systèmes physiques, notamment les circuits électriques [14]. En effet, certains systèmes ont des propriétés de dissipation d'énergie dans le même sens qu'un circuit électrique.

II.4 Avantage de la CBP

Un avantage important de cette technique est que les dynamiques du système en boucle fermée définissent un système passif. Cette caractéristique amène quatre avantages majeurs qui, dans une large mesure, expliquent le succès pratique de la commande basée sur la passivité [15].

- 1- L'action de la commande s'interprète clairement comme une interconnexion entre le système et son environnement. En particulier, la stabilisation peut être interprétée en termes d'équilibres d'énergie.
- 2- Les systèmes passifs sont robustes vis-à-vis des incertitudes paramétriques et des dynamiques non modélisées.
- 3- Dans certains cas, il est possible de donner une interprétation physique claire au réglage des paramètres de la commande, par exemple, des amortisseurs (résistance électrique) ou des ressorts. Cette propriété peut être d'une grande importance dans les applications industrielles.
- 4- Contrairement aux méthodes telles que la commande par retour linéarisant qui résultent de considérations mathématiques, la CBP a été développée à partir de propriétés physiques comme la conservation de l'énergie et de la passivité.

II.5 Concept général de la commande basée sur la passivité

La méthodologie de la CBP se base sur deux étapes principales. En premier lieu, effectuez un façonnement de l'énergie pour modifier l'énergie totale du système afin que la nouvelle fonction de l'énergie ait un minimum unique à l'équilibre désiré. En second lieu, une étape d'ajout d'amortissement au système, où l'on modifie la fonction de dissipation d'énergie afin d'imposer une stabilité asymptotique du système commandé.

L'ordre de procédure peut être inversé, on peut donc commencer par rechercher l'ajout d'amortissement et d'interconnexion au système qui permettront par la suite d'avoir une fonction d'énergie totale avec un minimum unique à l'équilibre désiré.

La conception de la commande par l'approche de passivité se résume en trois grandes étapes [16] :

❖ Première étape

- 1.1. Représentation du système sous forme énergétique, en utilisant les équations d'EL.
- 1.2. Vérification de la passivité du système à commander (en BO).
- 1.3. Décomposition du système en deux sous-systèmes interconnectés par retour négatif telle que la sortie du sous-système direct est la sortie à commander.
- 1.4. Vérification que chaque sous système est passif.

❖ Deuxième étape

- 2.1. Modification du modèle du système en utilisant le vecteur des forces qui ne produisent pas du travail (forces non dissipatrices), en se basant sur la sous étape 1.2.
- 2.2. Etablissement de la dynamique désirée en utilisant le modèle modifié du système.

❖ Troisième étape

- 3.1. Calcul des coordonnées désirés en utilisant la dynamique cible (désirée).
- 3.2. Calcul de la dynamique de l'erreur (entre coordonnées mesurés et désirés).
- 3.3. Invocation de la stabilité au sens de Lyapunov et détermination de la commande.
- 3.4. Vérification que le système en boucle fermée est passif.

En effet, la CBP est développée à l'origine pour la régulation des robots, on présente son origine qui n'est autre que la commande par la dynamique cible en anglais "Target Dynamics Matching Control (TDM)".

Chapitre II : Etude et application de la commande sur la chaîne de conversion hydrolienne

A partir du résumé des étapes de synthèse, on peut obtenir le schéma de commande basée sur la définition de la dynamique cible, présenté ci-dessous :

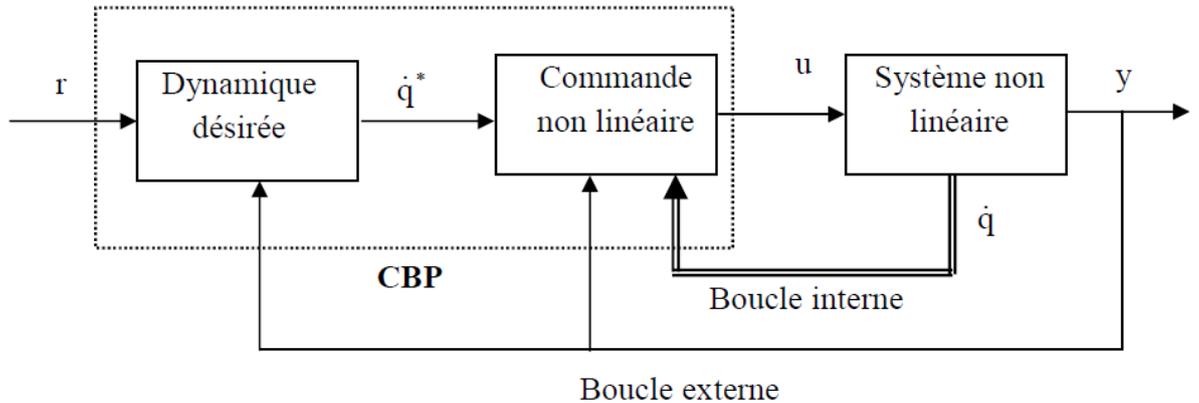


Figure II.2 : Schéma de principe de la commande basé sur la passivité.

II.6 Commande basée sur la passivité en tension (CBPT)

On suppose le cas idéal, c'est-à-dire tous les états (courants, vitesse rotorique et position) sont mesurables et ne sont pas entachés de bruits. Cette supposition est considérée afin de justifier les formulations mathématiques utilisées.

II.6.1 Conception de la commande

Nous synthétisons une commande basée sur la passivité en tension (CBPT) pour le GSAP, en suivant les mêmes étapes que [15]. Néanmoins, avant de formuler la problématique, on suppose que :

- Tous les paramètres sont connus.
- Le couple de charge τL est une fonction connue et bornée.

Avec les conditions précédentes, la commande calculée assure une stabilité interne, l'asservissement du couple et la régulation de vitesse.

C'est-à-dire, nous avons en boucle fermée :

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow +\infty} (C_e^* - C_e) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow +\infty} \omega_m = \omega_m^* \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Où C_e^* : couple électromagnétique désiré. ω_m^* : vitesse désirée.

Chapitre II : Étude et application de la commande sur la chaîne de conversion hydrolienne

La dynamique désirée en boucle fermée doit être compatible avec les contraintes physiques du système contrôlé.

II.6.2 Asservissement de la GSAP en tension

Le modèle de la GSAP adopté dans ce cas pour calculer la commande basée sur la passivité en tension (CBPT) est celui représenté dans le référentiel- $\alpha\beta$ qui est obtenu par l'application directe des équations d'Euler LaGrange (EL) comme décrit [15].

$$V_{\alpha\beta} = R_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta} + L_{\alpha\beta} \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} + \Psi_{\alpha\beta}(\vartheta_e) n_p \omega_m \quad (\text{II.2})$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = C_m - C_e(i_{\alpha\beta}, \vartheta_e) - f_{vf} \omega_m \quad (\text{II.3})$$

$$C_e(i_{\alpha\beta}, \vartheta_e) = \Psi_{\alpha\beta}^T(\vartheta_e) i_{\alpha\beta} \quad (\text{II.4})$$

Où

$L_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} L_d & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & L_q \end{bmatrix}$ est la matrice de l'induction statorique dans le repère $\alpha\beta$,

$i_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$ est le vecteur du courant statorique dans le repère $\alpha\beta$,

$V_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}$ est le vecteur du stator de tension dans le repère $\alpha\beta$,

$\Psi_{\alpha\beta}(\vartheta_e) = \Phi_f \begin{bmatrix} -\sin(\vartheta_e) \\ \cos(\vartheta_e) \end{bmatrix}$ est le vecteur des liaisons de flux dans le repère $\alpha\beta$,

$R_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} R_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & R_s \end{bmatrix}$ est la matrice de la résistance du stator dans le repère $\alpha\beta$,

$\omega_e = n_p \omega_m$ est la vitesse de rotation électrique du GSAP, et ϑ_e est la angulaire électrique.

On définit les entrées et sorties du GSAP avec :

Vecteur d'entrées $\mathbf{u} = [i_{\alpha\beta}^T \ \omega_m]^T$; vecteur de sorties régulées $\mathbf{y} = [V_{\alpha\beta}^T \ C_e]^T$.

La propriété de passivité du GSAP est formulée par le lemme suivant.

Lemme 1 :

Le choix précédent des vecteurs d'entrée et de sortie pour le GSAP ; définit que la relation entrée-sortie M donnée par $\mathbf{M}: \mathbf{u} \rightarrow \mathbf{y}$ est passive. La preuve du lemme 1 est donnée en [17].

