

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme Master en Electrotechnique

OPTION : Electromécanique

: Commande des systèmes électriques

Thème

**Commande en puissance d'une centrale
hydroélectrique**

Elaboré par :

Mr. TAHIR RAOUF
Mr. DEHOUCHE EL AZIZ

Encadré par :

Mr. TARAFT .S

Juin 2015

REMERCIEMENTS

Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et la patience pour mener ce travail à terme.

Nous exprimons notre profonde gratitude à monsieur M^r TARAFT.S. pour avoir assumé la responsabilité de nous encadrer, nous orienter et de nous conseiller tout au long de la réalisation de ce travail ainsi pour la confiance qu'ils nous ont accordé.

Nous remercions vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteurs de notre mémoire.

A ceux qui nous ont apporté, de près ou de loin, orientation, soutien et aide dans la réalisation et la concrétisation de ce travail.

Nos vifs remerciements à tous nos enseignants du primaire à l'université.

Dédicaces

Je dédie ce travail, à mes parents qui m'ont orienté et soutenu dans les choix difficiles.

A mes deux sœurs.

A ma grande famille que ce soit du côté paternel ou du côté maternel.

A mon binôme et toute sa famille.

A tous mes amis.

Houssine, midou, hakou, fahem, rahim, lounis.

Merbah, ramy

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire.

Je le dédie aussi à tous ceux qui le liront, et j'espère qu'ils trouveront dans son contenu des réponses à leurs questions.

RAOUF...

Dédicaces

Je dédie ce travail, à mes parents qui m'ont orienté et soutenu dans les choix difficiles.

A ma grande famille que ce soit du côté paternel ou du côté maternel.

A mon binôme et toute sa famille.

A tous mes amis.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire.

Je le dédie aussi à tous ceux qui le liront, et j'espère qu'ils trouveront dans son contenu des réponses à leurs questions.

El aziz...

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Généralités sur les centrales hydroélectriques réversibles

I-1 Introduction	3
-------------------------------	----------

I-2 Centrales hydroélectriques.....	3
--	----------

I-2-1- les centrales gravitaires	4
---	----------

I-2-2-Centrale hydroélectrique réversible STEP.....	5
--	----------

I-3-Principe de fonctionnement des centrales hydraulique	6
---	----------

I-4-Différents types de centrales	6
--	----------

I-4-1-Centrale au fil de l'eau	6
---	----------

I-4-2-Centrales alimentées par un réservoir.....	7
---	----------

I-5-Taille des centrales.....	8
--------------------------------------	----------

I-6 Complexes hydroélectriques	8
---	----------

I-6-1 Bassins	9
----------------------------	----------

II-6-2Les conduites	9
----------------------------------	----------

I-7-Les équipements électromécaniques	9
--	----------

I-7-1-Pompes	10
---------------------------	-----------

I-7-2-Le choix de type d'alternateur	11
---	-----------

I-7-3-Transformateur	11
-----------------------------------	-----------

I-7-4-Raccordement au réseau	12
---	-----------

I-7-5-turbines	12
-----------------------------	-----------

I-7-5-1-Principe de fonctionnement des turbines à réaction	13
---	-----------

I-7-5-2-Principe de fonctionnement des turbines à action	14
---	-----------

Sommaire

I-8-Choix d'une turbine pour une application.....	15
I-9-Principaux types de turbines	16
I-9-1-Les turbines Pelton	16
I-9-2-La turbine Francis	17
I-9 -3-Les turbines Kaplan	18
I-9-4-Les turbines Banki-Mitchell (Cross flow)	19
I-10-Machine asynchrone à double alimentation (MADA)	20
I-10-1-Structure de la machine à double alimentation (MADA)	20
I-10-2-Utilisation de la MADA dans la conversion électromécanique .	20
I-10-3-Principe de fonctionnement	20
I-10-4-Différents mode de fonctionnement de la MADA.....	21
I-11-Fonctionnement moteur et générateur	21
I-12- Transfert de puissance dans la MADA	22
I-13--Conclusion	24

Chapitre II : Modélisation des différentes parties de la centrale hydroélectrique en vue de sa commande

II.1. Introduction.....	25
II.2. Conventions de signe et équations de base.....	25
II.3.Modélisation des différentes parties d'une centrale hydroélectrique.....	26
II.3.1 Modélisation de la Pompe-turbine.....	26
II.3.2. Modélisation la machine asynchrone à double alimentation.....	26
II.3.2.1. définition de la Machine asynchrone double alimentée.....	26

Sommaire

II.3.2.2.la Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....	27
II.3.2.2.1. Hypothèses simplificatrices.....	27
II.3.2.2.2. Modèle de la machine dans un repère (a,b,c).....	28
II. 3.2.2.3. Modèle diphasé de la MADA dans le repère de Park.....	29
II.3.2.2.3.1 Equations électriques.....	30
II.3.2.2.3.2 Equations magnétiques.....	31
II.3.2.2.3.2 Équation mécanique.....	31
II.3.2.2.4. Choix du référentiel pour le modèle de Park.....	32
II. 3.2.2.4.1. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques...33	
II.3.2.2.4.2. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques.....33	
II. 3.2.2.4.3. Expressions de puissances active et réactive de la MADA.....34	
II. 3.2.2.4.4. Commande vectorielle en puissance de la MADA.....35	
II.3.3. Synthèse des régulateurs « Proportionnel – intégral (PI) ».....	36
II.3.4 Modélisation de convertisseur statique.....	38
II.3.4.1 Commande MLI des convertisseurs.....	40
II.3.4.2 Modélisation du bus continu.....	42
II.3.4.3. Modélisation du filtre.....	44
II.3.4.4. Modélisation du redresseur MLI.....	45
II.4. Conclusion.....	46

Chapitre III : Simulation et interprétations des résultats réversibles

Sommaire

III.1.Introduction.....	48
III .2.Système hydraulique globale.....	48
III .3. Résultats de simulation de turbinage.....	49
III.4.Interprétation des résultats	55
III.5.Conclusion.....	56
Conclusion générale.....	57
Annexe.....	58
Bibliographie.....	59

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Principe de fonctionnement des phases de pompage pour stocker l'énergie.....	4
Figure I.2 : Principe de fonctionnement des phases de turbinage pour produire de l'électricité.	4
Figure. I-3. Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques	6
Figure I-4 : Centrale de Beauharnois	7
Figure I-5 Barrage de Tignes, le plus haut de France	7
Figure I-6 : Rendements relatifs des turbines hydrauliques pour débits variables.....	12
Figure I-7 : Schéma représentatif de la turbine Francis	13
Figure. I.8 : Schéma représentatif de la turbine Kaplan ou à hélices.....	14
Figure I-9 Schéma représentatif de la turbine Pelton.....	14
Figure I-10 : Choix des turbines hydrauliques pour les microcentrales hydroélectriques...	15
Figure I-11 Turbine Pelton.....	16
Figure I-12 : Turbine Francis.....	17
Figure I-13 : Turbine Kaplan.....	18
Figure I-14 : Turbine Cross flow.....	19
Figure I-15 : Diagramme vectoriel des forces magnétomotrices en mode moteur et générateur	22
Figure I-16 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	24

Chapitre II

Fig. II.1. Représentation schématique de la MADA	28
Fig. II.2. Position des différents systèmes d'axes	29
Fig. II.3. Schéma de principe de contrôle des puissances de générateur.....	35
Figure II – 4 Schéma bloc de la commande vectorielle.....	36
Figure II – 5 Schéma bloc d'un système régulé par un PI.....	36

Figure. II.6 schémas d'un onduleur de tension triphasé.....	39
Figure II.7 Schéma de principe de la MLI.....	41
Figure. II.8- schéma du bus continu.....	42
Figure. II.9- régulation de la tension du bus continu.....	43
Fig. II.10. Représentation du filtre de liaison RL.....	44
Fig. II.11. Modèle obtenu du filtre dans le repère diphasé (dq).....	45
Fig. II.12. Redresseur MLI.....	45

Chapitre III

Fig.III.1. Schéma structural de commande du système global.....	49
Fig.III.2. le débit volumique.....	49
Fig.III.3. la puissance hydraulique de la turbine.....	50
Fig.III.4. la puissance mécanique de la turbine.....	50
Fig.III.5. vitesse de rotation mécanique.....	51
Fig.III.6. Glissement de la génératrice.....	51
Fig.III.7. la puissance injectée au réseau et sa référence(MW).....	52
Fig.III.8. la puissance reactive statotique.....	52
Fig.III.9. la vitesse et le courant de réseau	53
Fig.III.10- les courants rotorique	54
Fig.III.11- couple électromagnétique	55

NOMENCLATUR

C_g	Couple transmit à la génératrice [N.m].
C_{em}	Couple électromagnétique [N.m].
C_{vis}	Couple des frottements visqueux [N.m].
ω_{mec}	Vitesse mécanique de la génératrice [rd/s].
F	Coefficient de frottement visqueux [N.m.s/rd].
v_{ares}	Tension de réseau [V].
I_{ares}	Courant de réseau [A].
P_g	Puissance active du réseau [W].
P_{mec}	Puissance mécanique [W].
$P_{res-mes}$	Puissance active mesurée de réseau [W].
Q_{g-mes}	Puissance réactive mesurée de réseau [VAr].
$P_{res-ref}$	Puissance active de référence [W].
Q_{S-ref}	Puissance réactive de référence [VAr].
Q_g	Puissance réactive du réseau [VAr].
P_s	Puissance active statorique [W].
Q_s	Puissance réactive statorique [VAr].
P_r	Puissance active rotorique [W].
Q_r	Puissance réactive rotorique [VAr].
P_n	Puissance nominale [W].
g	Glissement de la génératrice.
R_s	Résistance d'une phase statorique [Ω].
R_r	Résistance d'une phase rotorique [Ω].
ϕ_{ds}	Flux statorique d'axe directe [Wb].
C	Capacité de bus continu [F].
ϕ_{qs}	Flux statorique d'axe en quadrature [Wb].
ϕ_{dr}	Flux rotorique d'axe directe [Wb].
ϕ_{qr}	Flux rotorique d'axe en quadrature [Wb].
v_{ds}	Tension statorique d'axe directe [V].

ω_r	Vitesse champ tournant du rotor [rd/s].
P	Nombre de paires de pôles de la génératrice.
L_r, L_s	Inductance cyclique statorique et rotorique [H].
M	Inductance mutuelle [H].
I_{ds}	Courant statorique d'axe directe [A].
I_{qs}	Courant statorique d'axe en quadrature [A].
I_{dr}	Courant rotorique d'axe directe [A].
I_{qr}	Courant rotorique d'axe en quadrature [A].
η	Rendement de la MADA.
J	Moment d'inertie totale [kg.m ²].
p	Opérateur de Laplace.
I_s	Courant de sortie du redresseur (A).
v_{dc}	Tension redressée (V).
I_{dc}	Courant redressée (A).
τ_r	Constante du temps du rotor (S).
S_a, S_b, S_c	Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.
τ_u	Temps de réponse désiré de la tension redressée[S].
μ_0	Tension initiale du condensateur [V].
I_c	Courant qui traverse le bus contenu [A].
μ_c	Tension aux bornes du condensateur (V)
v_c	Tensions statoriques [V].

ϕ_s	Flux statorique
ρ	Masse volumique de l'eau [kg/m^3]
θ_s	Angle électrique du champ tournant statorique [rd].
θ_r	Angle électrique du champ tournant par rapport au rotor [rd].
θ_m	Position angulaire du rotor par rapport au stator [rd].
H	Hauteur de la chute d'eau [m]
g	Accélération de la pesanteur [m/s^2].
Q	Débit volumique d'eau [m^3/s].
v_{qs}	Tension statorique d'axe en quadrature [V].
v_{dr}	Tension rotorique d'axe directe [V].
v_{qr}	Tension rotorique d'axe en quadrature [V].

Introduction générale

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que cela soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, ou sur le développement des activités industrielles. Elle est devenue une forme d'énergie indispensable par sa souplesse d'utilisation et par la multiplicité des domaines d'activité où elle est appelée à jouer un rôle plus important. Les modes et les moyens de production associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

En effet, les modes de production reposant sur la transformation des énergies renouvelables (hydraulique, éolien, solaire ...), sont appelés à être de plus en plus utilisés dans le cadre du développement durable.

Une alternative très intéressante au stockage d'énergie électrique, est le pompage-turbinage. En effet, cela permet d'une part de stocker de l'énergie potentielle par pompage lorsque la demande est inférieure à la production de base et d'autre part de couvrir les pics de consommation par turbinage

Les centrales de pompage –turbinage sont généralement équipées de pompes-turbines de types Francis qui ont la particularité d'avoir une roue à géométrie fixe. Elles sont donc optimisées pour un point de fonctionnement bien défini, caractérisé par une hauteur de chute, un débit et une vitesse de rotation.

Comme la hauteur de chute et le débit sont des grandeurs qui varient fortement en cours d'exploitation, un groupe à vitesse fixe fonctionne fréquemment à un rendement inférieur à sa valeur optimale. En revanche, si la vitesse du groupe est variable, il est alors possible de l'adapter continuellement selon la hauteur de la chute et le débit de sorte à maximiser le rendement. [1]

Actuellement, nous sommes intéressés aux centrales hydroélectriques à vitesse variable, utilisant une machine asynchrone à double alimentation(MADA) piloté par le rotor par deux convertisseurs commandés par modulation de largeur d'impulsion(MLI)

Le premier chapitre présente les généralités sur la centrale hydroélectrique à pompage-turbinage, les différentes technologies utilisées dans les centrales hydroélectriques.

Dans le deuxième chapitre nous présentons la modélisation de la turbine, de la machine asynchrone double alimentée, ainsi sa commande en puissance active et réactive. Puis nous établissons la modélisation des convertisseurs statiques et le bus continu.

Au troisième chapitre, nous présentons les résultats de simulation de mode turbinage.

Le présent travail sera achevé par une conclusion générale et quelques perspectives pour d'éventuelles contributions futures.

I -1-introduction :

Le présent chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur la production d'énergie gravitaire ou Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP). Où on va citer les domaines d'utilisation des centrales, leurs constitutions et enfin une définition de la machine asynchrone A double alimentation et son fonctionnement.

I-2- Centrales hydroélectriques :

Il existe trois formes principales de production d'énergie hydroélectrique :

- **les centrales dites gravitaires** pour les quelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement issus de cours d'eau (par gravitation)
- **les stations de transfert d'énergie par pompage (S-T-E-P)** aussi connues sous l'appellation centrales hydrauliques à réserve pompée ou centrale de pompage-turbinage
- **les usines marémotrices** au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (hydroliennes au sens strict) ou du mouvement des vagues.

I-2-1-les centrales gravitaires:

Les centrales gravitaires utilisent le flot d'eau amené par la gravité et le cycle de l'eau. L'eau est utilisée directement dans le cas des centrales au fil de l'eau, ou après l'avoir stockée derrière un barrage dans le cas des centrales-écluses et des centrales-lacs.

Les centrales au fil de l'eau sont situées en plaine et exploitent des cours d'eau dont le débit est relativement constant. Sans barrage réserve d'eau, ces centrales impactent moins l'environnement mais sont plus dépendantes des précipitations. Elles produisent de l'électricité à bas coût pour la consommation de base.

Chapitre I : Généralités sur les centrales hydroélectriques

I-2-2-Centrale hydroélectrique STEP :

Une centrale hydroélectrique est utilisée pour transférer l'eau entre deux bassins situés à des altitudes différentes.

Lorsque le réseau fournit un surplus d'électricité (heures creuses ou pic de production) l'eau du bassin inférieur est pompée dans le bassin supérieur.

Lorsque le réseau connaît un déficit de production électrique, la circulation de l'eau est inversée.

La pompe devient alors turbine et restitue l'énergie accumulée précédemment.

