

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira - 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

Thème

*Etude d'une centrale hydroélectrique
réversible*

Elaboré par :

Mr. OUALI SALIM

Mr. ALILI LEMNAOUER

Encadré par :

Mr. S.TARAFT

Mr. D.AOUZELLAG



Promotion 2012

REMERCIEMENTS

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force physique et morale pour accomplir ce travail.

Nous remercions sincèrement nos encadreurs : Mr S. TARAFT et Mr D.AOUZELLAG pour leurs aides, leurs encouragements et leurs patience ainsi pour leurs conseils précieux pendant la période de la réalisation de ce modeste travail.

Nous remercions également tous les membres du jury qui ont accepté de participer à la valorisation de ce travail.

Et enfin nous tenons vivement à remercier nos familles et tous nos amis.

Sommaire

Introduction générale	9
Chapitre I : Généralités sur les centrales hydroélectriques réversibles	
I.1 Introduction	11
I.2. Station de transfert d'énergie par pompage.....	11
I.3. Utilisation des centrales hydroélectriques réversibles.....	12
I.4. Définition de l'énergie gravitaire.....	12
I.5. Constitution d'une station de transfert d'énergie par pompage	12
I.5.1. Bassin.....	12
I.5.2. Turbines	13
I.5.2.1. Turbine Pelton.....	14
I.5.2.2. Turbine Crossflow (ou Banki Mitchell).....	14
I.5.2.3. Turbine Francis	15
I.5.2.4. Turbine Kaplan.....	15
I.5.3. Pompes.....	16
I.5.4. Conduites forcées.....	17
I.5.5. Générateurs (moteurs-alternateurs).....	18
I.5.6. Transformateurs.....	19
I.5.7. Raccordement au réseau.....	19
I.6. Contexte du stockage hydraulique gravitaire à l'échelle internationale.....	19
I.7. Comparaison entre les différents types de groupes à vitesse variable.....	20
I.8. Machines asynchrones à double alimentation.....	22
I.8.1. Structure de la machine à double alimentation (MADA).....	22
I.8.2. Utilisation de MADA dans la conversion électromécanique.....	22
I.8.3. Principe de fonctionnement.....	22
I.8.4. Différents modes de fonctionnement de la MADA.....	23
I.8.5. Avantages et inconvénients de la MADA.....	24
I.8.5.1. Avantages de la MADA.....	24
I.8.5.2. Inconvénients de la MADA.....	25
I.9. Conclusion.....	25

Chapitre II : Modélisation des différentes parties d'une centrale hydroélectrique réversible

II.1. Introduction.....	26
II.2. Conventions de signe et équations de base.....	26
II.3. Modélisation de la Pompe-turbine.....	28
II.4. Machine asynchrone double alimentée.....	29
II.5. Modélisation de la machine à double alimentation (MADA) et sa commande.....	29
II.5.1. Hypothèses simplificatrices	29
II.5.2. Modèle de la machine dans un repère (a,b,c).....	30
II.5.3. Modèle diphasé de la MADA dans le repère de Park.....	31
II.5.3.1. Equations électriques.....	32
II.5.3.2. Équations magnétiques.....	32
II.5.3.3. Équation mécanique.....	32
II.5.4. Choix du référentiel pour le modèle de Park.....	32
II.5.4.1. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	33
II.5.4.2 Relations entre tensions et courants rotoriques.....	34
II.5.4.3 Expressions de puissances active et réactive de l'aérogénérateur.....	34
II.5.4.4. Commande vectorielle en puissance de la MADA.....	35
II.6. Synthèse des régulateurs PI.....	36
II.7. Modélisation de convertisseur statique.....	38
II.7.1. Modélisation du redresseur MLI.....	38
II.7.2. Modélisation de l'onduleur MLI.....	39
II.7.3. Commande MLI des convertisseurs.....	41
II.7.4. Modélisation du bus continu.....	41
II.7.4. Modélisation du filtre.....	42
II.8. Conclusion.....	44

Chapitre III : Simulation des systèmes de pompage et turbinage d'une centrale hydroélectrique réversible

III.1. Introduction.....	45
III.2. Système hydraulique globale.....	45
III.3. Simulation de turbinage.....	46
III.3.1. Interprétation des résultats.....	51
III.4. Simulation de pompage.....	51

III.4.1. Interprétation des résultats.....	55
III.5. Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	56
Annexe.....	57
Bibliographie.....	58

Liste des figures

Chapitre I

I.1. Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques réversibles.....	11
I.2. Type de turbines en fonction de la hauteur manométrique, de la puissance et du débit...	13
I.3. Schéma de fonctionnement d'une turbine Pelton.....	14
I.4. Schéma de fonctionnement d'une turbine Banki-Michelle.....	14
I.5. Schéma de fonctionnement d'une turbine Francis.....	15
I.6. Schéma de fonctionnement d'une turbine Kaplan	15
I.7. Exemple de conduite forcée aérienne.....	18
I.8. Types d'installations à vitesse variable.....	21
I.9. Modes opérationnels caractéristiques de la MADA.....	24

Chapitre II

II.1. Sens des puissances définies positives.....	26
II.2. Schéma électrique équivalent de la pompe-turbine Francis.....	28
II.3. Représentation schématique de la MADA.....	30
II.4. Position des différents systèmes d'axes.....	31
II.5. Schéma de principe de contrôle des puissances de générateur.....	35
II.6. Schéma de bloc de la commande vectorielle.....	36
II.7. Schéma bloc d'un système régulé par un PI.....	36
II.8. Schéma d'un convertisseur statique.....	38
II.9. Redresseur MLI.....	39
II.10. Représentation schématique d'un onduleur MLI.....	40
II.11. Schéma du bus continu.....	41
II.12. Régulation de la tension du bus continu.....	42
II.13. Représentation du filtre de liaison RL.....	43
II.13. Modèle obtenu du filtre dans le repère diphasé (dq).....	44

Chapitre III

III.1. Schéma structural de commande du système global.....	45
---	----

III.2. Puissance mécanique de la turbine.....	45
III.3. Vitesse mécanique.....	46
III.4. Glissement de la génératrice.....	46
III.5. Puissance active transité au réseau et sa référence.....	46
III.6. Puissance réactive statorique et sa référence.....	46
III.7. Puissance active statorique.....	47
III.8. Puissance active rotorique.....	47
III.9. Puissance réactive transité au réseau.....	47
III.10. Puissance réactive rotorique coté réseau.....	48
III.11. Couple électromagnétique.....	48
III.12. Tension et courant d'une phase de réseau.....	48
III.13. Tension et courant d'une phase rotorique.....	49
III.14. Courant statorique.....	50
III.15. Puissance mécanique de la turbine.....	50
III.16. Vitesse mécanique.....	51
III.17. Glissement du moteur.....	51
III.18. Puissance active d'une phase réseau et sa référence.....	51
III.19. Puissance réactive statorique et sa référence.....	51
III.20. Puissance active statorique.....	52
III.21. Puissance active rotorique.....	52
III.22. Puissance réactive transité au réseau réseau.....	52
III.23. Courant et tension d'une phase de réseau.....	53
III.24. Courant et tension d'une phase rotorique.....	53
III.25. Couple électromagnétique.....	54

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_{g-mes}	Puissance active mesurée de réseau [W].
Q_{g-mes}	Puissance réactive mesurée de réseau [VAr].
P_{g-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].

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].
ω_s	Vitesse du champ tournant statorique [rd/s].
ω_r	Vitesse champ tournant du rotor [rd/s].
P	Nombre de paires de pôles de la génératrice.
L_s, L_r	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].
u_0	Tension initiale du condensateur [V].
I_c	Courant qui traverse le bus contenu [A].
u_c	Tension aux bornes du condensateur (V)
V_s	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/s²].
- Q Débit volumique d'eau [m³/s].

Indices

- ref indique la valeur référence
- mes indique la valeur mesurée
- n indique la valeur nominale

Introduction générale

La consommation d'électricité, qui est en constante augmentation, varie passablement selon les heures (jour/nuit), les jours (semaine/week-end) ou encore les saisons (été/hiver). Or un grand pourcentage de la production, appelé production de base, est assuré par des centrales thermiques, nucléaires ou encore au fil de l'eau qui ne sont techniquement exploitables qu'à puissance quasiment constante. Il s'avère donc nécessaire de pouvoir stocker l'énergie électrique de manière à couvrir les multiples fluctuations de la demande. En outre, le développement des énergies renouvelables et plus particulièrement la multiplication des sites éoliens importants, dont la production varie fortement suivant les conditions de vent, nécessite des capacités de stockage de plus en plus considérables.

Une alternative très intéressante au stockage d'énergie électrique, qui n'est pas économiquement envisageable pour de grandes quantités d'énergie, 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.

La plupart des installations de pompage-turbinage actuellement en service sont équipées de machines synchrones et fonctionnent donc à vitesse fixe. La flexibilité et les performances dynamiques de ce type de centrale peuvent néanmoins être significativement améliorées en optant pour une technologie à vitesse variable. En effet elle présente plusieurs avantages comparativement à la solution à vitesse fixe.

- Meilleur rendement à charge partielle et plus grande plage de fonctionnement en mode turbine

Les centrales de pompage-turbinage sont habituellement équipées de pompes-turbines de type 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 chute et le débit de sorte à maximiser le rendement.[6]

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

Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les centrales à pompage-turbinage, on a commencé par la présentation de la centrale, ces différentes parties et les domaines d'utilisation.

Dans le deuxième chapitre nous présentons la modélisation de la turbine-pompe, 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 et celui de pompage.

Enfin, nous présentons une conclusion générale et quelques perspectives.

I.1. Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur la production et le stockage d'énergie électrique d'origine hydraulique (Le stockage sous forme d'énergie gravitaire ou Station de Transfert d'Energie par Pompage (STEP)). Où on va citer les domaines d'utilisation des centrales, leurs constitutions et enfin une comparaison entre les groupes à vitesse variable.

I.2. Station de transfert d'énergie par pompage

Cette technique est ancienne et nommée aussi stockage par pompage hydraulique. Ce système de stockage est constitué de deux grands réservoirs situés à des hauteurs différentes, l'eau est pompée du réservoir inférieur au réservoir supérieur. L'eau pompée revient au bassin inférieur selon la demande toute en traversant une ou plusieurs turbines qui transforment l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique, cette dernière est régie par la formule ($w=mgh$), puis des générateurs entraînés par ces turbines transforment l'énergie mécanique en énergie électrique (voir la figure I.1).

Cette technique de stockage nous fournit jusqu'à 1000 MW, mais ils sont conditionnés par les contraintes géographiques, géologiques, environnementales et le coût assez élevé de leur construction. Ce dispositif ne peut pas être implanté au voisinage des centres de consommation et ils sont difficilement transportables.[1]
En général, le rendement associé à cette technique de stockage est de l'ordre 75%.

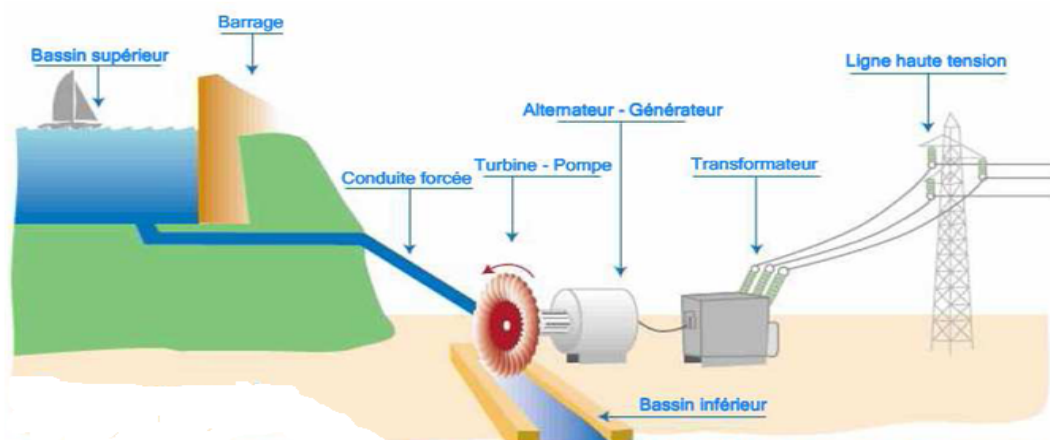


Figure. I-1. Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques réversibles [2]

I.3. Utilisation des centrales hydroélectriques réversibles

Elles sont actuellement utilisés de façons différentes par le gestionnaire du réseau en tant que réserves d'énergie pour :

- Contribuer à produire l'énergie électrique au coût minimum ;
- Lisser la courbe de production journalière d'énergie (effacement des heures de pointe) ;
- Gérer de façon saisonnière la consommation d'énergie hydraulique ;
- Participer au niveau tertiaire rapide d'intervention en cas de décrochage sur défaut du réseau de transport de l'énergie électrique.

