

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



**Faculté de Technologie**



**Département de Génie Electrique**

# **MEMOIRE**

**En vue de l'obtention du Diplôme Master**

**Filière : Electrotechnique**

**Option : Commande des Systèmes Electriques**

**Intitulé sous le**

## **Thème**

**Application d'une Commande non linéaire dans une  
Station de Transfert d'énergie par Pompage**

**Réalisé par :**

**Mr : Alia Nadji**

**Mr : Nemeur Ayoub**

**Encadré par :**

**Mr : S.Taraft**

**Promotion : 2017**

## Remerciements

*Avant tout, nous remercions **DIEU** le tout- puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Si nous sommes ici aujourd'hui, c'est grâce au soutien et aux encouragements de nos parents et de nos frères et sœurs, nous exprimons nos plus vifs remerciements.*

*Nous remercions notre promoteur **Mr S. TARAFT** pour son long soutien et ses efforts qui nous ont permis de réaliser ce mémoire.*

*Nous remercions aussi tous les enseignants nobles qui nous ont aidés de près ou de loin tout au long de notre parcours universitaire.*

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la mémoire de mon très cher et regrettable père, **AMAR** qui nous a quitté sans faire de bruit, digne, brave et bien déterminé comme tu l'as toujours été. Que le bon dieu t'accorde sa sainte miséricorde et t'accueille en son vaste paradis nchallah.*

*A ma très **chère mère** qui m'a chaleureusement aidé.*

*A mes frères **SOFIAN** et **ISLAM**.*

*A tous mes oncles et toutes mes tantes sans exception du côté paternel et maternel.*

*A tous mes amis sans exception.*

*NADJI....*



## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travaille :*

*A la mémoire de mes très chers  
à mon cœur, ma mère et mon père qui  
nous a quitté, Que le bon dieu les  
accorde sa sainte miséricorde et  
les accueille en son vaste paradis  
Inchallah.*

*À Ma famille mes frères Aymen et  
Chameseddine et ma soeur, ma future  
femme Ibtissem et toute sa famille.*

*A tous mes oncles et toutes mes tantes  
sans exception du côté paternel  
et maternel.*

*A tous mes amis sans exception.*

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

*Ayoub...*



# **SOMMAIRE**

# SOMMAIRE

---

Introduction générale.....	1
<b><u>Chapitre I : Généralités sur les centrales hydroélectriques réversible.</u></b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. L'énergie hydroélectrique.....	4
I.2.1. Avantages.....	4
I.2.2. Inconvénients .....	4
I.3. Centrales hydroélectriques .....	4
I.4. Types des centrales hydroélectriques.....	4
I.4.1. Centrales au fil de l'eau .....	5
I.3.2. Centrale de barrage.....	5
I.5. Taille des centrales hydroélectriques.....	7
I.6. Station de transfert d'énergie par pompage STEP.....	7
I.6.1. Principe de fonctionnement de la STEP .....	7
I.6.2. Avantages de la STEP .....	8
I.6.3. Rôle de la SETP dans le stockage de l'énergie électrique.....	8
I.6.4. Groupes turbine-pompe.....	9
I.6.4.1. Les groupes ternaires.....	9
I.6.4.2. Les groupes binaires réversibles.....	10
I.7. La vitesse variable.....	11
I.8. Les STEP dans le monde.....	11
I.9. Constitution de la station de transfert d'énergie par pompage(STEP).....	12
I.9.1. Bassin.....	12
I.9.2. Conduites forcées.....	12
I.9.3. Pompe.....	12
I.9.4. Turbine.....	13
I.9.5. Catégorie des turbines.....	13
I.9.5.1. Turbines à action.....	13

## SOMMAIRE

---

I.9.5.1.1. Turbine Pelton.....	13
I.9.5.1.2. Turbine Cross-flow.....	14
I.9.5.2. Turbine à réaction.....	14
I.9.5.2.1. Turbine Francis.....	14
I.9.5.2.2. Turbines hélice et Kaplan.....	15
I.9.6. Choix des turbines dans différents types de centrales en fonction de leurs hauteurs.....	16
I.10. Transformateur.....	16
I.11. Raccordement au réseau.....	16
I.12. Alternateur.....	17
I.12.1. Choix de types d'alternateurs.....	17
I.13. Présentation de la machine asynchrone double alimentation.....	18
I.13.1. Différentes domaines d'application de la MADA.....	18
I.13.2. Machine asynchrone double alimentation a rotor bobiné.....	16
I.13.3. Principe de fonctionnement de la MADA.....	18
I.13.4. Mode de fonctionnement de la MADA.....	20
I.13.5. Transfer de puissance dans la MADA.....	20
I.13.6. Avantages de la MADA.....	22
I.13.7. Inconvénients de la MADA.....	22
I.13.8. Utilisation de la MADA dans les conversions électromécaniques.....	23
I.14. Conclusion.....	23
<b><u>Chapitre II : Modélisation de la STEP et contrôle des puissances active et réactive en mode glissant.</u></b>	
II.1. Introduction .....	24
II.2. Conventions de signe et équations de base.....	25
II.3. Modélisation du groupe pompe turbine réversible .....	26
II.4. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) .....	26
II.4.1. Hypothèses simplificatrices.....	26



## SOMMAIRE

---

II.4.2. Modèle de la MADA dans le repère (a, b, c).....	27
II.4.3. Modèle diphasé de la MADA dans le repère de Park .....	27
II.4.3.1. Equations électriques.....	28
II.4.3.2. Equations magnétiques.....	29
II.4.3.4. Equation du couple électromagnétique .....	30
II.4.4. Expression des puissances, actives, réactives, statorique et rotorique.....	30
II.5.4. Expression de puissance issues du générateur.....	30
II.5. Commande vectorielle appliquée à la MADA.....	31
II.5.1 : Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	32
II.5.3. Types de commande vectorielle.....	34
II.5.4. Commande vectorielle en puissance de la MADA.....	34
II.6. Modélisation du convertisseur statique .....	35
II.6.1. Commande MLI des convertisseurs .....	37
II.6.2. Modélisation du bus continu .....	38
II.6.3. Modélisation du redresseur MLI.....	40
II.6.4. Modélisation du filtre R-L.....	40
II.8. Contrôle des puissance active et réactive en mode glissant .....	42
II.8.1. Présentation de la commande par mode glissement .....	42
II.8.2. Théorie de la commande par mode glissement .....	42
II.8.2.1. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande .....	42
II.8.2.2. Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état.....	43
II.8.2.3. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente.....	43
II.8.2.3.1. Avantages de cette structure.....	43
II.8.4. Notions d'un système à structure variable .....	44
II.8.5. Conception de la commande par mode glissant.....	44
II.8.5.1. Choix de la surface de glissement.....	45

## SOMMAIRE

---

II.8.5.2. Condition de convergence et d'existence .....	45
II.8.6. Phénomène de broutement.....	46
II.8.7. Détermination de la loi de commande .....	47
II.9. Application de la commande par mode glissant à la MADA .....	49
II.9.1 Contrôle de la puissance active .....	49
II.9.2. Contrôle de la puissance réactive .....	50
II.9.3. Calcul des paramètres $K_{rd}$ et $K_{rq}$ .....	50
II.10. Conclusion.....	52
<b><u>Chapitre III : Simulation et interprétations des résultats</u></b>	
III.1. Introduction.....	53
III.2. Système hydraulique global.....	53
III.3. Schéma du système global .....	54
III.4. Résultats de simulation .....	55
III.5. Interprétation des résultats.....	62
III.6. Conclusion.....	63
Conclusion générale .....	64
Annexe .....	66
Bibliographie.....	67

**Chapitre I : Généralités sur les centrales hydroélectriques.**

<b>Figure (I.1) :</b> Centrale hydroélectrique au file de l'eau.....	5
<b>Figure (I.2) :</b> Centrale de barrage .....	6
<b>Figure (I.3) :</b> Centrale de pompage-turbinage en mode de turbinage (a) et en mode de pompage (b).....	8
<b>Figure (I.4) :</b> Capacités des différents moyens de stockage d'énergie électrique.....	9
<b>Figure (I.5) :</b> Groupe ternaires.....	10
<b>Figure (I.6) :</b> Groupe réversible.....	11
<b>Figure (I.7) :</b> Conduites forcées.....	12
<b>Figure (I.8) :</b> Turbine Pelton.....	13
<b>Figure (I.9) :</b> Roue Francis .....	15
<b>Figure (I.10) :</b> Turbine Kaplan.....	15
<b>Figure (I.11) :</b> Structure de la MADA a rotor bobine.....	19
<b>Figure (I.12) :</b> Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation .....	22

**Chapitre II : Modélisation de la STEP et contrôle des puissances active et réactive en mode glissant**

<b>Figure (II.1) :</b> Sens des puissances définies positives.....	25
<b>Figure (II.2) :</b> Répartition des différents enroulements d'une MADA .....	27
<b>Figure (II.3) :</b> Angle statorique et rotorique dans le repère de Park .....	29
<b>Figure (II.4) :</b> Schéma de principe de contrôle des puissances du générateur.....	31
<b>Figure (II.5) :</b> Principe de la commande vectorielle .....	32
<b>Figure (II.6) :</b> Schéma bloc du système à réguler .....	33
<b>Figure (II.7) :</b> Schéma bloc de la commande vectorielle avec un seul régulateur .....	35
<b>Figure (II.8) :</b> Schéma d'un onduleur de tension triphasé .....	36
<b>Figure (II.9) :</b> Schéma de principe de la MLI .....	38
<b>Figure (II.10) :</b> Schéma du bus continu .....	38
<b>Figure (II.11) :</b> Régulateur du tension de bus continu .....	39
<b>Figure (II.12) :</b> Redresseur MLI .....	40

## *Liste des figures*

---

<b>Figure (II.13) :</b> Représentation du filtre de liaison R-L .....	40
<b>Figure (II.14) :</b> Modèle du filtre dans le repère d-q .....	41
<b>Figure (II.15) :</b> Structure de régulation par ajout de la commande équivalente .....	43
<b>Figure (II.16) :</b> Différentes modes de trajectoire dans le plan de phase .....	44
<b>Figure (II.17) :</b> Fonction signe .....	48
<b>Figure (II.18) :</b> Commande douce a un seul seuil .....	48
<b>Figure (II.19) :</b> Schéma bloc de la structure de la commande par mode glissant .....	51
<b><u>Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats</u></b>	
<b>Figure (III.1) :</b> Schéma structural de la commande du système global.....	54
<b>Figure (III.2) :</b> Débit volumique.....	55
<b>Figure (III.3) :</b> Puissance mécanique de la turbine.....	55
<b>Figure (III.4) :</b> Puissance active du réseau .....	56
<b>Figure (III.5) :</b> Surface de glissement de puissance active .....	56
<b>Figure (III.6) :</b> Puissance active du réseau et sa référence.....	57
<b>Figure (III.7) :</b> Surface de glissement de la puissance réactive.....	57
<b>Figure (III.8) :</b> Puissance réactive statorique et sa référence. ....	58
<b>Figure (III.9) :</b> Puissance active statorique.. ....	58
<b>Figure (III.10) :</b> Puissance réactive statorique.....	59
<b>Figure (III.11) :</b> Puissance active rotorique .....	59
<b>Figure (III.12) :</b> Couple électromagnétique .....	50
<b>Figure (III.13) :</b> Tension d'une phase rotorique .....	60
<b>Figure (III.14) :</b> Courant d'une phase rotorique.....	61

## **Liste des tableaux**

---

---

Tableaux (I-1) : Taille des centrales hydroélectriques .....	7
Tableaux (I.2) : Classification des centrales hydroélectrique en fonction de leur chute.....	16

## *Nomenclature*

---

$A_s, B_s, C_s :$	Phases statorique	[-]
$a_r, b_r, c_r :$	Phases rotorique	[-]
$C_{em} :$	Couple électromagnétique	[N.m]
$P_{t1} :$	Puissance primaire transformateur	[W]
$P_{res} :$	Puissance du réseau	[W]
$Q_{res} :$	Puissance réactive totale issus du générateur	[VAR]
$Q_{rr} :$	Puissance réactive à l'entrée du convertisseur coté réseau	[VAR]
$\theta_r :$	Position du rotor par rapport au stator	[rad]
$\theta_s :$	Angle du champ tournant statorique	[rad]
$\omega_m :$	Pulsation des courants rotorique.	[rad/s]
$\omega_s :$	Pulsation des courants statorique	[rad/s]
$P_s ,$	Puissance transitant par le stator	[W]
$P_{mec}$	Puissance mécanique de la machine	[W]
$P_r :$	Puissance transitant par le rotor	[W]
$P_{em} :$	Puissance électromagnétique	[W]
$f_m :$	Fréquence de rotation du rotor.	[Hz]
$f_r :$	Fréquence des courants rotorique.	[Hz]
$f_s :$	Fréquence des courants statorique.	[Hz]
$\Phi_{rd}, \Phi_{rq} :$	Flux direct et en quadrature rotoriques	[Wb]
$\Phi_{sd}, \Phi_{sq} :$	Flux direct et en quadrature statoriques	[Wb]
$C_{mec} :$	Couple mécanique	[N.m]
$g :$	Glissement	[-]
$H :$	Hauteur de chute	[m]
$J :$	L'inertie totale du groupe	[Kg.m <sup>2</sup> ]
$L_r :$	Inductance cyclique rotorique	[H]
$L_s :$	Inductance cyclique statorique	[H]
$MADA :$	Machine asynchrone à double alimentation	[-]

## *Nomenclature*

---

STEP :	Station de transfert d'énergie par pompage	[-]
MC :	Mode de convergence	[-]
MG :	Mode de glissement	[-]
MLI :	Modulation de largeur d'impulsion	[-]
MRP :	Mode de régime permanent	[-]
ENR :	Energie renouvelables	[-]
M :	Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor et de stator	[H]
N :	Vitesse de rotation	[tr/min]
$N_s$ :	Vitesse de synchronisme	[ tr/min]
P :	Nombres de paires de pôles.	[-]
S :	Opérateur de Laplace	[-]
$P_c$ :	Puissance emmagasinée dans le condensateur	[W]
$P_f$ :	Puissance active à transiter au réseau	[W]
$P_h$ :	Puissance hydraulique de l'eau	[W]
$P_{mec\ p-t}$ :	Puissance mécanique du groupe pompe turbine	[W]
Q :	Débit de l'eau	[m <sup>3</sup> /s]
G :	Accélération terrestre $G=9.81$	[m/s <sup>2</sup> ]
$\rho$ :	Masse volumique de l'eau	[Kg/m <sup>3</sup> ]
F :	Coefficient de frottement visqueux	[N.m.s /rd]
$C_{vis}$ :	Couple des frottements visqueux	[N.m]
$R_r$ :	Résistance rotorique	[ $\Omega$ ]
$R_s$ :	Résistance statorique	[ $\Omega$ ]
$R_f$ :	Résistance du filtre R-L	[ $\Omega$ ]
$L_f$ :	Inductance de filtre R-L	[H]
$V_{rd}, V_{rq}$ :	Tensions directe et en quadrature rotoriques	[V]
$V_{sd}, V_{sq}$ :	Tensions directe et en quadrature statoriques	[V]

## *Nomenclature*

---

$v_{dc}$ :	La tension redressé	[V]
$V_0$ :	La tension initiale de condensateur	[V]
$V_m$ :	La tension de modulatrice	[V]
$V_p$ :	La tension de la porteuse	[V]
$V_c$ :	Tension du Bus continu	[V]
$e_d$ :	La tension de découplage selon l'axe directe	[V]
$e_q$ :	La tension de découplage selon l'axe quadratique	[V]
$\Omega$ :	Vitesse angulaire de rotation	[rad/s]
$\Omega_s$ :	Vitesse synchronisme	[rad/s]
$\omega_r$ :	Vitesse du rotor de la génératrice	[rad/s]
$\omega_t$ :	Vitesse de la turbine	[rad/s]
$I_{rq}$ :	Courant rotorique selon l'axe quadratique	[A]
$I_{rd}$ :	Courant rotorique selon l'axe directe	[A]
$I_{sq}$ :	Courant statorique selon l'axe quadratique	[A]
$I_{sd}$ :	Courant statorique selon l'axe directe	[A]
$I_{dc-1}$ :	Courant modulé issu du premier convertisseur MLI	[A]
$I_{dc-2}$ :	Courant modulé issu du deuxième convertisseur MLI	[A]
$I_c$ :	Courant du condensateur	[A]
$I_{c-ref}$ :	Courant de référence à injecter dans le condensateur	[A]
$m$ :	L'indice de modulation	[-]
$r_1$ :	Le taux de modulation ou coefficient de réglage de tension	[-]
$[X]_{dq0}$ :	Matrice de transformation de Park	[-]
$[X]_{abc}$ :	Matrice inverse de Park	[-]
$\sigma$ :	Coefficient de dispersion de Blondel	[-]
$S_i$ :	L'état logique de conduction des interrupteurs	[-]
$\tau_u$ :	Le temps de réponse désiré de la tension redressée	[s]
$n$ :	Neutre	[-]



## *Nomenclature*

---

$\tau_r$ :	Temps de réponse du système	[-]
$e(x)$ :	L'écart entre la variable à régler et sa référence	[-]
$\delta$ :	Gaine positif	[-]
$c$ :	Capacité du condensateur	[F]
$V_{rq\text{ éq}}$ :	Tension équivalente du régulateur mode glissant	[V]
$V_{rd\ n}$ :	Tension non linéaire du régulateur	[V]
$K_{rd}$ :	Gaine de régulateur mode glissant (repère direct)	[-]
$K_{rq}$ :	Gaine de régulateur mode glissant (repère quadratique)	[-]
$S(x)$ :	Surface de glissement	[-]
$P_{s\text{ réf}}$ :	Puissance statorique de référence	[W]
Sat :	Fonction saturation (Matlab Simulink)	[-]
$Q_{s\text{ réf}}$ :	puissance réactive de référence	[V]

### **Indice**

$n$ :	Neutre
$s$ :	Indice pour stator
$r$ :	Indice pour rotor
$d$ :	Indice pour composante dans l'axe direct
$q$ :	Indice pour composante dans l'axe transverse
$a, b, c$ :	Indices pour les phases a, b et c
$cm$ :	Indice pour commande



# **Introduction Générale**

Face au défi environnemental et climatique qui impose impérativement de réduire les émissions de gaz à effet de serre, CO<sub>2</sub> pour l'essentiel, d'ici le milieu du 21<sup>e</sup> siècle, tous les pays industrialisés, mais également les pays émergents, se sont engagés dans la transition énergétique. Malgré la persistance des énergies fossiles encore majoritaires dans le paysage énergétique mondial et qui le resteront encore durant plusieurs décennies, la part des énergies renouvelables (ENR) ne cesse de croître.

En est fait l'énergie hydroélectrique occupe une place de laideur dans le domaine des énergies renouvelables notamment les centrales pompages turbinages avec leur grande capacité de stockage d'énergie potentiel mise à disposition du réseau électrique.

Le système de conversion électromécanique utilisé couramment dans les centrales hydroélectriques repose sur les machines synchrones à rotor bobiné ou les machines asynchrone à cage, qui possède une configuration simple, mais qui pouvant assurée un fonctionnement efficace seulement à l'aide des dispositifs de contrôle mécanique ou électrique.

Le système de conversion électromécanique présenté dans ce mémoire utilise une machine asynchrone à double alimentation (MADA), qui est une machine qui prend sa place petite à petite dans les stations hydroélectriques réversibles, car les avantages présentés par cette machine fait face à certaine contraintes que les autres systèmes de conversion subite.

Le but de ce travail c'est la commande en puissance de la STEP qui se résume aux contrôles des puissances active et réactive de la machine utilisé.

La régulation du système globale impose à utiliser une commande de type non linéaire et la commande par mode glissant, en est une. Cette dernière est considérée comme l'une des approches les plus simple pour la commande des systèmes non linéaire et les systèmes ayant un modèle imprécis.

Ce travaille fait l'objet d'une étude sur l'application d'une commande non linéaire dans une station de transfert d'énergie par pompage (STEP).

Le premier chapitre fait l'objet de généralité sur les centrales hydroélectriques, en se basant sur les stations réversibles (STEP), on définissants bien sûr chaque organe qui la constitue.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de chaque élément constituant la station (STEP), en commençant par le groupe pompe turbine réversible, ensuit la machine MADA, puis le convertisseur coté rotor. Enfin en termine par l'essentielle de notre travail qui consiste a appliqué la commande par mode glissant en passant bien sûr par la commande vectorielle avec orientation de flue statorique.

## *Introduction générale*

---

Le troisième chapitre est consacré à la simulation des résultats par le logiciel Matlab-Simulink, en commentant les résultats obtenus pour donner une explication qui est proche de la pratique.

Finalement, une conclusion générale résumera les résultats obtenus dans ce présent mémoire.



# CHAPITRE I

**Généralités sur les centrales hydroélectriques**

**I.1. Introduction**

Ce chapitre fait l'objet en premier lieu d'une introduction, ou bien d'une présentation des centrales hydroélectriques en commençant d'abord par donner une explication de l'énergie hydroélectrique, puis on passera au types de centrales qui existe en donnant leurs caractéristiques au passage.

Ensuit, on va présenter les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) en donnant une définition de cette dernière, en expliquons aussi leurs principes de fonctionnements dans les deux modes de fonctionnements (pompage et turbinage).

Puis, on va passer au rôle de ces stations dans le stockage d'énergie mise à disposition du réseaux électrique, puis on passe au groupes pompes turbine utilisé, ensuit en définiras tous les composant qui constitue une STEP (Conduits, Bassins ,.... Alternateurs, Turbines...).

On aura aussi à présenter les types de machine les plus utilisées jusqu' à présent en donnant un grand intérêt à présenter la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui serait la machine étudier ou bien utilisé dans notre étude en se basant sur les modes de fonctionnements de cette dernière sans oublié le transfert de puissance.

Enfin, en termine ce chapitre par une conclusion qui résumeras le travail traité dans ce chapitre qui serait une plateforme indispensable pour développer le chapitre suivant.

## **I.2. L'énergie hydroélectrique**

L'énergie hydroélectrique ou hydroélectricité est une énergie électrique renouvelable qui est issue de la conversion de l'énergie hydraulique en électricité. [1]

L'énergie potentielle de l'eau est convertie en énergie cinétique lors de la descente dans la conduite forcée. Puis, cette dernière est convertie en énergie cinétique de rotation dans la turbine hydraulique. Enfin, l'énergie cinétique de rotation de la turbine est transformée en énergie électrique dans l'alternateur.

### **I.2.1. Avantages [1]**

- Énergie renouvelable et propre ;
- Efficace : 90% de l'énergie cinétique convertie en électricité (comparé à 35% lors de la conversion de l'énergie chimique ou nucléaire) ;
- Fiable : les seuls mécanismes en jeu sont la turbine et la génératrice ;
- Économique : une fois construite, les coûts de maintenance et d'exploitation seront faibles.

### **I.2.2. Inconvénients**

- Les cours d'eau les plus intéressants sont déjà exploités ;
- On se dispute l'eau pas seulement pour produire de l'électricité.

## **I.3. Centrales hydroélectriques**

Les centrales hydrauliques exploitent des barrages, construits sur les fleuves, les rivières ou les lacs.

Grâce à une différence de hauteur, la force de l'eau fait tourner une turbine. Le générateur convertit le mouvement produit par la turbine en électricité.

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :

- Hauteur de la chute ;
- Débit de la chute.

## **I.4. Types des centrales hydroélectriques**

Il existe deux types de centrale hydroélectrique :

- Centrales au fil de l'eau ;
- Centrale de barrage.