Chapitre II : Etude et application de la commande sur la chaîne de conversion hydrolienne

Le modèle dynamique en (II.2) et (II.3) du GSAP est utilisé pour en déduire la dynamique désirée suivante :

$$\mathbf{V}_{\alpha\beta}^* = \mathbf{R}_{\alpha\beta} \mathbf{i}_{\alpha\beta}^* + \mathbf{L}_{\alpha\beta} \frac{d\mathbf{i}_{\alpha\beta}^*}{dt} + \boldsymbol{\Psi}_{\alpha\beta}(\boldsymbol{\vartheta}_e) \mathbf{n}_p \boldsymbol{\omega}_m \quad (\text{II.5})$$

$$\mathbf{C}_m = J \frac{d\boldsymbol{\omega}_m^*}{dt} - \mathbf{C}_e^*(\mathbf{i}_{\alpha\beta}^*, \boldsymbol{\vartheta}_e) - \mathbf{f}_{vf} \boldsymbol{\omega}_m^* \quad (\text{II.6})$$

Où

$\mathbf{V}_{\alpha\beta}^*$, $\mathbf{i}_{\alpha\beta}^*$, $\boldsymbol{\omega}_m^*$ sont les tensions désirées, les courants désirés, la vitesse de rotor désirée respectivement, et \mathbf{C}_e^* est le couple électromagnétique rotorique désirée.

L'objectif principal est de permettre au GSAP d'opérer à la même vitesse que la turbine de l'hydrolienne. Dans ce chapitre, nous proposons pour la conception de la CBPT, à choisir comme coordonnées désirées $\mathbf{i}_{\alpha\beta}^*$, $\boldsymbol{\omega}_m^*$ qui sont les courants GSAP et la vitesse de la turbine respectivement. L'objectif est de trouver $\mathbf{V}_{\alpha\beta}$ afin d'assurer la convergence de l'erreur dynamique entre la dynamique mesurée et la dynamique désirée à zéro, qui sont donnés par

$$\mathbf{L}_{\alpha\beta} \frac{d\boldsymbol{\varepsilon}_i}{dt} + \mathbf{R}_{\alpha\beta} \boldsymbol{\varepsilon}_i = \mathbf{V}_{\alpha\beta}^* - \mathbf{V}_{\alpha\beta} \quad (\text{II.7})$$

$$J \frac{d\boldsymbol{\varepsilon}_m}{dt} - \boldsymbol{\Psi}_{\alpha\beta}^T(\boldsymbol{\vartheta}_e) \boldsymbol{\varepsilon}_i + \mathbf{f}_{vf} \boldsymbol{\varepsilon}_m = \mathbf{0} \quad (\text{II.8})$$

Où

$\boldsymbol{\varepsilon}_i = \mathbf{i}_{\alpha\beta}^* - \mathbf{i}_{\alpha\beta}$ est l'erreur des courants, et $\boldsymbol{\varepsilon}_m = \boldsymbol{\omega}_m^* - \boldsymbol{\omega}_m$ est l'erreur de vitesse du rotor.

À cette fin, nous façonnons l'énergie de la boucle fermée pour qu'elle corresponde à une fonction énergétique désirée $\mathbf{V}_f^*(\boldsymbol{\varepsilon}_i)$ comme donné

$$\mathbf{V}_f^*(\boldsymbol{\varepsilon}_i) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}_i^T \mathbf{L}_{\alpha\beta} \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (\text{II.9})$$

Le suivi de la dérivée temporelle de $\mathbf{V}_f^*(\boldsymbol{\varepsilon}_i)$ sur (II.7), donne

$$\frac{d\mathbf{V}_f^*(\boldsymbol{\varepsilon}_i)}{dt} = -\boldsymbol{\varepsilon}_i^T (\mathbf{R}_{\alpha\beta} \boldsymbol{\varepsilon}_i + (\mathbf{V}_{\alpha\beta} - \mathbf{V}_{\alpha\beta}^*)) \quad (\text{II.10})$$

Chapitre II : Etude et application de la commande sur la chaîne de conversion hydrolienne

La convergence rapide vers zéro du vecteur d'erreur courant, en appliquant la loi de commande :

$$\mathbf{V}_{\alpha\beta} = \mathbf{V}_{\alpha\beta}^* - \mathbf{B}_i \boldsymbol{\varepsilon}_i \quad (\text{II.11})$$

Où

$\mathbf{B}_i = \mathbf{b}_i \mathbf{I}_2$, gain $\mathbf{b}_i > 0$, \mathbf{I}_2 si la matrice identité 2×2 .

Dans le système en boucle fermée, si nous choisissons un gain \mathbf{b}_i élevé, la matrice définie positive \mathbf{B}_i augmentera la convergence de l'erreur de suivi et surmonter les connaissances imprécises des paramètres du système. La preuve de la convergence exponentielle et de la stabilité de l'erreur des courants, est donnée en [17].

Courant désiré

La GSAP fonctionne à une vitesse idéale, seulement si le courant désiré dans le repère $\alpha\beta$ est choisi comme suit [15] :

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta}^* = \frac{2c_e^*}{3n_p\Phi_f} \begin{bmatrix} -\sin(\vartheta_e) \\ \cos(\vartheta_e) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Calcul du couple désiré

A partir de l'équation mécanique dynamique (II.3) et en prenant la vitesse du rotor $\boldsymbol{\omega}_m$ égale à sa consigne, on calcule le couple désiré, qui est donné comme suit :

$$\mathbf{C}_e^*(\mathbf{i}_{\alpha\beta}^*, \vartheta_e) = J \frac{d\boldsymbol{\omega}_m^*}{dt} - \mathbf{f}_{vf} \boldsymbol{\omega}_m^* \quad (\text{II.13})$$

Cette expression du couple électromagnétique désiré \mathbf{C}_e^* présente deux inconvénients: elle est en boucle ouverte et sa convergence est limitée par les paramètres mécaniques (J, \mathbf{f}_{vf}) de la GSAP.

Pour résoudre cela, nous avons le terme de coefficient de frottement (\mathbf{f}_{vf}) négligeable parce qu'il est très faible, et on introduit un régulateur PID (dérivé proportionnel-intégral), afin d'éliminer l'erreur statique et d'assurer la convergence rapide de l'erreur vitesse $\boldsymbol{\varepsilon}_m$, donc (II.13) est exprimé par

$$\mathbf{C}_e^* = J \frac{d\boldsymbol{\omega}_m^*}{dt} - k_p \boldsymbol{\varepsilon}_m - k_i \int_0^t \boldsymbol{\varepsilon}_m d\tau - k_d \frac{d\boldsymbol{\varepsilon}_m}{dt} \quad (\text{II.14})$$

Où

$$k_p > 0, k_i > 0 \text{ et } k_d > 0.$$

II.7 Commande vectorielle de l'onduleur côté réseau

L'onduleur côté réseau est utilisé pour fournir une énergie propre générée par le générateur hydrolienne au réseau électrique. La commande de ce convertisseur permet de d'ajuster la tension du bus continu, tout en ajustant la qualité de flux de puissances active et réactive injectées dans le 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 et 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 grâce à la commande par orientation de la tension de l'onduleur. L'analyse de cette stratégie de commande dérivée de l'application de la loi de Kirchhoff à l'onduleur figure (I.9). En considérant l'équation (I.23) et en négligeant la résistance R_f (car elle a peu d'impact sur la performance du système), on écrit :

$$\begin{cases} \frac{dI_{gd}(t)}{dt} = \frac{1}{L_f} (\omega_g L_f I_{gq} + V_{ondd} - V_{gd}) \\ \frac{dI_{gq}(t)}{dt} = \frac{1}{L_f} (\omega_g L_f I_{gd} + V_{ondq} - V_{gq}) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

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 (II.15) montre que les dérivées des courants des axes (dq) sont fortement couplées. Le lien des axes est compensé par un retour non linéaire.

Le but principal 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 (II.4)

Chapitre II : Etude et application de la commande sur la chaîne de conversion hydrolienne

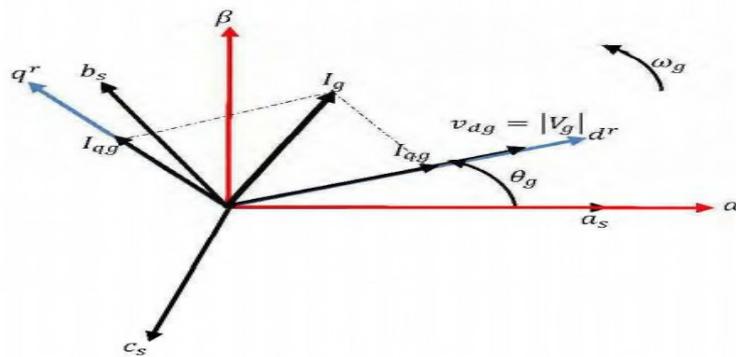


Figure II.4 : Digramme vectoriel spatial des courants et tensions triphasées du réseau. [11]

La figure (II.5) 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} , I_{gq}) du réseau et une boucle externe pour la régulation de la tension V_{dc} du bus continu.

