

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE  
GENIE ELECTRIQUE  
N° : RE 267



DOMAINE : SCNEINCES ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : ELECTROTECHINQUE  
OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par:** Khalfa Djalal Eddine

Boutiche Abdallah

**Intitulé**

**Commande de la puissance injectée par un  
générateur synchrone connecté au réseau  
électrique**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Dr. BENYETTOU Lotfi	Université de M'sila	Président
Dr. BENSLIMANE Tarak	Université de M'sila	Rapporteur
Mr. ZORIG Assam	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2016 /2017**

# *Remerciement*

*Nous remercions avant tous ALLAH pour son aide, ses innombrables dons, ALLAH qui nous donne la force, la volonté pour accomplir nos études.*

*Nous tenons à remercier **Dr. BENSLIMANE Tarak** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour son suivi continu durant la réalisation de ce mémoire, et pour ses conseils.*

*Nos remerciements vont au président du jury et aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce mémoire.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribué à notre formation.*

# *Dédicace*

*Nous dédions ce travail à :*

- *Nos chers mères et nos chers pers*
  - *Nos Chers frères et sœurs*
    - *Toute la famille*
      - *Tous les amis*
- *Tous les collèges de promotion 2017*
- *Tous ceux que nous aimons et tous qui nous aiment*
- *Tous ceux qui connaissent, **Khalfa Djalel** et*

***Boutiche Abdallah***

# Sommaire

---

## *Sommaire*

Liste des figures .....	I
Nomenclateurs .....	II
Introduction générale .....	1

### **Chapitre I**

#### **Généralités sur l'association système d'entraînement mécanique-générateur synchrone**

I.1.Introduction .....	3
I.2. Différents types des systèmes d'entraînement mécanique .....	3
I.2.1.Turbine .....	3
I.2.1.1.Turbine à vapeur .....	4
I.2.1.2.Turbine à gaz .....	5
I.2.1.3.Turbine hydraulique .....	7
I.2.1.4. Éolienne .....	8
I.2.2. Moteur diesel .....	10
I.3. Généralité sur les machines synchrones .....	11
I.3.1.Introduction .....	11
I.3.2.Moteur synchrone .....	11
I.3.3.Générateur synchrone .....	12
I.3.3.1.Construction des générateurs synchrones .....	12
a- Stator .....	13
b- Rotor .....	13
b.1- Rotor à aimant permanent .....	14
b.2- Rotor bobiné .....	15
b.2.1- Rotor à pôle saillant.....	15
b.2.2- Rotor à pôle lisse .....	16
b.3- Autre composant du rotor de générateur synchrone .....	16
I.3.3.2. Principe de fonctionnement d'un générateur synchrone .....	17
a- Nombre de pôles .....	18
b.1- Force électromotrice.....	18
b.2- Force électromotrice réelles .....	19
I.3.3.3. Système d'excitation d'un générateur synchrone .....	19
I.3.4. Refroidissement des machines synchrones de grande puissance.....	21

# Sommaire

---

I.3.5.Couplage des alternateurs sur le réseau .....	22
I.3.6.Bilan de puissance d'un alternateur .....	23
I.4. Conclusion .....	25

## Chapitre II

### Modélisation de l'association turbine hydraulique- générateur synchrone couplé au réseau

II.1.Introduction .....	26
II.2.Modélisation de la turbine hydraulique .....	27
II.3. Modélisation de générateur synchrone à rotor bobiné .....	28
II.3.1.Structure générale d'une machine synchrone à rotor bobiné .....	29
II.3.2.Hypothèse simplificatrice .....	30
II.3.3.Mise en équation de la machine .....	30
II.3.3.1.Equation électrique .....	30
II.3.3.2.Equation magnétique .....	31
II.3.4.Passage au repère de Park .....	32
II.3.4.1.Choix de référentiel .....	33
II.3.5.Modèle de la machine synchrone à rotor bobiné dans le repère de Park .....	34
II.3.5.1.Equation électrique .....	34
II.3.5.2.Equation magnétique .....	34
II.3.6.Expression de couple électromagnétique .....	35
II.3.7.Equation mécanique .....	36
II.4. Modélisation de transformateur .....	36
II.5. Modélisation de réseau électrique .....	37
II.6. Conclusion .....	38

## Chapitre III

### Commande en puissance active de l'association turbine hydraulique- générateur synchrone couplé au réseau

III.1. Introduction .....	39
III.2. Equilibre entre la production et la consommation .....	39
III.3. Fonctionnement des réseaux électrique .....	39
III.3.1. Appel de puissance d'un réseau électrique .....	40
III.3.2. Puissance active débitée .....	41
III.4. Commande de la puissance active débitée .....	43
III.4.1. Commande de la puissance par la régulation de la turbine .....	43
III.4.1.1. Boucle de régulation de la vitesse .....	44
III.4.1.2. Servomoteur .....	45
III.4.1.3. Boucle de régulation de la puissance .....	46
III.5. Simulation de commande en puissance active de l'association turbine- générateur synchrone couplé au réseau électrique.....	47
III.5.1. Résultats de simulation .....	47
III.5.1.1. Cas de deux augmentations consécutives de puissance .....	47
III.5.1.2. Cas de d'une augmentation suivie par une diminution de puissance .....	56
III.6. Conclusion .....	63
Conclusion général.....	64
Annexe	
Références bibliographique	
Résumé	