### I.4.1. Centrales au fil de l'eau

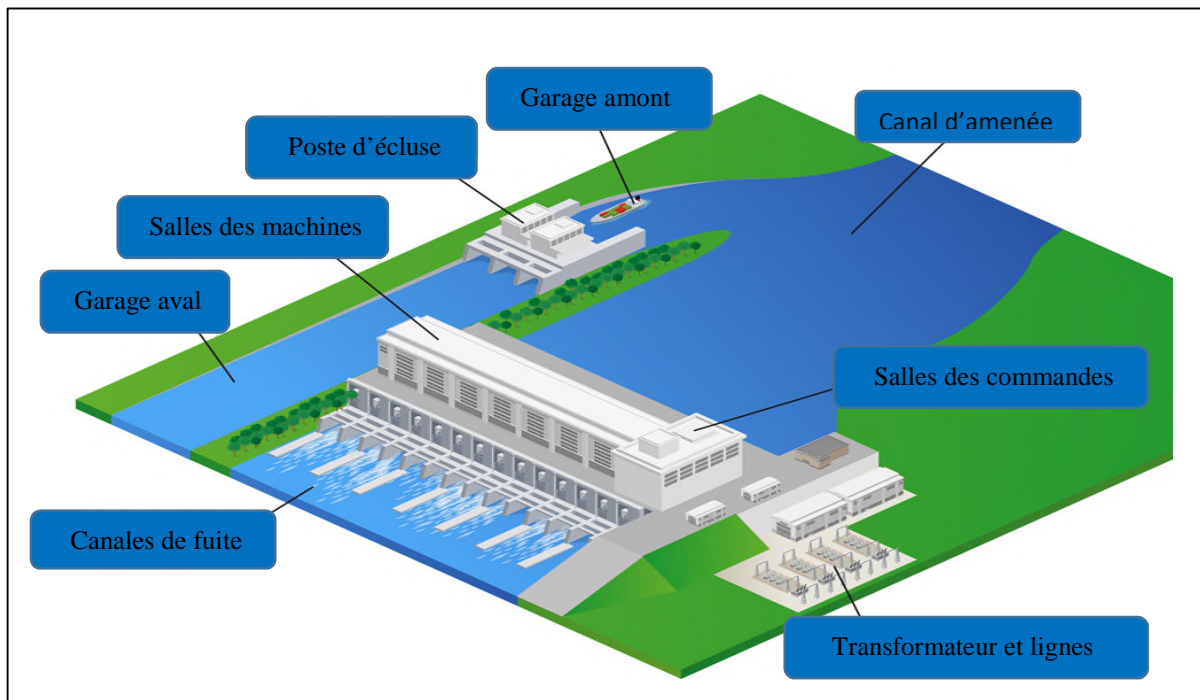
Les centrales au fil de l'eau utilisent le débit du fleuve, et fournissent une électricité à faible coût. La puissance délivrée dépend du débit du fleuve. Leurs capacités peuvent aller de moins de 1 mégawatt (mini centrales hydroélectriques) à plusieurs centaines de mégawatts. [2]

#### ➤ Caractéristique

Peu modulables et difficiles à arrêter, les centrales au fil de l'eau produisent de l'électricité fatale, utilisée en base, offrant une production constante et fiable. Cependant, en cas de grande sécheresse, et si le débit du fleuve est réduit, la production hydroélectrique peut être interrompue.

#### ➤ Ressource

La production au fil de l'eau utilise une source d'énergie primaire renouvelable et inépuisable (le courant de l'eau), le schéma explicatif ci-dessus nous montre le principe de fonctionnement de ces centrales.



**Figure (I.1) :** Centrale hydroélectrique au fil de l'eau.

### I.4.2. Centrale de barrage

Les barrages créent une retenue d'eau appelée réservoir, qui retient l'écoulement naturel de l'eau. Une hauteur de chute est créée entre l'eau accumulée et la turbine, placée dans la



centrale, en contrebas. Via une conduite forcée, l'eau est acheminée sur le couple turbine-alternateur, ce qui produit l'électricité.

La puissance de la centrale dépend de la hauteur de chute et du débit d'eau. Plus ceux-ci sont élevés, plus la puissance délivrée sera importante. Elle peut aller de quelques dizaines à plusieurs centaines de mégawatts. [2]

### ➤ Caractéristique

Modulables et capables de fournir rapidement de grande quantité d'électricité, les barrages sont utilisés en période de pointe, durant les heures de plus forte consommation (pics journaliers en période de grand froid, production de secours en cas de panne d'une autre centrale).

Les barrages sont un atout important pour ajuster la production à des variations importantes et rapides de la demande.

### ➤ Ressource

L'hydroélectricité de barrage provient d'une source d'énergie primaire renouvelable et inépuisable.

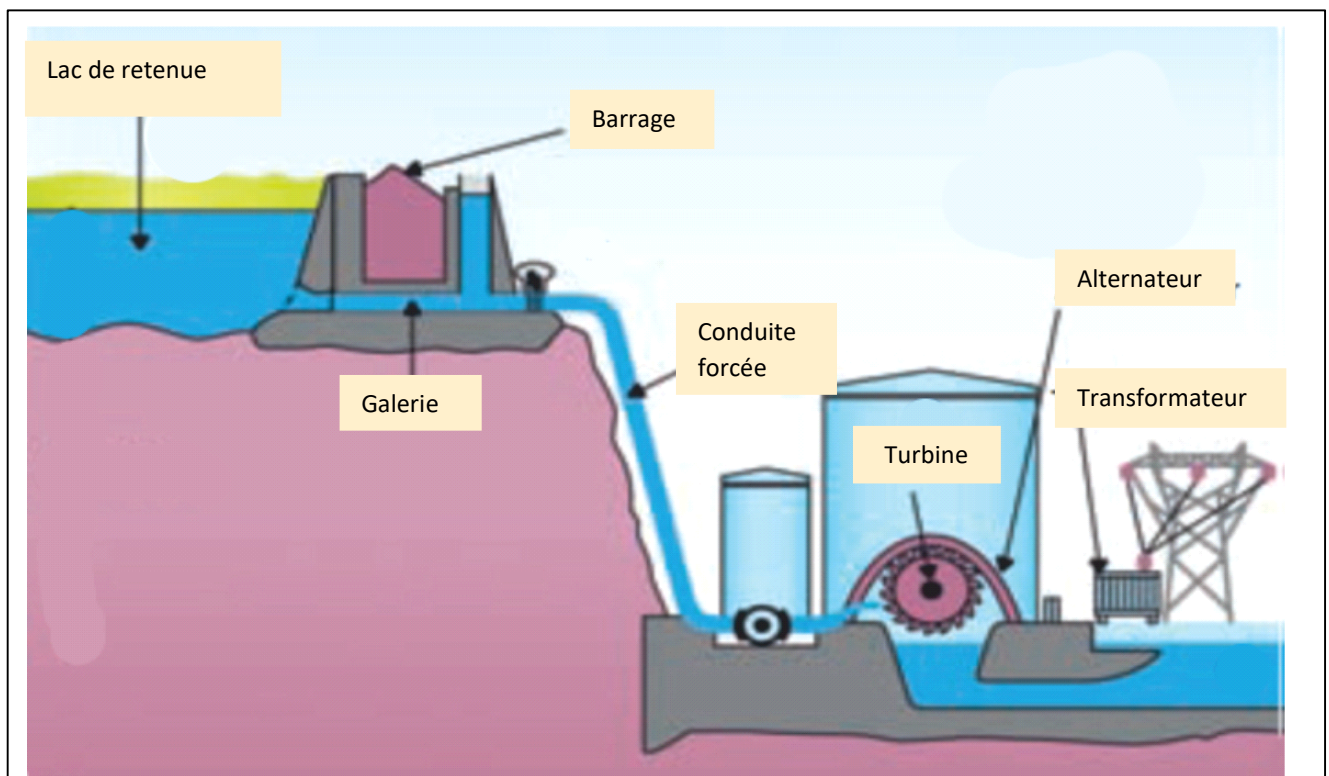


Figure (I.2) : Centrale de barrage.

### I.5. Taille des centrales hydroélectriques

Le tableau ci-dessus résume les catégories de centrales en fonction de la puissance délivrée :

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	$P < 10\text{KW}$

**Tableaux (I.1) :** Taille des centrales hydroélectriques.

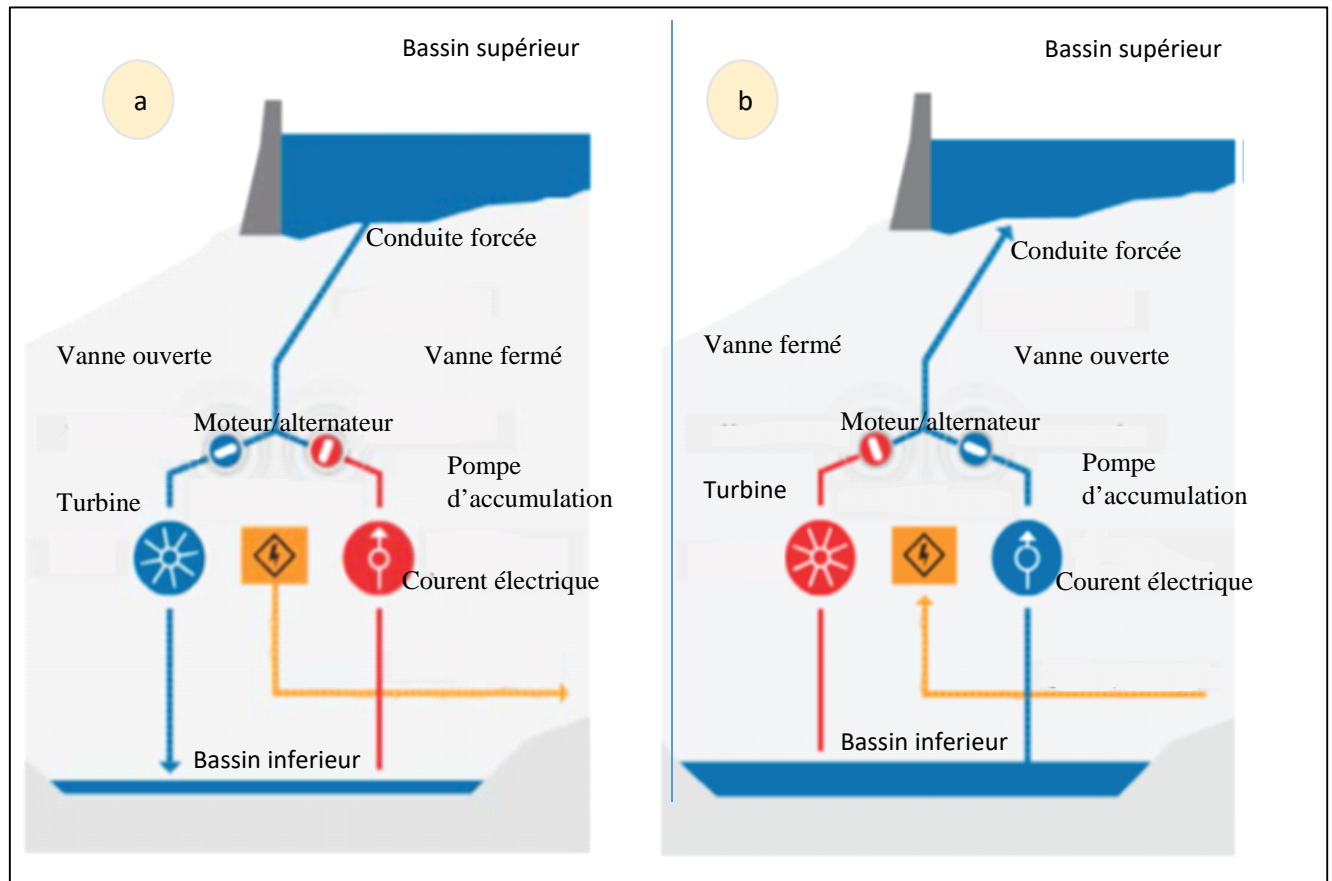
### I.6. Station de transfert d'énergie par pompage STEP

Contrairement aux centrales à accumulations les installations de pompages-turbines peuvent faire remonter l'eau déjà turbinée, afin de le turbinée à nouveau dans ce cas l'énergie stocker peut assurer l'approvisionnement en électricité du réseau a tout heure.

Généralement, elles turbinent lorsque le prix de l'électricité est plus élevé (par exemple : lorsque la demande augmente), et pompent lorsque celui-ci est bas (par exemple : lorsque la demande est faible). Les différences de prix entre courant pompé et courant turbiné sont donc un facteur important pour ces centrales. [3]

#### I.6.1. Principe de fonctionnement de la STEP

- Mode turbinage l'eau du bassin supérieur est relâchée dans le système avec un certain débit. Cette puissance de l'eau actionne la turbine, qui entraîne à son tour l'alternateur, qui nous donne de l'électricité qu'on injecte dans le réseau.
- Mode de pompage la machine fonctionne comme moteur qui est alimenté par l'électricité du réseau, et entraîne la pompe. Celle-ci refoule l'eau contenue dans le bassin inférieur pour qu'elle s'accumule dans le bassin supérieur.



**Figure (I.3) :** Centrale de pompage-turbinage en mode de turbinage (a) et en mode de pompage (b). [3]

### I.6.2. Avantages de la STEP

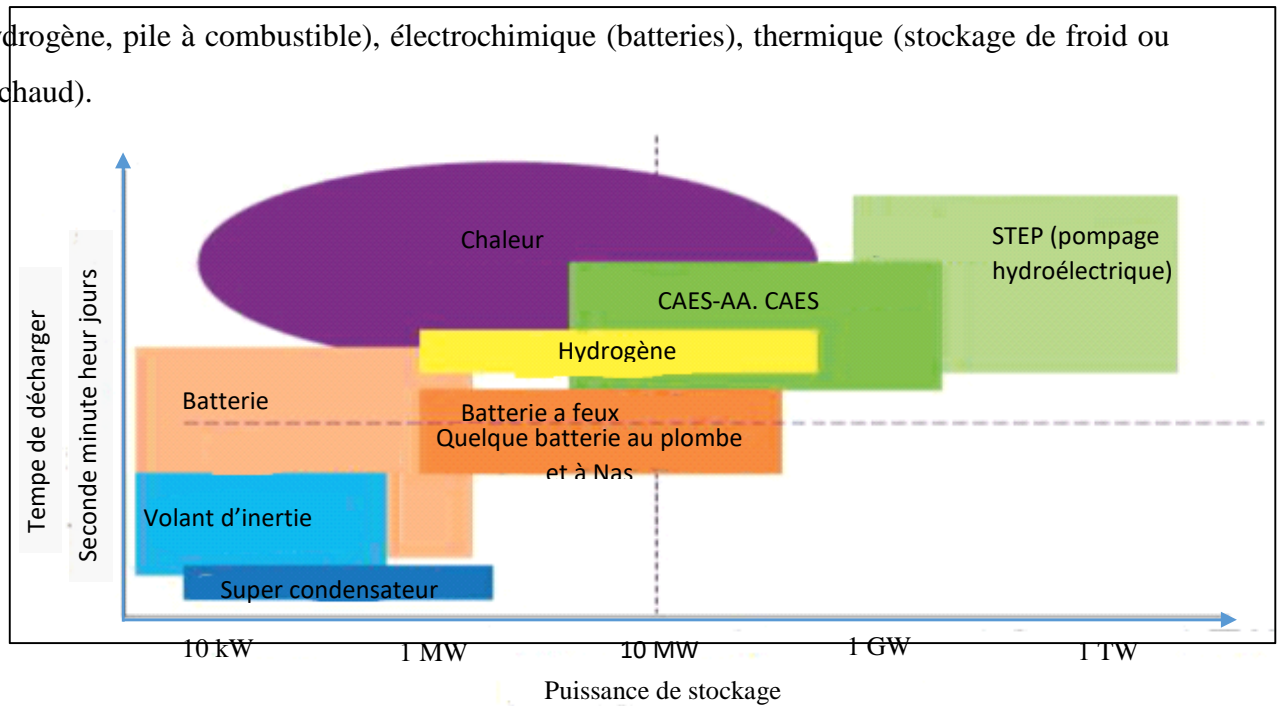
On peut citer quelques avantages :

- Le rendement d'une centrale de pompage-turbinage est de 75 à 80%, ce qui signifie qu'environ les trois quarts de l'énergie électrique utilisée pour l'exploitation de la pompe sont récupérés lors du turbinage.
- Les centrales hydroélectriques produisent de l'électricité de manière très efficace. En fait, elles convertissent environ 90 % de l'énergie de l'eau en électricité.
- Le rendement de ces stations est plus important que tout autre type de production d'énergie électrique. A titre d'exemple, le rendement d'une centrale nucléaire est inférieur à 40%. Les centrales hydroélectriques produisent 20% de l'électricité mondiale.

### I.6.3. Rôle de la STEP dans le stockage de l'énergie électrique

Le stockage direct de l'énergie électrique est une opération difficile surtout pour un stockage à grande échelle. Il convient donc de la transformer en une autre forme d'énergie plus facilement stockable.

La **figure (I.4)** illustre les différents moyens de stockage d'énergie électrique les plus connus. D'où on trouve le stockage mécanique (stockage potentiel ou cinétique), chimique (hydrogène, pile à combustible), électrochimique (batteries), thermique (stockage de froid ou de chaud).



**Figure (I.4) :** Capacités des différents moyens de stockage d'énergie électrique. [4]

On voit bien d'après la figure en haut que les STEP occupent une place de laideur dans le stockage propre (écologique) d'énergie électrique.

#### I.6.4. Groupes turbine-pompe

On trouve généralement deux types de groupes :

##### I.6.4.1. Les groupes ternaires

Les STEP de première génération étaient équipées de groupes ternaires à axe horizontal, puis l'augmentation des puissances, donc du poids des machines, a nécessité de passer à une disposition à axe vertical.

Dans cette configuration la turbine est une Pelton obligatoirement calée au-dessus du niveau aval maximal, sauf à utiliser un dispositif permettant de maintenir l'écoulement libre sous la roue par contre-pression.

Quant à la pompe, les conditions de non cavitation nécessitent son enfoncement sous le niveau aval minimal ce qui conduit à une ligne d'arbre de grande hauteur nécessaire à l'empilement des trois machines.

L'alternateur-moteur tournant dans le même sens de rotation pour les deux modes de fonctionnement, la turbine permet le démarrage en mode pompe directement sans nécessiter

une machine auxiliaire spécifique ou de procédures particulières pour diminuer le couple au démarrage. Sans contraintes liées au démarrage, il est possible de concevoir la pompe avec un nombre d'étages et des caractéristiques hydrauliques les mieux adaptées à son domaine pour un fonctionnement en sécurité. [4]

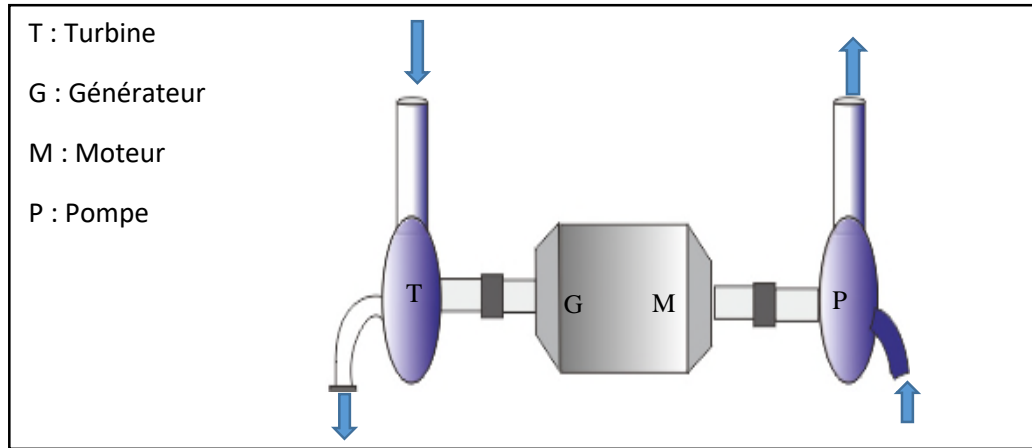


Figure (I.5) : Groupe ternaires.

#### I.6.4.2. Les groupes binaires réversibles

Dans ce cas, la pompe et la turbine ne constituent qu'une seule machine réversible par inversion du sens de rotation. La pompe turbine est équipée de roues de type Francis.

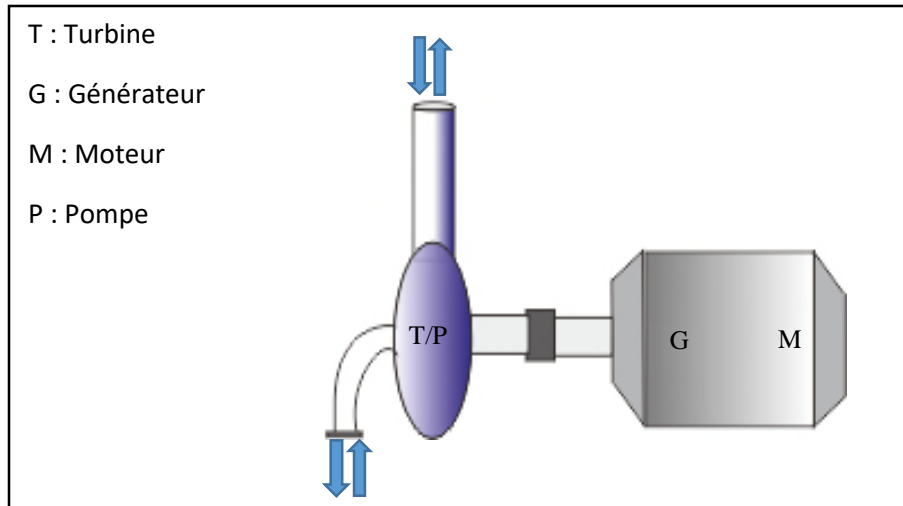
La majorité des installations actuellement en service sont des groupes non réglables avec moteur-alternateur synchrone. Mono-étage ou pluri-étages pour les hautes chutes, le démarrage en pompe nécessite une puissance importante pour vaincre le couple de démarrage, Il convient donc d'adjoindre une machine électrique capable d'apporter cette puissance.

L'évolution actuelle de la technologie permet aux constructeurs de proposer des groupes turbine-pompe réglables à deux étages munis d'un distributeur avec aubes directrices réglables. Ils permettent de couvrir des hauteurs de chute de 700 à 1200 m.

Le démarrage de ce type de groupe s'effectue roues dénoyées par air comprimé, rendu possible par la présence du distributeur, ce qui limite la puissance nécessaire à quelques pour cent de la puissance maximale et permet l'utilisation d'auxiliaires de démarrage de faible encombrement : moteur poney en partie supérieure du groupe, convertisseur de fréquences.

Les moteurs alternateurs synchrones équipant la plupart des centrales existantes de ces deux types d'architectures sont à vitesse fixe, la pompe est calée pour un point de fonctionnement déterminé par une hauteur de chute, un débit, une vitesse de rotation déterminée et ne peut être exploitée que sur une plage de puissance très limitée autour de ce point.

Du fait des variations en cours d'exploitation il en résulte un fonctionnement avec un rendement inférieur à l'optimum. Le groupe ternaire a la possibilité de régler la puissance de la turbine Pelton par action sur les injecteurs. [4]



**Figure (I.6) :** groupe réversible.

### I.7. La vitesse variable

La majorité des STEP actuellement en service sont équipées de groupes à vitesse fixe entraînés par moteur-générateur synchrone. Ils sont donc optimisés pour un point de fonctionnement bien défini en dehors duquel le rendement est inférieur à sa valeur optimale.

