

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAJA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Commande électrique

Thème

**Commande indirecte en couple d'une MADA dédiée à
une centrale hydro-électrique**

Réalisé par :

M^r HADDAR RYAD

M^r HAIL AKLI

Encadré par :

M^r FELLA BOUALEM

Promotion : 2018

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à réaliser ce modeste travail.

Ce travail n'allait pas prendre sa forme finale sans l'assistance de plusieurs personnes, Qu'elles trouvent à travers ces modestes lignes l'expression de nos sincères reconnaissances.

*Nos remerciements les plus profonds et les plus sincères s'adressent à notre encadreur **Mr FELLA Boualem** pour nous avoir guidés pas à pas dans notre progression.*

Ses encouragements, remarques, conseils et suggestions nous ont énormément aidés durant la réalisation de ce projet.

Nous remercions les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Enfin nous tenons à adressé nos vifs remerciements à toutes personnes ayant apporté un plus de près ou de loin à l'élaboration du présent travail.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, qui m'ont toujours soutenu dans les moments difficiles et qui n'ont jamais cessé de faire des efforts pour me mettre à l'aise et assuré ma réussite.

Ma sœur Lina.

Mon frère Ghiles.

Toutes la famille « HADDAR »

A tous mes amis sans exceptions

Mon collègue Akli et toute sa famille.

Toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à la réussite de ce présent travail.

Ryad

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, qui m'ont toujours soutenu dans les moments difficiles et qui n'ont jamais cessé de faire des efforts pour me mettre à l'aise et assuré ma réussite.

Ma sœur Sarah.

Mes frères Nabil, Anis et Amine.

Toutes la famille « HAIL »

A tous mes amis sans exceptions

Mon collègue Ryad et toute sa famille.

Toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à la réussite de ce présent travail.

AKLI

Table des matières

Liste des figures

Nomenclatures

Introduction générales.....1

Chapitre 1 : Généralité sur les centrales hydroélectriques

I.1-Introduction.....	3
I.2- Centrale hydro électrique.....	3
I.3- Principe de fonctionnement d'une centrale hydro-électrique.....	4
I.4- Les Différentes types de centrales hydroélectriques.....	5
I.5- Constitution des centrales hydroélectrique.....	6
I.5.1- Bassin.....	6
I.5.2- Pompes.....	6
I.5.3- Turbines.....	7
I.5.3.1- Choix du type de la turbine.....	8
I.5.3.1.1- Turbines à action (Turbines Pelton et Crossflow)	9
I.5.3.1.2- Turbines à réaction (Turbines Francis et Kaplan)	10
I.5.4- Les conduites forcées.....	12
I.5.5- Générateur.....	13
I.5.5.1- Le choix du type du générateur.....	13
I.5.6- les transformateurs.....	14
I.5.7- Le raccordement au réseau	14
I.6- Mode de fonctionnement.....	14
I.6.1- Fonctionnement à vitesse fixe.....	14
I.6.2- Fonctionnement à vitesse variable.....	15
I.7- Machine asynchrone double alimentation.....	15
I.8- Structure de la Machine asynchrone à double alimentation.....	16
I.9- Modes de fonctionnement de la MADA	16
I.10- Principe de fonctionnement de la MADA.....	18
I.11- Domaines d'application de la MADA.....	19
I.12- Avantages et inconvénients de la MADA.....	19
I.12.1- Avantages de la MADA.....	19
I.12.2- Inconvénients de la MADA.....	21
I.13- Conclusion.....	21

Chapitre 2 : Modélisation de la centrale hydroélectrique

II.1- Introduction	22
II.2- Description de la structure choisie à modéliser.....	22
II.3- Modélisation des différentes parties d'une centrale hydroélectrique.....	23
II.3.1- Modélisation de la turbine hydraulique.....	23
II.3.2- Modélisation du profile de l'eau.....	24
II.3.3- Modèle du multiplicateur.....	24
II.3.4- Equation dynamique de l'arbre de transmission.....	25
II.3.5- Stratégie de commande de la turbine hydrolienne.....	26

II.3.5.1- Extraction du maximum de puissance (MPPT)	26
II.3.5.2- Schéma de la turbine MPPT.....	28
II.3.6- Modélisation de la MADA.....	28
II.3.6.1- Hypothèses simplificatrices.....	29
II.3.6.2- Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan abc	29
II.3.6.3- Modèle de la machine asynchrone a double alimentation dans le plans dq.....	32
II.3.6.4- Modélisation de la MADA dans le repère de PARK.....	34
II.3.6.5- Choix du référentiel.....	35
II.3.6.5.1- Référentiel lié au stator.....	36
II.3.6.5.2- Référentiel lié au rotor.....	36
II.3.6.5.3- Référentiel lié au champ tournant.....	36
II.3.7- Modélisation des convertisseurs statiques.....	37
II.3.7.1- Modèle du convertisseur statique.....	37
II.3.7.2- Commande MLI des convertisseurs.....	39
II.3.8- Modélisation des bus continu.....	40
II.4- Conclusion.....	42

Chapitre 3 : stratégie de commande de la MADA et simulation

III.1- Introduction.....	43
III.2- La commande vectorielle de la MADA.....	43
III.3- Commande vectorielle par orientation du flux statorique.....	44
III.3.1- Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	45
III.3.2- Commande Indirecte de la MADA.....	48
III.3.2.1- Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....	48
III.3.2.2- Commande Indirecte sans Boucle de couple.....	49
III.3.2.2.1- Découplage entre les tensions rotoriques sur les axes directs et quadrature.....	49
III.3.2.3- Commande Indirecte avec Boucles de couple.....	53
III.4- Résultats de Simulation de la Commande Indirecte de la MADA.....	54
III.4.1- Résultats de simulation pour la commande indirecte sans boucle de couple	56
III.4.2- Résultats de simulation pour la commande indirecte avec boucle de couple	58
III.4.3- Résultats de simulation pour un test de robustesse.....	60
III.4.4- Résultats de simulation pour la commande indirecte avec boucle de couple et de flux.....	62
III.5- Conclusion.....	63
Conclusion générale.....	64

Bibliographie

Annexes

Liste des figures :

Chapitre 1 :

Figure I.1 : centrale hydroélectrique gravitaire	3
Figure I.2 : centrale hydroélectrique STEP	4
Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.....	5
Figure I.4 : Rendements relatifs des turbines hydrauliques pour débits variables.....	8
Figure I.5 : Turbine Pelton.....	9
Figure I.6 : Turbine Crossflow.....	10
Figure I.7 : Turbine Francis.....	11
Figure I.8 : Turbine Kaplan.....	11
Figure I.9 : Exemple de conduite forcée aérienne.....	12
Figure I.10 : Structure du rotor et du stator de la MADA.....	16
Figure I.11 : les quatre quadrants de fonctionnement de la MADA.....	17

Chapitre 2 :

Figure II.1 : schéma globale de la structure a modélisé.....	22
Figure II.2 : schéma de la turbine hydrolienne.....	23
Figure II.3 : Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.....	24
Figure II.4 : Schéma bloc de maximisation de la puissance extrait.....	27
Figure II.5 : Schéma bloc fonctionnel de la turbine avec MPPT.....	28
Figure II.6 : Représentation schématique de la MADA.....	30
Figure II.7 : Modèle de PARK de la MADA.....	33

Figure II.8 : Représentation de la machine dans le repère diphasé.....	34
Figure II.9 : schémas d'un onduleur de tension triphasé.....	38
Figure II.10 : Schéma de principe de la MLI.....	40
Figure II.11 : schéma du bus continu.....	40
Figure II.12 : régulation de la tension du bus continu.....	41

Chapitre 3 :

Figure III.1 : Principe de la commande vectoriel de la MADA.....	44
Figure III.2 : Orientation du flux statorique.....	45
Figure III.3 : schéma bloc de la MADA a orientation du flux statorique.....	48
Figure III.4 : Description des couplages.....	49
Figure III.5 : Reconstitution des tensions V_{qr} et V_{qf}	49
Figure III.6 : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles de couple.....	51
Figure III.7 : Schéma de régulation des courants i_{rd} et i_{rq}	51
Figure III.8 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de couple.....	53
Figure III.9 : Allure du profile de l'eau.....	54
Figure III.10 : Allure du coefficient de puissance.....	54
Figure III.11 : Allure de la vitesse mécanique.....	55
Figure III.12 : Allure du glissement.....	55
Figure III.13 : Allure de couple électromagnétique.....	56
Figure III.14 : Allure du flux statorique.....	56
Figure III.15 : (A) Allures des courants rotoriques, (B) un zoom.....	57
Figure III.16 : (A) Allures des courants statoriques, (B) un zoom	57

Figure III.17 : Allure de couple électromagnétique.....	58
Figure III.18 : Allure du flux statorique.....	58
Figure III.19 : (A) Allures des courants rotoriques, (B) un zoom.....	59
Figure III.20 : (A) Allures des courants statoriques, (B) un zoom.....	59
Figure III.21 : Allure de couple Électromagnétique pour $R'_r = 2R_r$	60
Figure III.22 : Allure du couple électromagnétique pour variation de la mutuelle.....	60
Figure III.23 : Allure de flux statorique pour $R'_r = 2R_r$	60
Figure III.24 : Allure de flux statorique Pour variation de la mutuelle.....	60
Figure III.25 : Allure des courants rotorique pour la variation de R_r	61
Figure III.26 : Allure des courants rotorique pour la variation de la mutuelle.....	61
Figure III.27 : Allure des courants statorique pour la variation de R_r	61
Figure III.28 : Allure des courants statorique pour la variation de la mutuelle.....	61
Figure III.29 : Allure du couple électromagnétique.....	62
Figure III.30 : Allure du flux statorique.....	62

Nomenclature :

A) Principales abréviations :

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

FTBO : Fonction de transfert en boucle ouverte

FTBF : Fonction de transfert en boucle fermée

PSO : Optimisation par essaim de particules

B) Principales notations :

V_{eau} : La vitesse du courant d'eau (m/s)

Ω_{turbine} : La vitesse de rotation de la turbine hydrolienne (tr/min)

Ω_{mec} : Vitesse de rotation du générateur (tr/min)

C_{turbine} : Couple de la turbine (N.m)

C_{hydr} : Couple hydrodynamique de la turbine (N.m)

C_{mec} : Couple mécanique (N.m)

C_{vis} : Couple de frottement visqueux (N.m)

C_{em} : Couple électromagnétique (N.m)

C_{g} : Couple moteur issu du multiplicateur (N.m)

C_{m} : Coefficient de couple

C_{p} : Coefficient de puissance

J_g : Inertie du générateur ($k_g \cdot m^2$)
 $J_{turbine}$: Inertie de la turbine ($k_g \cdot m^2$)
 J : Moment d'inertie totale ($k_g \cdot m^2$)
 f : Coefficient de frottement visqueux ($N_m \cdot s / rd$)
 λ : vitesse spécifique
 ρ : Masse volumique de l'eau ($k_g \cdot m^3$)
 R : Rayon de la turbine hydrolienne (m)
 S : Surface balayée par la turbine hydrolienne m^2
 G : Gain de multiplicateur de vitesse
 P_{hydr} : Puissance hydrodynamique ($watt$)
 P_{mec} : Puissance mécanique de la turbine hydrolienne
 P_s : Puissance active statorique
 Q_s : Puissance réactive statorique
 g : Coefficient de Glissement
 w_r : La vitesse angulaire du glissement
 V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions d'alimentation des enroulements statoriques (a, b, c)(V)
 V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Tensions d'alimentation des enroulements rotoriques (a, b, c) (V)
 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants statoriques (A)
 i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Courants rotoriques (A)
 R_s : Résistance statorique (Ω)
 R_r : Résistance rotorique (Ω)

- L_s, L_r : Inductance propre d'une phase statorique et rotorique (H)
- l_s, l_r : Inductance cyclique statorique et rotorique de la machine (H)
- M_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator (H)
- M_r : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor (H)
- M : Inductance mutuelle cyclique entre l'enroulement du stator et celle du rotor (H)
- M_{sr} : La valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une bobine statorique et une bobine rotorique (wb)
- ω_r : Pulsation du champ rotorique rd/s
- ω_s : Pulsation du champ statorique rd/s
- m : Indice de modulation
- f_p : Fréquence de la porteuse
- f_m : Fréquence de la tension de référence
- V_{sd}, V_{sq} : Tensions statoriques dans le repère de Park (d, q) (V)
- V_{rd}, V_{rq} : Tensions rotoriques dans le repère de Park (d, q) (V)
- e_d, e_q : Tensions de compensations directe et quadratique
- T_s : Constante de temps statorique.
- i_{sd}, i_{sq} : Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) (A)
- i_{rd}, i_{rq} : Courants rotoriques dans le repère de Park (d, q) (A)
- ϕ_{rd}, ϕ_{rq} : Flux rotoriques dans le repère de Park (d, q) (wb)
- ϕ_{sd}, ϕ_{sq} : Flux statoriques dans le repère de Park (d, q)

θ_s : Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe direct "d"
(rd)

θ_r : Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe direct "d"
(rd)

P : Le nombre de paires de pôles de la machine

ω_m : Vitesse électrique du rotor

θ : Angle électrique de position de la machine

V_s : Tension statorique (V)

V_{dc} : Tension redressée (V)

$U_a U_b U_c$: Tension simple à la sortie de l'onduleur (V)

$V_{ma} V_{mb} V_{mc}$: Tensions modulées du filtre

r : Coefficient de réglage

i_{on} : Courant à l'entrée de l'onduleur (A)

i_{dc} : Courant redressé (A)

i_c : Courant capacitif (A)

C : Capacité de bus continu (F)

L : Inductance de bus continu (H)

$S_1 S_2 S_3$: Fonction logique correspondent à l'état de l'interrupteur

(d,q) : repère directe et en quadrature

A) Indices :

Réf : indique la valeur de référence

mes : indique la valeur mesurée

est : indique la valeur estimée

opt : Indique la valeur optimale

Introduction générale

Le problème de tous les jours et dans le monde entier est de répondre à la demande énergétique qui augmente de plus en plus. L'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie. [2]

Face à cette demande, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais les risques d'accident liés à leur exploitation auraient des conséquences désastreuses, s'ajoute à ceci le coût du traitement des déchets. [2]

Face à ces problèmes, et pour minimiser l'émission du CO₂ par les centrales thermiques, plusieurs pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie classique, tel que les hydrolienne qui offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et d'une manière abondante.[2]

L'énergie hydraulique peut contribuer à une part significative des nouvelles sources d'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre. Leur exploitation raisonnée permet de produire de l'électricité exportable à terre. En effet, en plus des barrages hydrauliques, la mer est un fluide riche en flux énergétiques qui peuvent être exploités sous diverses formes. On peut citer par exemple, les énergies thermiques, hydro cinétiques (vagues et courants) et osmotiques. [28]

Le développement de la plupart de ces énergies connaît plusieurs difficultés d'ordre économique et technologique qui sont dues essentiellement aux nombres réduits de zones économiquement exploitables et aux coûts élevés des techniques proposées. Cependant, l'énergie hydraulique des courants d'eau que l'on peut récupérer par des machines appelées hydroliennes, connaît un intérêt considérable par les chercheurs et les industriels vu la grande similarité des technologies utilisées avec les éoliennes. Les systèmes hydroliennes se développent ainsi plus rapidement car on peut désormais s'appuyer sur des techniques fiables et éprouvées. [28]

L'objectif de notre travail est d'étudier et commander une centrale hydroélectrique équipée d'une Machine asynchrone à double alimentation (MADA) dédiée à une centrale hydroélectrique. Cette génératrice permet une production de l'énergie électrique à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources hydroliennes pour les différentes vitesses des courants d'eaux.

Notre travail est réparti en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur les centrales hydroélectriques, ainsi que les éléments les constituants. On présentera des généralités sur la MADA, ses applications, ainsi que ses différents modes de fonctionnement.

La partie électrique de la chaîne de conversion étudiée est consacrée à la machine asynchrone à double alimentation et les convertisseurs d'électronique de puissance qui sont le sujet du deuxième chapitre. On présentera la modélisation de la MADA, sa mise en équation permettra de simuler son modèle dans le mode moteur et générateur. On terminera cette partie par la modélisation de l'alimentation de la machine qui se compose d'un redresseur et d'un onduleur séparé par un bus continu.

Le troisième chapitre sera consacré à La commande vectorielle par orientation du flux qui présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

Dans cette optique, nous avons utilisé une loi de commande indirecte pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, en tenant compte des couplages entre les valeurs statoriques et rotoriques.

I.1- Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur la production et la distribution d'énergie électrique d'origine hydraulique issue des chutes d'eau d'un barrage (stockage sous forme d'énergie gravitaire) ou crée artificiellement (station de transfert d'énergie par pompage STEP), on va citer les différents constituant ainsi que les domaines d'utilisation des centrales hydroélectrique et enfin présentation de la machine asynchrone double alimentation et sa structure générale.

I.2- Centrale hydroélectrique

Une centrale hydroélectrique permet de fabriquer de l'électricité à partir de l'énergie hydraulique, grâce à la force de chute d'eau qui est d'origine naturelle (stockage sous forme d'énergie gravitaire) ou créés artificiellement à l'aide de deux bassin qui sont à différents niveau (station de transfert d'énergie par pompage STEP).

- **les centrales dites gravitaires :** ainsi nommées car les apports d'eau dans leur réservoir ou leur prise d'eau sont essentiellement issus de cours d'eau par gravitation, telles que les centrales au fil de l'eau ou les centrales hydroélectriques de lac. [11]

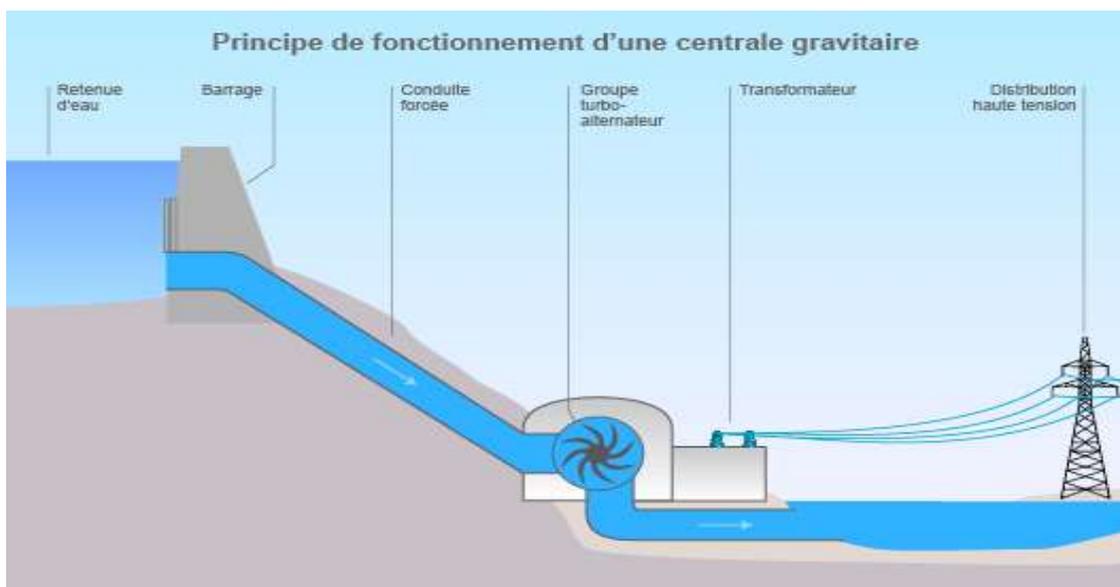


Figure I.1 : centrale hydroélectrique gravitaire

- **les stations de transfert d'énergie par pompage (S-T-E-P)** : aussi connues sous l'appellation « centrales hydrauliques à réserve pompée » ou « centrale de pompage-turbinage », dans lesquelles des turbines réversibles pompent l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. [11]

Généralement, elles turbinent lorsque le prix de l'électricité est plus élevé (par exemple : lorsque la demande augmente), et pompent lorsque celui-ci est bas (par exemple : lorsque la demande est faible). Les différences de prix entre courant pompé et courant turbiné sont donc un facteur important pour ces centrales.