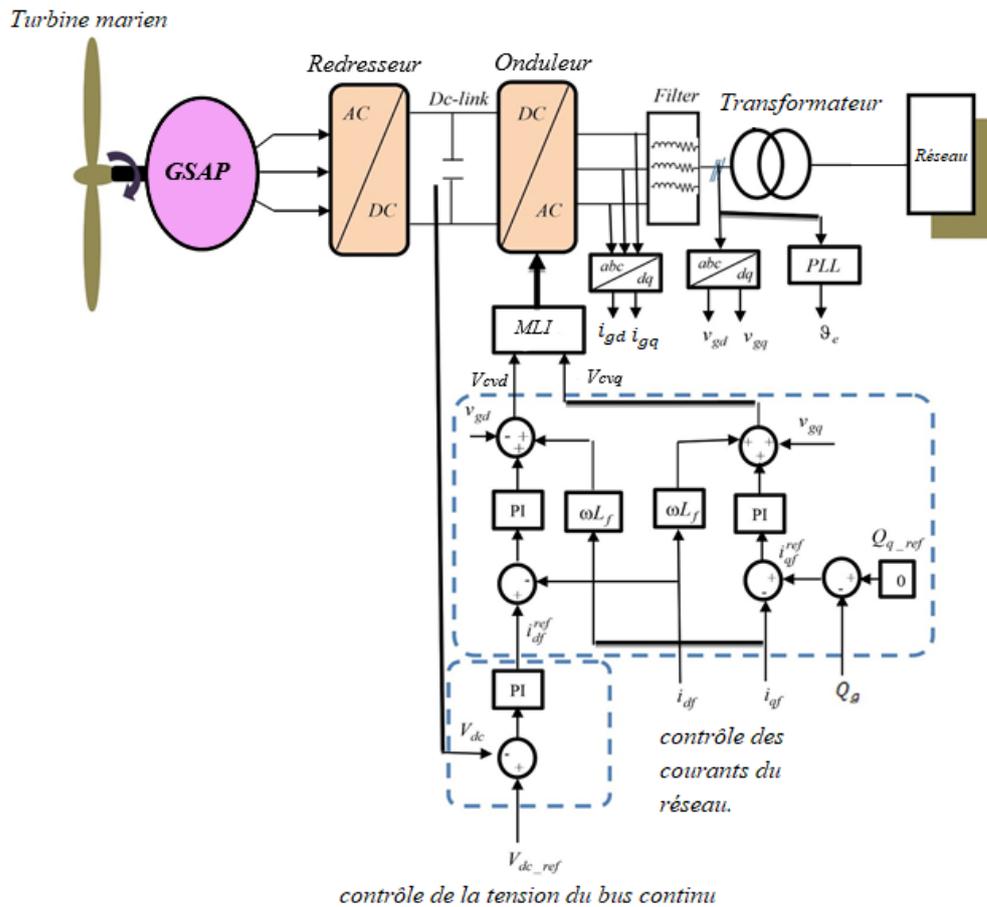


Figure II.5 : Commande de l'onduleur côté réseau.

Chapitre II : Etude et application de la commande sur la chaine de conversion hydrolienne

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

$$i_{gd}^{ref} = k_{dcp} (V_{dc-ref} - V_{dc}) + k_{dci} \int_0^t (V_{dc-ref} - V_{dc}) d\tau \quad (II.16)$$

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 :

$$\begin{cases} V_{gd}^{PI} = K_{gp}^d (i_{gd}^{ref} - i_{gd}) + K_{gi}^d \int_0^t (i_{gd}^{ref} - i_{gd}) d\tau \\ V_{gq}^{PI} = K_{gp}^q (i_{gd}^{ref} - i_{gd}) + K_{gi}^q \int_0^t (i_{gd}^{ref} - i_{gd}) d\tau \end{cases} \quad (II.17)$$

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 :

$$p_g = \frac{3}{2} V_{gd} I_{gd} \quad (II.18)$$

$$Q_g = -\frac{3}{2} V_{gd} I_{gq} \quad (II.19)$$

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les notions de base sur la passivité, et discuté le principe et les étapes de la technique de Commande Basée sur la Passivité. Nous avons également présenté une étude détaillée de la méthode de commande basée sur la passivité en tension pour le redresseur coté machine. Cette commande contrôle la vitesse de la rotation de

Chapitre II : Etude et application de la commande sur la chaine de conversion hydrolienne

génératrice et donc du couple en fonction de la vitesse des courants marins variables. Elle a pour objectif est d'adapter la vitesse de la génératrice à la vitesse de la turbine hydrolienne, ce qui permet d'extraire le maximum de puissance mécanique disponible sur l'arbre de la turbine hydrolienne.

L'analyse du convertisseur de tension en mode onduleur, coté réseau ainsi que son schéma de contrôle sont présentés. La commande de ce convertisseur est de réalisé 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.

Chapitre III

III.1 Introduction

La simulation numérique nous permet de conclure sur le bon fonctionnement d'un système, de vérifier et analyser le comportement dynamique du système commandé dans des conditions normales ou extrêmes. C'est une étape indispensable avant toute tentative réelle. L'avantage des tests de simulation est qu'ils permettent non seulement de gagner beaucoup de temps mais aussi d'économiser de l'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 que la stabilité et la sécurité du système commandé sont garanties, alors ces stratégies peuvent être appliquées sur les systèmes réels.

Dans ce chapitre on va représenter et étudier le schéma global de chaîne de conversion de l'énergie hydrolienne, et nous effectuerons un test de robustesse ainsi que l'interprétation des résultats de simulation.

III.2 Schéma bloc de simulation global de l'hydrolienne

La figure III.1 représente le schéma bloc de simulation global de la commande de la chaîne de conversion hydrolienne à base d'une GSAP ; afin de mieux l'expliquer (exposé) on l'a décomposé en cinq parties comme illustré :