Avec la vitesse variable il devient possible d'adapter les variations de débits et de la hauteur de chute tout en maximisant le rendement. En outre, cette technique présente un autre avantage important pour la gestion du remplissage des réservoirs, à savoir la possibilité de régler la puissance active en mode pompe en agissant sur la vitesse de rotation.

Le stockage est alors possible même si la quantité d'énergie disponible est inférieure à celle qu'exigerait le fonctionnement à vitesse fixe.

En permettant une meilleure adaptation aux variations de débit et de chute, la vitesse variable permet de minimiser la cavitation et les instabilités de fonctionnement.

### I.8. Les STEP dans le monde

Aujourd'hui la flexibilité dans l'exploitation des réseaux électriques par l'introduction du stockage est une nécessité surtout pour limiter l'utilisation des anciens méthodes d'exploitations qui sont à la fois coûteuses et dangereuses et même complexes.

En 2015, c'est le fort développement des énergies renouvelables intermittentes qui induit ce besoin de flexibilité. Au niveau mondial, 99% du stockage stationnaire de l'énergie



électrique est assuré par les STEP. La capacité mondiale atteignait 140 GW à fin 2011 pour 400 STEP en fonctionnement dont 46 MW pour l'ensemble européen, 45 en Asie, 21 aux Etats Unis. [4]

## I.9. Constitution de la station de transfert d'énergie par pompage(STEP) classique

### I.9.1. Bassin

Les retenues d'eau, haute et basse, peuvent être naturellement ou bien artificielles. Quand la retenue est artificielle les bassines sont généralement réalisées par creusement et par utilisation des matériaux de déblai pour créer une ceinture de digues fermant la cuvette, suivent la topographie du terrain à l'origine, plat ou déjà en dépression, les travaux de terrassement sont plus ou moins importantes. [6]

### I.9.2. Conduites forcées

Les conduites forcées ont pour fonction de transférer l'eau depuis les ouvrages d'aménée (galeries, canaux, ...) jusqu'aux installations qui permettent de convertir l'énergie hydraulique en énergie électrique (turbines d'une usine hydro-électrique).

Les ouvrages d'aménée peuvent provenir d'une retenue d'eau (lac, barrage). Ils peuvent être soit à ciel ouvert (canaux), soit être des galeries fermées avec ou sans surface libre (quand l'eau emplit entièrement la galerie on dit que la galerie est en charge). [5]



Figure (I.7) : Conduites forcées. [5]

### I.9.3. Pompe

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). [6]

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

#### **I.9.4. Turbine**

Le rôle de la turbine est de transformer l'énergie de l'eau, la vapeur ou de vent en énergie mécanique de manière à faire tourner un alternateur pour produire une énergie électrique.

#### **I.9.5. Catégorie des turbines**

Il existe deux catégories principales de turbines :

##### **I.9.5.1. Turbines à action**

Un jet libre agit sur des augets ou des aubes profilées placées sur la périphérie d'une roue. Ce jet exerce une force sur l'auget en mouvement de rotation, qui est transformée en couple et puissance mécanique sur l'arbre de la turbine.

La turbine à action est caractérisée par le fait que l'énergie à disposition de l'aubage est entièrement sous forme d'énergie cinétique.

L'échange d'énergie entre l'eau et l'aubage a lieu à pression constante, généralement à la pression atmosphérique. La roue de la turbine est dénoyée et tourne dans l'air. [7]

##### **I.9.5.1.1. 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. [14]



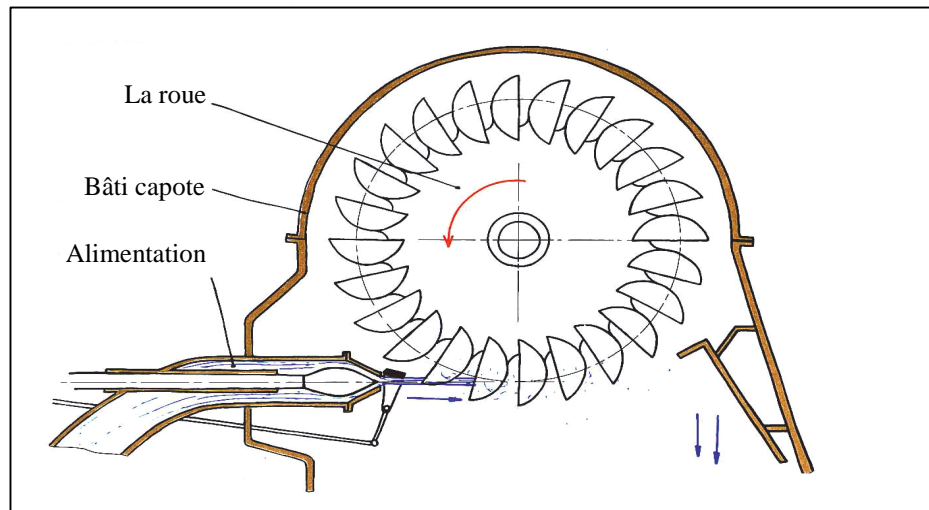


Figure (I.8) : Turbine Pelton.

### I.9.5.1.2. Turbine Cross-flow

La turbine Cross-flow, appelée aussi turbine à flux traversant, est une machine à action qui a ceci de particulier que l'eau traverse deux fois la roue.

La turbine Cross-flow est de construction simple, ce qui a conduit à sa popularité dans les pays en voie de développement.

La roue, traversée deux fois par l'eau, est autonettoyante : les débris bloqués sur l'aubage à l'entrée de la roue sont chassés par l'eau qui en sort. En contrepartie, le rendement maximum de ce type de turbine est moyen et reste compris, pour une machine de bonne qualité, entre 80 et 83%.

La vitesse de rotation est généralement basse ce qui fait qu'un multiplicateur à engrenages ou à courroie doit être intercalé entre turbine et générateur.

Lorsque la turbine Cross-flow travaille sous de faibles chutes et avec un niveau aval variable, elle peut être équipée d'un aspirateur qui permet de récupérer entre la moitié et les trois quarts de la hauteur d'aspiration. Pour ce faire, le bâti de la turbine est doté d'une soupape d'admission d'air pré-réglée pour maintenir la dépression nécessaire à la sortie de la roue. [7]

### I.9.5.2. Turbine à réaction

Une turbine à réaction est une machine fermée (noyée) qui utilise à la fois la vitesse de l'eau (énergie cinétique) et une différence de pression. Deux principes sont à la base de son fonctionnement :

- La création d'un tourbillon au moyen d'une bêche spirale, d'aubages directeurs, ou les deux à la fois.

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

Ces aubages se comportent comme une aile d'avion : l'écoulement de l'eau provoque sur le profil de l'aube une force hydrodynamique qui induit un couple sur l'arbre de la turbine. Comme pour une aile d'avion, la force portante résulte d'une différence de pression entre les deux faces du profil. [7]

#### I.9.5.2.1. Turbine Francis

Elle tien sont nom de James bicheno Francis (1815-1892) qui développa cette turbine à réaction en 1849.

La roue Francis est immergée est exploite aussi bien la vitesse de l'eau qu'une déférence de pression.

Cette turbine est typiquement une machine de basse chute (20-100 m environ), et le rendement atteint 92%.

L'eau y arrive sur le pourtour de la roue, pousse les aubes, puis se dirige vers l'axe de la turbine. Elle s'écoule ensuite par le canal de fuite situé sous la turbine.



Figure (I.9) : Roue Francis.

#### I.9.5.2.2. Turbines hélice et Kaplan

Cette turbine a été inventée par Viktor Kaplan, ingénieur autrichien (1876-1934). Cette turbine a la forme d'une hélice de bateau. Son axe peut être soit vertical, soit horizontal.

Dans le cas d'un axe horizontal, on parle de groupe (bulbe). Les pales de l'hélice sont orientables et immergées. L'eau est dirigée vers l'hélice par des aubes de distribution. Cette turbine est utilisée pour les basses chutes (2-30m) et les grands débits. Typiquement, ce type de

turbine équipe les centrales au file de l'eau. C'est aussi une machine à réaction dont le rendement mécanique, peu sensible aux variations de débit atteint lui aussi 92%.

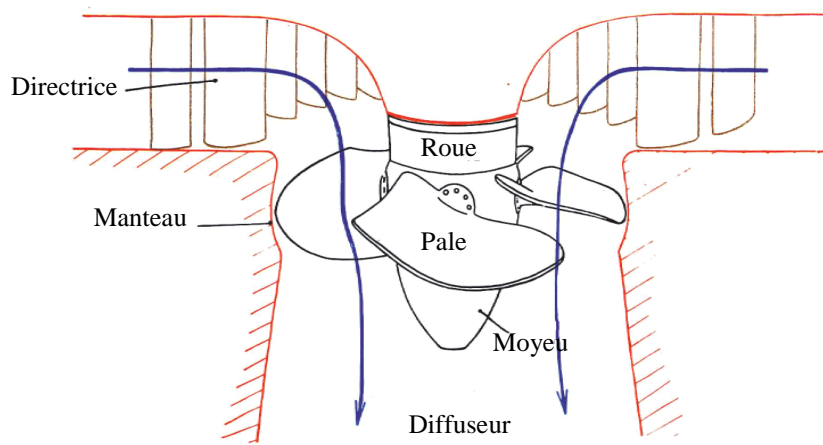


Figure (I.10) : Turbine Kaplan.

### I.9.6. Choix des turbines dans différents types de centrales en fonction de leurs hauteurs

Centrale hydroélectrique	Hauteur de chute (H)	Turbine utilisé
haute chute	$H > 200$ m	Pelton
Moyenne chute	$30\text{m} < H < 200\text{m}$	Francis.
Petite chute	$H < 30$ m	Kaplan

Tableaux (I.2) : Classification des centrales hydroélectrique en fonction de leur chute. [15]

### I.10. Transformateur

Un transformateur électrique est un convertisseur qui permet de modifier les valeurs de la tension, et de l'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative en un système de tension, et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement.

Dans un transformateur, l'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique qui constitue la carcasse du transformateur.

Ces deux circuits sont alors magnétiquement couplés. Ceci permet de réaliser un isolement galvanique entre les deux circuits.

Il est constitué de deux parties essentielles, le circuit magnétique et les enroulements. 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 20KV ou plus.

**I.11. Raccordement au réseau**

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

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

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

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

**I.12. Alternateur**

On nomme alternateurs, les générateurs de courant alternatif. La plupart sont des machines très puissantes en service dans les centrales thermiques ou hydrauliques. Les F.é.m. alternatives sont produites par induction, c'est-à-dire par déplacement relatif d'un circuit induit par rapport à un circuit inducteur.

Un courant continu passe dans les bobines de l'inducteur et aimante les pôles. Les lignes d'induction sortent par chaque pôle nord, traversent l'entrefer entre les pièces polaires et le stator, puis bifurquent à gauche et à droite pour passer dans les deux pôles sud voisins après avoir traversé une seconde fois l'entrefer.

Actuellement, pour les alternateurs de grande puissance, l'induit est fixe et l'inducteur mobile. Deux formes sont adoptées :

- Les alternateurs à pôles inducteurs saillants, dont la vitesse est relativement lente, sont entraînés par des turbines hydrauliques, des moteurs à gaz ou diesel.
- Les turbo-alternateurs à inducteurs lisses, sont accouplés à des turbines à vapeur ou hydrauliques tournant à grande vitesse. [8]

**I.12.1. Choix de types d'alternateurs**

Les principaux alternateurs utilisés dans les centrales hydroélectriques sont :

- 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 de débit d'eau permettant de maintenir une vitesse constante de la turbine. Le rendement

hydraulique globale est diminué de 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 importantes 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 centrales hydroélectriques. Toutefois des exemples d'applications intéressantes existent dans les systèmes éoliens [9], [10] et son utilisation est envisagée dans l'aéronautique.

La MADA permet de pallier aux problèmes précédents de stabilité de la machine asynchrone a 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.13. Présentation de la machine asynchrone double alimentation**

La machine à double alimentation comme son nom l'indique, une machine triphasée a courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles dans lesquels la puissance peut être fournir ou extraite de la machine à travers ces enroulements.

Ce type de machine nécessite une seule source d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux côtés de la machine, et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines de l'entraînement, et de génération à vitesse variable, là où le glissement de la machine peut être modifié au moyen de l'association des convertisseurs de puissances de côté statorique ou rotorique ou bien les deux à la fois.

Dans notre étude on a opter pour un convertisseur coté rotor. [11]

#### **I.13.1. Différentes domaines d'application de la MADA**

La MADA peut être utilisée dans plusieurs applications importantes notamment les applications nécessitant un fort couple de démarrage, telles que :

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.

- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charge etc...

### I.13.2. Machine asynchrone double alimentation a rotor bobiné

La machine asynchrone à rotor bobiné présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. [13]

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais.

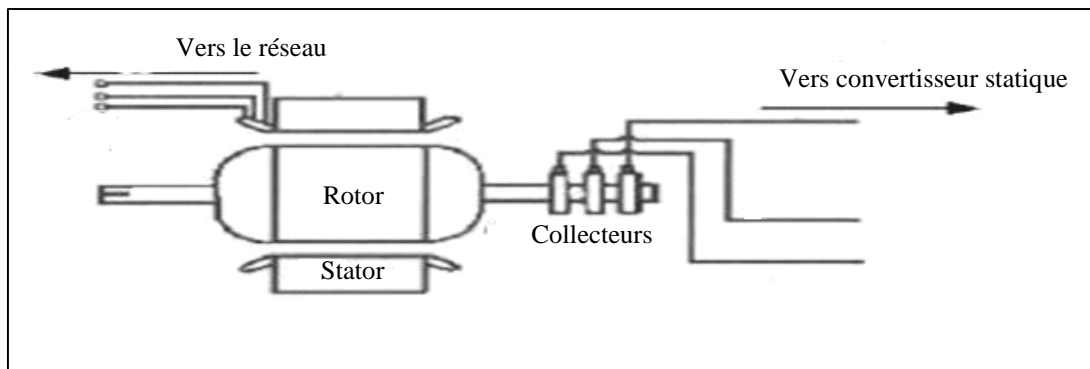


Figure (I.11) : Structure de la MADA a rotor bobine.

### I.13.3. Principe de fonctionnement de la MADA

En admettant que l'enroulement statorique de la machine à double alimentation et connecté directement au réseau, que l'enroulement rotorique triphasé et relié à un convertisseur de puissance bidirectionnel à travers un système balais –bagues et que les nombres de pôles du stator et du rotor sont identiques, la vitesse angulaire de rotation du rotor sera définie par :

$$\omega_m = \omega_s \pm \omega_r \quad (I.1)$$

$$\omega_m = P \cdot \Omega \quad (I.2)$$

Le signe positif (+) dans l'équation (I.1) signifie que le champ tournant créé par les enroulements du stator tourne dans le même sens que celui créé par les enroulements du rotor ( $\omega_m < \omega_s$ ), (en régime hypo-synchrone).

Le signe négatif (-) signifie que les champs tournants créés par les enroulements du stator et du rotor tournent dans des sens opposés et que la machine fonctionne en régime hyper-synchrone. [11]

La relation qui lie la fréquence du stator à celui du rotor est donnée par :

$$f_s = f_r + f_m \quad (I.3)$$

Avec :

$f_s$  : la fréquence des courants statorique.

$f_r$  : la fréquence des courants rotorique.

$f_m$  : la fréquence de rotation du rotor.

$\omega_s$  : la pulsation des courants statorique.

$\omega_m$  : la pulsation des courants rotorique.

P : nombres de paires de pôles.

g : le glissement

Dans ce cas, le glissement g est défini par :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{(\omega_s - \omega_m)}{\omega_s} \quad (I.4)$$

Si  $g > 0$  ; régime hypo-synchrone

Si  $g < 0$  ; régime hyper-synchrone

#### I.13.4. Mode de fonctionnement de la MADA

D'après l'équation (I.4), on peut distinguer quatre régimes de fonctionnement de la MADA :

- **Stationnaire (g=1)**

Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence  $f_s$  ; par conséquent, le rotor est le siège d'une F.é.m. induit avec une fréquence  $f_r$  identique à  $f_s$  . Dans cette condition, la MADA se comporte comme un transformateur.

- **Hypo-synchrone (0 < g < 1)**

En tournant le rotor dans la direction du flux du stator, la fréquence  $f_r$  de rotor commence à décroître . Plus la vitesse du rotor s'approche de celle du synchronisme, plus  $f_r$  tend vers 0, plus la tension d'induit dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme.

- **Synchrone (g=0)**

Au point où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence  $f_r$  du rotor s'annule. Dans ce cas, les enroulements du rotor tournent avec la même vitesse que celle du flux statorique ; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier. Par conséquent, il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.

- **Hyper-synchrone ( $g < 0$ )**

À partir de ces équations (I.3) et (I.4), avec davantage de l'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative. Le signe négatif signifie que l'ordre de phases du rotor s'inverse. L'augmentation de la vitesse relative des enroulements du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induit du rotor. [11]

### I.13.5. 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.12)** montre les différentes configurations de fonctionnement de la MADA dont le stator est relié directement au réseau et le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire du convertisseur.

Avec :

$P_{res}$ : est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau,  $P_s$ , la puissance transitant par le stator.

$P_{rg}$ : la puissance de glissement.

$P_{mec}$  : la puissance mécanique.

Pour le transfert de puissance, nous distinguons quatre cas possibles. [13]

- 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  $P_{rg} \ll$  Puissance de glissement  $\gg$  est renvoyée sur le réseau, c'est le fonctionnement moteur hypo synchrone.

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 délivrée par le réseau va au rotor qui sera convertie en puissance mécanique. La puissance est donc fournie à la machine par le stator et le rotor.

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.

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

- En mode générateur 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.



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

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

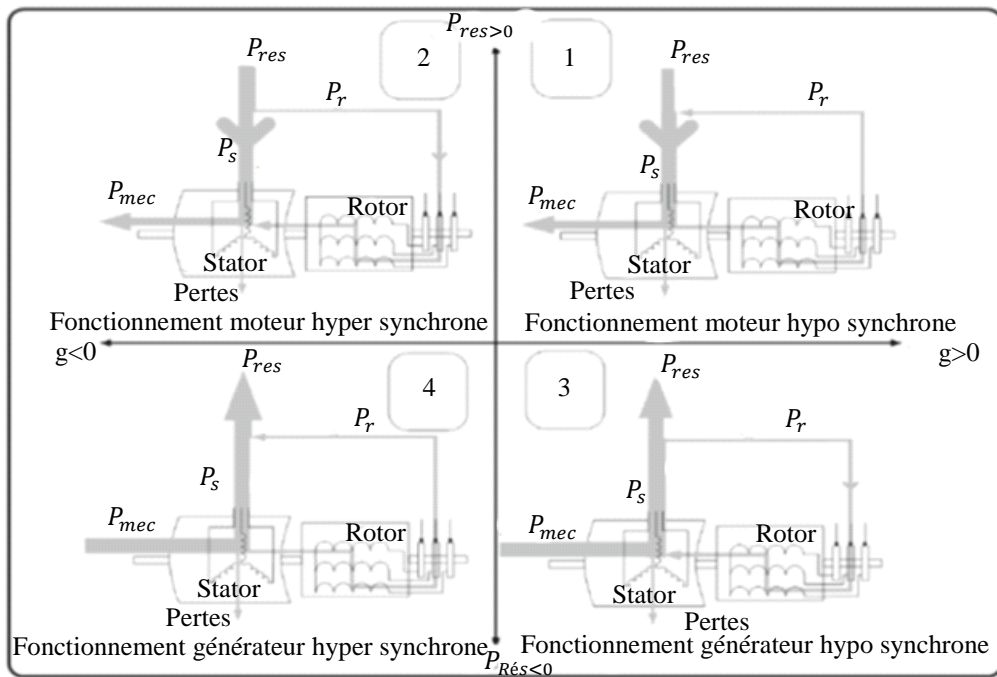


Figure (I.12) : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation. [13]

### I.13.6. Avantages de la MADA

Parmi les nombreux avantages offerts par la MADA on peut citer :

- L'accessibilité au rotor et au stator rend la mesure des courants possible, ce qui offre une grande flexibilité et précision au contrôle de flux et de couple électromagnétique.
- Les possibilités de reconfiguration grâce à sa double alimentation, ce qui permet à cette dernière de trouver un large domaine d'application.
- Une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines de grandes puissances.
- Un fonctionnement possible à couple constante au-delà de la vitesse nominale.
- Le convertisseur lié au rotor est dimensionné au tiers de la puissance nominale de la machine et dans le cas où cette dernière fonctionne dans une gamme de vitesse proche de celle de synchronisme, les pertes dans les interrupteurs à semi-conducteurs seront faibles. Par conséquent, le rendement obtenu de système machine-convertisseur sera élevé. [11]

**I.13.7. Inconvénients de la MADA**

- La MADA est plus volumineuse que la machine à cage d'écureuil à cause du système balais- bagues.
- Elle nécessite une maintenance périodique. [11]
- En fonctionnement générateur, elle génère des harmoniques grâce aux convertisseurs utilisés.

**I.13.8. Utilisation de la MADA dans les conversions électromécaniques**

Les Machines asynchrones à cage ou les machines synchrones utilisés dans les centrales hydroélectriques, ou bien dans la production d'énergie par éolienne sont contraintes à fonctionner à la vitesse du synchronisme, ou dans son voisinage, en revanche la MADA offre une 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.14. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présentée l'énergie hydroélectrique, et nous avons présenté les centrales hydroélectriques en définissant les deux types de centrale qui existent.

Ensuite, on est passé à la présentation des stations de pompage-turbinage en commençant par leurs principes de fonctionnement, et on a vu par la suite leurs grands rôles notamment dans le stockage de l'eau comme énergie potentielle mise à disposition du réseau à la demande.

Puis, nous avons présenté l'organe maître de la STEP à savoir le groupe pompe-turbine réversible, et nous avons vu aussi l'intérêt apporté par le fonctionnement à vitesse variable, puis on est passé à la présentation des différents constituants qui forment une STEP classique, en définissant les différents types de turbines et pompe hydraulique, et aussi les différents alternateurs qu'on utilise dans les centrales hydrauliques.

Enfin, on est passé à la présentation de la machine MADA en présentant ces modes de fonctionnements, et aussi le transfert de puissance dans les deux modes de fonctionnements de la STEP.



# ***CHAPITRE II***

***Modélisation de la STEP et contrôle des puissances active et réactive en mode glissant***

## **II.1. Introduction**

Une grande partie du chapitre précédents est dédié à la présentation des différents composants de la station hydroélectrique réversible, en particulier l'organe principale de conversion électromécanique à savoir la machine asynchrone à double alimentation.

L'étude de la station en mode pompage et turbinage, nous impose a commencé par mettre en évidence les différentes équations de basse avec convention de signe qui régit l'ensemble du système.

Ensuite, nous modéliserons le groupe turbine pompe réversible, puis on passe à la modélisation de la MADA.

Puis, pour faciliter l'étude, et avoir une dynamique similaire a une machine à courant continu, il serait primordial de passer par la commande vectorielle, dans notre étude nous avons opter pour la commande vectorielle avec orientation du flux statorique, puis vient le tour de la modélisation du convertisseur MLI (redresseur –filtre- onduleur) avec filtre R-L coté réseau.

