

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE IBN KHALDOUN- TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

Pour l'obtention du diplôme de master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Réseau Électrique

THÈME

ÉTUDE ET SIMULATION D'UNE MICRO-CENTRALE HYDROELECTRIQUE

Préparé par :

BERDRAA Lamia

BOUKHERIS Siham

Soutenu devant le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Mr. KOULALI Mustapha	MAA	UNIV DE TIARET	Président.
Mr. NEGADI Karim	MCB	UNIV DE TIARET	Encadreur.
Mr. BARKANI Abderrahmane	MBA	UNIV DE TIARET	Examineur.
Mr. BOUMEDIENE Bachir	MAA	UNIV DE TIARET	Examineur.

Promotion 2019 /2020

Remerciements

Nos remerciements vont tout premièrement, à ALLAH 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.

C'est avec une profonde reconnaissance et une considération particulière, que nous remercions notre encadreur, Dr NEGGADI Karim, de nous avoir accordé sa confiance pour réaliser ce travail, ainsi que pour son aide et son suivi permanent. On le remercie également pour sa patience, ses encouragements et ses précieux conseils.

Nos vifs remerciements s'adressent également à tous les membres du jury qui nous ont honorés par leurs présences et d'avoir acceptés d'examiner et d'évaluer notre modeste travail.

Nos sincères remerciements et notre gratitude pour, Pr. ALLAOUI Tayeb, directeur du laboratoire de Génie énergétique et génie informatique pour nous avoir faciliter l'accès au laboratoire afin de réaliser ce travail.

On ne peut omettre de remercier l'ensemble des enseignants du département génie électrique, dont nous avons eu l'honneur d'être les étudiantes.

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'études, qu'ils trouvent ici, l'expression de nos sincères remerciements.

Dédicaces



Du fond du cœur je remercie notre Grand Seigneur « Allah »
de m'avoir donnée la force, la santé, la persévérance et d'avoir illuminé mon chemin
malgré toutes les difficultés rencontrées.

C'est avec une grande émotion que je dédie ce modeste travail à des personnes très
chères à mes yeux :

A mon père, qui est la lumière de mes yeux et qui me comble d'amour, pour son soutien tout au
long de mon parcours universitaire, que ce travail soit l'accomplissement de tes vœux tant
allégués, et le fruit de ton soutien infailible,

A ma belle-mère qui m'a toujours soutenu dans les moments difficiles,

A mes chers frères et sœurs, Mokhtar, Sofiane, Mokhtaria, Latifa et leurs enfants,
pour leurs amours, leurs attentions, leurs aides et leurs soutiens qu'ils m'ont apportés,

A toute la famille « Boukheris »,

A Belkacem qui m'a donnée le courage, la bonne volonté et le soutien depuis
mon parcours universitaire ,

A mon binôme Berdaa Lamia et toute sa famille,

A mes meilleurs amis : Abdelkader, Youcef, Zahra et Abir,

A tous mes amis, sans oublier tous les étudiants de la promotion
2019/2020 de M2 réseau,

A tous mes enseignants tout au long de mes études,

En fin, à la mémoire de ma mère, J'espère que du
monde qui est sien maintenant,
elle apprécie cet humble geste comme preuve
de reconnaissance de la part d'une fille
qui a toujours prié pour le salut de son âme.
Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte
miséricorde.



Siham



Dédicaces

Afin d'être reconnaissante envers ceux qui m'ont appuyé et encouragé à effectuer ce Travail, je dédie ce mémoire 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.

Mes sœurs Nassima, Hadjira, Amina, Hanane et Sarah,

Mes frères Kadi Mohamed Mes nièces et neveux,

Toutes la famille « berdaa »,

A tous mes amis sans exceptions,

Ma collègue Siham et toute sa famille,

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

lamia

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I : Généralité et état de l'art sur un système énergétique d'une centrale hydroélectrique	
I.1 Introduction.....	04
I.2 Les centrales hydroélectriques.....	05
I.3 Production de l'énergie électrique dans une centrale hydraulique.....	05
I.4 L'hydroélectricité dans le monde.....	06
I.5 Microcentrale hydroélectrique.....	07
I.6 Application.....	08
I.7 Classification.....	08
I.7.1. Installations à basse pression.....	08
I.7.2. Installations à moyenne et haute pression.....	09
I.8 Les équipements d'une microcentrale hydroélectrique.....	09
I.8.1. Les équipements électromécaniques.....	09
I.8.2. Équipements électrique.....	12
I.8.2.1. La génératrice.....	12
I.8.2.2. Le transformateur.....	13
I.8.3. Les équipements civils	14
I.9 Machines asynchrones à double alimentation (GADA)	14
I.9.1. Structure de la GADA.....	14
I.9.2. Modes de fonctionnement.....	15
I.9.3. Principe de fonctionnement de la GADA.....	16
I.9.4. Avantages et inconvénients de la GADA.....	17
I.9.4.1. Avantages de la GADA.....	17
I.9.4.2. Inconvénients de la GADA.....	18
I.10 Principe de fonctionnement d'une microcentrale hydraulique.....	18
I.11 Modes de fonctionnement.....	19
I.12 Système de stockage de l'énergie électrique.....	20
I.12.1. Synthèse sur les différentes techniques de stockage.....	20
I.12.2. Système de stockage électrostatiques (super-condensateurs)	20
I.13 Les avantages du petit hydraulique.....	22
I.14 Les inconvénients de la microcentrale hydraulique.....	22
I.15. Conclusion.....	23

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion hydroélectrique

II.1 Introduction.....	24
II.2 Différentes Topologies des chaînes de conversion d'énergie.....	25
II.3 Configuration du système de l'usine hydroélectrique proposée.....	26
II.4 Modélisation de la turbine hydraulique.....	27
II.5 Modélisation de multiplicateur (partie mécanique).....	28
II.6 Modélisation de la GADA.....	30
II.6.1 Modelé de la GADA dans le repère triphasé.....	31
II.6.2 Modèle de la GADA dans le repère dq.....	33
II.7 Modélisation des convertisseurs statiques.....	34
II.7.1. Modélisation d'un redresseur Vienna (convertisseur côté rotor).....	34
II.7.2. Modélisation d'un Bus continu.....	37
II.7.3. Modélisation d'un onduleur à trois niveaux (convertisseur coté réseau).....	38
II.8 Modélisation d'un réseau électrique.....	40
II.9 Conclusion.....	41

Chapitre III : Commande et simulation d'une microcentrale hydroélectrique en mode connecté.

III.1 Introduction.....	42
III.2 La commande vectorielle de la GADA.....	42
III.3 Définition du facteur de puissance du réseau.....	44
III.4 Contrôleur MPPT de la microcentrale hydroélectrique.....	45
III.5 La commande par mode glissant.....	47
III.5.1 Conception de contrôleur de mode glissant d'ordre supérieur.....	47
III.6 Contrôle de convertisseur côté rotor.....	47
III.7 Régulation de la tension continue.....	49
III.8 Contrôle de convertisseur côté réseau (CCR).....	50
III.9 Résultats de simulation et interprétations.....	52
III.10 Conclusion.....	59
Conclusion générale.....	62
Références bibliographiques.....	64

Liste des figures

Figure I.1 : La production mondiale de l'électricité.....	07
Figure I.2 : Turbine Pelton	10
Figure I.3 : turbine Francis	11
Figure I.4 : turbine kaplan.....	11
Figure I.5 : Génératrice synchrone et son multiplicateur.....	12
Figure I.6 : Génératrice asynchrone de 220 kW et son multiplicateur.....	13
Figure I.7 : Transformateur de puissance de 120 MVA	13
Figure I.8 : Structure du rotor de la GADA.....	15
Figure I.9 : les différentes modes de fonctionnement de la GADA.....	16
Figure I.10 : Principe d'une centrale hydraulique.....	19
Figure I. 12 : Schéma de principe du super-condensateur déchargé et chargé	21
Figure II.1 : Configurations existantes pour la vitesse variable de MHPP.....	26
Figure II.2 : représentation électromécanique de la turbine hydroélectrique.....	27
Figure II.3 : caractéristiques de turbine hydroélectrique.....	28
Figure II.4 : Modèle mécanique de la turbine hydraulique.....	29
Figure II.5 Schéma bloc du modèle de la turbine hydraulique.....	30
Figure II.6 : Topologie d'un redresseur triphasé de Vienna.....	34
Figure II.7 : Schéma monoiphasé équivalent d'un redresseur de type Vienna.....	36
Figure II.8 : schéma de bus continu.....	37
Figure II.9 : régulation de la tension du bus continu.....	38
Figure II.10 :Schéma de principe d'un onduleur à trois niveaux.....	39
Figure II.11 : Structure du CCR.....	40
Figure III.1: Schéma fonctionnel d'une centrale hydroélectrique avec configuration de conversion de puissance et objectifs de contrôle.....	43
Figure III.2 : Définition du flux de puissance entre le réseau et la liaison DC, et le réseau.....	45
Figure III.3 : Schéma bloc de maximisation de la puissance	47
Figure III.4 : Schéma de la commande par mode glissant d'ordre supérieur du convertisseur côté rotor.....	49
Figure III.5 : Régulation de la tension continue avec un correcteur PI.....	50

Figure III.6 : Schéma de la commande par mode glissant du convertisseur côté réseau.....	52
Figure III.7 : Schéma de la chaîne de conversion hydroélectrique sous Matlab/Simulink.....	53
Figure III.8 : Les Caractéristiques mécaniques de la centrale hydroélectrique produites sous un débit d'eau variable.....	53
Figure III.9 : Réponse dynamique de la GADA de la stratégie de commande proposée: (a) et (b) composantes d,q du tension et courant du rotor respectivement.....	54
Figure III.10 : Réponse dynamique de la GADA de la stratégie de commande proposée: Composantes d, q du Couple électromagnétique et Flux rotorique.....	54
Figure III.11 Réponse dynamique de la GADA de la stratégie de commande proposée: (a)et (b) composantes d, q du tension et courant du stator respectivement.....	55
Figure III.12 : Réponse dynamique de la commande proposée : tension du bus continu, fréquence de la génératrice et fréquence du réseau.....	56
Figure III.13 : Réponse dynamique de la stratégie de commande proposée.....	56
Figure III.14 : Tension et courant de phase du réseau.....	57
Figure III.15 : Analyse spectrale et THD du courant et de la tension de la phase a du réseau.....	58

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Catégories d'une centrale hydroélectrique [8].....	05
Tableau I.2 : Bilan mondial 2018 de la production d'électricité et taux moyens de la croissance par source primaire.....	07
Tableau III.1 : Données MADA utilisées pour la simulation.....	52
Tableau III.2 : Paramètre de l'onduleur AC-DC et du réseau.....	52

Liste des abréviations

GADA	Générateur Asynchrone Double Alimentation
GSEE	Générateur Synchrone d'Excitation Electrique
GSAP	Générateur Synchrone a Aimant Permanant
CST	Convertisseur de Source de Tension
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
CCR	Conertisseur Côté Réseau
CCM	Convertisseur Côté Machine
DC	Direct Current
HVDC	Hight Voltage Direct Current
AC	Alternatif Current
IM	Moteur Integté
FP	Facteur de Puissance
SOSMC	Sliding Order Superieur Mode Contrôler
GES	Gaz à Effet de Serre
F.M.M	Force Magnéto Motrice
MHPP	Micro hydraulic power plant
MPPT	Maximum power point tracking

Introduction Générale

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.

Face à cette demande, le monde a accentué la production de l'énergie par les énergies fossiles, mais le risque d'accident de ses derniers, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures. Pour faire face à ces différents problèmes, les pays se tournent de plus en plus vers l'utilisation de sources d'énergies propres et renouvelables. En effet, ces pays se sont engagés, à moyen terme, à augmenter dans leur production d'énergie électrique la part d'énergies d'origine renouvelable (Eolien, solaire, maritime, biosphère) [1].

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables, elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées... etc. On qualifie les énergies renouvelables d'énergies "flux" par opposition aux énergies "stock", elles-mêmes constituées de gisements limités de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz, uranium). Contrairement à celle de ces dernières. L'exploitation des énergies renouvelables n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir. Mais elles sont encore sous-exploitées par rapport à leur potentiel puisqu'elles ne couvrent que 20 % de la consommation mondiale d'électricité [1].

L'hydroélectricité est la plus importante et la plus économique des énergies renouvelables. Elle offre une densité de puissance élevée, un très bon rendement de transformation et un excellent facteur de rendement. Elle est favorable à la protection de l'environnement, car elle ne produit pas de gaz à effet de serre susceptibles de provoquer de

profonds changements climatiques.

Dans ce travail, nous sommes intéressés aux centrales hydroélectriques réversibles à vitesse variable utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) pilotée par le rotor par deux convertisseurs commandés par modulation de largeur d'impulsion (MLI). L'idée maîtresse du travail mené dans ce mémoire est d'utiliser les possibilités offertes par la vitesse variable pour travailler à des points de rendement maximaux (placement MPPT), et ce, afin de favoriser un fonctionnement harmonieux entre sources renouvelables et réseaux connectés tout en respectant les contraintes exigées par les charges et/ou les opérateurs réseau.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Après une introduction générale, le premier chapitre est dédié à des généralités et l'état de l'art de l'hydroélectricité en présentant des statistiques sur la production de l'énergie hydraulique dans le monde par rapport aux autres procédés de production. Une présentation sur la microcentrale hydraulique à travers sa définition, son principe et son mode de fonctionnement ainsi que ses différents équipements. On introduira aussi la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), sa structure et son principe de fonctionnement ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

On présentera dans le chapitre 2 la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion hydroélectrique telle que la turbine, le multiplicateur de vitesse, la GADA, les convertisseurs statiques, le bus continu et le réseau. La mise en équation permettra de simuler sont modèle dans le mode générateur.

Le troisième chapitre sera consacré à la commande et la simulation numérique d'une chaîne de conversion hydroélectrique en profil variable de la chute d'eau. On commençant par

définir les différentes stratégies de commande choisissant le control par mode glissant pour commander les deux convertisseurs statique coté machine et coté réseau.

Les résultats de simulation son définit on dernier pour mieux voir les paramètres influant sur la production des centrales hydroélectrique.

Le manuscrit est finalisé par des conclusions et les perspectives.