## Table des figures

Tableau I(1) : Classification des différentes turbines .....	3
--	---

### Chapitre I

Figure I(1) : Turbine à vapeur.....	4
Figure I(2) : Turbine à gaz .....	5
Figure I(3) : Différents composants d'une turbine à gaz .....	6
Figure I(4) : Turbine Pelton.....	7
Figure I(5) : Turbine Francis .....	7
Figure I(6) : Turbine Kaplan.....	8
Figure I(7) : Composants d'une éolienne .....	9
Figure I(8) : Groupe diesel .....	10
Figure I (9) : Moteur synchrone .....	11
Figure I(10) : Constitution d'un générateur synchrone .....	12
Figure I (11): Stator d'un alternateur.....	13
Figure I(12) : Rotor à aimants permanents .....	14
Figure I(13) : Rotor à pôle saillant .....	15
Figure I(14) : Rotor à pôle lisse.....	16
Figure I(15) : Principale composante d'un rotor à pôles lisses .....	17
Figure I(16) : Excitatrice .....	19
Figure I(17) : Système d'excitation d'une machine synchrone .....	20
Figure I(18) : Circuit de refroidissement de l'alternateur .....	21
Figure I(19) : Couplage d'une machine synchrone sur un réseau .....	22
Figure I(20) : Bilan de puissance d'un générateur synchrone .....	23

### Chapitre II

Figure II(1) : Modèle équivalent du débit d'eau.....	27
Figure II(2) : Modèle de calcul de la pression d'eau sous environnement Matlab Simulink .....	27
Figure II(3) : Modèle de la turbine hydraulique sous Matlab Simulink .....	28
Figure II(4) : Schéma représentatif de générateur synchrone à modéliser.....	29
Figure II(5) : Transformation triphasé diphasé .....	32
Figure II(6) : Modèle d'un transformateur .....	36
Figure II(7) : Modèle du réseau électrique.....	37

## Chapitre III

Figure III(1) : Fluctuations typiques de l'appel de puissance durant une année .....	40
Figure III(2) : Fluctuation de l'appel de puissance durant une journée .....	41
Figure III(3) : Relation entre la puissance active débitée par un alternateur et l'angle $\delta$ .....	42
Figure III(4) : Principe de la régulation .....	44
Figure III(5) : Schéma bloc de régulation de la vitesse de hydro-générateur sous Matlab simulink .....	44
Figure III(6) : Schéma de bloc d'un régulateur PI sous Matlab simulink .....	45
Figure III(7) : Schéma de bloc servomoteur .....	45
Figure III(8) : Schéma bloc du servomoteur sous Matlab simulink .....	45
Figure III(9) : Schéma block de régulation de la commande de l'hydro-générateur puissance sous Matlab/simulink .....	46
Figure III(10) : Schéma bloc globale de régulation de la vitesse et de la puissance de l'hydro-générateur sous Matlab simulink .....	46
Figure III(11) : Schéma block de l'association Turbine hydraulique, générateur synchrone-réseau .....	47
Figure III(12) : Puissance active débitée par le générateur et sa référence .....	49
Figure III(13) : Puissance active débitée et sa référence avec la puissance mécanique de la turbine .....	49
Figure III(14) : Vitesse rotorique du générateur synchrone .....	50
Figure III(15) : Vitesse rotorique du générateur synchrone (Zoom) .....	50
Figure III(16) : Couple mécanique fournie par la turbine hydraulique .....	51
Figure III(17) : Courant statorique du générateur synchrone .....	51
Figure III(18) : Courants statoriques du générateur (Zoom) .....	52
Figure III(19) : Tensions statoriques du générateur .....	53
Figure III(20) : Tension statorique du générateur (Zoom) .....	53
Figure III(21) : Courants du réseau électrique .....	54
Figure III(22) : Courants du réseau électrique (Zoom) .....	54
Figure III(23) : Tensions du réseau électrique .....	55
Figure III(24) : Tensions du réseau électrique (Zoom) .....	55
Figure III(25) : Puissance active débitée par le générateur et sa référence .....	57
Figure III(26) : Puissance active débitée et sa référence avec la puissance mécanique de la turbine .....	57
Figure III(27) : Vitesse rotorique du générateur synchrone .....	58
Figure III(28) : Vitesse rotorique du générateur synchrone (Zoom) .....	58
Figure III(29) : Couple mécanique fournie par la turbine hydraulique .....	59
Figure III(30) : Courant statorique du générateur synchrone .....	59
Figure III(31) : Courants statoriques du générateur (Zoom) .....	60
Figure III(32) : Tensions statoriques du générateur .....	61
Figure III(33) : Tension statorique du générateur (Zoom) .....	61
Figure III(34) : Courants du réseau électrique .....	62
Figure III(35) : Tension du réseau électrique .....	62

### Nomenclature

$e(t)$ ,  $E$  : Force électromotrice induite.

$N$  : Nombre total de conducteur.

$K_d$  : Facteur de distribution.

$K_f$  : Facteur de forme.

$K$  : Coefficient de Kapp.

$(d)$ : Un axe d'animation rotorique longitudinal  $(d)$ .

$(q)$ : Un axe inter polaire en quadrature  $(q)$ .

$w$  : Pulsation des grandeurs électrique.

$P(\Theta_r)$ : Matrice de Park

$P(\Theta_r)^{-1}$ : Matrice inverse de Park.

$X$  : Vecteurs de courant, tension ou flux.

$W_s$  : Pulsation des tensions statorique.

$n$ : Vitesse de rotation en tr/min.

$P_a$  : Puissance absorbée

$C_m$  : Couple utile sur l'arbre en N.m.

$I_{ex}$  : Courant d'excitation.

$E_{ex}$  : Tension d'excitation.

$P_u$ : Puissance utile.

$P_{js}$  : Pertes joule dans le stator.

$R$  : Résistance entre deux bornes de l'alternateur.

$P_{jr}$ : Pertes joule dans le circuit inducteur (rotor).

$R_r$  : Résistance dans le circuit d'excitation.

$f$  : Fréquence de la tension induit.

$\theta_0$  : L'angle électrique initial.

$R_s$ : Résistance des phases statorique.

$V_f$  : Tension d'excitation rotorique.

$I_f$  : Courant d'excitation rotorique.

$\Phi_f$  : Flux rotorique.

$R_f$  : Résistance rotorique.

$M$  : Mutuelle inductance entre phases du stator.

$L$  : Inductance propre d'une phase statorique.