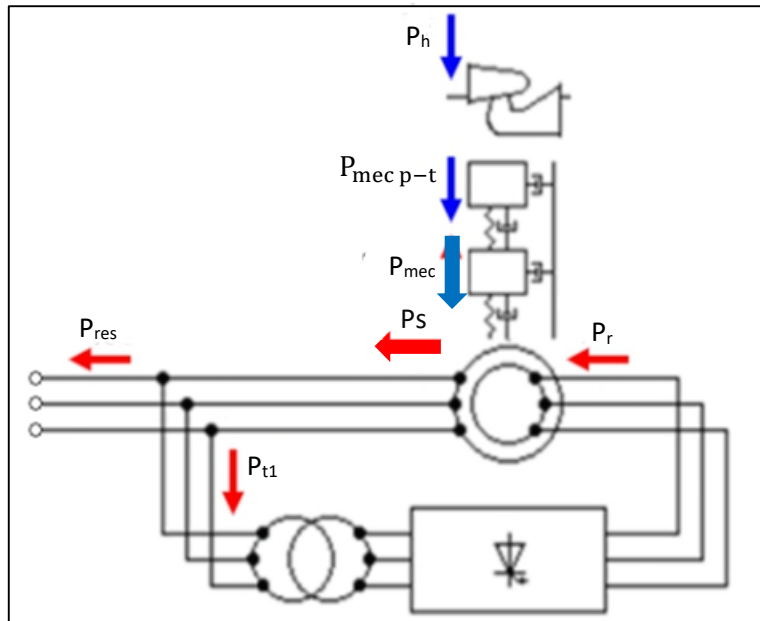
Puis on passe à la présentation détaillée de la commande non linéaire utilisée dit mode glissant tout en élaborant les lois de commande adaptée.

Enfin, on termine par une conclusion qui résume le travail effectuée dans ce chapitre.

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

L'étude de de la station dans les deux modes de fonctionnement (pompage et turbinage) reste une tâche très difficile. Même si les composants électromécaniques restent les même dans les deux modes de fonctionnement, mais à la seule déférence que certaines équations qui régisse ces composants changent de signe en fonction du mode étudié.

Alors avant de passer à la modélisation, il serait nécessaire d'éclaircir ce point. La **figure (II.1)** indique le sens des puissances en mode turbinage.



**Figure (II.1) :** Sens des puissances définies positives. [16]

Les différentes puissances représentées à la **figure (II.1)** sont définies par les relations suivantes (phase turbinage) :

$$P_h = \rho G Q H \tag{II.1}$$

$$P = C \Omega \tag{II.2}$$

$$P_{mec} = C_{em} \Omega \tag{II.3}$$

$$P_s = C_{em} \Omega_s \tag{II.4}$$

$$P_r = - g P_s \tag{II.5}$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \tag{II.6}$$

Avec :

$$P_{mec} = P_s + P_r = (1 - g) P_s \tag{II.7}$$

$$P_{res} = - P_s - P_r = -P_{mec} \tag{II.8}$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega = \sum C \tag{II.9}$$

Où :

J : Est l'inertie totale du groupe.

### **II.3. Modélisation du groupe pompe turbine réversible**

La modélisation du groupe pompe-turbine réversible se résume à :

Le débit d'eau  $Q$ , peut être représenté par un signal qui traduit à la fois son sens de direction (mode pompage et turbinage), et sa variation qui sera dans cette étude non contrôlé ou bien non fixé (vitesse variable) par un dispositif mécanique pour l'adaptation à la fréquence du réseau.

La puissance qui entraîne le groupe est appelé la puissance hydraulique  $P_h$  qui en fonction de la hauteur de chute  $H$  et du débit  $Q$  le tous est régit par l'équations (II.1).ensuit cette puissance hydraulique sera convertie en puissance mécanique qui entraineras le groupe avec une vitesse de rotation variable  $W_r$  .

Les termes cités en haut sont des acteurs importants qui entre dans la commande du système globale alors on imagine bien la complexité de cette commande qu'on va traiter par la suit.

### **II.4. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)**

Les machines asynchrones en générales, occupent une large plage d'applications en industrie au détriment des machines synchrones et à courant continu. Elle présente un système dynamique non linéaire. Par conséquent, sa commande nécessite la disponibilité d'un modèle représentant fidèlement son comportement au niveau de ses modes électriques, électromagnétiques, et mécaniques.

#### **II.4.1. Hypothèses simplificatrices**

La complexité de la machine électrique nous impose à assumer quelques hypothèses acceptables afin d'obtenir un modèle mathématique simplifié.

Ces hypothèses sont nécessaires afin de trouver un modèle décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone. Ils permettront l'allègement des calculs.

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

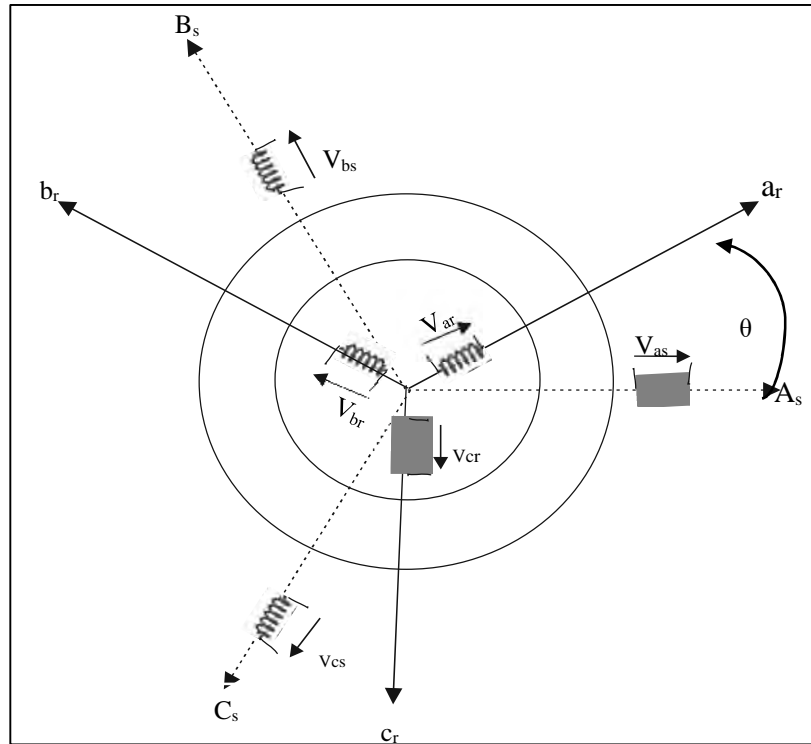
- L'entrefer constant.
- Caractéristique du circuit magnétique linéaire (perméabilité du fer infinie).
- Saturation non pris en compte.
- Répartition du champ est sinusoïdale.
- Pertes ferromagnétique négligeables.

De ce fait tous les coefficients d'inductances propres sont constants, et les coefficients d'inductances mutuelles ne dépendent que de la position des enroulements. [17]

**II.4.2. Modèle de la MADA dans le repère (a, b, c)**

La machine asynchrone à double alimentation comme toute machine électrique se compose principalement de deux parties, stator et rotor. Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine, et il est séparé du stator par un entrefer. Les enroulements du stator et du rotor sont identiques et ils sont couplés en étoile ou (en triangle) à la seule différence est ce que celui du rotor est relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais (MADA à rotor bobiné).

Les trois enroulements du stator ( $A_s, B_s, C_s$ ) sont parallèles aux enroulements du rotor ( $a_r, b_r, c_r$ ) et sont distribués sinusoidalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre. La **figure (II.2)** illustre la distribution des enroulements dans une machine asynchrone à rotor bobiné.



**Figure (II.2) :** Répartition des différents enroulements d'une MADA.

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

Ces équations présentent une complexité, et une non linéarité ce qui rend leurs résolutions très difficiles. Afin de palier à ce problème, nous modélisons la machine dans le repère diphasé tournant (d, q, 0).

### II.4.3. Modèle diphasé de la MADA dans le repère de Park

La transformation de Park définie par la matrice de rotation  $P(\Psi)$  permet de ramener les grandeurs du repère triphasé naturel (a, b, c) sur les axes d'un repère fictif diphasé tournant (d, q, 0).

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

$$[X]_{dq0} = P(\Psi) [X]_{abc} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$$P(\Psi) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & \cos\left(\Psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\Psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\Psi) & -\sin\left(\Psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\Psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

La transformation inverse de Park est exprimée par :

$$[X]_{abc} = P^{-1}(\Psi) \cdot [X]_{dq0}$$

Où

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

Avec :

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

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

Pour un système équilibré la composant homopolaire est nulle, et en appliquant la transformation de Park, un modèle mathématique est obtenu après calcul, il est représenté sous la forme suivant :

#### II.4.3.1. Equations électriques

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$



Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

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

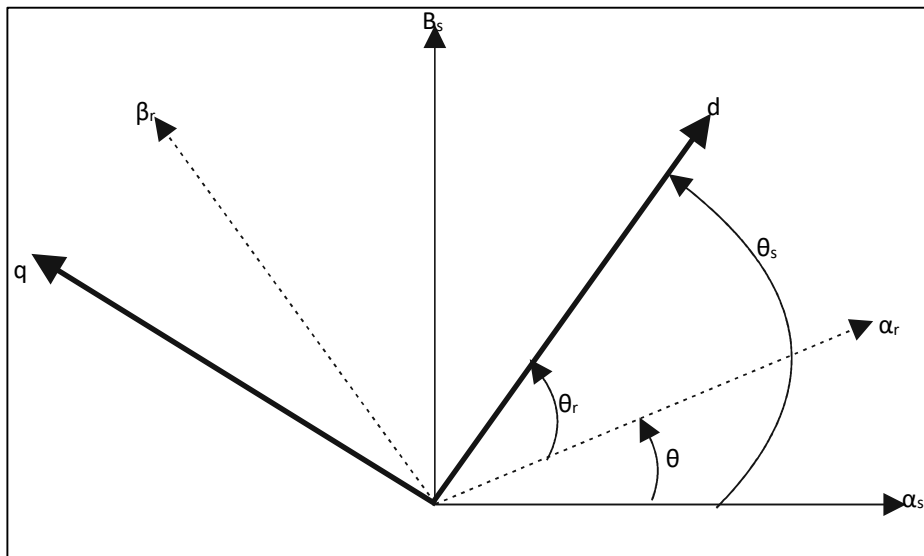
Où :

$R_s$  et  $R_r$  : résistance d'une phase, statorique, et rotorique respectivement.

$\theta_s$  : angle du champ tournant statorique.

$\theta_r$  : la position du rotor par rapport au stator.

Les angles  $\theta_r$  et  $\theta_r$  sont liés par la relation suivante :  $\theta_s = \theta + \theta_r$



**Figure (II.3) :** Angle statorique et rotorique dans le repère de Park. [18]

### II.4.3.2. Equation magnétique

Pour le stator :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Où

$L_s, L_r, M$  :représentent respectivement les inductances cyclique statorique ,rotorique et mutuelle.

#### II.4.3.3. Expression de la puissance électromagnétique

L'expression de la puissance électromagnétique est donnée par :

$$P_{em} = \omega_s (\phi_{sd} \cdot I_{sq} - \phi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{II.19})$$

#### II.4.3.4. Equation du couple électromagnétique

En peut déduire l'expression du couple électromagnétique de l'équation (II.19).en divisant cette dernier par la vitesse de synchronisme  $\Omega_s$ .

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = \frac{PP_{em}}{\omega_s} = P (\phi_{sd} I_{sq} - \phi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{II.20})$$

#### II.4.4. Expression des puissances, actives, réactives, statorique et rotorique

Pour le stator :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Où :

$P_s, P_r$ : puissances actives, statorique et rotorique .

$Q_s, Q_r$  : puissance réactives, statorique et rotorique.

#### II.5.4. Expression de puissance issues du générateur

En négligeant les pertes d'énergie active dans le convertisseur statique, nous pouvons exprimée les puissances générées comme suit :

$$\begin{cases} P_{res} = P_s + P_r \\ Q_{res} = Q_s + Q_{rr} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

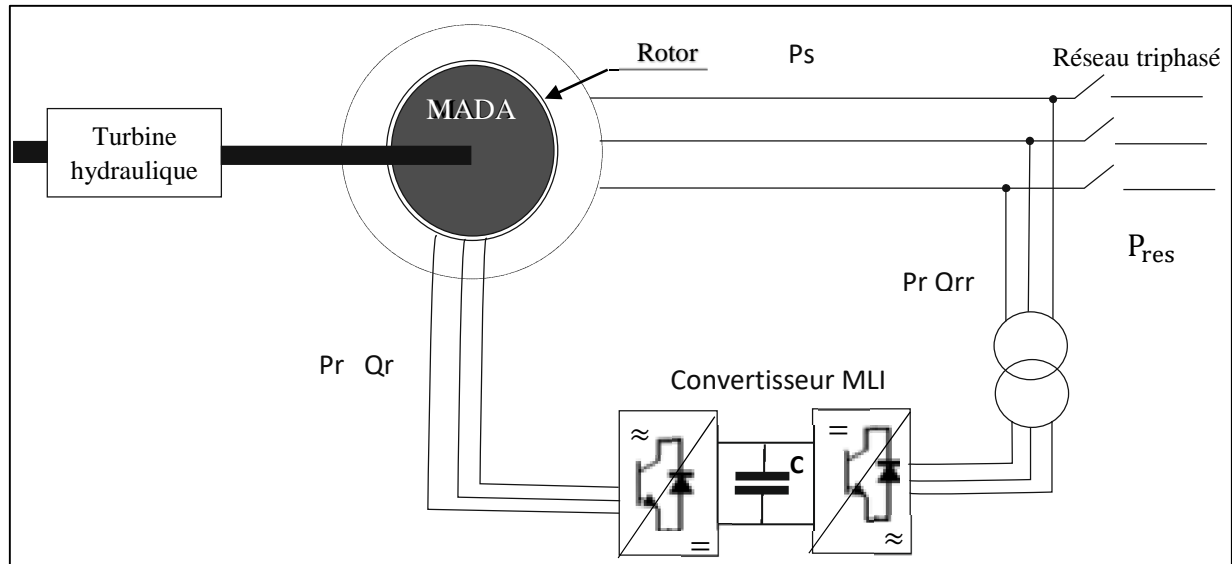
Avec :

$Q_{rr}$  : la puissance réactive à l'entrée du convertisseur coté réseau.

$P_{res}$  : puissance active totale issu du générateur.

$Q_{res}$  : puissance réactive totale issu du générateur.

Le contrôle des grandeurs rotorique de la MADA permet, la gestion du transit de puissance entre le générateur et le réseau. Le schéma global du système étudié est représenté sur la **figure (II.4)**



**Figure (II.4) :** Schéma de principe de contrôle des puissances de générateur.

## II.5. Commande vectorielle appliquée à la MADA

Le découplage naturel entre le flux et le couple, ont fait de la machine à courant continu et pendant longtemps, le meilleur moyen utilisé dans les entraînements et génération d'énergie électriques à vitesse variable.

On appliquera cette commande à la MADA en réalisant un découplage entre les grandeurs de telle sorte que le flux soit régulé par la composante directe du courant statorique ou rotorique (selon l'orientation choisie), et le couple par la composante en quadrature.

Ainsi, la commande de la MADA sera ramenée à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée, dans cette partie nous intéresserons à la commande vectorielle d'une MADA à rotor bobiné alimenté par un onduleur de tension. [19]

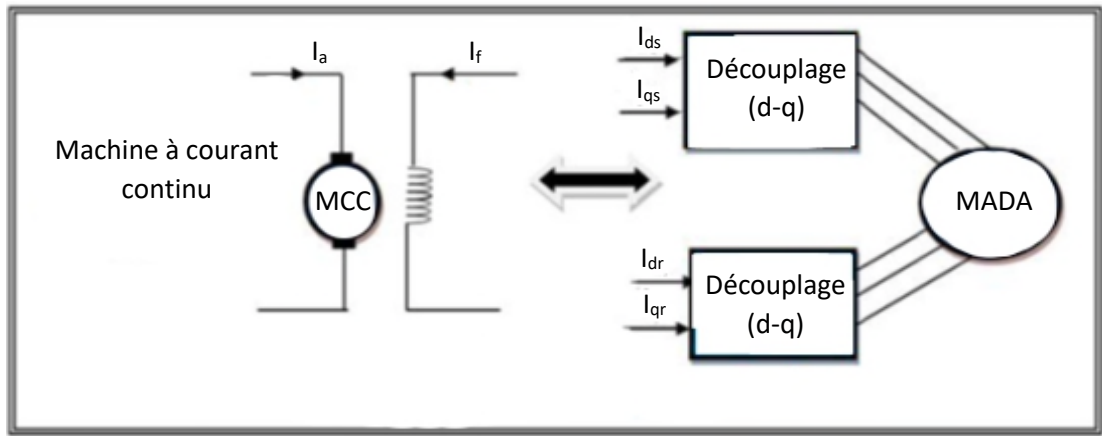


Figure (II.5) : Principe de la commande vectorielle. [19]

Avec :

MCC : Machine à courant continu.

$I_a$  : Courant qui circule dans l'induit d'MCC.

$I_f$  : courant qui circule dans l'inducteur de l'MCC.

### II.5.1 : Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

La machine à double alimentation étudié est de type rotor bobiné, alors la commande du flux est appliquée au stator, et en choisissant un référentiel (d-q) lié au champ tournant statorique, et en alignant le vecteur flux statorique sur l'axe (d), nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

On suppose que le réseau électrique connecté au stator et ayant pour tension simple  $V_s$  est constant, cela conduit à un flux statorique  $\phi_s$  constant.

Dans la production de l'énergie hydroélectrique, on utilise des machines de moyennes et de fortes puissances. De ce fait on peut négliger la résistance statorique, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\phi_{sd}}{dt} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \cdot \phi_{sd} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{sd} = 0 \\ \phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

De ce fait les équations des flux statorique se résumes à :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \phi_{sq} = 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Les tensions à imposer au rotor pour obtenir des courants voulus et par conséquent les puissances désirées, sont exprimées dans le système d'équations :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} + g \left(\frac{M V_s}{L_s}\right) \end{cases} \quad (II.27)$$

L'influence des termes de couplage  $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$  entre les deux axes est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser. Le terme  $\left(g \frac{M V_s}{L_s}\right)$  représente une force électromotrice dépendant de la vitesse rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur.

En régime permanent l'équation devient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{rd} + g \left(\frac{M V_s}{L_s}\right) \end{cases} \quad (II.28)$$

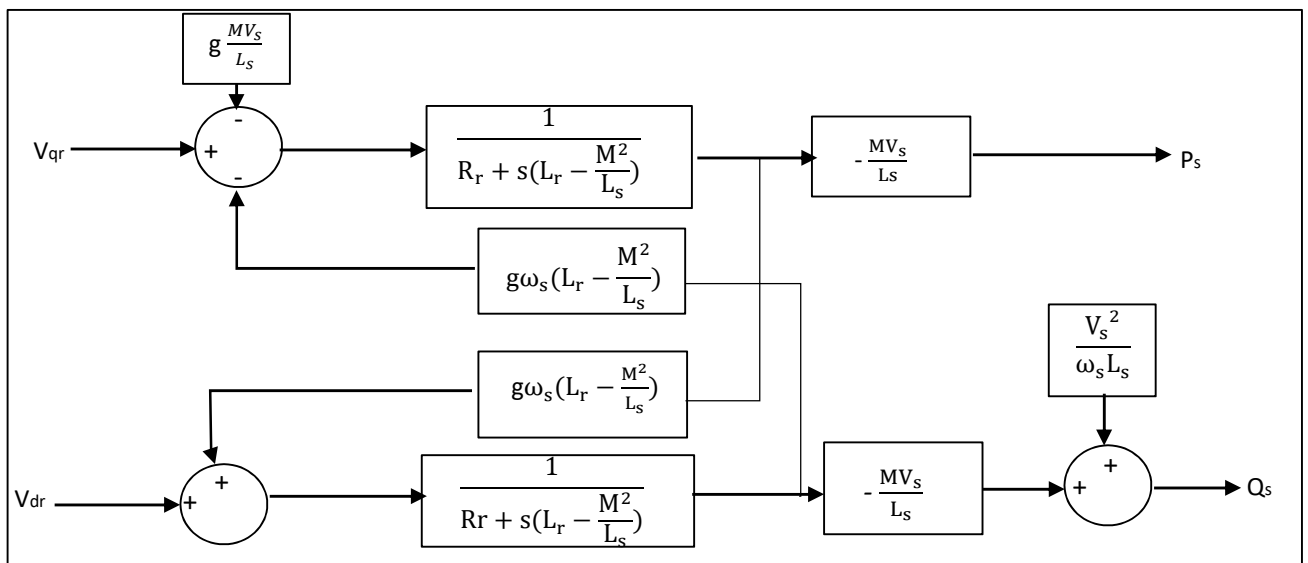
Les expressions des puissance active et réactive statorique devient :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{rq} \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (II.29)$$

Quand  $\phi_{sd}$  est estimé a  $\phi_s$ , le couple électromagnétique dépende uniquement de la composant  $I_{rq}$

$$C_{em} = -P \frac{M \cdot \phi_s}{L_s} \cdot I_{rq} \quad (II.30)$$

Les expressions permettent d'établir un schéma blocs du système à réguler est représenté sur la **figure (II.6)**



**Figure (II.6) :** Schéma bloc du système à réguler. [17]

La figure montre l'existence de fonction de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tension rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques.

Alors la possibilité d'établir une commande vectorielle est envisageable car les influences des termes de couplage resteront faibles ce qui rende les axes d et q indépendants chacun avec son régulateur.

Par conséquent les grandeurs de références pour ces régulateurs seront :

- La puissance active pour l'axe « q » rotorique ;
- La puissance réactive pour l'axe « d » rotorique.

### **II.5.3. Types de commande vectorielle**

La commande vectorielle appliqué à la MADA dans les applications dans l'énergie hydroélectrique nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse. Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase).

Deux méthodes ont été développée soit :

#### **➤ La commande vectorielle directe**

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global.

#### **➤ La commande vectorielle indirecte**

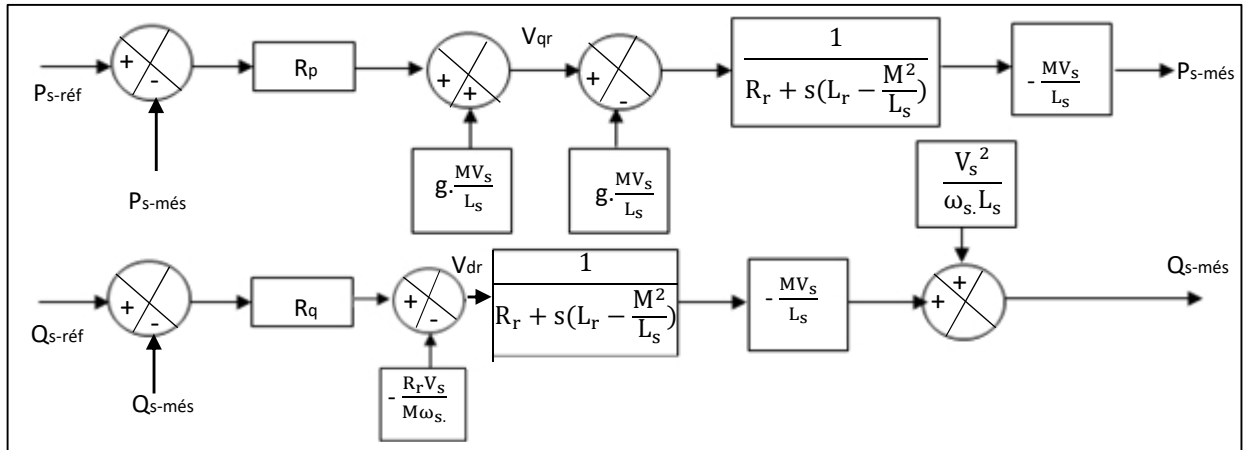
La commande indirecte est basée sur le principe à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux mais seulement sa position. Elle consiste à estimer la position du vecteur du flux, et de régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire. Cette méthode est très sensible aux variations paramétriques de la machine.