L'opération permet de stocker de l'énergie inutilisée

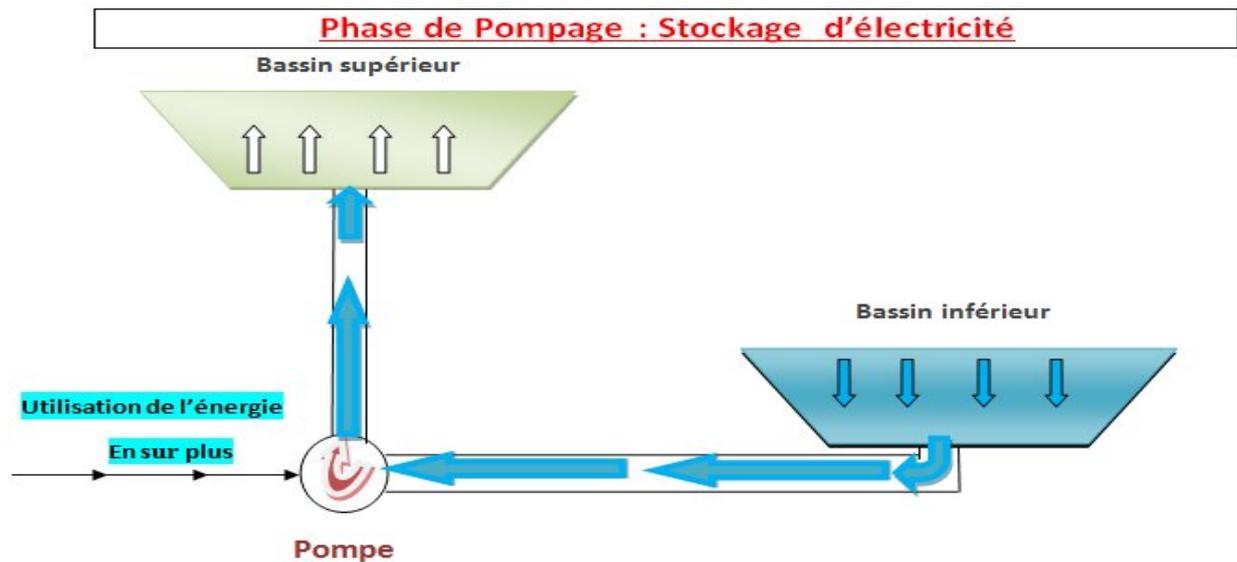


Figure I.1 : Principe de fonctionnement des phases de pompage pour stocker l'énergie [1]

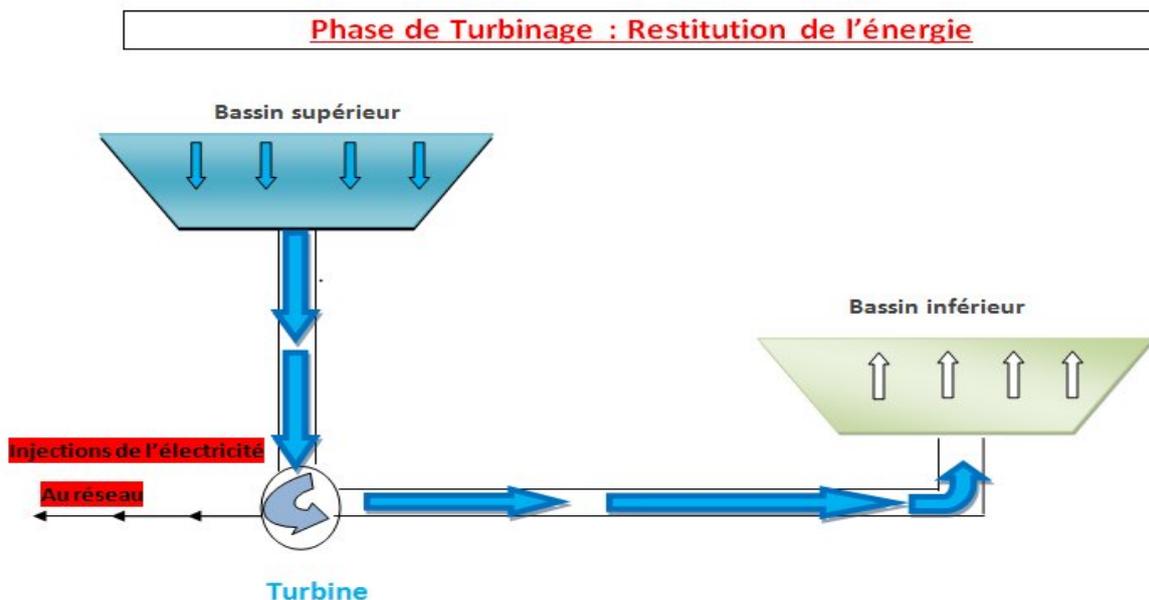


Figure I.2: Principe de fonctionnement des phases de turbinage pour produire de l'électricité [1]

I-3-Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques :

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice.

L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique.

Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en Énergie électrique.

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :

- ➔ hauteur de la chute d'eau,
- ➔ débit de la chute d'eau.

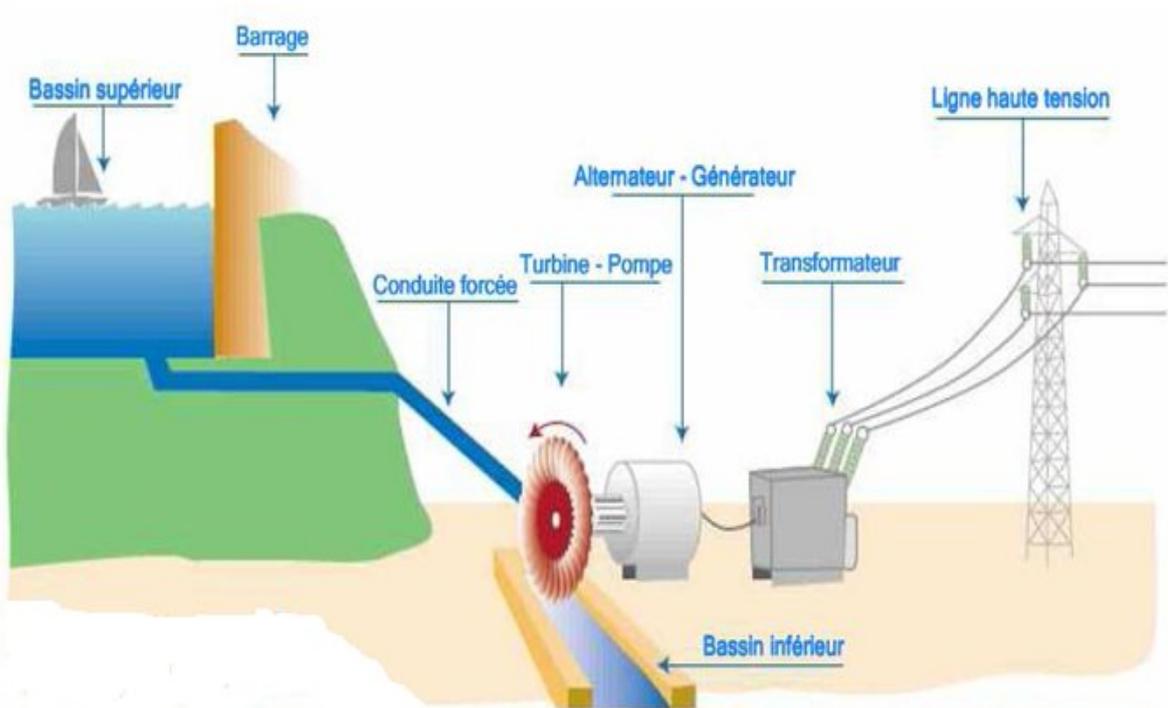


Figure. I-3. Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques [2]

I-4-Différents types de centrales :

Nous distinguons deux types de centrales hydroélectriques : les centrales au fil de l'eau et les centrales alimentées par un réservoir.

I-4-1-Centrale au fil de l'eau :

Il s'agit d'une centrale installée directement dans le lit de la rivière et qui ne possède pas de réservoir. Le débit turbiné correspond au débit naturel du cours d'eau. La puissance produite varie uniquement avec ce débit



Figure I-4 : Centrale de Beauharnois au Québec : Puissance 1660MW ; hauteur de chute 24m [2]

I-4-2-Centrales alimentées par un réservoir :

Il s'agit d'une centrale alimentée par une retenue d'eau permettant un stockage d'eau saisonnier ou interannuel. Le réservoir permet de moduler le débit d'eau et offre donc une souplesse pour répondre aux variations de la demande d'électricité.



Figure I-5 Barrage de Tignes, le plus haut de France (160 m il retient 230 millions de m³) [3]

I-5-Taille des centrales :

La classification se fait aussi par quantité d'électricité produite.

Tableau I-1 : classification des centrales d'après leur puissance

Centrales	Puissance
Grande	$P > 10\text{MW}$
Petite Moyenne	$10\text{MW} > P > 1\text{MW}$
Mini petite	$1\text{MW} > P > 10\text{kW}$
Micro	$P < 10\text{kW}$

I-6-Complexes hydroélectriques :

Un complexe hydroélectrique est un ensemble d'ouvrages de génie civil et d'installations mécaniques et électriques dédiés à la production d'énergie électrique. Généralement, un complexe hydroélectrique comprend les ouvrages suivants:

- Un barrage (bassin) pour stocker les surplus d'eau et augmenter la hauteur de chute.
- Des évacuateurs de crue pour écouler les surplus d'eau au besoin.
- Des conduites forcées pour amener l'eau à la centrale. Elles doivent supporter les surpressions et les dépressions causées par les coups de bélier et les fermetures brusques des turbines. Les surfaces intérieures doivent être suffisamment lisses de façon à minimiser les pertes de charge.
- Des salles de machine abritant les groupes turboalternateurs, les appareillages électriques et les équipements de commande et d'exploitation.
- Un canal de fuite pour permettre la restitution de l'eau dans le lit de la rivière.

I-6-1-Bassins:

Les retenues d'eau, haute et basse, peuvent être soit naturelle, soit artificielles.

Dans ce dernier cas, les bassines sont généralement réalisées par creusement et par utilisation des matériaux de déblai pour créer une ceinture de digues fermant la cuvette. Suivant la topographie du terrain à l'origine, plat ou déjà en dépression, les travaux de terrassement sont plus ou moins importants. La cuvette ainsi réalisée est ensuite généralement étanchée par un revêtement en béton bitumineux ou en brai vinyle. Le coût de construction de telle installation est donc très variable en fonction du terrain [4]

I-6-2-Les conduites :

On distingue généralement, une entrée d'eau munie d'une grille crapaudine, d'une vanne et d'une entrée alimentant un canal, une conduite forcée ou directement la turbine selon le type de centrale.

- L'entrée est généralement en béton armé, la grille en acier et la vanne en bois ou en acier.
- Un canal, un tunnel et/ou une conduite forcée, qui amène l'eau jusqu'à la centrale, dans les installations où la centrale se trouve à une certaine distance en aval de l'entrée d'eau
- Les canaux sont généralement excavés et suivent les contours du terrain. Les tunnels sont souterrains et creusés par forage et dynamitage ou à l'aide d'un tunnelier.
- Les conduites forcées, qui amènent l'eau sous pression, peuvent être en acier, en fer, en fibre de verre, en plastique ou en béton.
- L'entrée et la sortie de la turbine, qui incluent les soupapes et les vannes nécessaires pour arrêter l'arrivée d'eau lors de la fermeture et de l'entretien. Ces composants sont généralement en acier. Lorsqu'il faut avoir des vannes en aval de la turbine pour des travaux d'entretien, celles-ci peuvent être en bois.
- Un canal de fuite, qui transporte l'eau de la sortie de la turbine jusqu'à la rivière. Ce canal est aussi excavé.

I-7-Les équipements électromécaniques :

Les principaux composants électriques et mécaniques d'une petite centrale sont la turbine et la génératrice qui peuvent être en plusieurs exemplaires. Différents types de turbines ont été conçues afin de s'adapter à tous les types de sites hydroélectriques se trouvant dans le monde.

Chapitre I : Généralités sur les centrales hydroélectriques

Les turbines utilisées dans les petites centrales sont des versions réduites de celles qui équipent les grandes centrales classiques.

I-7-1-Pompes :

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

Le rendement des pompes se situe généralement entre 70%(pour les pompes centrifuges) et 90% (pour les pompes volumétrique). [4]

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

- Les pompes centrifuges sont adaptées aux débits moyens et élevés pour des hauteurs limites
- Les pompes volumétriques sont destinées à des faibles débits et grand hauteur.

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

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

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

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

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

I-7-2-Le choix de type d'alternateur :

Dans les microcentrales, on rencontre principalement :

- Les machines synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné

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

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

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

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

- Les Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

Actuellement, il existe très peu d'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans les microcentrales hydrauliques. Toutefois des exemples d'applications intéressantes existent dans les systèmes éoliens [5], [6] et son utilisation est envisagée dans l'aéronautique. Elle permet de pallier aux problèmes précédents de stabilité de la machine asynchrone à cage et autorise réellement un fonctionnement à vitesse variable. Une excitation auxiliaire fournie aux enroulements du rotor permet de contrôler la tension et la fréquence au stator

I-7-3-Transformateur :

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

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

Les transformateurs de puissance sont indispensables quand la centrale doit débiter sur un réseau de tension 20 KV ou plus.

I-7-4-Raccordement au réseau :

Pour les installations hydroélectriques d'une puissance inférieure à 250kW, le raccordement se fait sur le réseau moyenne ou basse tension. [7]

Les caractéristiques d'un raccordement au réseau basse tension sont les suivantes :

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

Le cout d'un raccordement au réseau est en fonction de la distance de ce dernier par rapport à l'installation de stockage.

I-7-5-turbines :

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

Le rendement des turbines se situe généralement entre 60et80% ; il croit avec la taille des roues.

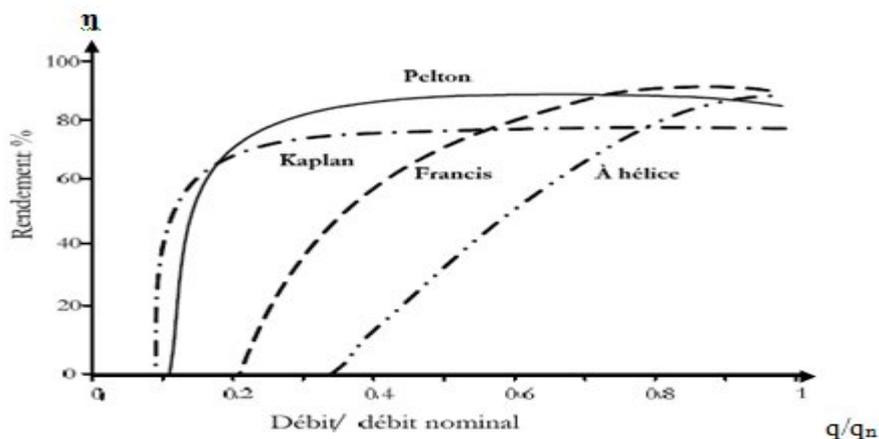


Figure I-6 : Rendements relatifs des turbines hydrauliques pour débits variables [5].

Deux catégories principales de turbines se distinguent :

- Celles utilisées dans les centrales à hauteur de chute faible ou moyenne sont généralement du type (à réaction), comme les turbines Francis et les turbines à hélice à pales fixes et variables (Kaplan).

Chapitre I : Généralités sur les centrales hydroélectriques

- Les turbines dites « à action » tel que la turbine Pelton, Banki et cross flow qui sont utilisées pour les hautes chutes.

I-7-5-1-Principe de fonctionnement des turbines à réaction :

L'eau sous pression induit une force sur la face des aubes de la roue. Au fur et à mesure que l'eau traverse la turbine, la pression diminue, transformée en énergie mécanique de rotation et transmise au générateur par l'arbre de transmission. La roue de la turbine est complètement immergée et son bâti doit être capable de supporter la pression de service. Les turbines fonctionnant de cette manière sont appelées (turbines à réaction). Les turbines 'Francis', 'Kaplan' et 'à hélices' appartiennent à cette catégorie.

Une turbine à réaction utilise à la fois la vitesse de l'eau (énergie cinétique) et une différence de pression (énergie de pression).

Deux principes sont à la base de fonctionnement d'une turbine à réaction :

- la création d'un tourbillon au moyen d'une bêche spirale, d'aubages du distributeur ou les deux à la fois

- la récupération du mouvement circulaire du tourbillon par les pales d'une roue en rotation qui devient les filets d'eau pour leur donner une direction parallèle à l'axe de rotation.

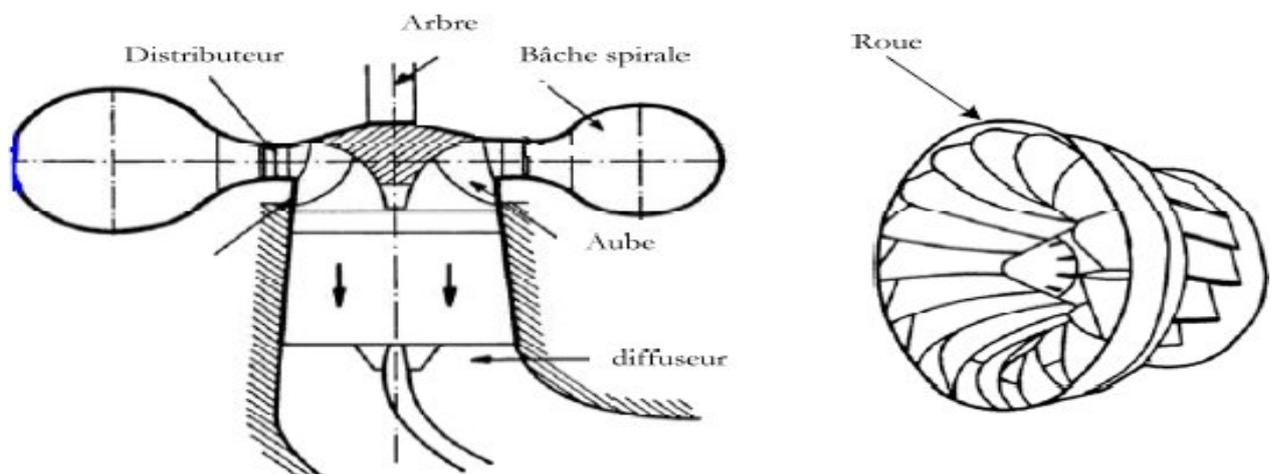


Figure I-7 : Schéma représentatif de la turbine Francis [8]

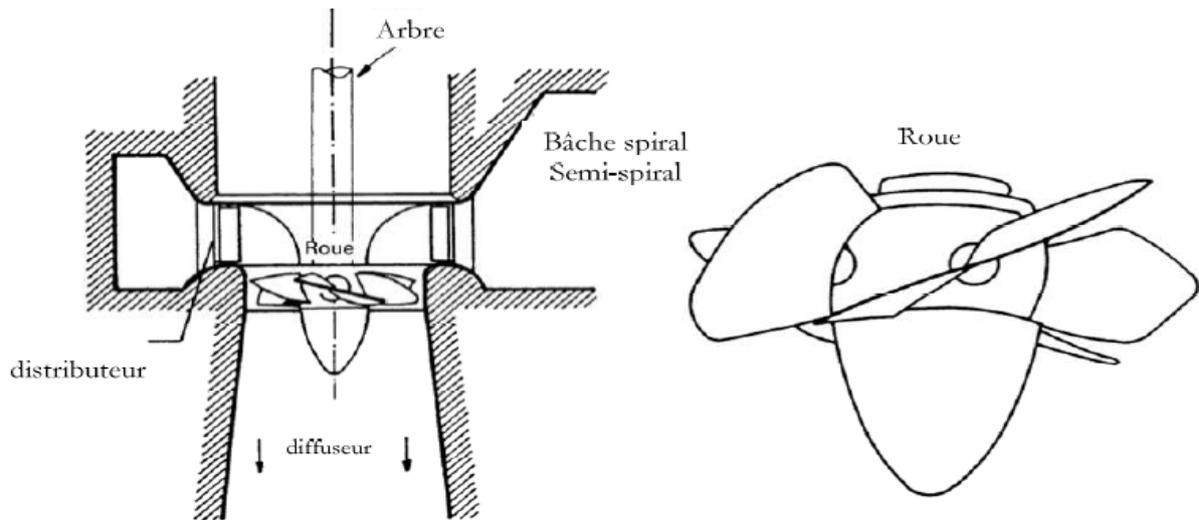


Figure. I.8 : Schéma représentatif de la turbine Kaplan ou à hélices [8]

I-7-5-2-Principe de fonctionnement des turbines à action :

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. L'énergie cinétique est véhiculée par un jet à haute vitesse s'écoulant dans ces augets, montés sur la périphérie de la roue. Les turbines qui fonctionnent de cette manière sont appelées (turbines à action). La plus efficace et la plus utilisée est la turbine (Pelton).