$M_f$  : Mutuelle inductance du rotor.

## Nomenclature

---

$I_f$  : Courant d'excitation rotorique.

$\theta_r$ : Angle de a position de rotor.

$\theta$ : Angle entre l'axe magnétique (a) et l'axe longitudinal (d).

$w$  : Vitesse de rotation du référentiel choisi.

$V_d, V_q$ : Composantes de la tension au stator dans le repère de Park.

$V_f$ : Composantes de la tension rotorique dans le repère de Park.

$I_d, I_q$ : Composantes du courant statorique dans le repère de Park.

$I_f$ : Composantes du courant rotorique dans le repère de Park.

$\phi_d, \phi_q$ : Composantes du flux statorique dans le repère de Park.

$\phi_f$ : Flux d'excitation.

$\omega_r$ : Pulsation électrique rotorique.

$L_d, L_q$ : Inductances de l'enroulement de stator d'axe (d) et d'enroulement de stator d'axe de q.

$L_f$  : Inductance du bobinage de champ principal.

$M_{sf}$  : Inductance mutuelle entre l'enroulement de champ et l'enroulement de stator d'axe (d).

$P(t)$ : Puissance transmise.

$\Omega$ : Vitesse mécanique.

$C_{em}$ : Couple électromagnétique.

$C_m$  : Couple moteur avec (couple mécanique d'un turbine).

$C_f$  : Couple de frottements visqueux.

$J$ : Moment d'inertie de la machine.

$p$  : "Puissance active débitée.

$S$  : puissance apparente.

$E_0$  : Tension induit par phase.

$E_1$  : Tension ou borne par phase en.

$X_s$  : Réactance synchrone par phase.

$\delta$ : L'angle de déphasage entre  $E_0E_1$  en degré électrique.

$P_{max}$  : Puissance active maximale.

$\alpha$ : L'angle de décalage mécanique.

$g$  : Coefficient de l'ouverture de la vanne.

$P_e$  : Puissance en kW.

$Q$  : Débit moyen mesuré en mètres cube par seconde.

$H$  : Hauteur de chute en mètres.

$r$ : Rendement de la centrale (compris entre 0,6 et 0,9).

## Nomenclature

---

Cr-Ni-Va: Eléments chimiques chrome<sup>24</sup> –nickel<sup>28</sup> – vandadium<sup>23</sup>.

$P_{hyd}$ : Puissance hydraulique.

$q$  : Débit d'eau.

$h$  : Pression d'eau.

$T_w$  : Temps de lancer de la conduite.

$P_m$ : Puissance mécanique de la turbine hydraulique.

$\beta$  : Constante de la turbine hydraulique.

$g_{min}$ ,  $g_{max}$  : Coefficient de vannage.

$V_{gmin}$ ,  $V_{gmax}$  : Vitesse de l'ouverture de la vanne.

$V_1$ ,  $V_2$  : Tension primaire et tension secondaire de transformateur.

$R_1$ ,  $L_1$  : Résistance et l'inductance de primaire du transformateur.

$R_2$ ,  $L_2$  : Résistance et l'inductance de secondaire du transformateur.

$R_r$ ,  $L_r$  : Résistance et l'inductance de réseau électrique.

$V_r$  : Tension de réseau électrique.

$RP$  : Coefficient de pondération de l'erreur d'entre la puissance active et sa référence.

$P_{ref}$  : Puissance active de référence.

$W_{ref}$  : Vitesse rotorique de référence.

## Abréviation

MCC : Machine à Courant Continu.

MSRB : Machine Synchrone à Rotor Bobiné.

MSAP : Machine Synchrone à Aimant Permanent.

PI : Proportionnel Intégral.

## Introduction Générale

La génération d'électricité, la plupart du temps, est assurée par un générateur synchrone entraîné en rotation par une turbine ou dans quelques cas rares par un moteur Diesel stationnaire. Une turbine est un dispositif rotatif (turbomachine) destiné à utiliser la force d'un fluide (eau, vapeur, air, gaz de combustion), dont le couple est transmis au moyen d'un arbre. L'énergie du fluide, caractérisée par son débit et son enthalpie, est partiellement convertie en énergie mécanique pour entraîner un alternateur (ou tout autre récepteur mécanique rotatif) [1].

La production de l'énergie électrique à travers les énergies hydrauliques est basée sur la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie mécanique par l'intermédiaire d'une turbine hydraulique couplée à un générateur synchrone qui produit l'électricité.

Les alternateurs triphasés sont la source primaire d'une grande partie d'énergie électrique que nous consommons. Ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique avec des grandes puissances [2].

La commande des machines à courant alternatif est aujourd'hui une réalité industrielle. Depuis les années 1980, de nombreux laboratoires de recherche se sont penchés sur ce thème.

Le problème des commandes de puissance est très important dans toutes les applications nécessitant la transformation d'une énergie mécanique en énergie électrique, ou bien dans les domaines de la production de l'énergie électrique [2].

Bien que la plus ancienne des machines électriques industrielles, la machine à courant Continu reste très utilisée et particulièrement comme actionneur. Ceci tient au fait que son fonctionnement est d'une grande simplicité, de même que sa modélisation, mais surtout ses performances statiques et dynamiques sont exceptionnelles [3].

Cependant, la fragilité du système balai collecteur a toujours été un inconvénient de la M.C.C, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et présente des difficultés de maintenance et des interruptions. C'est pour cette raison qu'on a eu intérêt à utiliser des machines électriques à courant alternatif soit synchrone ou asynchrone afin d'écartier cet inconvénient [3].

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. L'obtention d'un tel fonctionnement nécessite que le champ magnétique rotorique soit généré par des aimants ou par un circuit d'excitation. Un alternateur est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie mécanique [4].