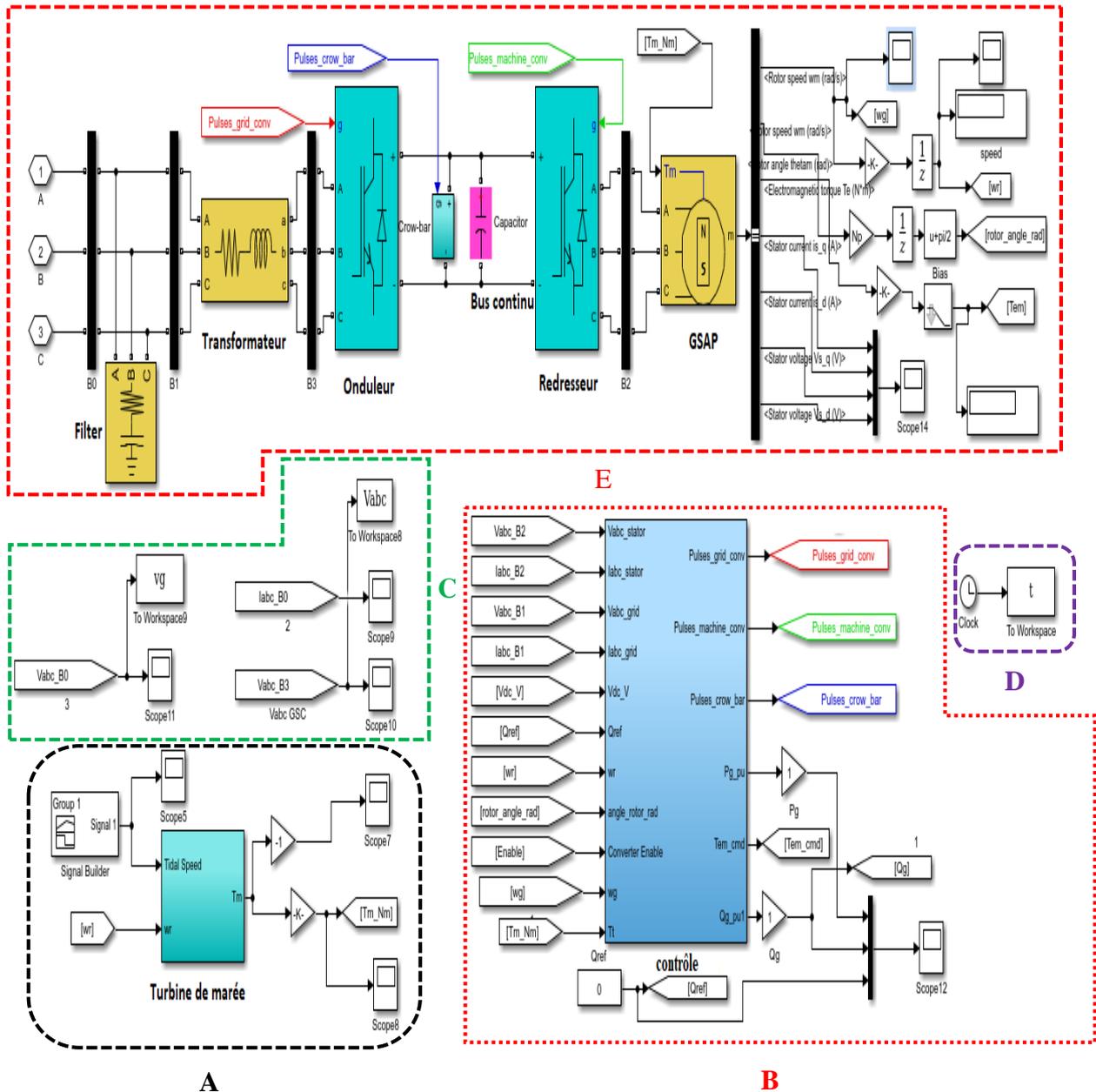


Figure III.1 : Schéma bloc simulation de la chaîne de conversion hydrolienne.

- Dans la partie A : illustre le Schéma bloc de simulations de la turbine marée ou lorsqu'en injecte un signal de la vitesse de marée, il calcule le couple mécanique.
- La partie B : illustrée Schéma bloc simulations de la commande qui contient les équations de la commande de CBPT et la commande classique PI.
- La partie C : Schéma bloc est réalisé pour lire les tensions est les courant.
- La partie D : représente le schéma bloc temporisation de la simulation.
- Dans La partie E : illustre le Schéma bloc simulations de la chaîne de conversion hydrolienne.

- Le rôle de redresseur est de convertir la tension alternatif/continu.
- Le rôle de bus continu (capacité) est de lisser les tensions et les courants qu'on reçoit de la GSAP.
- Le rôle l'onduleur est es de convertir les courant continu en courant alternative.
- Le rôle de transformateur permettant de modifier les valeurs de tension est d'intensité de courant délivre par une source alternative au le réseau.
- Le rôle de réseau électrique permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

III.3 Test initial et interprétation des résultats de simulation

Afin de vérifier l'efficacité des stratégies de contrôle proposées, tant pour le CPBT que pour le contrôleur PI, appliquées au système de conversion de l'énergie hydrolienne à base de GSAP. Un test de simulation a été réalisé sous le logiciel MATLAB/Simulink. Les paramètres globaux du système de conversion de l'énergie hydrolienne sont indiqués dans l'annexe. Les conditions initiales utilisées dans la simulation sont $[i_{\alpha\beta}(0), \omega_m(0)] = [0 \ 0 \ 0]$ pour GSAP, $V_{dc}(0) = 0$ et $i_{gdq}(0) = [0 \ 0]$ pour le réseau. Les résultats de la simulation sont basés sur une GSAP d'une puissance nominale de 1,5 MW et une vitesse nominale de 125 tr/min, le bus continu est fixé à 1150 V et la puissance réactive est fixée à zéro. D'après la méthode de placement des pôles, Les gains PID CPBT du couple désiré sont donnés comme suit :

$k_p = 5$, $k_i = 1000$ et $k_d = 0.5$. Les gains PI du bus continu sont $k_{dcp} = 5$ et $k_{dci} = 500$. Les gains concernant le contrôleur PI du courant côté réseau sont $K_{gp}^d = K_{gp}^q = 9$ et $K_{gi}^d = K_{gi}^q = 200$. La valeur finale du paramètre d'amortissement est $b_i = 400$ qui a été obtenue en utilisant une procédure d'essais et d'erreurs à partir de valeurs supposées basées sur les conditions de stabilité. Pour tester la robustesse de la CBPT, nous avons varié les paramètres de la machine [17].

Test de la CBPT avec les valeurs paramétriques initiales

Les paramètres du système de conversion de l'énergie hydrolienne utilisé sont indiqués dans l'annexe 1. La vitesse du courant marin utiliser est un signal constant qui est représenté par la Figure III.2.

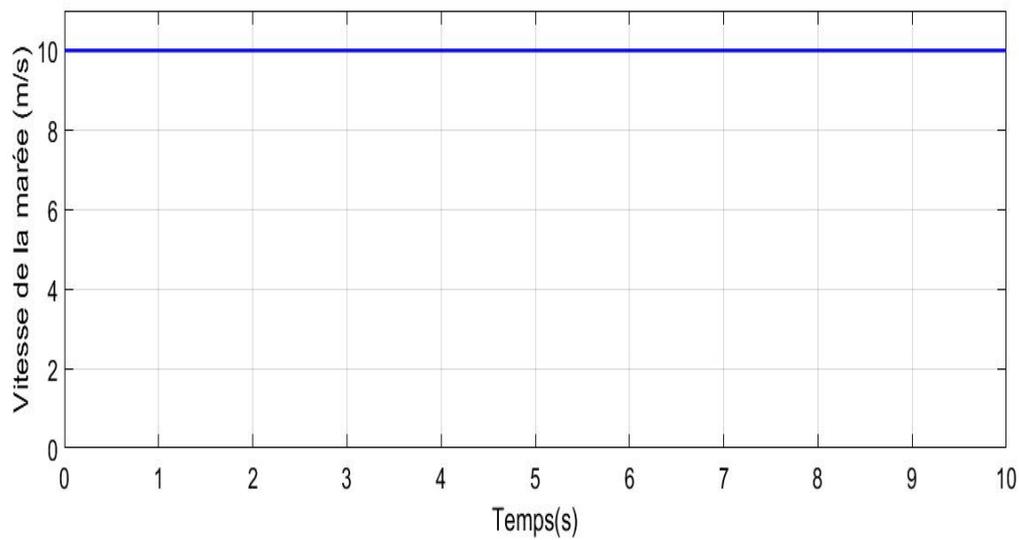


Figure III.2 vitesse de la marée

La Figure III.2 illustre la dynamique de la vitesse de marée, que nous avons pris comme valeur constante (10 m/s) en raison de la présence de petits changements qui se produisent avec le temps, elle est utilisée pour tester l'efficacité du système en boucle fermée.

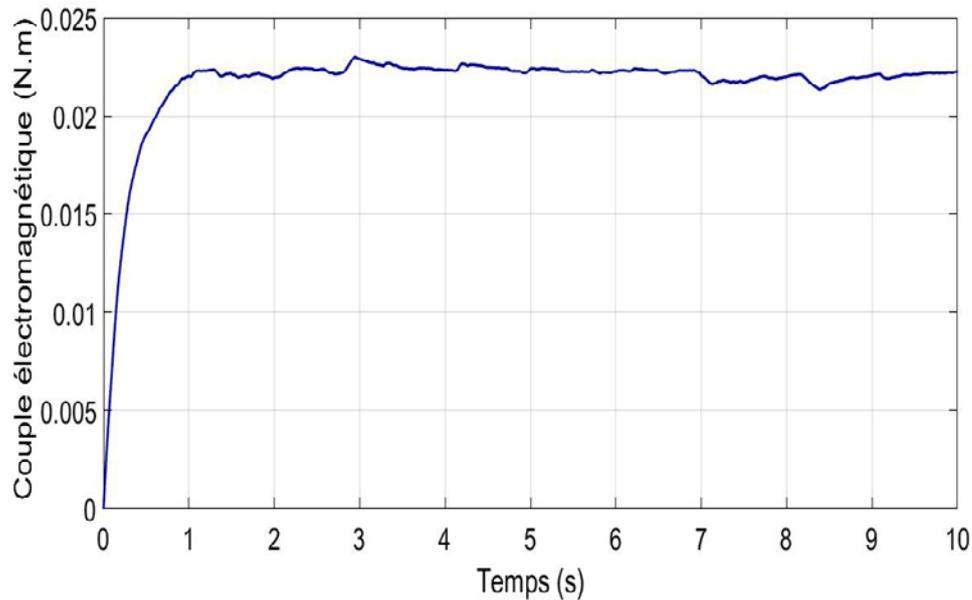


Figure III.3 Couple électromagnétique

Le couple électromagnétique développé par la GSAP est montré à la Figure III.3 On remarque que (C_e) se stabilise au régime établi.