### **II.5.4. Commande vectorielle en puissance de la MADA**

La commande vectorielle appliqué à la MADA nous imposons à choisir un système d'axes (d-q), et une loi de commande qui assure ce découplage entre les grandeurs à contrôler.

L'objectif de cette commande c'est de faire suivre à la MADA une consigne en puissance avec une dynamique là mieux possible que le permet la fréquence de modulation du convertisseur utilisé.

Le schéma bloc de la commande vectorielle avec un seul reguleteur est montré sur la **figure (II.7)**



**Figure (II.7) :** Schéma bloc de la commande vectorielle avec un seul régulateur.

Les blocs  $R_p$  et  $R_q$  du schéma de **figure (II.7)** représentent les régulateurs de la puissance active et réactive. L'objectif de ces régulateurs est d'obtenir des performances dynamiques élevées et une bonne robustesse. Pour réaliser ces objectifs on utilise des régulateurs mode glissant.

### II.6. Modélisation du convertisseur statique

Un convertisseur statique de puissance, reste un élément indispensable pour commander une machine électrique. Ce dernier transforme le signal de contrôle à l'entrée en un signal de puissance pour la machine.

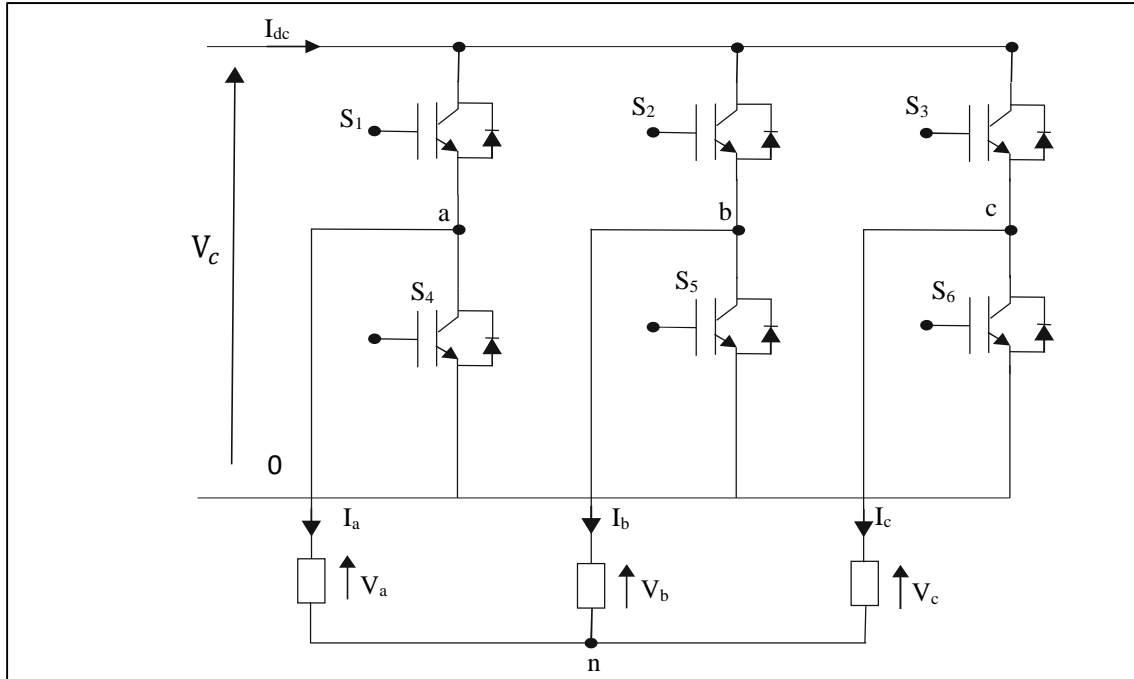
Les harmoniques à la sortie convertisseur causent l'échauffement de la machine ainsi que les pulsations du couple. Par contre, les harmoniques à l'entrée provoquent des perturbations sur le réseau.

Avec la disponibilité des transistors de puissance à cout 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 les harmoniques provoquent l'échauffement de la machine et les pulsations du couple.

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

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

Afin de simplifier le modèle des convertisseurs, en considérant les interrupteurs (IGBT et diode) parfaits. La **Figure (II.8)** représente un onduleur de tension alimenté par une tension continu  $u_c$ .



**Figure (II.8) :** Schéma d'un onduleur de tension triphasé. [21]

La loi des mailles nous donne :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

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

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.32})$$

D'où :

$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (\text{II.33})$$

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

$$\begin{cases} V_{an} = V_a = \frac{1}{3}(2V_{a0} - V_{b0} - V_{c0}) \\ V_{bn} = V_b = \frac{1}{3}(-V_{a0} + 2V_{b0} - V_{c0}) \\ V_{cn} = V_c = \frac{1}{3}(-V_{a0} - V_{b0} + 2V_{c0}) \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

L'expression de la tension  $V_{j0}$ , est fonction de l'état logique de conduction des interrupteurs du bras de l'onduleur ou il est connecté. Soit à noter l'état passant du  $i^{\text{eme}}$  interrupteur par  $S_i = 1$  et son état bloqué par  $S_i = 0$ ,  $V_{j0}$  s'exprime alors par la relation suivante :  $V_{j0} = V_c$



Si pour  $i$  prenant les valeurs 1, 2 et 3, et  $j = a, b$  et  $c$ .

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

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

De plus la relation entre les courants modulés par le convertisseur ( $I_{dc}$ ) et les courants alternatifs ( $I_a, I_b, I_c$ ) sont défini par l'équation suivante :

$$I_{dc} = [S_1 \ S_2 \ S_3] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

### II.6.1. Commande MLI des convertisseurs

L'objectif de la commande MLI est de diminuer les harmoniques présents dans les courants générés par le convertisseur. Le principe est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse qui détermine la période de découpage à une modulante dont le fondamentale est à la fréquence de 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.

Plusieurs types d'MLI sont utilisés dont On peut citer : la MLI à Bande d'hystérésis triangulaire, la MLI à échantillonnage périodique, la MLI à porteuse triangulaire et l'MLI vectorielle.

Toute fois nous adoptons la MLI naturelle à cause de sa simplicité d'élaboration, dont son principe est représenté dans la figure suivante :

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

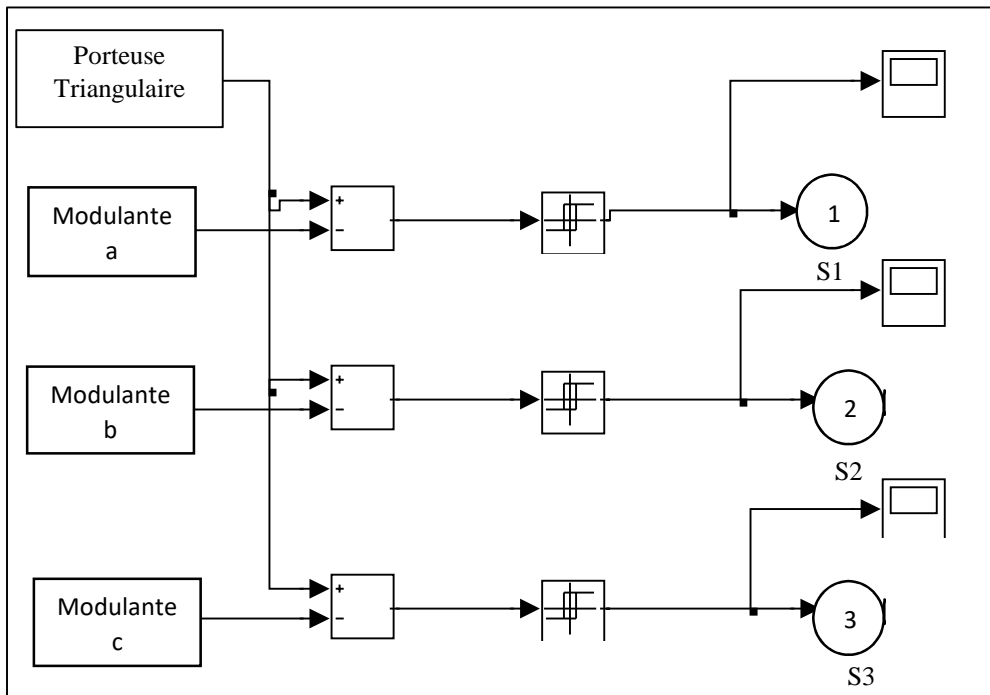
$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (\text{II.37})$$

- Le taux de modulation, ou coefficient de réglage de tension " $r$ " comme étant le rapport de la tension  $V_m$  de la modulatrice sur la tension de la porteuse  $V_p$ .

$$r = \frac{V_m}{V_p} < 1 \quad (\text{II.38})$$

- L'avantage principale que présente l'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 dissymétriques par rapport à la période de la porteuse.

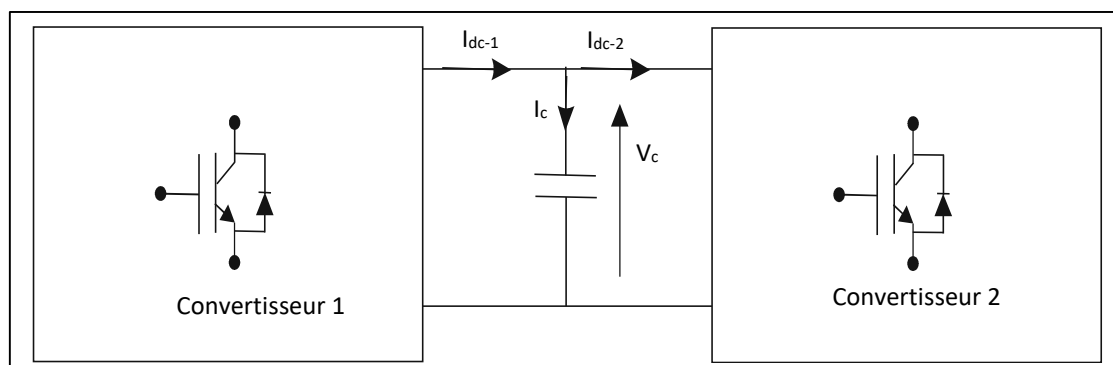
- Nous adaptons l’MLI à la fréquence variable coté rotor de la génératrice toute fois coté réseau a fréquence fixe. Dont sont principe est représenté dans la figure suivante :



**Figure (II.9) :** Schéma de principe de la MLI. [21]

### II.6.2. Modélisation de bus continu

Le couplage des deux convertisseur statique (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. Dans la **Figure (II.10)** est représenté en détaille le bus continu et on peut voir qu’il est représenté par le condensateur ou sont connectés le bus continu des convertisseurs. Chaque convertisseur exerce son influence sur le circuit, par le courant qu’il donne ou qu’il prend au condensateur



**Figure (II.10) :** Schéma de bus continu. [21]

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

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{c} I_c \tag{II.39}$$

Le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent deux courants modulés par chaque convertisseur :

$$I_c = I_{dc-1} - I_{dc-2} \quad (II.40)$$

Ainsi on a

$$V_c(t) = V_0 + \frac{1}{c} \int_{t_1}^{t_2} I_c dt \quad (II.41)$$

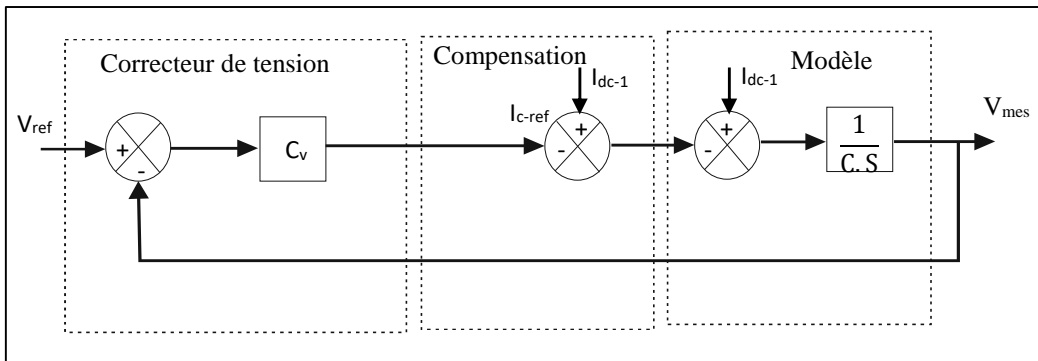
Avec  $V_0$  est la tension initiale de condensateur .

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

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

$$k_p = \frac{c}{\tau_u} \quad (II.42)$$

$\tau_u$  : est le temps de réponse désiré de la tension redressée.



**Figure (II.11) :** Régulateur de tension de bus continu. [21]

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

$$P_{dc-1} = V_c I_{dc-1} \quad (II.43)$$

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

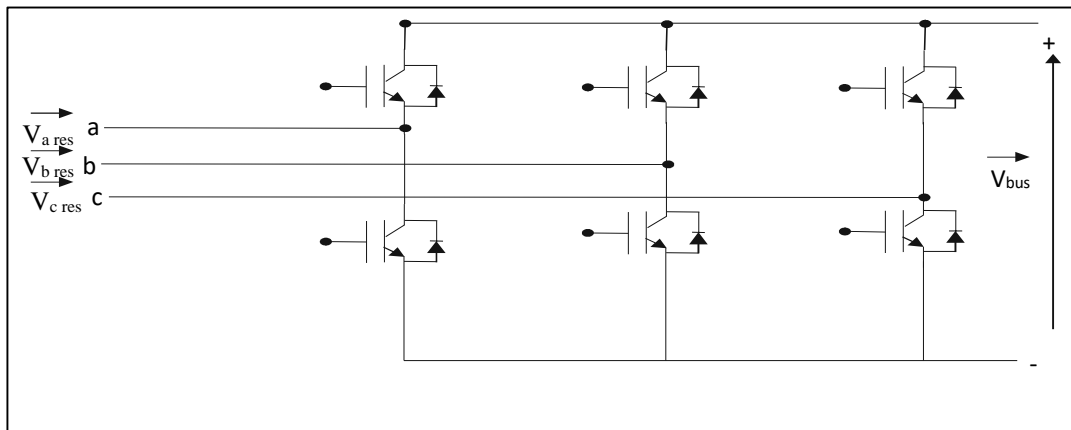
$$P_{c-ref} = V_c I_{c-ref} \quad (II.44)$$

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

$$P_{f-ref} = P_{dc-1} - P_{c-ref} \quad (II.45)$$

### II.6.3. Modélisation du redresseur MLI

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



**Figure (II.12) :** Redresseur MLI. [21]

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

$$\begin{bmatrix} V_{on1} \\ V_{on2} \\ V_{on3} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{II.46}$$

$$I_{dc} = S_a I_a + S_b I_b + S_c I_c \tag{II.47}$$

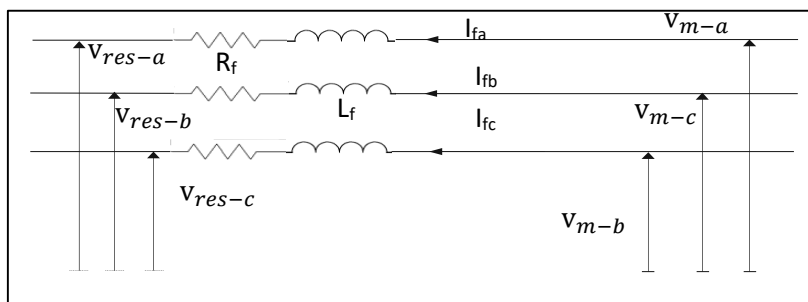
Avec :

$v_{dc}$  : tension redressée.

$I_{dc}$  : courant redressée.

### II.6.4. Modélisation du filtre R-L

Le schéma de la **figure (II.13)** montre la liaison du filtre R-L au réseau électrique



**Figure (II.13)** Représentation du filtre de liaison R-L. [21]

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

$$\begin{pmatrix} V_{m-a} \\ V_{m-b} \\ V_{m-c} \end{pmatrix} = R_f \begin{pmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{pmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{res-a} \\ V_{res-b} \\ V_{res-c} \end{pmatrix} \quad (II.48)$$

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

$$\begin{cases} v_{res-d} = R_f I_{fd} + L_f \frac{dI_{fd}}{dt} - L_f \omega_s I_{fq} + V_{md} \\ v_{res-q} = R_f I_{fq} + L_f \frac{dI_{fq}}{dt} - L_f \omega_s I_{fd} + V_{mq} \end{cases} \quad (II.49)$$

On considère les tensions de couplage suivantes :

$$\begin{cases} e_d = -L_f \omega_s I_{fq} \\ e_q = L_f \omega_s I_{fd} \end{cases} \quad (II.50)$$

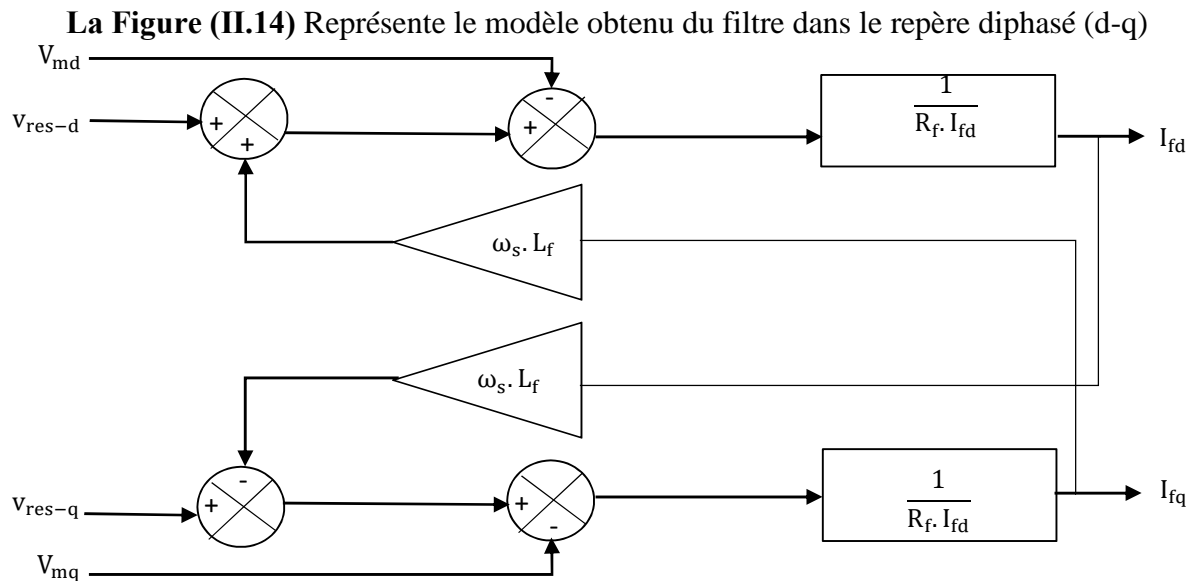
$$\begin{cases} v_{bd} = R_f I_{fd} + L_f \frac{dI_{fd}}{dt} \\ v_{bq} = R_f I_{fq} + L_f \frac{dI_{fq}}{dt} \end{cases} \quad (II.51)$$

Où les tensions aux bornes des bobines sont définies par :

$$\begin{cases} v_{bd} = V_{md} - e_q - v_{res-d} \\ v_{bq} = V_{mq} - e_d - v_{res-q} \end{cases} \quad (II.52)$$

En appliquant la transformée de Laplace pour les équations précédentes, on fait apparaître deux fonctions de transfert identiques :

$$F(p) = \frac{I_{fd}(p)}{v_{bd}(p)} = \frac{I_{fq}(p)}{v_{bq}(p)} = \frac{1}{R_f + S L_f} \quad (II.53)$$



**Figure (II.14) :** Modèle du filtre dans le repère d-q. [21]

## **II.8. Contrôle des puissances active et réactive en mode glissant**

Cette partie est dédiée à la commande en puissances de la MADA par des régulateurs mode glissant, le but de cette commande et le réglage des puissances, actives et réactives de la machine d'une manière découplée en exploitant les avantages de ce type de régulateur dans les deux modes de fonctionnement de la STEP.

Du fait que la MADA est à rotor bobiné, alors on a opté pour l'orientation du flux statorique, tout en agissant sur l'alimentation du rotor par l'intermédiaire d'un convertisseur MLI, dans le but de régler les grandeurs statorique.

### **II.8.1. Présentation de la commande par mode glissement**

La commande par mode glissant est l'une des techniques de commande de type non linéaire les plus utilisées. D'ailleurs c'est une commande qui a fait ses preuves depuis les années 70 notamment avec les travaux d'Utkin.

Le principe consiste à amener, quelles que soient les conditions initiales, le point représentatif de l'évolution du système sur une hyper surface de l'espace de phase par l'intégration d'éléments de commutation dans la loi de commande. De plus, la commande garantit que le point représentatif du système atteint l'hyper surface en un temps fini. Le système se met en régime glissant lorsque ce point a atteint l'hyper surface, dite surface de glissement. Son comportement devient alors insensible aux perturbations sur la sortie et aux variations paramétriques. [14]

Le principal inconvénient de cette commande reste le phénomène de broutement ou chattering. Notons que le chattering peut exciter des dynamiques haute fréquence négligées menant parfois à l'instabilité.

### **II.8.2. Théorie de la commande par mode glissement**

La commande par mode de glissement est parfaitement adaptée au système à structure variable, cette commande est basée sur trois configurations pour la synthèse des différentes commandes.

#### **II.8.2.1. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande**

Cette structure de commande est la plus classique et, la plus utilisée. Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'application aux variateurs de vitesse.

Elle a été utilisée pour la commande moteurs pas-à-pas.

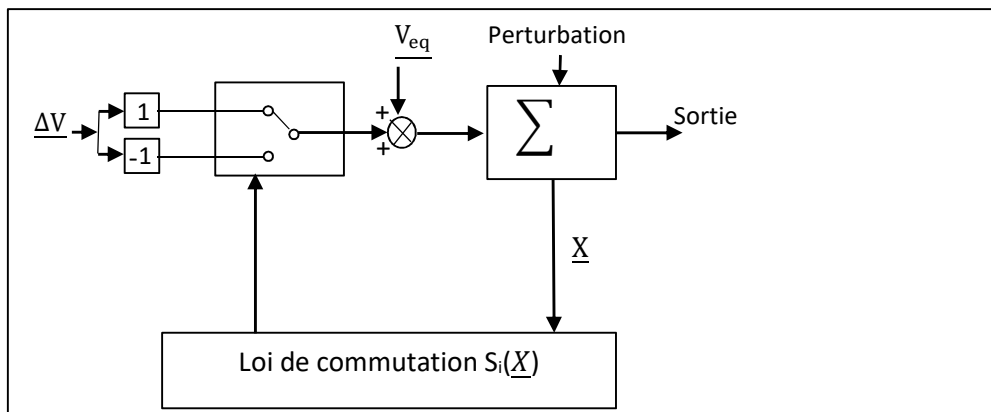
**II.8.2.2. Structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état**

Cette méthode s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique ou le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage. La non linéarité provient de la commutation entre les gains donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système.