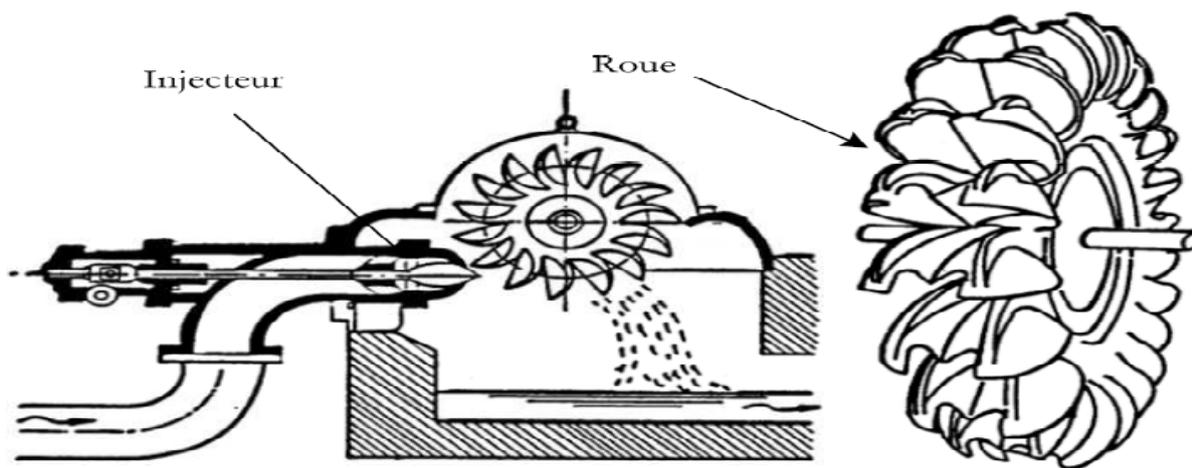


Figure I-9 Schéma représentatif de la turbine Pelton [8]

I-8-Choix d'une turbine pour une application :

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

Les petites turbines hydrauliques peuvent atteindre des rendements d'environ 90 % [8]. On veillera à choisir la meilleure turbine pour chaque application, étant donné que certaines donnent un bon rendement que dans une plage limitée de débits (ex. : les turbines à hélice à pales fixes).

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

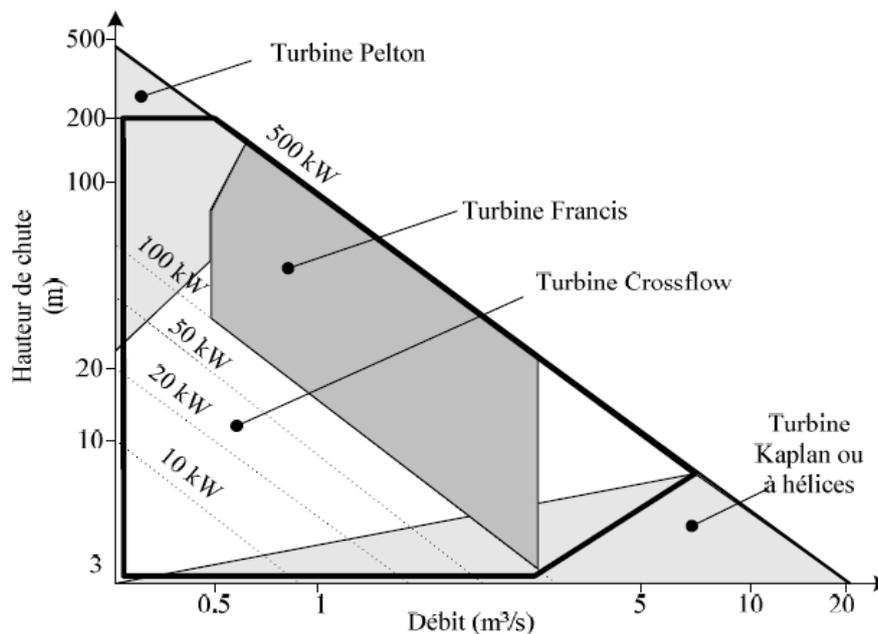


Figure I-10 : Choix des turbines hydrauliques pour les microcentrales hydroélectriques [8]

I-9-Principaux types de turbines :

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

I-9-1-Les turbines Pelton :

Elles sont utilisées généralement pour les centrales de hautes chutes, à faible débit. Elles sont très peu présentes sous nos contrées.

La turbine Pelton est une machine à action dont l'axe peut être vertical ou horizontal. Celle-ci est composée d'une roue mobile garnie à sa périphérie d'augets en double cuillère et dont le distributeur est fait d'injecteurs ; leur nombre peut varier de 1 à 6.

La vitesse nominale de la turbine varie de 500 tr/min à 1500 tr/min, ce qui permet un couplage direct sans multiplicateur à la génératrice électrique [9].

La figure I-8 présente schématiquement une turbine Pelton.

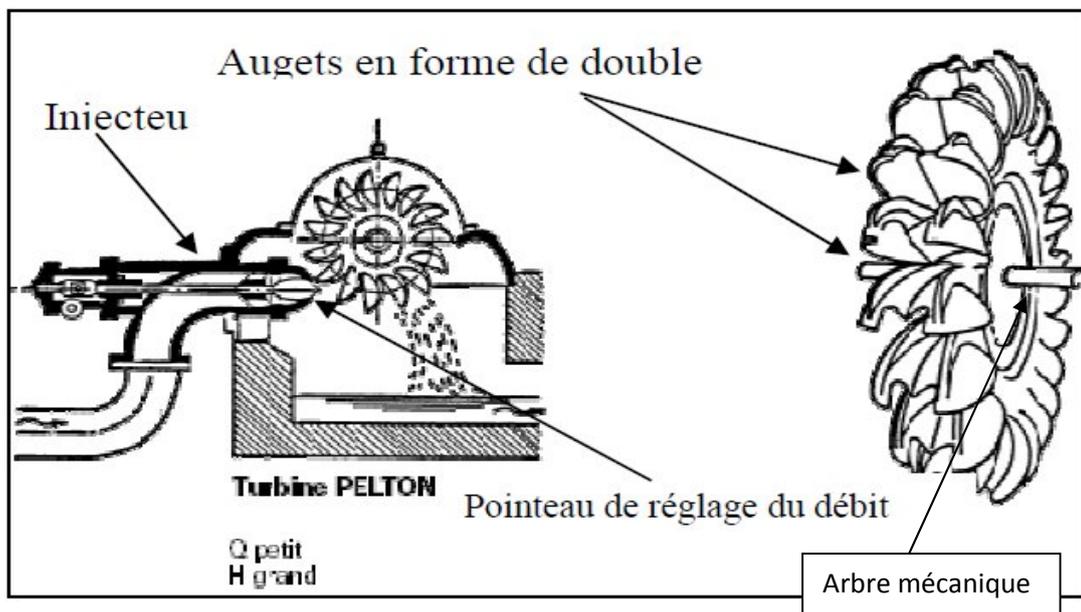


Figure I-11 Turbine Pelton [9]

Les injecteurs sont des tuyères convergentes munies d'un pointeau transformant l'énergie de pression en énergie cinétique. Ils sont disposés autour de la roue et leur jet, à pression atmosphérique, est dirigé vers le milieu des augets, au "diamètre Pelton". Une régulation du débit et un réglage du diamètre du jet peuvent être effectués en faisant varier la sortie du pointeau.

Chapitre I : Généralités sur les centrales hydroélectriques

La roue mobile tourne à pression atmosphérique, il n'y a plus de variation de pression du fluide dans cette roue. Mais lors de son passage dans la roue, l'eau est déviée de presque 180°, ainsi, elle cède toute son énergie cinétique.

Cette roue ne dispose pas de diffuseur car l'eau à la sortie de la roue ne possède plus d'énergie. Il y a juste un boîtier qui permet de récupérer l'eau et de la canaliser vers le bief aval. A titre d'information, la centrale Pelton de la Bieudron qui fait partie du complexe Suisse de la Grande Dixence d'une puissance totale égale à 2000MVA

I-9-2-La turbine Francis :

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

La turbine Francis est une turbine à réaction de type radial à axe vertical. et est adaptée pour des hauteurs et débits moyens. Son distributeur est enroulé autour de la turbine, l'entrée de l'eau se fait par toute sa périphérie. La sortie de l'eau se fait de manière axiale dans le diffuseur (qui fait office d'aspirateur).

La figure I-9 représente la turbine Francis.

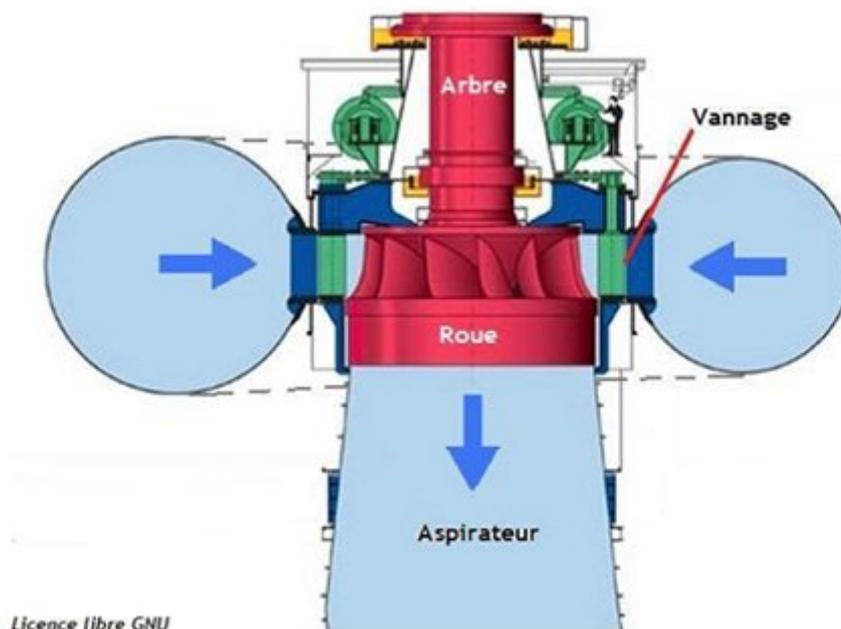


Figure I-12 : Turbine Francis [9]

I-9 -3-Les turbines Kaplan :

Les turbines Kaplan (ou turbines hélice) sont les turbines les mieux adaptées pour les faibles chutes (environ 2m) et des débits importants. Elles conviennent bien pour des débits variables et leur rendement est bon (84-90% maximum) en dépit d'une vitesse de rotation faible. La roue de la turbine Kaplan est semblable à une hélice de bateau et les pâles sont orientables pour optimiser le coefficient de rendement h_t de la turbine.

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

La figure I-13 représente la turbine Kaplan

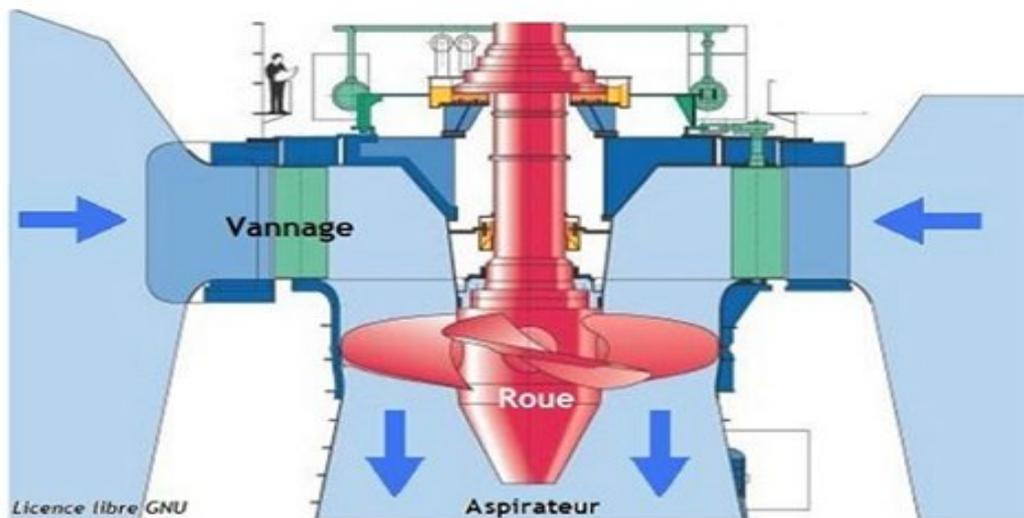


Figure I-13: Turbine Kaplan [9]

I-9-4-Les turbines Banki-Mitchell (Cross flow):

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

- Un injecteur de section rectangulaire et dont le débit est réglé à l'aide d'une aube profilée rotative, similaire à une vanne papillon.
- Une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilée.
- Un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine.

La figure I-14 représente la turbine Cross flow.

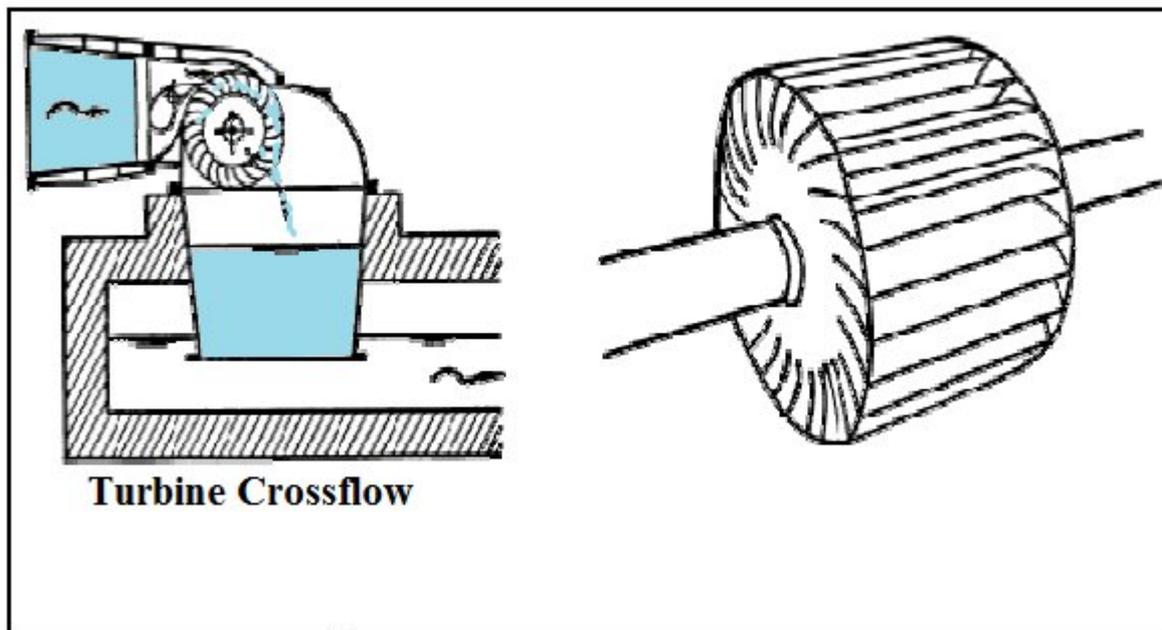


Figure I-14: Turbine Cross flow [9]

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

I-10-Machine asynchrone à double alimentation (MADA) :

La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné dont les enroulements du stator sont directement reliés au réseau électrique. Les enroulements du rotor sont reliés au réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur statique de fréquence en puissance (onduleur/redresseur). La sensibilité élevée de la MADA vis-à-vis des défauts électriques fait apparaître de nombreuses difficultés en termes de respect des spécifications imposées par les opérateurs des réseaux électriques. L'inconvénient majeur de la MADA est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau.

I-10-1-Structure de la machine à double alimentation (MADA) :

La constitution du stator de la MADA est la même pour la machine synchrone ou asynchrone à cage d'écureuil. L'originalité de la MADA provient du fait que le rotor n'est plus à cage, ce dernier est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités reliées à des bagues conductrices

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

I-10-2-Utilisation de la MADA dans la conversion électromécanique :

Contrairement aux machines asynchrones à cage ou aux machines synchrones qui sont contraintes à fonctionner à la vitesse du synchronisme ou dans son voisinage, la MADA est une machine qui offre la possibilité de fonctionner sur large plage de variation de vitesse de rotation.

Par cette caractéristique intéressante, la MADA connaît un succès grandissant dans le domaine de la conversion électromécanique.