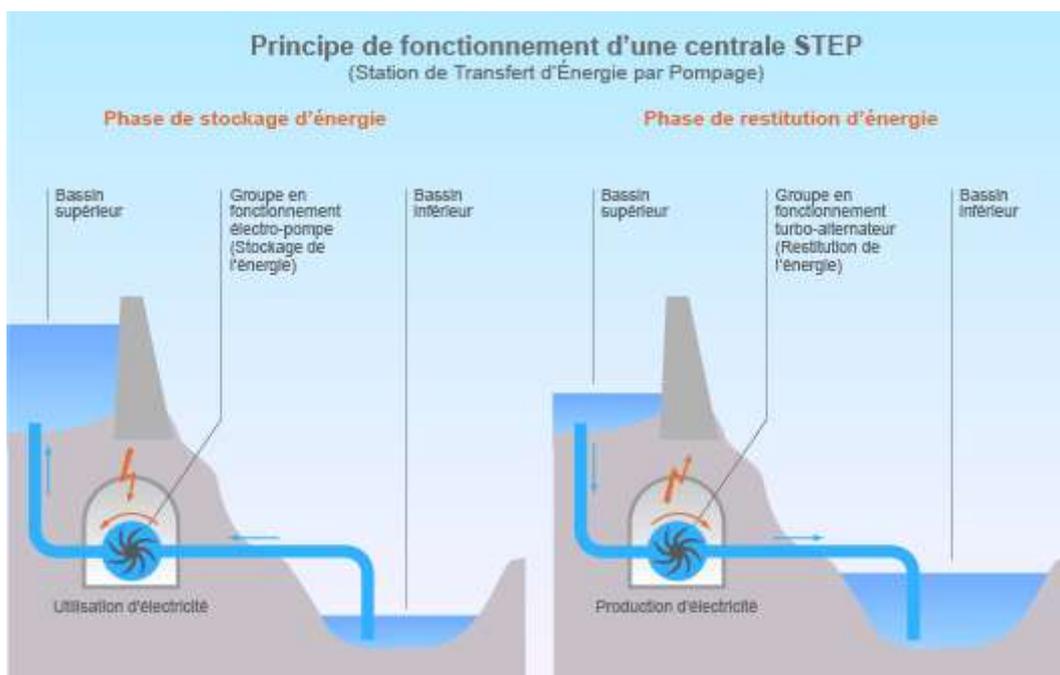


Figure I.2 : Centrale hydroélectrique STEP

I.3- Principe de fonctionnement d'une centrale hydro-électrique

Une centrale hydraulique produit de l'électricité en utilisant la force de l'eau, l'hydroélectricité est la première énergie renouvelable dans le monde, il existe plusieurs types d'aménagement hydraulique en fonction de la hauteur de la chute (de hautes chute, de moyenne chute et au file de l'eau) et du débit de l'eau.

Un barrage retient l'écoulement naturelle de l'eau, de grandes quantité d'eau s'accumule et forme alors un lac de retenu.

Une fois l'eau stockée, des vannes sont ouvertes au niveau du barrage pour que l'eau s'engouffre dans de longs tuyaux appelés conduite forcée, ces tuyaux à taille humaine, conduisent l'eau vers la centrale hydraulique située en contrebas.

Pour préserver le milieu aquatique, un débit minimal est maintenu dans le milieu naturel entre le barrage et la centrale.

Dans la centrale, à la sortie de la conduite, la force de l'eau fait tourner une turbine qui fait à son tour tourner un générateur. A l'intérieure du générateur, l'interaction entre le rotor et les bobines de fils de cuivre du stator produit un courant électrique, un transformateur élève ensuite la tension de ce courant à 225 ou à 400 V pour qu'ils puissent être transporté plus facilement dans les lignes à très hautes tension du réseau.

Enfin, l'eau turbinée qui a perdu de sa puissance rejoint le nit naturel de la rivière par un canal spéciale appelé canal de fuite.

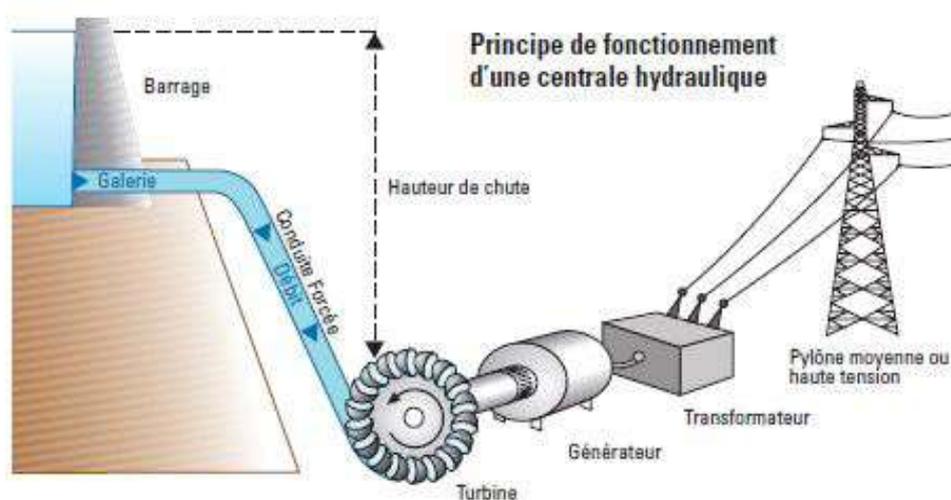


Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

I.4- Les Différents types de centrales hydroélectriques

Il existe une grande diversité d'installations hydroélectriques, en fonction de leur situation géographique, du type de cours d'eau, de la hauteur de la chute, de la nature du barrage et de sa situation par rapport à l'usine de production électrique.

On distingue deux types de centrale hydroélectrique : centrale alimentée par un réservoir, centrale au fil de l'eau.

➤ Centrale alimentée par un réservoir

Ces centrales sont alimentées par la retenue d'eau dans les barrages qui permettent un stockage d'eau saisonnier ou interannuel, le réservoir permet donc de moduler le débit d'eau selon la demande d'électricité.

Il existe deux types de centrale de lac : centrales de hautes chutes (centrale de lac) qui sont installées en haute montagne. Elles sont caractérisées par un débit faible et avec une chute supérieure à 300 m. Les centrales de moyennes chutes (centrale d'éclusée) qui sont installées dans les montagnes de moyenne hauteur, elles sont caractérisées par un débit moyen et un dénivelé assez fort avec une chute comprise entre 30 et 300 m.

➤ Centrale au fil de l'eau

Elles sont implantées sur le cours de grands fleuves ou de grandes rivières. Elles sont caractérisées par un débit très fort et un dénivelé faible avec une chute de moins de 30 m. Dans ce cas, il n'y a pas de retenue d'eau et l'électricité est produite en temps réel. [14]

I.5- Constitution des centrales hydroélectriques

I.5.1- Bassin

Les retenues d'eau, haute et basse, peuvent être soit naturelles, soit artificielles. Dans ce dernier cas, les bassins sont généralement réalisés par creusement et par utilisation des matériaux de déblai pour créer une ceinture de digues fermant la cuvette. Suivant la topographie du terrain à l'origine, plat ou déjà en dépression. Les travaux de terrassement sont plus au moins importants. La cuvette ainsi réalisée est ensuite généralement étanchée par un revêtement en béton bitumineux ou en brai vinyle. Le coût de construction de telles installations est donc très variable en fonction du terrain. [16]

I.5.2- Pompes

Les pompes hydrauliques sont des générateurs de débit, elles transforment l'énergie mécanique en énergie hydraulique, vers des récepteurs.

Le rendement des pompes se situe généralement entre 70 % (pour les pompes centrifuges) et 90 % (pour les pompes volumétriques).

Le choix d'un type de pompe doit être fait en accord avec les caractéristiques hydrauliques de l'installation envisagée (débit, hauteur manométrique) :

- Les pompes centrifuges sont adaptées aux débits moyens et élevés pour des hauteurs limitées,
- Les pompes volumétriques sont destinées à des faibles débits et des grandes hauteurs.

Dans le cas de pompes de surface, elles seront auto-amorçantes. Le couple au démarrage (3 à 5 fois le couple nominal) nécessite systématiquement l'usage d'un contrôleur.

Depuis que les stations de turbinage-pompage sont devenues des moyens de stockage très efficaces et économiques, de nombreux efforts ont été faits pour améliorer le côté économique et fiable de ces stations.

Actuellement, les groupes de pompage-turbinage en exploitation sont quasiment tous réalisés avec des moto-générateurs synchrones à la fréquence du réseau et par conséquent à vitesse constante. Les performances de tels groupes peuvent être massivement améliorées en recourant à des moto-générateurs à vitesse variable.

Les principales caractéristiques des systèmes de stockage avec des pompes à vitesse variable sont :

- une régulation de la puissance active de la pompe.
- une grande efficacité et une large gamme d'opérations en mode de turbinage, particulièrement sous chargement partiel.
- -une amélioration de la stabilité du système en injectant de la puissance active ou par compensation de la puissance réactive.

Les coûts de pompe estimés dans l'outil sont basés sur des pompes à vitesse constante et non réversibles. [18]

I.5.3- Turbines

Une turbine hydraulique est une machine tournante, constituée principalement d'une roue à aubes, qui reçoit de l'énergie d'un fluide, sous forme d'énergie de pression ou d'énergie cinétique et qui la transforme en énergie mécanique directement utilisable sur un arbre en rotation.

Le rendement des turbines se situe généralement entre 80 et 90 % ; il croît avec la taille des roues.

Il existe plusieurs types de turbines dont le choix sera fonction de la hauteur de chute et du débit du site sélectionné pour l'installation d'une centrale. [18]

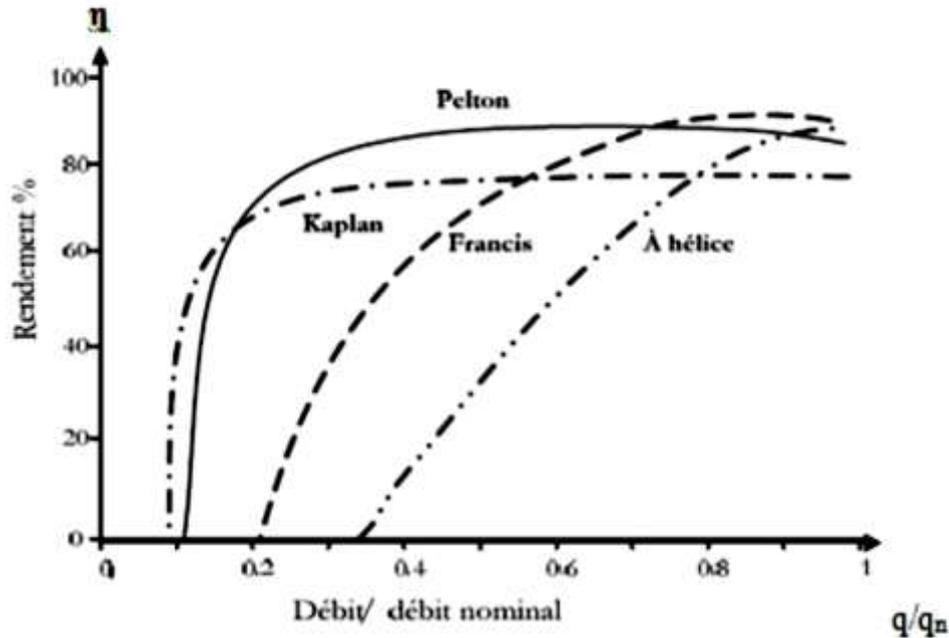


Figure I.4 : Rendements relatifs des turbines hydrauliques pour débits variables

I.5.3.1- choix du type de la turbine

Les turbines utilisées dans les installations dont la chute est élevée sont généralement appelées turbines à impulsion. La famille des turbines à impulsion comprend : les turbines Pelton, Banki-michell (crossflow). Les pales de ces turbines à impulsion recueillent l'énergie d'un jet d'eau à haute vitesse puis finissent leur course dans l'air.

Les petites turbines hydrauliques peuvent atteindre des rendements avoisinant 90 %. On veillera à choisir la meilleure turbine pour chaque application, étant donné que certaines donnent un bon rendement que dans une plage limitée de débits (ex. : les turbines à hélice à pales fixes).

Pour la plupart des petites centrales au fil de l'eau où le débit varie considérablement, il est préférable de faire appel à des turbines à réaction qui donnent un bon rendement dans une vaste gamme de débits (ex. : Kaplan, et turbine Francis). On peut également utiliser plusieurs turbines qui fonctionnent dans une plage limitée de débits et à vitesse variable pour s'adapter aux variations du débit.

I.5.3.1.1- Turbines à action (Turbines Pelton et Crossflow)

➤ Principe de fonctionnement

Un jet d'eau agit sur des augets en forme de double cuillère placés à la périphérie de la roue. Ce jet exerce une force hydraulique sur l'auget en rotation, effort qui est converti en couple sur l'arbre de la turbine. La turbine à action est caractérisée par le fait que l'énergie à disposition de l'aubage a lieu à pression constante, généralement la pression atmosphérique. La roue de la turbine est dénoyée et tourne dans l'air. [17]

➤ Turbine Pelton

La turbine Pelton est constituée par une roue à augets qui est mise en mouvement par un jet d'eau provenant d'un injecteur. Les augets sont profilés pour obtenir un rendement maximum tout en permettant à l'eau de s'échapper sur les côtés de la roue. La vitesse nominale de la turbine varie de 500 tr/min à 1500 tr/min. [17]

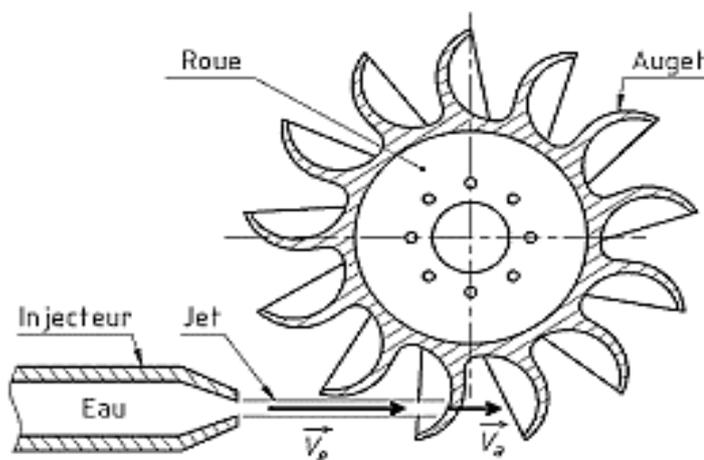


Figure I.5 : Turbine Pelton

➤ Turbine Crossflow (ou Banki Mitchell)

La turbine Crossflow, appelé aussi turbine à flux traversant, est une machine à action qui a ceci de particulier que l'eau traverse deux fois la roue. De construction simple, elle est constituée de trois parties principales

- Un injecteur de section rectangulaire et dont le débit est réglé à l'aide d'une aube profilée rotative, similaire à une vanne papillon.
- Une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilée.

- Un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine.

En général sa vitesse de rotation est faible, ce qui justifie l'emploi d'un multiplicateur pour la coupler à une génératrice. [17]

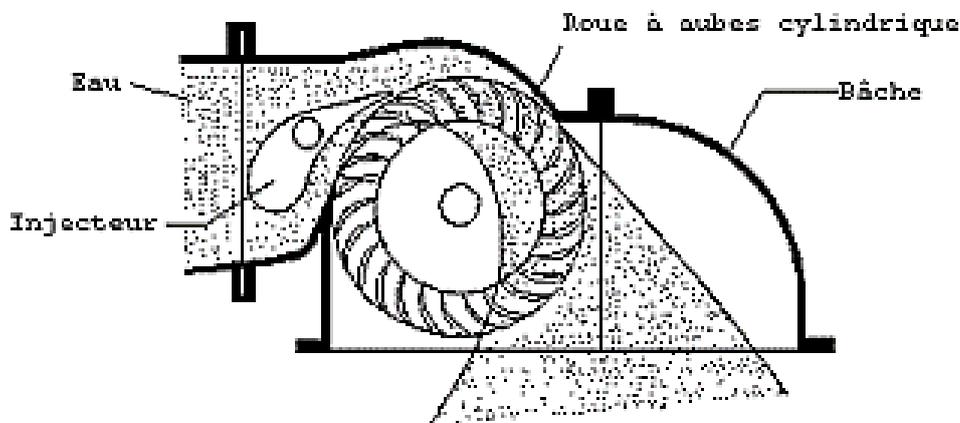


Figure I.6 : Turbine Crossflow

I.5.3.1.2- Turbines à réaction (Turbines Francis et Kaplan)

➤ Principe de fonctionnement

Une turbine à réaction est une machine complètement immergée dans l'eau et mise en rotation par effet tourbillon au moyen d'une bêche en forme de spirale et des aubages directeurs fixes ou mobiles. Les aubages de la turbine sont profilés de manière à donner aux filets d'eau une direction parallèle à l'axe de rotation à la sortie de la turbine. C'est à la fois l'énergie cinétique de l'eau et la différence de pression entre l'intrados et l'extrados des aubages qui génère le couple, contrairement aux turbines à action pour lesquelles seule l'énergie cinétique de l'eau est impliquée. [17]

➤ Turbine Francis

La turbine Francis est utilisée pour des faibles variations de débit (débits moyens entre 100 l/s et 6000 l/s). Elle s'adapte bien aux chutes moyennes de 10m à 100m. Elle a un bon rendement et une vitesse de rotation élevée (1000 tr/min). [17]

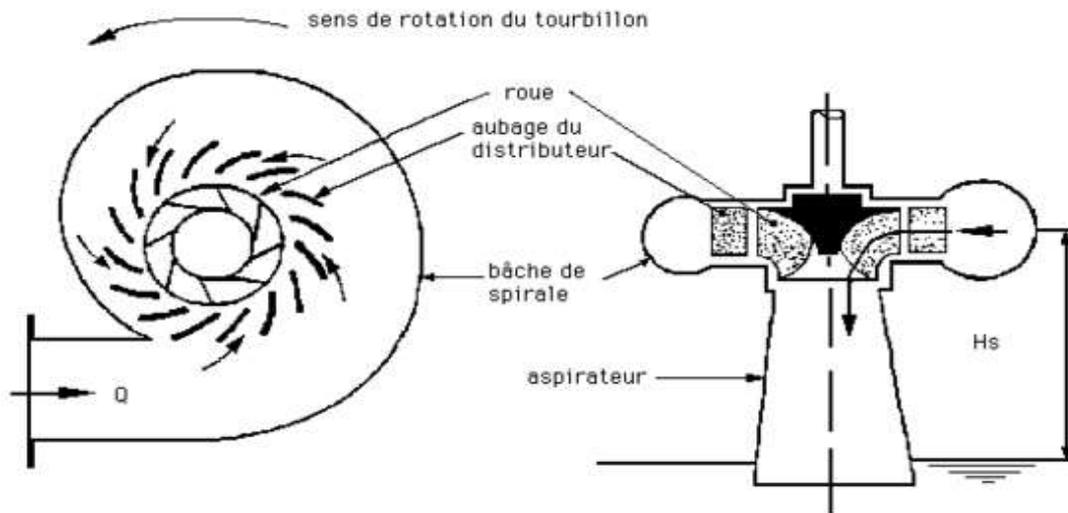


Figure I.7 : Turbine Francis

➤ **Turbine Kaplan**

Les turbines Kaplan (ou turbines hélice) sont les turbines les mieux adaptées pour les faibles chutes (environ 2m) et des débits importants de l'ordre de 300 l/s à 15000 l/s. Elles conviennent bien pour des débits variables et leur rendement est bon (84-90% maximum) en dépit d'une vitesse de rotation faible.

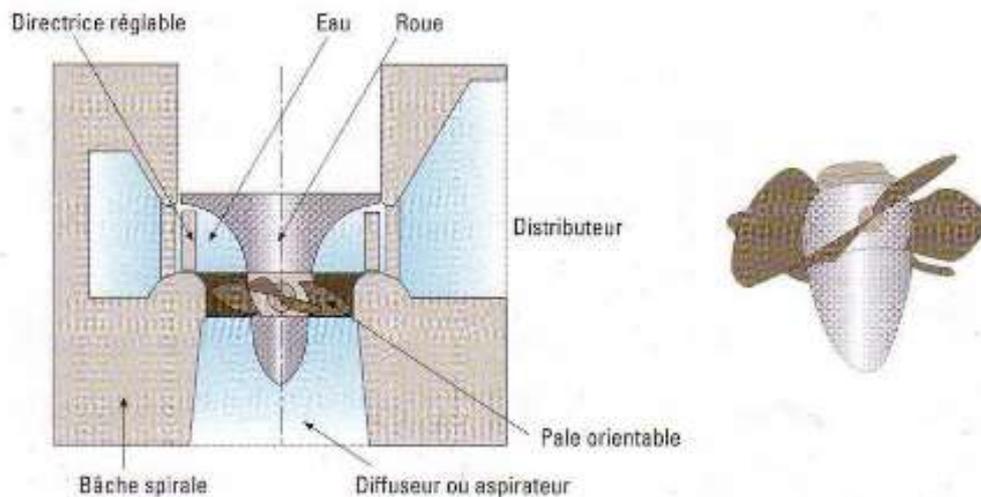


Figure I.8 : Turbine Kaplan

La roue de la turbine Kaplan est semblable à une hélice de bateau et les pâles sont orientables pour optimiser le coefficient de rendement η_t de la turbine.