La commande de puissance produit ou bien générée par une machine synchrone à rotor bobiné il dépende des plusieurs paramètres, elle a une relation avec la charge au ce machine est connectée lorsque l'alternateur est branchée sur un réseau leur puissance injecté est dépende à l'appelé de puissance de ce réseau donc pour faire la commande de la puissance active d'une machine synchrone à rotor bobiné (alternateur) il faut connaître bien les caractéristiques de système (turbine + générateur) et l'appelé de puissance nécessaire pour garder la stabilité de réseau et pour protéger notre machine.

La production de l'énergie électrique doit être égale à tout instant à la consommation. C'est pour cela que la turbine doit avoir des organes et des mécanismes qui lui permettent de faire varier sa puissance suivant la consommation c'est-à-dire que la turbine doit avoir un mécanisme de commande. Cet équilibre doit être réalisé à tout instant car les écarts ont des répercussions sur la valeur de la fréquence et de la puissance.

Le sujet de ce mémoire concerne, en particulier, la commande de puissance active injectée dans le réseau électrique par un générateur synchrone à rotor bobiné entraîné par un système hydraulique. Ce mémoire est organisé en trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous allons présenter globalement les différents systèmes mécaniques entraînant un générateur synchrone, ainsi que quelques généralités sur les machines synchrones.

Le second chapitre sera consacré à la modélisation des différentes parties de l'association turbine hydraulique-générateur synchrone à rotor bobiné couplé au réseau.

Le troisième chapitre sera consacré à la commande de puissance active injectée dans le réseau électrique, par l'hydro-générateur synchrone ainsi que la régulation de sa vitesse.

# Chapitre I :

## Généralités sur l'association système d'entraînement mécanique-générateur synchrone

### I.1.Introduction

Hormis les centrales photovoltaïques, la génération d'électricité, la plupart du temps, est assurée par un alternateur entraîné en rotation par une turbine ou dans quelques cas rares par un moteur Diesel stationnaire. Ces alternateurs produisent l'électricité en moyenne tension (5 à 20 Kv) cette tension il va le augmenté jusqu' (220 et 400 kV) à travers les transformateurs élévateurs pour transporté le maximum de l'énergie électrique aux différents clients [1].

Suivant le type et la taille de la centrale électrique, plusieurs variantes de turbines sont possibles : turbine à vapeur, turbine à gaz, turbine hydraulique, turbine éolienne ...etc.

Une turbine est un dispositif rotatif (turbomachine) destiné à utiliser la force d'un fluide (eau, vapeur, air, gaz de combustion), dont le couple est transmis au moyen d'un arbre. L'énergie du fluide, caractérisée par son débit et son enthalpie, est partiellement convertie en énergie mécanique pour entraîner un alternateur (ou tout autre récepteur mécanique rotatif) [1].

Dans ce chapitre, on doit fait une description générale sur l'association système d'entraîneur mécanique-générateur synchrone.

### I.2. Différents types des systèmes d'entraînement mécanique

#### I.2.1.Turbines

Ils existent différents fluides utilisés dans la conversion d'énergie cinétique du fluide en énergie mécanique. Cette diversité a entraîné l'apparition de différentes turbines assurant cette conversion d'énergie. Les différents types des turbines existant dans une centrale électrique et leurs fluides correspondant sont classés dans le tableau suivant :

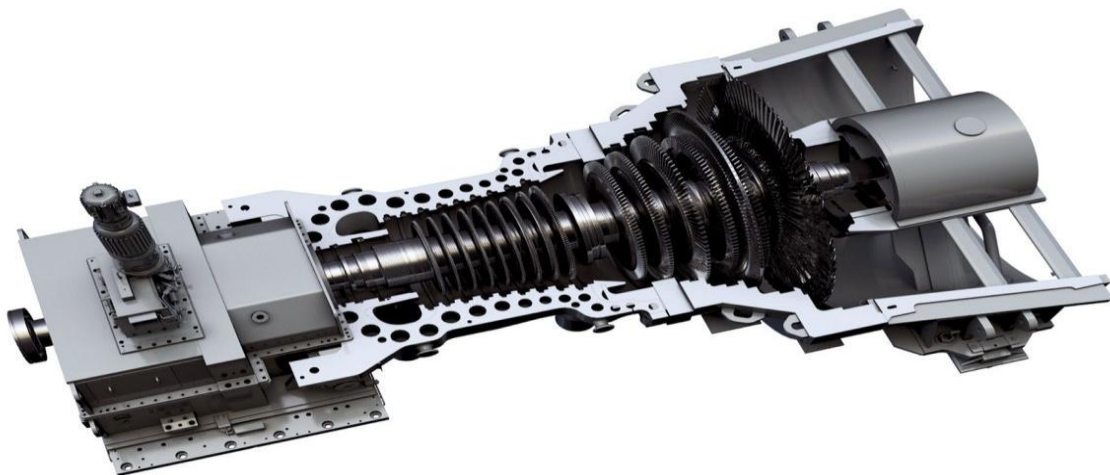
<b>Fluide</b>	<b>Type de turbine</b>	<b>Type de centrale</b>
<b>Vapeur</b>	Turbine à vapeur	Centrale thermique
<b>Eau</b>	Turbine hydraulique	Centrale hydraulique
<b>Gaz</b>	Turbine à gaz	Centrale thermique
<b>Air</b>	Eolienne	Centrale éolienne

**Tableau I(1) : Classification des différentes turbines**

### I.2.1.1. Turbine à vapeur

La turbine à vapeur est un moteur thermique à combustion externe, fonctionnant selon le cycle thermodynamique dit de Clausius-Rankine. Ce cycle se distingue par le changement d'état affectant le fluide moteur qui est en général de la vapeur d'eau. En fait, la vapeur d'eau surchauffée se détend dans la turbine en fournissant de l'énergie mécanique avant d'être détendue et condensée au contact de la source froide sous vide partiel. Dans la turbine à vapeur, la vapeur peut agir par son énergie cinétique (turbine à action) ou par détente dans les aubes du rotor (turbine à réaction). Parmi les turbines à vapeur à action, on distingue la turbine de Laval, dans laquelle la vapeur se détend avant de venir en contact avec les aubes, la turbine Curtis, à plusieurs étages de pression et à détentes multiples, et la turbine Râteau, multicellulaire, dont les aubes sont fixées à la périphérie des disques calés sur l'arbre. La turbine Parsons est une turbine à réaction comportant plusieurs étages de pression; elle comprend une succession de couronnes fixes munies d'aubages directeurs alternant avec des couronnes mobiles à aubes [5] [6].