I-10-3-Principe de fonctionnement :

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de (Machine Génératrice) vu sa flexibilité de fonctionnement. Grâce à l'accès au rotor et via une interface électronique de puissance, il est possible de contrôler la vitesse de rotation ainsi que le facteur de puissance. [10]

Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques f_r est égale à

g fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine. Avec l'apparition des semi-conducteurs une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et un onduleur permettrait le passage de la puissance de glissement vers le réseau.

I-10-4-Différents mode de fonctionnement de la MADA :

Les modes de fonctionnement de la MADA peuvent être présentés en fonction de glissement g comme suit :

- **Stationnaire ($g=1$)** le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s . Le circuit rotorique est le siège d'une force électromotrice induite de fréquence f_r égale à celle du stator. Dans ce cas la MADA se comporte comme un transformateur.
- **Hypo synchrone ($0 < g < 1$)** on fait tourner le rotor dans la même direction du flux statorique, la fréquence du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor croît, plus la fréquence f_r décroît, par conséquent la tension induite diminue linéairement.
- **Synchrone ($g=0$)** dans ce cas la vitesse mécanique du rotor est égale à celle du champ tournant. Par conséquent la fréquence f_r du rotor est nulle, et il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.
- **Hyper synchrone ($g < 0$)** par davantage d'accélération, la vitesse du rotor s'élève par rapport à celle du champ tournant, par conséquent la fréquence f_r devient négative, ce qui signifie que l'ordre de phase du rotor (a_r, b_r, c_r) s'inverse, ce qui engendre l'augmentation de la tension induite au rotor.

Néanmoins cette machine a quelques inconvénients à savoir :

- Elle est volumineuse qu'une machine asynchrone (MAS) à cage.
- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudié et très connue.
- Usure du système (bagues-balais) et jaillissement d'étincelles lors du frottement des balais sur les bagues.

I-11-Fonctionnement moteur et générateur :

Pour un fonctionnement en génératrice, la MADA requiert un couple sur l'arbre de la machine dans le même sens que le sens de rotation du champ tournant F_s . L'effet de ce couple provoque un décalage en avant des pôles du rotor par rapport aux pôles du stator et par conséquent la force magnétomotrice du rotor F_r est en avance sur les forces magnétomotrices F_s et F (Figure I.15). Le couple électromagnétique de la machine qui s'exerce sur le rotor devient un couple résistant dans le sens contraire du sens de rotation de la machine [11].

Chapitre I : Généralités sur les centrales hydroélectriques

Pour un fonctionnement en moteur, la force magnétomotrice résultante F est en avance sur la force magnétomotrice Fr . Le couple sur l'arbre de la machine est un couple résistant dans le sens contraire de la vitesse de rotation du champ tournant F_s et le couple électromagnétique Tem de la machine est un couple moteur dans le même sens que le sens de rotation.

Chaque mode de fonctionnement requiert une commande appropriée des tensions rotoriques, ce qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine et offrir ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

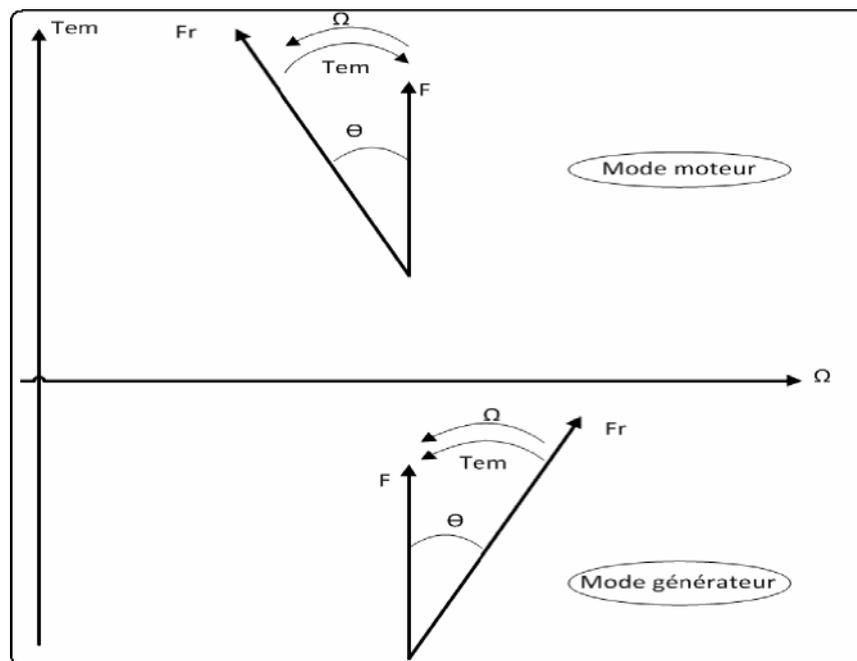


Figure I-15 : Diagramme vectoriel des forces magnétomotrices en mode moteur et générateur [11]

I-12- Transfert de puissance dans la MADA :

La présence du convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler la puissance entre le stator et le réseau. La Figure I.14 montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire du convertisseur. $P_{rés}$ est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_s , la puissance transitant par le stator, P_r , la puissance transitant par le rotor, et P_{mec} , la puissance mécanique.

Pour le transfert de puissance, nous distinguons quatre cas possibles [12]

Chapitre I : Généralités sur les centrales hydroélectriques

➤ Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau au stator. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance P_r (Puissance de glissement) est renvoyée sur le réseau, c'est le fonctionnement moteur hypo synchrone. Les conditions mathématiques qui traduisent ce fonctionnement en négligeant tout les pertes sont :

$$g > 0, \quad P_s > 0, \quad P_{mec} > 0, \quad P_r = g * P_s > 0.$$

La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce fonctionnement, cependant la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

➤ En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique. La puissance est donc fournie à la machine par le stator et le rotor, les conditions mathématiques sont les suivants :

$$g < 0, \quad P_s > 0, \quad P_{mec} > 0, \quad P_r = g * P_s < 0.$$

La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

➤ En fonctionnement générateur hypo synchrone, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. La puissance est fournie au réseau par le stator et une partie de cette puissance transitant par ce dernier est réabsorbée par le rotor. Les conditions mathématiques sont les suivants :

$$g > 0, \quad P_s < 0, \quad P_{mec} < 0, \quad P_r = g * P_s < 0.$$

La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

➤ En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près par le rotor et le stator.

Les conditions mathématiques sont les suivants :

$$g < 0, \quad P_s < 0, \quad P_{mec} < 0, \quad P_r = g * P_s > 0.$$

La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce fonctionnement mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

Chapitre I : Généralités sur les centrales hydroélectriques

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quelque soit la vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement.

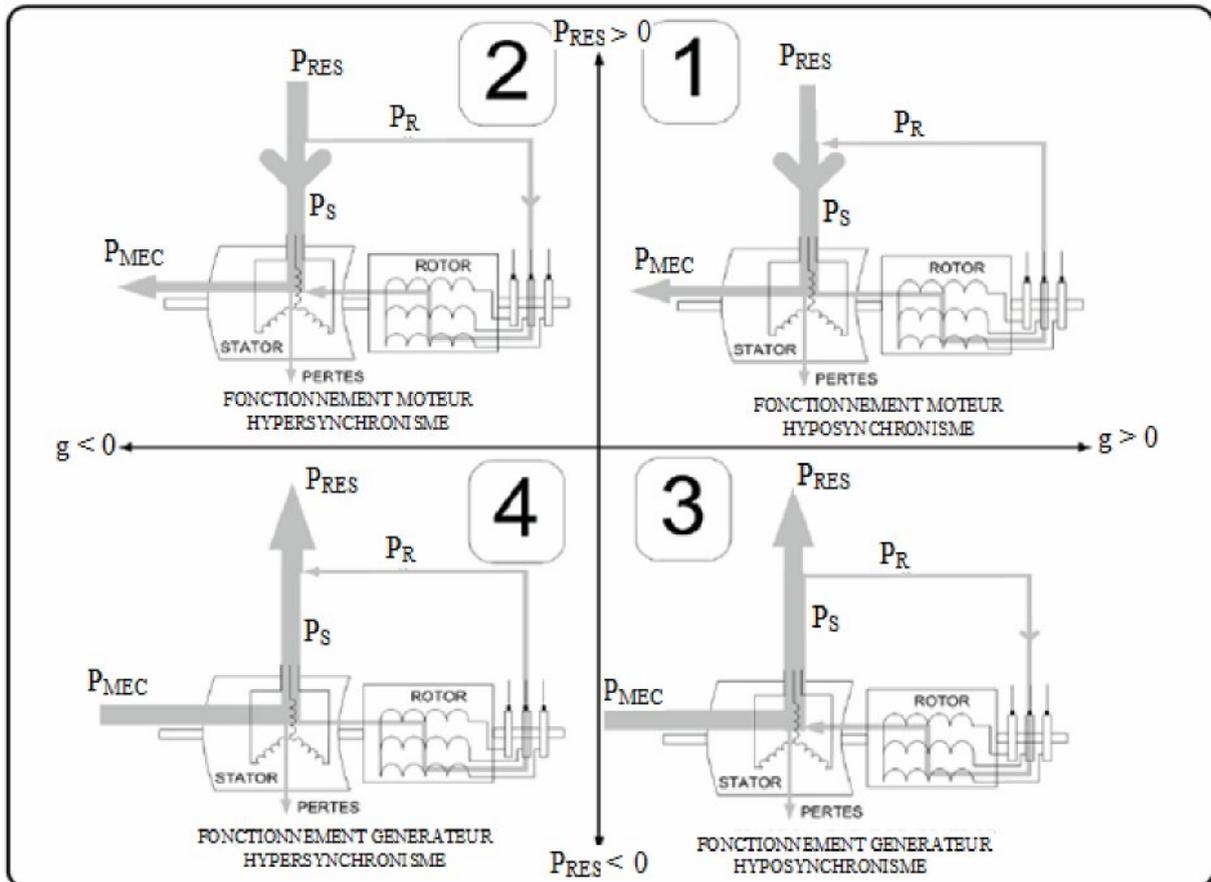


Figure I-16 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation [12]

I-13-Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les centrales hydroélectriques .

Dans ce contexte, quelques notions principales au sujet des STEP ont été données comme le mode de fonctionnement de la centrale, ces constituants avec des explications et les différents types utilisables pour chaque constituant, on a cité aussi les principales centrales qui existe à travers le monde.

II.1. Introduction :

Après avoir présenté les différents composants de la centrale hydroélectrique au chapitre I, nous avons choisi la machine asynchrone à double alimentation à deux convertisseurs statiques commandés en MLI.

Dans ce chapitre, nous modélisons les différents composants de la centrale et nous présentons une commande qui permettra de commander indépendamment les puissances actives et réactives.

II.2. Conventions de signe et équations de base :

Avant de passer à la modélisation, il est nécessaire de définir les conventions de signe qui seront utilisées par la suite.

Il faut noter que dans le cas du hydro générateur, la vitesse de la machine est, par convention toujours considérée positive alors que le signe du couple Électromagnétique change selon le mode de fonctionnement. En ce qui concerne la pompe-turbine, c'est le couple mécanique qui est toujours considéré positif et sa vitesse qui change de signe selon le mode de fonctionnement. Par conséquent, le fait que les vitesses du moto générateur et de la pompe-turbine soient de signes opposés et que les couples C_{mec} et C soient de même signe en mode moteur/pompe, ce qui n'a physiquement aucun sens, est uniquement lié au choix des conventions de signe. Cette particularité est prise en compte en introduisant un rapport de vitesses égal à (-1) entre les masses mécaniques du motogénérateur et de la pompe-turbine, dans le cas où le groupe est exploité en mode moteur/pompe. En mode générateur/turbine, les conventions sont en revanche tout à fait cohérentes. [1]

Les différentes puissances sont définies par les relations suivantes :

$$P_{res-ref} = -\eta P_{mec} = -\eta C_{mec} \Omega \quad (\text{II.1})$$

$$P = C \cdot \Omega \quad \text{Avec} \quad \Omega = \frac{2\pi}{60} \cdot N_r \quad (\text{II.2})$$

$$P_{mec} = C_{em} \cdot \Omega \quad (\text{II.3})$$

$$P_s = C_{em} \cdot \Omega_s \quad (\text{II.4})$$

$$P_{res} = P_s + P_r = (1 - g)P_s = -\eta P_{mec} \quad \text{avec} \quad g = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (\text{II.5})$$

$$P_{res} = P_s + P_r = (1 - g)P_s = -\eta P_{mec} \quad (\text{II.6})$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega = \Sigma C \quad (\text{II.7})$$

Où J est l'inertie totale du groupe

Ces relations ne prennent pas en compte les pertes mécaniques (pertes dans les paliers, pertes frottements, pertes liées au débit de fuite), les pertes dans le hydro générateur (pertes cuivre, pertes fer, pertes frottements et ventilation), ainsi que les pertes dans la cascade rotorique (pertes de commutation et pertes en conduction dans le convertisseur.

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

II.3.1 Modélisation de la Pompe-turbine

La pompe-turbine Francis peut être modélisée par une source de pression qui convertit l'énergie hydraulique en travail mécanique, une inductance relative aux effets d'inertie de l'eau et une résistance modélisant les pertes de charges à travers les aubes directrices. [1].

$$P_h = \rho \cdot Q \cdot H \cdot g \quad (\text{II.8})$$

II.3.2. Modélisation la machine asynchrone à double alimentation :

II.3.2.1. définition de la Machine asynchrone double alimentée :

La machine asynchrone double alimentée est une machine triphasée à rotor bobiné alimentée par ces deux armatures : le stator et le rotor. En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile ou en triangle. La seule différence est que le circuit du rotor est relié à trois bagues sur lesquelles viennent glisser des balais lorsque la machine tourne.

Dans le cas général, la machine est alimentée par deux sources externes de différentes tensions et fréquences. Ces dernières fournissent à la fois l'excitation en termes d'énergie réactive et la puissance active pour le développement du couple nécessaire. Ainsi, les courants du stator et du rotor vont créer deux champs tournants dont leur rotation est fonction des fréquences respectivement imposées par les deux sources d'alimentation. [13]. Comme une machine synchrone, les fréquences imposées par les deux sources externes confèrent à la machine une vitesse de rotation fixe. Afin de garantir un fonctionnement stable de la machine il faut que les champs tournants du stator et du rotor soient fixes l'un par rapport à l'autre, c'est-à-dire satisfaire la relation suivante :

$$\Omega_s = \Omega \pm \Omega_r \quad (\text{II.9})$$

Dans cette expression Ω_s et Ω_r sont respectivement les vitesses du champ tournant du stator et celui du rotor. Le signe supérieur se rapporte au cas où le champ du rotor tourne dans le même sens que le rotor (mode hypo synchrone) et le signe inférieur se rapporte au cas lorsqu'il tourne en sens opposé (mode hyper synchrone).

II.3.2.2. la Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

II.3.2.2.1. Hypothèses simplificatrices

Dans le cas de la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe, on doit tenir compte de sa configuration exacte et certaines hypothèses simplificatrices [14].

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

II.3.2.2.2. Modèle de la machine dans un repère (a,b,c)

La machine asynchrone à double alimentation se compose principalement de deux parties, stator et rotor. Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais. Les trois enroulements du stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre. La Fig.II.1 illustre la distribution des enroulements dans une machine asynchrone à rotor bobiné à un pair de pôle.

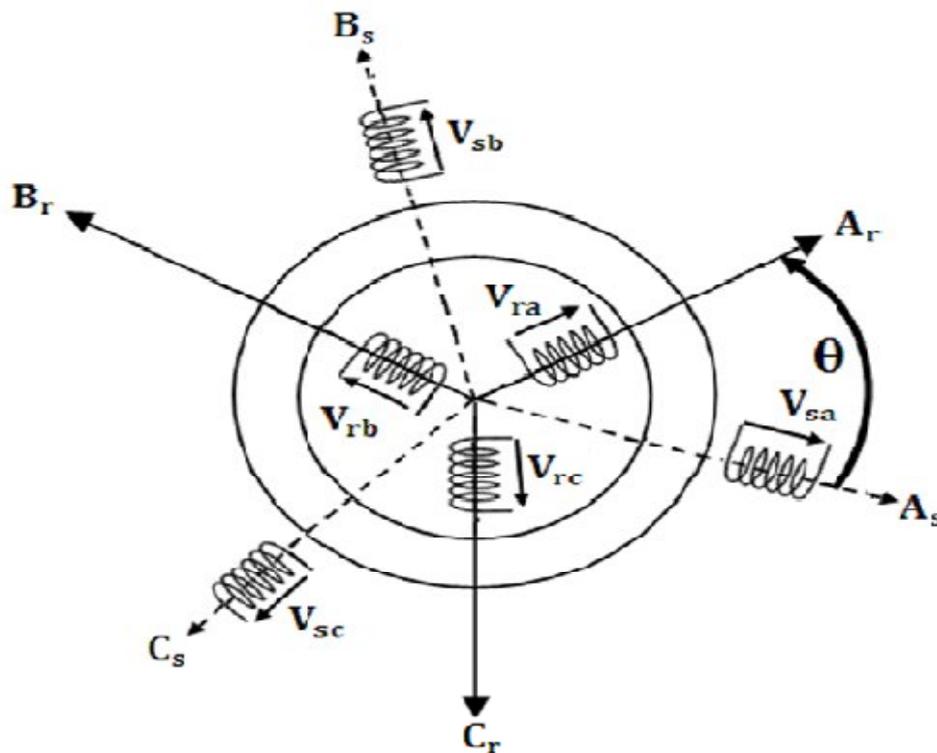


Fig. II.1. Représentation schématique de la MADA [13]

$$\begin{cases} (v_s)_{abc} = [R_s] \cdot (I_s)_{abc} + \frac{d(\phi_s)_{abc}}{dt} \\ (v_r)_{abc} = [R_r] \cdot (I_r)_{abc} + \frac{d(\phi_r)_{abc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Les flux à travers les enroulements, exprimés par rapport aux matrices inductances et aux vecteurs courants sont :

$$\begin{aligned} \psi &= \theta_s \\ \psi &= \theta_r \end{aligned} \quad (\text{II.11})$$

Ces équations présentent une complexité et une non linéarité ce qui rend leurs résolution très difficile. Afin de palier à ce problème, nous modélisons la machine dans un repère diphasé tournant (d, q, o).