Liste des Symboles

φ_s	Flux statorique.
φ_r	Flux rotorique.
φ_m	Flux magnétisant.
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_r	Couple résistant.
i_a, i_b, i_c	Courants instantanés dans les phases du moteur.
$\hat{\phi}_s$	Flux et couple estimés.
R_{s1}, R_{s2}, R_r	Les résistances statoriques et rotoriques.
g	Glissement.
P_{em}	Puissance électromagnétique.
P	Puissance instantanée.
i_a, i_b, i_c	Courants instantanés dans les phases du moteur.
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}, \phi_{s\alpha}, \phi_{s\beta}$	Courants et Flux dans les axes (α, β).
f	Fréquence.
k_f	Coefficient de frottement.
k_p, k_i	Paramètres du régulateur PI.
V_s	Vecteur de tension statorique.
δ	Angle entre les vecteurs flux statorique et rotorique.
θ	L'angle entre le flux statorique et l'axe de référence.
Ω	Vitesse électrique.
Ω_m	La vitesse mécanique du rotor.
p	Nombre de paires de pôles.
σ	Coefficient de dispersion.
ω_s	Pulsation statorique.
θ_m	Angle mécanique.
θ_e	Angle électrique.
θ_{s1}	Pulsation de glissement.
J	Moment d'inertie de la machine.

$[L_{cs}], [L_{cr}] \text{ et } [M_{rs}]$	Matrices d'induction statorique, rotorique et mutuelle.
$L_{s(r)}$	Inductance propre d'une phase du stator (rotor).
$M_{s(r)}$	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques (rotoriques) .
$L_{so} - L_{sl} , L_{so} + L_{sl}$	Les valeurs minimum et maximum de l'inductance propre d'une phase de l'induit.
M_s	La valeur maximale de l'inductance mutuelle entre deux phases de l'induit.

C HAPITRE I

**Généralité et état de l'art sur un
système énergétique d'une centrale
hydroélectrique**

I.1 Introduction

Sous l'effet de la démographie et de la croissance économique, la demande énergétique mondiale est en forte croissance. Les énergies fossiles, dont le pétrole au premier rang, assure aujourd'hui plus de 80 % de l'offre mondial en énergie. Cette situation se traduit par une dépendance mondiale aux énergies carbonées. Ces dernières années, la hausse des prix du pétrole depuis 2002 est comparable à celle qu'avaient provoquée les chocs pétroliers de 1973 et 1979. Le prix du baril de Brent a été multiplié par 5, dépassant pour la première fois 100 dollars en janvier 2008. Les derniers rapports du GIEC2 confirment et renforcent la certitude de l'existence d'une augmentation de l'effet de serre due à l'activité humaine. Il donne des prévisions d'augmentation de la température moyenne du globe et d'élévation du niveau moyen des mers Sur le globe. Ainsi, selon les scénarios plus ou moins pessimistes, la température moyenne sur la terre s'élèverait en 2100 de (1,8° à 4°).

Le protocole de Kyoto, élaboré en 1997 pour servir de cadre international à la lutte contre le réchauffement de la Terre, avait fixé pour objectif la réduction moyenne de 5.2% des émissions des gaz à effet de serre sur la période 2008-2012 pour les ramener à leur niveau de 1990.

La Commission européenne a défini l'idée principale du développement durable comme « répondant aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité de l'avenir générations pour répondre à leurs propres besoins - autrement dit, une meilleure qualité de vie pour tous, maintenant et pour les générations à venir [4].

Actuellement, les sources d'énergie renouvelables font l'objet d'un regain d'intérêt. La cause principale de cet essor est l'épuisement des ressources énergétiques conventionnelles de la Planète (le fuel, le gaz naturel, le charbon et l'uranium). Globalement, en 2009 il y avait 1230 GW installés en énergies renouvelables produisant de l'électricité, ce qui représente 18% de la capacité dans le monde. Cette énergie renouvelable peut être fournie par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux [5].

L'hydroélectricité est une source d'énergie renouvelable basée sur le cycle naturel de l'eau. Elle est considérée comme la plus mature, la plus fiable et la plus rentable technologie de production d'énergie renouvelable disponible. elle est l'une des énergies renouvelables les plus développées dans le monde. Elle met à profit l'énergie de l'eau qui se déplace d'un point haut vers un point bas, essentiellement pour produire de l'électricité.

L'hydroélectricité est largement acceptée comme une énergie propre et compatible avec les contraintes environnementales.

L'hydroélectricité est l'énergie qui présente le meilleur délai d'amortissement énergétique, toutes énergies comparées, renouvelables et fossiles. Au cours de sa vie, une centrale

hydroélectrique produit plus de 200 fois l'énergie nécessaire pour construire, maintenir et exploiter cette centrale. Cet excellent résultat s'explique par la longévité des installations hydroélectriques.

Les centrales hydroélectriques présentent la particularité de ne pas avoir de durée de vie limitée, dès lors qu'elles font l'objet d'un entretien régulier [6].

La petite hydraulique où la puissance est généralement inférieure à 10 MW, a un potentiel énorme dans le monde entier, ce qui lui permettrait une contribution significative aux besoins énergétiques futurs. Dans le nouveau contexte du marché d'électricité, cette technologie représente une bonne solution en termes de coût et d'impact environnemental. Comme la principale ressource est continue et prévisible. Ces systèmes peuvent constituer la base de futurs micro-réseaux en particulier dans les sites isolés. Dans le nouveau contexte du Marché d'électricité. Cette technologie représente une bonne solution en termes de coût et d'impact environnemental [7].

I.2 Les centrales hydroélectriques

Ce sont des centrales de production d'électricité qui transforme l'énergie sauvage d'une chute d'eau en énergie mécanique grâce à une turbine, puis en énergie électrique grâce à un générateur ; dans laquelle le flux crée par l'eau amenée par écoulement libre (canaux) ou par des conduites en charge (conduites forcées) actionne la rotation des turboalternateurs, avant de retourner à la rivière. C'est une forme d'énergie renouvelable, propre et non polluante.

Le tableau 1 ci-dessous présente les catégories hydroélectriques les plus répandues et le nombre de besoins en énergie électrique des maisons satisfaits pour mettre les choses en contexte [7].

Tableau I.1 : Catégories d'une centrale hydroélectrique [8].

Catégorie Hydro	Gamme de puissance	Nombre De foyers alimentés
Pico	0 KW-5 KW	0-5
Micro	5 KW-100 KW	5-100
Mini	100 KW-1 MW	100-1000
Moyenne	10 MW-100 MW	10000-100000
Grande	100 MW+	100000+

I.3 Production de l'énergie électrique dans une centrale hydraulique

La centrale hydroélectrique est essentiellement composée d'un générateur, d'une turbine, d'une conduite forcée et de portillons. Généralement, deux types de turbines sont utilisés :

La turbine à impulsion par exemple la turbine Pelton Wheel et la turbine à réaction comme la turbine Francis et Kaplan. Le générateur et la turbine sont pour la plupart reliés directement par un arbre vertical L'existence d'une hauteur de chute élevée produit de l'eau à écoulement rapide qui traverse la conduite forcée et arrive à la turbine. Le débit d'eau dans la turbine est contrôlé par les

portillons. Les portillons peuvent être réglés avec l'ouverture du pivot autour de la périphérie de la turbine pour contrôler la quantité d'eau qui s'écoule dans la turbine. Des servo-actionneurs, contrôlés par le régulateur, aident à régler ces portes.

L'eau entraîne le groupe turbine-alternateur et le générateur rotatif produit de l'électricité. Au stade initial, l'eau stockée à charge hydraulique claire possède une énergie potentielle. En traversant la conduite forcée, elle perd progressivement de l'énergie potentielle et gagne de l'énergie cinétique avant d'atteindre la turbine. Un regard critique sur le processus de production d'énergie par les centrales hydroélectriques montre que les modèles de centrales hydroélectriques sont fortement influencés par le système de conduite forcée-turbine, le générateur électrique et de nombreux systèmes de contrôle.

Une fois mise en mouvement, la turbine entraîne un générateur de courant qui va transformer l'énergie mécanique disponible sur son arbre, en énergie électrique.

Le courant produit à la sortie du générateur doit ensuite être évacué et transporté jusqu'au point de livraison. Lorsque la production d'énergie électrique est injectée eau réseau local d'électricité, il faut que la valeur de la tension produite (en générale 380v) soit égale à la valeur des lignes de transport de l'électricité (par exemple 20000V).

Cette action est réalisée par un transformateur qui permet d'élever la tension [9].

I.4 L'hydroélectricité dans le monde

Du fait de l'impact des stations de pompage sur le productible, les comparaisons avec les autres filières ne seront réalisées qu'en terme d'énergie électrique produite. En revanche, pour

Éviter ce biais, le développement historique de la filière ne sera étudié qu'en terme de capacité installée.

Il existe plus de 15 pays dont le total d'électricité générée provient d'au moins 90% de la production hydraulique et près de 40 pays pour plus de 50%. Les grands pays les plus engagés en pourcentage de leur production totale sont la Norvège (99,3%), le Brésil (81,7%), le Venezuela (67,2%) ou le Canada (56,7%).

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'hydraulique est la seule à être exploitée à grande échelle pour produire de l'électricité, et ceci dans le monde entier. En 2018, elle assurait 16% de la production électrique mondiale, encore loin derrière le charbon (38.1%) et le gaz (23.3%). Quatre pays se partagent plus de la moitié de la production : la Chine fait la course en tête, avec un quart de la production mondiale, suivie du Brésil, du Canada et des États-Unis.

Dans le monde, on recense aujourd'hui quelque 10 000 grands barrages produisant de l'électricité. Parmi les plus impressionnants : le barrage d'Itaipu, à la frontière entre le Brésil et le Paraguay, ou encore celui des Trois-Gorges en Chine. Sa retenue d'eau s'étend sur 600 km de longueur, soit la distance en Paris et Marseille ! Le barrage lui-même est long de plus de 2 kilomètres, pour une hauteur de 140 mètres [10].

Tableau I.2 : Bilan mondial 2018 de la production d'électricité et taux moyens de la croissance par source primaire.

Désignation	Biomasse	Eolien	Hydro	Solaire	Géothermie	Nucléaire	Pétrole	Charbon	Gaz
Production d'électricité sur 10 ans	02	4.9	15.8	2.2	0.3	10.2	03	38.1	23.3
Evolution moyenne %/An sur 10 ans	9.2	20	2.6	48	3.2	-0.1	-4.3	1.8	4.1

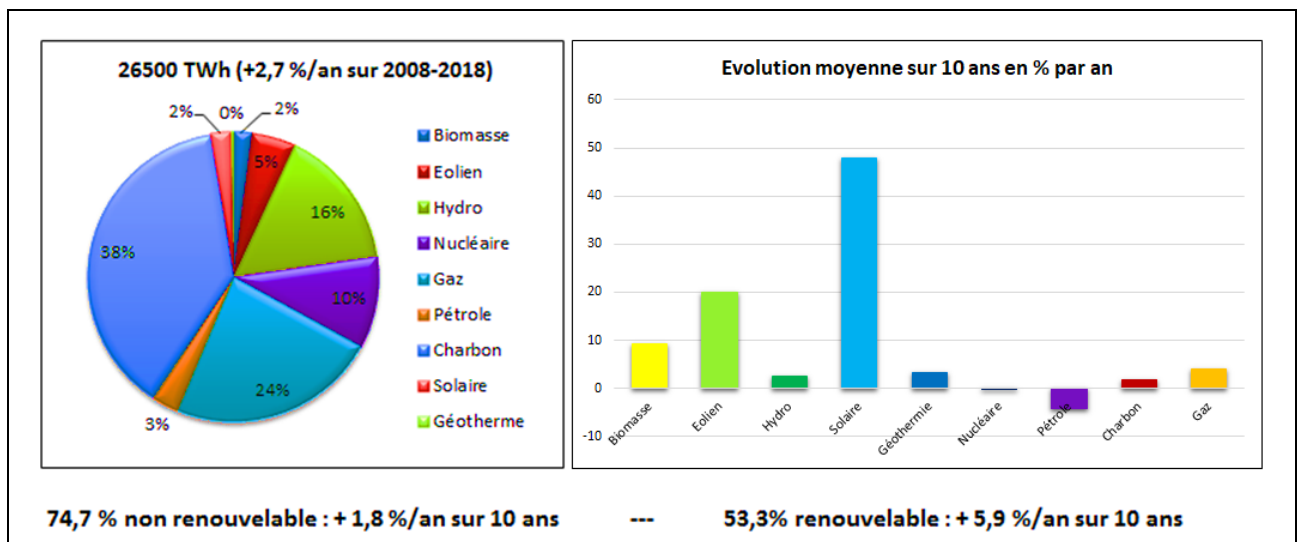


Figure I.1 : La production mondiale de l'électricité.

I.5 Microcentrale hydroélectrique

Les microcentrales hydrauliques (MHPP), de par leur faible puissance, leur localisation au fil de l'eau, leur mode d'exploitation décentralisé, leur connexion au réseau BT ou MT, présentent des différences notables par rapport aux grandes installations. Bien souvent, elles ont été implantées, leur grand nombre les classe parmi les sources d'énergie dispersées dont la problématique de gestion constitue un sujet d'actualité important [9].

I.5.1 Définition d'une microcentrale hydraulique

Une microcentrale hydraulique se définit comme une installation de production énergétique, d'une puissance de moins de 10 MW.

Celles-ci peuvent être classées aussi en trois catégories distinctes selon la hauteur de la chute d'eau :

- Centrales à haute chute : 120 m et plus,
- Centrales à moyenne chute : 30 à 120 m,
- Centrales à basse chutes : 2 à 30 m [9].

La production d'énergie par une centrale hydraulique qu'elle soit grande ou petite est en fonction du débit de l'eau et de la hauteur de chute (différence de pression) à disposition.

Les débits des microcentrales peuvent représenter quelques litres ou plusieurs mètres cubes à la seconde. A partir de deux mètres, une chute avec un débit suffisant est considérée comme exploitable. Par ailleurs, des hauteurs de 500 mètres (pression 50bars) ou plus peuvent produire une quantité intéressante d'énergie, même si le débit est faible (5 l/sec).

I.6 Application

L'importance des microcentrales apparaît donc surtout au niveau régional: pour de nombreuses communes, fabriques ou moulins, elles constituent une source d'énergie d'appoint avantageuse, elles peuvent être intégrées dans des projets à usages multiples et en améliorer la couverture des frais par la production d'énergie. Leur construction, rénovation et entretien représentent un potentiel de travail pour les entreprises locales, elles augmentent la sécurité d'approvisionnement de certaines entreprises comme les moulins à farine qui peuvent ainsi fonctionner même en cas de panne de réseau, elles constituent une alternative avantageuse à de longues lignes électriques pour alimenter des habitations, fermes, hôtels ou cabanes isolées en région de montagne; elles tirent parti du potentiel de force hydraulique sans nuire à l'environnement de par leur petite taille et leur simplicité, elles ont une fonction didactique puisqu'elles permettent à nombre de visiteurs de prendre conscience des problèmes pratiques de la production d'énergie [11].