La figure I(1) représente une turbine à vapeur avec ses éléments principaux.



**Figure I(1) : Turbine à vapeur [6]**

Les turbines à vapeur ce sont des turbines puissantes mieux adapté en dessous de 10MW  
Mais il ya des inconvénients : [7]

- 1-Usinage très complexe des aubes Réalisation contraignantes (acier fortement allié Cr-Ni-Va, aubes de longueur limitée, contraintes chimiques, mécaniques et thermiques).
- 2-Coût très élevé malgré les économies d'échelles.
- 3-Complexité des installations.
- 4-Important débit d'eau de refroidissement.
- 5-Possibilité de consommation des énergies fossiles.

### I.2.1.2. Turbine à gaz

Les applications pratiques des turbines à gaz se sont produites la première fois de 1939 à 1941 .en 1939, la société suisse Brown Boveri a utilisé une turbine à gaz pour la production de l'électricité, et aussi en 1939 le premier vol d'un avion actionnée par une turbine à gaz [8].

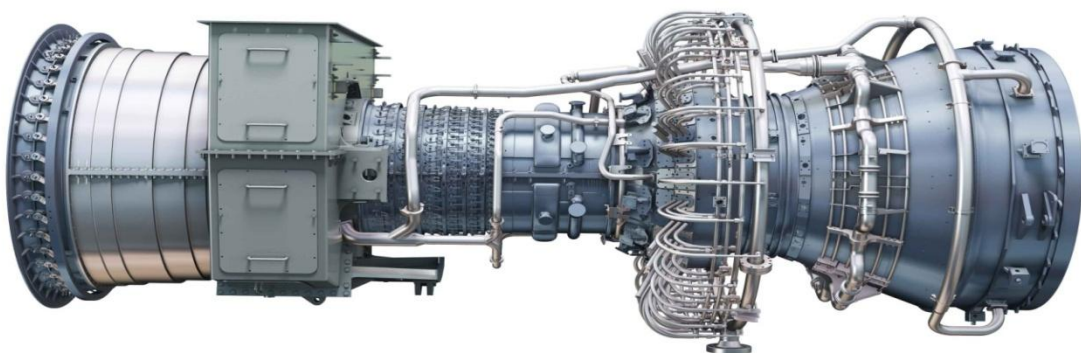
Les turbines à gaz font partie des turbomachines définies par râteau comme étant des appareils dans les quels a lieu un échange d'énergie entre un rotor tournant autour d'un axe à vitesse constante et fluide en écoulement permanent. Une turbine à gaz, appelée aussi turbines à combustion, est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure (fuel, gaz) [9].

La turbine à gaz est un moteur thermique réalisant les différentes phases de son cycle thermodynamique dans une succession d'organes traversé par un fluide moteur gazeux en écoulement continu [8].

Dans sa forme la plus simple, la turbine à gaz fonctionne selon le cycle dit de « Joule » comprenant successivement [9] :

- une compression adiabatique qui consomme de l'énergie mécanique.
- un chauffage (combustion) isobare comme pour un moteur diesel.
- une détente adiabatique jusqu' à la pression ambiante qui produite de l'énergie mécanique.
- un refroidissement isobare.

La figure suivante représente une turbine à gaz avec ses différents composants.



**Figure I(2) : Turbine à gaz [10]**

Une centrale à turbine à gaz est constituée de [10] :

1-Moteur de lancement : Pour démarrer (lancement) le système (turbine à gaz), on utilise un moteur de lancement qui joue le rôle d'un démarreur.

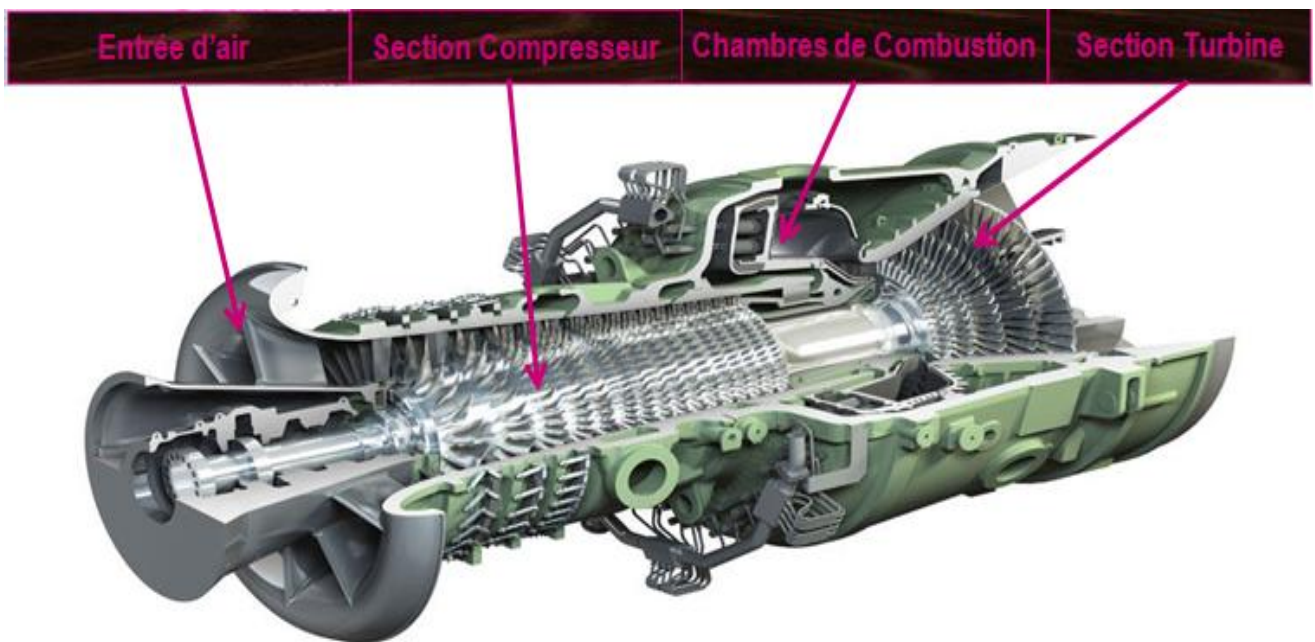
2-Entrée d'air : Elle comporte deux systèmes, Un système de filtrage d'air et un système d'un éventuel refroidissement d'air à l'entrée sans descendre au-dessous d'une température de 5 à 7 °C.