I.4. Définition de l'énergie gravitaire

Une masse m lâchée d'une hauteur h permet de réaliser un travail, appelé l'énergie potentielle ou l'énergie gravitaire W [4]. Celle-ci est définie par la formule suivante:

$$W=m.g.h \quad (I-1)$$

Avec: g : l'accélération gravitationnelle [$m\ s^{-2}$] ; h : la hauteur de chute [m] ; m : la masse [kg] ; W : l'énergie potentielle [J].

Selon cette formule, nous pouvons constater que la performance réalisée varie proportionnellement avec la masse et la hauteur. Ce type de stockage constitue le principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques. L'eau est stockée dans un réservoir dont la capacité de stockage d'énergie est proportionnelle à la hauteur de chute et au volume stocké.

I.5. Constitution d'une station de transfert d'énergie par pompage

I.5.1.Bassin

Les retenues d'eau, haute et basse, peuvent être soit naturelles, soit artificielles. Dans ce dernier cas, les bassins sont généralement réalisés par creusement et par utilisation des matériaux de déblai pour créer une ceinture de digues fermant la

cuvette. Suivant la topographie du terrain à l'origine, plat où 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 cout de construction de telles installations est donc très variable en fonction du terrain.[5]

I.5.2. Turbines

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

Le rendement des turbines se situe généralement entre 60 et 80 % ; il croit avec la taille des roues.

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

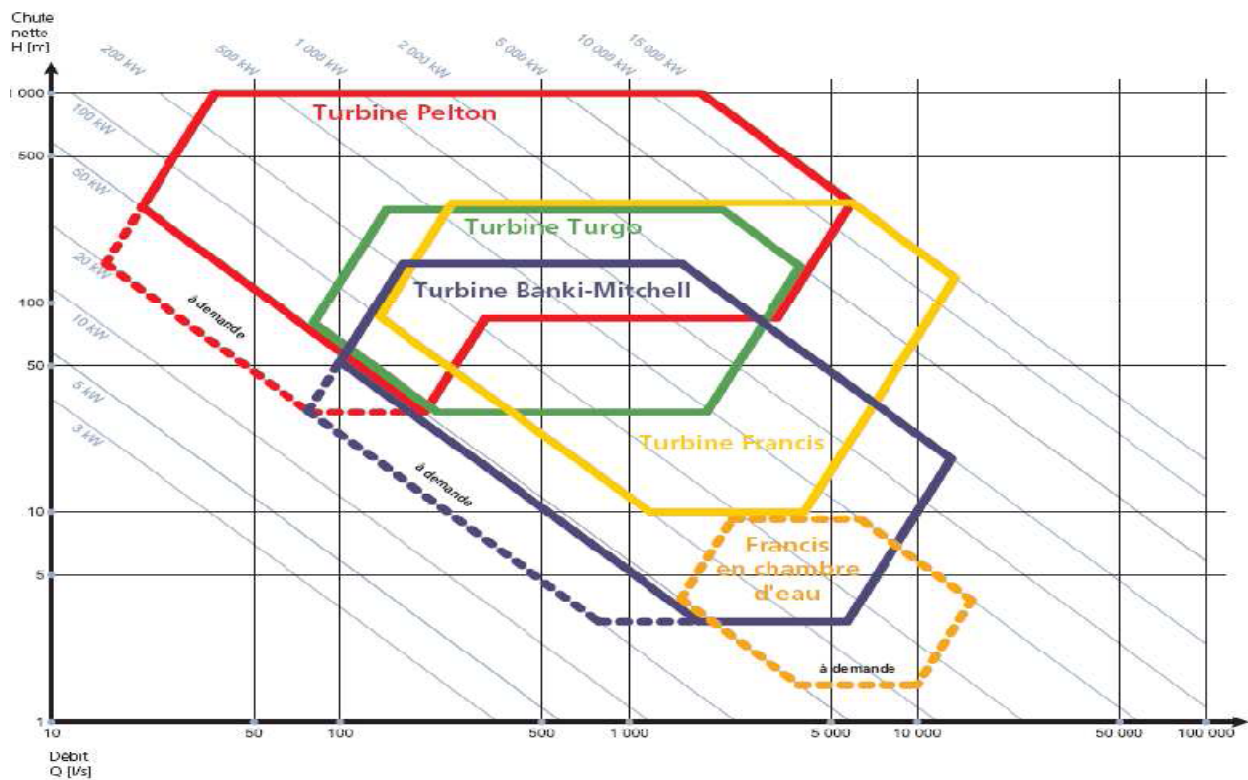


Fig. I.2 : Type de turbines en fonction de la hauteur manométrique, de la puissance et du débit

I.5.2.1. Turbine Pelton

La turbine Pelton est constituée par une roue à augets qui est mise en mouvement par un jet d'eau provenant d'un injecteur. Les augets sont profilés pour obtenir un rendement maximum tout en permettant à l'eau de s'échapper sur les côtés de la roue.

La vitesse nominale de la turbine varie de 500 tr/min à 1500 tr/min, ce qui permet un couplage direct sans multiplicateur à la génératrice électrique.[7]

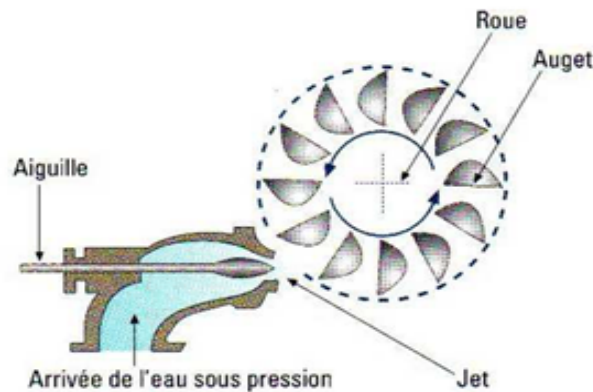


Fig. I.3 : Schéma de fonctionnement d'une turbine Pelton

I.5.2.2. Turbine Crossflow (ou Banki Mitchell)

La turbine Crossflow, appelé aussi turbine à flux traversant, est une machine à action qui a ceci de particulier que l'eau traverse deux fois la roue[7]. 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 profilées ;
- Un bâti enveloppant la roue et sur lequel sont fixés les paliers de la turbine .

En général sa vitesse de rotation est faible, ce qui justifie l'emploi d'un multiplicateur pour la coupler à une génératrice ou bien d'utiliser des machines avec un nombre de pôles important.

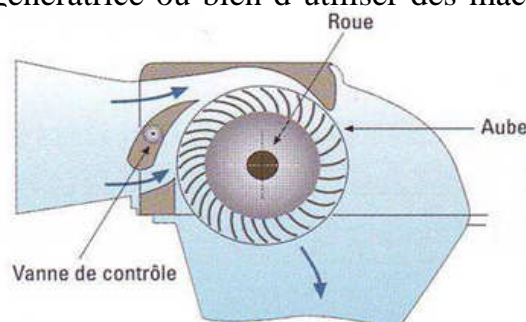


Fig. I.4 : Schéma de fonctionnement d'une turbine Banki-Michelle

I.5.2.3. 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).[7]

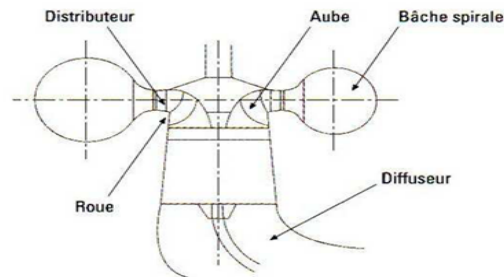


Fig. I.5 : Schéma de fonctionnement d'une turbine Francis

I.5.2.4. Turbine Kaplan

Les turbines Kaplan (ou turbines hélice) sont les turbines les mieux adaptées pour les faibles chutes (environ 2m) et des débits importants de l'ordre de 300 (l/s) à 15000 (l/s). Elles conviennent bien pour des débits variables et leur rendement est bon (84-90% maximum) en dépit d'une vitesse de rotation faible.[7]

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.

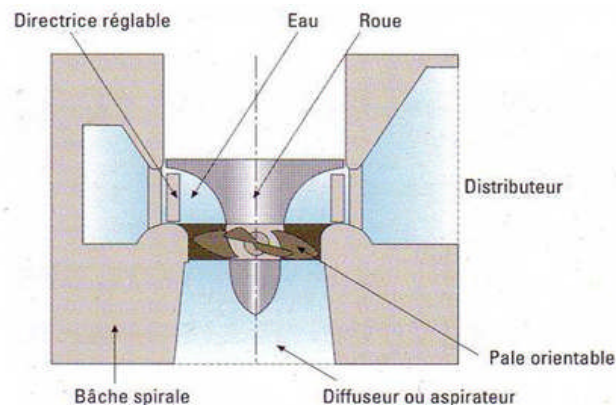


Fig. I.6: Schéma de fonctionnement d'une turbine Kaplan

Les couts de turbines dépendent à la fois de la puissance mais aussi du modèle de turbine utilise. Dans le cadre de notre outil, le cout des turbines comprend la turbine en elle-même et le générateur associe.

I.5.3.Pompes

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

Le rendement des pompes se situe généralement entre 70 % (pour les pompes centrifuges) et 90 % (pour les Pompes volumétriques).[5]

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

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

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

Depuis que les stations de turbinage-pompage sont devenues des moyens de stockage très efficaces et économiques, de nombreux efforts ont été faits pour améliorer 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 de turbinage, particulièrement sous chargement partiel ;
- une amélioration de la stabilité du système en injectant de la puissance active ou par compensation de la puissance réactive.

Les couts de pompe estimés dans l’outil sont basés sur des pompes à vitesse constante et non-réversibles.

I.5.4. Conduites forcées

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

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

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



Figure 1.7 : Exemple de conduite forcée aérienne

I.5.5. Générateurs (moteurs-alternateurs)

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

Les générateurs synchrones sont généralement utilisés en réseau autonome, pour des unités de grande puissance, souvent supérieure à 2 000 kW, raccordés au réseau national.[5]

Les générateurs asynchrones, quant à eux, sont essentiellement utilisés lorsque la production de la centrale est prévue pour une vente, car dans ce cas, la génératrice est pilotée par le réseau qui régule la fréquence et la tension du courant produit. Ils sont utilisés pour des puissances inférieures à 2 000 kW.

I.5.6. Transformateurs

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

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

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

I.5.7. Raccordement au réseau

Pour les installations hydroélectriques d'une puissance inférieure à 250kW, le raccordement se fait sur le réseau moyenne ou basse tension. [5]

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

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

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

I.6. Contexte du stockage hydraulique gravitaire à l'échelle internationale

Les STEP sont utilisées depuis longtemps comme équipement secondaire des grands équipements hydrauliques.

Elles étaient tombées en désuétude au profit d'autres moyens de production de pointe comme les centrales thermiques classiques (fioul, gaz, charbon) mais leur intérêt économique s'est considérablement accru : les combustibles fossiles se renchérissent, tout comme les permis d'émettre les indésirables émissions de CO₂ ; et le stockage d'énergie tire profit de la volatilité des cours de l'électricité générée par l'ouverture des marchés de l'énergie, ainsi que de la montée en puissance des énergies renouvelables intermittentes.