II. 3.2.2.3. Modèle diphasé de la MADA dans le repère de Park

La transformation de Park définie par la matrice de rotation P(Y) permet de ramener les variables du repère triphasé naturel (a, b, c) sur les axes d'un repère fictif diphasé tournant (d, q, o).

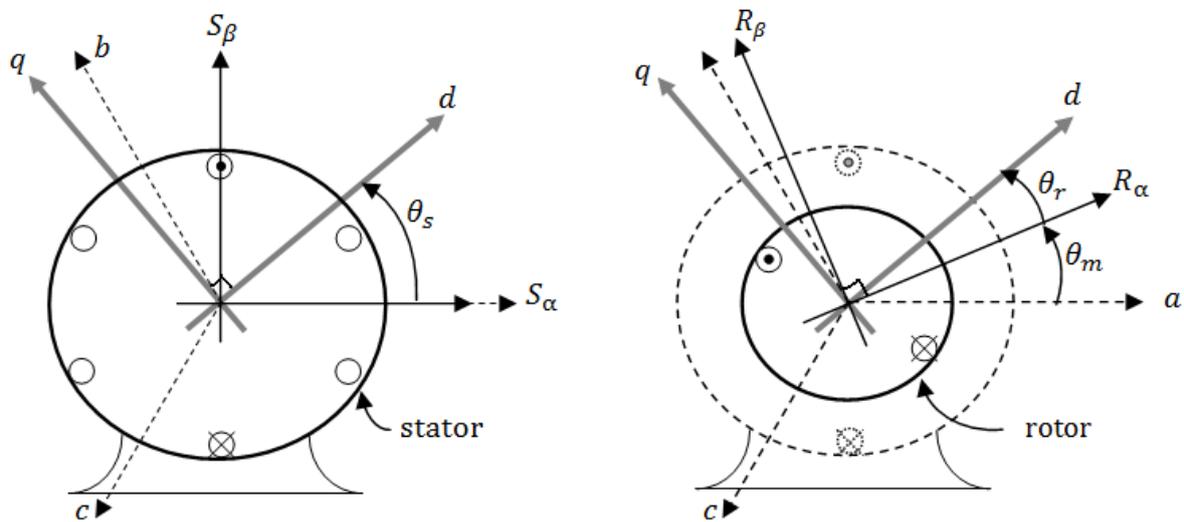


Fig. II.2. Position des différents systèmes d'axes [13]

Le produit matriciel définissant la transformation de Park est exprimée par :

$$[X]_{dq0} = p(\psi) \cdot [X]_{abc} \quad (\text{II.12})$$

Avec

$$p(\psi) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\psi) & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\psi) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$\psi = \theta_s$ (Phase statorique), pour les grandeurs statoriques.

$\psi = \theta_r$ (Phase rotorique), pour les grandeurs rotoriques.

Pour un système équilibré la composante homopolaire est nulle, et en appliquant la transformation de Park aux équations de la machine asynchrone dans le repère naturel, un modèle de la machine est obtenu après calcul, il est représenté sous la forme suivante :

II.3.2.2.3.1 Equations électriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} + \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} - (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} - (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \\ \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

II.3.2.2.3.2 Equations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{ds} = l_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \phi_{qs} = l_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = l_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} = l_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

II.3.2.2.3.2 Équation mécanique

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

C_g : Couple moteur issu du multiplicateur ;

C_{em} : Couple électromagnétique;

C_{vis} : Couple des frottements visqueux ;

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

$$C_{em} = p \left(\phi_{ds} \cdot i_{qs} - \phi_{qs} \cdot i_{ds} \right) \quad (\text{II.20})$$

Avec :

P : nombre de paires de pôles

II.3.2.2.4. Choix du référentiel pour le modèle de Park

En choisissant un référentiel diphasé 'd-q' lié au champ tournant, et en alignant le vecteur flux statorique ϕ_s avec l'axe 'd', nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s \\ \phi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

L'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_s} (\phi_s i_{qr}) \quad (\text{II.22})$$

Dans la production d'énergie hydraulique, on utilise les machines de moyenne, et de forte puissance, sur ceux on peut négliger la résistance statorique et toujours dans la deuxième approche suscitée, on peut écrire les expressions des tensions et des flux Statoriques comme suit :

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

À partir du système d'équations (II.24) nous pouvons exprimées les courants statoriques i_{ds} et i_{qs} en fonction des courant rotoriques i_{dr} et i_{qr} comme suit :

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{\phi_s}{L_s} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

II. 3.2.2.4.1. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :

Les puissances actives et réactives de la MADA, sont exprimées par les relations Suivantes :

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{qs} - v_{ds} i_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

$$\begin{cases} P_r = v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr} \\ Q_r = v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

En remplaçant les courants i_{ds} et i_{qs} par leurs expressions données, dans les relations de puissances statoriques on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q_s = v_s \frac{\phi_s}{L_s} - v_s \cdot \frac{M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

II.3.2.2.4.2. Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions dans les relations (II.25), et on obtient, le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Ces expressions des flux d'axes 'd' et 'q', sont alors portées dans les expressions des tensions rotoriques (II.15), nous obtenons alors :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} i_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{d}{dt} i_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} + g \left(\frac{M V_s}{L_s} \right) \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

En régime permanent, le système d'équations (II.30) écrit :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} + g \left(\frac{M V_s}{L_s} \right) \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Avec v_{dr} et v_{qr} sont des tensions, à imposer au rotor pour obtenir des courants voulus et par conséquent des puissances désirées.

II. 3.2.2.4.3. Expressions de puissances active et réactive de la MADA :

En négligeant les pertes d'énergie active dans le convertisseur statique, les expressions de puissances active et réactive s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} P_{res} = P_s + P_r \\ Q_{res} = Q_s + Q_{rr} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Avec Q_{rr} : la puissance réactive rotorique coté réseau.

Le contrôle des grandeurs rotoriques de la MADA permet, la gestion du transit de puissances entre le générateur et le réseau. Le schéma global du système étudié est représenté par **la figure. II.3.**

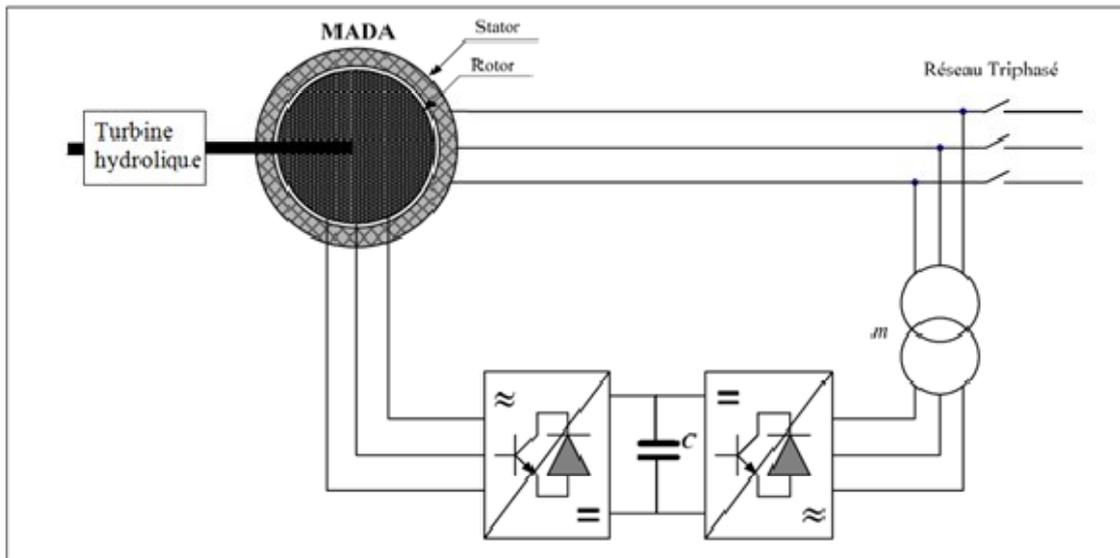


Fig. II.3. Schéma de principe de contrôle des puissances de générateur

II. 3.2.2.4.4. Commande vectorielle en puissance de la MADA

Le but de la commande vectorielle consiste à imposer un fonctionnement de la MADA similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, où le découplage entre le couple et le flux existe naturellement. Pour cela, il faut choisir un système d'axes (dq) et une loi de commande qui assure ce découplage entre les grandeurs à contrôler. Schéma bloc de la commande vectorielle, est montré sur figure. II.4 [8]

Les blocs PI représentent les régulateurs de puissance active et réactive. Le but de ces régulateurs est d'obtenir des performances dynamiques élevées, et une bonne robustesse. Pour atteindre ces objectifs on utilise des régulateurs PI.

$$P_{res_ref} = -\eta \cdot P_{mec} \quad (II.33)$$

Avec : P_{mec} : La puissance mécanique de la turbine

η : le rendement de la MADA.

P_{res_ref} : La puissance de référence du réseau.

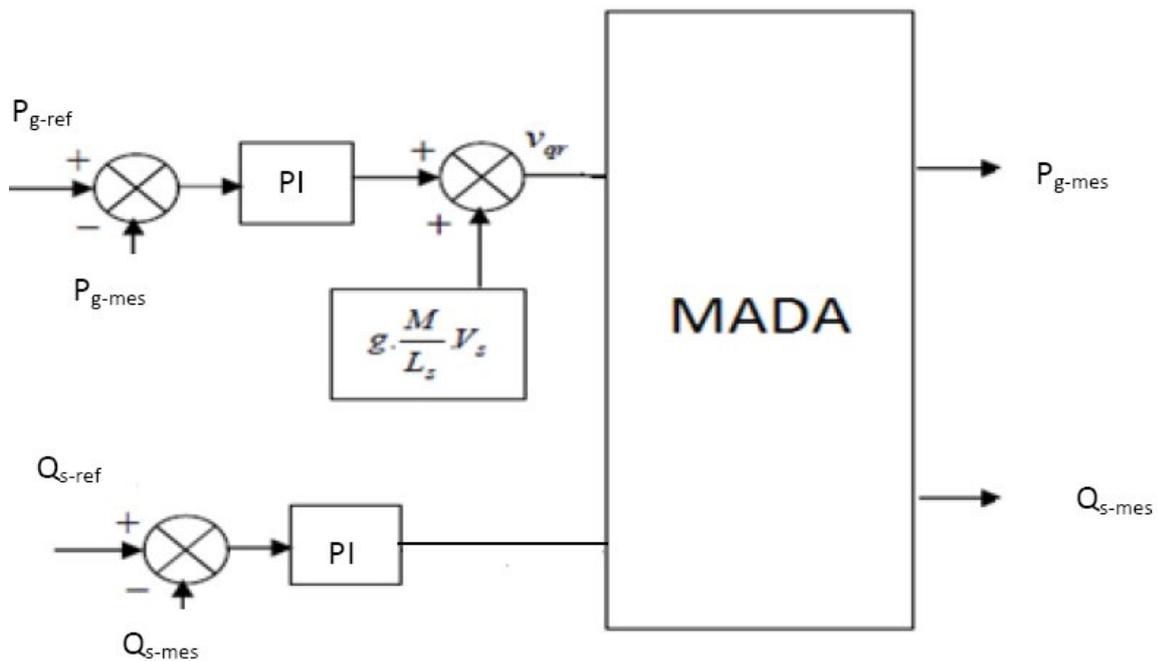
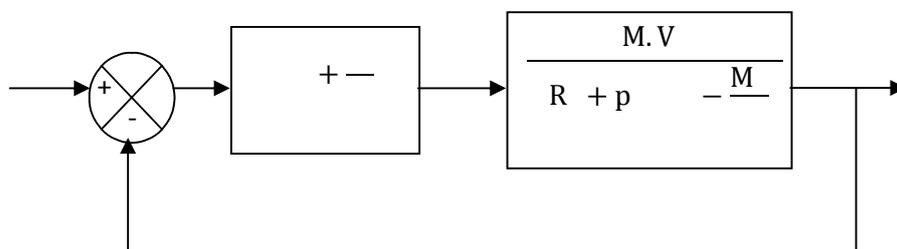


Figure .II.4- Schéma bloc de la commande vectorielle[8]

II.3.3. Synthèse des régulateurs « Proportionnel – intégral (PI) »

Le rôle des régulateurs de chaque axe est d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de référence et les puissances actives et réactives mesurées. Rappelons que la synthèse des régulateurs sera effectuée sur la base de modèle simplifié de la (Figure II -7) Nous avons opté pour le choix des PI vue leur simplicité et la rapidité à maitre en œuvre tout en offrant des performances acceptables [15].



(Figure II – 5) Schéma bloc d'un système régulé par un PI

la fonction de transfert est de la forme $\frac{M.V}{R + p - \frac{M}{p}}$, correspondant aux deux régulateur utilisés dans la (Figure II – 5)

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) s'écrit :

$$G_{BO}(s) = \frac{K \cdot (s + z)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{II 34})$$

Afin éliminer le zéro présent dans la fonction de transfert en boucle ouverte, nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse des régulateurs, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$G_{BO}(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{II 35})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$G_{BO}(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{II 36})$$

La fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) est :

$$G_{BF}(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 + K} \quad \text{avec} \quad K = \frac{1}{T_r} \quad (\text{II 37})$$

Le terme T_r désigne ici le temps de réponse du système. Nous choisissons de fixer celui-ci à 100 ms, ce qui représente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie électrique sur le réseau avec la MADA de 1,5 MW.

Une valeur inférieure est susceptible d'engendrer des régimes transitoires avec des dépassements et des instabilités indésirables.

On peut exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et temps de réponse :

$$K = \frac{1}{T_r} \quad (\text{II 38})$$

$$K = \frac{1}{T_r} \quad (\text{II 39})$$

II.3.4 Modélisation de convertisseur statique

Un convertisseur statique de puissance, est un élément important dans le système d'entraînement. Il transforme le signal de contrôle à l'entrée en un signal de puissance pour la machine. Les récents développements dans les modèles de composants, la conception assistée par ordinateur (CAO) et les semi-conducteurs ont contribué largement à la modélisation des convertisseurs statiques.

Les harmoniques à la sortie du convertisseur causent l'échauffement de la machine ainsi que les pulsations de couple. Par contre, les harmoniques à l'entrée provoquent des perturbations sur le réseau.

Avec la disponibilité des transistors de puissance à coût moindre et le développement des algorithmes MLI, il est devenu possible d'utiliser la technique MLI pour améliorer la forme d'onde du courant d'une machine et par conséquent minimiser des harmoniques provoquant l'échauffement de la machine et les pulsations du couple. [16]

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

- Permet un transfert bidirectionnel de la puissance de glissement entre le rotor et réseau, ce qui permet les fonctionnements en hyosynchrone et hypersynchrone.
- Génère moins ou pas de perturbations sur le réseau électrique par propagation de courants harmoniques [17], [18].

Afin de simplifier le modèle des convertisseurs, en considérant les interrupteurs (IGBT et diode) parfaits. La figure (II.6) représente un onduleur de tension alimenté par une tension continu u .

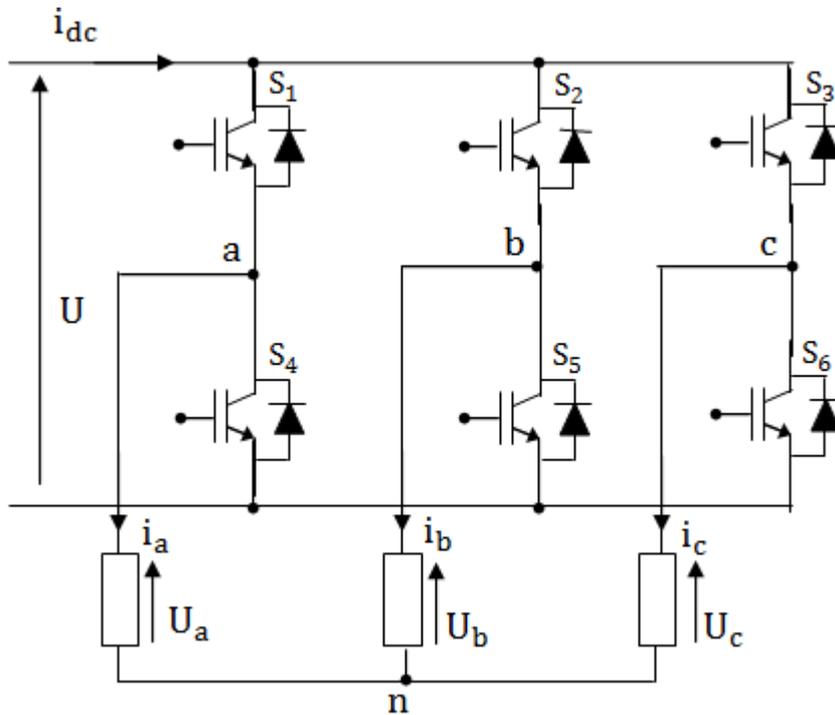


Figure. (II.6)- schémas d'un onduleur de tension triphasé

La loi des mailles nous donne :

$$\begin{aligned} U &= U_a + U_n \\ U &= U_b + U_n \\ U &= U_c + U_n \end{aligned} \tag{II.40}$$

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

$$U_a + U_b + U_c = 0 \tag{II.41}$$

Le potentiel du point neutre est donné par :

$$U_n = -\frac{1}{3}(U_a + U_b + U_c) \tag{II.42}$$

D'où :

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

$$\begin{cases} U_a = U_n = -\frac{1}{3}(2U_a - U_b - U_c) \\ U_b = U_n = -\frac{1}{3}(-U_a + 2U_b - U_c) \\ U_c = U_n = -\frac{1}{3}(-U_a - U_b + 2U_c) \end{cases} \tag{II.43}$$

L'expression de la tension U_i , est en fonction de l'état logique de conduction des interrupteurs du bras de l'onduleur ou il connecté. Soit à noter l'état passant du interrupteur par

$S_i = 1$ Et son état bloque par $S_i = 0$, U_i s'exprime alors par la relation suivante :

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

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

$$\begin{matrix} U \\ U \\ U \end{matrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{matrix} S \\ S \\ S \end{matrix} \quad (\text{II.44})$$

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

$$I_i = [S_a \ S_b \ S_c] \cdot \begin{matrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{matrix} \quad (\text{II.45})$$

II.3.4.1 Commande MLI des convertisseurs

L'objectif de la commande à MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur. Le principe est de comparer un signale triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à une modulante dont la fondamental est à la fréquence de la référence. Le résultat de cette comparaison est le signal MLI qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs du convertisseur. Cette méthode permet d'obtenir de façon simple, les temps de conduction de chaque interrupteur [19].