I.7 Classification

La classification s'effectue en fonction de la manière dont l'eau est captée et conduite à la turbine, de l'emplacement de cette dernière et de la hauteur de chute ou dénivellation exploitée. On distingue deux classes principales de petites centrales :

1.7.1. Installations à basse pression

Le long d'un cours d'eau ou sur un canal de dérivation. L'ouvrage le plus important est le barrage, ou prise d'eau, le plus souvent construit en béton. Sa fonction est de détourner le débit nécessaire directement vers la turbine ou dans un canal de dérivation tout en laissant passer les crues. La centrale est soit intégrée directement dans le barrage, soit placée à l'extrémité d'un canal.

Il n'y a en règle générale pas de conduite forcée, ou celle-ci reste très courte. Les chutes se situent entre 2 et 20 mètres et la pression dans la turbine est faible (0,2 à 2 bars).

1.7.2. Installations à moyenne et haute pression

Sur des cours d'eau, des sources de montagne, des réseaux d'eau potable et dans des circuits hydrauliques industriels. Aux composants mentionnés pour la première catégorie s'ajoute une conduite forcée entre la prise d'eau, ou l'extrémité du canal de dérivation, et la centrale. La conduite est l'ouvrage le plus important de ce type de petite centrale.

Dans leur principe, les petites centrales se distinguent peu des grandes installations. La différence se situe avant tout au niveau de la simplicité de conception et d'exploitation. En effet, les petites centrales doivent non seulement être peu coûteuses à la construction, mais doivent aussi pouvoir fonctionner automatiquement sans personnel permanent et avec un minimum de surveillance et d'entretien. En règle générale elles sont exploitées au fil de l'eau, sans réservoir d'accumulation, éléments trop coûteux pour de petites installations [11].

➤ Les turbines

Le passage de puissance hydraulique en puissance mécanique se fait grâce à une turbine qui est mise en rotation par le flux de l'eau de manière à faire tourner un alternateur. Le choix du type de turbine se fait en fonction du débit nominal Q_n et de la chute nette H_n . De plus, pour les petites centrales possédant un débit suffisamment constant tout au long de l'année, il est également possible d'utiliser des pompes travaillant en régime inversé. Il existe de nombreux types de turbines s'adaptant aux différentes contraintes imposées par chaque site, on peut les classer en deux groupes [12].

❖ Turbines à action

Une turbine est dite à action si la pression du fluide à la sortie du distributeur P_e (soit la pression à l'entrée de la roue) et la pression à la sortie de la roue P_c sont identiques : $P_e = P_c =$ pression atmosphérique. Exemple : pelton

✓ Turbine Pelton

La turbine Pelton est une turbine à action dont la pression de l'eau est entièrement convertie en énergie cinétique avant d'entrer en contact avec la roue et de lui transmettre son énergie, elle est utilisée pour des hautes chutes, de 60 m jusqu'à plus de 1000 m. Elle est constituée d'une roue à augets sur lesquels un ou plusieurs injecteurs acheminent l'eau. Chaque injecteur est constitué d'une tuyère permettant de former un jet d'eau à haute vitesse, et d'un pointeau mobile permettant de contrôler le débit. Le réglage des pointeaux se fait par un asservissement hydraulique ou électrique. Pour les installations d'eau potable on préférera un asservissement électrique. La figure I.2

représente une turbine Pelton [12].

I.8 Les équipements d'une microcentrale hydroélectrique

I.8.1. Les équipements électromécaniques



Figure I.2 : Turbine Pelton [13]

❖ Turbine à réaction

L'énergie potentielle est convertie en partie dans le distributeur et en partie dans le rotor. Dans le rotor, une différence de pression existe entre l'entrée et la sortie. L'écoulement est dévié et accéléré dans le rotor [14].

✓ Turbine Francis

La turbine Francis est constituée d'une roue, d'un rotor, d'un tuyau d'admission et d'un châssis et d'éléments d'admission d'eau ayant, en général, une forme de spirale. La roue assure la fourniture en eau et un débit suffisant. Dans le rotor, l'énergie de l'eau est convertie en énergie mécanique. L'écoulement peut passer d'une direction radiale à une direction axiale à la sortie de l'eau. La forme du rotor et de ses pales dépend de la hauteur de chute. Les turbines Francis à axe vertical installées dans des chambres ouvertes sont les plus communes, particulièrement pour les PCH jusqu'à 5 MW. Les turbines à axe vertical, dans des châssis à spirales, comprenant des turbines à rotors multiples, sont également utilisées. Leur champ d'application habituel est de 25 à environ 350 m de chute. la figure I.3 montre une turbine Francis [9].



Figure I.3 : turbine Francis[13]

✓ *Turbines hélice (Kaplan)*

Les turbines hélice (Kaplan) sont les plus appropriées pour le turbinage des faibles chutes. Elles se particularisent par leur roue qui est similaire à une hélice de bateau, et dont les pales sont fixes (turbine hélice) ou réglables en marche (turbine Kaplan).

Les possibilités de réglage de ces machines sont :

- Turbine hélice à pales et distributeur fixe.
- Turbine hélice à pales variable et distributeur fixe.
- Turbine Kaplan à pales variables et distributeur fixe.
- Turbine Kaplan à pales et distributeur réglables [9].



Figure I.4 : turbine kaplan[13]

I.8.2. Équipements électrique

I.8.2.1. La génératrice

Un générateur électromécanique convertit l'énergie mécanique qu'il reçoit à son arbre (turbine) en énergie électrique distribuée au consommateur. Le consommateur peut être le réseau interconnecté qui fixe la tension et la fréquence (mode connecté) ou un réseau isolé auquel le producteur doit garantir une tension ainsi qu'une fréquence qui doit être toutes les deux fixes et stables dans une fourchette admissible pour les appareils du consommateur (mode isolé) [12].

Les génératrices utilisées dans les petites centrales hydroélectriques sont de deux grands types :

✓ *Le générateur synchrone*

Dans ces machines le rotor tourne à la même vitesse que la vitesse du champ tournant (vitesse de synchronisme) d'où l'appellation de machine synchrone, c'est des machines qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique (alternateurs) ou vice versa (moteurs synchrones) nécessitent une alimentation en courant continu de leur inducteur ou système d'excitation. La machine synchrone est très répandue en tant que génératrice d'électricité. La gamme de puissance de ces machines va d'une dizaine de KVA à plus d'un millier de MVA. La figure I.5 représente une machine synchrone [12].

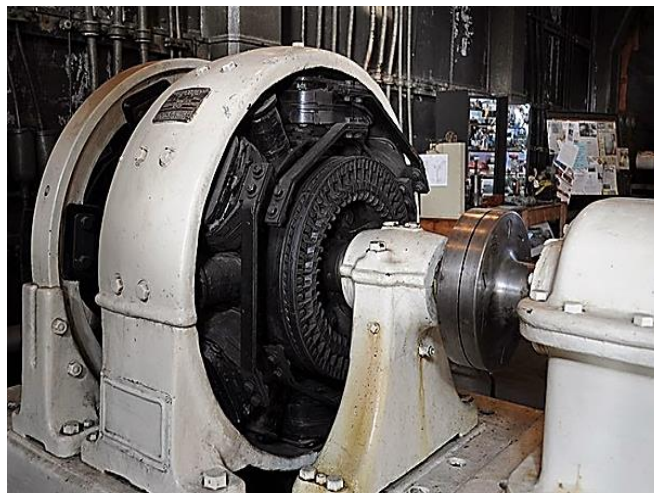


Figure I.5 : Génératrice synchrone et son multiplicateur [15]

✓ *Le générateur asynchrone*

La machine asynchrone, appelée aussi machine à induction, peut, comme toutes les machines électriques, fonctionner aussi bien en génératrice qu'en moteur. C'est toute fois le plus répandu des moteurs électriques, parce qu'il est simple, de construction robuste, et d'un prix de revient relativement modique. Ces avantages sont surtout dus au fait que le rotor n'est branché sur aucune source extérieure de tension, sauf utilisation particulière avec rotor bobiné. Il doit son nom de machine à induction au fait que le champ tournant du stator induit des courants alternatifs dans le circuit rotorique . La figure I.6 représente une machine asynchrone[9].



Figure I.6 : Génératrice asynchrone de 220 kW et son multiplicateur[16]

I.8.2.2. Le transformateur

Le transformateur est une machine statique qui permet de transformer une tension ou un courant d'une certaine fréquence en une autre tension ou un autre courant de même fréquence. Cette machine effectue un transfert d'énergie électrique par voie électromagnétique. Le transformateur comporte deux enroulements, l'un dit primaire qui reçoit la puissance active de la source, l'autre dit secondaire qui restitue à son tour cette même puissance.

Les enroulements sont montés sur un circuit magnétique feuilleté. Si la tension d'alimentation appliquée au primaire est plus basse que celle délivrée par le secondaire, le transformateur fonctionnera en élévateur, dans le cas contraire il fonctionnera en abaisseur. Dans les mini centrales la transmission de l'énergie produite nécessite l'installation d'un transformateur élévateur de tension on cas où celle-ci n'est pas proche d'une ligne basse tension, comme il peut être installé à l'entrée de la mini centrale en abaisseur de tension pour l'alimentation des équipements électrique utilisés dans celle-ci (pompes de refoulement d'eau). La figure I.7 représente un transformateur [13].



Figure I.7 : Transformateur de puissance de 120 MVA [17]

1.8.3. Les équipements civils

- **La centrale** : elle abrite la turbine et l'installation de production du courant.
- **Le barrage ou déversoir** : alimente en eau le canal de dérivation et coupe le cours d'eau entièrement ou en partie.

Les barrages sont en général peu importants et peuvent eux aussi bénéficier d'une architecture adaptée au milieu naturel avec par exemple la conception de passage à poissons.

- **Le canal de dérivation** : il amène le débit turbinable jusqu'à la centrale et le restitue au cours d'eau.

L'équipement d'une micro centrale, robuste et fiable, nécessite un entretien très simple et les frais de fonctionnement sont par conséquent réduits [13].

I.9 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) suscite un intérêt particulier, surtout en tant que génératrice dans le domaine de l'énergie hydraulique. Pour ce faire, la structure de cette machine, les différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisés sont étudiées [18].

Les hydrauliques utilisant la MADA, ont le stator directement couplé au réseau alors que le rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques Figure I.8.

Ce type de machine asynchrone s'est développé, car la double alimentation permet une meilleure exploitation du potentiel de l'hydraulique Avec un onduleur de taille réduite et une commande appropriée, on obtient une qualité de tension similaire à celle de la machine asynchrone classique [19].

1.9.1. Structure de la MADA

Cette machine possède un stator identique à celui d'une machine asynchrone classique. La différence réside dans le rotor qui est composé d'enroulements triphasés disposés, de la même manière que les enroulements statoriques, et connectés en étoile. Leurs extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des ballais, ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques (Figure I.8). La structure de cette machine, permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone [20].

La différence réside dans le fait, que le rotor, n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent, est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif.

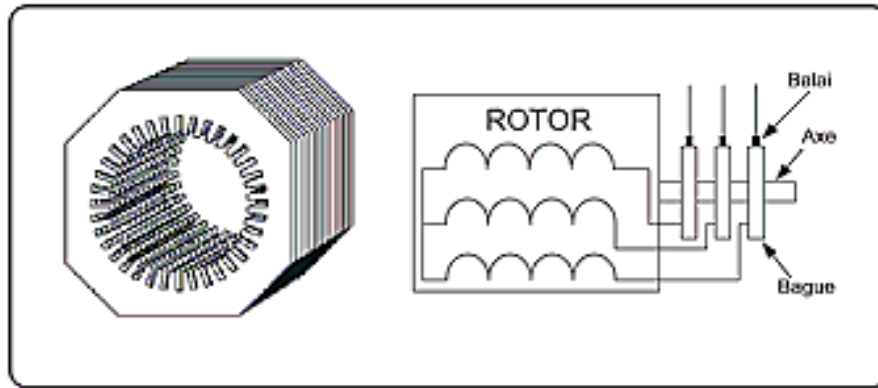


Figure I.8 : Structure du rotor de la MADA

I.9.2. Modes de fonctionnement

En fonctionnement, le stator de la MADA est connecté directement au réseau et son rotor est alimenté par un convertisseur de puissance. Son fonctionnement est basé sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. Sa puissance rotorique, au lieu d'être dépensée en pertes Joules, est récupérée et injecter dans le réseau. La difficulté est, que la fréquence des courants rotoriques est égale à g fois la fréquence du réseau. Durant des années, cette difficulté était surmontée grâce à un regroupement de machines [11]. Avec l'apparition des semi-conducteurs, une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et d'un onduleur permet le passage de la puissance de glissement vers le réseau [21].

La MADA peut fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec la machine asynchrone réside, dans le fait, que ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur [20]. Les différents modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci- dessous Figure.I.9 :

➤ Moteur en hypo synchronisme

L'énergie absorbée du réseau est transformée partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est injectée au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

➤ Moteur en hyper synchronisme

La puissance statorique est fournie par le réseau, ainsi que la puissance de glissement. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique [22].

➤ Génératrice en hypo synchronisme

L'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la machine, qui la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. Afin de permettre un fonctionnement hypo synchrone, l'énergie de glissement,

provenant du réseau, se doit d'être transmise au rotor. Ainsi pour le fonctionnement générateur hypo synchrone, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation [22].

➤ **Génératrice en hyper synchronisme**

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $(g.P_{méc})$ est transmise par l'intermédiaire du rotor

Les quadrants 3 et 4 sont intéressants pour une utilisation dans un système éolien. Lorsque la MADA fonctionne en génératrice, la turbine fournit une puissance mécanique P_m à la machine [22].