Quant aux rendements, ils ont plus que doublé, atteignant plus de 80 %. [5]

Le tableau. I.1 présente quelques réalisations dans le monde entier :

Tab I.1 : Exemples de STEP en service dans le monde

	Lieu	Puissance MW	Date de mise en service	Capacité réservoirs (Mm ³)	Dénivelé max (m)
Afrique	Drakensberg (Afrique du Sud)	1000	1981	27	475
	Palmiet (Afrique du Sud)	400	1988	20,8	300
	Afourer (Afrique du Nord)	463	2005		600
Europe	Goldisthal (Allemagne)	1060	1998	12	330
	Kanalski (Slovénie)	178	2008	2	
	Dinorwig (R-U)	1800	1982	6	545
	Vianden (Luxembourg)	1141	1959		287
	Chiotas (Italie)	1200	1980		1070
	Piastra Edolo (Italie)	1016	1981		1260
Russie	Zagorsk (Russie)	1200	1988		100
Asie	Tianhuangping (Chine)	1800	2001	8	605
	Okuy shino (Japon)	1200	1978		545
	Tamaharo (Japon)	1200	1983		559
	Imaichi (Japon)	1050	1984		52
USA	Ludington (USA)	1872	1974		98
	Racoon (USA)	1532	1959		317
	Bath Country (USA)	2740	1978		387
	Helms (USA)	1070	1981		495
Australie	Wivenhoe, Brisbane (Australie)	625	1984	28,7	95

I.7. Comparaison entre les différents types de groupes à vitesse variable

Il existe principalement deux types de groupes à vitesse variable (Figure I.8). La première variante consiste simplement en une machine synchrone alimentée à travers un convertisseur de courant permettant de varier la fréquence de la machine et par conséquent sa vitesse. L'inconvénient majeur est que l'électronique de puissance constituant le convertisseur doit être dimensionnée pour une puissance nominale de la machine. Cette solution n'est donc ni techniquement ni économiquement réalisable pour des machines de très grande puissance.[6]

Le deuxième type d'installation est constitué d'une machine asynchrone à rotor bobiné équipée d'une cascade rotorique comportant un convertisseur.

Contrairement au cas précédent, la puissance active traversant le convertisseur se limite à la puissance de glissement. Bien évidemment le dimensionnement du

convertisseur doit également tenir compte du transit de puissance réactive à travers le rotor de la machine asynchrone.

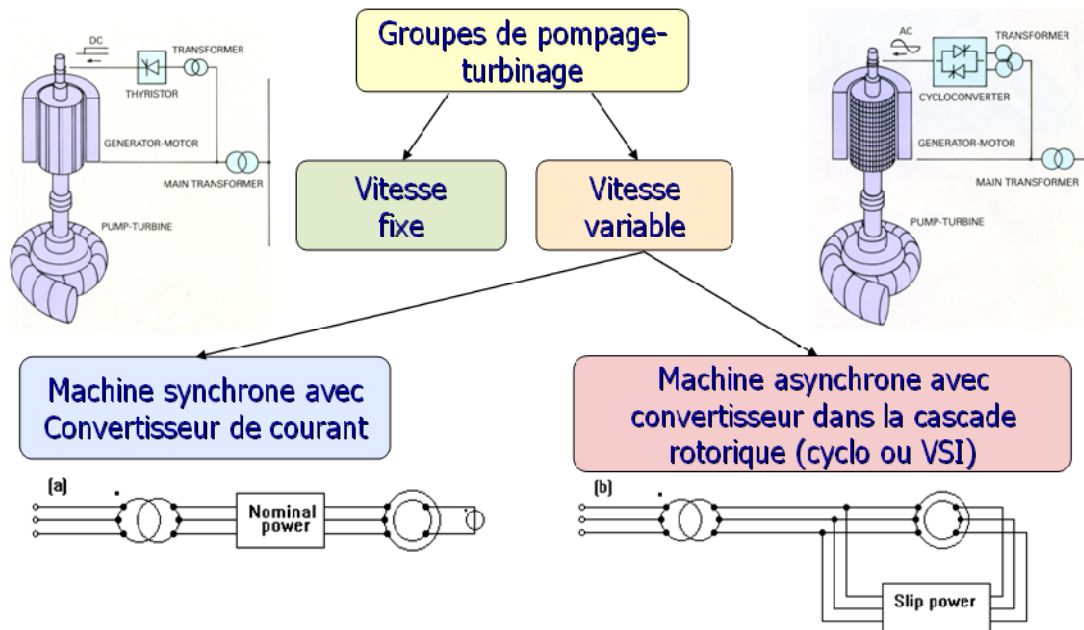


Figure I.8 : Types d'installations à vitesse variable

Le convertisseur de la cascade rotorique peut être de type cycloconvertisseur ou convertisseur de tension (VSI, Voltage Source Inverter). Le cycloconvertisseur est constitué de thyristors alors que le convertisseur VSI se compose de deux onduleurs à pulsations avec IGBT ou IGCT et d'un circuit continu commun qui peut être à deux ou multi-niveaux.

La variante VSI a les avantages suivants comparativement à la version cycloconvertisseur :

- un seul transformateur classique au lieu de trois transformateurs à trois enroulements
- pas de sous-harmoniques,
- possibilité de produire du réactif, utilisation en compensateur statique de réactif.
- possibilité de démarrer en mode pompe sans équipement supplémentaire.

Ainsi l'installation à vitesse variable la plus adaptée pour des applications à grande puissance est la machine asynchrone à rotor bobiné avec cascade rotorique de type VSI et c'est par conséquent cette structure qui sera considérée dans cette étude.

I.8. Machines asynchrones à double alimentation

I.8.1. 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.8.2. Utilisation de 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 une 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.8.3. Principe de fonctionnement

La MADA comme son nom l'indique est une machine doublement alimentée. Elle a le surnom de « machine généralisée » 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.8.4. Différents modes 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 là 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 du 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.8.5.. Fonctionnement à quatre quadrants de la MADA

La MADA peut fonctionner en moteur comme générateur, en mode hypo synchrone et hyper synchrone. Ces modes de fonctionnement sont illustrés sur (figure I.11) ; avec P_r , P_m et P_s désignent les puissances du rotor, mécanique et du stator.[1]

a- Fonctionnement moteur

- Mode hypo synchrone : dans ce mode la puissance P_r est fournie par le rotor
- Mode hyper synchrone : dans ce cas la puissance P_r est absorbée par le rotor.

b- Fonctionnement générateur

-Mode hypo synchrone : dans ce mode la puissance P_r est absorbée par le rotor.

-Mode hyper synchrone : dans ce mode la puissance P_r est fournie par le rotor.

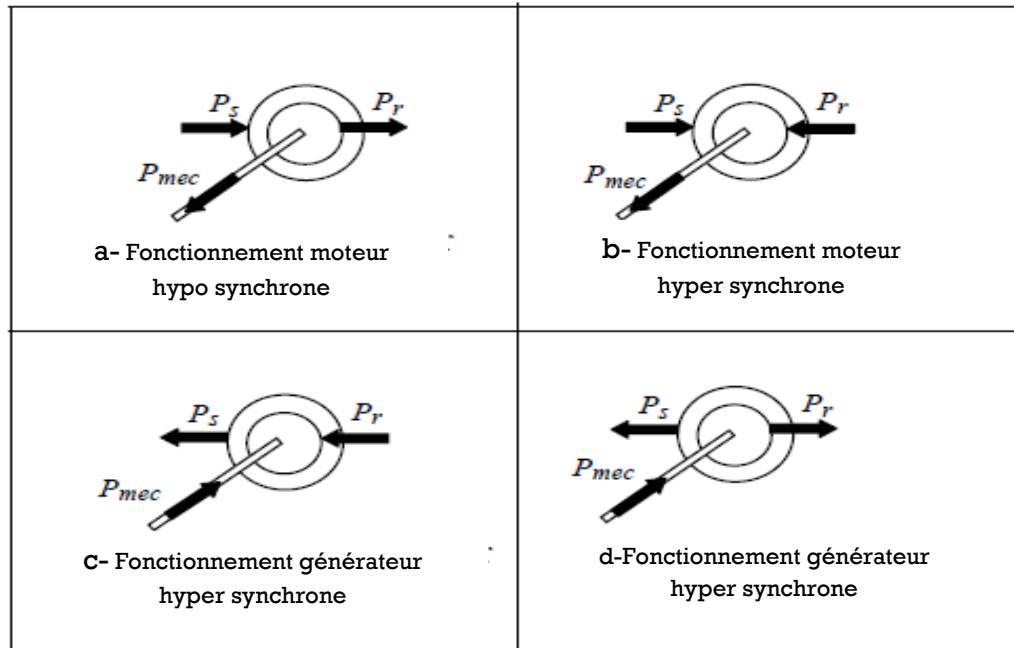


Fig. I.9 : Modes opérationnels caractéristiques de la MADA[1]

Aujourd'hui, 80% des hydrogénérateurs connectés au réseau contiennent des générateurs asynchrones doublement alimentés à vitesse variable, ces derniers offrent l'avantage de contrôler les grandeurs statoriques à partir de celles rotoriques par l'intermédiaire de convertisseur statique.

I.8.6. Avantages et inconvénients de la MADA

Nous introduisons dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable. [11]

I.8.6.1. Avantages de la MADA

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

- La possibilité d'accès au rotor, contrairement à la machine à cage.
- La partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes

fer de la machine et augmentant son rendement. De plus, l'alimentation de la machine par deux onduleurs va nous permettre de travailler autour de l'arrêt à des fréquences relativement élevées évitant ainsi un déclassement des convertisseurs tout en maintenant un couple à l'arrêt. Cette même propriété nous assure un contrôle quasi insensible aux variations résistives de la machine.

- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.

- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse nominale jusqu'à deux fois nominale.

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

I.8.6.2. Inconvénients de la MADA

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.

- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).

- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage. Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la MADA.

I.9. Conclusion

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

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 et enfin une comparaison entre les différents types de groupes à vitesse variable.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des différentes parties de la chaîne étudiée.

II.1. Introduction

Après avoir présenté les différents composants de la centrale hydroélectrique réversible au chapitre I, nous avons choisi la machine asynchrone à double alimentation à deux convertisseurs statiques commandés en MLI qui est utilisé dans la plupart des centrales hydroélectrique réversible.

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.

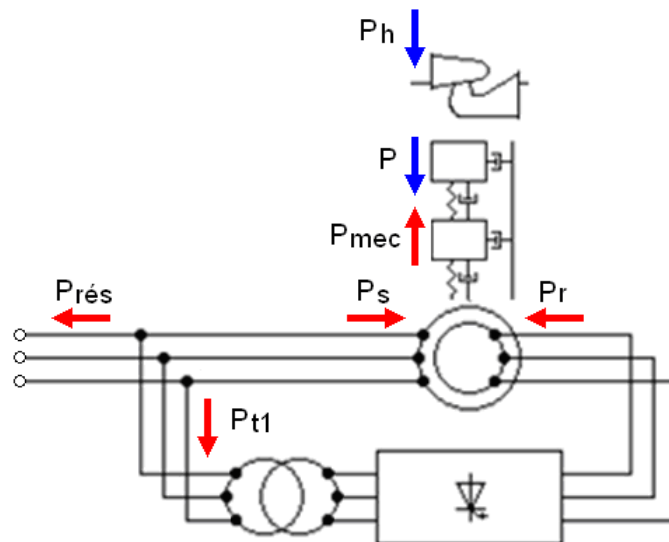


Figure II.1 : Sens des puissances définies positives [6]

Tableau II.1 : Conventions de signe pour la moto générateur [6]

Symbole	Quantité	Mode générateur	Mode moteur	Unité
$P_{rés}$	puissance réseau	>0	<0	W
P_s	puissance statorique	<0	>0	W
P_r	puissance rotorique	Selon le mode de fonctionnement		W
P_{t1}	puissance primaire transfo			W
P_{mec}	puissance mécanique	<0	>0	W
T_{em}	couple électromagnétique	<0	>0	Nm
N	vitesse	>0	>0	t/min

Tableau 2.2 : Conventions de signe pour la pompe-turbine [6]

Symbole	Quantité	Mode turbine	Mode pompe	Unité
P_h	puissance hydraulique	>0	<0	W
P	puissance mécanique	>0	<0	W
T	couple mécanique	>0	>0	Nm
N	vitesse	>0	<0	t/min
Q	débit	>0	<0	m ³ /s
H	hauteur de chute	>0	>0	m

Il faut noter que dans le cas du hydrogénérateur, 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 T_{mec} et T 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.[6]

Les différentes puissances représentées à la (Figure II.1) sont définies par les relations suivantes :

$$P_{g-ref} = -\eta P_{mec-opt} = -\eta K \Omega_{opt}^3 \quad (II.1)$$

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

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

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

$$P_r = -g \cdot P_s \quad \text{avec} \quad g = \frac{N_s - N_r}{N_s}, \text{ le glissement} \quad (II.5)$$

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

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

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 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.[6] .Schéma électrique équivalent est représenté à la figure II.2.