Cette structure est là moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle a été mise en œuvre dans la commande de moteurs à courant continu et a aimants permanents, ainsi que dans la commande des machines à induction. Un ouvrage a été consacré à ce type de commande.

**II.8.2.3. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente**

Une telle structure dont le principe est montré sur la **figure (II.17)**. Présente un réel avantage. Elle permet de pré-positionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent. L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente.



**Figure (II.15) :** Structure de régulation par ajout de la commande équivalente. [19]

**II.8.2.3.1. Avantages de cette structure**

Nous avons choisi cette structure de régulation grâce à ces avantages prometteurs qu'elle présente d'ont on peut citer :

- L'organe de commande est moins sollicité, et la commande équivalente est ajoutée à la structure pour pré-positionner le système dans un état désiré permanent et stable, le terme de commutation assure la convergence vers cet état et d'y rester ensuite.

- Cette méthode de commande a déjà été abordée dans les travaux antérieurs. Les auteurs mentionnent des résultats très satisfaisants pour des applications robotiques ainsi que des applications utilisant des machines à induction.

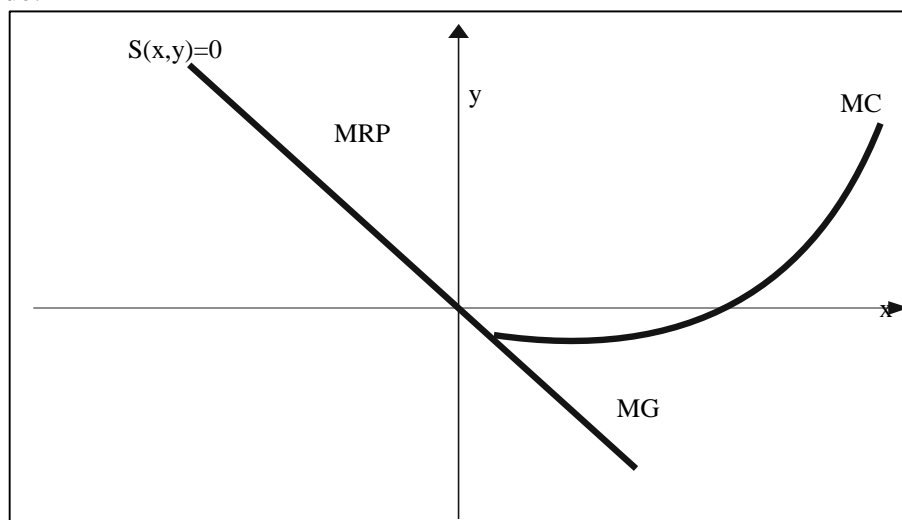
#### **II.8.4. Notions d'un système à structure variable**

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement. Il est caractérisé par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à une autre à tout instant. De plus, un tel système peut avoir de nouvelles propriétés qui n'existent pas dans chaque structure. [20]

Dans la commande des systèmes à structure variable par mode glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface, puis par la loi de commutation elle est obligée d'y rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit et appelé mouvement de glissement.

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes :

- Le mode de convergence (MC) c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation  $S(x, y) = 0$ . ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- Le mode glissement (MG) c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement  $S(x, y)$ .
- Le mode du régime permanent (MRP) ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système de son point d'équilibre, il est caractérisé par la qualité et la performance de la commande.



**Figure (II.16) : différents modes de trajectoire dans le plan de phase.**



**II.8.5. Conception de la commande par mode glissant [20]**

La conception de la commande par mode glissant revient principalement à déterminer ces trois étapes :

- Choix de la surface de glissement ;
- Détermination des conditions d'existence du régime glissant ou conditions d'accès ;
- Synthèse des lois de commande du mode glissant.

**II.8.5.1. Choix de la surface de glissement**

Le procédé le plus judicieux et le plus simple consiste à choisir une surface de commutation égale au vecteur erreur du vecteur d'état. Considérons le système non linéaire défini par les équations suivantes :

$$\dot{x} = [A]. [x] + [B]. [U] \tag{II.54}$$

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. Ainsi la surface représente le comportement dynamique désiré du système. Dans notre cas. Nous nous intéresserons à une surface non linéaire.

La forme non linéaire est une fonction de l'erreur sur la variable à régler (x), elle est donnée par :

$$S(x) = \left( \frac{\partial}{\partial x} + \delta \right)^{r-1} .e(x) \tag{II.55}$$

Avec :

e(x) : l'écart entre la variable à régler et sa référence.

$$e(x) = x_{ref} - x \tag{II.56}$$

$\delta$ : Gain positif.

r : degré relatif, il représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande.

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro.

**II.8.5.2. Condition de convergence et d'existence**

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement, et d'y rester indépendamment de la perturbation.

On présente deux types de conditions qui sont :

- **Fonction discret de commutation**

C'est la première condition de convergence, elle est proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin. il s'agit de donner à la surface une dynamique convergent vers zéro.

$$\begin{cases} \dot{S}(x) > 0 & \text{si } S(x) < 0 \\ \dot{S}(x) < 0 & \text{si } S(x) > 0 \end{cases} \tag{II.57}$$

Cette dernière peut être reformulée autrement par :

$$\dot{s}(x).S(x) < 0 \quad (\text{II.58})$$

• **Fonction de Lyapunov [20]**

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive pour les variable d'état du système .L'idée est de choisir une fonction scalaire  $S(x)$  pour garantir l'attraction de la variable a contrôler vers sa valeurs de référence.

Nous définissons la fonction de Lyapunov comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} s^2(x) \quad (\text{II.59})$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = \dot{s}(x) S(x) \quad (\text{II.60})$$

Pour que la fonction  $V(x)$  puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifier que si la condition (II.58) est vérifiée, par conséquent le carrée de la distance de la fonction (II.59) entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement décroît tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface de glissement.

Cette condition suppose un régime glissant idéal.

La condition de convergence est définie par l'équation de Lyapunov , elle rend la surface attractive et invariante.

**II.8.6. Phénomène de broutement**

En mode de glissement, la commande discontinue commute entre deux valeurs ( $\pm k$ ) a une fréquence théorique infinie. Ce phénomène est appelé phénomène de broutement (chattering en anglais).

Dans ce mode, la trajectoire d'état n'évolue plus exactement le longe de la surface, mais elle tende à osciller au voisinage de celui-ci. Ce phénomène peut exciter les dynamiques négligés durant la modélisation.

Dans le but de réduire ces oscillations, nous proposons une des solutions qui repose sur la variation de la commande ( $V_n$ ) en fonction de la distance entre la trajectoire de la variable à régler et la surface de glissement.il s'agit d'encadrer la surface par une bonde avec un ou deux seuils, le choix de ces seuils est directement lié à la précision en boucle fermée.

Parmi les méthodes qui réduisent l'effet de la fonction signe dans une bonde autour de la surface, nous trouvons la commande douce, cette commande est caractérisée par un ou deux seuils. Pour diminuer progressivement la valeur de ( $V_n$ ) en fonction de l'approche de l'état vers

la surface dans les régions qui encadre cette dernière. La commande varie entre les deux valeurs limites ( $\mp k$ ) suivant une pente entre les deux seuls.

### II.8.7. Détermination de la loi de commande

Dans la littérature, on trouve trois types de commande, la commande par contra réaction, la commande par relais, et la commande équivalente les deux dernières approches, sont les plus utilisés dans la commande des machines électriques.

Dans notre cas, la méthode choisie est celle de la commande équivalente, alors la structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte  $V_{eq}$  et l'autre stabilisante  $V_n$ .

$$V = V_{eq} + V_n \quad (II.61)$$

$V_{eq}$  : elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement  $S(x) = 0$ . La commande est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle  $\dot{S}(x) = 0$ .

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{dS}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (II.62)$$

En remplaçant (II.54) et (II.61) dans (II.62), nous trouvons :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} A(x) + \frac{dS}{dt} B(x) V_{eq} + \frac{dS}{dx} B(x) V_n \quad (II.63)$$

Durant la phase glissement et la phase du régime permanent  $V_n = 0$ . De ces conditions, on déduit  $V_{eq}$  de l'équation (II.63) :

$$V_{eq} = - \left( \frac{dS}{dx} B(x) \right)^{-1} \frac{dS}{dx} A(x) \quad (II.64)$$

Avec :

$$\frac{dS}{dx} B(x) \neq 0$$

En substituant l'équation (II.62) dans (II.64) la dérivée de la surface  $S(x)$  devient

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dx} B(x) V_n \quad (II.65)$$

La commande discrète  $u_n$  est déterminée pour vérifier la condition de convergence équation (II.58) en tenant compte de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système. La condition de convergence exprimée par l'équation (II.61) devient

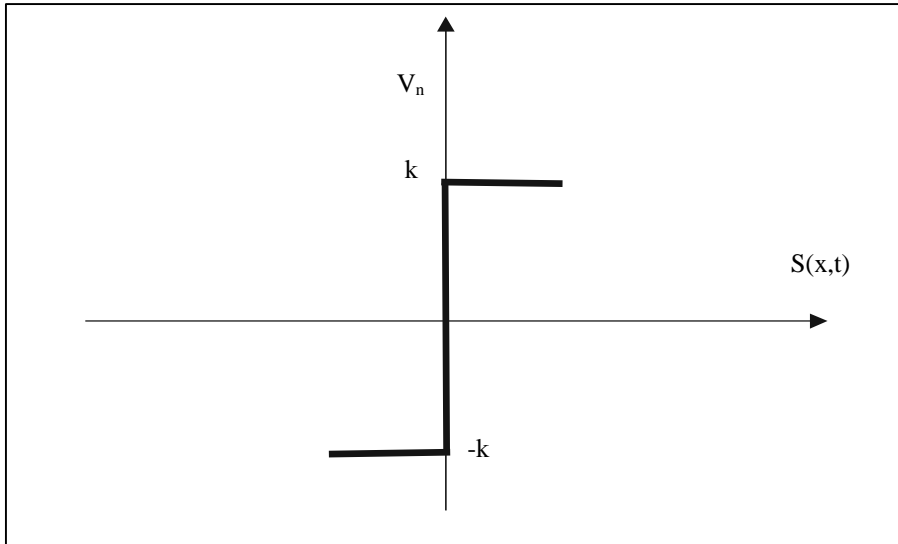
$$S(x) \frac{dS}{dx} B(x) V_n < 0 \quad (II.66)$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe  $V_n$  doit être opposé à celui de l'expression

$$S(x) \frac{dS}{dx} B(x) \tag{II.67}$$

La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'un relai représenté sur la **figure (II.17)**

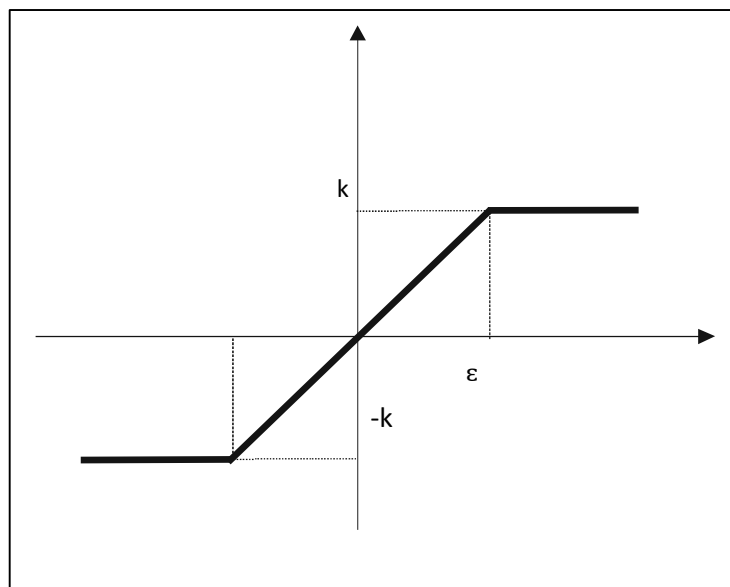
$$V_n = k \cdot \text{sign}(S(x)) \tag{II.68}$$



**Figure (II.17) :** Fonction signe. [17]

Toutefois l'utilisation de la commande de type relai peut provoquer des dynamiques indésirables caractérisées par le phénomène de broutement.

Afin de limiter le phénomène de broutement, une commande en mode glissement dite commande douce à un seul seuil est utilisée voir la **figure (II.18)**.



**Figure (II.18) :** Commande douce a un seul seuil. [17]

$$\begin{cases} |k| \cdot \frac{S(x)}{\varepsilon} & \text{si } |S(x)| < \varepsilon \\ |k| \cdot \text{sign.}(S(x)) & \text{si } |S(x)| > \varepsilon \end{cases} \quad (\text{II.69})$$

## II.9. Application de la commande par mode glissant à la MADA

Avant de passer à la commande il serait utile de rappeler d'abord les expressions des puissances actives, et réactive statoriques, dans le repère de Park avec orientation du flux statoriques.

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (\text{II.70})$$

A partir du système d'équation (II.27) on tire les expressions des courant rotorique comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dI_{rd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (V_{rd} - R_r I_{rd} + g \omega_s L_r \sigma I_{rq}) \\ \frac{dI_{rq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_r} (V_{rq} - R_r I_{rq} + g \omega_s L_r \sigma I_{rd} - g \frac{M V_s}{L_s}) \end{cases} \quad (\text{II.71})$$

### II.9.1. Contrôle de la puissance active

L'expression de la surface de contrôle de la puissance active est définie comme suit :

$$s(p) = P_{res \text{ réf}} - P_{res} \quad (\text{II.72})$$

La dérive de la surface est :

$$\dot{s}(p) = \dot{P}_{res \text{ réf}} - \dot{P}_{res} \quad (\text{II.73})$$

En remplace l'expression de la puissance tirée de l'expression (II.70) :

$$\dot{s}(p) = \dot{P}_{res \text{ réf}} - V_s \frac{M}{L_s} (g - 1) \dot{I}_{rq} \quad (\text{II.74})$$

De l'expression (II.74) on tire  $\dot{I}_{rq}$ , et en remplaçant l'expression de  $V_{rq}$  par  $(V_{rq \text{ éq}} + V_{rq \text{ n}})$  on obtient :

$$\dot{s}(p) = \dot{P}_{res \text{ réf}} - V_s (g - 1) \frac{M}{L_r L_s \sigma} (V_{rq \text{ éq}} + V_{rq \text{ n}} - R_r I_{rq} + g \omega_s L_r \sigma I_{rd} - g \frac{M V_s}{L_s}) \quad (\text{II.75})$$

Durant le mode glissant et en régime permanent, on a :

$$s(p) = 0, \quad \dot{s}(p) = 0, \quad V_{rq \text{ n}} = 0$$

Alors on tire de l'équation (II.75) l'expression de  $V_{rq \text{ éq}}$  :

$$V_{rq \text{ éq}} = -\dot{P}_{\text{res réf}} \frac{L_r L_s \sigma}{M V_s} \frac{1}{1-g} + R_r I_{rq} + g \omega_s L_r \sigma I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \quad (\text{II.76})$$

Par conséquent le terme de commutation est donné par :

$$V_{rq n} = K_{rq} \cdot \text{Sat}(s(p)) \quad (\text{II.77})$$

Avec  $K_{rq}$  est un gain positif.

### II.9.2. Contrôle de la puissance réactive

L'expression de la surface de contrôle de la puissance réactive est définie comme suit :

$$S(Q) = Q_s \text{ réf} - Q_s \quad (\text{II.78})$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{s}(Q) = \dot{Q}_s \text{ réf} - \dot{Q}_s \quad (\text{II.79})$$

On remplace l'expression de la puissance réactive à partir de l'équation (II.29) :

$$\dot{S}(Q) = \dot{Q}_s \text{ réf} + V_s \frac{M}{L_s} \dot{I}_{rd} \quad (\text{II.80})$$

On tire l'expression du courant  $I_{rd}$  à partir de l'équation (II.70) :

$$\dot{S}(Q) = \dot{Q}_s \text{ réf} + V_s \frac{M}{\sigma L_r L_s} (V_{rd} - R_r I_{rd} + g \omega_s L_r \sigma I_{rq}) \quad (\text{II.81})$$

En remplaçant l'expression de  $V_{dr}$  par  $(V_{rd \text{ éq}} + V_{rd n})$ , la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$\dot{S}(Q) = \dot{Q}_s \text{ réf} + V_s \frac{M}{\sigma L_r L_s} (V_{rd \text{ éq}} + V_{rd n} - R_r I_{rd} + g \omega_s L_r \sigma I_{rq}) \quad (\text{II.82})$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(Q)=0 \quad , \quad \dot{S}(Q)=0 \quad , \quad V_{dr n} = 0$$

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente  $V_{dr \text{ éq}}$  qui s'écrit :

$$V_{rd \text{ éq}} = -\dot{Q}_s \text{ réf} \frac{L_r L_s \sigma}{M V_s} + R_r I_{rd} - g \omega_s L_r \sigma I_{rq} \quad (\text{II.83})$$

$$V_{rd n} = K_{rd} \text{ Sat}(S(Q)) \quad (\text{II.84})$$

### II.9.3. Calculer des paramètre $K_{rd}$ et $K_{rq}$

Le calculs de ces paramètres reste indispensables pour :

- Limiter les courants à des valeurs admissibles pour le couple maximal.
- Assurer la rapidité de la convergence.
- Imposer la dynamique en mode de convergence et de glissement.

➤ **Calculer  $K_{rd}$**

La condition de convergence  $S(x).\dot{S}(x) < 0$  est assurée

Si  $S(x) > 0$  et  $\dot{S}(x) < 0$

De l'expression (II.81) on obtient l'inégalité suivant

$$\dot{Q}_s \text{ réf} + V_s \frac{M}{\sigma L_r L_s} (K_{rd} - R_r I_{rd} + g \omega_s L_r \sigma I_{rq}) < 0 \quad (\text{II.85})$$

D'où

$$K_{rd} < \frac{L_r L_s \sigma}{V_s M} \dot{Q}_s \text{ réf} + R_r I_{rd} - g \omega_s L_r \sigma I_{rq} \quad (\text{II.86})$$

Et Si  $S(x) < 0$  et  $\dot{S}(x) > 0$

L'expression (II.81) nous conduit à l'inégalité suivante

$$\dot{Q}_s \text{ réf} + V_s \frac{M}{\sigma L_r L_s} (-K_{rd} - R_r I_{rd} + g \omega_s L_r \sigma I_{rq}) > 0 \quad (\text{II.87})$$

$$\text{D'où} \quad K_{rd} > \left| -\left( \frac{L_r L_s \sigma}{V_s M} \dot{Q}_s \text{ réf} - R_r I_{rd} + g \omega_s L_r \sigma I_{rq} \right) \right| \quad (\text{II.88})$$

➤ **Calcul de  $K_{rq}$**

Si  $S(x) > 0$  et  $\dot{S}(x) < 0$

Alors on peut écrire :

$$\dot{P}_{\text{res réf}} - V_s \frac{M}{L_r L_s \sigma} (g - 1) (K_{rq} - R_r I_{rq} + g \omega_s L_r \sigma I_{rd} - g \frac{M.V_s}{L_s}) < 0 \quad (\text{II.89})$$

D'où

$$K_{rq} > (g - 1) \frac{L_r L_s \sigma}{V_s M} \dot{P}_{\text{res réf}} + R_r I_{rq} - g \omega_s L_r \sigma I_{rd} + g \frac{M.V_s}{L_s} \quad (\text{II.90})$$

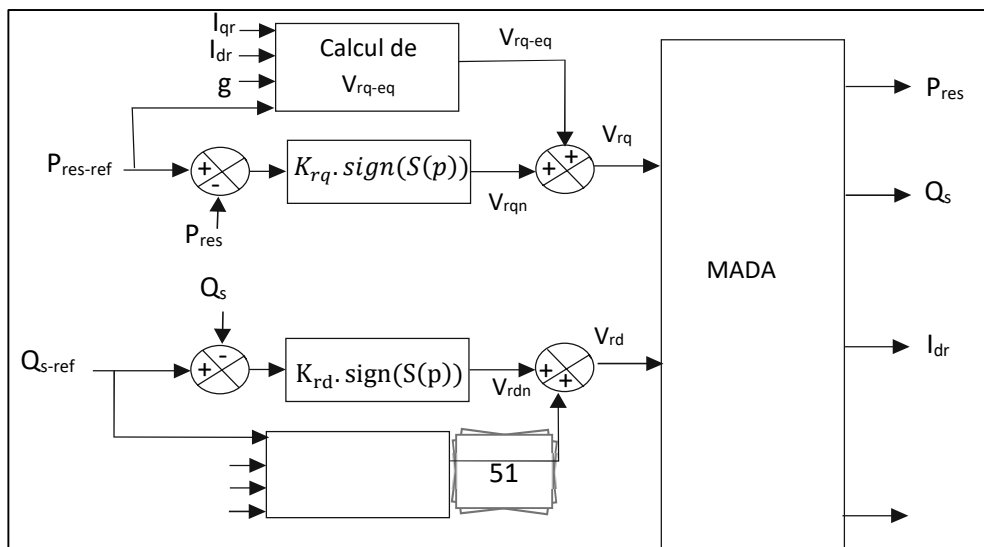
Si  $S(x) < 0$  et  $\dot{S}(x) > 0$

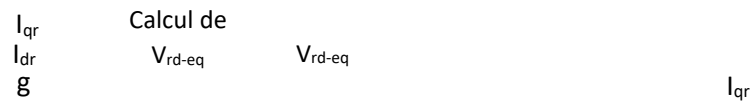
$$\dot{P}_{\text{res réf}} - V_s \frac{M}{L_r L_s \sigma} (g - 1) (-K_{rq} - R_r I_{rq} + g \omega_s L_r \sigma I_{rd} - g \frac{M.V_s}{L_s}) > 0 \quad (\text{II.91})$$

D'où

$$K_{rq} > -\left( \frac{L_r L_s \sigma}{V_s M} (g - 1) \dot{P}_{\text{res réf}} + R_r I_{rq} + g \omega_s L_r \sigma I_{rd} + g \frac{M.V_s}{L_s} \right) \quad (\text{II.92})$$

$$K_{rq} > \left| -\left( \frac{L_r L_s \sigma}{V_s M} (g - 1) \dot{P}_{\text{res réf}} + R_r I_{rq} - g \omega_s L_r \sigma I_{rd} + g \frac{M.V_s}{L_s} \right) \right| \quad (\text{II.93})$$





**Figure (II.19) :** Schéma bloc de la structure de la commande par mode glissant. [17]

## II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté et modélisé les différentes parties de la station pompage turbinage en commençant par la pompe turbine réversible, puis on est passé à la modélisation de la machine MADA en passant par la transformé de Park pour atterrir dans un repère qui simplifieras les équations de la machine.

Puis on a d’opter pour une commande avec orientation de flue statorique pour dimensionner la machine à avoir un découplage similaire a une MCC a excitation séparé, afin de commander la machine en agissant séparément avec deux régulateurs l’un pour le contrôle de la puissance active l’autre pour la puissance réactive.

Ensuit on est passé à la modélisation du convertisseur MLI qui reste le seul intermédiaire entre le rotor et le réseau.

Puis on est passé à l’essentiel de notre travail qui est d’appliqué une commande de type non linéaire, pour nous la commande par mode glissant était la mieux adapté par ses résultats déjà reconnus dans déférents applications, et aussi par sa robustesse, alors on la présenter et on la défini sa structure et ses différents caractéristiques, et par déférents calcule on a déduit les équations de commande nécessaires pour la commande des régulateurs pour l’études spécifié qui est commande en puissance de la STEP.