La turbine Kaplan offre une analogie intéressante avec les turbines éoliennes sur l'aspect du réglage de l'orientation des pâles. [17]

I.5.4- Les conduites forcées

Les conduites forcées des petites centrales sont réalisées avec des tuyaux standards disponibles sur le marché pour d'autres applications (eau potable et eaux usées).

Le choix du matériau des tuyaux est essentiellement en fonction de la chute (ou pression) et du diamètre de la conduite. [18]

Les tuyaux pour canalisations en plastique ou fibro-ciment sont utilisables pour les faibles hauteurs, jusqu'à 10 ou 20 m. Jusqu'à 140 m de chute (pression 14 bars) et pour des faibles diamètres (200 mm ou moins), le plastique, PVC, PE ou polyester, présente de multiples avantages, en particulier du point de vue du prix et de la résistance à la corrosion. Pour des pressions plus élevées et des conditions de terrain difficiles, le choix se limite aux tuyaux en fonte, qui ont fait leurs preuves dans l'approvisionnement en eau, ou en acier inox. [18]



Figure I.9 : Exemple de conduite forcée aérienne

Les conduites forcées des petites centrales récentes sont généralement enterrées, ce qui permet de préserver le paysage. [18]

I.5.5- Générateur

La puissance mécanique est transformée en puissance électrique par un générateur de courant. Il est mis en rotation par la turbine ; en général par un accouplement direct ou par un système de transmission.

I.5.5.1- Le choix du type du générateur

Dans les microcentrales, on rencontre principalement :

➤ **Les machines synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné**

Elles restent les génératrices les plus utilisées pour générer une tension alternative sinusoïdale. Pour fournir une fréquence constante, il faut un système de régulation mécanique du débit d'eau permettant de maintenir une vitesse constante de la turbine.

Le rendement hydraulique global est diminué du fait des pertes de charge introduites par la vanne de régulation. [17]

➤ **Les machines asynchrones à cage débitant sur un réseau ou sur charge isolée.**

Son utilisation reste encore limitée mais devrait rapidement évoluer du fait du coût relativement faible de la machine asynchrone par rapport à la machine synchrone. En fonctionnement autonome, la génératrice asynchrone pose des problèmes importants de stabilité en tension et en fréquence. Il faut des capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine, et le fonctionnement ne peut se faire qu'avec une plage de vitesse restreinte. Les charges utilisées ne doivent par conséquent pas être exigeantes en tension et en fréquence. [17]

➤ **Les Machines asynchrones à double alimentation**

Actuellement, il existe très peu d'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans les microcentrales hydrauliques. Toutefois des exemples d'applications intéressantes existent dans les systèmes éoliens et son utilisation est envisagée dans l'aéronautique. Elle permet de pallier aux problèmes précédents de stabilité de la machine asynchrone à cage et autorise réellement un fonctionnement à vitesse variable. Une excitation auxiliaire fournie aux enroulements du rotor permet de contrôler la tension et la fréquence au stator. [17]

I.5.6- Les transformateurs

Les transformateurs sont des appareils extrêmement divers, par leur fonction, mais aussi par leur taille et leur coût.

Les deux grandes catégories sont les transformateurs de puissance et les transformateurs de mesure.

Les transformateurs de puissance sont indispensables quand la centrale doit débiter sur un réseau de tension 20 kV ou plus. Ils permettent d'élever la tension du générateur à 20 kV ou plus. [18]

I.5.7- Le raccordement au réseau

Pour les installations hydroélectriques d'une puissance inférieure à 250kW, le raccordement se fait sur le réseau moyenne ou basse tension. Les caractéristiques d'un raccordement au réseau basse tension sont les suivantes :

- le point de raccordement doit être à proximité de l'installation ;
- un système de protection réseau est obligatoire ;
- un dispositif de comptage pour l'énergie fournie et l'énergie consommée par l'installation hydraulique doit être installé.

Le coût d'un raccordement au réseau est fonction de la distance de ce dernier par rapport à l'installation de stockage. [18]

I.6- Mode de fonctionnement

Il existe essentiellement deux modes de fonctionnements des hydroliennes suivant la source d'énergie,

I.6.1- Fonctionnement à vitesse fixe

Le système hydrolien se caractérise par une vitesse de rotation pratiquement constante, il emploie des génératrices à inductions connectées directement au réseau. La vitesse de la turbine est réglée par le rapport du multiplicateur de vitesse et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. Ce système présente des avantages et des inconvénients : [12]

➤ **Avantages**

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

➤ **Inconvénients**

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

I.6.2- Fonctionnement à vitesse variable

Dans ce mode de fonctionnement l'hydrolienne tourne à vitesse variable. Il est donc indispensable d'optimiser et de réguler la puissance captée en fonction de la vitesse du courant marin, ceci par la régulation de la vitesse de rotation de l'hydrolienne et il est nécessaire d'utiliser des génératrices à fréquence fixe et vitesse variable ce qui permet de fonctionner sur une large gamme de vitesse du courant marin pour récupérer le maximum de puissance [12]

➤ **Avantages**

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

➤ **Inconvénients**

- Complexité de la commande et de la construction du système.

I.7- Machine asynchrone à double alimentation

La Machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone à rotor bobiné dont les enroulements du stator sont directement reliés au réseau électrique. Les enroulements du rotor sont reliés au réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur statique de fréquence réversible en puissance (onduleur/redresseur).

Cette machine est un peu plus complexe que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, et leur robustesse est

légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage.

Cette machine nous offre l'avantage de passer d'un fonctionnement à un autre de manière assez fluide. Effectivement la MADA est une machine généralisée (peut fonctionner en asynchrone ou synchrone).

I.8- Structure de la machine asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles. Son stator est identique à celui de la machine asynchrone à cage d'écurueil (MAS) ou d'une machine synchrone (MS) et son rotor se diffère radicalement puisqu'il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écurueil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

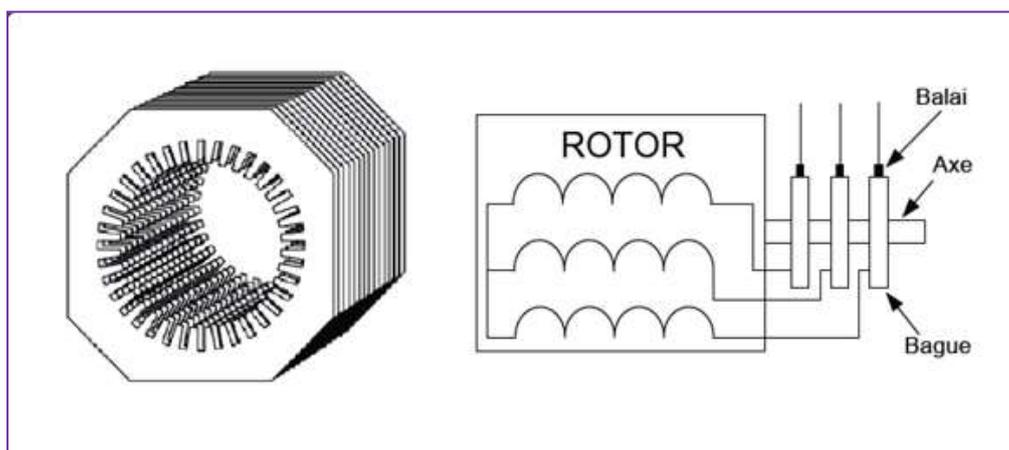


Figure I.10 : Structure du rotor et du stator de la MADA

I.9- Modes de fonctionnement de la MADA

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur.

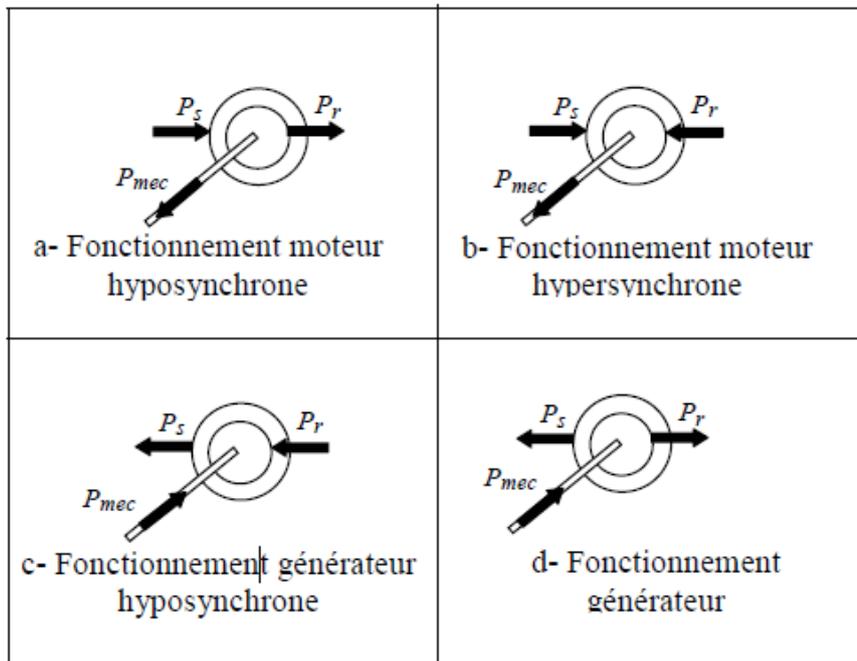


Figure I.11 : les quatre quadrants de fonctionnement de la MADA

Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. [2]

Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement :

I.9.1- Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone

- La puissance est fournie par le réseau au stator.
- La puissance de glissement est renvoyée au réseau.
- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

I.9.2- Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone

- La puissance fournie par le réseau va au rotor et stator.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme,
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement

I.9.3- Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement
- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.

I.9.4- Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme.

La machine asynchrone à cage peut être fonctionnée ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor

I.10- Principe de fonctionnement de la MADA

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices $f.m.m$ du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Du moment que le vecteur résultant de $f.m.m$ des enroulements statoriques tourne, dans l'espace, avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$ et que le rotor tourne à la [1]

vitesse ω_r par conséquent, pour satisfaire à cette condition, il faut que le vecteur $f.m.m$ de l'enroulement rotorique tourne par rapport au rotor avec la vitesse :

$$\omega_g = \omega_s - \omega_r = \omega_s - \omega_s (1 - g) = \omega_s \cdot g \quad (I.1)$$

Où :

g : est le coefficient de glissement.

ω_g : est la vitesse angulaire du glissement.

C'est-à-dire proportionnellement au glissement g ; si la vitesse du moteur est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation sont identiques ; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à celle de synchronisme les sens seront opposés.

Pour que la rotation du vecteur f. m. m par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_r , définie à partir de $\omega_s \cdot g = 2 \cdot \pi \cdot f_r$; c'est-à-dire

$$f = g \cdot f_s \quad (I. 2)$$

I.11- Domaines d'application de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation a été conçue pour fonctionner en moteur sur une grande plage de variation de vitesse comme première application. L'utilisation d'une MADA permet de varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques, ce dispositif sera donc économique quand on place les convertisseurs entre le rotor et le réseau en réduisant leurs tailles d'environ 70%.

Pour le fonctionnement de la MADA en génératrice, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines asynchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée. [10]

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation du carburant.

I.12- Avantages et inconvénients de la MADA

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

I.12.1- Avantages de la MADA

Comme avantages de la MADA, on peut citer :

- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur. [4]
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse.
- Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée. [4]
- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine. [5]
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse. [2,6]
- Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement. [5]
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation. [6]
- Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau. [7]

I.12.2- Inconvénients de la MADA

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone, alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix [8].
- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [9].

I.13- Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur les centrales hydroélectrique. Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie hydroélectrique ont été données comme les différents types de centrale hydroélectrique, leurs mode de fonctionnement leurs constitution ainsi que leurs avantages et inconvénients

A la fin de ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la Machine asynchrone à double alimentation, ou on a constaté l'intérêt grandissant accordé par les divers auteurs à cette machine.

Cette étude porte principalement sur son fonctionnement en génératrice, pour des applications éoliennes et hydroélectriques, ou sur son fonctionnement en moteur avec une grande variété de modes d'alimentation et de contrôle. La simplicité de sa commande et sa souplesse de reconfiguration lui ont associée le surnom d'une « Machine Généralisée ».

II.1- Introduction :

Dans ce présent chapitre, nous avons choisi de modéliser la machine asynchrone double alimentation associé à deux convertisseurs statiques commandés en MLI, afin d’assurer une production d’électricité quel que soit les conditions de l’eau et la vitesse de la centrale hydroélectrique.

Dans la premier partie de ce chapitre, nous nous intéressants à la modélisation de la turbine hydraulique, on a présenté une modélisation de sa partie mécanique avec une vitesse de l’eau variable. En deuxième lieu, nous avons élaboré un modèle de la machine asynchrone double alimentation.

II.2- Description de la structure choisie à modéliser

La structure à modéliser est constituée d’une turbine hydroélectrique, et d’une machine asynchrone à double alimentation qui débite sur un réseau triphasé, le circuit rotorique est alimenté par le réseau, via une cascade de deux convertisseurs statiques (Redresseur, Onduleur MLI), l’ensemble est représenté sur la (figure II.1)

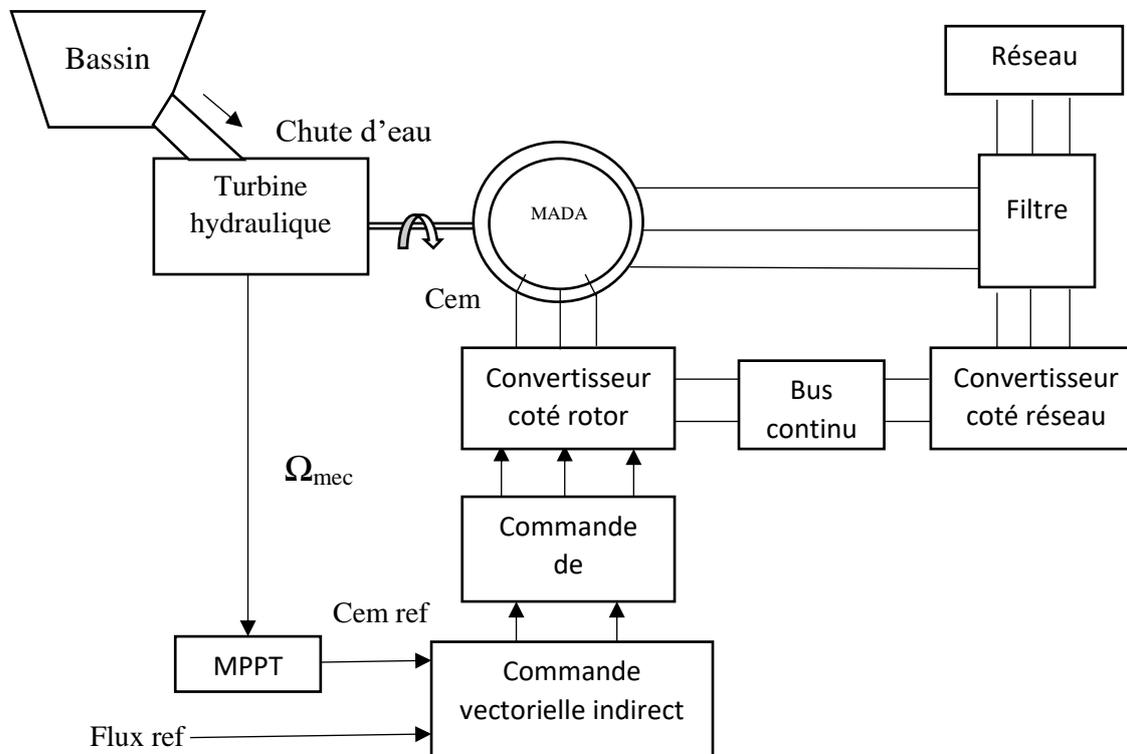


Figure II.1 : Schéma global de la structure à modéliser.

II.3- Modélisation des différentes parties d'une centrale hydroélectrique :

II.3.1- Modélisation de la turbine hydraulique

La modélisation de la turbine hydraulique consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente des courants d'eau et des conditions de fonctionnement, sa vitesse de rotation en particulier. Cela permettra de connaître le couple hydroélectrique appliqué sur l'arbre lent de la centrale hydroélectrique. Selon le coefficient de puissance C_p , la puissance hydroélectrique est calculée :

$$P_{hydr} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S V_{eau}^3 \quad (II.1)$$

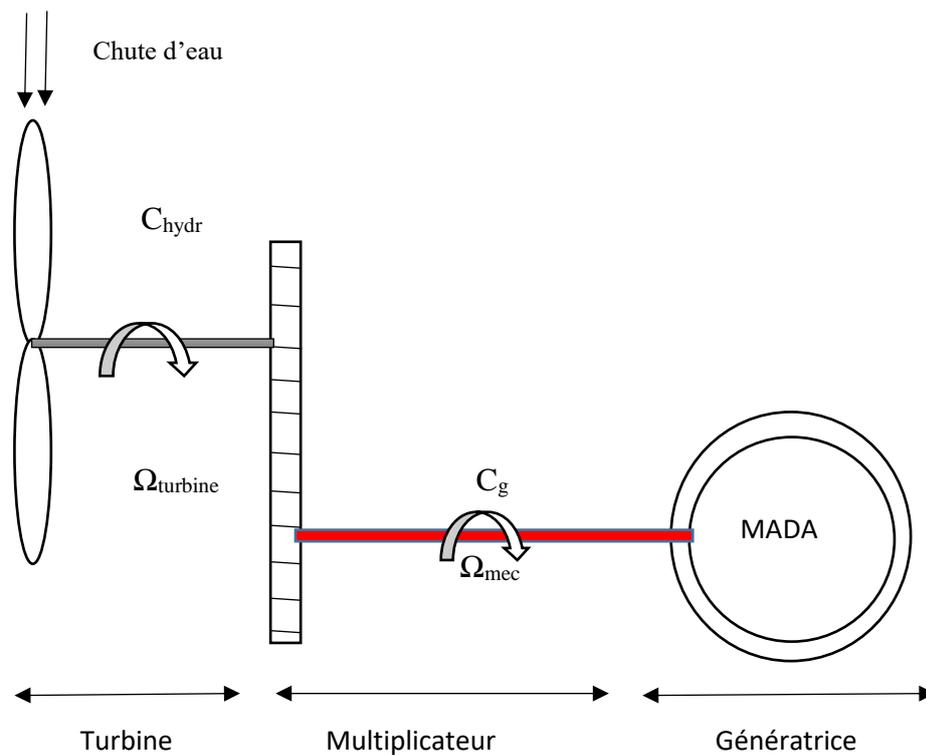


Figure II.2 : Schéma de la turbine hydrolienne.

Ou :

S = Surface balayée par la turbine en m^2 .

ρ = Masse volumique de l'eau en Kg/m^3 .

V_{eau} = Vitesse du courants d'eau en m/s .

C_p = Coefficient de puissance (sans dimension).

$\lambda =$ vitesse spécifique $\lambda = \frac{R.\Omega}{V_{eau}}$.

Ω : la vitesse linéaire périphérique en bout de pale de l'hélice rad/s.

R : est le rayon de la turbine (m).

II.3.2- Modélisation du Profil de l'eau

Les chute d'eau sont de nature aléatoire, par conséquent nous les avons modélisé par une fonction variable dans le temps, en faisant tourner la turbine hydraulique dans les deux modes ; hyper synchrone et hypo synchrone, et tout en restant dans le régime nominal de la MADA.

II.3.3- Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse (rapide) de la génératrice. Ce multiplicateur est considéré parfait, donc il se réduit à un simple gain de vitesse G. [19]

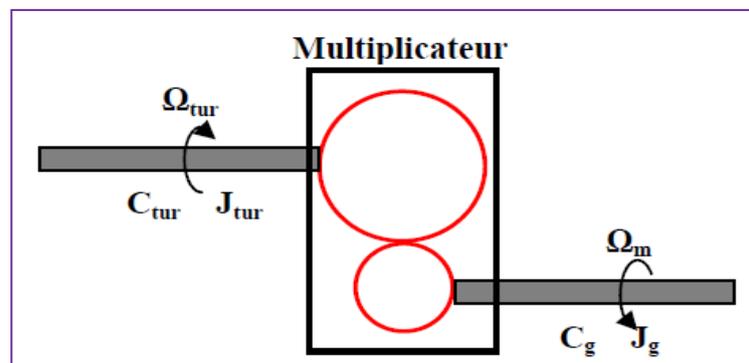


Figure II.3 : Modèle mécanique simplifié du multiplicateur.