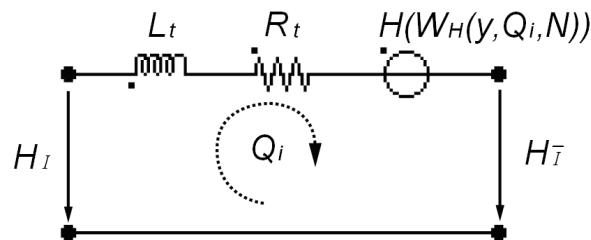


Figure II.2. Schéma électrique équivalent de la pompe-turbine Francis [6]

La source de pression $H(W)=H(Q, N, y)$ dépend des caractéristiques de la pompe-turbine qui sont des fonctions non linéaires du débit Q , de la vitesse de rotation N et de l'ouverture du distributeur y . Ces caractéristiques de pompe-turbine sont obtenues à partir de données expérimentales issues de campagnes de mesures réalisées sur un modèle réduit de la pompe-turbine selon la norme internationale IEC 60193 . Ces mesures sont en effet effectuées à vitesse de rotation N constante pour différentes ouvertures du distributeur. Pour chaque ouverture y , la hauteur de chute H est variée dans une certaine plage de fonctionnement et les valeurs de débit Q et de couple T correspondantes sont mesurées. Ces campagnes résultent donc en des quintuplets (y, N, H, Q, T) de points de fonctionnement. Ces quintuplets sont finalement transformés en quadruplets $(y, N_{11}, Q_{11}, T_{11})$, N_{11} , Q_{11} et T_{11} étant des facteurs dimensionnels définis à partir de la vitesse N , du débit Q , du couple T , de la hauteur de chute H et du diamètre de référence de la pompe-turbine D_{ref} selon les formules suivantes :

$$N_{11} = \frac{N.D_{ref}}{\sqrt{H}}, Q_{11} = \frac{Q}{\sqrt{H}.D_{ref}^2}, T_{11} = \frac{T}{H.D_{ref}^3} \quad (II.8)$$

II.4. 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.[8]

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 :

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

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.5. Modélisation de la machine à double alimentation et sa commande

II.5.1. Hypothèses simplificatrices

Lors de la modélisation de la MADA, on a supposé que :

- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé ;
- Les pertes par courant de Foucault et par hystérésis sont négligées ;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale ;
- Les résistances ne varient pas avec la température ;

- Entrefer constant ;
- L'influence de l'effet de peau n'est pas prise en compte.

De ce fait tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductances mutuelles ne dépendent que de la position des enroulements.

II.5.2. Modèle de la machine dans un repère (a,b,c)

La figure II. 3 représente la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique. Les enroulements statoriques sont stationnaires, alors que les enroulements rotoriques sont repérés par un angle variable θ_m qui représente la position angulaire électrique du rotor par rapport au stator.

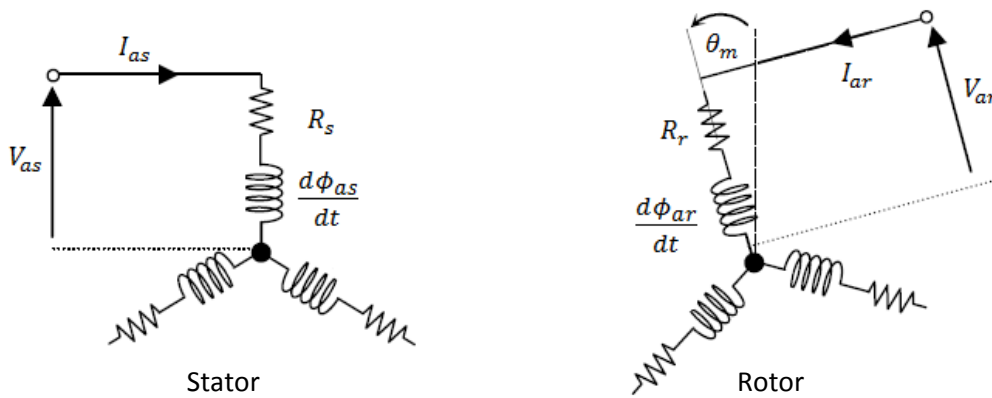


Fig. II.3. Représentation schématique de la MADA [8]

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

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

$$\begin{cases} (\phi_s)_{abc} = [L_s] \cdot (I_s)_{abc} + [M_{sr}] \cdot (I_r)_{abc} \\ (\phi_r)_{abc} = [L_r] \cdot (I_r)_{abc} + [M_{sr}] \cdot (I_s)_{abc} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

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.5.3. 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).

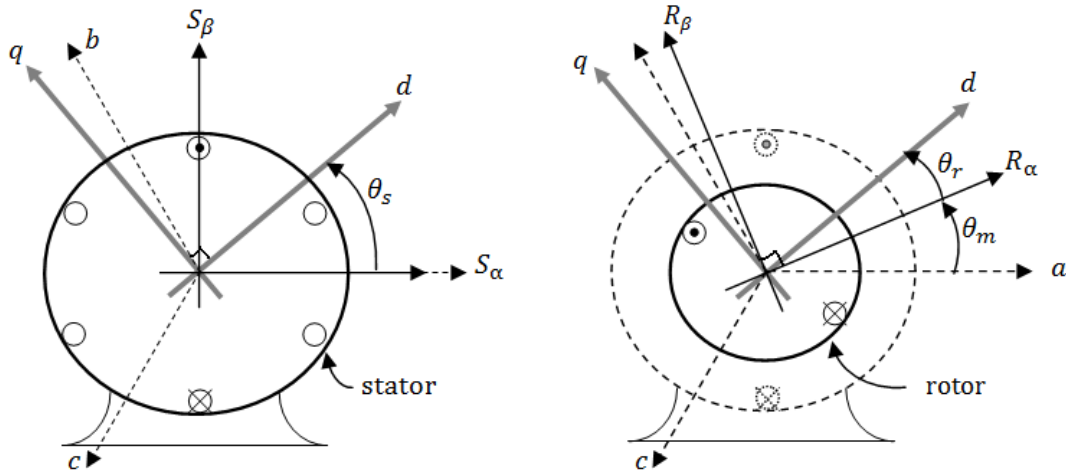


Fig. II.4. Position des différents systèmes d'axes [8]

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

$$[x]_{dqo} = p(\Psi) \cdot [x]_{abc} \quad (\text{II.12})$$

Avec

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

$\Psi = \theta_s$ (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.5.3.1. Equations électriques

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

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

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

II.5.3.2. Équations 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.5.3.3. Équation mécanique

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

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

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 :

$$C_{em} = P(\Phi_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II.20})$$

Avec :

P : nombre de paires de pôles.

II.5.4. 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 :

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

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

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.5.4.1. Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

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

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

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

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.5.4.2. 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 :

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

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

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

En régime permanent, le système d'équations (II. 31), s'écrit :

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

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.5.4.3. 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.

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

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.5.

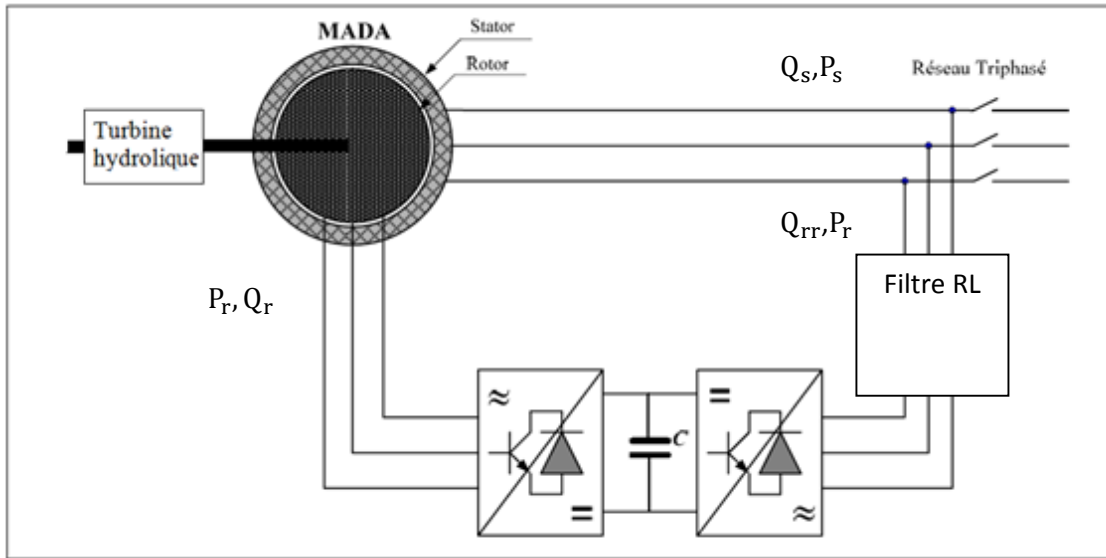


Fig. II.5. Schéma de principe de contrôle des puissances de générateur

II.5.4.4. Commande vectorielle en puissance de la MADA

L'objectif de la commande vectorielle en puissance de la MADA consiste à lui faire suivre une consigne en puissance avec une dynamique électrique, la mieux possible que le permet la fréquence de modulation du convertisseur utilisé. Schéma bloc de la commande vectorielle, est montré sur figure. II.6. [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.

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

Avec :

$P_{mec-opt}$: La puissance mécanique de la turbine

η : Le rendement de la MADA ;

P_{g-ref} : La puissance de référence du réseau.

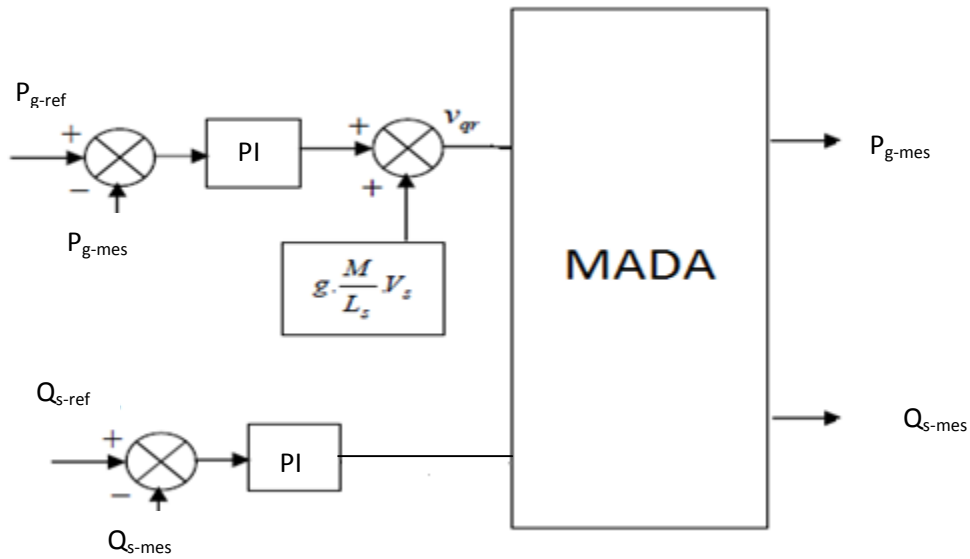


Fig. II.6. Schéma bloc de la commande vectorielle

II.6. Synthèse du régulateurs PI

Le rôle des régulateurs de chaque axe est d'annuler l'écart entre les puissances actives et réactives de références et des puissances actives et réactives mesurées. Rappelons que la synthèse des régulateurs sera effectuée sur la base du modèle simplifié. [9]