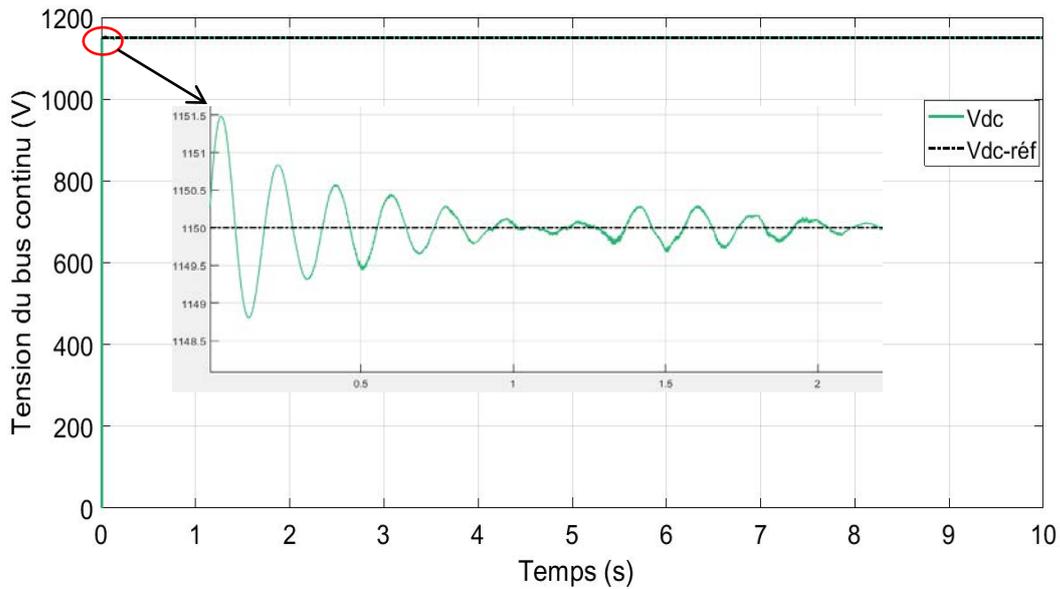


Figure III.4 Tension du bus continu

La Figure III.4 présente la dynamique de la tension du bus continu. Comme on peut le voir, il suit rapidement la valeur de référence 1150V, avec une convergence rapide et une erreur statique très faible.

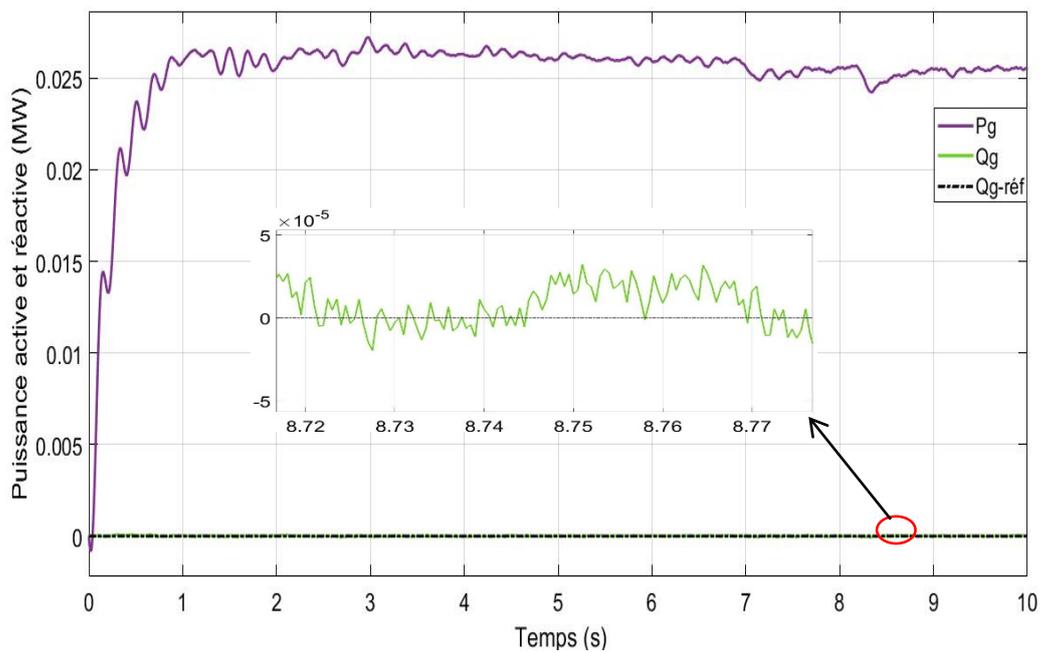


Figure III.5 Puissance active et réactive

L'évolution des puissances actives et réactives en fonctions du temps sont montrées par la Figure III.5 On remarque que la puissance réactive injectée au réseau est presque nulle,

par contre la puissance active est très importante. Cela montre un bon rendement et une bonne efficacité du système de génération d'énergie.

III.4 Test de robustesse

III.4.1 teste de variation de la résistance statorique

Des changements de paramètres ont été réalisés afin de tester la robustesse et l'efficacité du système. Comme le montrent les figures ci-dessous III.6-7-8, un changement de +50%, et +75% de la résistance statorique R_S , n'a aucun effet sur les performances du système.

Tel qu'on peut le voir, la tension du bus continu et la puissance réactive ne sont pas affectées et suivent rapidement leurs références et le couple électromagnétique se stabilise au régime établi. Il convient de rappeler que dans ce travail le contrôleur PI conventionnel est conçu uniquement pour réguler le bus continu et la puissance réactive.

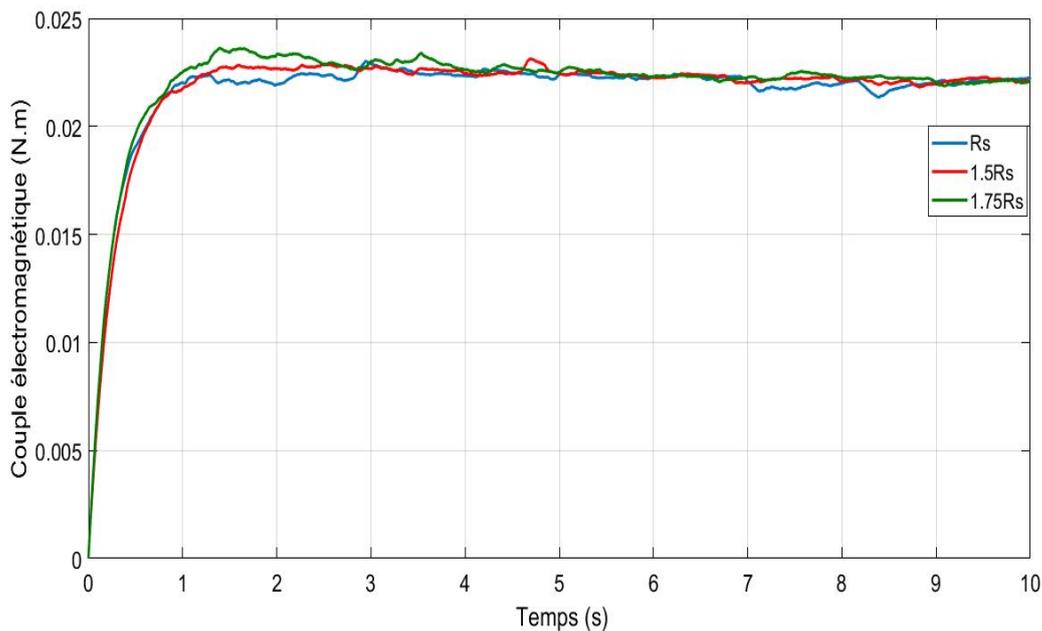


Figure III.6 Couple électromagnétique avec variation de +50%, +75% de R_S .