Par le principe de conservation de puissance mécanique échangée entre la turbine et la génératrice à travers le multiplicateur de vitesse est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{turbine}}{G} \quad (II.2)$$

$$\Omega_{mec} = G.\Omega_{turbine} \quad (II.3)$$

Avec :

G : Gain du multiplicateur.

C_g : Couple moteur issu du multiplicateur.

$C_{turbine}$: Couple de la turbine.

Ω_{mec} : Vitesse de rotation du générateur.

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine.

II.3.4- Équation dynamique de l'arbre de transmission

Par le principe de conservation de l'énergie cinétique de rotation échangée via le multiplicateur de vitesse, entre le rotor de la turbine et le rotor de génératrice, l'inertie totale peut s'écrire sous la forme : [19]

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.4)$$

Avec :

$J_{turbine}$: Inertie de la turbine

J_g : Inertie du générateur

L'inertie de l'arbre de la génératrice est négligée devant l'inertie de la turbine ramenée à son axe de rotation. L'équation de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique de génératrice à partir du couple appliqué au rotor.

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.5)$$

Le couple mécanique C_{mec} prend en compte le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple de frottement visqueux C_{vis} et le couple moteur issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.6)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottement visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.7)$$

II.3.5- Stratégies de commande de la turbine hydrolienne

II.3.5.1- Extraction du maximum de puissance (MPPT)

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

Dans cette partie, nous présentons une stratégie pour contrôler le couple électromagnétique et indirectement la puissance électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance générée. On distingue deux familles de structure de commande :

- Stratégie de commande avec asservissement de vitesse mécanique.
- Stratégie de commande sans asservissement de vitesse mécanique.

En pratique, la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée

Nous nous intéressons uniquement à la stratégie de commande sans asservissement de vitesse. Cette stratégie de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse de l'eau varie dans le temps. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II.8)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique C_{mec} développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ($C_{vis} = 0$), on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (II.9)$$

Le couple électromagnétique de référence (réglage) est déterminé à partir d'une estimation du couple hydrodynamique :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{hydr-est}}{G} \quad (II.10)$$

Le couple hydrodynamique peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du courant d'eau et de la mesure de la vitesse mécanique :

$$C_{hydr-est} = C_{p-max} \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-est}} \cdot V_{eau-est}^3 \quad (II.11)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine-est}$ est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.12)$$

La mesure de la vitesse du courant d'eau apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$V_{eau-est} = \frac{\Omega_{turbine-est} \cdot R}{\lambda_{opt}} \quad (II.13)$$

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

$$C_{em-ref} = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (II.14)$$

L'expression du couple de référence est alors proportionnelle au carré de la vitesse de la génératrice.

Avec :

$$C_{em-ref} = A \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (II.15)$$

$$A = \frac{C_{p-max}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2G^3} \quad (II.16)$$

Le schéma bloc de maximisation de la puissance extraite sans asservissement de vitesses est le suivant :

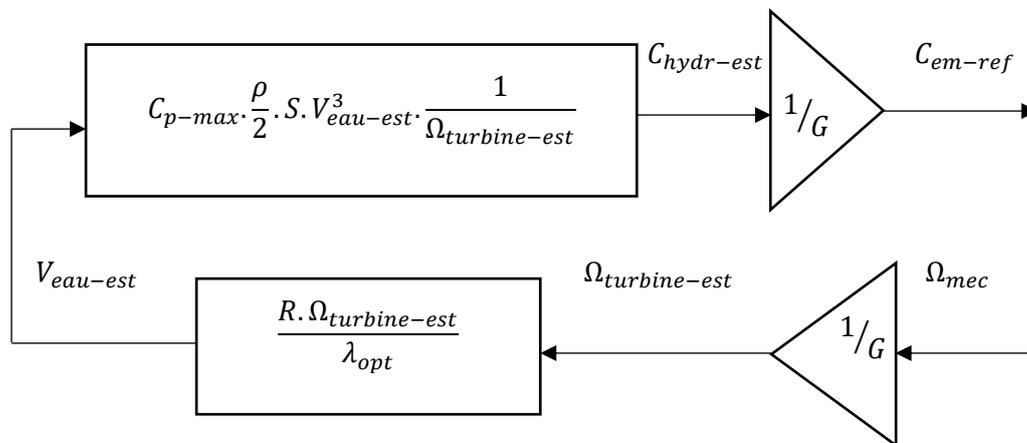


Figure II. 4 : Schéma bloc de maximisation de la puissance extrait.

II.3.5.2 Schéma de la turbine en MPPT

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine avec MPPT se déduit à partir des équations précédentes, qui sont représentées sur la figure (II.5)

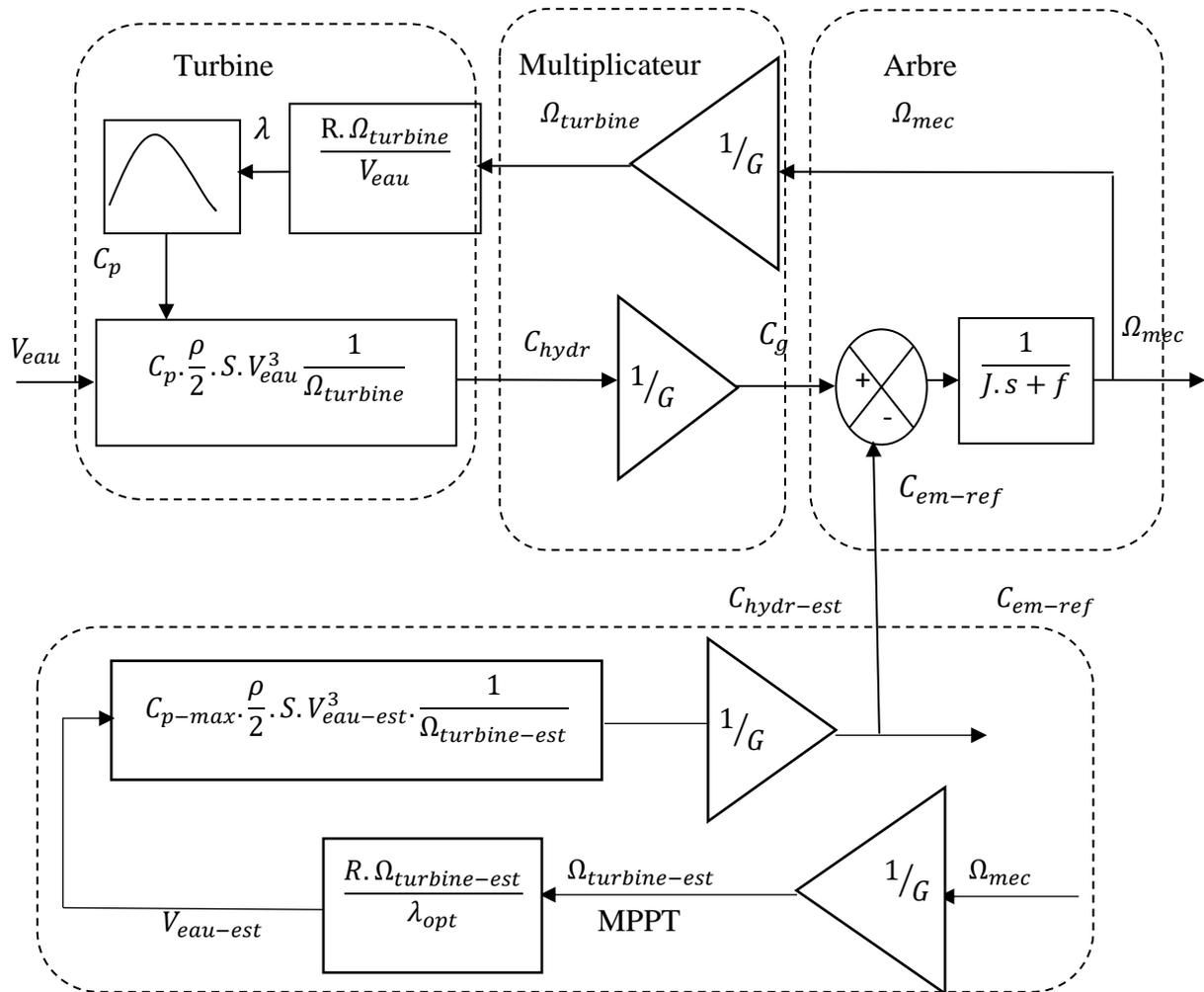


Figure II. 5 : Schéma bloc fonctionnel de la turbine avec MPPT.

II.3.6- Modélisation de la MADA :

Comme nous l'avons précédemment vu, la machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone classique à rotor accessible et identique au stator. Donc, le modèle de la MADA est le même que celui de la MAS avec l'exception des tensions rotoriques non nulles.

II.3.6.1- Hypothèses simplificatrices

Dans le cas de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe, on doit tenir compte de sa configuration exacte et certaines hypothèses simplificatrices. [20]

- On suppose les circuits magnétiques non saturés. Ce qui permet d'exprimer les flux et les courants en fonctions linéaires.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- Les pertes par d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- La machine est connectée à un système de tension triphasé équilibré

II.3.6.2- Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan (a,b,c)

Les trois enroulements statoriques (A, B et C) sont en parallèles aux enroulements rotoriques et ont une distribution sinusoïdale, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre. La figure (II.6) illustre la distribution des enroulements dans une machine asynchrone à rotor bobiné à une paire de pôle.

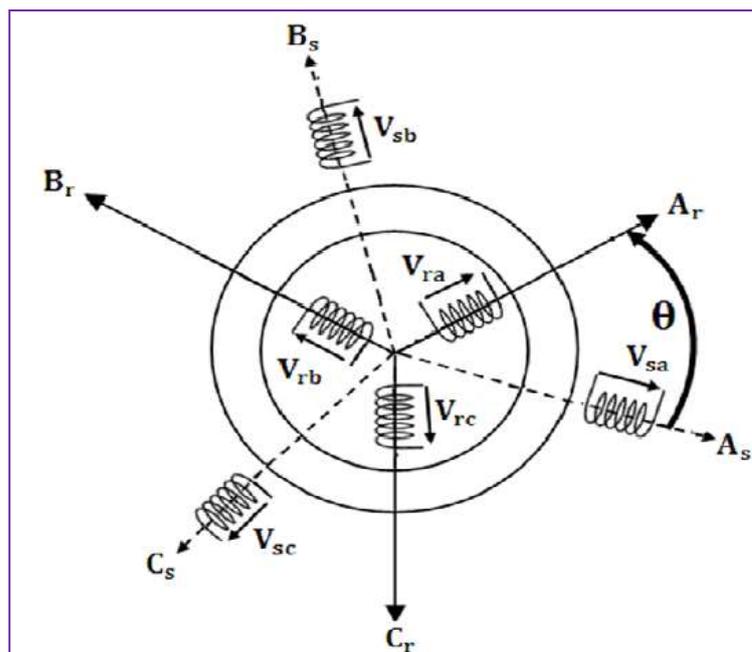


Figure II.6 : Représentation schématique de la MADA

L'application de la loi de Faraday aux bornes des enroulements du stator et du rotor permet d'obtenir les équations de la machine.

- **Equations électriques**

Les équations des tensions électriques des enroulements statoriques et rotoriques, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle, par :

Tel que :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \quad (\text{II.17})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \quad (\text{II.18})$$

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix};$$

$$[\Phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}.$$

Avec :

$[V_s], [V_r]$: Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques dans le repère (a b c).

$[I_s], [I_r]$: Vecteurs des courants statoriques et rotoriques dans le repère (a b c).

$[\Phi_s], [\Phi_r]$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques dans le repère (a b c).

$[R_s], [R_r]$: Matrice de Résistances du stator et du rotor.

- **Equations magnétiques**

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (\text{II.19})$$

$$[\phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \quad (\text{II.20})$$

Telle que :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_s & M_r \\ M_r & M_s & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

L_s et L_r : Inductance propre d'une phase du stator et du rotor respectivement.

M_s et M_r : Inductance mutuelle entre deux phases du stator et du rotor respectivement.

M_{sr} et $[M_{sr}]^t$: Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et rotor.

En remplaçant les relations (II.19) et (II.20), respectivement dans les relations (II.17) et (II.18), nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_{ss}] \frac{d[I_s]}{dt} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] \cdot [I_r] \} \quad (\text{II.21})$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_{rr}] \frac{d[I_r]}{dt} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \} \quad (\text{II.22})$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables ((II.21) et (II.22)). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

- **Equations mécaniques**

L'équation mécanique de la machine s'écrit

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \Omega \quad (\text{II.23})$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine).

II.3.6.3- Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan dq

Les transformations utilisées permettent la conservation de la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de Park. La Figure (II.7) illustre bien la distribution des enroulements quadratiques et directs du repère de Park.

- **Transformation de Park**

La transformation de Park consiste à transformer le système triphasé équilibré (abc) en un système biphasé tournant (dq) orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système

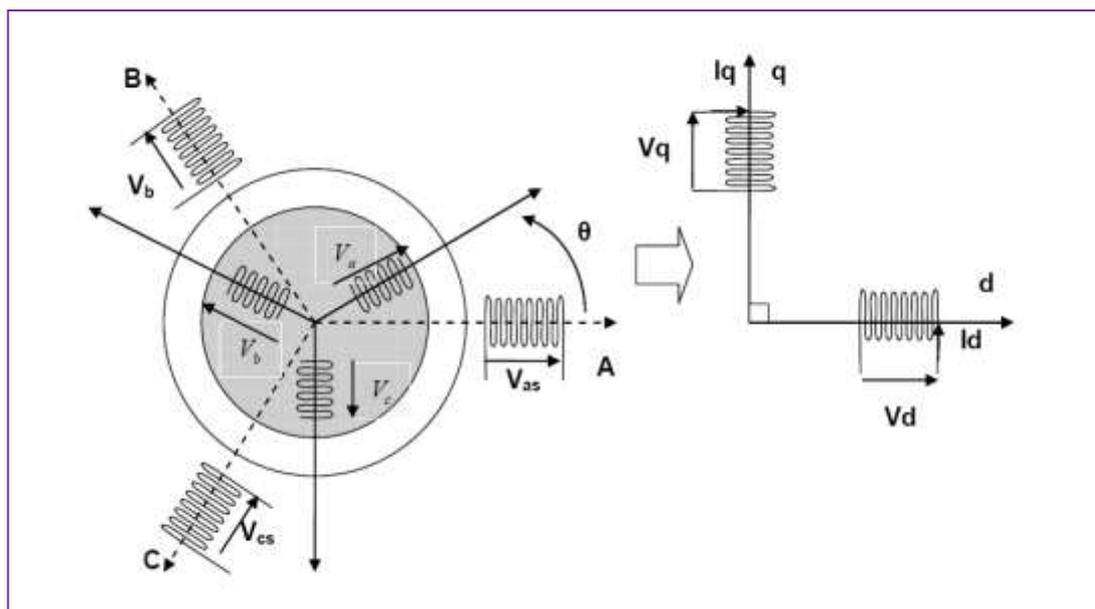


Figure II.7 : Modèle de PARK de la MADA.

On utilise la matrice de PARK (II.24) pour arriver aux équations précédentes dans le plan dq on appliquant la relation :

$$[X]_{dq} = [P(\theta)][X]_{abc} \quad (II.24)$$

Telle que :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

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

On utilise la matrice inverse de PARK (II.26) pour arriver aux équations précédentes dans le plan abc on appliquant la relation : [21]

$$[X]_{abc} = [P^{-1}(\theta)][X]_{dq} \quad (II.26)$$

Tel que la matrice inverse de PARK :

$$[P^{-1}(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 27})$$

Dans le cas de la conservation de la puissance nous avons $k = \sqrt{\frac{2}{3}}$.

II.3.6.4- Modélisation de la MADA dans le repère de PARK

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (dq) donné par la transformation de Park [21]. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park (II.27).

La transformation de Park aboutit à une relation liant les angles θ_s et θ_r (figure II.8), celle-ci s'exprime par :

$$\theta_s = \theta_r + \theta \quad (\text{II.28})$$

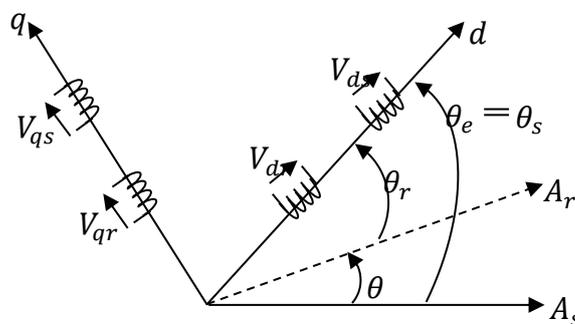


Figure II.8 : Représentation de la machine dans le repère diphasé.

Avec :

θ_r, θ_s : Angle du stator et du rotor

• **Equations électriques**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

• **Equations magnétiques**

$$\begin{cases} \phi_{ds} = l_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = l_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = l_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = l_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$l_s = L_s - M_s$: Inductance cyclique propre statorique de la machine.

$l_r = L_r - M_r$: Inductance cyclique propre rotorique de la machine.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$: Inductance magnétisante la machine.

• **Expression du couple électromagnétique :**

L'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et des courants rotoriques est exprimée comme suite :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{l_s} \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{qr} - \phi_{qs} \cdot I_{dr}) \quad (\text{II.31})$$

Avec :

P : Nombre de paires de pôles de la machine.

II.3.6.5- Choix de référentiel

Les équations de la machine utilisée peuvent être exprimées dans trois référentiels selon le positionnement de ses axes par rapport aux axes de la machines. [22]

➤ Référentiel lié au stator.

- Référentiel lié au rotor.
- Référentiel lié au champ tournant.

II.3.6.5-1-Référentiel lié au stator

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au stator ($\omega_{coor} = 0$).

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel. L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif. Ce référentiel est choisi dans le cas où la variation de vitesse de rotation est importante : [26]

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \\ \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_m \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} + \omega_m \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \omega_m \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

II.3.6.5-2-Référentiel lié au rotor

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ω . donc ($\omega_{coor} = \omega = P \cdot \Omega$). L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor. [26]

Ce référentiel est choisi dans les problèmes des régimes transitoires ou la vitesse de rotation est constante :

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

II.3.6.5-3-Référentiel lié au champ tournant

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques, d'où ($\omega_{coor} = \omega_s$) ; ($\omega_r = \omega_s - \omega$). Ce

référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue. [26]

Ce référentiel est souvent choisi dans le cas où la fréquence d'alimentation est constante et sur cette base que nous avons fait ce choix.

$$\begin{cases} \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_m \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Nous avons choisi dans notre cas le système d'axe (d,q) lié au champ tournant car il est le plus approprié,

II.3.7- Modélisation des convertisseurs statiques

II.3.7.1- Modèle du convertisseur statique

Les convertisseurs considérés dans notre étude sont de type parallèles double PD3 et constitués d'IGBT et de diodes montées en antiparallèle commandés par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour deux raisons principales :

- Permet un transfert bidirectionnel de la puissance de glissement entre le rotor et réseau, ce qui permet les fonctionnements en hyposynchrone et hypersynchrone de la machine.
- Génère moins ou pas de perturbations sur le réseau électrique par propagation de courants harmoniques. [23]

Afin de simplifier le modèle des convertisseurs, en considérant les interrupteurs (IGBT et diode) parfaits. La figure (II.9) représente un onduleur de tension alimenté par une tension continue u .