3-Compresseur : Le compresseur, à flux axial multi-étages, est constitué d'un ensemble d'ailettes fixes (stator) et mobiles (rotor), comprime l'air extérieur, simplement filtré, jusqu'à 10 à 15 bars, voire 30 bars pour certains modèles.

4-Chambre de combustion : Le système de combustion comporte plusieurs chambres. Le combustible (gazeux), est injecté dans les chambres de combustion où il se mélange avec l'air comprimé pour entretenir une combustion continue.

5-La turbine : Une turbine à gaz comprime l'air et le mélange avec du fuel. Le fuel est brûlé, les gaz chauds se détendent en traversant la turbine, où l'énergie thermique et cinétique des gaz chauds est transformée par la turbine en énergie mécanique qui sera convertie par l'alternateur en électricité.

La figure I(3) est une représentation des principaux composants d'une turbine à gaz.



**Figure I(3) : Différents composants d'une turbine à gaz [10]**

### I.2.1.3. Turbine hydraulique

En 2011, l'hydroélectricité représente environ 16,2 % de la production mondiale d'électricité et possède de nombreux atouts. C'est une énergie renouvelable, d'un faible coût d'exploitation et qui est responsable d'une faible émission de gaz à effet de serre [11].

L'énergie hydroélectrique, ou hydroélectricité, est une énergie électrique renouvelable obtenue par conversion de l'énergie hydraulique. L'énergie électrique est produite par la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une turbine hydraulique couplée à un générateur électrique. Pour les barrages par accumulation la quantité d'énergie disponible, sur une période donnée, dans la réserve d'eau d'un barrage dépend de son volume, des apports et pertes naturels sur la période et de la hauteur de chute. L'eau agit par son poids et sa vitesse sur toute la surface du rotor. Dans les turbines hydrauliques à action, les pressions d'entrée et de sortie sont les mêmes, dans les turbines à réaction, la pression de sortie est inférieure à la pression d'entrée [12].

Il existe trois principaux types des turbines. Le choix du type de turbine le plus adapté est fait par le calcul de la vitesse spécifique.

1-La turbine Pelton, adaptée aux hautes chutes, avec une roue à augets, inventée par Lester Allan Peltonen 1879. Elle est conçue pour les hauteurs de chute de plus de 200 mètres [11].



**Figure I(4) : Turbine Pelton**

2-La turbine Francis, plutôt montée pour des chutes moyennes, voire hautes, avec une roue à aubes simple ou double. Conçue par James B. Francis en 1868 [11].



**Figure I(5) : Turbine Francis**

3- La turbine Kaplan, inventée en 1912, parfaitement adaptée aux basses chutes et forts débits, avec une roue de type hélice, comme celle d'un bateau. Viktor Kaplan a mis au point une roue à hélice dont les pales peuvent s'orienter en fonction des débits utilisables [11].



**Figure I(6) : Turbine Kaplan**

La puissance d'une centrale hydraulique peut se calculer par la formule suivant [11]

$$P_e = Q.H.g.r$$

Avec :

$P_e$  : puissance en kW

$Q$  : débit moyen mesuré en mètres cube par seconde

$H$  : hauteur de chute en mètres

$g$  : constante de gravité, soit près de 9,8 (m/s<sup>2</sup>)

$r$  : rendement de la centrale hydraulique (compris entre 0,6 et 0,9)

#### **I.2.1.4. Turbine Eolienne**

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [13].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer[13].

La turbine éolienne se compose principalement de six éléments comme présenté dans la figure I(7) [14] :

1- La tour :

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol.

2- Le rotor :

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3. Le rotor est fixé à l'arbre principal par des boulons. Le grand rotor est constitué de trois pales qui captent le vent.

3- La nacelle :

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique. Il comporte (arbre principale, moyeu, multiplicateur)

4- Génératrice :

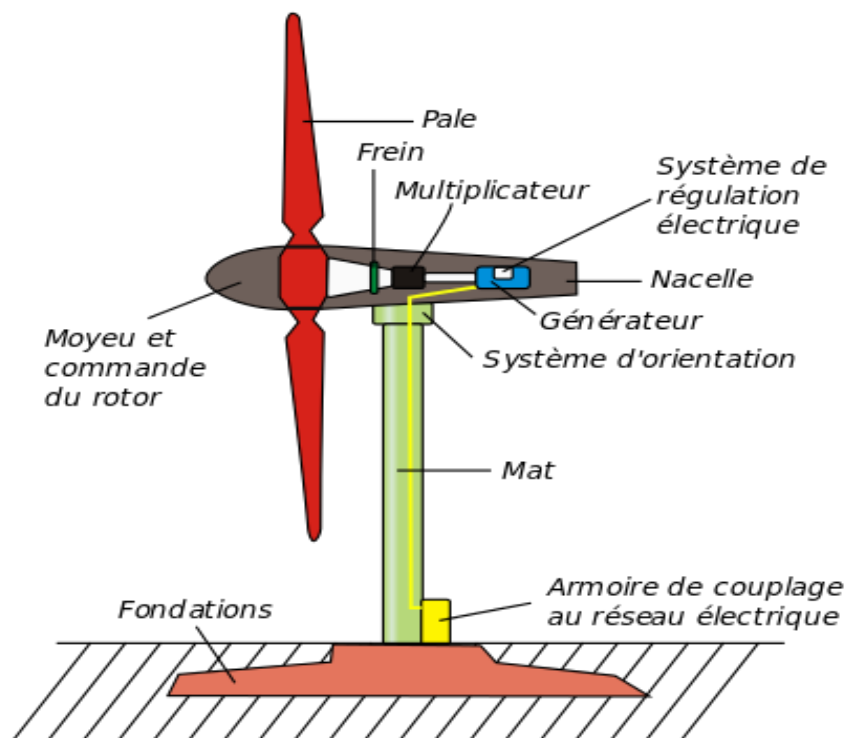
La génératrice produit de l'électricité en tournant. Le courant est conduit à travers la tour par des câbles électriques.