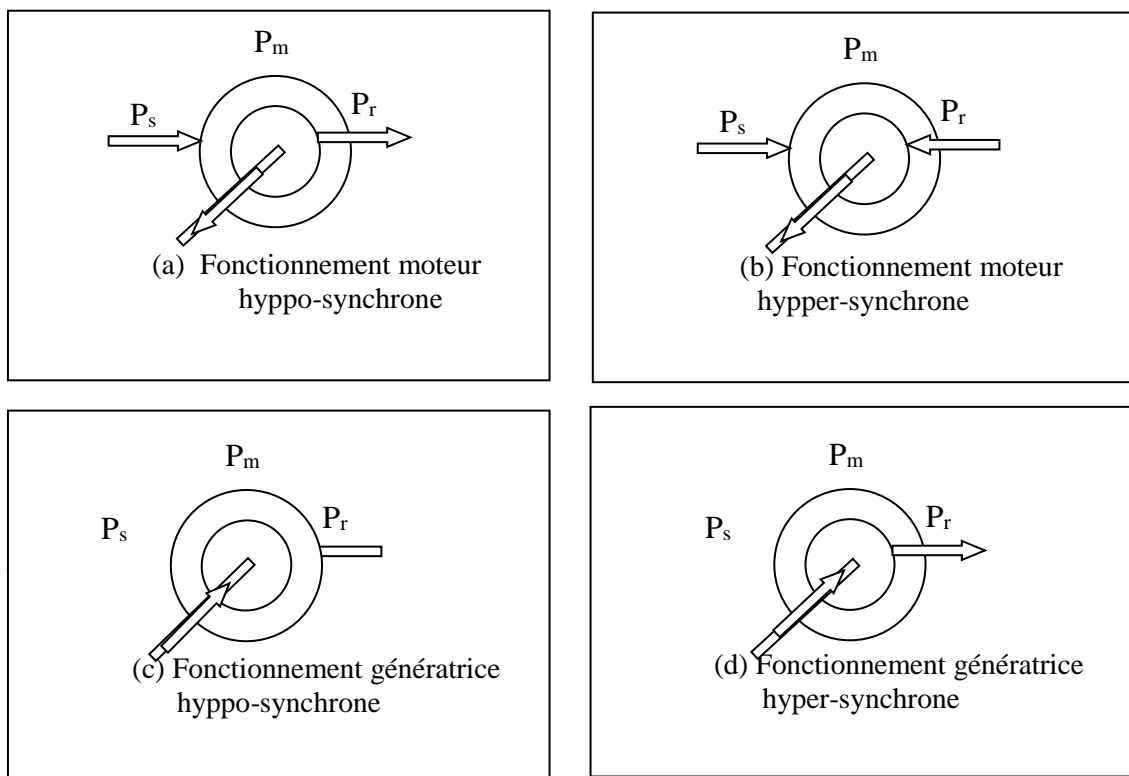


Figure I.9 : les différentes modes de fonctionnement de la GADA

I.9.3. Principe de fonctionnement de la GADA

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 $\omega_s = 2\pi f_s$ et que le rotor tourne à la 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 :

Où : $\omega_g = \omega_{s-} \omega_r = \omega_{s-} \omega_s = (1 - g) = \omega_s g$

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 $\omega_g = 2\pi f_r$, c'est-à-dire :

$$f = g f_s [23].$$

1.9.4. Avantages et inconvénients de la GADA

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

1.9.4.1. Avantages de la GADA

Comme avantages de la GADA, on peut citer :

L'utilisation d'une GADA 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.

- 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 GADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée. [24]
- 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 [25].
- 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.

- 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.
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.
- 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 [26].

I.9.4.2. Inconvénients de la GADA

Tout d'abord, la GADA 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 [27].
- 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 [28].

I.10 Principe de fonctionnement d'une microcentrale hydraulique

On peut expliquer le principe de fonctionnement d'une micro-centrale hydraulique en se basant sur un principe fondamental qui dit que tout corps soumis à la gravité terrestre, en tombant fournit de l'énergie ; il en est ainsi pour les chutes d'eau. Ainsi, quelque soit sa destination, de l'eau qui coule est une source potentielle d'énergie. Ce principe s'applique surtout aux canalisations des zones montagneuses. Dans lesquels la dénivellation entre l'amont et l'aval est importante. Cette différence d'altitude génère une pression souvent trop élevée pour être supportée par les

canalisations ; il est alors nécessaire de la dissiper, du moins partiellement, pour assurer la pérennité des réseaux. La méthode traditionnelle consiste à installer des réducteurs de pression sur les réseaux. Or une pression est une énergie potentielle. Plutôt que de la dissiper à l'aide de ces réducteurs de pression et donc de perdre cette énergie, il est possible de la transformer en électricité par l'intégration de turbines hydrauliques sur le réseau d'eau [15].

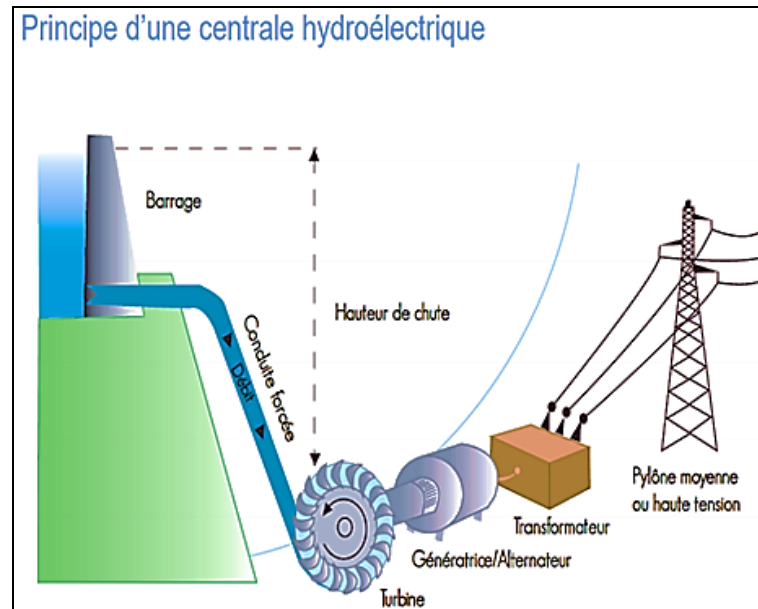


Figure I.10 : Principe d'une centrale hydraulique [15]

I.11 Modes de fonctionnement

a) Fonctionnement en réseau interconnecté (Parallèle)

On entend par réseau interconnecté, le réseau principal où la tension U et la fréquence f sont rigides, c'est-à-dire que leur valeur ne varie pratiquement pas en fonction de la charge. Dans ce mode de fonctionnement, les paramètres à régler sont les puissances actives et réactives puis le $\cos \varphi$. Dans ce mode de fonctionnement on peut trouver des générateurs synchrones et asynchrones [15].

b) Fonctionnement en réseau isolé

On appelle réseau isolé le cas d'une station de production qui fournit de l'énergie électrique à un ou plusieurs consommateurs la centrale peut comporter plusieurs générateurs. Dans le cas d'un réseau isolé, les tensions et fréquences délivrées varient en fonction de la charge. Dans ce cas de fonctionnement il est à préciser que les machines asynchrones ne sont pas utilisées. En effet, la régulation est beaucoup plus difficile et plus coûteuse car elle demande une électronique de puissance sophistiquée [15].

I.12 Système de stockage de l'énergie électrique

Les différentes technologies de stockage, répondant aux critères techniques et économiques varient considérablement selon la nature des applications et des besoins [29]. Les critères de choix d'une technologie de stockage dépendent du besoin, associé à un cahier des charges, des contraintes de réglementation, du coût et d'environnement [30].

La sélection d'un système de stockage, sur un site donné, dépend de [31] :

La quantité et la nature de l'énergie disponible ;

- Des puissances disponibles ;
- La densité de stockage en énergie et en puissance, qui conditionne le volume et le poids du système ;
- Du coût et de la maintenance, qui sont liés à la maturité de la technologie ;
- Du nombre de cycles et de la profondeur de la décharge ;
- De la sécurité

En général, le stockage de l'énergie électrique, issue de la conversion hydraulique, peut se faire par sa transformation en une autre forme d'énergie stockable. Les possibilités techniques sont très vastes et concernent pratiquement toutes formes d'énergie : mécanique, chimique ou thermique. Parmi les systèmes de stockage d'énergie, actuellement disponibles : le stockage hydraulique, les batteries, les super-condensateurs.

I.12.1. Synthèse sur les différentes techniques de stockage

De nombreux moyens de stockage de l'énergie électrique existent avec des puissances allant jusqu'à quelques gigawatts. Chacun possède ses caractéristiques et ses contraintes [32].

Pour les installations hydrauliques de grande puissance, permettant de répondre aux pics de Consommation sur le réseau de distribution d'électricité, les systèmes de stockage d'énergie Les plus performants sont : les super-condensateurs et les accumulateurs électrochimiques.

I.12.2. Système de stockage électrostatique (super-condensateurs)

Le super-condensateur est un système de stockage de l'énergie sous une forme électrostatique. Il est constitué de deux électrodes poreuses, généralement en carbone activé, plongées dans un électrolyte liquide et scindées par un séparateur. Celui-ci laisse circuler uniquement les ions et pas les électrons [32]. Son principe est semblable à celui du condensateur, mais dont le film diélectrique est remplacé par un électrolyte conducteur ionique. Le déplacement des ions, positifs ou négatifs, dans l'électrolyte sous l'effet d'un champ électrique appliqué entre les électrodes, permet de former à la frontière une accumulation de charges électriques, appelée double

couche [33]. Théoriquement, les ions restent confinés dans l'électrolyte et n'interviennent pas dans la réaction électrochimique à l'interface avec les électrodes, contrairement à un accumulateur électrochimique [34]. Il en résulte une longévité et des cycles beaucoup plus importants. La Figure I.11, illustre la formation de la double couche à l'interface électrode-électrolyte pour les états déchargé et chargé du super-condensateur. Toute fois, ce type de stockage est destiné à des applications à petite échelle. Son utilisation, à moyenne ou grande échelle, nécessite un branchement en série de plusieurs éléments pour obtenir la tension demandée [35]. Cela pourrait générer un risque de déséquilibre lors de la mise en série. Néanmoins, son coût unitaire est assez élevé, avec une faible densité énergétique et une autodécharge élevée (5% par jour). Toutes ces raisons réduisent la possibilité d'adopter des super-condensateurs dans des applications stationnaires [29].

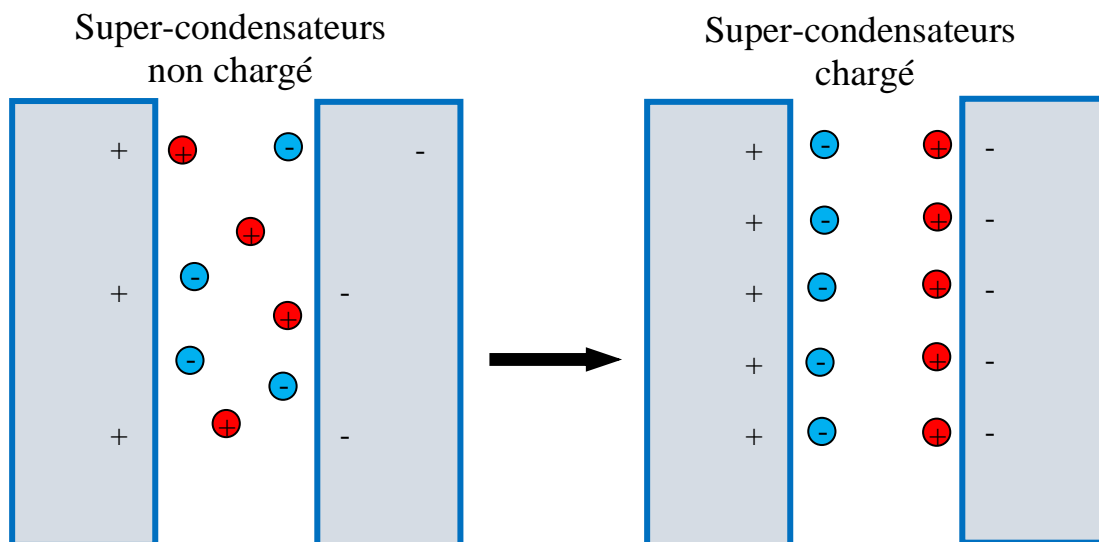


Figure I. 12 : Schéma de principe du super-condensateur déchargé et chargé .

I.12.1.1. Accumulateurs électrochimiques

Les batteries ou accumulateurs électrochimiques sont des dispositifs électrochimiques, qui convertissent l'énergie électrique en énergie chimique pendant le chargement et l'énergie chimique en énergie électrique au cours du déchargement. C'est la modification chimique de l'électrolyte qui permet d'accumuler ou de restituer cette énergie. Une batterie est composée par l'assemblage de plusieurs éléments ou cellules unitaires. Une cellule est composée de trois éléments : une électrode positive, une électrode négative et un électrolyte [35].

Bien qu'il existe de nombreux types d'accumulateurs :

- L'accumulateur au plomb

- L'accumulateur Nickel-Cadmium
- L'accumulateur nickel-hydrure métalliques
- L'accumulateur Lithium-Ion (Li-ion)

I.13 Les avantages de la microcentrale hydroélectrique

Loin des grands barrages hydroélectriques, le petit hydraulique fait appel à des installations de petites tailles, le plus souvent en cascade. Un dimensionnement idéal pour une mise en régie locale de cette source d'énergie renouvelable

- Les principaux avantages énergétiques et environnementaux de cette énergie sont les suivants :
- C'est une ressource renouvelable. En effet, l'eau utilisée est toujours intégralement restituée.
- C'est une ressource locale, et donc stratégique pour les questions d'indépendance énergétique.
- Elle n'est généralement pas émettrice de gaz à effet de serre (GES) durant sa phase d'exploitation. C'est toujours vrai pour les ouvrages "au fil de l'eau" (sans stockage), sur lesquelles se porte un intérêt particulier.
- Elle n'est pas intermittente à court terme, contrairement à l'énergie solaire et à l'énergie éolienne. La production hydraulique varie bien entendu suivant des cycles saisonniers, les cours d'eau pouvant être diminués l'été ou au contraire renforcés par la fonte de glaciers.
- Le matériel ou les équipements sont robustes et ont fait leurs preuves avec une exploitation simple et une durée de vie longue [9].

I.14 Les inconvénients de la micro-centrale hydraulique

Les micros centrales hydrauliques, si elles sont mal intégrées dans leur environnement, peuvent également présenter des impacts négatifs sur l'environnement pouvant générer des perturbations de diverses natures :

- Atteinte au paysage par l'aspect peu esthétique de la centrale, de la prise d'eau et de la conduite forcée ;
- Bruit généré par les turbines, le multiplicateur de vitesse de l'alternateur, le transformateur et l'écoulement de l'eau, pouvant provoquer une gêne pour le voisinage proche
- Prise d'eau pouvant entraîner une perturbation du régime de l'eau et de la relation nappes aquifères - rivières ;
- Installation pouvant constituer un obstacle à la migration des poissons [13].