Nous avons opté pour le choix des PI vue leurs simplicité et la rapidité à maitre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. [10]

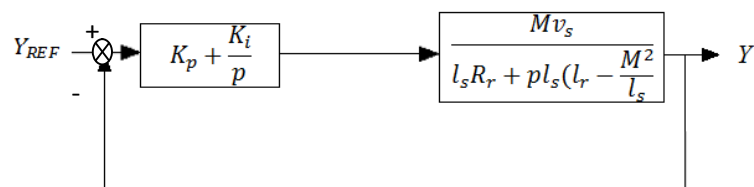


Fig. II.7. Schéma bloc d'un système régulé par un PI

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

$$FTBO = \left(\frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{p}{K_p}} \right) \cdot \left(\frac{\frac{MV_s}{I_s \left(I_r - \frac{M^2}{I_s} \right)}}{p + \frac{I_s R_r}{I_s \left(I_r - \frac{M^2}{I_s} \right)}} \right) \quad (II.34)$$

A fin d'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 :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{I_s R_r}{I_s \left(I_r - \frac{M^2}{I_s} \right)} \quad (II.35)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$FTBO = \frac{K_p \left(\frac{MV_s}{I_s \left(I_r - \frac{M^2}{I_s} \right)} \right)}{p} \quad (II.36)$$

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

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r p} \quad \text{avec } \tau_r = \frac{1}{K_p} \left(\frac{I_s \left(I_r - \frac{M^2}{I_s} \right)}{MV_s} \right) \quad (II.37)$$

Le terme τ_r désigne ici le temps de réponse du système que l'on se fixe de l'ordre de 100 ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie électrique sur le réseau avec une **MADA** de 1.5 MW. Une valeur inférieure est susceptible d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables.

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

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{I_s \left(I_r - \frac{M^2}{I_s} \right)}{MV_s} \quad (II.38)$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{R_r I_s}{M V_s} \quad (\text{II.39})$$

II.7. Modélisation de convertisseur statique

La structure de la figure II .8 utilise deux ponts triphasés d'IGBT commandables par modulation de largeur d'impulsion .Ce choix permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur :

Un contrôle du flux et de vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du coté de la machine, et un contrôle des puissances active et réactive transitées du coté réseau.

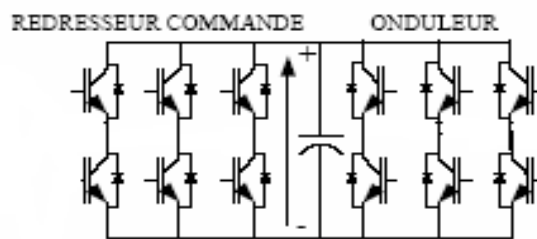


Fig. II.8.Schéma d'un convertisseur statique [12]

Cette configuration hérite les caractéristiques suivantes :

- La puissance rotorique est bidirectionnelle, ce qui permet les fonctionnements en hypo et hyper synchrone.
- Le fonctionnement en MLI de l'onduleur du coté réseau permet un prélèvement des courants de meilleur qualité.

II.7.1. 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.

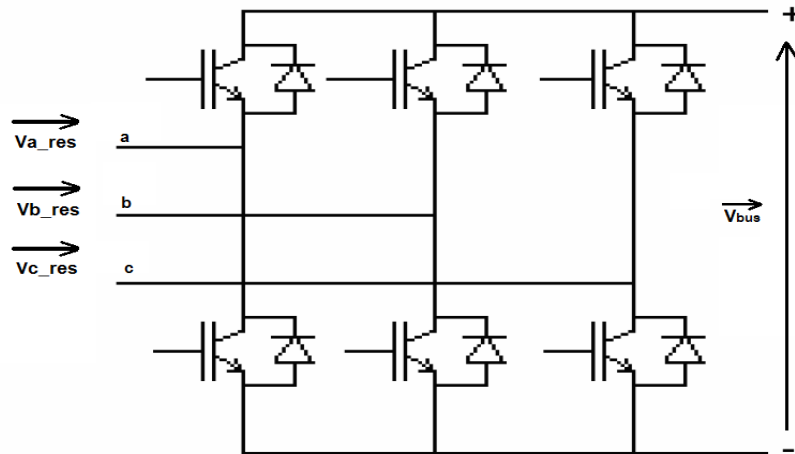


Fig. II.9. Redresseur MLI

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

$$i_{dc} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c \quad (\text{II.41})$$

Avec :

V_{dc} : Tension redressée ;

i_{dc} : Courant redressée ;

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.7.2. Modélisation de l'onduleur MLI

L'onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion (MLI) est un convertisseur statique d'énergie électrique qui transforme une source de tension continu en une alimentation de tension alternative pour alimenter des charges en courant alternatif.

L'onduleur triphasé possédant six cellules de commutation (IGBT) et diode de roue libre chaque bras de l'onduleur est composé de deux cellules de commutation

constituées chacune de l'interrupteur avec sa diode, la sortie correspondant au point milieu du bras.

Les signaux de commande des interrupteurs de chaque bras doivent être complémentaires pour éviter le court-circuit de l'alimentation continue de l'onduleur fig.II.10.

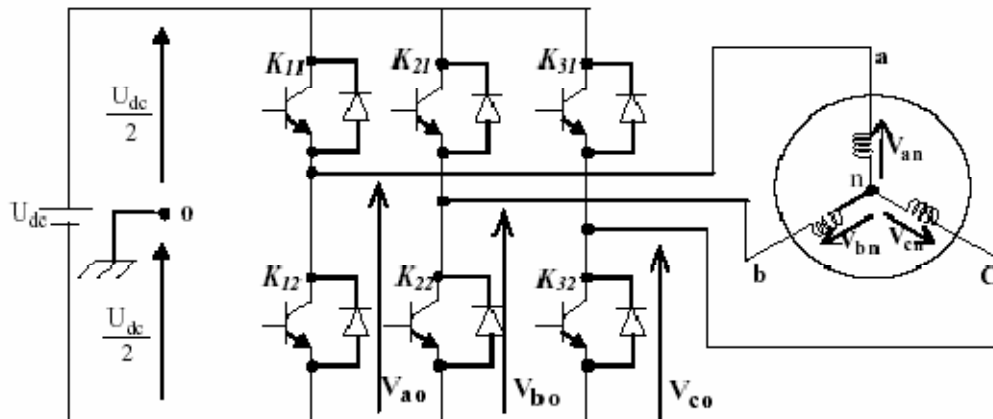


Fig. II.10. Représentation schématique d'un onduleur de tension [12]

On pose les fonctions logiques suivantes :

$$F_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

$$F'_i = \begin{cases} 0 & \text{si } T'_i \text{ est fermé} \\ 1 & \text{si } T'_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction S_i avec ($i=a,b,c$) tel que :

$$S_i = (F_i - F'_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } F_i = 1 (F'_i = 0) \\ -1 & \text{si } F_i = 0 (F'_i = 1) \end{cases}$$

La matrice de connexion de l'onduleur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{on1} \\ V_{on2} \\ V_{on3} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

Avec :

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.7.3. Commande MLI des convertisseurs

La commande par modulation en largeur d'impulsion ou commande MLI consiste à choisir une fréquence de commutation pour les interrupteurs et à fixer à l'intérieur de la période de commutation les intervalles de conduction des interrupteurs connectés à une borne de la (source de courant) en fonction d'un signal de référence qui correspond au potentiel souhaité pour cette borne.

L'objectif de la commande MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur. Plusieurs types de MLI sont utilisés. On peut citer par exemple, la MLI sinus avec porteuse triangulaire, la MLI pré calculée et la MLI vectorielle. Toute fois nous adaptons la MLI naturelle à cause de sa simplicité d'élaboration.

II.7.4. Modélisation du bus continu

Le couplage des deux convertisseurs statiques (coté rotor et coté réseau) est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit.[8]

Dans la figure II.11 est représenté en détail le bus continu et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur. Chaque convertisseur exerce son influence sur le circuit par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur.

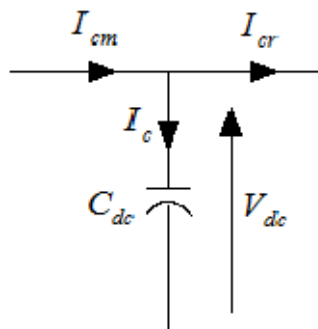


FIG. II.11. Schéma du bus continu

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

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \cdot \int_0^t (I_{cm} - I_{cr}) \cdot dt \quad (\text{II.43})$$

Pour pouvoir contrôler efficacement le courant cote alternatif, le niveau de tension sur le bus continu doit vaincre la tension composée du réseau et de compenser toutes les chutes de tension provoquées par la circulation des courants dans les inductances de raccordement.

$$V_{dc} > \sqrt{6}V_g \quad (\text{II.44})$$

Le réglage du bus continu est réalisé au moyen d'une boucle de régulation permettant de maintenir une tension constante du bus continu, avec un correcteur proportionnel intégral générant la référence du courant à injecter dans le condensateur (i_{c_ref}).

La synthèse du régulateur est la même que celle présentée précédemment, dont on a $k_i \ll k_p$, Donc le régulateur se réduit en un gain pur, Il vaut :

$$k_p = \frac{c}{\tau_u} \quad (\text{II.45})$$

Avec τ_u : est le temps de réponse désiré de la tension redressée

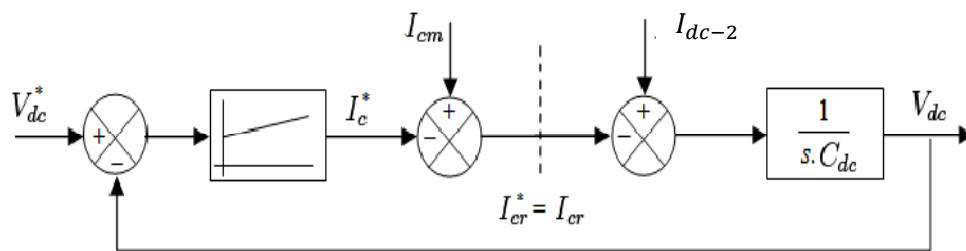


FIG. II.12. Régulation de la tension du bus continu

II.7.5. Modélisation du filtre

Le schéma de la figure (II.12) montre que la liaison au réseau électrique est réalisée via un filtre d'entrée R-L.

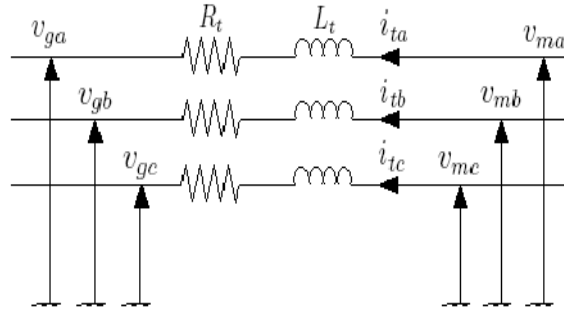


Fig. II.13. Représentation du filtre de liaison RL

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

$$\begin{pmatrix} V_{ma} \\ V_{mb} \\ V_{mc} \end{pmatrix} = R_t \cdot \begin{pmatrix} I_{ta} \\ I_{tb} \\ I_{tc} \end{pmatrix} + l_t \cdot \frac{d}{dt} \cdot \begin{pmatrix} I_{ta} \\ I_{tb} \\ I_{tc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{ga} \\ V_{gb} \\ V_{gc} \end{pmatrix} \quad (\text{II.46})$$

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

$$v_{md} - V_g = (R_t + l_t \cdot s) \cdot I_{td} - w_g \cdot l_t \cdot I_{tq} \quad (\text{II.47})$$

$$v_{mq} - V_g = (R_t + l_t \cdot s) \cdot I_{tq} - w_g \cdot l_t \cdot I_{td} \quad (\text{II.48})$$

On considère les tensions de couplage suivantes :

$$e_{td} = V_{gd} - w_g \cdot l_t \cdot I_{tq} \quad (\text{II.49})$$

$$e_{tq} = V_{gq} - w_g \cdot l_t \cdot I_{td} \quad (\text{II.50})$$

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.

$$F(s) = \frac{1}{R_t + s \cdot l_t} \quad (\text{II.51})$$

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

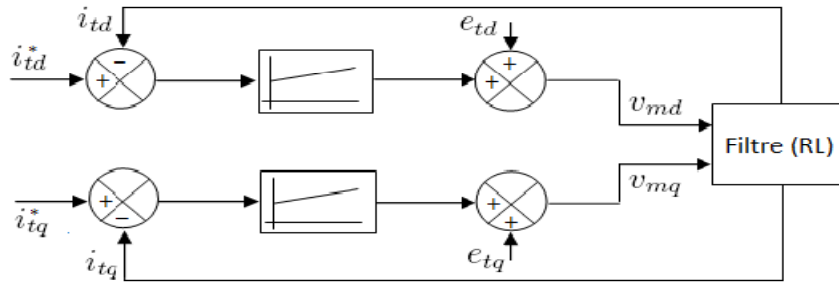


FIG.II.14. Modèle obtenu du filtre dans le repère diphasé (dq).