5- Frein mécanique :

On utilise le frein mécanique quand l'éolienne doit être réparée ou maintenue. Ainsi on assure que le rotor ne se met pas brusquement à tourner.

6- Anémomètre ou girouette:

L'anémomètre mesure la vitesse du vent. Il informe continuellement le système de commande de la vitesse du vent.



**Figure I(7) : Composants d'une éolienne**

## I.2.2. Moteur diesel

La production de l'énergie électrique fait partie d'une multitude de solutions parmi eux le générateur diesel (centrale diesel généralement de grande puissance) ou bien le groupe électrogène de faible puissance. Ces derniers sont constitués généralement d'un moteur diesel et d'une machine synchrone. La taille et le poids du système peuvent varier de quelques kilogrammes (groupe électrogène) à plusieurs dizaines de tonnes (centrale diesel) (figure I(8)) [15].

Le groupe diesel traditionnel est composé d'un moteur diesel tournant à vitesse fixe accouplé à un alternateur synchrone produisant de l'énergie électrique selon le besoin.

Un autre type de groupes électrogènes fonctionnant à vitesse variable sont basés sur l'association d'un alternateur fonctionnant à vitesse et puissance variables entraîné par un moteur diesel et un convertisseur [16].



Figure I(8) : Groupe diesel [15]

## I.3. Généralité Sur les Machines Synchrones

### I.3.1. Introduction

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs Pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales où trapézoïdales [2].

Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone. Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants [3].

Comme toutes les machines électriques tournantes, la machine synchrone est réversible et peut également fonctionner en générateur et comme moteur.

### I.3.2. Moteur synchrone

Les machines synchrones peuvent fonctionner comme générateur ou comme moteur. Lorsqu'on l'utilise comme moteur, on alimente le stator sous une tension alternative pour crée un champ statorique tournant, entrainant le rotor à tourner en synchronisme avec le champ tournant du stator d'où vient le nom moteur synchrone. Cette vitesse est donc liée à la fréquence de la tension d'alimentation du stator en dépit de la charge mécanique entraînée.

La plupart des moteurs synchrones ont une puissance comprise entre 150 kW (200 HP) et 15 MW (20 000 HP) et leur vitesse synchrone est habituellement comprise entre 180 et 450 tr/min. Ils sont donc surtout utilisés dans l'industrie lourde [2] [19].



**Figure I (9) : Moteur synchrone [19]**

### I.3.3. Générateur synchrone

Un générateur électrique est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie en passant par l'énergie mécanique [17].

Ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW [2]. Elles sont utilisées dans différentes centrales de production d'énergie électrique (hydraulique, thermique, nucléaire .....), groupes électrogènes automobile, la marine,...etc. [27]

#### I.3.3.1. Construction d'un générateur synchrone

La composition de l'alternateur est par une partie fixe qui s'appelle stator et une partie tournante s'appelle rotor.

- Stator (est appelé aussi induit) : il est constitué par des enroulements qui constituent le siège du courant électrique alternatif induit par le changement du flux de champs magnétique due au mouvement relatif l'inducteur par rapport à l'induit [17].

- Rotor (nommé aussi inducteur) : Il est généralement de deux types.

1-Rotor à aimant permanent ou le champ est constant dans ce cas la tension alternative fournie par la machine ne pas réglable.

2-Rotor bobiné ou bien électroaimant, où le bobinage rotorique est alimenté en courant continu par un collecteur à bague rotatif ou bien avec un système excitation à travers une excitatrice à diodes tournantes [17].

La figure I(10), représente les éléments principaux qui constituent un alternateur de grande puissance.