I.15 Conclusion

Ce premier chapitre est l'illustration au mieux du développement technologique des centrales hydrauliques avec la spécification des petites centrales hydroélectriques en exposant les éléments du système de production de ce type d'énergie ainsi que les différents types des turbines avec leurs principes et leurs modes de fonctionnement adopter,

L'objectif de ce chapitre est de présenter les aspects environnementaux et technologiques caractérisant les énergies renouvelables et de poser la problématique du présent travail. Il consiste à étudier un système de conversion de l'énergie hydraulique, L'utilité des énergies renouvelables, pour un meilleur environnement et une réduction des gaz à effet de serre est établie. Les différents potentiels de l'énergie renouvelable, et de l'énergie hydraulique en particulier, Un intérêt particulier, est consacré à la technologie de conversion basée sur la MADA. Cette technologie permet de réduire le dimensionnement des convertisseurs statiques à 30 % en véhiculant seulement la puissance de glissement. Elle permet aussi le réglage de la puissance réactive.

Le chapitre suivant, aborde l'étude du modèle pour chacun des éléments.de la chaine de conversion.

CHAPITRE II

Modélisation de la chaîne de conversion hydroélectrique

II.1 Introduction

La modélisation nécessite une parfaite connaissance de la structure électromécanique (machine électrique), de la structure électrique (alimentation électrique) et de la structure mécanique (masse tournante, couple résistant, frottement visqueux). En effet, le modèle de la modélisation est très important pour la conception et l'analyse de ses performances statiques et dynamiques.

Le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation est généralement traité par la méthode des deux axes qui utilise la théorie de l'espace vectoriel pour le passage d'un système triphasé réel à un système diphasé fictif. Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices (à définir et à respecter) peuvent être adoptées dans l'élaboration des modèles mathématiques, permettant d'une part une mise en équations particulièrement simples et d'autre part de pousser assez loin, parfois jusqu'à son terme, la résolution de certains problèmes par voie purement analytique. L'étude du système d'entraînement complet est nécessaire, où la GADA est associée à deux convertisseurs. À travers ces convertisseurs, s'opère le transfert d'énergie entre une source alternative et la GADA, d'où l'importance de l'étude de l'association convertisseur- machine.

Les onduleurs de tension triphasée constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Ils sont présents dans les domaines d'application les plus variés, les plus connus dans l'industrie et sans doute celui des entraînements électriques à vitesse variable. Les convertisseurs statiques utilisent actuellement des composants à semi-conducteurs travaillant à des fréquences de commutation élevées avec des pertes par commutation très faibles vis-à-vis des puissances mises en jeu dans les systèmes à commander. Il existe plusieurs structures d'onduleurs, où chacune d'elles correspond à un type d'application déterminée. Pour de faibles et moyennes puissances, on utilise des onduleurs à deux niveaux. Pour des applications de fortes puissances et/ou haute tension, on utilise des onduleurs multi niveaux.

Ces nouvelles structures permettent d'avoir des tensions de sorties plus élevées et avec un meilleur taux de distorsion harmoniques

La commande d'un processus physique ne peut être correctement effectuée sans sa représentation mathématique. Celle-ci est une étape très importante dans l'asservissement des systèmes. En effet, afin de concevoir une structure de commande, il est nécessaire de disposer d'un modèle mathématique représentant fidèlement les caractéristiques du processus. Ce modèle ne doit pas être trop simple pour ne pas s'éloigner de la réalité physique, et ne doit pas être trop complexe pour simplifier l'analyse et la synthèse des structures de commande. Sachant qu'une bonne commande doit faire face à la possibilité de changement du processus, on peut réaliser le modèle

dynamique de la machine à partir d'une bonne approximation du processus réel. Pour les machines électriques [36]

II.2 Différentes topologies des chaînes de conversion d'énergie

Une classification des topologies de puissance représentatives pour le système de production d'électricité micro-hydroélectricité à vitesse variable (SPEMH) est présentée à la figure I.1.

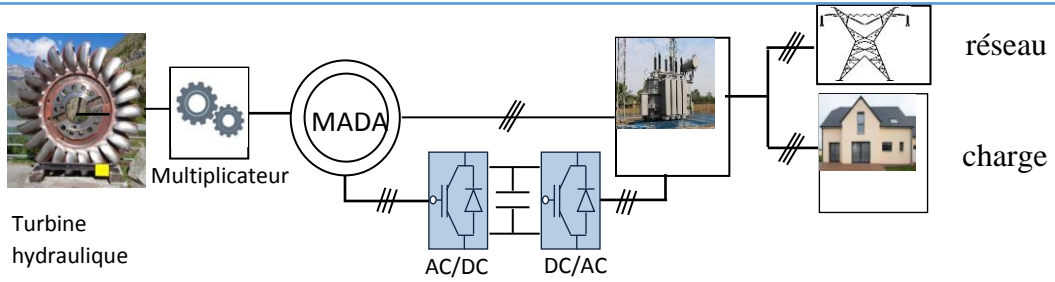
Les topologies sont différentes de trois aspects, à savoir les générateurs utilisés, le système de couplage mécanique, et la connexion électronique de puissance.

Les unités de génération peuvent être équipées soit d'un générateur d'induction doublement alimenté (GADA) ou d'un générateur synchrone à aimant permanent (GSAP), le (GSAP) peut être remplacé par un générateur synchrone d'excitation électrique (GSEE).

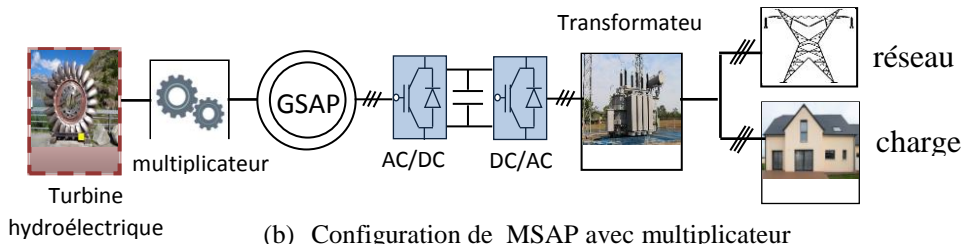
En ce qui concerne la connexion mécanique, une boîte de vitesses est essentiellement nécessaire pour GADA. Le système équipé d'une boîte de vitesses et d'un système d'entraînement direct ont été utilisés dans le GSAP.

En outre, la connexion PE a de grandes différences pour diverses topologies GADA a une connexion directe entre stator et le réseau et un convertisseur de source de tension (CST) est connecté au rotor et stator. Cet onduleur ne transporte qu'une fraction de la puissance à grande échelle en sacrifiant la capacité de contrôle. MSAP a des unités PE connectées au stator et au réseau, le convertisseur découple le générateur du réseau Un convertisseur d'excitation est nécessaire pour (GSEE) [37]

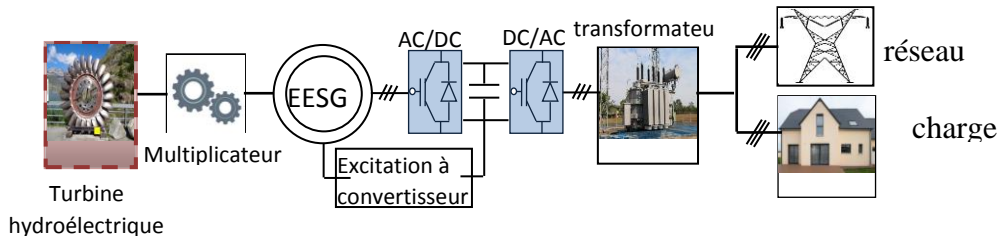
En termes de coûts et d'entretiens, d'importants entretiens pour GADA sont nécessaires pour sa boîte de vitesses et les anneaux de glissement, mais les coûts du générateur d'induction sont normalement moins chers que GSAP, en particulier pour la grande capacité. En outre, les systèmes d'entraînement direct sont maintenant largement utilisés, comme un GSAP à entraînement direct sans boîte de vitesses nécessite moins d'entretien. Alors que la faible vitesse de rotation conduit à plus de paires de pôles de générateur de conception, résultant en un plus grand volume de générateur et un coût plus élevé [38].



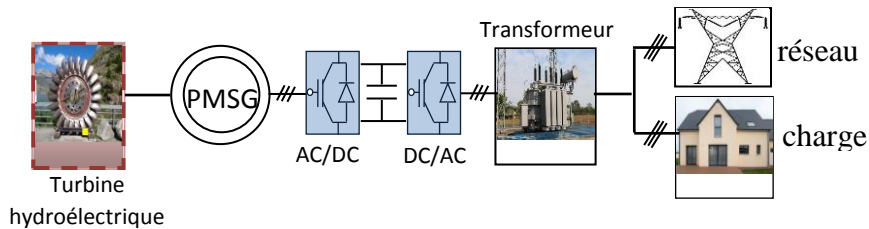
(a) configuration de la GADA



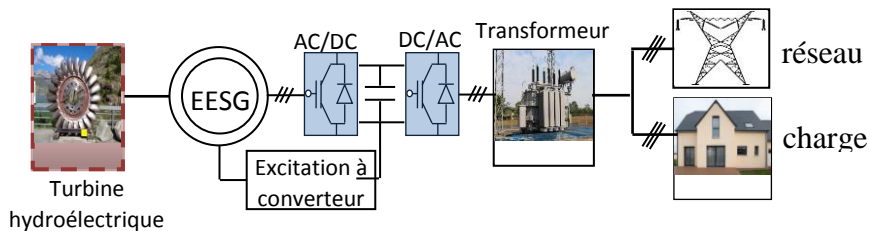
(b) Configuration de MSAP avec multiplicateur



(c) Configuration de EESG avec multiplicateur



(d) Configuration de PMSG connecté directe



(e) Configuration de EESG connecté direct

Figure II.1 : Configurations existantes pour la vitesse variable de MHPP

II.3 Configuration du système de l'usine hydroélectrique proposée

Le système hydraulique à vitesse variable étudié dans ce mémoire, basé sur une GADA, La turbine, via un multiplicateur, entraîne la GADA, laquelle est directement raccordée au réseau électrique à travers des convertisseurs statiques triphasés à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) par le rotor.

Celui-ci est muni de systèmes bague/balais. Ces Convertisseurs Côtés GADA et Réseau, notés respectivement CCM et CCR [7].

II.4 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, des conditions de fonctionnement et en particulier sa vitesse de rotation. 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 par [39] :

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

S = Surface balayée par la turbine en m².

ρ = Masse volumique de l'eau en Kg/m³.

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

C_p = Coefficient de puissance (sans dimension).

λ = vitesse spécifique

$$\lambda = \frac{R \Omega}{V_{eau}} \quad (\text{II.2})$$

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

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

La puissance mécanique P_{mec} à la sortie de la turbine hydraulique est obtenue à partir de la puissance hydraulique P_{hyd} et de son rendement η_t .

L'expression de la puissance mécanique est donnée par :

$$P_{mec} = \eta P_{hyd} = C_{turbine} \Omega_{arbre} \quad (\text{II.3})$$

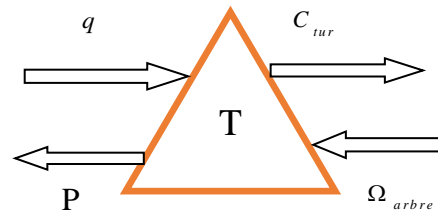


Figure II.2 : représentation électromécanique de la turbine hydroélectrique[40]

La puissance absorbée par la turbine hydraulique dépend de la tête d'eau nette et de son débit :

$$p_h = \rho \alpha H Q \omega \quad (\text{II.4})$$

L'efficacité de la turbine hydraulique est définie comme le rapport de puissance mécanique transmis par l'arbre à l'énergie hydraulique absorbée, ce qui affecte fortement la puissance mécanique de sortie nette :

$$p_m = \eta \rho a H Q \omega \quad (\text{II.5})$$

ρ [kg / m^3] : est la densité de volume de l'eau,

a : est l'accélération due à la gravité [m / s^2].

Le couple mécanique pourrait être donné par :

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} \quad (\text{II.6})$$

Où :

ω [rad / s] : représente la vitesse de rotation de la turbine.

Selon les équations du modèle de turbine, le tracé de ses caractéristiques est représenté par la figure II.3. Ce tracé est une fonction de plusieurs valeurs de la puissance mécanique de la turbine et de sa vitesse.

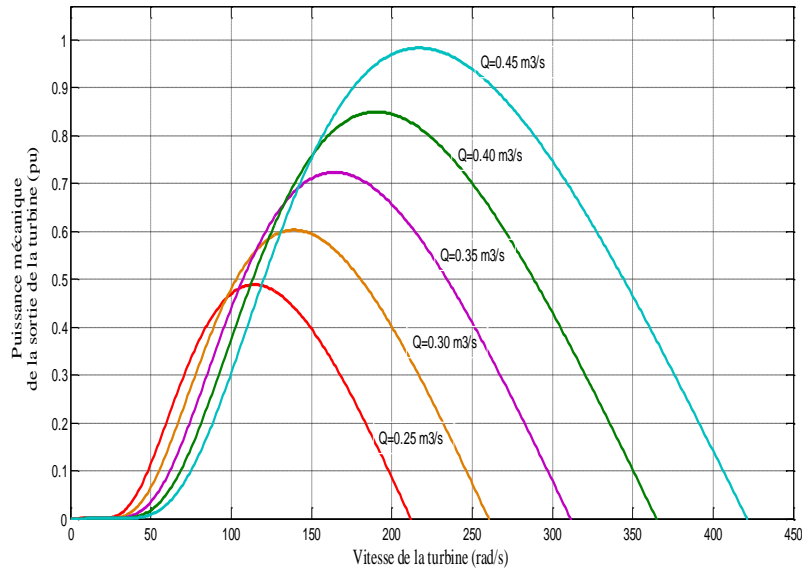


Figure II.3 : Les caractéristiques de la turbine hydroélectrique.

II.5 Modélisation du multiplicateur (partie mécanique)

La turbine de la centrale hydroélectrique est considérée comme identique, elle est fixée sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation ω , ce dernier est relié à un multiplicateur de gain G qui entraîne la génératrice électrique. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse de l'eau et donc une égalité de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser la turbine comme un système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques.

En outre la conception hydrodynamique de la turbine, le coefficient de frottement par rapport à l'eau est considéré très faible et peut être négligé. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement côté génératrice.

Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitué de deux masses comme l'illustre la Figure II.4 dont la validité, par rapport au modèle complet de la turbine, a déjà été vérifiée [41].