# ***CHAPITRE III***

***Simulation et interprétations des résultats***

### III.1. Introduction

Comme on l'a vu dans les deux chapitres précédent, le fonctionnement a vitesse variable caractérise les stations hydroélectriques réversible des autres centrales de conversion d'énergie de grande puissance, en effet pour extraire le maximum de puissance il faut que la vitesse de rotor de la génératrice varie convenablement avec la variation du débit.

Ce chapitre est consacré à la simulation sous logiciel Matlab du fonctionnement de la station réversible déjà modélisé dans le chapitre précédent dans les deux phases de fonctionnement pour évaluer l'efficacité de la commande élaborée à partir des résultats de simulation.

### III.2. Système hydraulique global

La station réversible étudié est constitué d'un bassin supérieur, l'eau relâcher de ce dernier d'un débit qui sera variable bien sûr pour satisfaire le fonctionnement a vitesse variable.

La groupe pompe turbine réversible utilise est de type Francise, et la machine est une MADA a rotor bobiné, elle est dimensionnée pour que le stator sera connecté directement au réseaux par contre le rotor est séparé du réseau via un convertisseur bidirectionnels commandés en MLI.

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

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

- Pour les valeurs du couple électromagnétique inférieur à celle nominale, l'expression de la puissance active de référence est :
- Pour les valeurs du couple électromagnétique tendent à dépasser sa valeurs nominale, l'expression de la puissance de référence devient :

III.3. Schéma du système global

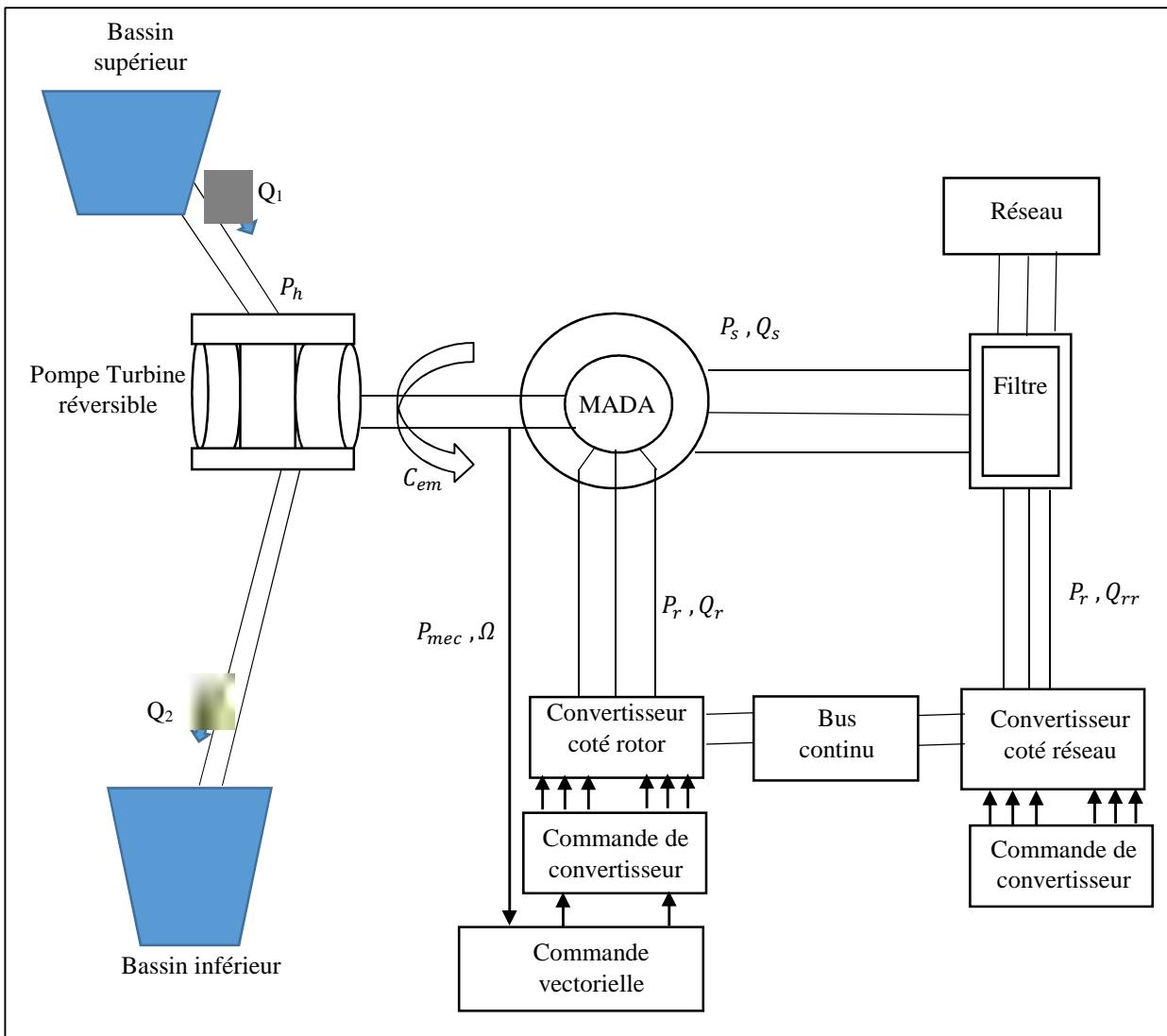
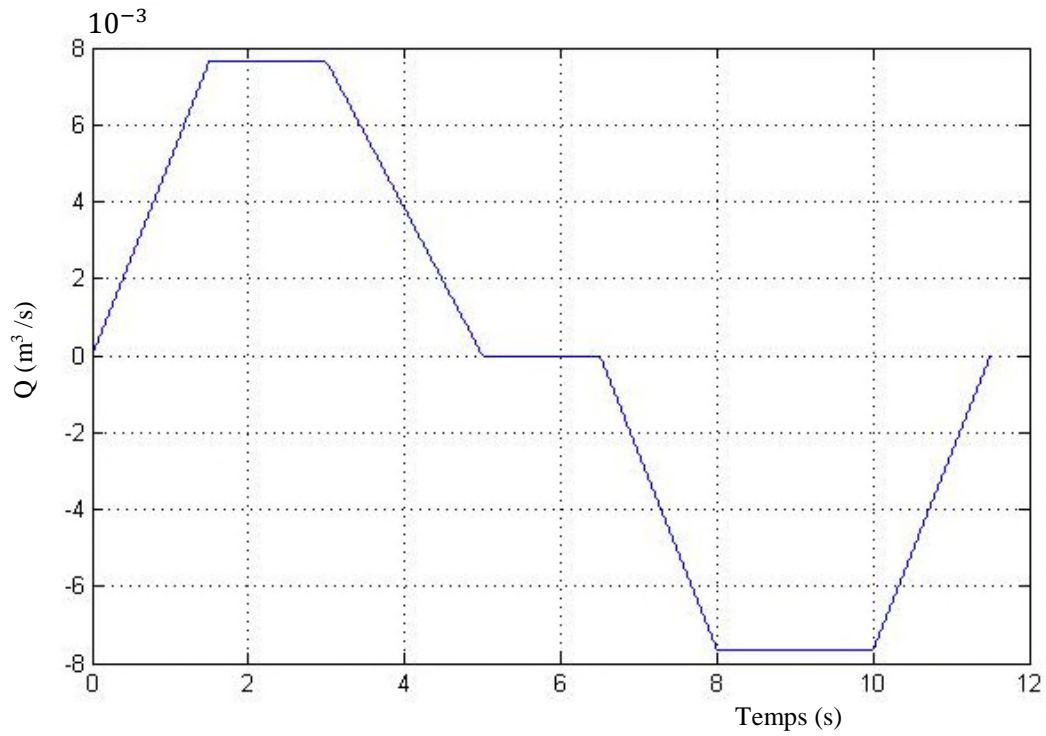


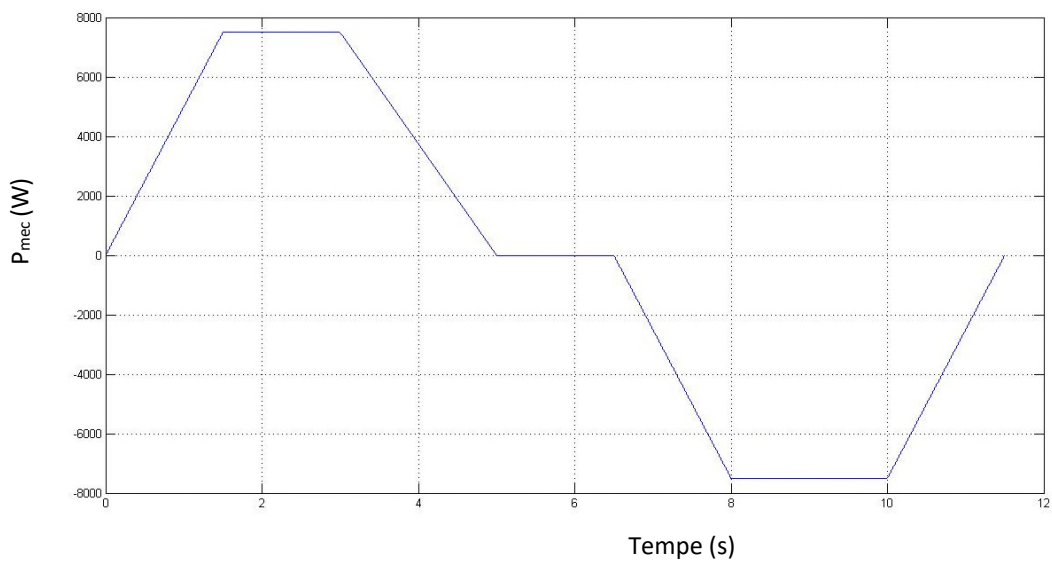
Figure (III.1) : Schéma structural de la commande du système global.

### III.4. Résultats de simulation

Les résultats de simulation sont obtenus avec le débit volumique illustrée sur la **figure (III.2)**



**Figure (III.2) :** Le débit volumique.



**Figure (III.3) :** La puissance mécanique de la turbine.

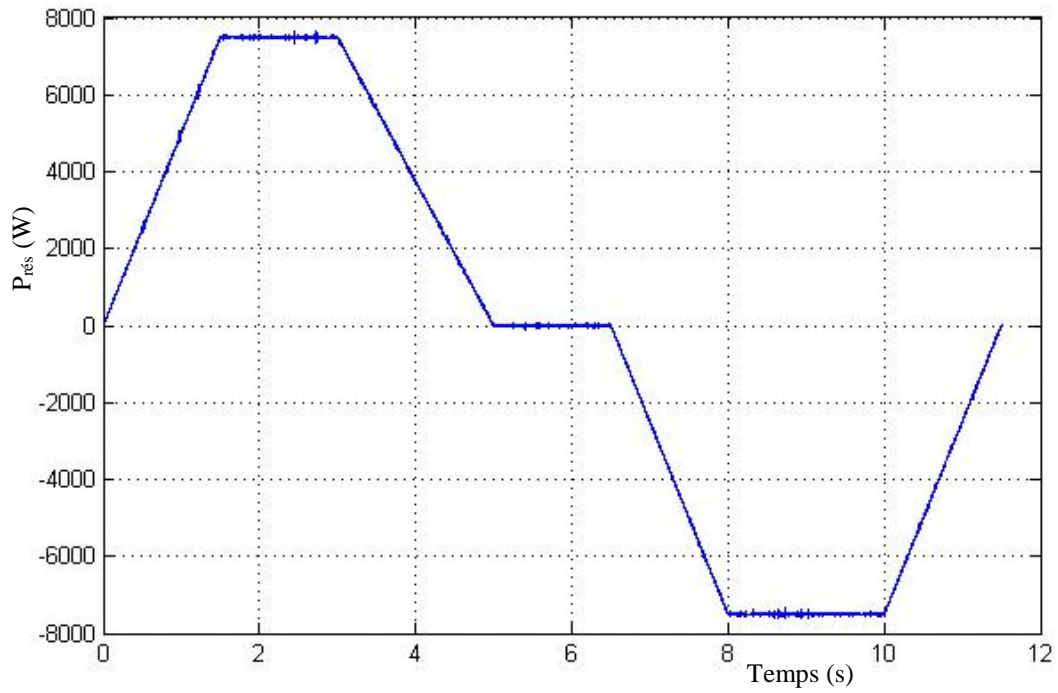


Figure (III.4) : Puissance active du réseau.

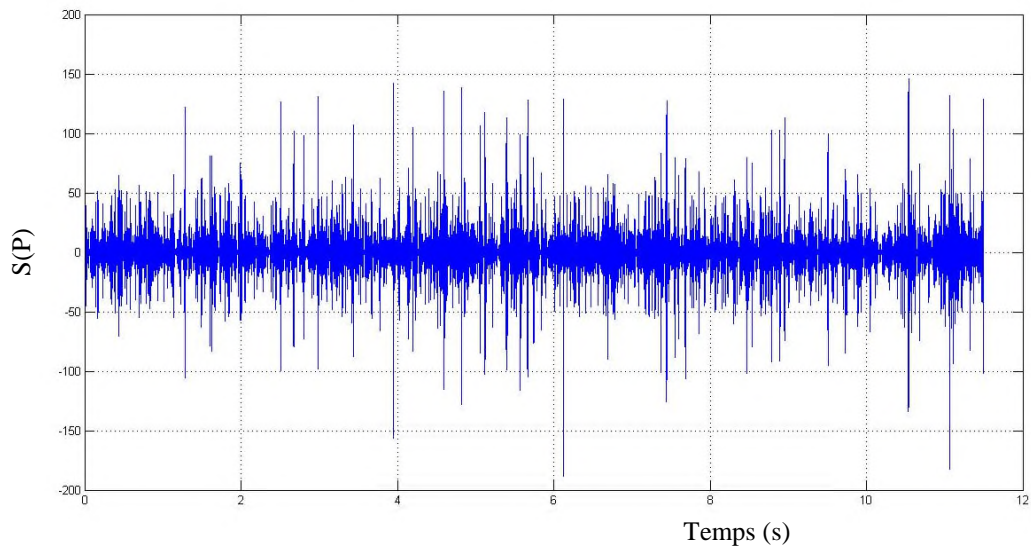


Figure (III.5) : Surface de glissement de la puissance active.

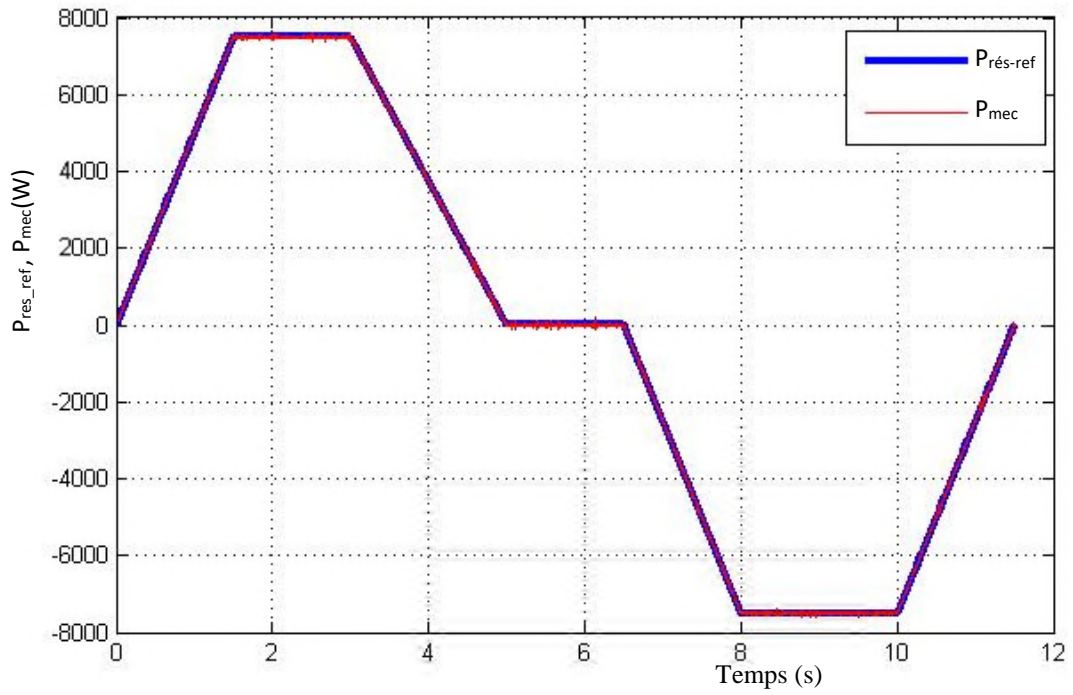


Figure (III.6) : Puissance active de réseau et ça référence.

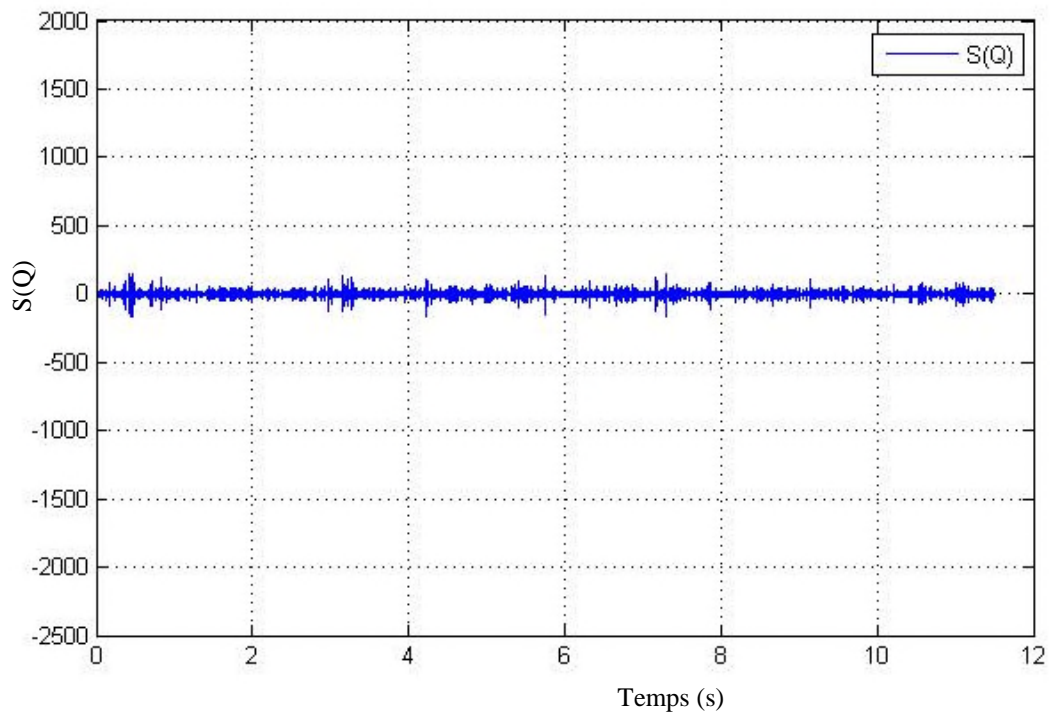


Figure (III.7) : Surface de glissement de puissance réactive.

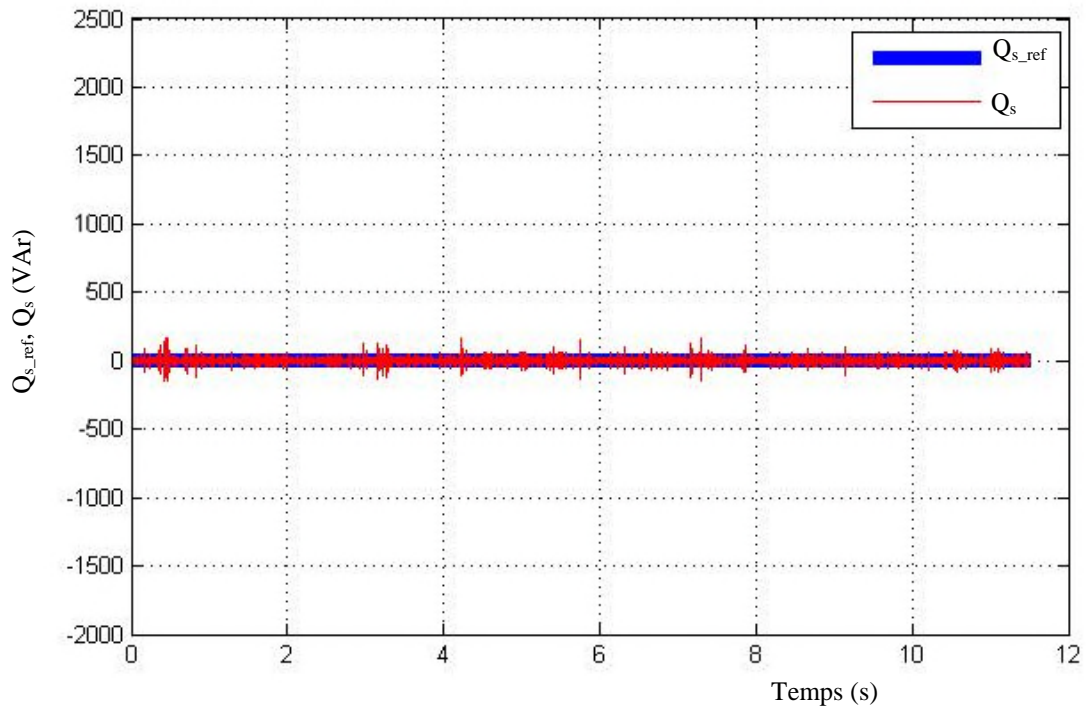


Figure (III.8) : Puissance réactive statorique et ça référence.

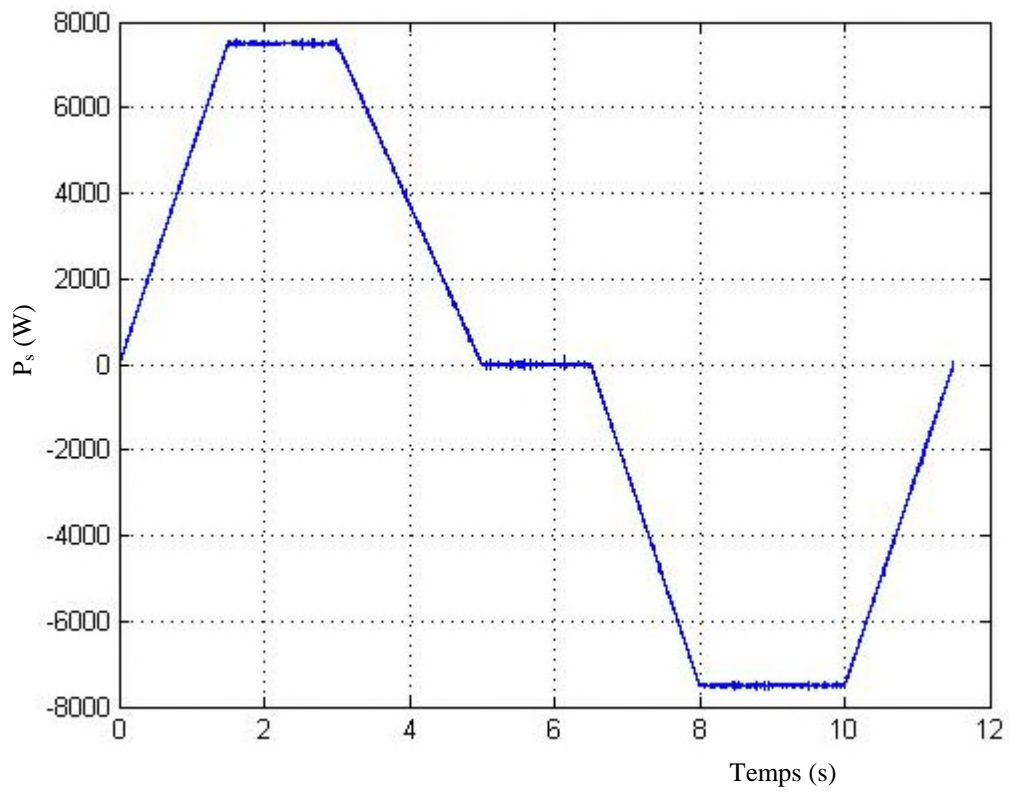


Figure (III.9) : Puissance active statorique.