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

$$m = \frac{f_{ref}}{f_{carrier}} \quad (\text{II.46})$$

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

$$r = \frac{U_{ref}}{U_{carrier}} < 1 \quad (\text{II.47})$$

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

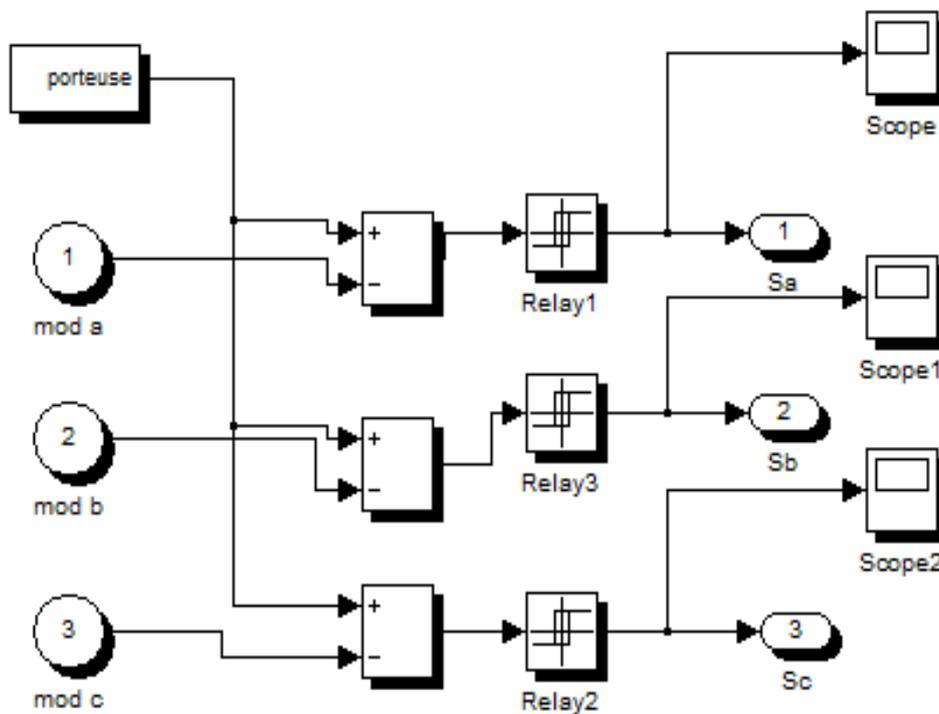


Figure (II.7) Schéma de principe de la MLI

II.3.4.2 Modélisation du bus continu

Le couplage des deux convertisseurs statiques (coté rotor et coté réseau) est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, comme le montre **figure II .8**, il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit. Dans la **figure II .8** est représenté en détaille le bus continu et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur ou sont connectés les deux convertisseurs. [19]

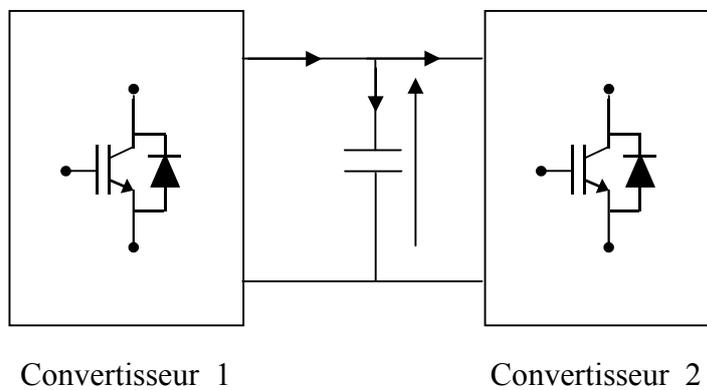


Figure. II.8- schéma du bus continu

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

$$C \frac{dV}{dt} = I \tag{II.48}$$

$$V = \frac{1}{C} \int I dt + V_0 \tag{II.49}$$

$$V(t) = V_0 + \frac{1}{C} \int I dt \tag{II.50}$$

Avec V_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_{ref}).

La synthèse du régulateur est la même que celle présentée précédemment, dont on a

« \dots », donc le régulateur se réduit à un gain pur, il vaut :

$$= \dots \quad \text{(II.51)}$$

: est le temps de réponse désiré de la tension redressée.

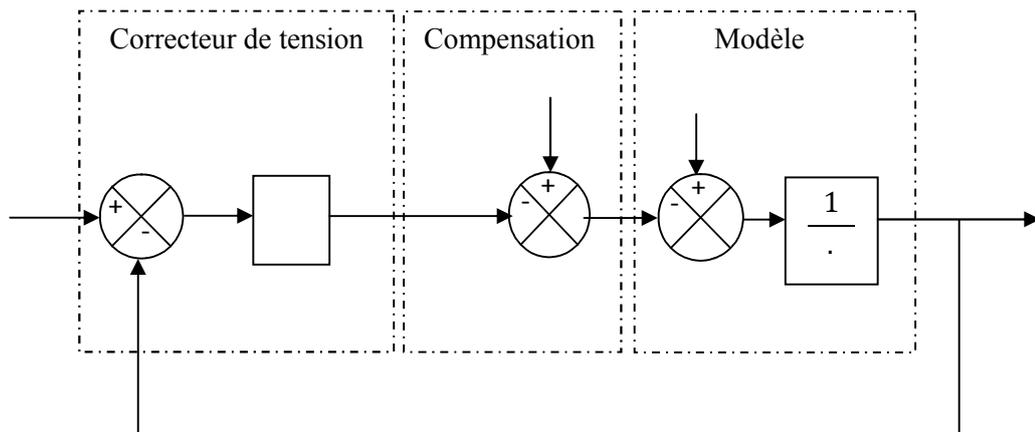


Figure. II.9- régulation de la tension du bus continu

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 :

$$= \dots \quad \text{(II.52)}$$

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

$$= \dots \quad \text{(II.53)}$$

II.3.4.3. Modélisation du filtre

Le schéma de la **figure (II.10)** montre que la liaison au réseau électrique est réalisée via un filtre d'entrée **R-L**.

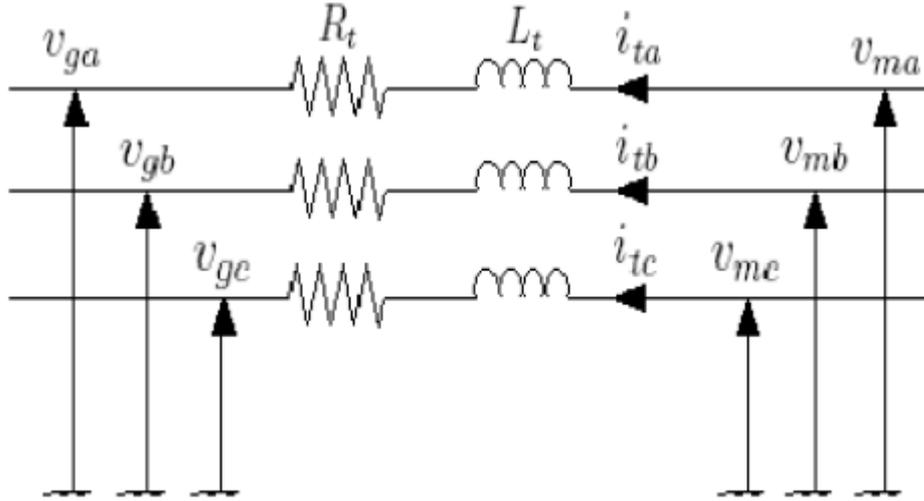


Fig. II.10. Représentation du filtre de liaison RL [8]

L'ensemble des équations liant les tensions modulées et les courants qui transitent le filtre sont regroupées dans l'équation différentielle suivante :

$$\begin{pmatrix} v_{am} \\ v_{bm} \\ v_{cm} \end{pmatrix} = R_t \begin{pmatrix} I_{ta} \\ I_{tb} \\ I_{tc} \end{pmatrix} + L_t \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{ta} \\ I_{tb} \\ I_{tc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.54})$$

En appliquant la transformation de Park, L'équation précédente devient :

$$\begin{aligned} v_{md} - v_g &= (R_t + L_t \cdot s) \cdot I_{td} - \omega_g \cdot L_t \cdot I_{tq} \\ v_{mq} - v_g &= (R_t + L_t \cdot s) \cdot I_{tq} - \omega_g \cdot L_t \cdot I_{td} \end{aligned} \quad (\text{II.55})$$

On considère les tensions de couplage suivantes :

$$\begin{aligned} e_{td} &= v_{gd} - \omega_g \cdot L_t \cdot I_{tq} \\ e_{tq} &= v_{gq} - \omega_g \cdot L_t \cdot I_{td} \end{aligned} \quad (\text{II.56})$$

De cette façon, les courants peuvent être commandés indépendamment l'un de l'autre en agissant sur les tensions d'axe d et q. Une fonction de transfert identique entre les courants et les tensions d'un même axe est obtenue.

$$F(s) = \frac{1}{R_T + sL_t} \quad (\text{II.57})$$

Pour une réponse dynamique plus rapide et pour annuler l'erreur en régime permanent des régulateurs PI sont utilisés.

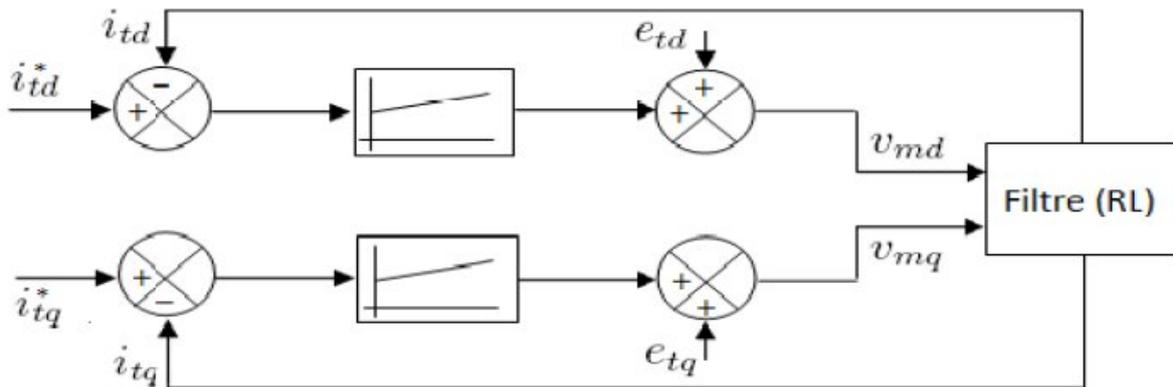


Fig.II.11. Modèle obtenu du filtre dans le repère diphasé (dq).

II.3.4.4. Modélisation du redresseur MLI

La commande du redresseur est réalisée avec la commande MLI, ce qui revient à commander les transistors IGBTs afin d'obtenir une tension continue au bus, la réalisation se fait par une comparaison de la tension du bus a la tension de référence qui est quasi-continue

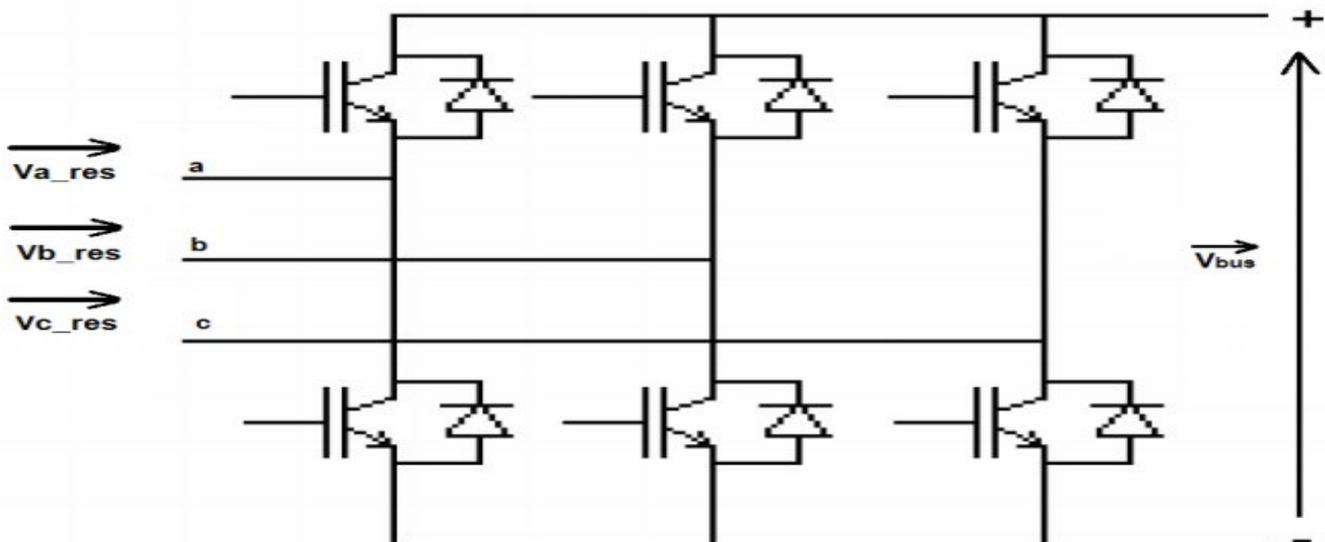


Fig. II.12. Redresseur MLI

Le redresseur MLI est modélisé par la matrice de connexion suivante :

$$\begin{pmatrix} v_{on1} \\ v_{on2} \\ v_{on3} \end{pmatrix} = \frac{E}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (\text{II.58})$$

$$i_{dc} = s_a \cdot i_a + s_b \cdot i_b + s_c \cdot i_c \quad (\text{II.59})$$

v_{dc} : Tension redressée .

i_{dc} : Courant redressée.

II.4.Conclusion :

Ce chapitre fait l'objet de l'établissement de la modélisation des différentes parties d'une centrale hydroélectrique pour des variations du débit d'eau, basée sur une machine asynchrone à double alimentation. On a vu l'intérêt de la transformation de Park qui permet d'avoir un système d'équation différentielle à coefficients constants pour faciliter sa résolution, Ainsi que l'intérêt de l'orientation du flux qui sert à simplifier le modèle de la MADA.

III.1.Introduction

Comme on a cité dans les deux chapitres précédents, les systèmes à vitesse variable sont les plus attrayants de fait de leur rendement énergétique élevé. En effet pour pouvoir extraire le maximum de puissance disponible dans la centrale hydraulique, il faut que la vitesse du rotor de la génératrice varie convenablement avec la variation du débit.

Dans ce présent chapitre nous évaluons le comportement et l'efficacité de la commande élaborée à partir des résultats de simulation des systèmes pompage qui seront présentés.

III .2.Système hydraulique globale

La centrale hydroélectrique réversible utilisée est constituée d'une pompe-turbine de type Francis et d'une machine asynchrone doublement alimentée de puissance nominale de 1.5MW, son stator est directement connecté au réseau par contre son rotor est lié à ce dernier via une cascade de deux convertisseurs bidirectionnels commandés en MLI.

Afin d'améliorer le rendement énergétique de la MADA, on a forcé la puissance réactive statorique à zéro par une référence dans la commande du convertisseur statique coté machine, de même pour la puissance réactive rotorique coté réseau par l'autre convertisseur, par conséquent le facteur de puissance coté réseau est unitaire.