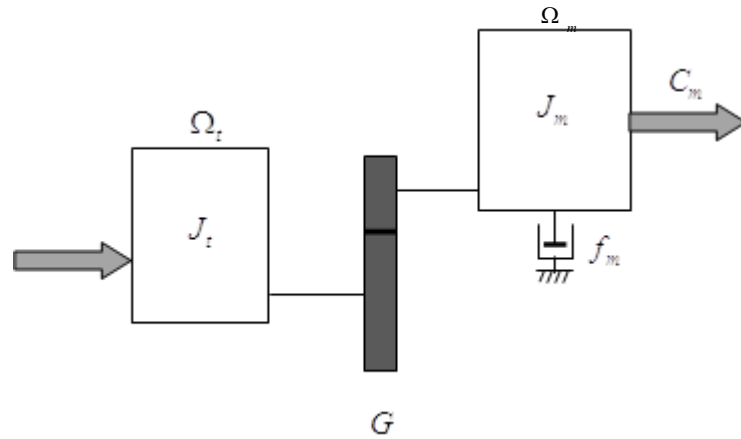


Figure II.4 : Modèle mécanique de la turbine hydraulique

avec :

J_t : Le moment d'inertie de la turbine hydraulique ;

J_m : Le moment d'inertie de la GADA ;

f_v : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la GADA ;

C_m : Le couple mécanique sur l'arbre de la GADA ;

ω_m : la vitesse de rotation de la GADA.

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la GADA (arbre rapide) Figure II.4. Considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par :

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.7})$$

$$\Omega_m = G \Omega_t \quad (\text{II.8})$$

D'après la Figure II.5, l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la GADA est donnée par :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_m \right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

C_{em} : le couple électromagnétique de la GADA.

Le problème entre la turbine et le générateur réside dans la différence des vitesses de rotation. La vitesse de la turbine est déterminée par le débit et la hauteur nette de la chute d'eau tandis que la vitesse de rotation du générateur est donnée par la machine. Notre but est donc de contrôler la vitesse de rotation transmise entre le générateur et de son multiplicateur de vitesse.

Les multiplicateurs de vitesse existants sur le marché offrent une grande variété d'options. Pour un projet de cette ampleur le choix optimal est le multiplicateur de vitesse par courroie plate

qui offre des rendements élevés à faible coût, peu de difficulté technique et une faible maintenance. Les autres options ne sont pas adéquates pour la transmission de puissance dans notre projet. Le multiplicateur à courroie plate est également l'option la plus économique. Cependant, pour la turbine vis hydrodynamique, il sera obligatoire de choisir un multiplicateur de vitesse à engrenages, dont le rendement est de 95%.

Le multiplicateur de vitesse utilisé sera finalement à courroie plate dans le cas de la turbine Banki car il répond au mieux aux exigences techniques et économiques de notre projet, et aux engrenages dans le cas de la vis hydrodynamique [40].

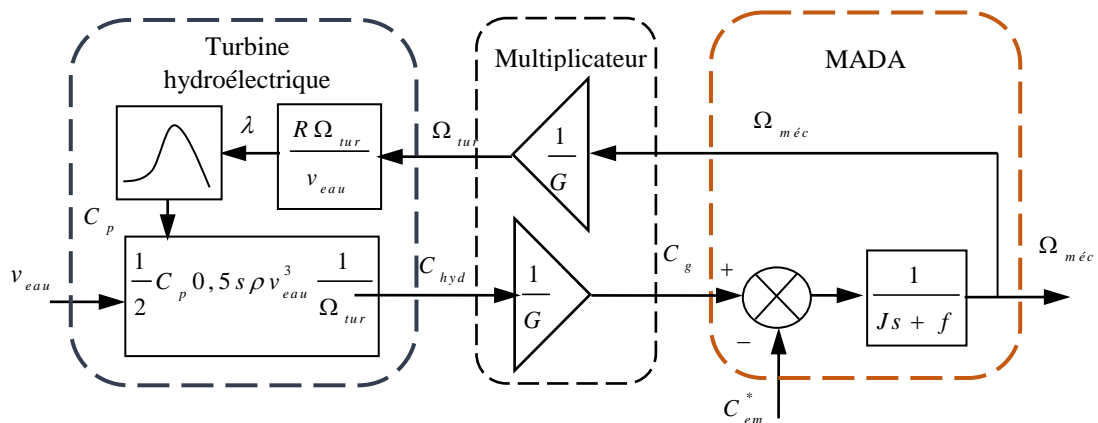


Figure II.5 Schéma bloc du modèle de la turbine hydraulique.

II.6 Modélisation de la GADA

La GADA avec les répartitions de ses enroulements et sa géométrie propre, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Il est alors nécessaire d'adopter les hypothèses simplificatrices suivantes afin de pouvoir élaborer un modèle simple :

- La machine est symétrique et à entrefer constant,
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté, il en résulte que les
- Pertes fer et par hystérésis sont négligeables et que seuls les enroulements sont parcourus par des courants.
- La f.m.m créée dans une phase au stator et au rotor, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.
- L'influence de l'effet de la température n'est pas prise en compte, il en résulte que tous les coefficients d'inductances propres sont constants et ceux d'inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétiques [42].

II.6.1 Modelé de la GADA dans le repère triphasé

La machine asynchrone à double alimentation peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor.

➤ **Equations générales de la GADA (électrique)**

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

$$[V_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d}{dt}[\psi_s] \tag{II.10}$$

$$[V_r] = [R_r] [i_r] + \frac{d}{dt}[\psi_r] \tag{II.11}$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}, [\psi_s] = \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix}, [\psi_r] = \begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix}, \tag{II.12}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \tag{II.13}$$

R_s, R_r : Résistances des enroulements statoriques et rotoriques.

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

$$[\psi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] [I_r] \tag{II.14}$$

$$[\psi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] [I_s] \tag{II.15}$$

Tel que :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}, [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} \tag{II.16}$$

Les inductances propres aux phases statoriques sont désignées par : L_{aa}, L_{bb} et L_{cc} .

Si on prend en considération l'induction de fuite des enroulements dans l'entrefer, l'inductance propre de chaque phase s'écrit comme suit :

$$L_{xx} = L_x + L_{fx} \tag{II.17}$$

Avec $x = a, b$ ou c .

Ou :

L_x : L'inductance magnétisante propre de chaque phase,

L_{fx} : L'inductance de fuite propre de chaque phase.

Puisque les enroulements statoriques sont semblables, ayant la même inductance

magnétisante et inductance de fuite, on définira par :

$$L_{xx} = M_s + L_{fs} \quad (\text{II.18})$$

M_s : L'inductance magnétisante de l'enroulement statorique,

L_{fs} : L'inductance de fuite de l'enroulement statorique.

➤ **Calcul des inductances du moteur**

Les phases statoriques sont séparées dans l'espace d'un angle de $2\pi/3$ et les inductances mutuelles sont calculées comme suit :

$$\begin{cases} L_{ab} = L_{ba} = M_s \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{M_s}{2} \\ L_{bc} = L_{cb} = M_s \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{M_s}{2} \\ L_{ca} = L_{ac} = M_s \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{M_s}{2} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Suivant le même procédé, pour calculer les inductances mutuelles entre les enroulements rotoriques, chaque inductance propre de ces derniers s'écrit comme suit:

$$\begin{cases} L_{AB} = L_{BA} = M_r \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{M_r}{2} \\ L_{BC} = L_{CB} = M_r \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{M_r}{2} \\ L_{CA} = L_{AC} = M_r \cos \frac{2\pi}{3} = -\frac{M_r}{2} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Alors le système (II.18) devient:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} M_s + L_{fs} & -\frac{M_s}{2} & -\frac{M_s}{2} \\ -\frac{M_s}{2} & M_s + L_{fs} & -\frac{M_s}{2} \\ -\frac{M_s}{2} & -\frac{M_s}{2} & M_s + L_{fs} \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} M_r + L_{fr} & -\frac{M_r}{2} & -\frac{M_r}{2} \\ -\frac{M_r}{2} & M_r + L_{fr} & -\frac{M_r}{2} \\ -\frac{M_r}{2} & -\frac{M_r}{2} & M_r + L_{fr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) s'écrit :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]' = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

M_{sr} : L'inductance mutuelle entre stator et rotor.

En remplaçant les relations (II.14) et (II.15) respectivement dans les relations (II.10) et

(II.11), on obtient les deux expressions suivantes :

$$\begin{cases} V_s = [R_s] \cdot [i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt}[i_s] + \frac{d}{dt}[M_{sr}] \cdot [I_r] \\ V_r = [R_r] \cdot [i_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt}[i_r] + \frac{d}{dt}[M_{sr}]^t \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

II.6.2 Modèle de la GADA dans le repère dq

Le modèle de la GADA décrit dans le référentiel (d,q) tournant à la vitesse du champ statorique est exprimé comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} - \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

L'expression de couple électromagnétique de MADA est donnée par la relation suivante :

$$T_{em} = p (\phi_{sd} i_{sq} - \phi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{II.26})$$

Les puissances active et réactive sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

II.7 Modélisation des convertisseurs statiques

La commande de la GADA nécessite un onduleur à MLI (CCM) qui règle l'amplitude et la fréquence des tensions envoyées à son rotor. Ce convertisseur a besoin à son tour d'une alimentation continue régulée obtenue grâce à un redresseur à MLI (CCR). Cette partie vise à modéliser ces deux convertisseurs [43].

II.7.1. Modélisation d'un redresseur Vienna (convertisseur côté rotor)

Basé sur la combinaison d'un pont de diodes triphasé et d'un hacheur élévateur, le redresseur triphasé trois niveaux à trois interrupteurs a été développé à l'université technique de Vienne en

1992, par professeur Johann W. Kolar et son équipe de la section d'électronique de puissance, d'où l'appellation "redresseur de Vienne"[44].

Le redresseur de Vienne est un redresseur CFP (correction du facteur de puissance) unidirectionnel avantageux avec moins de commutateurs de puissance actifs, un courant d'entrée sinusoïdal et une tension de liaison CC de sortie équilibrée, une faible tension sur les commutateurs, un fonctionnement de commutation élevé et un rendement élevé. Le redresseur de type boost est utilisé pour le vent, les micros turbines, la basse tension DC (LVDC), la distribution haute tension DC (HVDC) et le secteur AC à l'avant pour des tensions plus élevées de 400V-750V-1500V. Il se compose de 3 interrupteurs et de 18 diodes avec condensateur de liaison CC en sortie. Le courant traverse les trois MOSFET et les condensateurs dans le complètement chargé. Le courant de phase monte, à travers d'un MOSFET, pendant cette période d'impulsion, charge le condensateur [7].

Lorsque le MOSFET est éteint, le courant passe par la diode supérieure ou inférieure en fonction de la direction du courant. En ajustant la largeur de l'impulsion qui active les MOSFET, le courant de ligne correspondant est forcé à être sinusoïdal et en phase avec la tension. Lorsque les MOSFET sont activés, la phase correspondante est connectée à l'inductance de ligne, au point central entre les deux condensateurs de sortie.

La figure II.6 présente le schéma d'un redresseur triphasé de Vienna

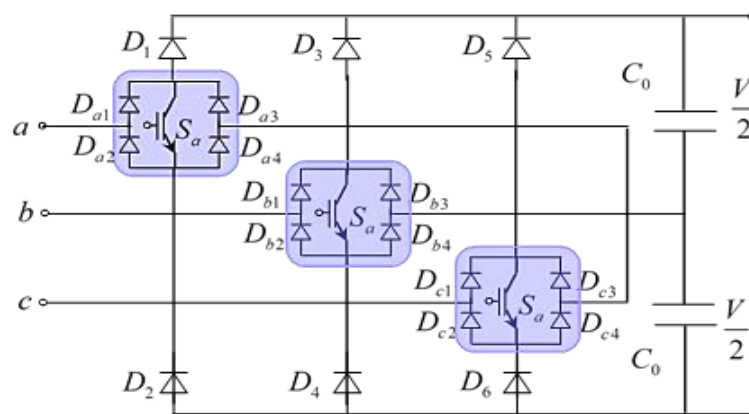


Figure II.6 : Topologie d'un redresseur triphasé de Vienna

Parmi toutes les topologies triphasées non-polluantes, le redresseur triphasé à trois niveaux (Vienne) se présente comme le principal concurrent du redresseur *MLI* à six interrupteurs présenté précédemment figure II.6 du point de vue rendement et coûts. Le redresseur de Vienne offre l'avantage de réduire le nombre d'interrupteurs actifs à la moitié, ce qui simplifie significativement la complexité de la commande. Il présente également des taux d'utilisation de diodes et des *IGBTs* plus élevés.

Sa structure à point milieu capacitif permet une nette diminution des pertes par commutation. De plus, le dimensionnement des éléments inductifs est réduit de moitié, ainsi offrant des économies supplémentaires dans les coûts de réalisation. D'un point de vue fonctionnel, les

performances en régime permanent sont très comparables pour les deux redresseurs, avec des efforts de mesure et complexité de commande moindre pour le redresseur de Vienne.

D'autre part, lors d'une évaluation objective dans la catégorie des topologies multinationnels unidirectionnels, du point de vue angle de contrôlabilité, ondulation de courant et de tension en mode commun, le redresseur de Vienne se présente comme le meilleur candidat rendement/prix pour les applications de correction du facteur de puissance.

La topologie de Vienne peut être intégrée dans plusieurs applications intéressantes, dont on cite les modules de télécommunications, les chargeurs de batteries, les moteurs intégrés (IM), les convertisseurs AC/DC/AC utilisés dans les alimentations sans interruption de puissance (UPS), les systèmes d'entraînements de faible dynamique (climatiseurs, fontaines), les systèmes d'électronique médicale, les unités de soudage, les équipements de mesure et de test ...etc.

Cette topologie peut également être d'un spécial attrait pour les applications aéronautiques, où la tendance actuelle est d'utiliser plus d'énergie électrique pour commander des sous-systèmes d'un avion. L'utilisation des convertisseurs AC/DC dans ce cadre a pour objectif d'alimenter divers types de charges continues, à partir d'un bus AC de fréquence variable entre 360 et 800 Hz. De tels convertisseurs doivent donc satisfaire des exigences spécifiques à ce genre d'applications, à savoir un faible volume, un rendement massique élevé, une haute fiabilité et une capacité à compenser les harmoniques de courants.

Le redresseur de Vienne semble parfaitement répondre à ces critères [45].

II.7.1.1 Principe de Fonctionnement du Redresseur Triphasé à Trois Niveaux

La branche d'un convertisseur est constituée d'un interrupteur bidirectionnel commandable K_i , associé à deux diodes de roue libre D_i et D_i' qui assurent la conduction du courant vers la charge quand l'interrupteur est bloqué. La tension aux bornes d'un interrupteur K_i peut prendre trois valeurs différentes selon l'état de l'interrupteur et le signe du courant correspondant, soit $\{0 \text{ ou } \neq V_{dc}/2\}$.

On représente sur la figure II.7, le schéma équivalent monophasé du redresseur, soit la phase « a ».