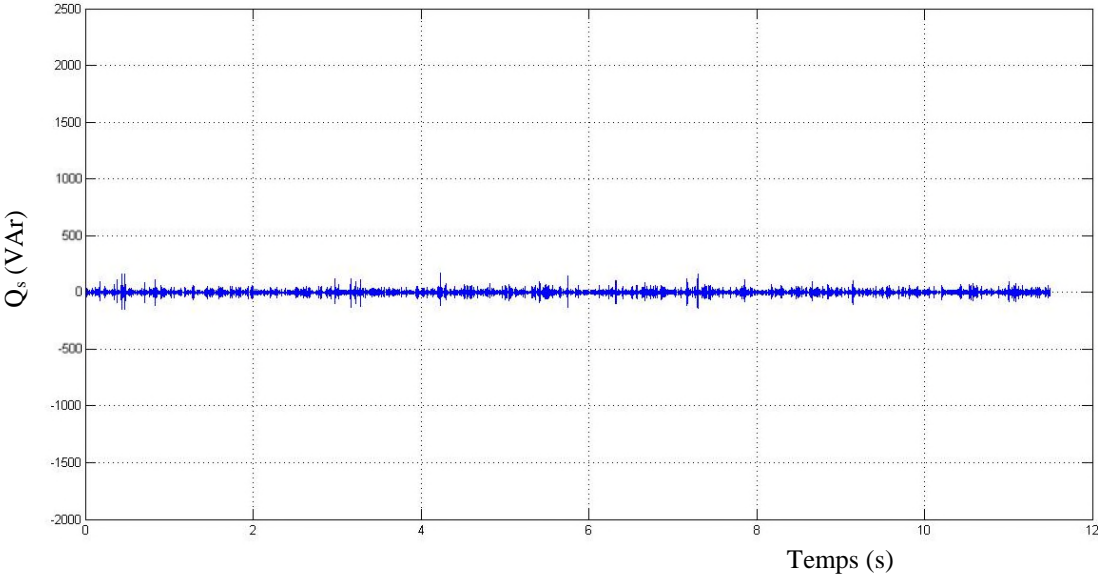


Figure (III.10) : Puissance réactive statorique.

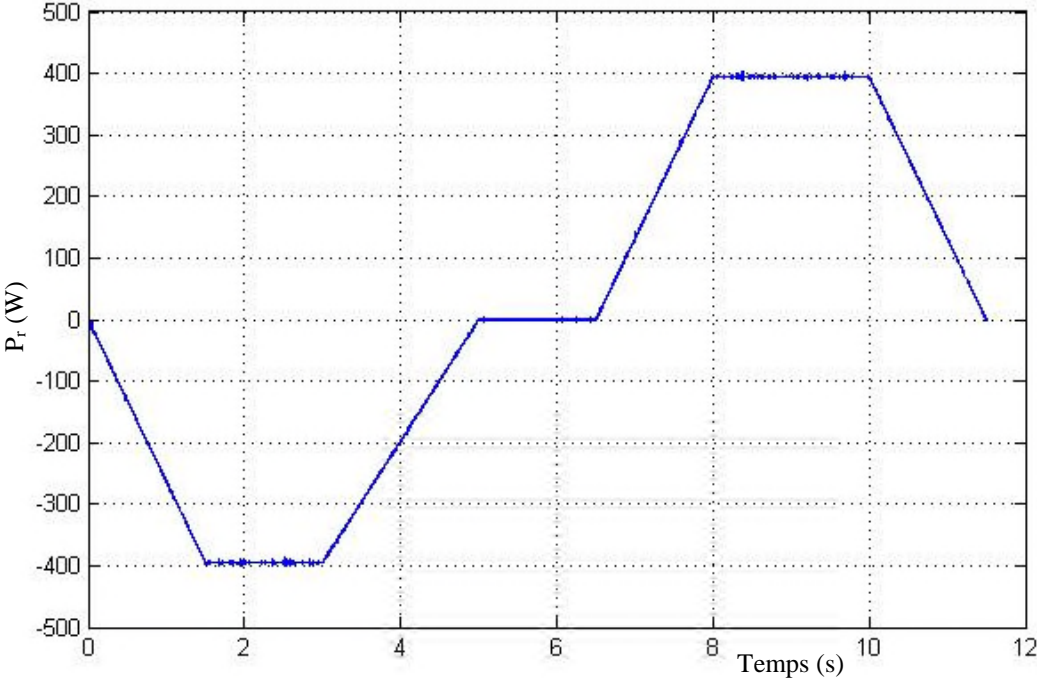
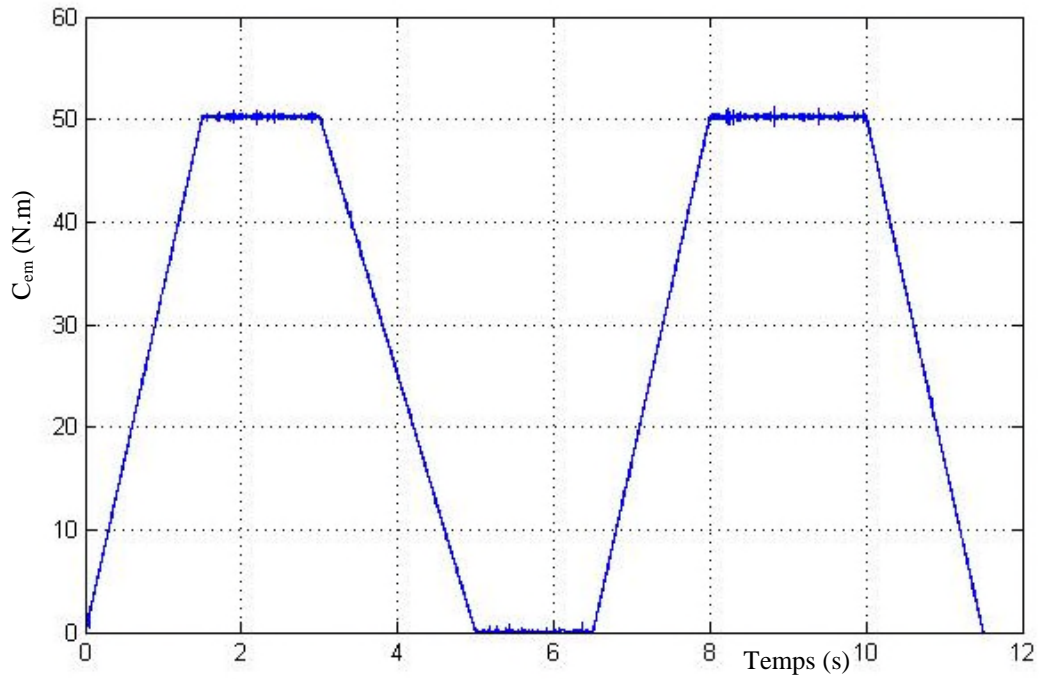
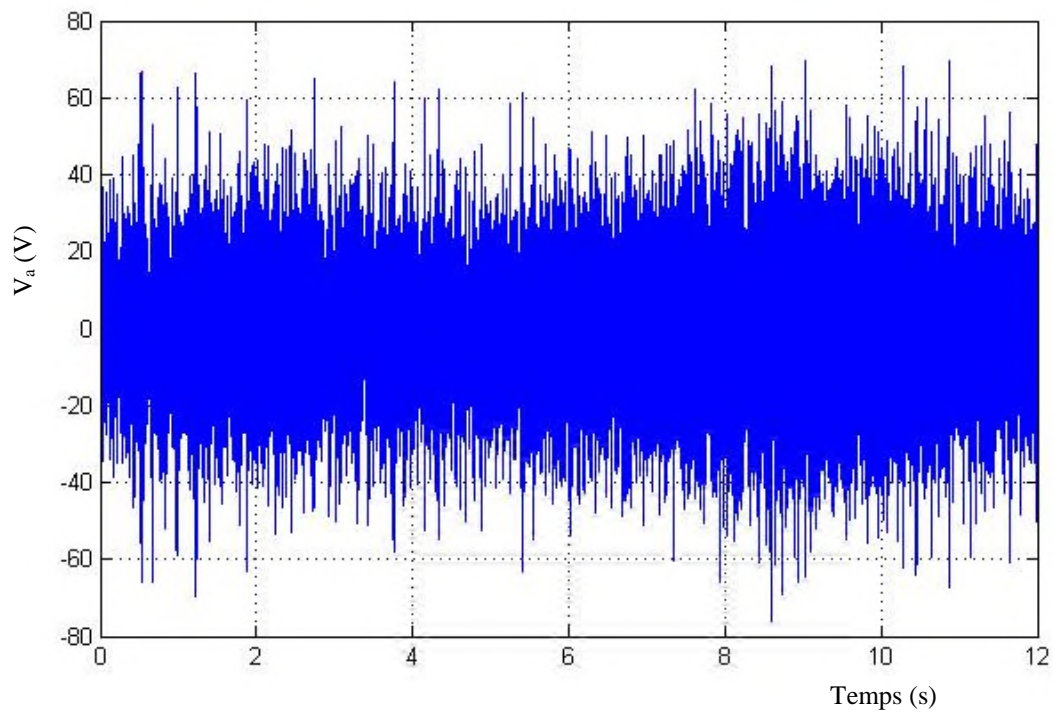


Figure (III.11) : Puissance active rotorique.





**Figure (III.12) :** Couple électromagnétique.



**Figure (III.13) :** Tension d'une phase rotorique.

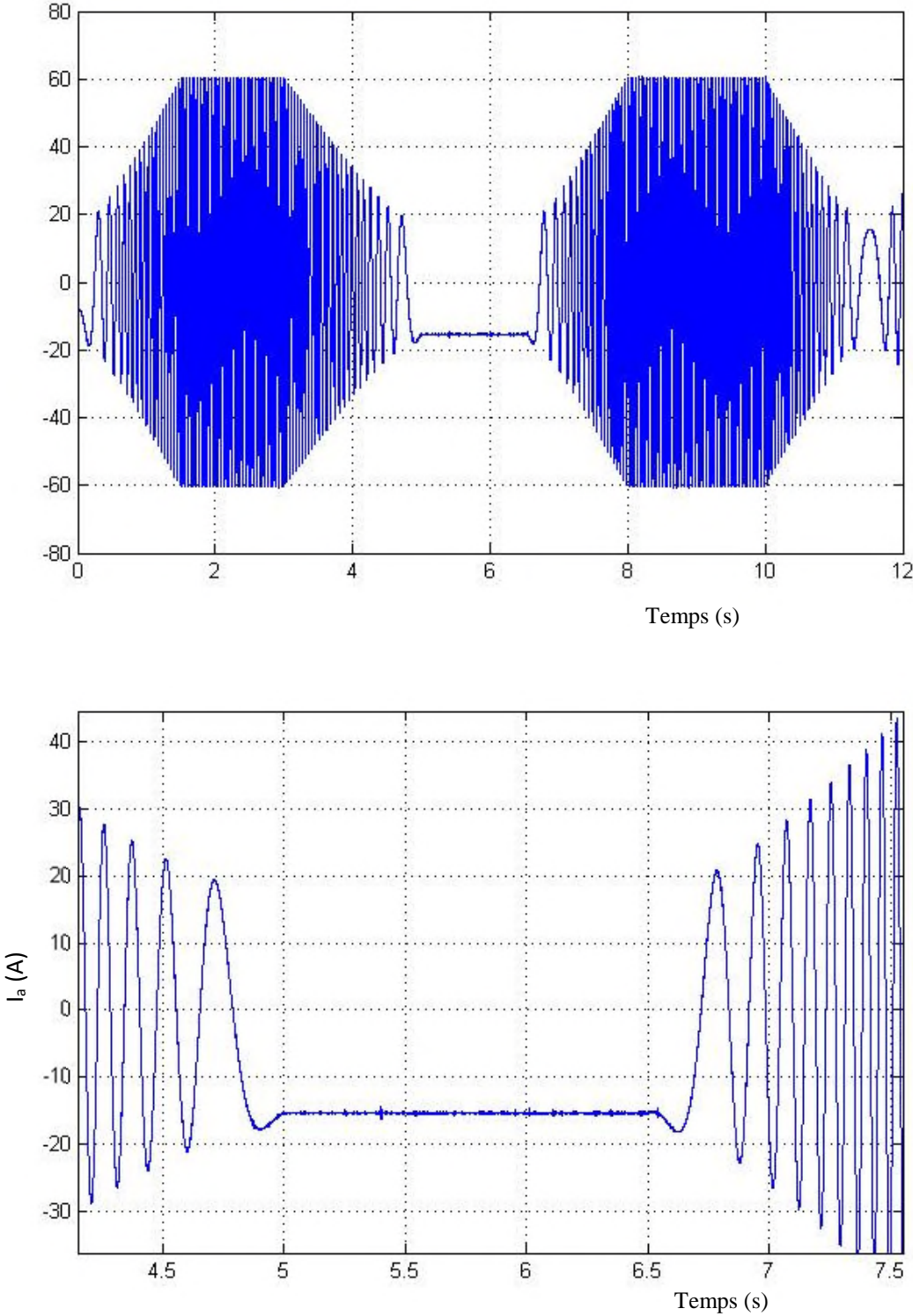


Figure (III.14) : Courant d'une phase rotorique.

### III.5. Interprétation des résultats

Le comportement dynamique du système étudié est illustré de **la figure 2 à 14** :

La Figure (III.2) illustre l'allure du débit d'eau relâcher du bassin supérieur exprimé sur la figure par la partie négative, et le débit d'eau pompé du bassin inférieur exprimé par la partie positive. la partie nulle exprime que la STEP est au repos (ni pompage ni turbinage).

La Figure (III.3) : illustre l'allure de La puissance mécanique de la turbine. la partie positif c'est le pompage, ou la MADA fonctionne en moteur. La partie négative c'est le turbinage, ou la MADA fonctionne en génératrice. La puissance est nulle dans la partie qui exprime l'arrêt de la STEP.

La Figure (III.4) : illustre l'allure de la puissance active du réseau, dont on voit bien qu'elle suit la puissance mécanique, et elle est la somme de la puissance  $P_s + P_r$ .

La Figure (III.5) et La Figure (III.7) : illustre l'allure de la surface de glissement de la puissance active et réactive respectivement. La surface est nulle ce qui montre la fiabilité, et le bon fonctionnement de la commande par mode glissant.

La Figure (III.6) : illustre l'allure de la puissance active du réseau et sa référence qui est la puissance mécanique. On voit bien que les deux allures sont identique (l'une colle sur l'autre) ce qui montre aussi le bon fonctionnement de la commande utilisé.

La Figure (III.8) : illustre l'allure de la puissance réactive statorique et sa référence. On voit bien que les deux allures se colle l'une sur l'autre ce qui signifie le bonne fonctionnement de la commande par mode glissant.

La Figure (III.9) : illustre l'allure de la puissance active statorique, on voit bien qu'elle suit la puissance mécanique.

La Figure (III.11) : illustre l'allure de la puissance active rotorique, qu'on voit bien qu'elle traduit le fonctionnement hyposynchrone de la MADA. En mode pompage l'allure est négative en mode turbinage l'allure est positif.

La Figure (III.13) : illustre l'allure de la tension d'une phase rotorique.

La Figure (III.14) : illustre l'évolution du Courants d'une phase rotoriques dont en remarque que sur la période ou la STEP est au repos (ni pompage ni turbinage) leurs allures changent de forme car à cette période la fréquence est nulle.

**III.6. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation du fonctionnement du système global dont on a présenté les différentes allures qui traduisent le fonctionnement de la STEP dans ces deux modes de fonctionnement.

Les résultats obtenus nous montrent le bon fonctionnement de la commande par mode glissant appliqué à la MADA.



***Conclusion  
Générale***

Dans ce mémoire nous avons présentée l'une des techniques de production d'énergie électrique, sert l'une des plus ancienne mais actuellement face au défi environnementale malheureusement qui touche notre planète, on pourrait la qualifier de la plus noble, car elle utilise une source primaire renouvelable et surtout propre.

La réversibilité d'utilisation de la source de production, et aussi la grande capacité de stockage à grande échelle, pousse les STEP dans les premiers ranges des perspectives amenant à la transition énergétique.

L'objectif de ce travail était de simuler par le logiciel MATLAB SUMULINK le fonctionnement de la station de transfert d'énergie par pompage (STEP) en mode pompage et turbinage, en appliquant la commande par mode glissant aux puissances statorique de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), dont le stator est alimenté directement du réseau, alors que le rotor est connecté à ce dernier via un convertisseur bidirectionnel (redresseur + filtre + onduleur) a basse d'IGBT commander en MLI.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des centrales hydroélectrique notamment les centrales réversibles dont les STEP, et nous avons vus le rôle de ces dernière dans le stockage d'énergie propre (énergie renouvelable), et nous avons défini les différents composants qui constitues une STEP classique, nous avons présenté aussi la machine MADA qui sera étudié par la suit.

Dans le deuxième chapitre, on a modélisé les différents composants de la STEP (MADA, convertisseur, turbine pompe...), et on a vu l'intérêt de passé par la transformé de Park qui permet de passer d'un système triphasé a un système diphasé, puis on est passé la commande vectorielle par orientation de flue statorique, pour avoir un découplage entre l'équation du couple et du flue, afin de contrôler le système avec un seul régulateur à chaque bras ( $V_{rq}$  et  $V_{rd}$ ).ces régulateurs sont de type mode glissant dont on a défini et déduit leurs structures qui s'adapte à notre commande qui est une commande en puissance, dans ce chapitre des schémas blocs sont élaborés contenant des équations qui régisses le système pour les exploité dans la simulation au troisième chapitre.

Dans le troisième chapitre, une simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink du système global a étudié a était effectuée. Les résultats obtenus montrent le bon fonctionnement du système qui montre la fiabilité de la commande par mode glissant.

## *Conclusion générale*

---

Suit à ces résultats satisfaisant obtenus dans ce mémoire, quelques perspectives sont envisageables :

- Remplacé les convertisseurs à deux niveau par des convertisseurs multi niveau.
- Faire des test pratique pour traduire les résultats obtenus lors de la simulation.
- Invité les responsables à se pencher sur ces techniques de stockage et pourquoi pas réalisé une STEP ici en ALGERIE.
- Avoir une fort collaboration entre les différents constructeur d'Equipment électromécanique et mécanique qui sont dédié à ces centrales.



***ANNEXE***



❖ **Paramètre de la MADA :**

Fréquence F	: 50 HZ
Nombre de pair de pole P	: 2
Résistance d'enroulement statorique $R_s$	: 0.455 $\Omega$
Résistance d'enroulement rotorique $R_r$	: 0.19 $\Omega$
Inductance cyclique statorique $L_s$	: 0.07 H
Inductance cyclique rotorique $L_r$	: 0.0213 H
Inductance magnétisante M	: 0.034 H

❖ **Paramètre du régulateurs mode glissant :**

$K_{rd}$ :	: 2000
$K_{rq}$ :	: 2000

❖ **Paramètre du bus continu :**

Valeurs de la capacité c	: 5000 $\mu F$
Gain proportionnel du correcteur $K_p$	: 2

❖ **Paramètre du filtre :**

Résistance du filtre de liaison au réseau	: 0.5 m $\Omega$
Inductance du filtre de liaison au réseau	: 0.2 m $\Omega$



# **Bibliographie**

- [1]: <http://mecano.gme.usherbrooke.ca/~mlacroix/ENERGIE/HYDROELECTRICITE>.
- [2] : <http://www.japprends-lenergie.fr/upload/enjeux/ressources/centrales-hydrauliques>.
- [3] :[https://www.strom.ch/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/27\\_Centrales\\_de\\_pompage\\_turbinage\\_fr](https://www.strom.ch/fileadmin/_migrated/content_uploads/27_Centrales_de_pompage_turbinage_fr)
- [4] : [http://encyclopedie-energie.org/sites/default/files/fichiers\\_joints/articles/art080\\_Tournery-JeanFrancois\\_Stations-pompage-STEP](http://encyclopedie-energie.org/sites/default/files/fichiers_joints/articles/art080_Tournery-JeanFrancois_Stations-pompage-STEP).
- [5] :**F.Élie** (Les conduites forcées, principes, aménagements, sécurités) <http://fred.elie.free.fr>, 2014.
- [6] : **C. Felat** (Le stockage hydraulique gravitaire et production hydroélectrique sur les pentes réunionnaises –étude du stockage de l'énergie photovoltaïque) [www.island-news.org](http://www.island-news.org),2009.
- [7] : **S. Breban** (Etude du système de conversion électromécanique d'une microcentrale hydroélectrique a vitesse variable) thèse de Doctorat, université de paris France 2008.
- [8] :[https://www.strom.ch/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/27\\_Centrales\\_de\\_pompage\\_turbinage\\_fr](https://www.strom.ch/fileadmin/_migrated/content_uploads/27_Centrales_de_pompage_turbinage_fr)
- [9] : **Müller, M. Deicke, R. W De Doncker** (doubly fed induction generator systems for wind turbines) IEEE,Industry applications magazine 2002
- [10] : **C. R Kelber and W.Shumacher** (adjustable speed constant frequency energy generation with doubly-fed induction machines)VSSHY 2000-european conference variable speed in small hydro-Grenoble France 2000.
- [11] : **R. abdessemed** (électrotechnique, modélisation et simulation des machine électrique) ellipse Edition Marketing S.A,2011.
- [12] : **B.A. Afaf** (commande indirecte des puissances d'une machine asynchrone à double alimentation intégré dans un système éolien connecté au réseau) mémoire de magister, l'université d'el oued Algérie 2013.
- [13] : **H. Bennani** (machine asynchrone a double alimentation Les lois de commande en régime permanent), mémoire présenté à la faculté des études supérieures et postdoctorales de l'université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.),2011.
- [14] : **M. Nasser** (supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés) thèse de doctorat Paris Tech, France 2011
- [15] : <http://ww2.ac-poitiers.fr/electrotechnique/IMG>.
- [16] : **Y. Pannatier** (Optimisation des stratégies de réglage d'une installation de pompage turbinage à vitesse variable) Thèse de doctorat, paris France 2010.

- [17] : **S.Taraft** (contribution a l'amélioration des performances d'un générateur éolienne à base de la machine asynchrone double alimentation) Thèse de doctorat, université de Bejaia Algérie 2015.
- [18] : **B.A. Afaf** (Commande Directe des Puissances d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Intégré dans un Système Éolien Connecté au Réseau) Mémoire de magister, El Oued Algérie 2013.
- [19] : **P.E Vidal** (Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation) Thèse de doctorat, Toulouse France 2004.
- [20] : **A. Guezgouz et L. Korichi** (commande en mode glissant de la MADA dans une éolienne a vitesse variable connectée au réseau) mémoire d'ingénieur, Bejaia Algérie 2009.
- [21] : **F.Abdoun et A.Idir** (Etude et Simulation d'une Chaine de Conversion Eolienne à Base d'une Machine Asynchrone Double Alimentée) mémoire d'ingénieur, Bejaia Algérie 2008.