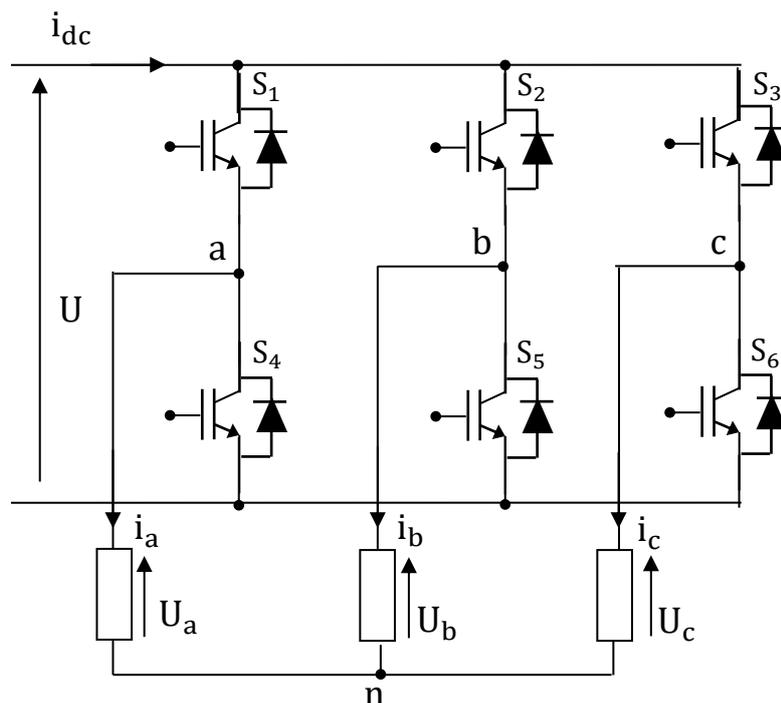


Figure II.9 : schémas d'un onduleur de tension triphasé.

La loi des mailles nous donne :

$$\begin{cases} U_{a0} = U_{an} + U_{no} \\ U_{b0} = U_{bn} + U_{no} \\ U_{c0} = U_{cn} + U_{no} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

D'autre part le fait que la charge soit équilibrée donne :

$$U_{an} + U_{bn} + U_{cn} = 0 \quad (\text{II.36})$$

Le potentiel du point neutre est donné par :

$$U_{no} = \frac{1}{3}(U_{a0} + U_{b0} + U_{c0}) \quad (\text{II.37})$$

D'où :

Les expressions des tensions de phases sont alors exprimées comme suit :

$$\begin{cases} U_{an} = U_a = \frac{1}{3}(2U_{a0} - U_{b0} - U_{c0}) \\ U_{bn} = U_b = \frac{1}{3}(-U_{a0} + 2U_{b0} - U_{c0}) \\ U_{cn} = U_c = \frac{1}{3}(-U_{a0} - U_{b0} + 2U_{c0}) \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

L'expression de la tension U_{j0} , est en fonction de l'état logique de conduction des interrupteurs du bras de l'onduleur ou il connecté. Soit à noter l'état passant du i^{eme} interrupteur par

$S_i = 1$ Et son état bloqué par $S_i = 0$, U_{j0} s'exprime alors par la relation suivante :

$U_{j0} = u \cdot S_i$ Pour i prenant les valeurs 1, 2,3 et $j=a, b, c$

Nous déduisant le modèle de l'onduleur sous forme matricielle en fonction des états logique des interrupteurs :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{u}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (II.39)$$

De plus la relation entre les courants modulé par le convertisseur (I_{dc}) et les courants alternatifs (i_a, i_b, i_c) est défini par l'équation suivante

$$I_{dc} = [S_1 \ S_2 \ S_3] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (II.40)$$

II.3.7.2- Commande MLI des convertisseurs

L'objectif de la commande à MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur. Le principe est de comparer un signale triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à une modulante dont la fondamental est à la fréquence de la référence. Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs du convertisseur. Cette méthode permet d'obtenir de façon simple, les temps de conduction de chaque interrupteur. [24]

- L'indice de modulation " m " défini comme étant le rapport de la fréquence f_p de la Porteuse à la fréquence f_m de la tension de référence :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (II.41)$$

- Le taux de modulation ou coefficient de réglage de tension " r " comme étant le rapport de la tension V_m de référence et l'amplitude V_p de la porteuse.

$$r = \frac{V_m}{V_p} < 1 \quad (II.42)$$

- L'avantage principal que présente la MLI est qu'elle repousse vers les fréquences les plus élevées les harmoniques de la tension ce qui facilite le filtrage. [25]
- L'inconvénient, quelle génère des impulsions dissymétrique par apport à la période de la porteuse.
- Nous adoptons à la MLI qui s'adapte à fréquence variable coté rotor de la génératrice toute fois de côté réseau à fréquence fixe, dont sont principe est représenté dans la figure suivante :

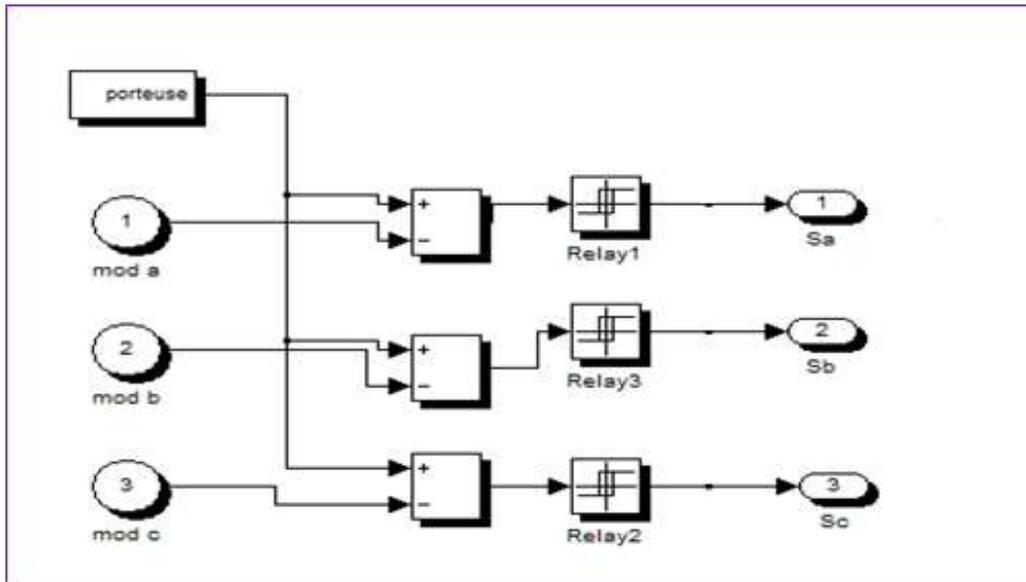


Figure II.10 : Schéma de principe de la MLI.

II.3.8- Modélisation du bus continu

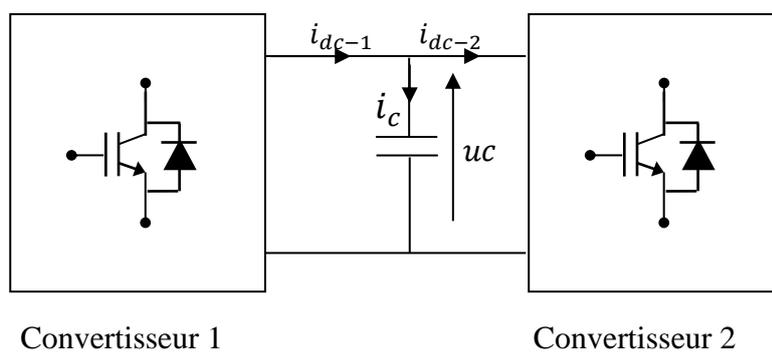


Figure II.11 : schéma du bus continu.

Le couplage des deux convertisseurs statiques (coté rotor et coté réseau) est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, comme le montre la figure (II.11), il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit. Dans la figure (II.12) est représenté en détail

le bus continu et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur ou sont connectés les deux convertisseurs. [24][19].

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif

$$\frac{duc}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_c \quad (\text{II.43})$$

$$i_c = i_{dc-1} - i_{dc-2} \quad (\text{II.44})$$

$$u_c(t) = u_o + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_c dt \quad (\text{II.45})$$

Avec :

u_o : est la tension initiale de condensateur.

Le réglage de bus continu est réalisé en boucle de régulation permettant de maintenir une tension constante de bus continu, avec un correcteur proportionnel intégrale générant la référence du courant à injecter dans le condensateur (i_{c-ref}).

La synthèse du régulateur est la même que celle présentée précédemment, dont on a $K_i \ll K_p$, donc le régulateur se réduit à un gain pur, il vaut :

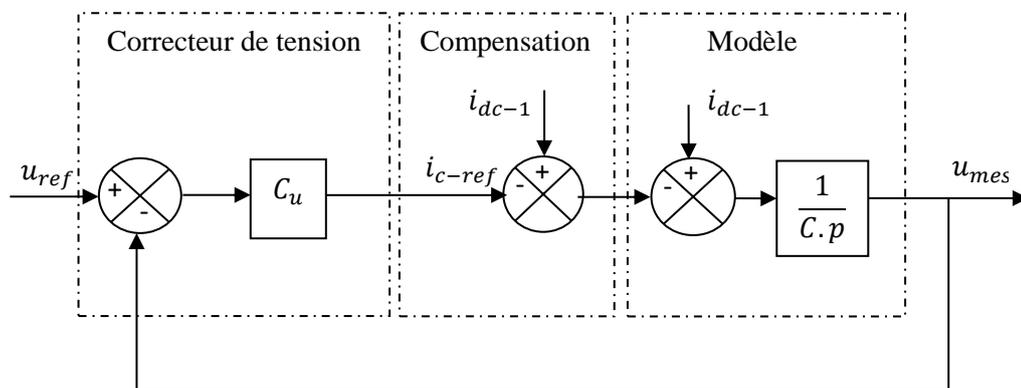


Figure II.12 : régulation de la tension du bus continu.

$$K_p = \frac{C}{\tau_{uc}} \quad (\text{II.46})$$

τ_{uc} : est le temps de réponse désiré de la tension redressée.

Le contrôle de la tension du bus continu fixe la référence de la puissance active à transiter au réseau. La puissance active transitée au bus continu est :

$$P_{dc-1} = u_c \cdot i_{dc-1} \quad (\text{II.47})$$

La référence de la puissance emmagasinée dans le condensateur s'exprime par :

$$P_{c-ref} = u_c \cdot i_{c-ref} \quad (\text{II.48})$$

Si on néglige les pertes dans le condensateur, puis dans le convertisseur et dans le filtre devant la puissance transitée, la référence de la puissance active à transiter au réseau s'écrit :

$$P_{f-ref} = P_{dc-1} - P_{c-ref} \quad (\text{II.49})$$

II.4- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une description générale de la structure à modéliser, puis nous avons modélisé les différentes parties d'une centrale hydrolienne, à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation fonctionnant en mode générateur. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi à cette machine, dont la complexité a été réduite.

Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système d'équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle, ainsi que l'intérêt de l'orientation du flux qui sert à simplifier le modèle de la MADA.

Ce modèle sera exploité pour étudier la stratégie de la commande en couple de la machine asynchrone à double alimentation au chapitre suivant.

III.1- Introduction

La machine asynchrone double alimentation est souvent utilisée dans les applications industrielles pour la production de l'énergie électrique pour sa facilité de fonctionnement en hypo-synchrone et hyper-synchrone, mais cette machine a une commande complexe car son modèle mathématique est non linéaire et fortement couplé.

Dans ce présent chapitre, nous avons choisi de contrôler le couple électromagnétique et le flux statorique par la commande vectorielle indirecte à flux orienté statorique et à vitesse variable.

III.2- La commande vectorielle de la MADA

La commande vectorielle des machines électrique devient un domaine de recherche très attractif, l'intérêt pour cette méthode est justifié par le fait que ces machines électriques constituent un actionneur peu encombrant et très peu couteux pour les entrainements industriels. La commande de cette machine est complexe car la difficulté réside dans le découplage entre les deux paramètres de commande : flux magnétique et couple électromagnétique.[27]

La commande vectorielle par orientation du flux est une solution très attractive pour la réalisation des performances dans les applications à vitesse variable comme la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement génératrice que moteur.[27]

Il existe plusieurs variantes de cette commande vectorielle. On peut les classifier selon leur orientations du repère (d,q) comme suite :

- Selon le flux de l'entrefer.
- Selon le flux rotorique.
- Selon le flux statorique.

On utilise deux méthodes principales :

- Méthode directe développée par Banchke
- Méthode indirecte développée par Hazz

Dans notre cas, on a choisi une commande vectorielle indirecte par orientation du flux statorique qui est la mieux adaptée à notre étude. Cette dernière se décompose en trois parties :

- Le contrôle du flux
- Le contrôle des courants statorique
- Le découplage par compensation

Pour établir cette commande vectorielle de la MADA, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes :

- le bobinage est supposé réparti de manière à donner une f.m.m sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux
- Le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau sont négligés ainsi que le fonctionnement se fait en régime non saturé.
- le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié

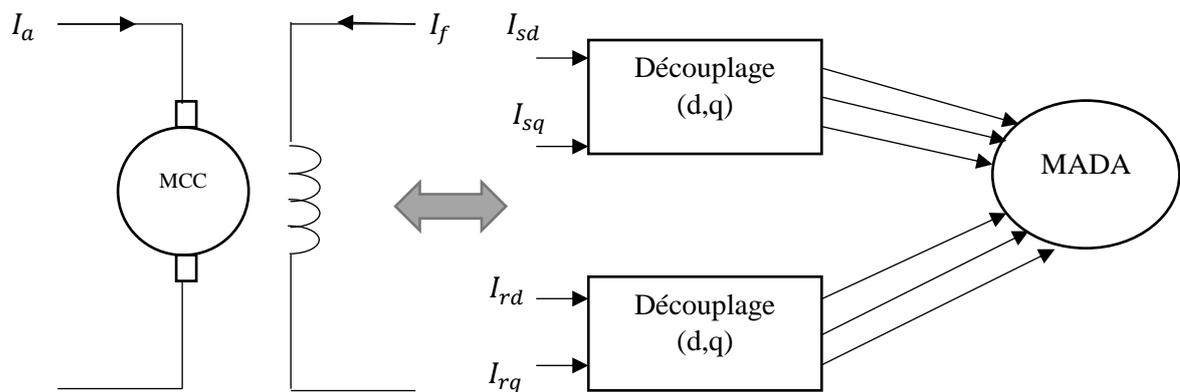


Figure III.1 : Principe de la commande vectoriel de la MADA.

III.3- Commande vectorielle par orientation du flux statorique

La machine asynchrone double alimentation est une machine multi variable qui est régit par des fonctions différentielles. Le passage du repère a,b,c vers le repère de Park (d,q), sous certaines hypothèse, permet de simplifié ces équations et de mieux appréhender une meilleure compréhension du comportement physique de la machine.

Cette commande consiste a orienté le repère tournant d'axes (d,q) tel que l'axe « d » soit confondu avec le vecteur flux statorique, ce qui permet d'obtenir une expression de couple dans

laquelle deux courants orthogonaux (I_{rd}, I_{rq}) interviennent, le premier générateur de flux et l'autre générateur de couple.

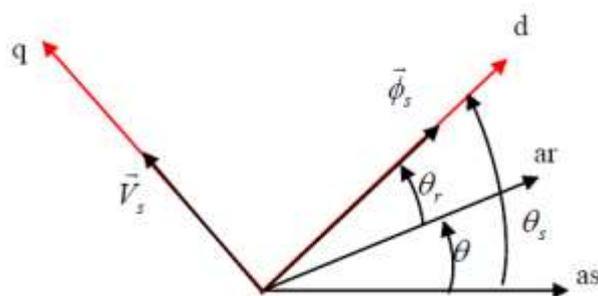


Figure III.2 : Orientation du flux statorique.

En se basant sur l'orientation du flux statorique on peut écrire :

$$\phi_{sd} = \phi_s \text{ et } \phi_{sq} = 0 \quad (\text{III. 1})$$

III.3.1- Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Le principe de cette commande est de contrôler directement les courants rotoriques I_{rd} , I_{rq} de la MADA et de contrôler indirectement les courant statorique I_{sd} , I_{sq} .

On rappelle les équations différentielles de la MADA :

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{sd}}{dt} = V_{sd} - R_s i_{sd} + \phi_{sq} \omega_s \\ \frac{d\phi_{sq}}{dt} = V_{sq} - R_s i_{sq} - \phi_{sd} \omega_s \\ \frac{d\phi_{rd}}{dt} = V_{rd} - R_r i_{rd} + \phi_{rq} \omega_r \\ \frac{d\phi_{rq}}{dt} = V_{rq} - R_r i_{rq} - \phi_{rd} \omega_r \end{cases} \quad (\text{III. 2})$$

Lorsqu'on oriente un des flux, le modèle de la MADA sera simplifié et son dispositif de commande le sera également simplifié. On orientant le repère de Park tel que l'axe « d » soit confondu avec le vecteur flux statorique. L'équation (III. 1) montre que le flux statorique qui suit l'axe q est constamment nul : $\phi_{sq} = 0$

En simplifiant les équations de la MADA au stator et au rotor on obtient :

$$\begin{cases} \frac{d\phi_{sd}}{dt} = V_{sd} - R_s i_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \phi_{sd} \omega_s \\ \frac{d\phi_{rd}}{dt} = V_{rd} - R_r i_{rd} + \phi_{rq} \omega_r \\ \frac{d\phi_{rq}}{dt} = V_{rq} - R_r i_{rq} - \phi_{rd} \omega_r \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

A partir des équations des composantes directes et quadratiques du flux statorique (équation II.30), on obtient les équations des courants statorique suivantes :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\phi_{sd} - M i_{rd}}{L_s} \\ i_{sq} = -\frac{M}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

On remplaçant les équations (III. 4) dans les équations des flux rotorique dans le repère (d,q) (équation II.30), on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{rd} + \frac{M}{L_s} \phi_{sd} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{rd} + \frac{M}{L_s} \phi_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} - \frac{M^2}{L_s} i_{rq} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

σ est le coefficient de dispersion entre les enroulements d et q, donc son équation est comme suite :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s} \quad (\text{III. 6})$$

On remplaçant les expressions des équations des courants statoriques et des flux rotoriques dans le repère d et q (III. 4) et (III. 5) dans les équations(III. 3), on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} - \frac{R_s}{L_s} \cdot M i_{rd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = -\frac{R_s}{L_s} \cdot M i_{rq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \cdot \sigma \cdot \frac{di_{rd}}{dt} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{sd}}{dt} - L_r \omega_r \sigma i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \cdot \sigma \cdot \frac{di_{rq}}{dt} + L_r \omega_r \sigma i_{rd} + \omega_r \frac{M}{L_s} \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{III. 7})$$

En notant les f.e.m suivantes :

$$\begin{cases} e_d = L_r \omega_r \sigma i_{rq} \\ e_q = L_r \omega_r \sigma i_{rd} \end{cases} \quad (\text{III. 8})$$

On remplaçants (III.8) dans les équations rotorique(III.7), on obtient les équations des courants rotorique et statorique suivant :

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{1}{R_r + L_r \sigma_s} [V_{rd} + e_d] \\ i_{rq} = \frac{1}{R_r + L_r \sigma_s} [V_{rq} - e_q - \omega_r \frac{M}{L_s} \phi_{sd}] \end{cases} \quad (III. 9)$$

A partir des équations statoriques obtenu dans(III.7), on peut déterminer l'équation du flux statorique suivante :

$$\phi_{sd} = \frac{L_s}{R_s} V_{ds} - \frac{L_s}{R_s} P \phi_{sd} + M i_{rd} \quad (III. 10)$$

On simplifiant l'équation (III. 10), et sachant que $V_{ds} = 0$, on obtient :

$$\phi_{sd} = \frac{M}{1 + T_s \cdot s} i_{dr} \quad (III. 11)$$

Ou $T_s = \frac{L_s}{R_s}$ est la constante de temps statorique.

Le couple a pour expressions :

$$C_{em} = p(\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}) \quad (III. 12)$$

Sachant que $\phi_{sq} = 0$ par raison d'orientation du flux statorique, on obtient une équation simplifié du couple électromagnétique comme suite :

$$C_{em} = p \phi_{sd} i_{sq} \quad (III. 13)$$

Et sachant que le courant i_{sq} ne pouvant pas être directement contrôler, on aura besoin d'utiliser les équations des courants statoriques (III. 4) pour faire apparaitre la composante en quadrature du courant rotorique dans l'expression du couple électromagnétique comme suite :

$$C_{em} = -p \frac{M}{L_s} \phi_{sd} i_{rq} \quad (III. 14)$$

On constate maintenant que le couple électromagnétique est proportionnel au courant i_{rq} si le flux est maintenu constant, de préférence le maintenir à sa valeur nominale de manière à avoir un couple maximale. La tension V_{rq} varie le courant i_{rq} , et le flux peut être contrôlé par le réglage du courant i_{rd} , pour rendre ce dernier variable ,on doit faire action sur la tension V_{rd} .

La figure suivante montre la représentation schématique du modèle à flux statorique de la MADA.