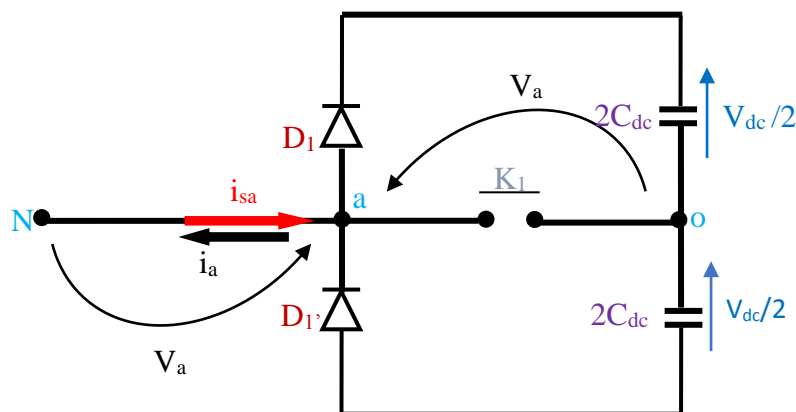


Figure II.7 : Schéma monophasé équivalent d'un redresseur de type Vienna

D'après le schéma de Figure II.7 on peut déduire les équations suivantes :

$$v_a = \begin{cases} 0 & \text{Si } K_1 \text{ est fermé} \\ \frac{V_{dc}}{2} & \text{Si } K_1 \text{ est ouvert et } i_{sa} > 0 \\ -\frac{V_{dc}}{2} & \text{Si } K_1 \text{ est ouvert et } i_{sa} < 0 \end{cases} \quad (II. 28)$$

$$v_a = \text{sign}(i_{sa})(1 - S_1) \frac{V_{dc}}{2} \quad (II. 29)$$

Avec S_1 désigne l'état de commutation de l'interrupteur K_1 (1 pour K_1 fermé et 0 pour K_1 ouvert)

$$v_a' = v_a + v_o$$

Les équations des autres phases « b » et « c » peuvent être déduites de la même manière.

Pour un système triphasé équilibré avec neutre isolé du point milieu du côté continu, nous pouvons aussi déduire l'expression de la tension v_o comme suit:

$$v_o = -\frac{(v_a + v_b + v_c)}{3} \quad (II. 30)$$

II.7.2. Modélisation d'un 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.8,

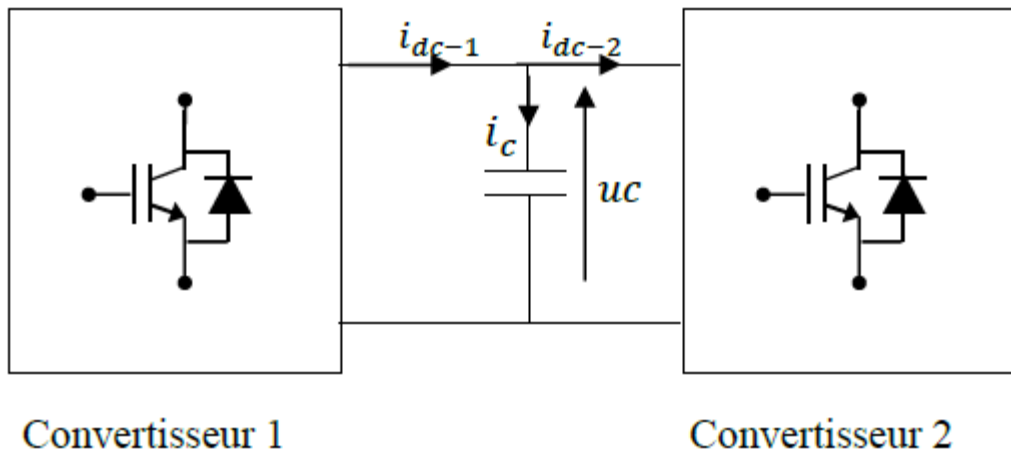


Figure II.8 : schéma de bus continu

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 [46].

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

$$\frac{duc}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i_c \quad (\text{II.31})$$

$$i_c = i_{dc-1} - i_{dc-2} \quad (\text{II.32})$$

$$U_c(t) = U_0 + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} i_c dt \quad (\text{II.33})$$

Avec :

u_0 : 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 $Ki \ll$, donc le régulateur se réduit à un gain pur, il vaut :

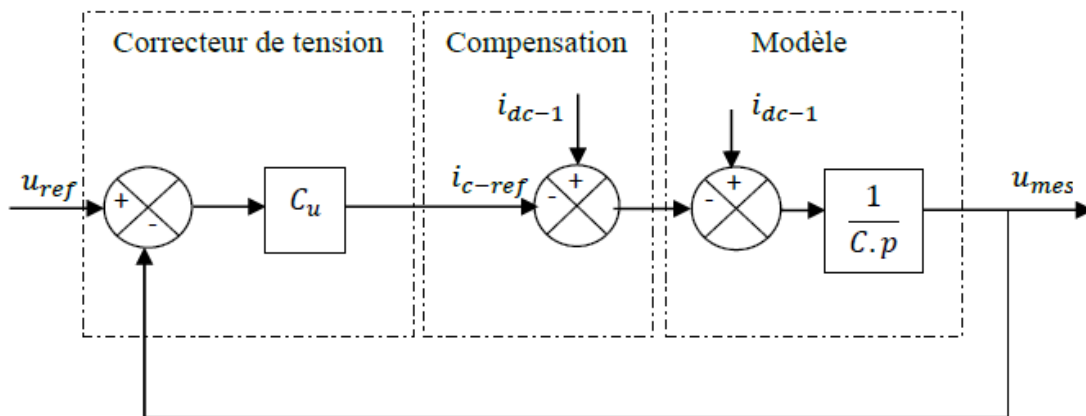


Figure II.9 : régulation de la tension du bus continu

$$K_p = \frac{C}{\tau_{uc}} \quad (\text{II.34})$$

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 :

$$P_{dc-1} = U_c \cdot i_{dc-1} \quad (\text{II.35})$$

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

$$P_{C-ref} = U_c \cdot i_{C-ref} \quad (\text{II.36})$$

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 :

$$P_{f-ref} = P_{dc-1} - P_{C-ref} \quad (\text{II. 37})$$

II.7.3. Modélisation d'un onduleur à trois niveaux (convertisseur côté réseau)

Le convertisseur côté réseau a la même conception que le convertisseur côté machine présentée précédemment. Nous intéressons à la modélisation de la connexion du CCR, avec le réseau électrique via le filtre RL.

L'onduleur à point neutre à trois niveaux a de nombreux avantages par rapport à l'onduleur à deux niveaux conventionnel, tels qu'une forme d'onde plus douce, moins de distorsion, moins de fréquence de commutation et un faible coût [7].

La topologie d'un onduleur NPC à trois niveaux est illustrée à la figure 6.

L'onduleur à trois niveaux à un total d'états de commutation. :

- Lorsque les commutateurs supérieurs sont s_{ak1}, s_{ak2} à l'état activé, cela correspond à l'état «1».
- Lorsque les commutateurs inférieurs s_{ak3}, s_{ak4} sont activés, cela correspond à l'état «-1».
- Lorsque les interrupteurs auxiliaires s_{ak2}, s_{ak3} sont activés, cela se traduit par l'état «0» [7].

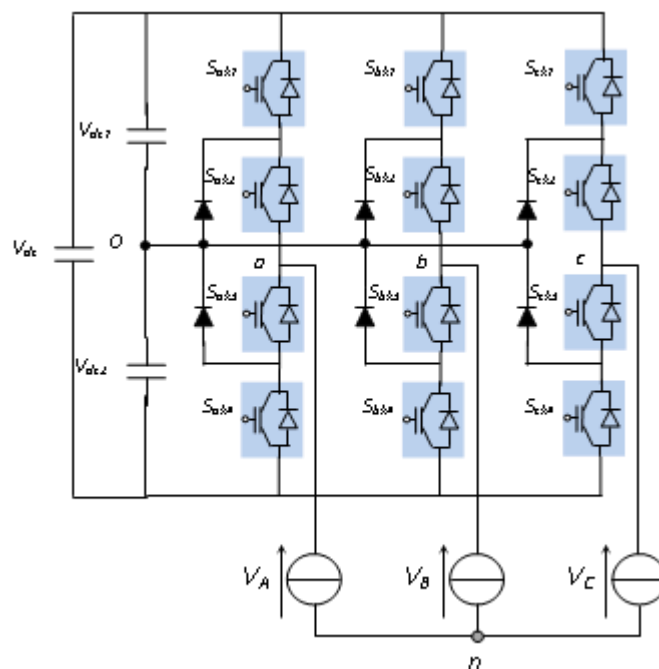


Figure II.10 : Schéma de principe d'un onduleur à trois niveaux

Les fonctions F_{km}^b de connexion sont données par:

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases} \quad (\text{II. 38})$$

Où

$m=1$ le demi-bras supérieur et: $m=0$ le demi-bras inférieur

La tension v_{AO}, v_{BO}, v_{CO} de phase peut s'écrire

$$\begin{cases} V_{AO} = F_{11}^b V_{c1} - F_{10}^b V_{c2} \\ V_{BO} = F_{21}^b V_{c1} - F_{20}^b V_{c2} \\ V_{CO} = F_{31}^b V_{c1} - F_{30}^b V_{c2} \end{cases} \quad (\text{II. 39})$$

Les tensions de sortie simples sont écrites comme suit

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} V_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} V_{c2} \quad (\text{II. 40})$$

Le convertisseur côté réseau à la même conception que le convertisseur côté machine présentée précédemment. Nous intéressons à la modélisation de la connexion du CCR, avec le réseau électrique via le filtre RL. La figure II.11 illustre l'ensemble de la liaison au réseau électrique constituée du bus continu, du CCR et du filtre d'entrée.

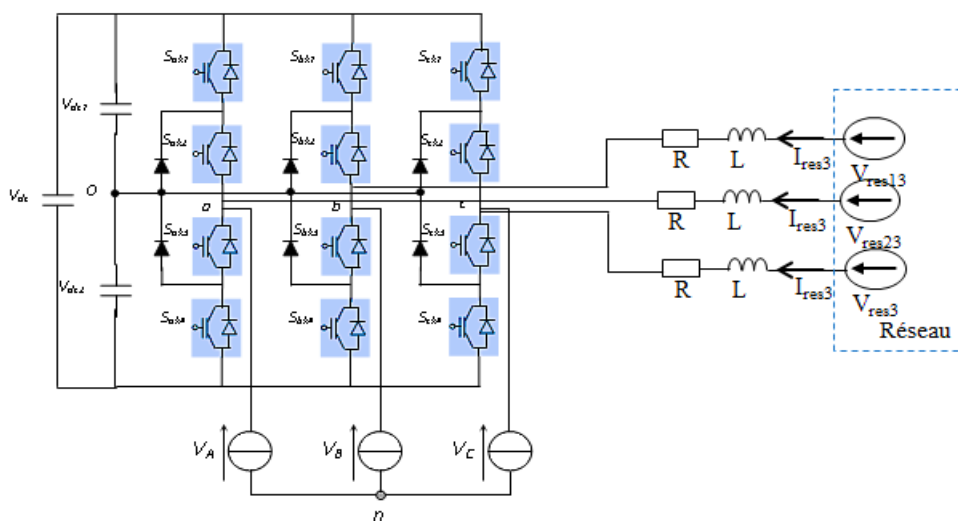


Figure II.11 : Structure du CCR.

II.8 Modélisation d'un réseau électrique

Modèle Le dynamique de la connexion au réseau dans le cadre de référence tournant de façon synchrone avec la tension du réseau est donnée comme suit :

$$\begin{cases} v_{dg} = v_{id} - R_g i_{dg} - L_{dg} \frac{di_{gd}}{dt} + L_{qg} \omega_g i_{qg} \\ v_{qg} = v_{iq} - R_g i_{qg} - L_{qg} \frac{di_{gq}}{dt} + L_{dg} \omega_g i_{dg} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

où: v_{dg}, v_{qg} sont les composants directs et en quadrature des tensions du réseau, v_{id}, v_{iq} (V) sont les composants des tensions de l'onduleur, R_g, L_{dg}, L_{qg} sont la résistance, respectivement l'inductance directe et en quadrature du réseau, i_{dg}, i_{qg} (A) sont les composants directs et en quadrature des courants du réseau respectivement, v_{dc} est la tension du circuit intermédiaire, i_{dc} est le courant de la ligne de transmission côté réseau et est le condensateur du circuit intermédiaire.

Les équations de puissance dans le référentiel synchrone sont données par :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} (v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg}) \\ Q_g = \frac{3}{2} (v_{dg} i_{qg} - v_{qg} i_{dg}) \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Après avoir orienté le cadre de référence le long de la tension du réseau, est égal à zéro en alignant l'axe d. Ensuite, la puissance active et réactive peut être obtenue dans cette nouvelle référence à partir des équations suivantes.

Ensuite, les puissances active et réactive peuvent être obtenues dans cette nouvelle référence à partir des équations suivantes [47] :

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} v_{dg} i_{dg} \\ Q_g = \frac{3}{2} v_{dg} i_{qg} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

II.9 Conclusion

Ce chapitre, illustre une description générale de la structure à modéliser, cette modélisation a affectée les différentes parties d'une centrale hydroélectrique à vitesse variable basée sur une génératrice 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.

Le modèle de GADA est un système d'équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park a permis de simplifier ce modèle, ainsi que l'intérêt de l'orientation du flux qui sert à simplifier le modèle de la GADA.