II.8.Conclusion

Dans ce chapitre, on a modélisé les différentes parties d'une centrale hydroélectrique réversible 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. Cette modélisation nous a permis aussi d'aboutir à des schémas bloc qui seront exploités dans le prochain chapitre pour la simulation du système (turbinage-pompage).

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 et turbinage 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 : $P_{g-ref} = -\eta P_{mec-opt} = -\eta K \Omega_{opt}^3$;
- Pour les valeurs du couple électromagnétique tendent à dépasser sa valeur nominale, l'expression de la puissance de référence est : $P_{g-ref} = -\eta P_{mec} = -\eta C_{mec} \cdot \Omega$.

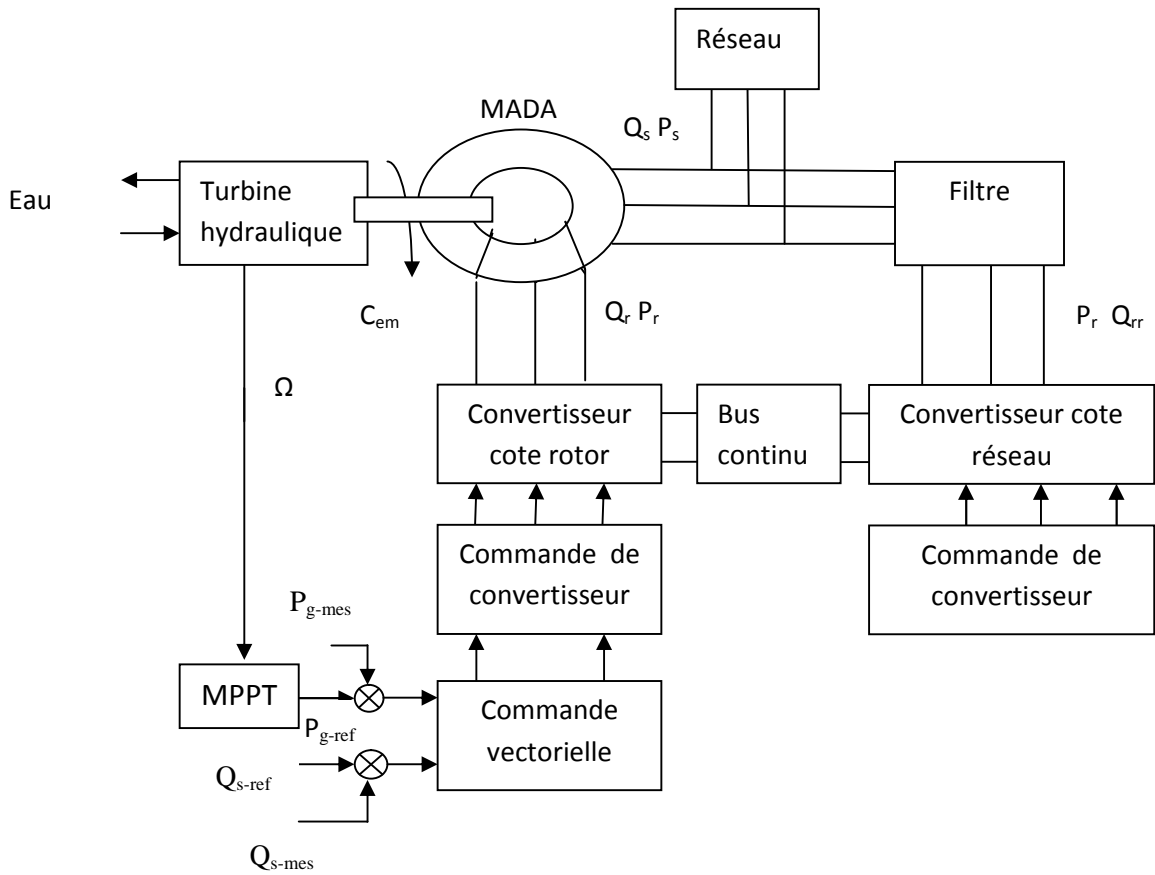


Fig.III.1. Schéma structural de commande du système global

III .3. Résultats de simulation de turbinage

Les résultats de simulation sont obtenus avec la puissance mécanique de référence illustrée sur la fig.III.2

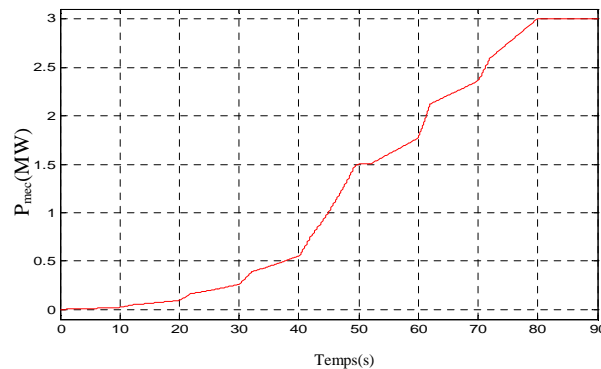


Fig.III.2. Puissance mécanique de la turbine

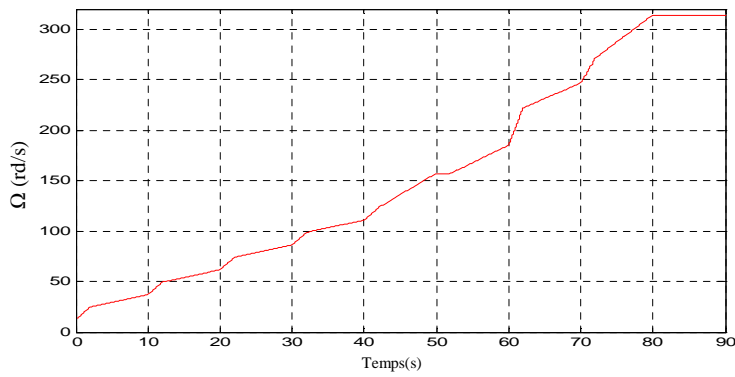


Fig.III.3. Vitesse de rotation mécanique

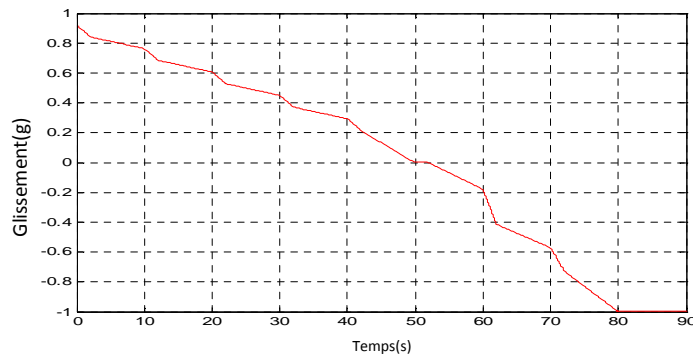


Fig.III.4. Glissement de la génératrice

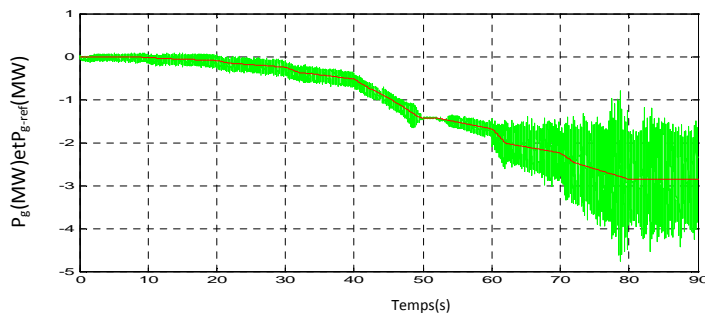


Fig.III .5- Puissance active transité au réseau et sa référence

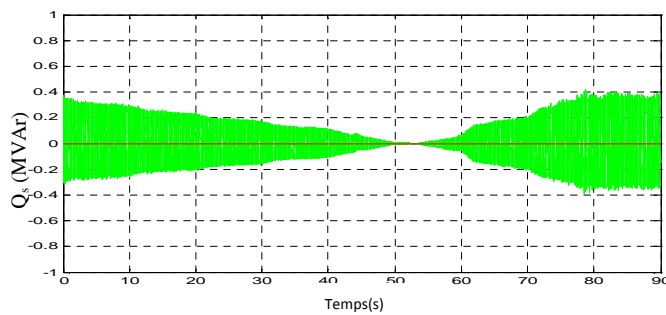
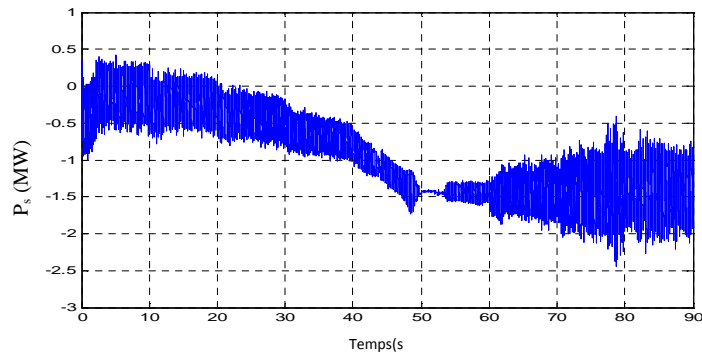
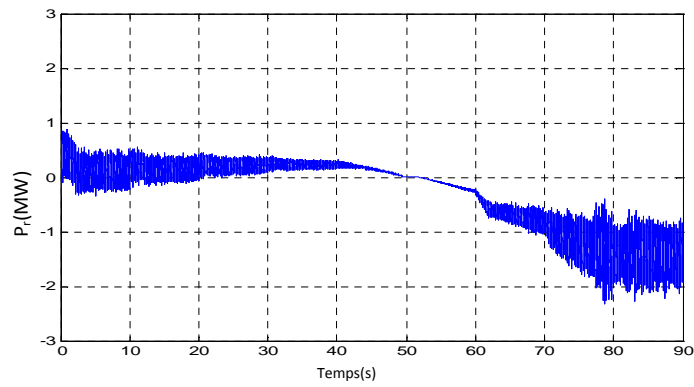
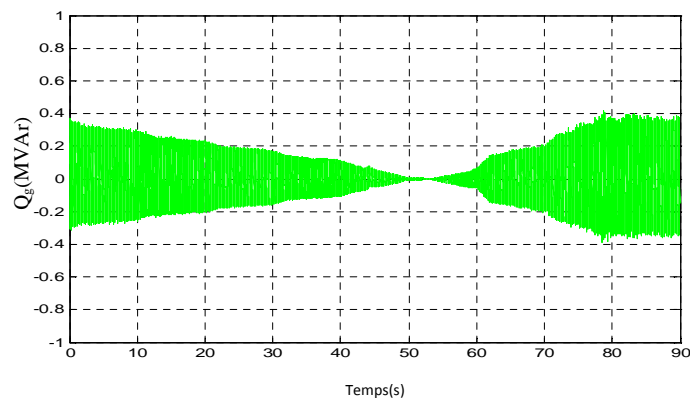