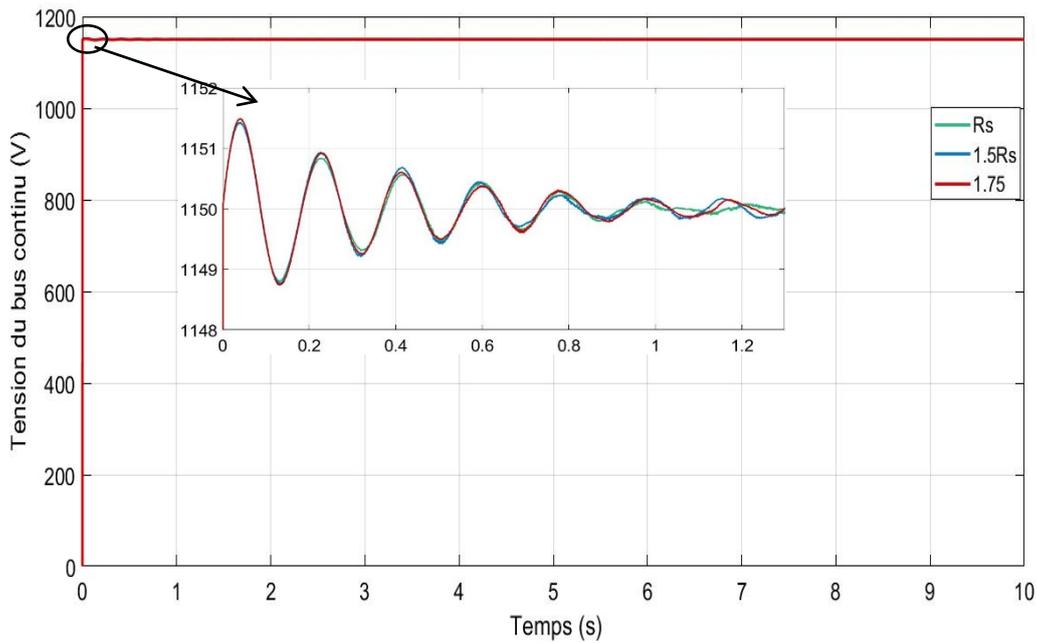


Figure III.7 Tension du bus continu avec variation de +50%, +75% de R_S .

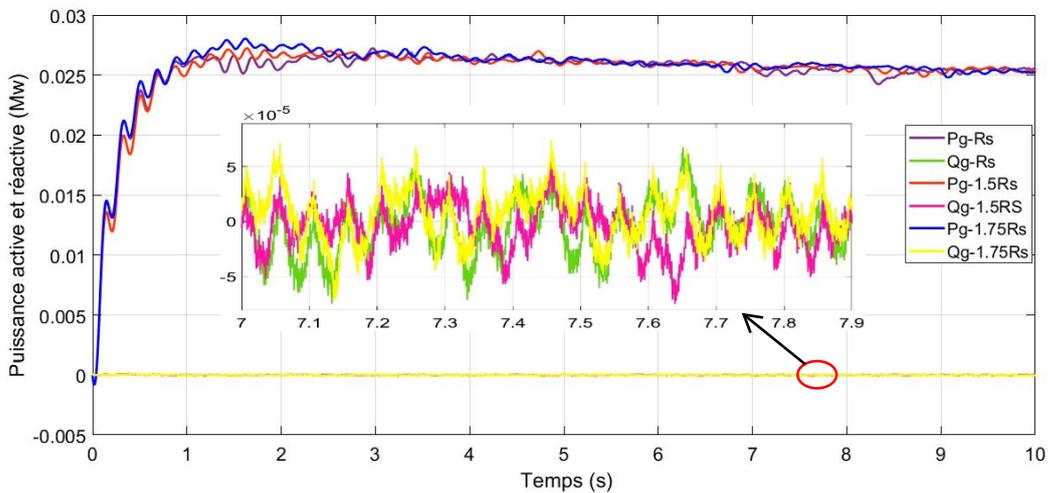


Figure III.8 Puissance active et réactive avec variation de +50%, +75% de R_S .

III.4.2 teste de variation du moment d'inertie

Un changement de +50% et +75% du moment de l'inertie totale J , montre une légère diminution de la partie mécanique (T_e) et la puissance active (p_g), mais comme indiqué, les réponses du bus continu et de la puissance réactive sont maintenues autour de leur valeur de

référence (Voir les figures III.9-10-11). Ceci est dû au fait que la conception CPBT qui utilise uniquement l'équation électrique de la GSAP où le sous-système mécanique est considéré comme une perturbation passive.

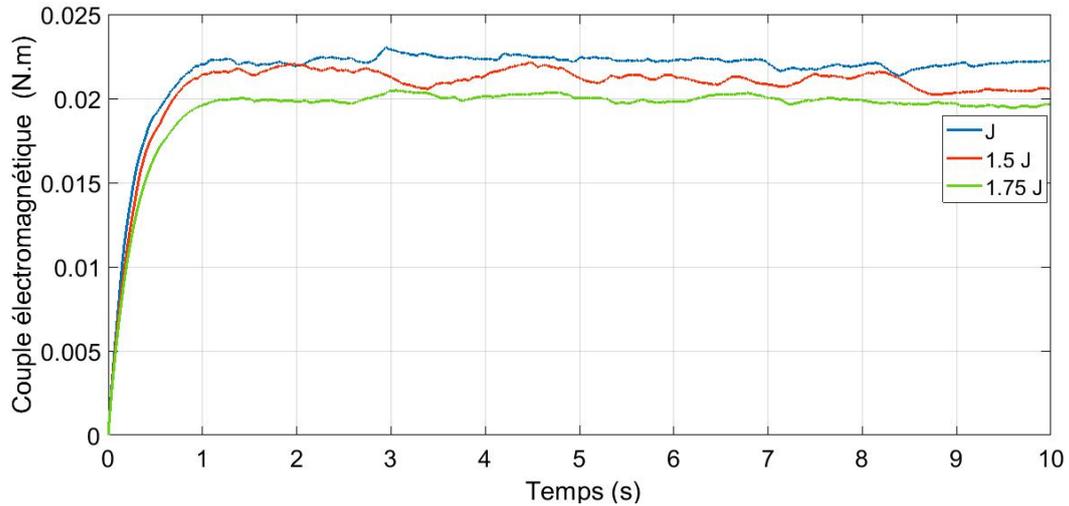


Figure III.9 Couple électromagnétique avec changement de +50% et +75% de J.

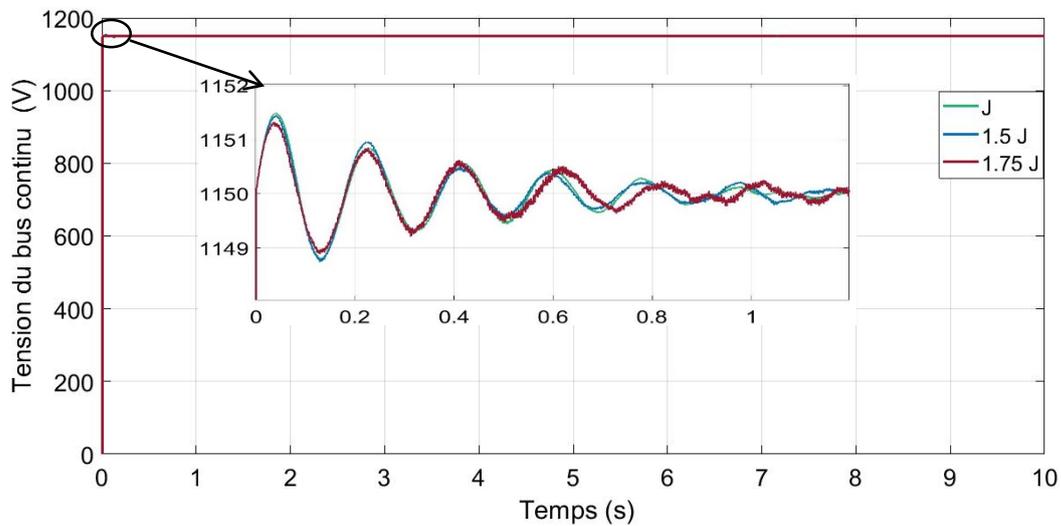


Figure III.10 Tension du bus continu avec changement de +50% et +75% de J.