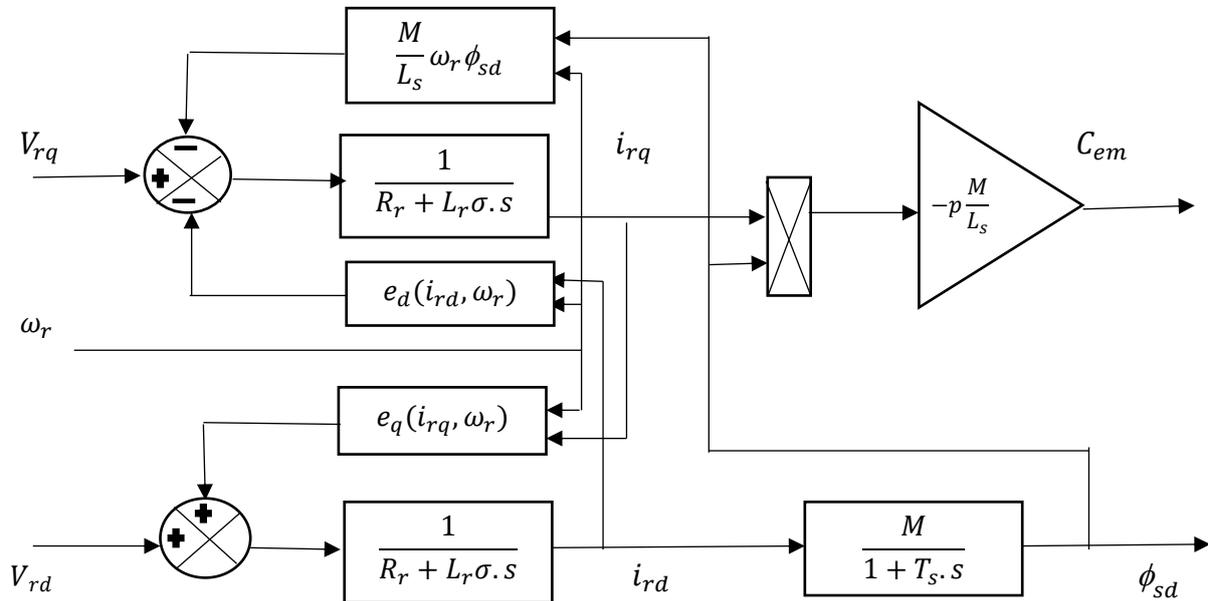


Figure III.3 : schéma bloc de la MADA à orientation du flux statorique.

III.3.2- Commande Indirecte de la MADA

III.3.2.1- Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques

V_{dr} et V_{qr} sont les tensions à imposer au rotor de la machine pour obtenir les courants voulus et par conséquent les puissances à commander. Les expressions trouvées nous renseignent sur l'existence d'un couplage entre les deux axes d et q. Afin d'aboutir à une commande performante, il faut au préalable réaliser un découplage entre les deux axes.

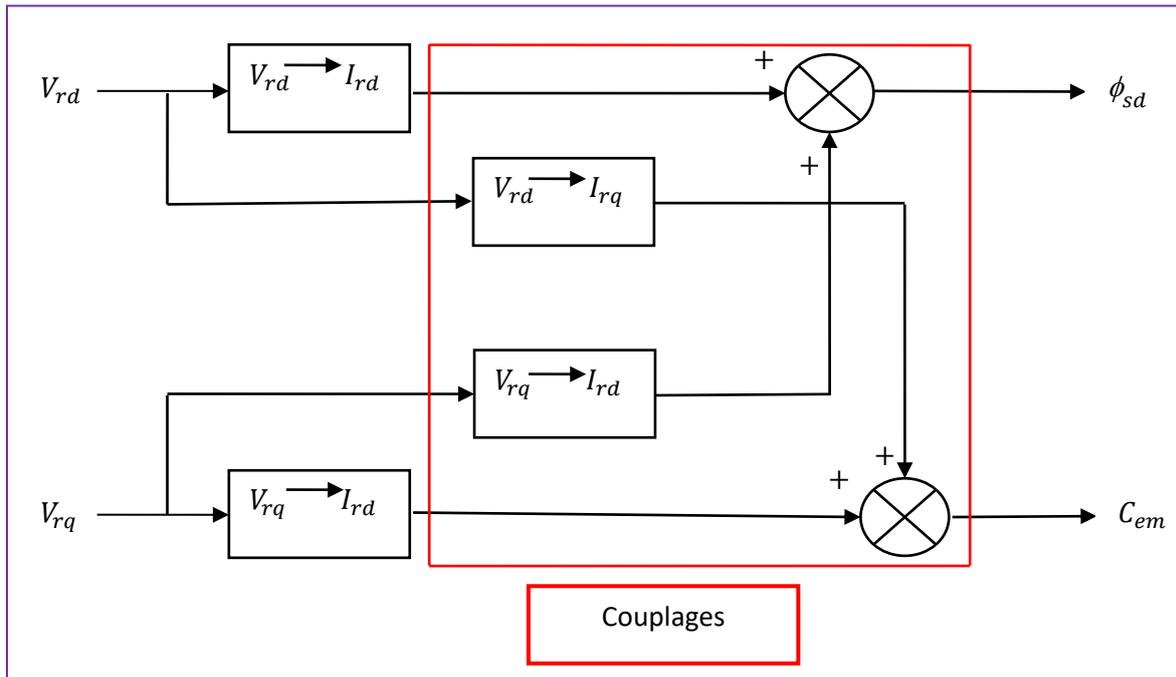


Figure III.4 : Description des couplages.

III.3.2.2- Commande Indirecte sans Boucle de couple

Les courants rotoriques i_{rq} et i_{rd} , sont respectivement les images du couple électromagnétique C_{em} et le flux statorique ϕ_{sd} , doivent poursuivre leurs courants de références.

III.3.2.2.1- Découplage entre les tensions rotoriques sur les axes directs et en quadrature

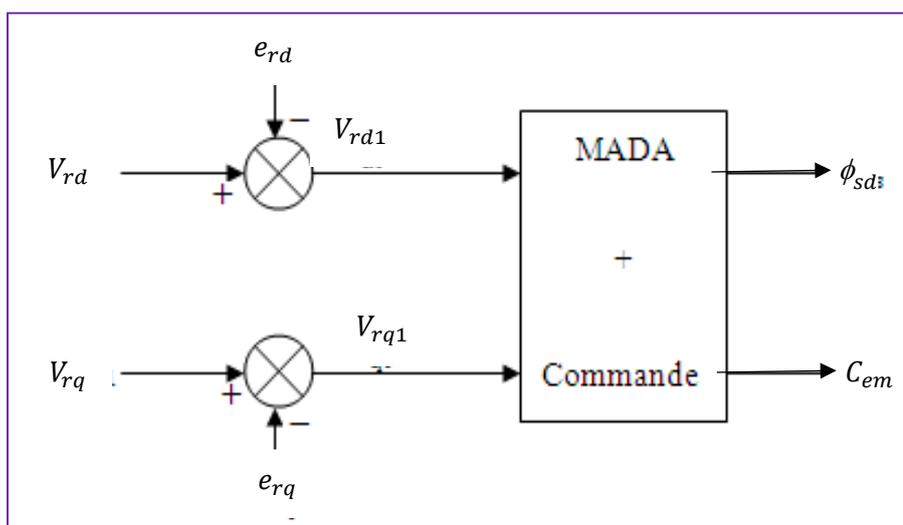


Figure III.5 : Reconstitution des tensions V_{rd} et V_{rq} .

Il existe plusieurs techniques pour éliminer l'effet de l'entrée à une sortie

- ✓ Découplage par compensation.
- ✓ Découplage utilisant un régulateur.
- ✓ Découplage par retour d'état.

Nous nous intéressons au découplage par compensation pour cela on définit deux nouvelles variables de commande V_{dr1} et V_{qr1} avec :

- **Découplage par Compensation :[26]**

Dans l'équation (III. 7) , on peut voir les équations de tension rotorique qui incluent deux termes de couplage entre l'axe d et l'axe q .

Nous devons présenter un système de découplage, en présentant les termes de compensation

$$\begin{cases} e_{rd} = L_r \omega_r \sigma i_{rq} \\ e_{rq} = -L_r \omega_r \sigma i_{rd} - \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \omega_r \end{cases} \quad \text{(III. 15)}$$

Puis, on a défini deux nouvelles variables intermédiaires de découplage par deux expressions qui sont :

$$\begin{cases} V_{rd} = V_{rd1} - e_{rd} \\ V_{rq} = V_{rq1} - e_{rq} \end{cases} \quad \text{(III. 16)}$$

Le schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du MADA est représenté par la figure III. 6

La figure III.6 consiste à contrôler le couple électromagnétique et le flux statorique indirectement par le réglage des deux composantes ; directe et en quadrature du courant rotorique par des régulateurs PI dont les consignes sont directement déduites des valeurs du couple référence e_r du flux référence que l'on veut imposer au MADA.

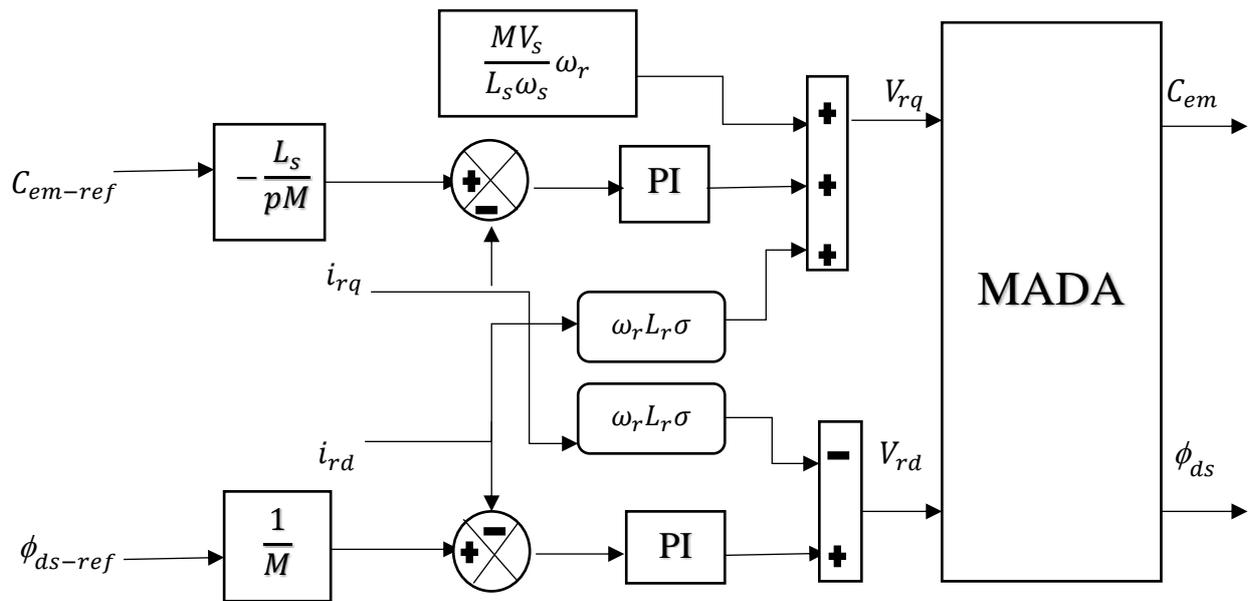


Figure III.6 : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle de couple.

• Dimensionnement du Régulateur PI : [26]

Les fonctions de transferts des courants rotorique directe et quadrature sont obtenues à partir des expressions des tensions rétorque de l'équation (III. 7) et par l'annulation des termes de découplages par les termes de compensations :

$$\begin{cases} \frac{i_{rd}}{V_{rd}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r \cdot s} \\ \frac{i_{rq}}{V_{rq}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r \cdot s} \end{cases} \quad (III. 17)$$

La boucle de régulation des courants i_{rd} et i_{rq} peut se présenter par le schéma bloc de la figure III. 7 :

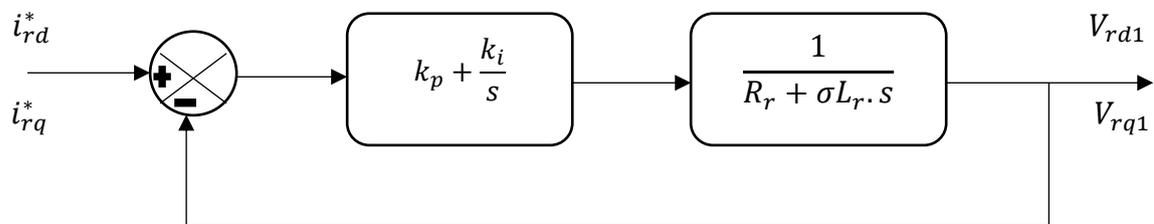


Figure III.7 : Schéma de régulation des courants i_{rd} et i_{rq} .

On note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l'axe d et l'axe q . Soit un régulateur PI de fonction de transfert :

$$PI_{(s)} = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (\text{III. 18})$$

La FTBO de la figure III. 3 sera :

$$FTBO_{(s)} = \frac{k_i}{s} \left(s \frac{k_p}{k_i} + 1 \right) \frac{1}{R_r \left(1 + \frac{\sigma L_r s}{R_r} \right)} \quad (\text{III. 19})$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition, on trouve :

$$\frac{k_p}{k_i} = \sigma T_r \quad (\text{III. 20})$$

$$\text{Ou } T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant comme suit :

$$FTBO_{(s)} = \frac{k_i}{R_r \cdot s} \quad (\text{III. 21})$$

Donc la FTBF de la figure III. 3 sera :

$$FTBF_{(s)} = \frac{\frac{k_i}{R_r \cdot s}}{1 + \frac{k_i}{R_r \cdot s}} = \frac{1}{\frac{R_r}{k_i} \cdot s + 1} = \frac{1}{1 + \tau_r \cdot s} \quad (\text{III. 22})$$

$$\text{ou } \tau_r = \frac{R_r}{k_i} \quad (\text{III. 23})$$

De l'expression (III. 20) et (III. 23) on trouve :

$$\begin{cases} K_p = K_i \cdot \sigma T_r = \frac{\sigma L_r}{\tau_r} \\ k_i = \frac{R_r}{\tau_r} \end{cases} \quad (\text{III. 24})$$

La constante τ_r est déterminée par la constante électrique du système à réguler τ_e

$$\tau_e = \sigma \cdot T_r \quad (\text{III. 25})$$

Avec $\tau_r < \tau_e$

III.3.2.2- Commande Indirecte avec Boucle de couple

Afin d'améliorer la commande précédente, nous avons incorporé une boucle de régulation supplémentaire au niveau du couple afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système.

La figure III.8 présente le schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de couple de la MADA

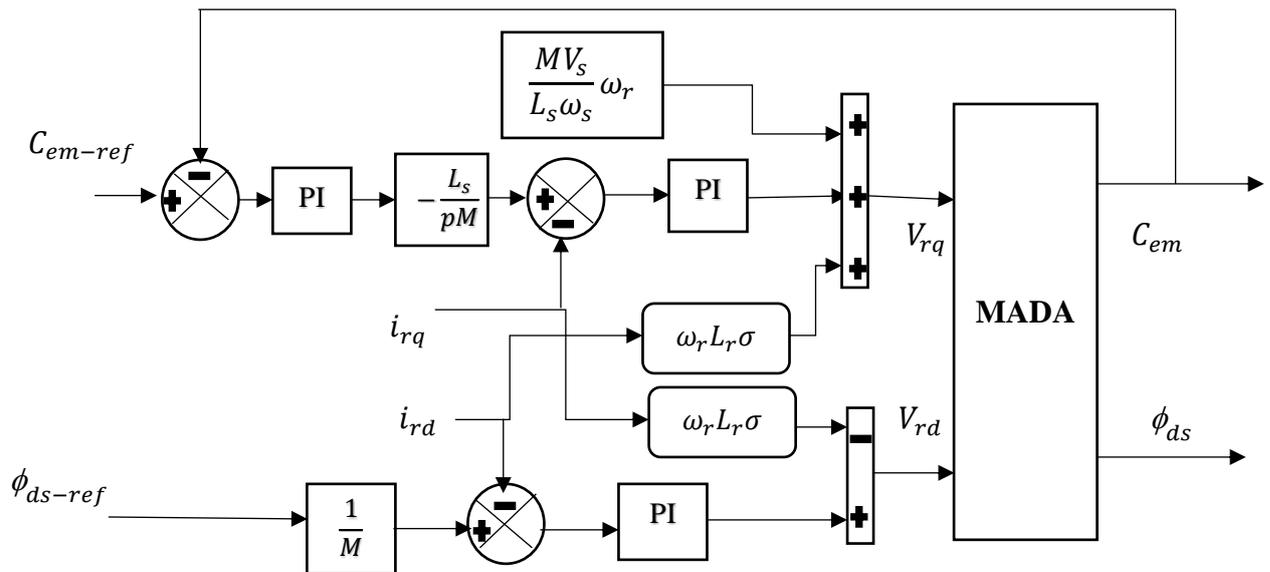


Figure III.8 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucle de couple.

III.4- Résultats de Simulation de la Commande Indirecte de la MADA

Pour examiner et visualiser le comportement de notre commande, nous avons donc soumis notre système à des échelons de tel sort à avoir un flux et une vitesse de l'eau variable.

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode générateur utilisée dans la simulation sont reportés en annexe.

- **Profile de l'eau :**

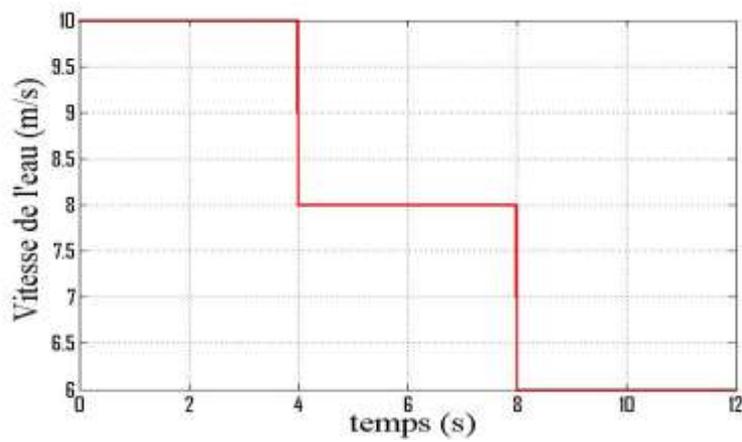


Figure III.9 : Allure du profil de l'eau.

Afin d'évaluer la stratégie MPPT pour extraire le maximum de la puissance générée par le générateur, Nous avons proposé une variation dans l'échelon de la vitesse de l'eau qui est présenté sur la figure III.9, la vitesse de l'eau débute à 10m/s, elle a été changée soudainement à 8m/s à l'instant 4s. A l'instant 8s, la vitesse de l'eau est égale à 6m/s.

- **Coefficient de puissance :**

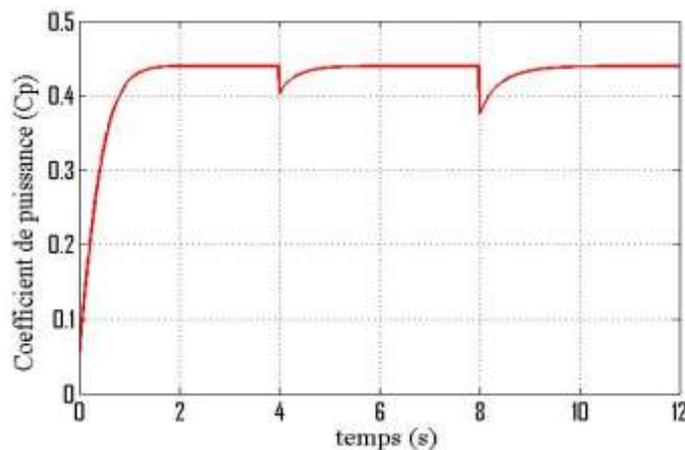


Figure III.10 : Allure du coefficient de puissance.

Le coefficient de puissance C_p est gardé autour de sa valeur maximale ($C_{p_max} = 0.5$) comme le montre la figure III.10, sauf de petite diminution à l'instant 4s et 8s, ce qui montre l'efficacité de la commande MPPT sur la turbine.