Fig.III.6. Puissance réactive statorique et sa référence

**Fig.III.7.** Puissance active statorique**Fig.III.8-** Puissance active rotorique**Fig.III.9.** Puissance réactive transité au réseau

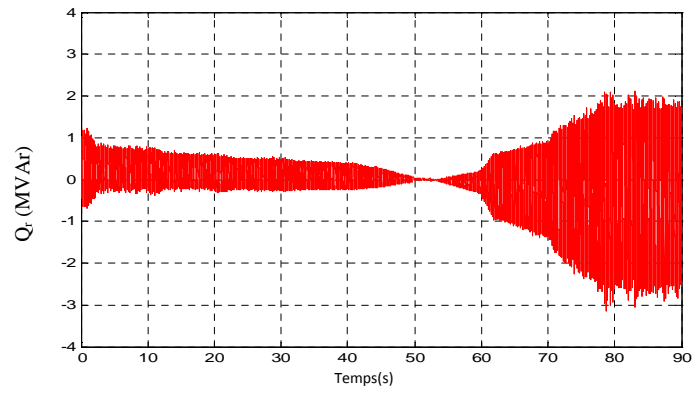


Fig. III.10. Puissance rotorique coté rotor

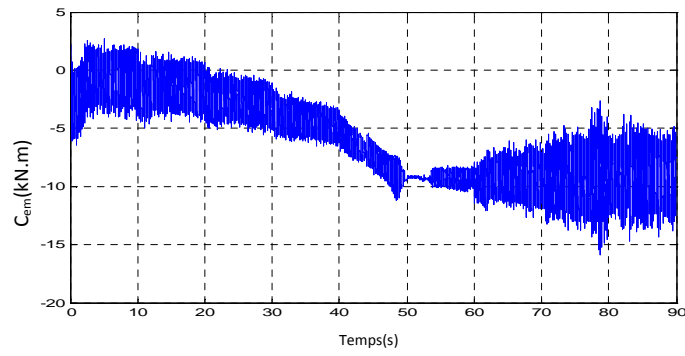


Fig.III.11-Couple électromagnétique

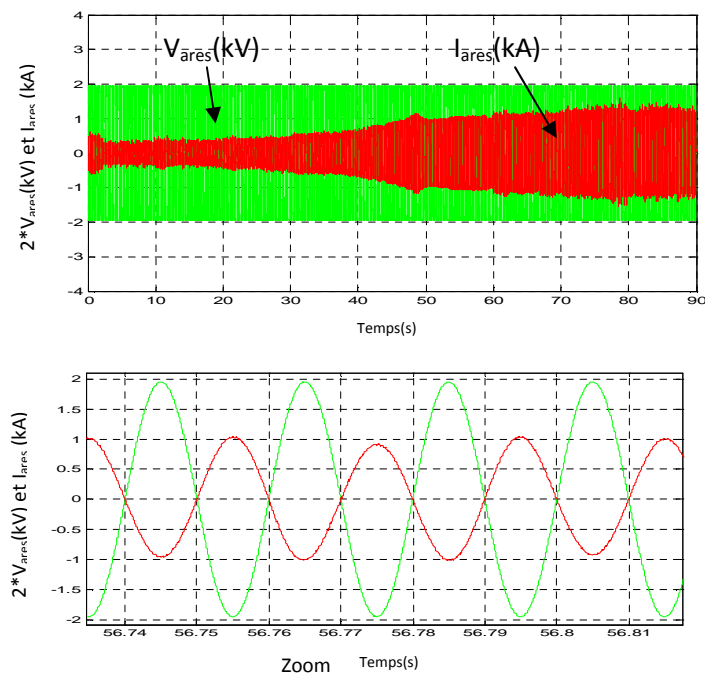


Fig.III.12-Tension et courant d'une phase de du réseau

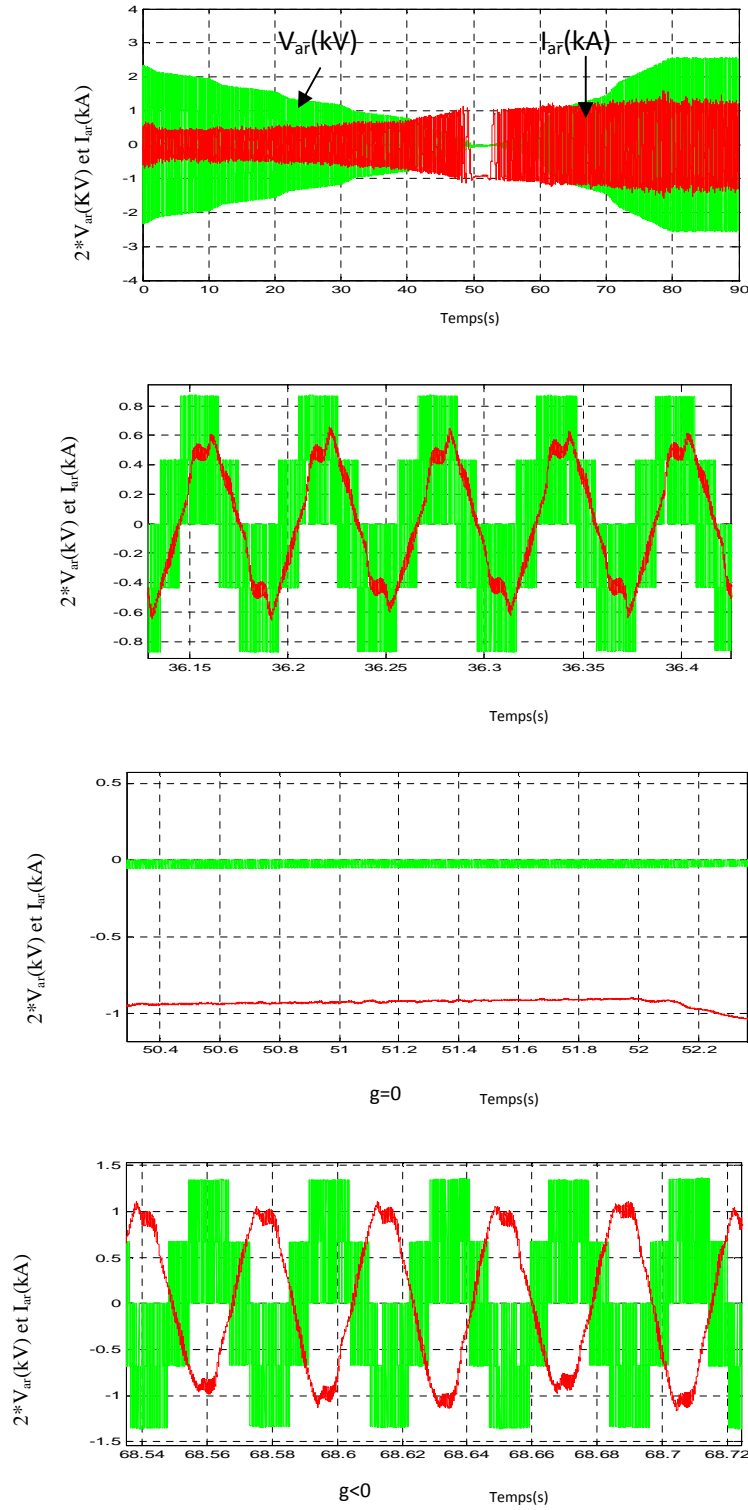


Fig.III.13-Tension et courant d'une phase rotorique

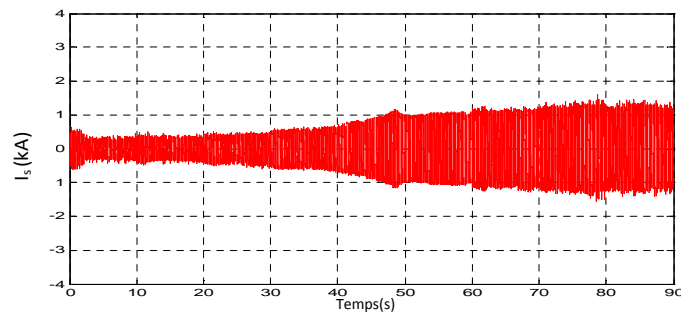


Fig.III.14.Courant statorique

II.3.1.Interprétation des résultats

La figure III.4 illustre l'allure du glissement de la MADA qui est l'image de la vitesse mécanique, il varie entre +0.9 et -1

Les figures III.5 et III.6 montrent que les puissances active du réseau et réactive statorique suivent parfaitement leurs références cela justifie la fiabilité de la commande utilisée.

Le sens d'écoulement et la valeur de la puissance active rotorique dépendent de signe de glissement, sont montrés sur la fig.III.8.

La figure III.12 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.13 illustre l'évolution de la tension et le courant d'une phase rotorique dont on remarque des changements de phase et de pulsation. La durée de la période est importante (grandeurs continues) quand le glissement s'approche de zero.

III.4.Résultats de simulation de pompage

Les résultats de simulation sont obtenus avec la puissance mécanique de référence illustrée sur la fig.III.2