La puissance active de référence injectée au réseau est obtenue comme suit :

- ◀ Pour les valeurs du couple électromagnétique inférieure à celle nominale, l'expression de la puissance de référence est : $P_{res-ref} = -\eta P_{mec} = -\eta K \Omega^3$
- ◀ Pour les valeurs du couple électromagnétique tendent à dépasser sa valeur nominale, l'expression de la puissance de référence est : $P_{res-ref} = -\eta P_{mec} = -\eta C_{mec} \Omega$

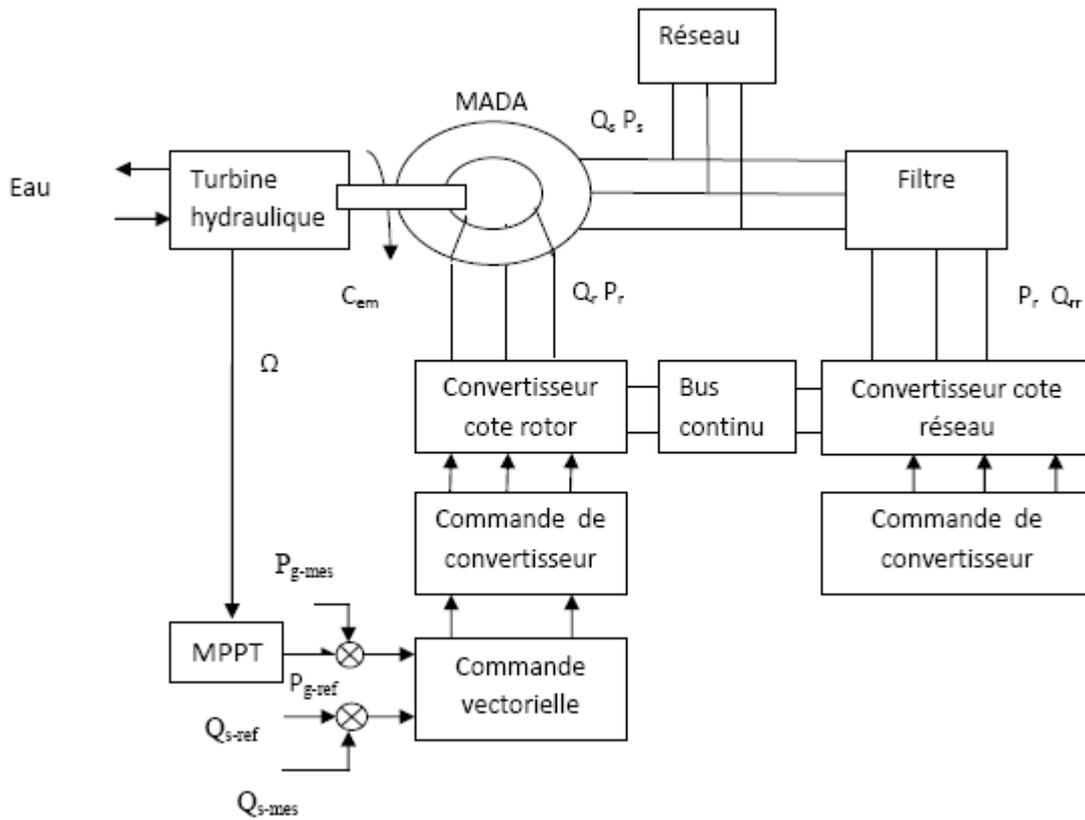


Fig.III.1. Schéma structural de commande du système global

III .3. Résultats de simulation de turbinage

Les résultats de simulation sont obtenus avec le débit volumique illustrée sur la fig.III.2