• **Vitesse mécanique :**

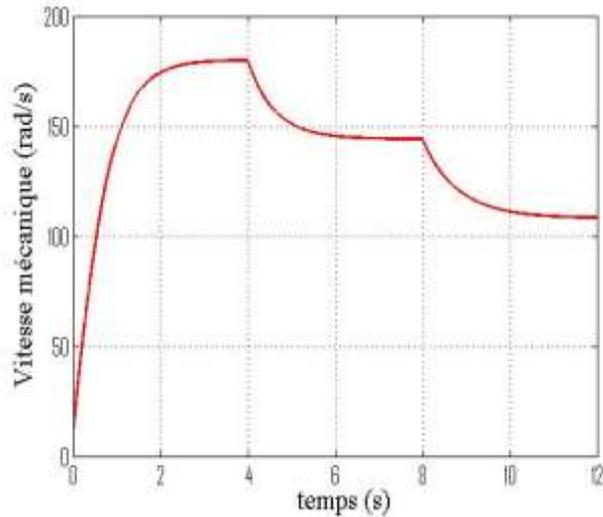


Figure III.11 : Allure de la vitesse mécanique.

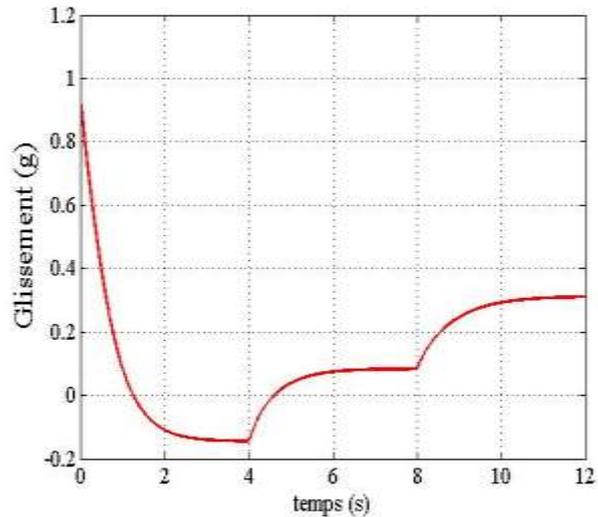


Figure III.12 : Allure du glissement.

D'après les figures III.9 et III.11, nous constatons que quand la vitesse de l'eau v est égale à 10m/s la vitesse optimale de la turbine Ω_t est presque égale à 180 rad/s, et quand v est à 8m/s, Ω_t est presque à 144 rad/s et quand v est à 6m/s, Ω_t est à 108.5 rad/s, donc la vitesse de la turbine varie en fonction de la vitesse de l'eau, ces ajustements ont été réalisés selon le processus de MPPT.

L'allure du glissement (figure III.12) nous permet de constater que la vitesse de la machine varie autour de la vitesse de synchronisme ce qui nous permet de faire marcher la MADA dans les deux modes hypo synchrone et hyper synchrone.

III.4.1- Résultats de simulation pour la commande indirecte sans boucle de couple

- Le couple électromagnétique et le flux statorique

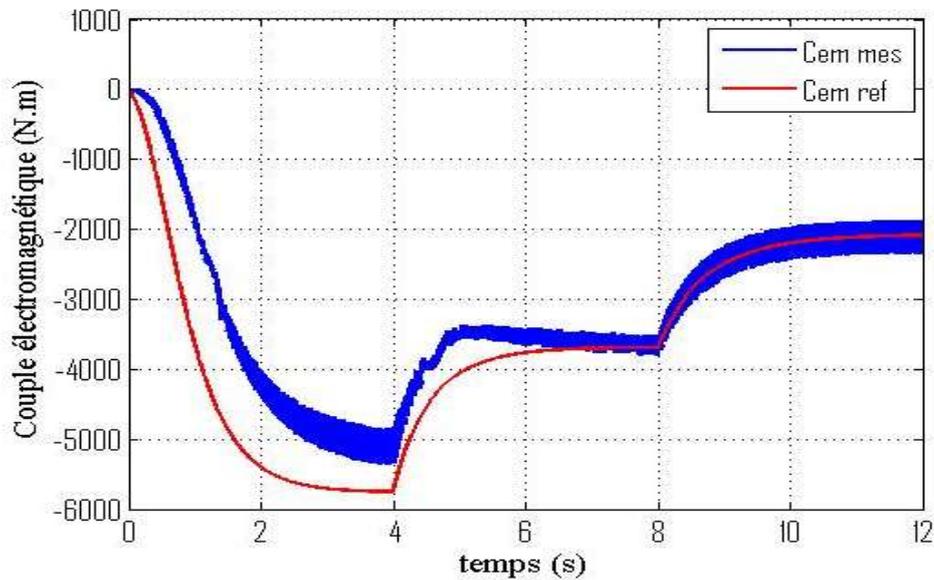


Figure III.13 : Allure de couple électromagnétique.

On constate sur la figure III.13, que le couple électromagnétique suit moins bien sa référence, on remarque une erreur statique entre l’instant 0s et 6s, puis à partir de 6s le couple suit parfaitement sa référence.

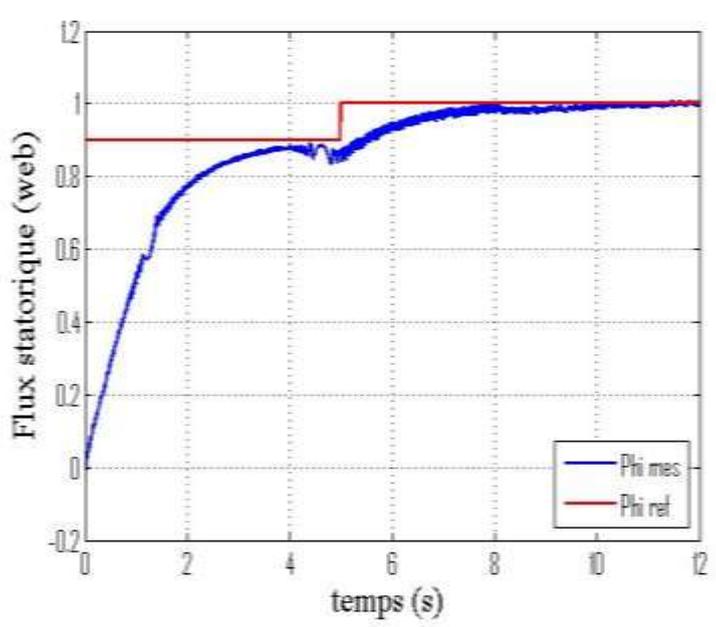


Figure III.14 : Allure du flux statorique.

Sur la figure III.14, on constate que le flux met du temps pour suivre la variation de la consigne, du a la magnétisation de la machine entre l’instant 0s a 4s. Par contre lorsqu’il atteint

le régime permanent, le temps de réponse est devenu plus petit et il atteint sa référence plus rapidement sans erreur statique importante.

- **Les courants rotoriques :**

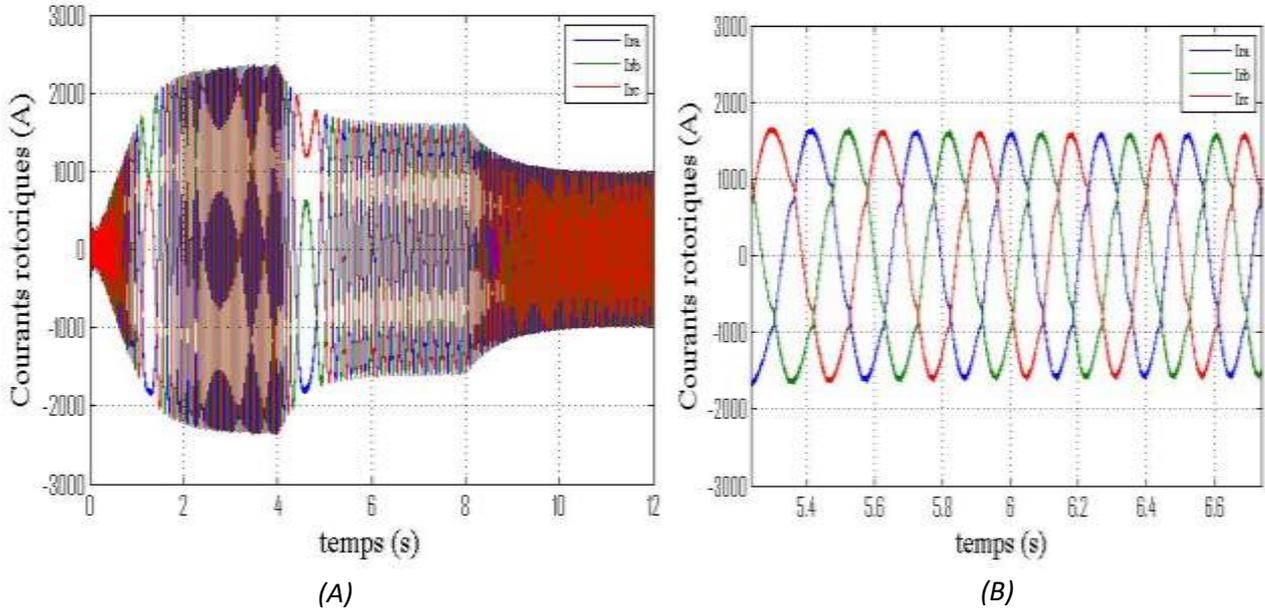


Figure III.15 : (A) Allures des courants rotoriques, (B) un zoom.

- **Les courants statoriques :**

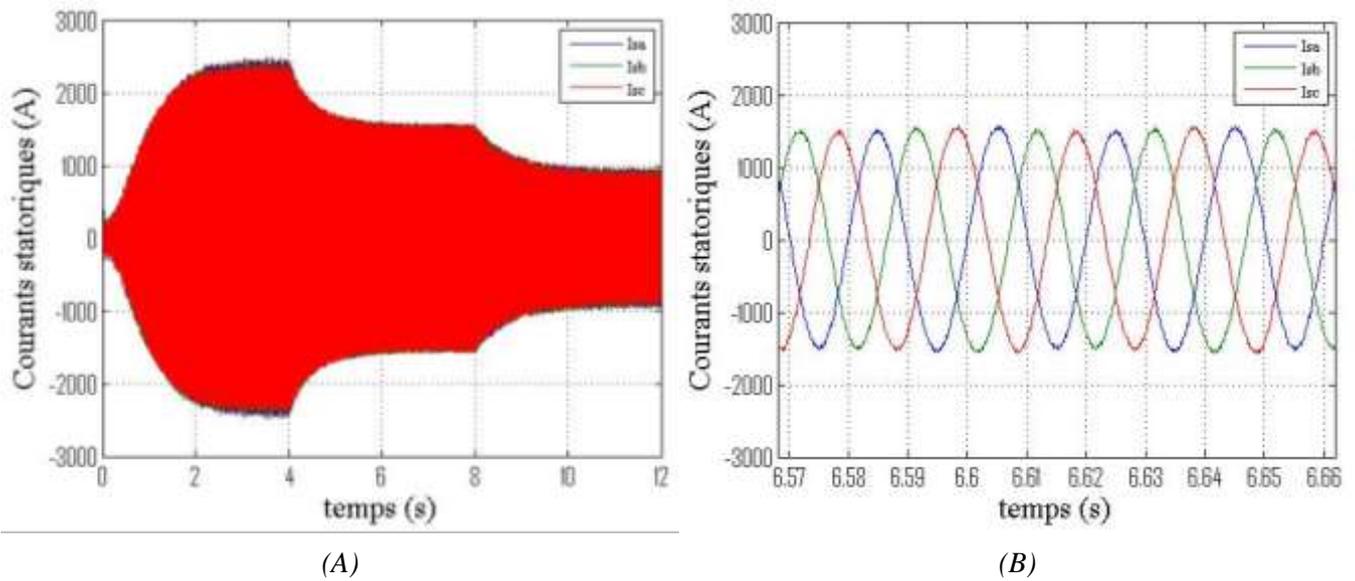


Figure III.16 : (A) Allures des courants statoriques, (B) un zoom.

Les figures III.15 et III.16 montrent que les courants obtenus au stator et au rotor varient en fonction de la vitesse de l'eau, de plus, ces courants ont des formes sinusoïdales avec des oscillations relativement importantes.

III.4.2- Résultats de simulation pour la commande indirecte avec boucle de couple

Afin d'améliorer la rapidité de notre système et le suivi de la consigne de l'MPPT, nous avons ajouté un troisième régulateur pour le couple électromagnétique, on constate que La commande indirecte avec boucle de couple donne de meilleures performances,(figure III.17)

- Le couple électromagnétique et le flux statorique

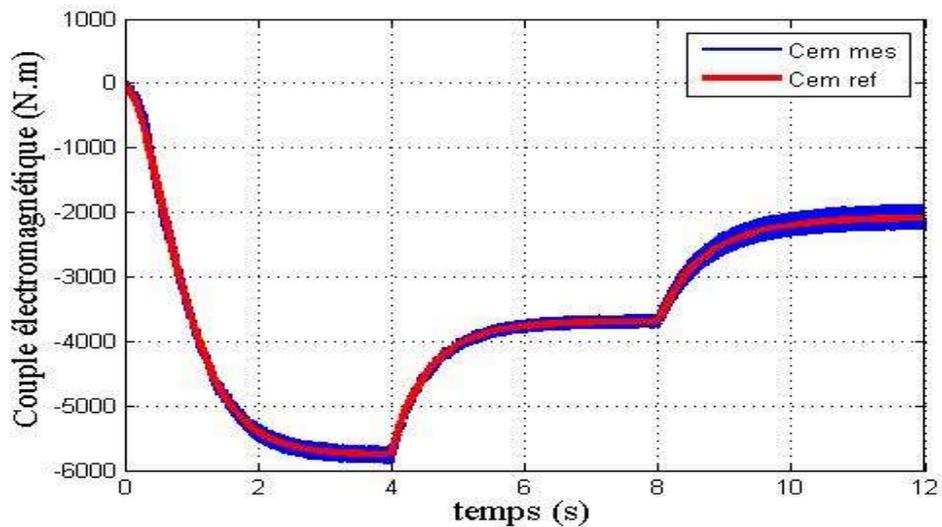


Figure III.17 : Allure de couple électromagnétique.

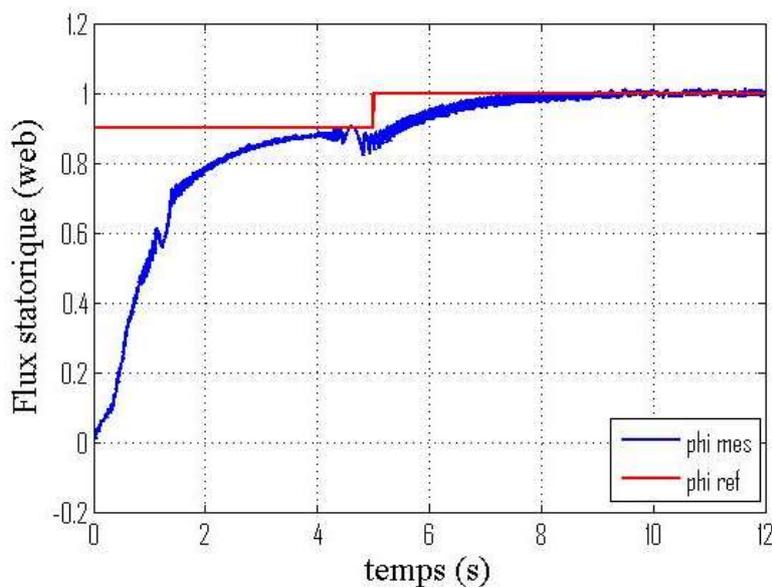


Figure III.18 : Allure du flux statorique.

Comme on peut le constater sur la figure III.17, le couple électromagnétique suit bien sa référence pendant toutes la variation de la vitesse de l'eau. Cela montre bien un bon découplage entre le couple électromagnétique et le flux.

On constate sur la figure III.18 que le flux n'a subi aucun changement lorsqu'on a ajouté le troisième régulateur pour le couple.

- **Les courants rotoriques**

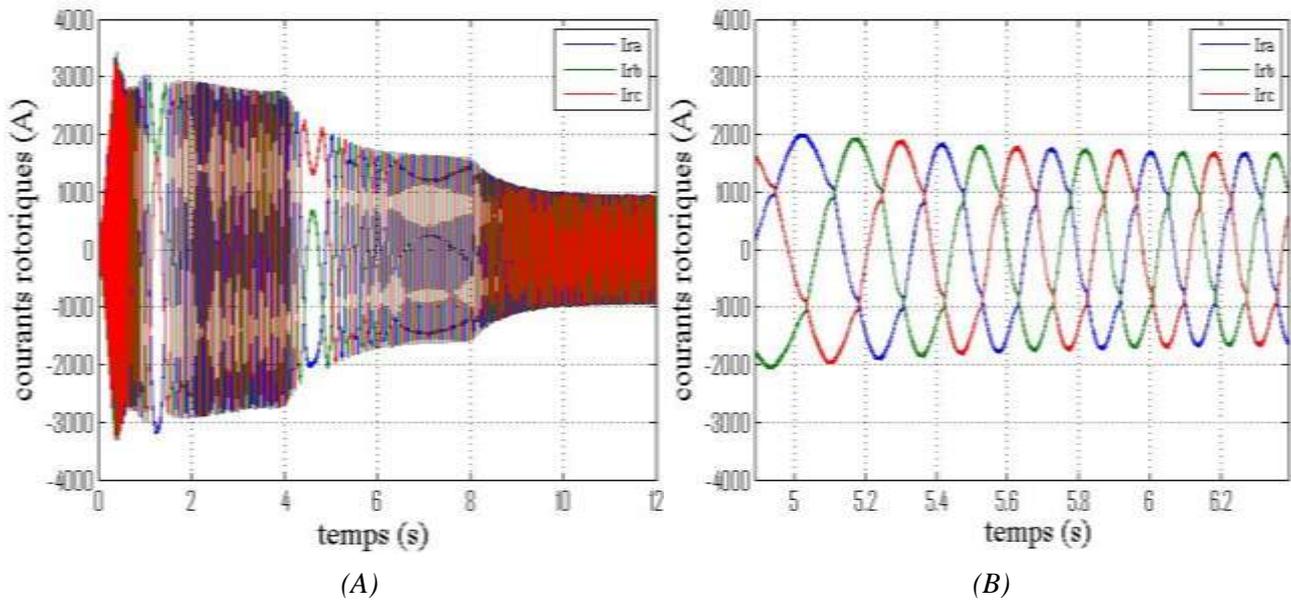


Figure III.19 : (A) Allures des courants rotoriques, (B) un zoom.

- **Les courants statoriques**

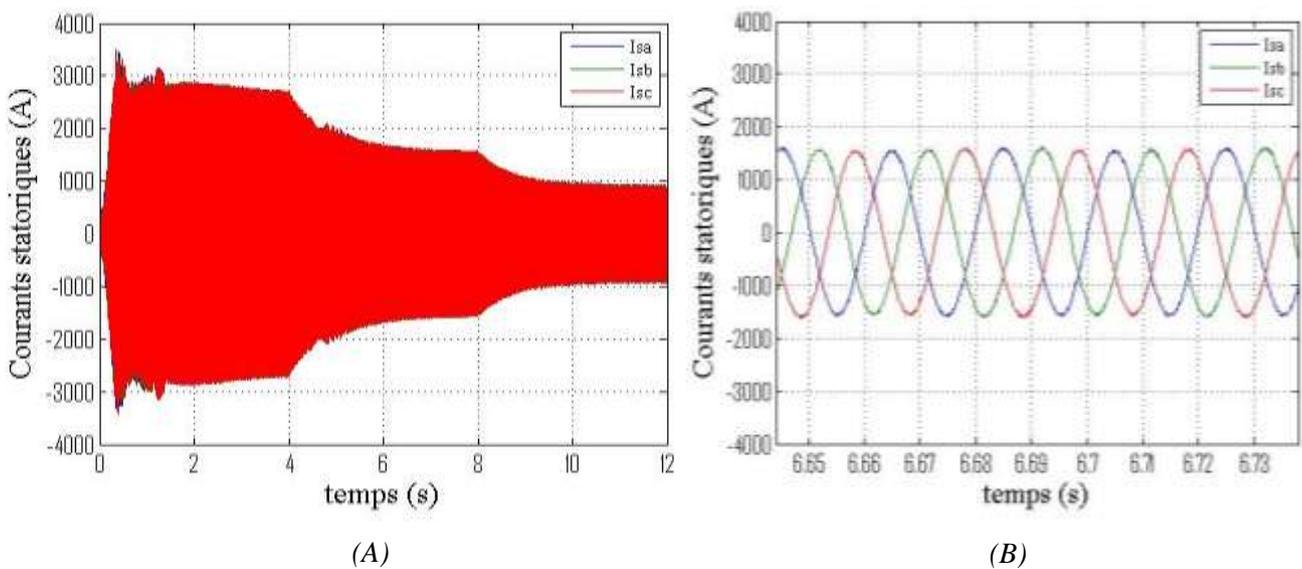


Figure III.20 : (A) Allures des courants statoriques, (B) un zoom.