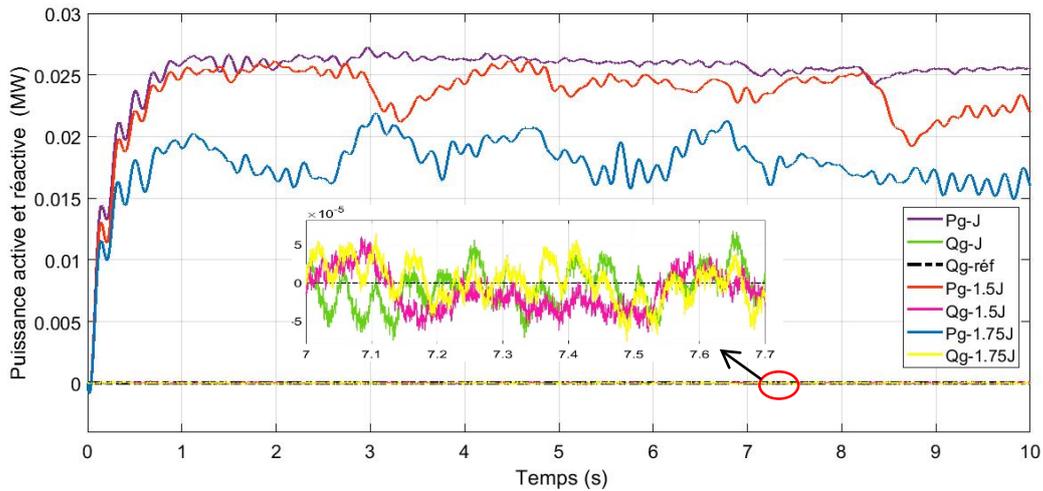


Figure III.11 Puissance active et réactive avec changement de +50% et +75% de J.

III.4.3 Teste de variation de la résistance statorique et du moment d'inertie

Pour le dernier essai, comme indiqué sur les figures ci-dessous III.12-13-14, une modification simultanée de +50% et de +75% de la résistance statorique ainsi que du moment d'inertie total donne une réponse similaire à celle du cas précédent (voir figures III 6-7-8), ceci est dû aux grandes valeurs des gains du terme de dissipation qui compensent les incertitudes paramétriques ainsi qu'à la convergence des erreurs de poursuite qui est assurée.

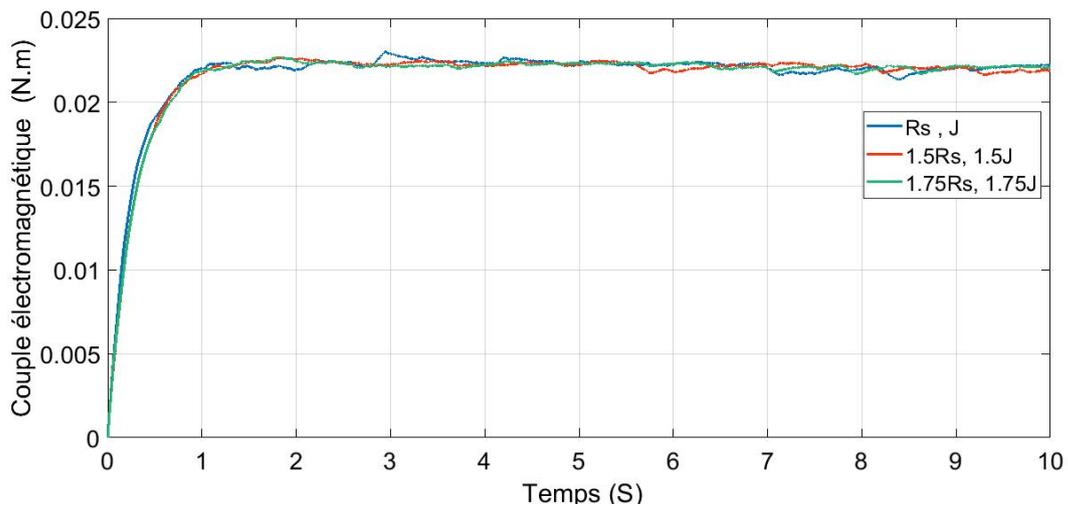


Figure III.12 Couple électromagnétique changement de +50% et de +75% de R_s et J.

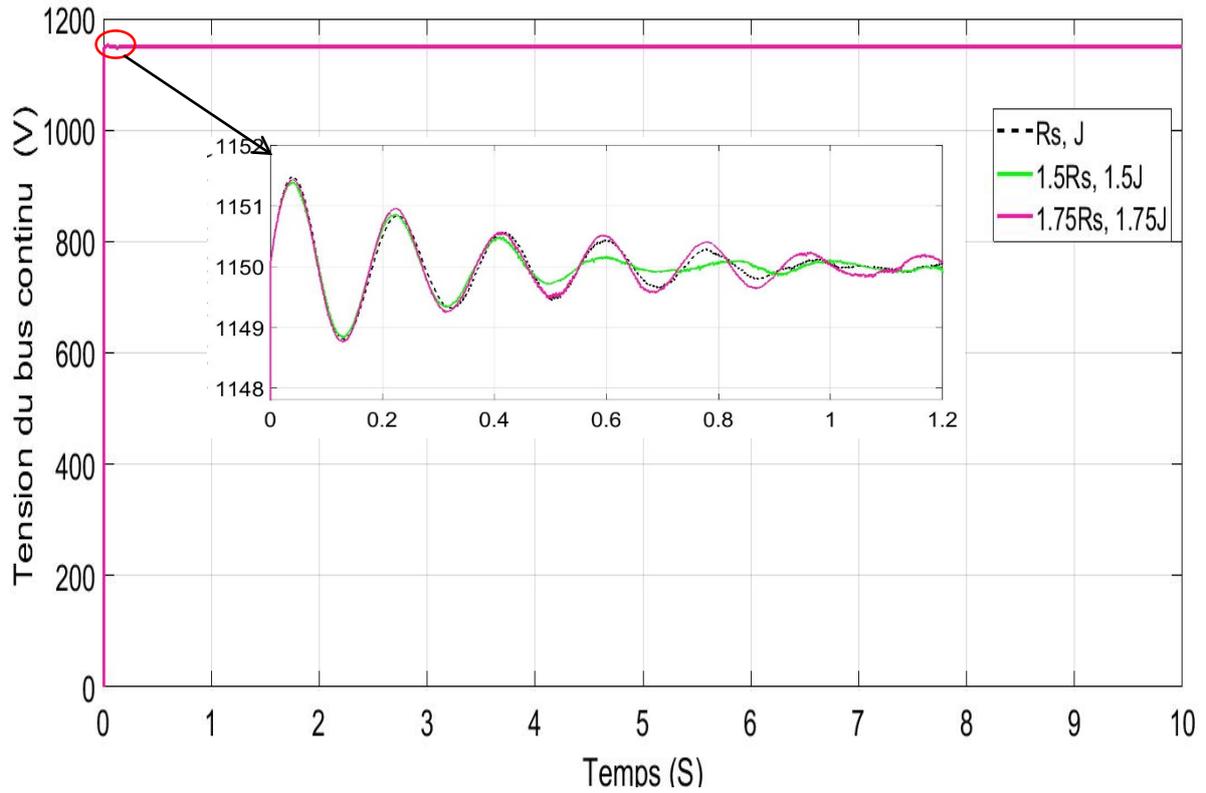


Figure III.13 Tension du bus continu avec changement de +50% et de +75% de R_s et J.

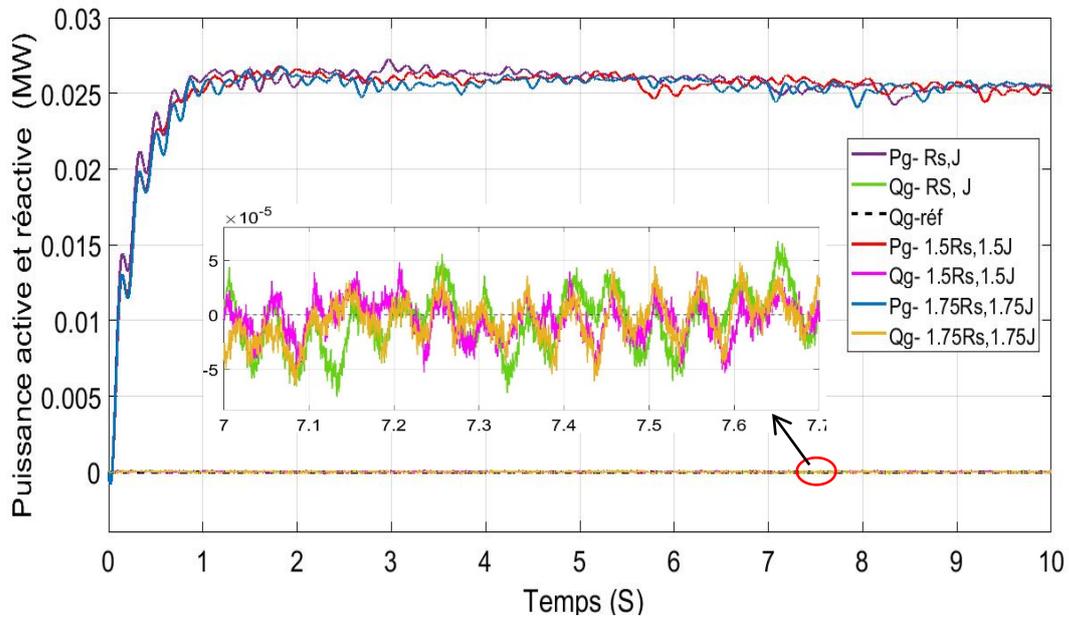


Figure III.14 Puissance active et réactive avec changement de +50% et de +75% de R_s et J.