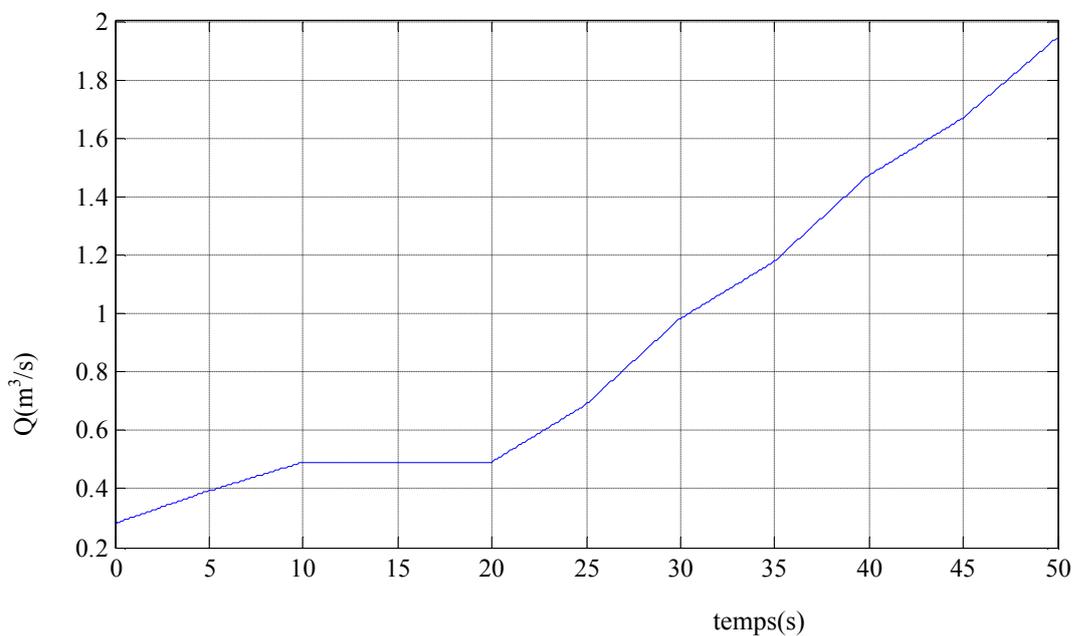


Fig.III.2. le debit volumique

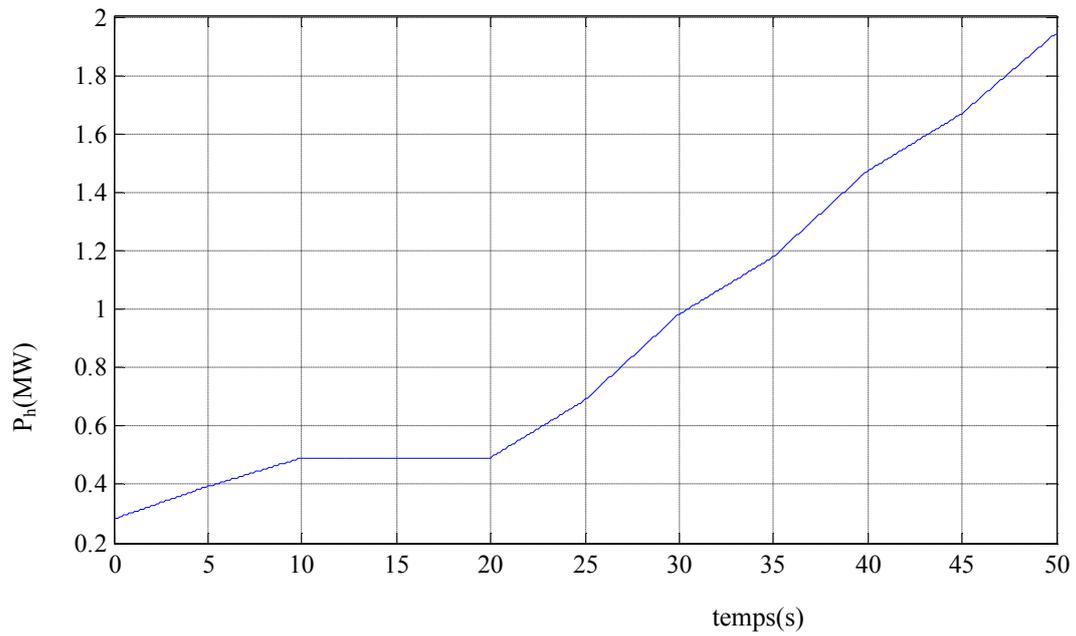


Fig.III.3. la puissance hydraulique de la turbine

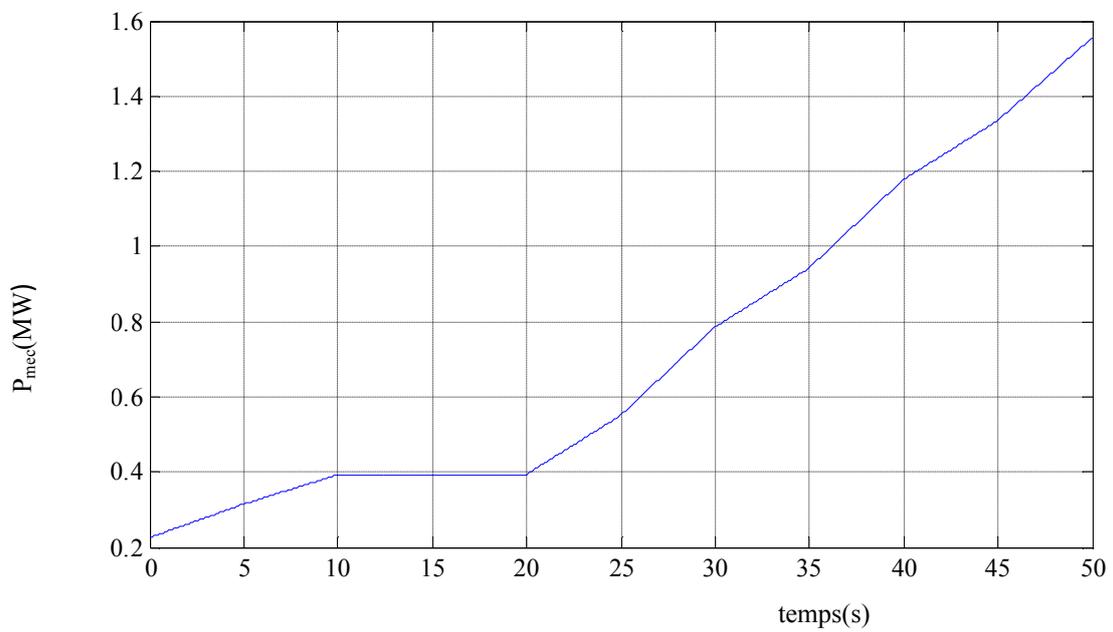


Fig.III.4. la puissance mécanique de la turbine

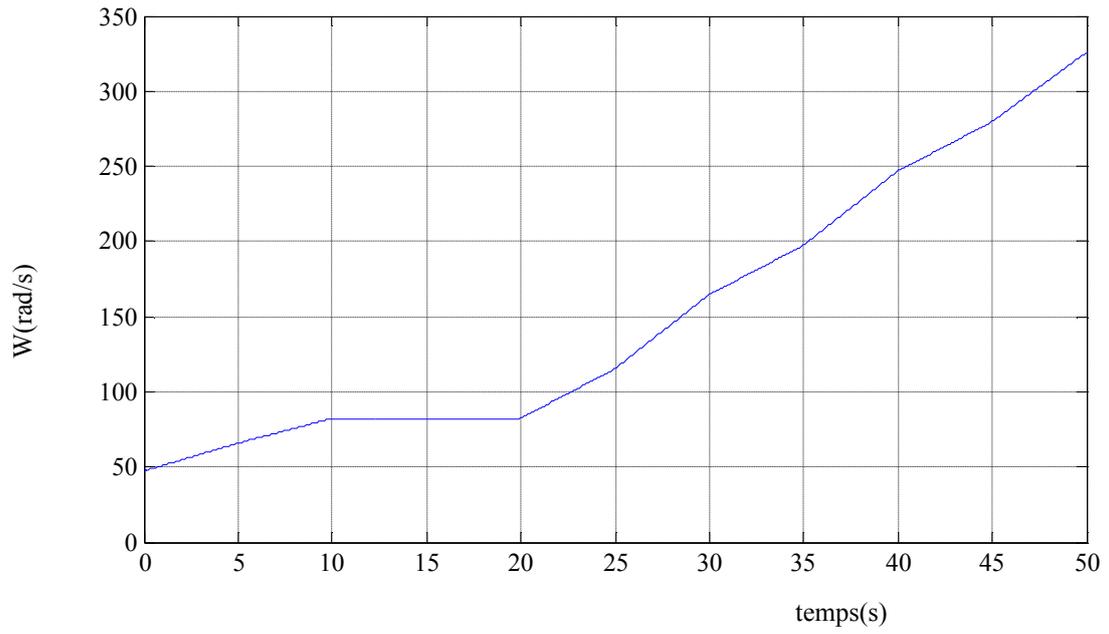


Fig.III.5. vitesse de rotation mécanique

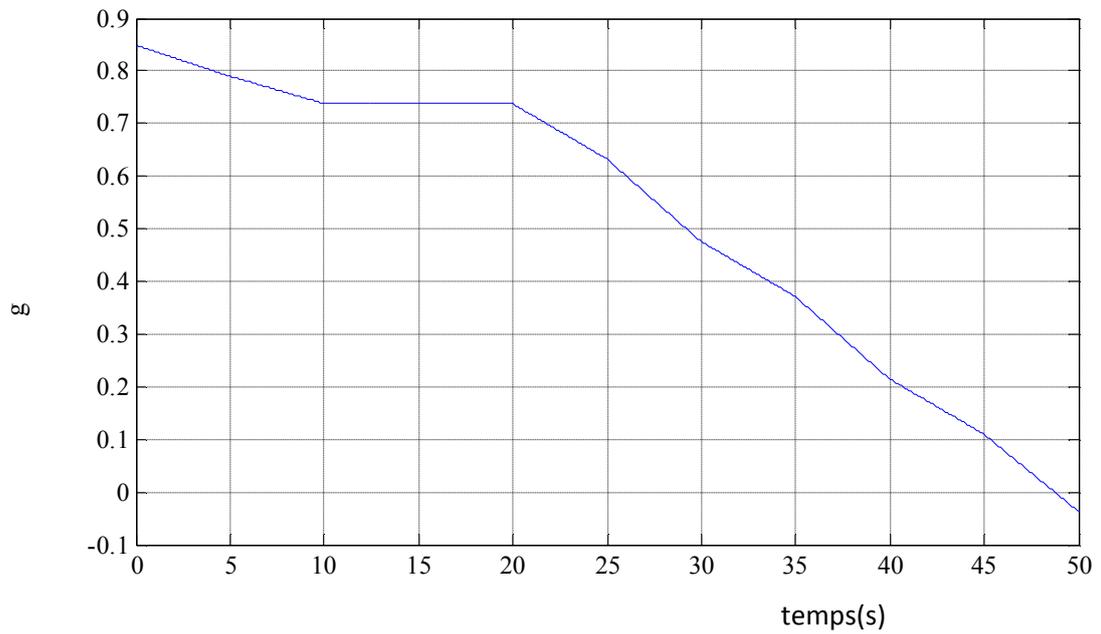


Fig.III.6. Glissement de la génératrice

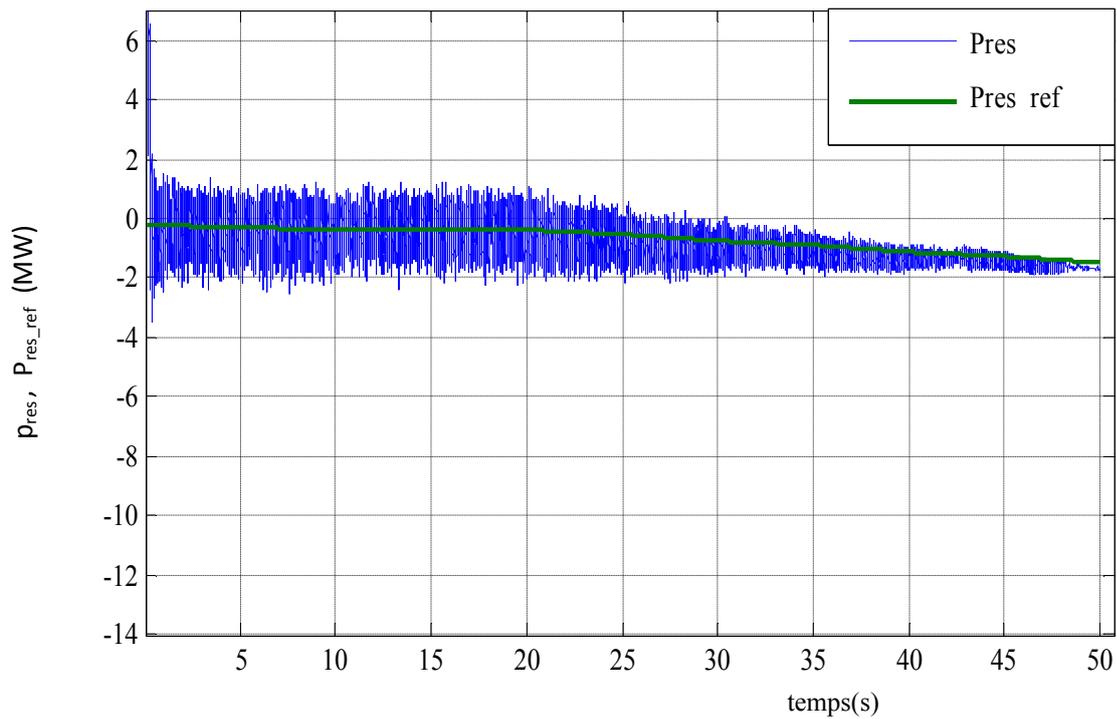


Fig.III.7. la puissance injectée au réseau et sa référence

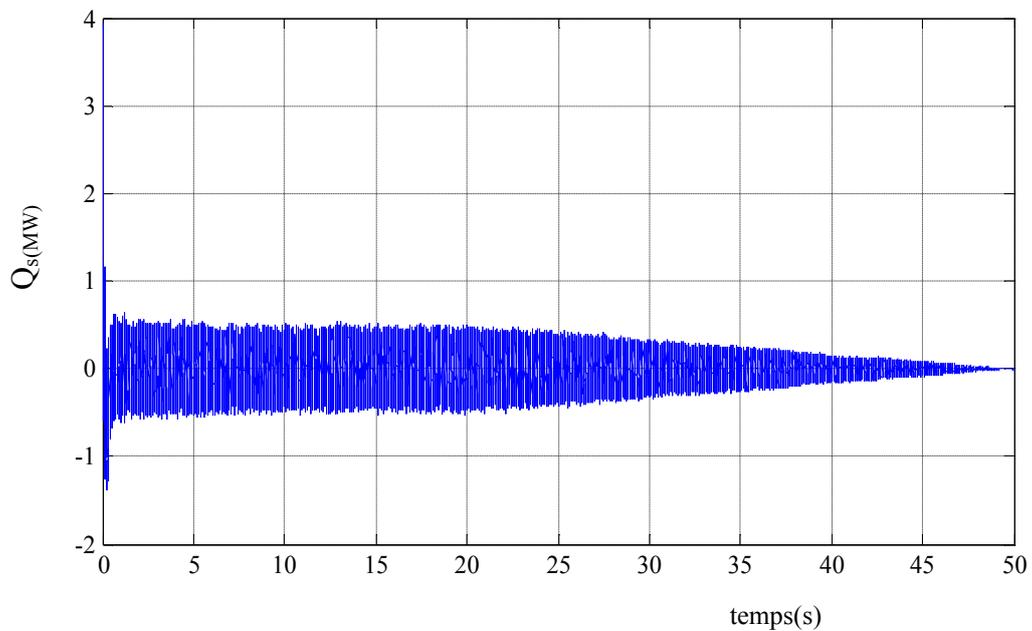


Fig.III.8-la puissance réactive statorique

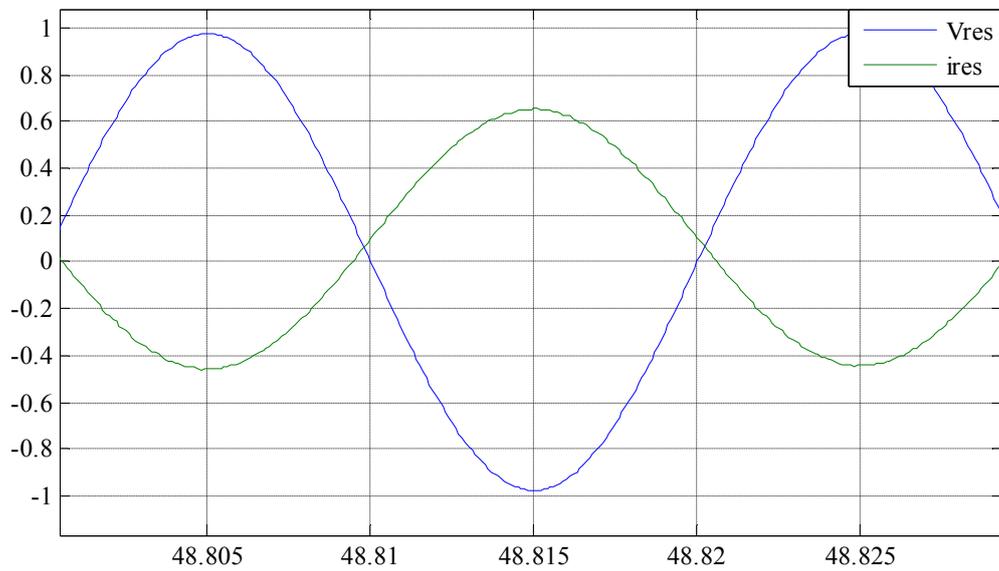
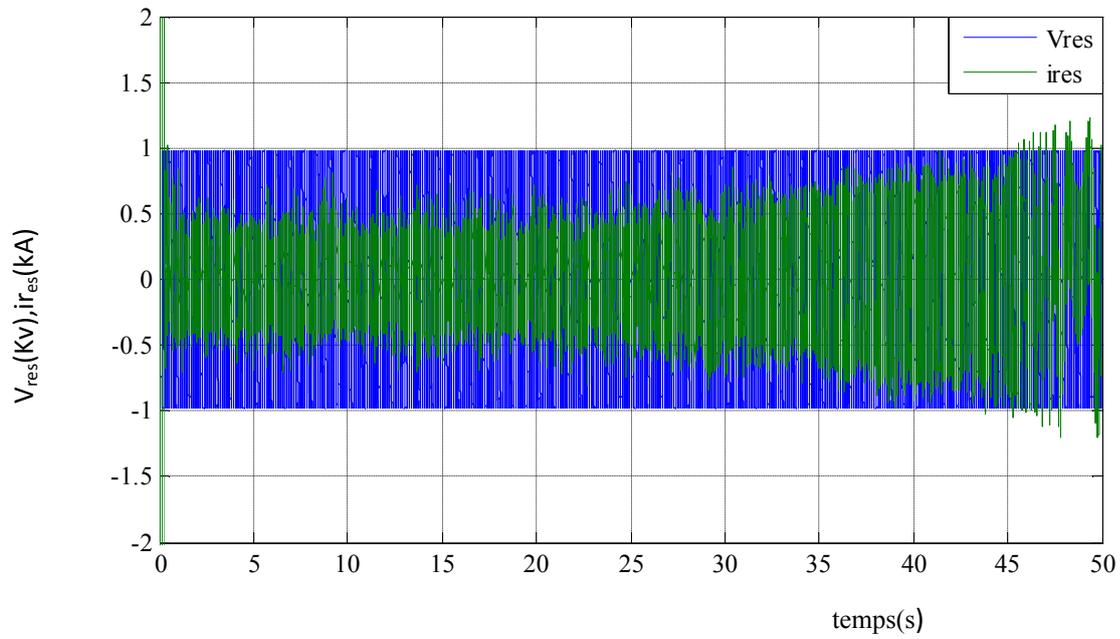


Fig.III.9. la tension et le courant de réseau

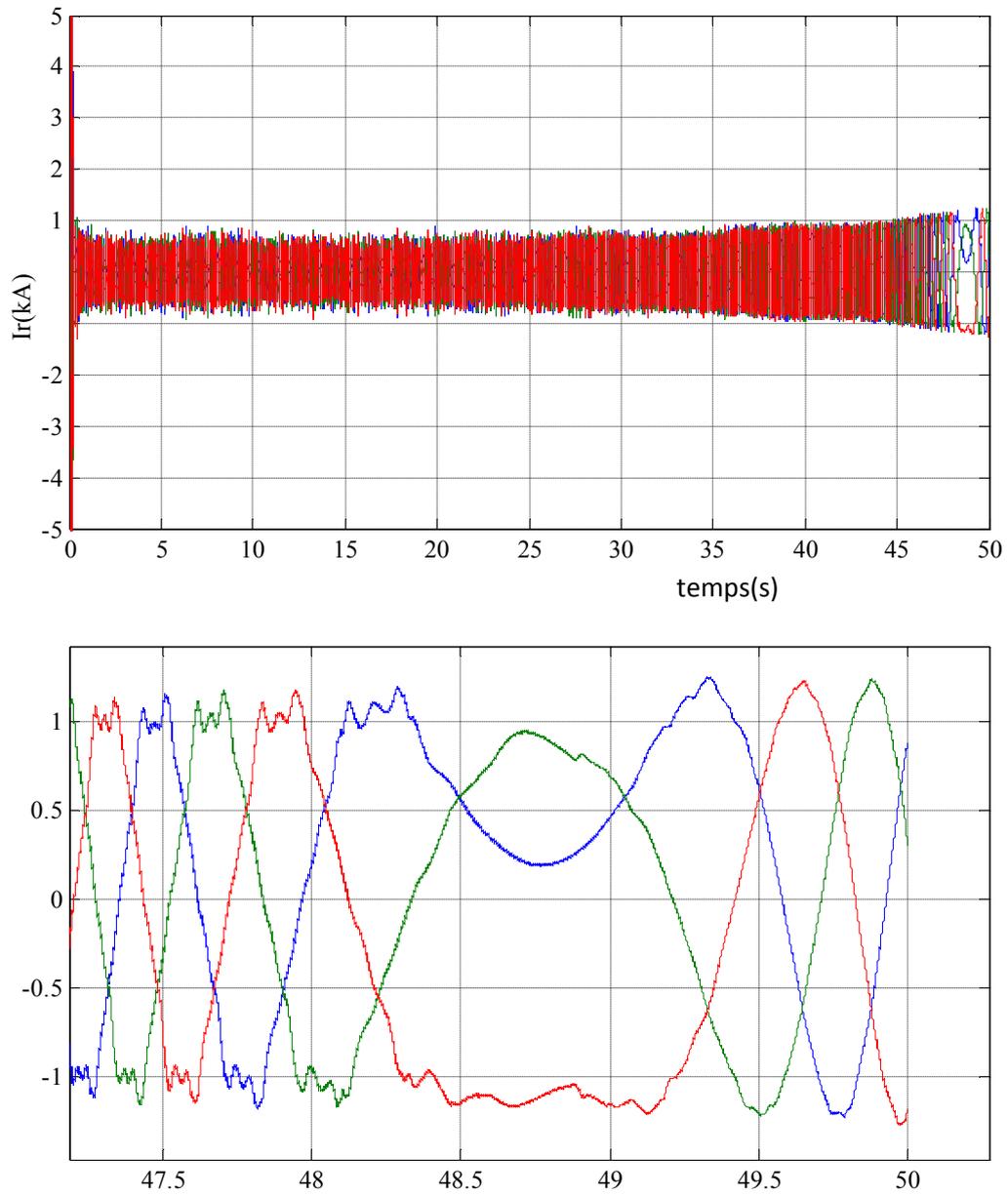


Fig.III.10. les courants rotorique

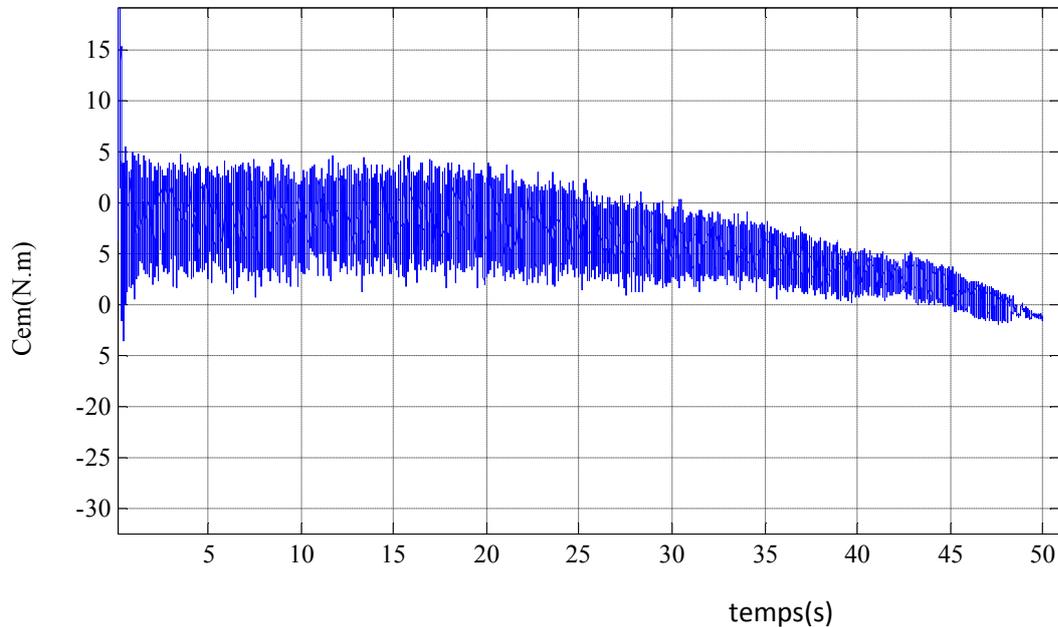


Fig.III.11-le couple électromagnétique

III.4. Interprétation des résultats :

Le comportement dynamique du système étudié est illustré de **la figure 2 a 11**.

La figure **III.4** illustre l'allure du glissement de la MADA qui est l'image de la vitesse mécanique, il varie entre +0.85 et -0.1

La figure **III.7** montre que la puissance injectée au réseau et Suive parfaitement leur référence cela justifie la fiabilité de la commande utilisée

La figure **III.8** la puissance réactive statorique maintenue à 0 par la commande

La figure **III.9** montre que la tension et le courant injecté au réseau sont en opposition de phase, cela signifie que le transit de la puissance active est de générateur au réseau et la puissance réactive de l'hydro générateur est nulle.

La figure **III.10** illustre l'évolution de courant rotorique dont on remarque que sur la période de fonctionnement où le glissement est positif ($g > 0$), dans ce cas le rotor fournit de la puissance active au réseau.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de système turbinage qui montre que la MADA fonctionne dans les quatre quadrants couple-vitesse en mode génératrice et moteur hypo et hyper synchrone. Pour un glissement nul, la MADA fonctionne en génératrice asynchrone synchronisée et le rotor est alimenté par des grandeurs continues, c'est aussi le cas de moteur asynchrone.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et la simulation de turbinage dans une centrale hydroélectrique basée sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA), son stator est connecté directement au réseau et son rotor est alimenté par deux convertisseurs à base d'IGBT commandés en MLI. Ces convertisseurs sont interconnectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'outil utilisé pour arriver à ce but est l'environnement « MATLAB Simulink »

Nous avons présenté dans le premier chapitre des généralités sur les centrales hydroélectriques réversibles.

La présentation de la centrale hydroélectrique réversible, type de machines nous montre l'intérêt que porte la machine asynchrone double alimentée par rapport aux autres machines utilisées.

Dans le deuxième chapitre, on a modélisé les différentes parties de la centrale hydroélectrique réversible, et on a vu l'intérêt de la transformation de Park qui permet d'avoir un système d'équations différentielles à coefficients constants pour faciliter leur résolution, ainsi que l'orientation de flux qui sert à simplifier le modèle de la MADA. Cette modélisation nous permet aussi d'aboutir à des schémas blocs qui seront exploités dans le dernier chapitre pour la simulation de système turbinage.

Dans le troisième chapitre, une simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink de système global turbinage a été effectuée. Les résultats obtenus montrent le bon fonctionnement du système utilisé et la fiabilité de l'approche de la commande élaborée.

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

- Utilisation des commandes non linéaires (mode glissant, logique floue, ...).
- Remplacer les convertisseurs à deux niveaux par des convertisseurs multi-niveaux.
- Des tests pratiques et ce pour corroborer les résultats théoriques.

Annexe

Paramètre de la MADA

Puissance nominale Pn	: 1.5 MW
Tension d'alimentation	: 690V 50Hz
Nombre de paire de pole P	: 2
Résistance d'enroulement statorique Rs	: 0.012Ω
Résistance d'enroulement rotorique Rr	: 0.021Ω
Inductance cyclique statorique Ls	: 13.732mH
Inductance cyclique rotorique Lr	: 13.703mH
Inductance magnétisante M	: 13.528mH

Paramètres des régulateurs PI

Gain proportionnel de correcteur de puissance Kp	: 5 .531 e-6
Gain intégral de correcteur de puissance Ki	: 3.09 e -6

Paramètre du bus continu

Valeur de la capacité c	: 5000μF
Gain proportionnel du correcteur Kp	: 2

Paramètres du filtre

Resistance du filtre de liaison au réseau	: 0.5 mΩ
Inductance de filtre de liaison au réseau	: 0.2mH

BIBLIOGRAPHIE

[1] : Y. pannatier, (optimisation des stratégies de réglage d'une installation de pompage-turbinage à vitesse variable) ; thèse de Doctorat à l'école polytechnique Fédéral de Lausanne ; 2010

[2]:http://www.hydroquebec.com/production/hydroelectrique/saint_laurent/beauharnois/index.html

[3]:http://www.industrie.gouv.fr/energie/hydro/fl_hydro.htm

[4] : C.Felat. (le stockage hydraulique gravitaire et production hydroélectrique sur les pentes réunionnaises – Etude du stockage de l'énergie photovoltaïque). www.island-news.org, 2009

[5]: S. Müller, M. Deicke, R.W. De Doncker, (Doubly fed induction generator systems for wind turbines). IEEE. Industry Applications magazine, pp. 26-33, 2002.

[6]: C. R. Kelber and W. Schumacher, (Adjustable Speed Constant Frequency Energy Generation with Doubly-Fed Induction Machines,) VSSH y 2000 - European Conference Variable Speed in Small Hydro; Grenoble, France; 26-28, 2000.

[7] : Ph. D Nguyennhoc, (optimisation de systèmes de production intermittents et non conventionnels couplés au réseau électrique) ; thèse de doctorat à l'université de Grenoble ; 2006

[8] : (Petites centrales hydrauliques – les turbines hydrauliques) rapport Programme d'action PACER – Energies renouvelables en suisse ISBN 3-905232-55-3

[9] : Rapport (PACER), en Suisse (Petites centrales hydrauliques –le choix, le Dimensionnement et les essais de réception d'une mini-turbine), ISBN 724.747.f 1995.

[10] : F.poitier. (Étude et commande de génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne), thèse de doctorat de l'université de nant, 2003

[11] : T.Wildi, «Électrotechnique». Les presses de l'université Laval, 2008

[12]: M. Ermiq, Cadirci.I, (Double-output induction generator operating at subsynchronous and supersynchronous speeds: steady-state performance optimization and wind-energy recovery). IEE PROCEEDINGS-B, Vol. 139, No. 5, 1992.

[13] F.Abdoune, « Etude et contrôle des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à rotor bobiné », mémoire de Magister en électrotechnique de l'université de Béjaia 2011.

[14] M.CHALALI et N.KHIRI. Etude d'une éolienne vitesse variable basée sur une machine asynchrone double alimentée par un convertisseur matricielle .Mémoire ingénieur de l'université de Bejaia, 2006.

[15] A. BOYETTE, «*Contrôle, commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne*», thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy1, Décembre2006.

[16] K.SEDDIK ET M.CHOUAIB, **réglage** des puissances active et réactive de la génératrice asynchrone par des régulateurs en mode de glissant, thèse d'ingénieure université Med Boudiaf de M'sila ,2005.

[17] GUEZGOUZ Ali et KORICHI Lyes « commande en mode glissant de la MADA dans une éolienne à vitesse variable connectée au réseau » mémoire d'ingénieur d'état université de Bejaia 2008/2009.

[18] L. KHATTACHE, «*étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée*», mémoire de magister, Université de Batna, 2007.

[19] Bousca)Tol A, Davat B, de Fomel B, et al. Multimachine Multiconverter System: application for electromechanical drives. European Physics Journal - Applied Physics, 2000, 10(2): 131-147.