D'après les figures III.19 et III.20, nous avons constaté que les courants atteignent plus rapidement des fréquences plus grande que sur la commande précédente. Ça montre bien l'importance du troisième régulateur ajouter pour le couple électromagnétique.

III.4.3- Résultats de simulation pour un test de robustesse

La robustesse des commandes est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à fortes variations de paramètres.

Dans ce cas, nous avons décidé de tester la robustesse de notre système en variant la résistance rotorique qui sera multiplié par deux ($R'_r = 2R_r$), puis en variant la mutuelle (l'inductance mutuelle 'M' de 10% à sa valeur nominale), nous avons obtenu les résultats suivants :

- **Le couple électromagnétique et le flux statorique**

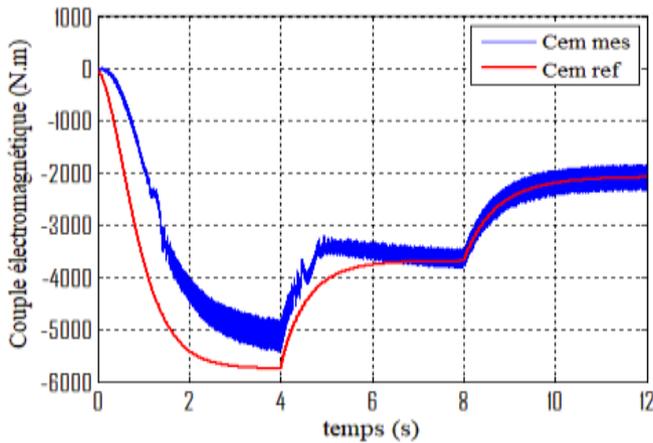


Figure III.21 : Allure de couple Électromagnétique pour $R'_r = 2R_r$.

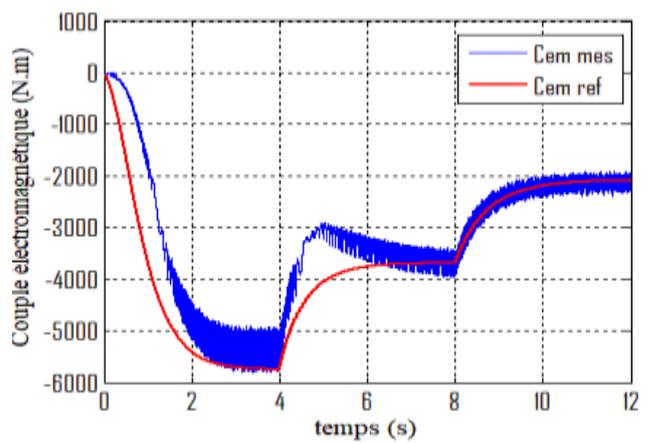


Figure III.22 : Allure du couple électromagnétique pour variation de la mutuelle.

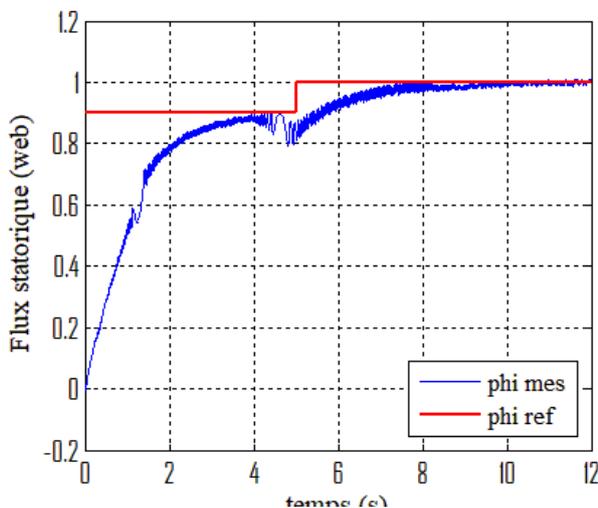


Figure III.23 : Allure de flux statorique pour $R'_r = 2R_r$.

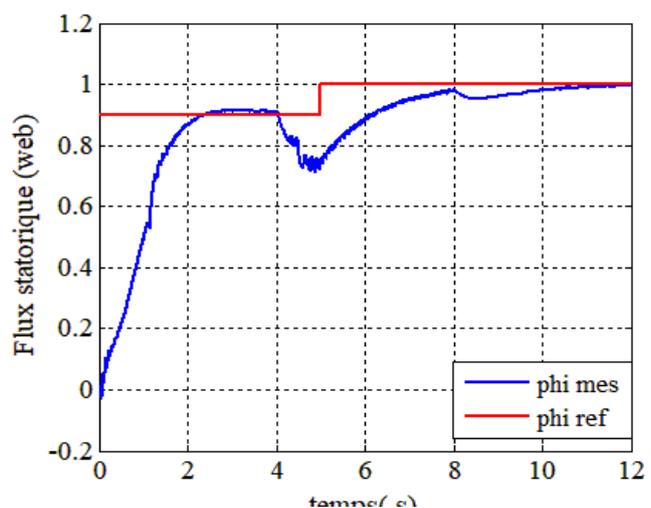


Figure III.24 : Allure de flux statorique Pour variation de la mutuelle.

On constate bien que le régulateur PI ne perd pas de robustesse en augmentant la résistance rotorique (figure III.21 et la figure III.23), Par contre, on constate que le régulateur PI perd sa robustesse particulièrement face à la variation de la mutuelle (les figures III.22 et III.24)

- **Les courants rotoriques et statoriques**

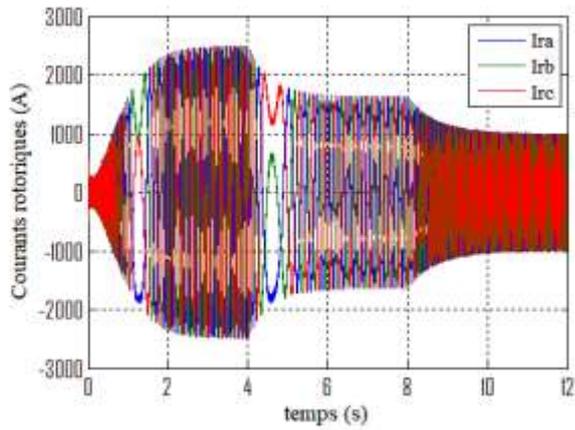


Figure III.25 : Allure des courants rotorique pour la variation de R_r .

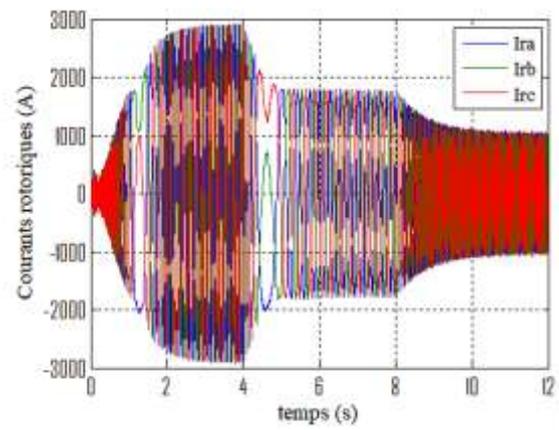


Figure III.26 : Allure des courants rotorique pour la variation de la mutuelle.

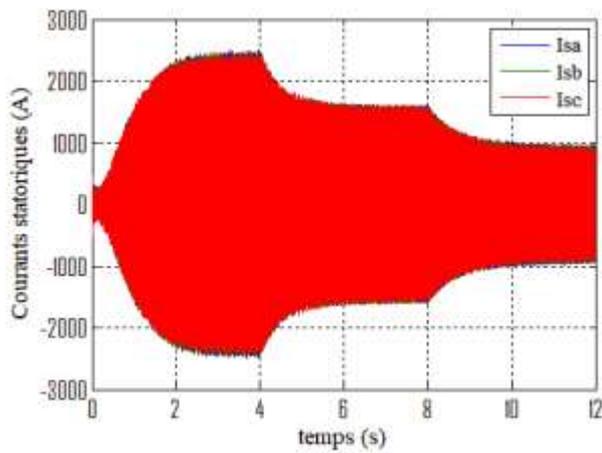


Figure III.27 : Allure des courants statorique pour la variation de R_r .

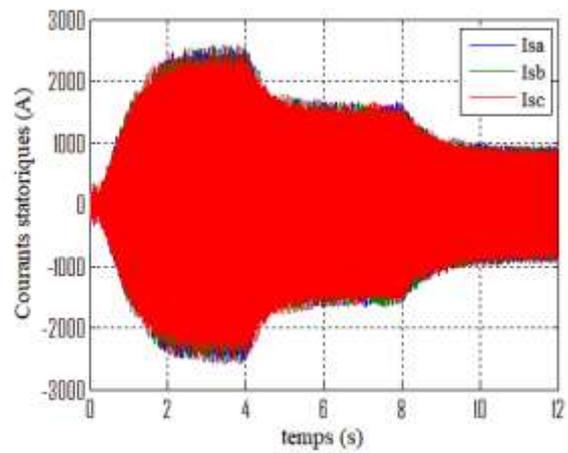


Figure III.28 : Allure des courants statorique pour la variation de la mutuelle.

On constate d'après les figures III.25 et III.27 que l'augmentation de la résistance rotorique n'affecte pas les courants rotoriques et statoriques.

Par contre, sur les figures III.26 et III.28, la variation de la mutuelle a une influence sur l'amplitude des courants rotoriques et statoriques.

III.4.4- Résultats de simulation pour la commande indirecte avec boucles de couple et de flux

Afin d'améliorer notre système, on a ajouté un quatrième régulateur pour mieux réguler le flux et aussi pour améliorer la robustesse de notre commande. On a obtenu les résultats suivants :

- **Couple électromagnétique et le flux statorique**

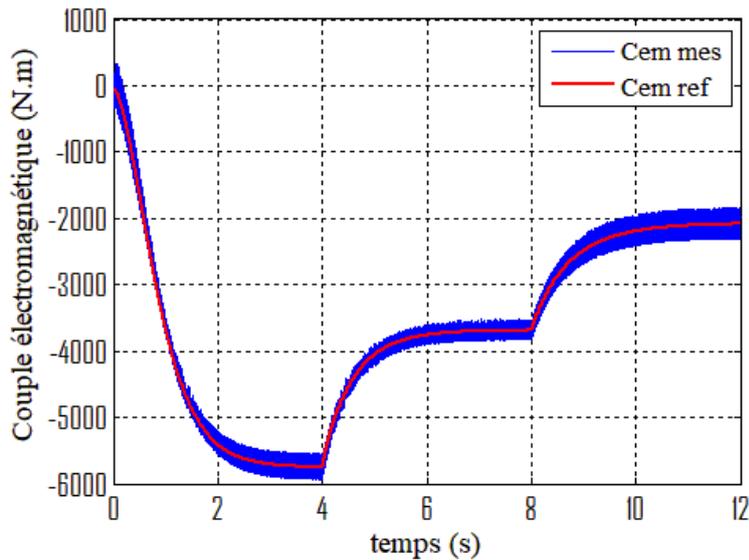


Figure III.29 : Allure du couple électromagnétique.

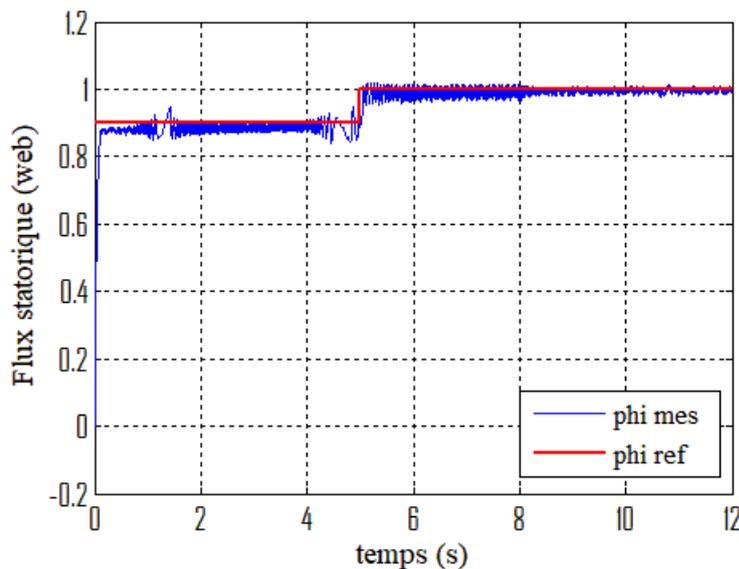


Figure III.30 : Allure du flux statorique.

D'après les figures III.29 et III.30, On peut remarquer que les échelons du couple et du flux sont bien suivis par le système aussi bien pour le couple électromagnétique que pour le flux statorique. On y voit une bonne dynamique et une erreur statique presque nulle,

III.5- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé la modélisation et la commande du système de conversion hydrolienne basé sur un modèle simplifié de la machine asynchrone a double alimentation en mode génératrice pour la régulation du couple électromagnétique et du flux statorique avec la commande MPPT de la turbine pour extraire le maximum de la puissance généré par la génératrice.

Nous avons établi un modèle mathématique pour réaliser une commande vectorielle indirecte à orientation du flux statorique visant à contrôler de manière indirecte le couple et le flux en contrôlant les courants rotoriques quadratique et direct.

A la fin de ce chapitre, on a procédé à des tests des simulations différentes dans le but d'améliorer le suivie de la consigne du couple électromagnétique et du flux statorique. Les résultats de simulation obtenus correspondent bien aux résultats attendus, cela justifie le bon modèle mathématique développé de la commande dans ce chapitre.

Conclusion générale

La machine asynchrone à double alimentation est un système non linéaire, multi variable, soumis à des variations paramétriques et à des perturbations inconnues. Le présent travail nous a permis de faire une étude de la commande en couple d'une machine asynchrone à double alimentation dédié à une centrale hydroélectrique. L'objectif de notre travail est de faire une modélisation de la MADA ainsi que les différents composants du système hydroélectrique en vue d'élaborer un système de commande. Pour ce faire, on a utilisé l'environnement Simulink/MATLAB. La modélisation et la commande à vitesse variable ont été étudiées pour une centrale hydroélectrique équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation.

Nous avons présenté dans le premier chapitre des généralités sur les systèmes hydroélectriques. Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet de la technologie utilisée dans les centrales hydroélectriques ont été données comme les différents types de ces dernières et leur mode de fonctionnement. De plus, on a fait une étude générale de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), ses applications, ses modes de fonctionnement et ses avantages.

Dans le deuxième chapitre, on a modélisé les différentes parties de notre système. On a vu l'intérêt de la transformation de Park qui permet d'avoir un système d'équations différentielles à coefficients constants pour faciliter sa résolution.

Le troisième chapitre est dédié à la réalisation de la méthode de commande basée sur la commande indirecte du couple par orientation du flux statorique, ainsi que l'intérêt qu'elle porte pour la simplification du modèle de la MADA. Les différentes parties modélisées nous ont permis aussi d'aboutir à des schémas bloc qui sont exploités pour la simulation du système global.

Les résultats de simulation de cette stratégie de commande ont montrés des performances assez satisfaisantes en termes de suivi des références.

Afin d'optimiser les gains des régulateurs PI qui sont utilisés dans la commande vectorielle classique du MADA et dans le but d'améliorer les performances de la commande en flexibilité et en robustesse, des perspectives intéressantes peuvent être émises, à savoir une

méthode PSO “*optimisation par essaim de particules*” soit en anglais « *Particle Swarm Optimization* » [26] qui consiste à optimiser le système avec un algorithme qui donne une solution approchée, et l’utilisation d’autres régulateurs non linéaire comme entre autres la commande par mode glissant pour améliorer la robustesse du système.

Références bibliographiques :

- [1] **Y. Elbia**, « Commande floue optimisée d'une machine asynchrone a double alimentation et a flux orienté », Mémoire de Magistère En Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [2] **Serhoud Hicham**, «Commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne» Mémoire de Master Académique, Université d'EL-Oued, 2015.
- [3] **S.Khojit el khil**, « Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) », mémoire Ingénieur ENIT-DEA Génie Electrique , 2006.
- [4] **F. Poitiers**, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne : Machine Asynchrone à Cage Autonome, Machine Asynchrone à Double Alimentation Reliée au Réseau », Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.
- [5] **S. Drid**, « Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'alimentation: Théorie et Expérimentation », Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [6] **G. Salloum**, "Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [7] **A. Chaiba**, « Commande par la Logique Floue de la Machine Asynchrone à Double Alimentation Alimentée en Tension », Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2004.
- [8] **V. Paul-Etienne**, « Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.

[9] **A. L. Nemmour**, « Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.

[10] **F.merrahi**, « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) », mémoire de magister de l'Ecole Nationale polytechnique, 2007

[11] **Site internet**, « https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_hydro%C3%A9lectrique »

[12] **A. BELKAID**. « Optimisation de la commande des convertisseurs statiques dans le cas de la production d'énergie électrique ». Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 17 Novembre 2004.

[13] **Site internet**

« <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite> »

[14] **Site internet**

« <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differents-types-de-centrales-hydrauliques> »

[15] **Site internet**

https://fr.wikipedia.org/wiki/Petite_centrale_hydro%C3%A9lectrique

[17] **Mohamed Nasser**, «Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés. », thèse de doctorat à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011

[18] **Cédric FERLAT**, « Le stockage hydraulique gravitaire et la production hydroélectrique sur les pentes réunionnaises – Etude du stockage de l'énergie photovoltaïque », https://www.arer.org/IMG/pdf/448_Rapport-stock-hydraulique-CF2009.pdf , 2009

[19] **S El. Aïmani**, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille1 (USTL).

[20] **H. Tamrabet**, « Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone », mémoire de magister, Université de Batna, 2006

[21] **Y.A. Benchrif**, « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne », projet de fin d'études, ENSP, Juin 2008.

[22] **H. Idjouadien et S. Irbah**, « Commande non linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation », mémoire d'ingénieur d'état Bejaia 2007.

[23] **L. Aloui**, « Etude par simulation d'une éolienne basée sur une machine Asynchrone à double alimentation alimentée par convertisseur matriciel », Mémoire de Magister en électrotechnique à l'Université de Bejaia, octobre 2006.

[24] **F. Abdoune et A. Idir**, « Etude et simulation d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », mémoire d'ingénieur d'état en électromécanique, Université de Bejaia, 2007.

[25] **A. Guezgouz et L. Korichi**, « commande en mode glissant de la MADA dans une éolienne à vitesse variable connectée au réseau » mémoire d'ingénieur d'état université de Bejaia, 2009.

[26] **Y. Bekakra**, « Contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation », thèse doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.

[27] **Ben Nadji Hocine et Belloul Abdallah**, « commande de la puissance active et réactive du GADA par la méthode de mode glissant », mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar-El-Oued, 2015

[28] **Aberkane Arezki et Itoudj Hamid**, « Etude et commande d'une chaîne de conversion d'énergie dédiée à une hydrolienne », mémoire d'ingénieur d'état, université de Béjaia, 2010

Annexes

A. Paramètres et caractéristiques de la GADA utilisée en simulation

➤ A.1 Caractéristiques :

Puissance nominale	1.5 MW
Tension composée	690 V
Fréquence	50 Hz

➤ A.2 Parameters

Résistance statorique	0.012 Ω
Résistance rotorique	0.021 Ω
Inductance statorique	0.013732 H
Inductance rotorique	0.013703 H
Mutuelle	0.013528 H
Moment d'inertie	50 Kg.m ²
Nombre de pair de pôle	2
Coefficient de frottement visqueux	$f= 0.0071 \text{ N ms}/rd$
Sigma	0.027436

➤ Paramètres de la turbine :

Rayon de l'hélice	35 m
Gain de multiplicateur de vitesse	90
Vitesse initial	10 m/s

➤ **Paramètres du bus continu + Redresseur MLI**

Valeur de la capacité de filtrage de la tension DC	400e-6 F
Valeur de l'inductance de lissage	0.08 H
Résistance du filtre inductif	0.5 Ω
Temps de réponse de la tension DC	2e-3 s
Temps de réponse des courants réseaux	8e-4 s

➤ **Paramètres de la commande vectorielle indirecte :**

	Ki	Kp
Pour les régulateurs de courants	5.25	0.093
Pour les régulateurs de Couple	150	5
Pour les régulateurs de Flux	5	30

➤ **Paramètres de MPPT sans asservissement :**

Coefficient de puissance maximum	0.44
Lamda optimal	7
Gain de multiplicateur de vitesse	90
Rayon	35 m

Chapitre 1

Chapitre 2

Chapitre 3