III.5 Conclusion

Ce chapitre on analyser les différents composant de notre système et son fonctionnement, ont également traité les résultats de la simulation ainsi les tests de la robustesse de notre commande et montrent l'efficacité du système de conversion, avec l'inclusion de la dynamique de la GSAP pour une vitesse de marée utilisée.

Les études de simulation montrent une accélération du point de puissance maximale de la marée, et la puissance réactive générée est extrêmement réduite avec la méthode proposée.

Le système GSAP fournit une bonne performance, une robustesse contre les incertitudes des paramètres du générateur, et une efficacité.

La stratégie de contrôle est une structure raisonnable et relativement simple, et est très prometteuse dans les applications de l'énergie hydrolienne.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, on s'est intéressé à l'étude de la synthèse de commande basée sur la passivité en tension (CBPT) appliquée à une génératrice synchrone à aimants permanents, qui est associée en entraînement direct une turbine marine. Afin de trouver une solution qui réduit au maximum les contraintes de maintenance qui est l'un des inconvénients majeur de l'hydrolienne ; c'est pour cela que le choix de la commande a utilisé joue un rôle très important dans le prolongement de la durée de vie d'une hydrolienne.

Il y a quatre objectifs de la commande globale de ce système hydrolienne qui sont :

La synchronisation de la vitesse de la génératrice synchrone à aimants permanents à la vitesse de la turbine hydrolienne permet d'extraire le maximum de puissance mécanique disponible sur l'arbre de la turbine hydrolienne et de l'injectées dans le réseau, ceci est fait par la commande basée sur la passivité en tension (CBPT).

L'ajustement de la qualité du flux de puissances active et réactive injectées au réseau électrique pendant la variation de la vitesse des courants marins et de la résistance statorique ainsi que du moment d'inertie total, Ceci permet de minimiser aux maximum la puissance réactive générée, a la valeur de référence (nulle), ainsi la puissance active injectée au réseau est purement active.

Le contrôle de la tension du bus continu est réalisé 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 régulateur PI classique

Détermination de la valeur de la tension à transmettre dans le réseau à l'aide d'un transformateur électrique.

D'après les tests de simulation sur MATLAB/Simulink, on remarque que le système en boucle fermée a donné des résultats qui ont satisfait nos objectifs ; car la commande conçue est stable et efficace, elle n'est pas influencée par les fluctuations de l'environnement marin, fournit une bonne performance, une robustesse significative contre les variation des paramètres du la génératrice, aucune perturbation ne survient dans le réseau électrique car seule la puissance active est injectée dans ce dernier.

La stratégie de contrôle est une structure raisonnable et relativement simple, elle est très prometteuse dans les applications d'énergie hydrolienne. Actuellement, le système de conversion simulé est en cours de préparation pour la validation expérimentale.

Bibliographie

- [1] <https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/principe-et-fonctionnement-de-l-hydrolienne>
- [2] <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/la-circulation-oceanique-s1343>
- [3] Projet ADEM1 2005 : Les hydroliennes
- [4] Saad BELGANA « Étude et conception d'un système de production d'énergie électrique multi-sources », Mémoire de maîtrise en génie électrique, École de technologie supérieure université du Québec, 2017.
- [5] <https://vdm-hydrolienne.webnode.fr/iii-avantages-inconvenients/>
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] A. Tebbal et M. sekhri, « Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone a Aiment Permanent », Mémoire de master en électrotechnique, Université de Jijel, 2019.
- [9] M. MAYOUF « ETUDE comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aimants permanents » Université d'Al Hadj Lakhdar –Batna 2014.
- [10] I. Meghlaoui « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal » Mémoire de magister Université Badji Mokhtar – annaba,2009.
- [11] G.P.Nyoumea « modelés d'indentification et commande d'un aérogénérateur a machine synchrone a aimant permanents » Mémoire de maitrise en ingénierie, Université du Québec, 2018.
- [12] Ana Maria ANDREICA « Optimisation énergétique de chaînes de conversion hydroliennes-modélisation, commandes et réalisations expérimentales », Thèse de mémoire, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.

- [13] TPE Hydroliennes (webnode.fr)
- [14] A. Loria et R. Ortega, « Introduction à l'analyse des systèmes par l'approche entrée sortie », Systèmes de Régulation, Edition Masson, Paris 1996.
- [15] A. Y. Achour and B. Mendil, « Passivity based voltage controller-observer design with unknown load disturbance for permanent magnet synchronous motor », Proc. Of IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 201-206, 2014.
- [16] P. J. Nicklasson, R. Ortega et G. Espinosa : « Passivity-Based Control of a Class of a Blondel-Park transformable electric machine », IEEE. Transaction on Automatic control, Vol. 42, No. 5, pp. 629-647, May 1997.
- [17] Y. Belkhier & A. Achour, « Passivity-based Voltage Controller for Tidal Energy Conversion System with Permanent Magnet Synchronous Generator », Article in International Journal of Control Automation and Systems, Université Bejaia, September 2020.

Annexes

Paramètres utilisés dans la simulation :

➤ **La turbine :**

-Rayon de l'hélice : $R = 10$ m

-Nombre de pales : $P = 3$

-Inertie totale : $J = 35000$ kg. m²

-Coefficient de frottement visqueux :

Masse volumique de l'eau :

➤ **La machine :**

-Puissance nominale : 1.5 MW

-Vitesse nominale : 125 tr/min

-Résistance d'enroulement statorique : $R_S = 0.006\Omega$

-Inductance cyclique statorique : $L_d = L_q = 0,3$ mH

-Nombre de paire de pôles : $n_p = 48$

-Flux des aimant permanent : $\Phi_f = 1,48$ wb

➤ **Paramètres du bus continu :**

-Valeur de la capacité : $C = 0.99$ F

-Tension de bus continue : $V_{dc} = 1150$ V

- Valeur de l'inductance de lissage : $R_f = 0.3$ pu

-Valeur de l'inductance de lissage : $L_f = 0.3$ pu

➤ **Le réseau :**

-Tension d'alimentation : $V_s = 575$ V

-Fréquence : 60Hz

RESUME : ce travail concerne l'étude d'une chaîne de conversion d'énergie hydrolienne connecté aux réseaux électrique. L'objectif principal est de maximiser l'énergie extraite du courant marin et de résoudre les problèmes liés à la variation paramétrique ainsi que les propriétés non linéaires du système de conversion en utilisant la commande basée sur la passivité (CBP). Une CBP commandée en tension est proposée pour résoudre les problèmes de robustesses rencontrés par les commandes classiques dans le côté génératrice. La méthode vectorielle classique est utilisée pour injecter la puissance électrique produite par la génératrice dans le réseau électrique. Pour finir nous avons réalisé des tests de Simulation sur MATLAB/Simulink qui montrent l'efficacité de notre commande.

SUMMARY: this work concerns the study of a tidal turbine energy conversion chain connected to electrical networks. The main objective is to maximize the energy extracted from the sea current and to solve the problems related to the parametric variation as well as the non-linear properties of the conversion system using the passivity-based control (CBP). A voltage-controlled CBP is proposed to solve the robustness problems encountered by conventional controls in the generator side. The classic vector method is used to inject the electrical power produced by the generator into the electrical network. Finally, we carried out Simulation tests on MATLAB / Simulink which show the efficiency of our command

ملخص: يتعلق هذا العمل بدراسة سلسلة تحويل طاقة توربينات المد والجزر المتصلة بالشبكات الكهربائية. الهدف الرئيسي هو تعظيم الطاقة المستخرجة من تيار البحر وحل المشكلات المتعلقة بالتغير البارامترى وكذلك الخصائص غير الخطية لنظام التحويل باستخدام التحكم القائم على السلبية. تم اقتراح التحكم على أساس سلبية الجهد لحل مشاكل المتانة التي تواجهها أدوات التحكم التقليدية في جانب المولد. يتم استخدام طريقة المتجه الكلاسيكية لحقن الطاقة الكهربائية التي ينتجها المولد في الشبكة الكهربائية. أخيرًا، أجرينا اختبارات المحاكاة التي تُظهر كفاءة قيادتنا