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

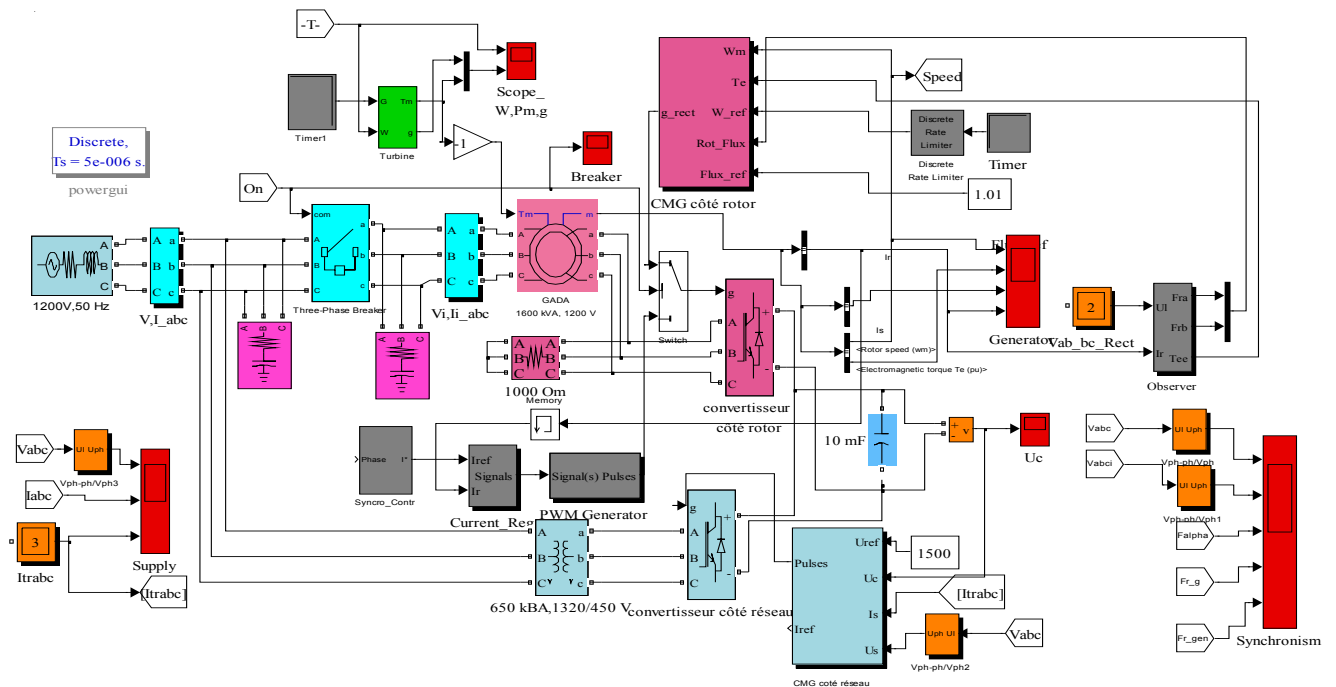
C **HAPITRE III**

**Commande et simulation d'une
microcentrale hydroélectrique en
mode connecté**

Tableau III.2 : Paramètre de l'onduleur AC-DC et du réseau.

Composantes	Valeursdenotation
Courant nominale	1000 A
Fréquence	50 Hz
Tension nominale Vrms	1200 V
Cote de capacité	0.01 F

Pour évaluer et tester la technique de contrôle proposée pour un modèle complet de la GADAbasé sur une centrale hydroélectrique avec boucle de réglage des courants, de la puissance active et réactive et de la tension continue à l'aide de contrôleurs à mode glissant, une simulation a été réalisée sous MATLAB / Simulink.



FigureIII.7 : Schéma simulée sous matlab Simulink.

La quantité d'énergie produite / fournie par la turbine hydroélectrique dépend du débit d'eau variable évalué $Q = 0,8 \text{ m}^3 / \text{s}$ au temps entre $t = [1-5 \text{ s}]$, $Q = 0,6 \text{ m}^3 / \text{s}$ au temps entre $t = [15,5-20 \text{ s}]$ et $Q = 0,9 \text{ m}^3 / \text{s}$ au temps entre $t = [20,5-25 \text{ s}]$ respectivement.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la production et la commande d'une chaîne de génération électrique à base d'hydraulique à vitesse variable.

Les travaux ont eu pour but d'utiliser les possibilités offertes par la technologie de la vitesse variable pour la maximisation du rendement de la génératrice hydraulique et l'harmonisation de son fonctionnement sous différents modes.

Le premier chapitre a été accentué sur les généralités des centrales de production hydroélectrique notamment les microcentrales.

Dans le deuxième chapitre, le travail mené a été une étude sur la technologie des microcentrales hydrauliques à vitesse variable. Différentes topologies ont été établies dans le but de choisir une structure basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation interfacée au réseau par un redresseur triphasé de type Vienna et un onduleur de tension à trois niveaux via un bus continu. Les éléments de la chaîne de conversion hydroélectrique ont été modélisés afin de faire une simulation numérique.

Le chapitre 3 a porté sur la commande de la microcentrale hydraulique à vitesse variable. Trois stratégies de contrôle ont été élaborées. La première concerne la commande MPPT de la turbine hydroélectrique où l'objectif principal a été l'optimisation du rendement de la turbine hydraulique par la vitesse variable et surtout en mode connecté au réseau, suivie par l'introduction de la commande vectorielle au système. Les courants de la génératrice ont été contrôlés par la technique à mode glissant d'ordre supérieur. Cette commande est efficace face à la complexité et la non linéarité du système étudié. En outre, elle permet de réduire les chattering aux niveaux des grandeurs contrôlées.

La troisième stratégie a pour but de contrôler les puissances actives et réactives du système ainsi que la tension du bus continu. Une commande par mode glissant côté réseau a été introduite dans le but d'assurer une alimentation sans interruption en respectant les normes et la sensibilité des réseaux électriques. Une simulation numérique a été effectuée dans le cas d'une perturbation qui réside dans la variation du débit d'eau de la turbine hydroélectrique. Les résultats obtenus ont été analysés et interprétés.

A la fin des travaux de ce mémoire on estime avoir contribué à:

- La modélisation et la simulation dynamique d'une microcentrale hydraulique qui permet le soutien d'un réseau ou l'alimentation des charges isolées sous différents scénarios.
- L'optimisation du fonctionnement de la microcentrale hydraulique grâce à l'algorithme de la commande MPPT proposée.

- L'analyse de la qualité des courants injectés au réseau et surtout l'effet des oscillations de la vitesse de rotation.
- La commande par mode glissant à vitesse variable du système. Cette commande a été proposée comme alternative à la commande en vitesse afin de simplifier cette dernière par l'élimination de sa boucle de contrôle.
- La simulation dynamique en utilisant Matlab/Simulink. Les résultats obtenus sont très encourageants.

Les perspectives du travail de recherche de ce mémoire sont ouvertes. Elles peuvent viser à court terme l'étude du comportement de la microcentrale sur un banc d'essai expérimental (émulateur) en utilisant des convertisseurs de puissance avancés et leurs stratégies de commande intelligentes associées. A long terme, on peut envisager de valider les lois de commande sur site.

Références bibliographiques

- [1] **A. GUASMI, S. GUELMINE** “Modélisation et commande du système de conversion éolienne basé sur une GADA” mémoire de master académique université de Mohamed Boudhiad M’sila, 2017.
- [2] **Site internet** : <https://www.edfenr.com/lexique/energies-renouvelables/> 19-09-2020 à 14:00.
- [3] **A. LAOUARI** “Etude en CFD d'une turbine hydraulique” Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister Université M’hamed BOUGARA, 2011
- [4] **V.PAVSKA FMH 606,**”Process simulation and control of hydro power plants” master’s thesis, 2017.
- [5] **M.TEDJANI,** “Amélioration de la Qualité de l’Énergie Électrique Produite par un Système de Conversion Éolien”, THESE du diplôme de DOCTORAT EN SCIENCES université BADJI MOKHTAR ANNABA, 2015.
- [6] **L.BELHADJI,** optimisation du contrôle commande d’un système hydraulique réversible a vitesse variable”.science de l’ingénieur physique université de Grenoble Français, 2013.
- [7] **A.BOUDALI, K.NEGADI, A.BERKANI, M.BOUDIAF, F MARGNETTI,** “SUPER TWSTING SLIDING MODE CONTROLLER OF SMALL HYDRO POWER PLANTS ENERGY GENERATION BASED DFIG”, PAPER UNIVERSITY IBN KHALDOUN TIARET, 2020.
- [8] **A.BOUDALI, K.NEGADI, T. ALLAOU,** “Fuzzy Logic Control of DFIG Small Hydropower Plant Connected to the Electrical Grid”, Paper university IBN KHALDOUN TIARET, 2020.
- [9] **T.HACHEMI et K.GHEDAMSI,** “Etude et commande d’un système hydraulique à vitesse variable, THESE du diplôme du master”, Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, 2017.
- [10] **Site internet** <https://www.missionenergie.goodplanet.org/fiche/les-energies-hydrauliques-2/> 1/09/2020 à 14h.
- [11] **Ş.BREBAN,** “ETUDE DU SYSTÈME DE CONVERSION ELECTROMÉCANIQUE D’UNE MICROCENTRALE HYDROÉLECTRIQUE À VITESSE VARIABL”, l’École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, thèse de Doctorat, 2008.
- [12] **R.TERKI et K.HOSNI,** “Microcentrale Hydroélectrique Connectée au Réseau, du diplôme d’Ingénieur d’Etat”, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE Tizi OUZOU,2012.

Références bibliographiques

[13] **Site internet :**

<https://www.bing.com/search?q=types+des+turbine+hydraulique&FORM=HDRSC1> 11/09/2020 à 11h

[14] **T.GHENNAM**, “Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2011.

[15] **Site internet :**

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Georgetown_PowerPlant_Museum_GE_DC_Generator_01.jpg?uselang=fr 11/09/2020 à 11 h

[16] **Site internet :** <https://fdmf.fr/a-propos-d-un-potentiel-energetique/> 12/09/2020 à 12h.

[17] **Site internet :**

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/Leistungstransformator_neu.jpg?download 12/09/2020 à 14h.

[18] **M. NAIDJI and B. ABDERRAHMANE**, “Conception et Réalisation d’un Système d’Acquisition pour une Eolienne de Petite Puissance,” Mémoire, Ecole nationale polytechnique Alger, 2010.

[19] **Y.A.BENCHERIF**, “Modélisation et commande d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l’énergie éolienne,” Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2008.

[20] **P. FREDERIC**, “Etude et commande de génératrices asynchrones pour L’utilisation de l’énergie éolienne,” Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2003.

[21] **M.HADDAR et M.HAIL AKLI**, “Commande indirecte en couple d’une MADA dédiée à une centrale hydro-électrique”, thèse de master, Université A. MIRA-BEJAIA, 2018.

[22] **F.POIERS**, “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.

[23] **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.

[24] **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.

Références bibliographiques

- [25] **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.
- [26] **V.PAUL-ETINNE**, “Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation”, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [27] **A. L. NEMMOR**, “Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation”, Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [28] **H.IBRAHIM et D. MARIYA**, “Générateur éolien-diesel avec stockage d'énergie : critères de choix du système de stockage,” CIFQ2011 / ÉnergRenouv01 20-22 juin 2011, Saguenay, pp. 1–6, 2011.
- [29] **S. TRIESTE**, “Modélisation et optimisation technico-économique d'une chaîne de conversion et de stockage d'énergie d'un navire électrique zéro émission,” Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2013.
- [30] **L. TULINE**, “Le stockage stationnaire de l'énergie,” Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives France, 2012
- [31] **D.PAIRE**, “Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entrainements électriques hybrides: application à un ascenseur avec récupération d'énergie,” Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010.
- [32] **B. MULTON and J. Peter**, “Le stockage de l'énergie électrique moyens et applications,” Rev. 3E.I, vol. 6, pp. 59–64, 1996.
- [33] **P. KRECZANIK**, “Étude de la fiabilité et du vieillissement d'un système de stockage par super-condensateurs pour l'alimentation partielle et ponctuelle d'un trolleybus grâce à la récupération de l'énergie de freinage. Approche du composant au système de stockage,” Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2011.
- [34] **A. PAYMAN**, “Contribution à la Gestion de l' Energie dans les Systèmes Hybrides Multi-sources Multi-charges,” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [35] **SEL. AIMANI**, “ 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).
- [36] **G.BAOLING, S.BACHA, M.ALAMIR, M.AMGAD**, “Variable speed micro-hydro power génération system: Review and Experimental results”, Symposium de Génie Electrique (SGE 2018), 3-5 Juillet 2018, Nancy, France.
- [37] **B. BELTRAN, ME. BENBOUZID, T. AHMED-ALI**, “Second-Order Sliding Mode Control of a Doubly Fed Induction Generator Driven Wind Turbine”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 27, N°2, June 2012, 0885-8969/\$31.00 © 2012 IEEE.

- [38] **Mr F. BOUALEM** “Commande indirecte en couple d’une MADA dédiée à une centrale hydro-électrique” mémoire de master université de Bijaya Algerie 2018.
- [39] **O. MOUSSA, H. BENGUESMIA, R. ABDESSEMED, S. BENAGGOUNE**, “High-order sliding mode control of a grid-connected brushless doubly fed induction generator”, International Conference on Mechanics and Energy, December 19-21, 2019, Monastir, TUNISIA ICME 2019.
- [40] **A. GAILLARD**, “Système éolien basé sur une MADA : contribution à l’étude de la qualité de l’énergie électrique et de la continuité de service” thèse de doctorat de l’université de Henri Poincaré, Nancy-I France 2010.
- [41] **C. HAO, N. DAVID AND C. DIONYSIOS, C. ALIPRANTIS**, “Analysis of Permanent-Magnet Synchronous Generator with Vienna Rectifier for Wind Energy Conversion System”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 4, N° . 1, January 2013. 1949-3029/\$31.00 © 2012. IEEE.
- [42] **Site internet** : <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/11047> 5/09/2020.
- [43] **N. BELHAOUCHET**, “Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées Application : Amélioration de la Qualité de l’Energie” UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF Algérie 2011.
- [44] **A. JAINI, S. SHANKAR AND V. VANITHA**, “Power Generation Using Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) Based Variable Speed”, Wind Energy Conversion System (WECS): An Overview, Journal of Green Engineering, Vol. 7 4, 477–504. Doi : 10.13052/jge1904-4720.742, 27 March 2018.
- [45] **S EL. AIMANI**, “Modélisation de différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension”, thèse de doctorat de l’université des sciences et technologies de Lille 1 (USTL).
- [46] **H. BEN NADJI ET B. ABDALLAH**, “commande de la puissance active et réactive du GADA par la méthode de mode glissant”, mémoire de master, Univeristé Echahid Hamma Lakhdar-El-Oued, 2015.
- [47] **B, MEGHNI, D, DIB, A, TAHER AZAR**, “ A second-order sliding mode and fuzzy logic control to optimal energy management in wind turbine with battery storage, Springer, Neural Computing & Applications, Vol 2 N°8, November 2015, DOI 10.1007/s00521-015-2161-z.
- [48] **A, HOSSEIN RAJAEI, M. MOHAMADIAN, S, M, DEGHAN AND A. YAZDIAN**, “PMSG-based variable speed wind energy conversion system using Vienna rectifier”, European Transactions on electrical Power, Euro. Trans. Electr. Power 2011; 21:954–972, published online 25 August, 2010 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/etep.488 .

[49] **K. BOUZAINI, S. BEN SLAMA, C. ADNANE**,“ Higher Order Sliding mode control For PMSG In wind power Conversion System, Proceedings of 2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT-2016) Tunisia, Hammam et December, 16-18, 2016, 978-1-5090-1055-4 © 2016 IEEE.