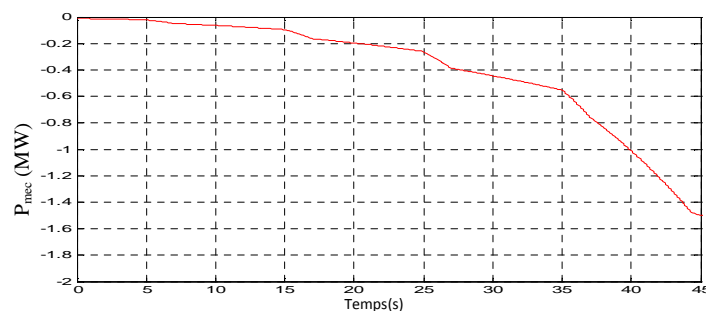


Fig.III.15. Puissance mécanique de la turbine

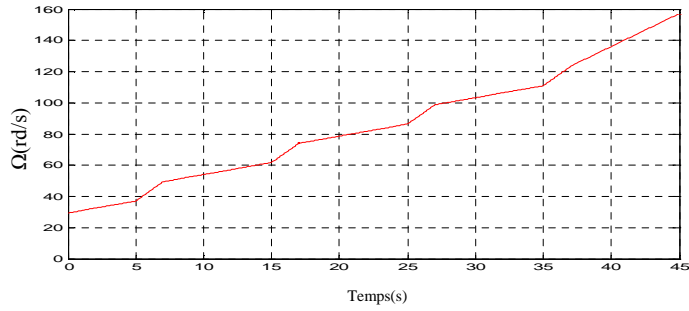


Fig.III.16.Vitesse mécanique

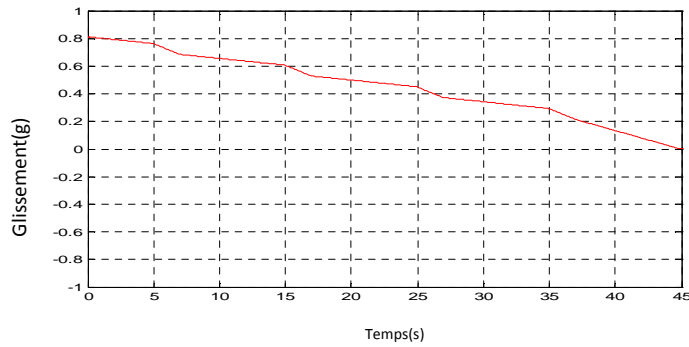


Fig.III.17.Glissement du moteur

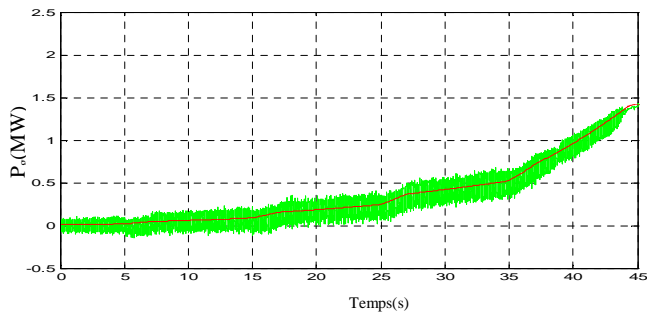


Fig.III.18.Puissance active transitée au réseau
et sa référence

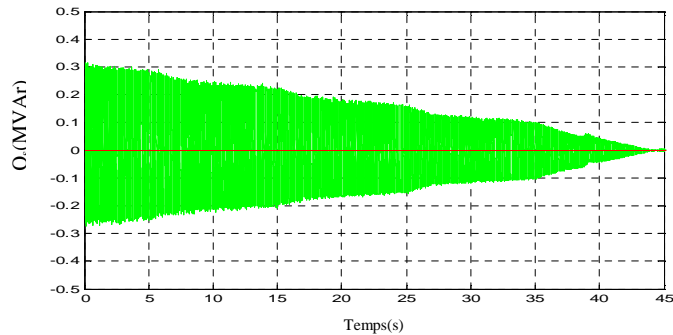
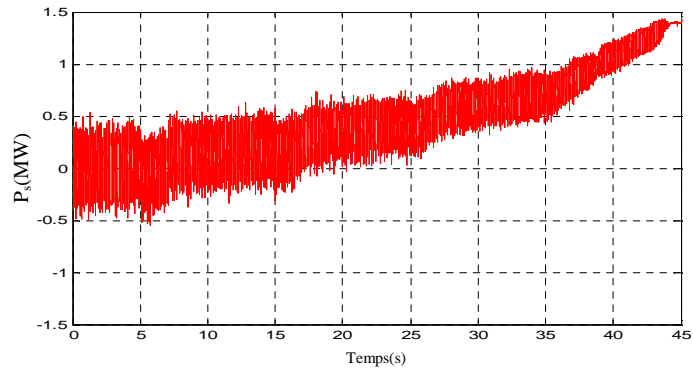
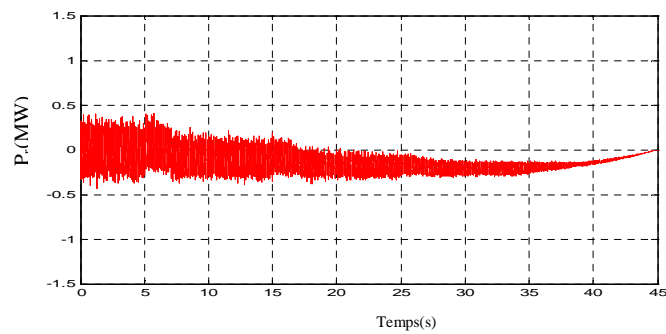
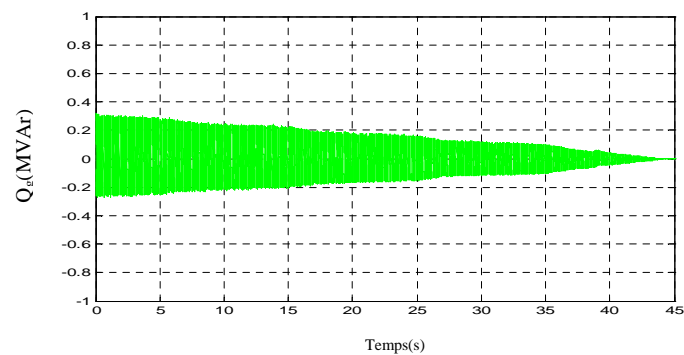
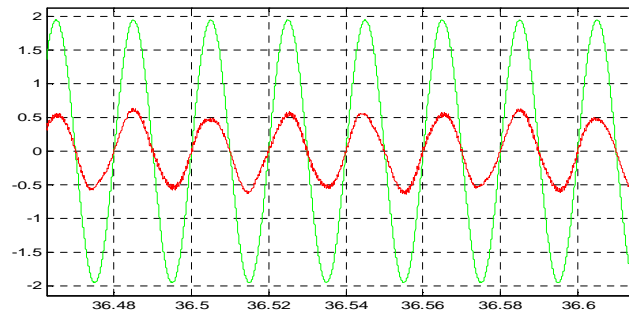
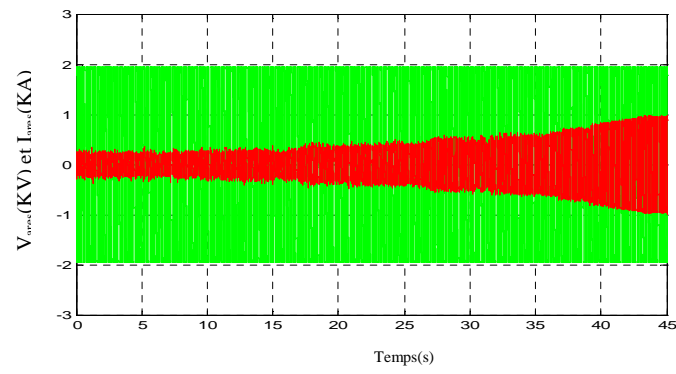


Fig.III.19.Puissance réactive statorique
et sa référence

**Fig.III.20.** Puissance active statorique**Fig.III.21.** Puissance active rotorique**Fig.III.22.** Puissance réactive injecté au réseau



Zoom

Fig.III.23. Courant et tension d'une phase du réseau

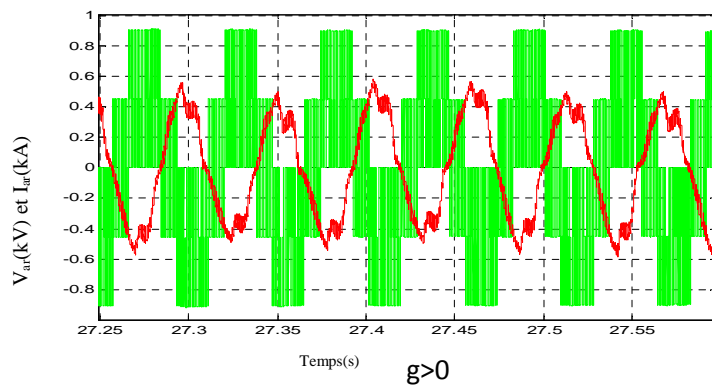
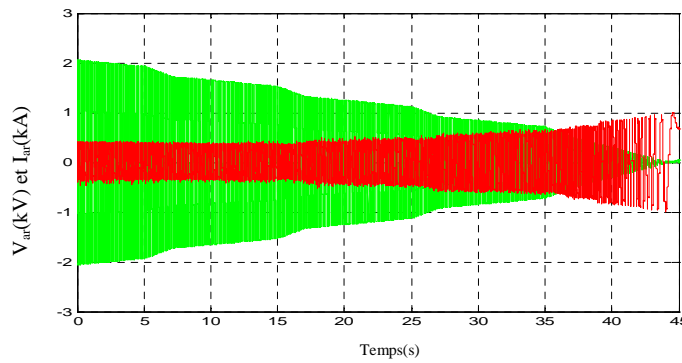


Fig.III.24. Courant et tension d'une phase rotorique

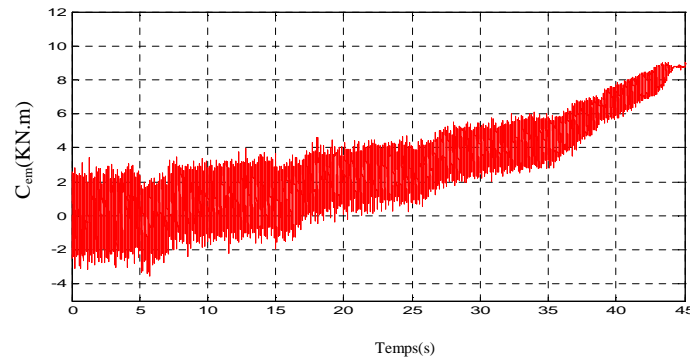


Fig.III.25.Couple électromagnétique

III.4.1. Interprétation des résultats

La figure III.17 illustre l'allure du glissement de la MADA qui est l'image de la vitesse mécanique, il varie entre +0.8 et 0

Les figures III.18 et III.19 montrent que les puissances active du réseau et réactive statorique suivent parfaitement leurs références, ce qui indique la fiabilité de la commande utilisé.

La figure III.22 montre le transfert de puissance active transitant entre le rotor et le réseau et son amplitude qui varient en fonction de glissement.

La figure III.23 montre que le courant de réseau est en phase par rapport à la tension du réseau, cela signifie que le transit de la puissance active est vers le moteur, pour un ($\cos \Phi=1$).

La figure III.24 illustre l'évolution de la tension et le courant d'une phase rotorique dont on remarque que sur la période de fonctionnement ou le glissement est positif ($g>0$) le déphasage entre la tension et le courant rotorique est compris entre $(\frac{\pi}{2}$ et $\pi)$, Dans ce cas le rotor fourni de la puissance active au réseau.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation des deux systèmes, turbinage et pompage qui montrent 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 synchronisé et le rotor est alimenté par des grandeurs continues, c'est aussi le cas de moteur asynchrone. L'écoulement de la puissance rotorique dépend du signe de glissement et celle de stator est indépendante de ce dernier.

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude et la simulation de pompage – turbinage dans une centrale hydroélectrique réversible basé sur une machine asynchrone à double aimantation (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 a montré l'intérêt que porte la machine asynchrone double alimentée par rapport aux autres machines utilisées.

Dans le deuxième chapitre, on a modalisé 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 coefficient constant pour

faciliter leur résolution, ainsi que l'orientation de flux qui sert à simplifier le modèle de la MADA. Cette modalisation nous permet aussi d'aboutir à des schémas blocs qui seront exploités dans le dernier chapitre pour la simulation de système pompage-turbinage.

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

Conclusion générale

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

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

Enfin on souhaite voire un jour cette technique de stockage dans notre pays.

Annexe

Paramètre de la MADA

Puissance nominale P_n	: 1.5 MW
Tension d'alimentation	: 690V 50Hz
Nombre de paire de pole P	: 2
Résistance d'enroulement statorique R_s	: 0.012 Ω
Résistance d'enroulement rotorique R_r	: 0.021 Ω
Inductance cyclique statorique L_s	: 13.732mH
Inductance cyclique rotorique L_r	: 13.703mH
Inductance magnétisante M	: 13.528mH

Paramètres des régulateurs PI

Gain proportionnel de correcteur de puissance K_p	: $5.531e^{-6}$
Gain intégral de correcteur de puissance K_i	: $3.09e^{-4}$

Paramètre du bus continu

Valeur de la capacité c	: 5000 μ F
Gain proportionnel du correcteur K_p	: 2

Paramètres du filtre

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

BIBLIOGRAPHIE

- [1] S. Taraft , « Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation » Mémoire de Magister en Electrotechnique ; Université de Bejaia ; 2008.
- [2] D. Picault « Exploitation d'un parc éolien en association avec du stockage énergétique »; Rapport de Projet de Fin d'Études de master en Génie Électrique de l'Institut National Polytechnique de Grenoble; 2007
- [3] F.Avellan, « évolution des groupes à vitesse variable »,cour a l'université d'Aix Marseille.
- [4] Ph. D. Nguyenngoc, « Optimisation de systèmes de production intermittents et non conventionnels couplés au réseau électrique » ; Thèse de Doctorat à l'université de Grenoble ; 2006.
- [5] C. Ferlat, « Le stockage hydraulique gravitaire et la production hydroélectrique sur les pentes réunionnaises – Etude du stockage de l'énergie photovoltaïque ». www.island-news.org, 2009.
- [6] 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.
- [7] M. Nasser, « Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés. », Thèse de Doctorat à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ; Paris 2011.
- [8] F.Abdoune, « Etude et contrôle des aérogénérateurs basés sur les machines asynchrones à rotor bobiné », mémoire de Magister en électrotechnique de l'université de Bejaia, 2011.
- [9]A.Boyette. « contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne. », Thèse de doctorat de l'université Nancy I, 2006.
- [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] G. Salloum, « Contribution a la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Toulouse, 2007.

[12] N. HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », mémoire de majester de l'université Mentouri de Constantine, 2008.