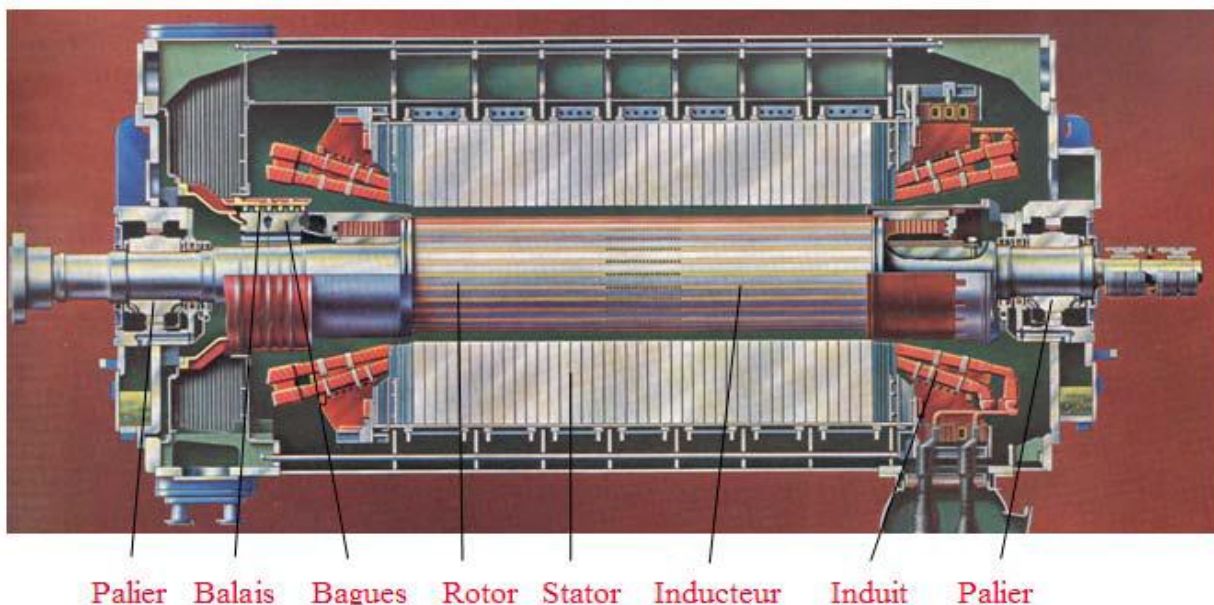


Figure I(10) : Constitution d'un générateur synchrone

### a. Stator

Le stator de l'alternateur est constitué par un ensemble fixe (statique) .c'est une partie active construit par l'enroulement stator et le circuit magnétique qui convertissant l'énergie mécanique du rotor en énergie électrique et permettant sa transmission vert l'extérieur [21].

L'enroulement est la partie principale de l'alternateur .sa construction est par un ensemble du conducteur immobilisés dans le circuit magnétique .il est le siège de la puissance électrique générée par l'alternateur et il doit évacuer cette énergie à l'extérieur .l'enroulement statorique est refroidi par un système de refroidissement indirect [19].

Le stator d'une machine synchrone est constitué de plusieurs bobines réparties dans les encoches statorique. Il existe une multitude de topologies utilisées pour le bobinage du stator dans les Machines électriques. Pour les alternateurs, deux catégories de bobinage sont couramment utilisées : le bobinage distribue et le bobinage concentrique [20].

Le bobinage concentrique est adapté pour des applications de grande puissance avec un nombre de phases et de pôles élevés. Le bobinage distribue est plutôt utilisé pour des applications où le nombre de pôles est réduit [22].

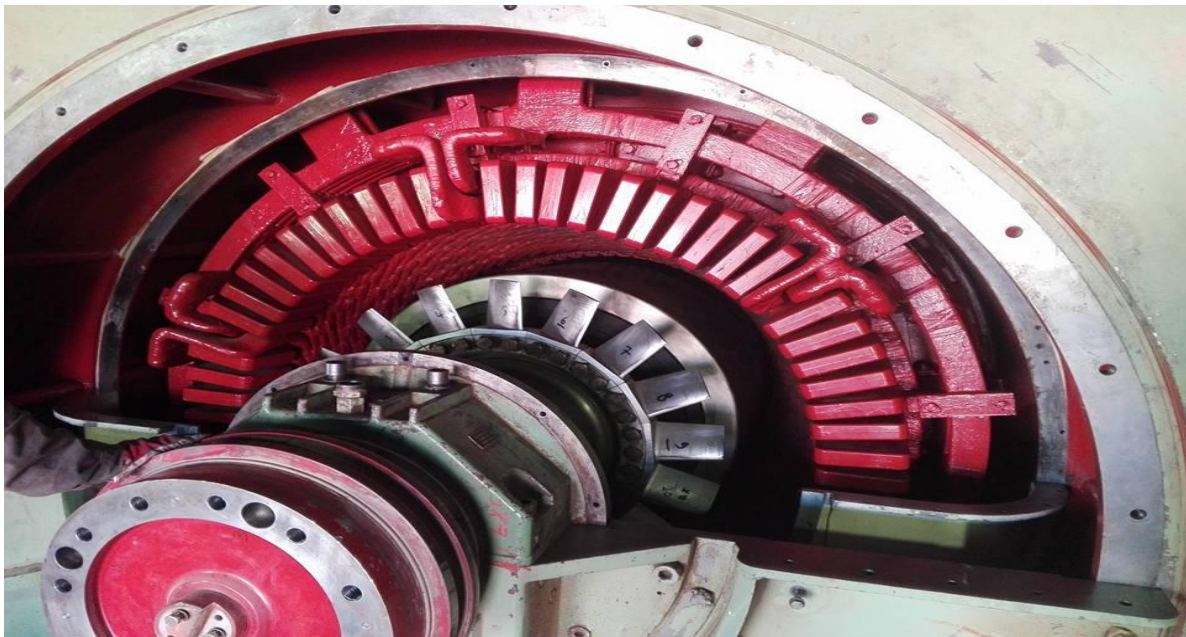


Figure I (11): Stator d'un alternateur [21]

La figure I(11) ci-dessus représente un stator pour un alternateur de groupe électrogène.

### b- Rotor

Appelle l'inducteur c'est la partie tournante de l'alternateur est le rotor qui entraîne par la turbine.

Le rotor porte deux paires de pôle successivement nord et sud, avec une alimentation de ces bobines inductrices est par un courant continu [19].

La division de l'enroulement inducteur est en plusieurs bobiné domiciliées dans des encoches longitudinales fraisées dans le fut du rotor .il compose deux ventilateurs axiaux, aussi relié à la turbine

par le plateau d'accouplement. Le rotor de l'alternateur tourne dans des coussinets montés sur des paliers [21].

Il existe des plusieurs types des rotors pour les générateurs synchrones (rotor à aimant permanent, ou bien rotor bobiné).

### **b.1. Rotor à aimant permanent**

Les machines synchrones à aimant permanent (MSAP) sont de plus en plus utilisées dans de nombreux domaines grâce à leur efficacité énergétique, leur simplicité de mise en œuvre et leur performance dynamique. La sûreté de fonctionnement de ce type d'actionneurs devient cependant un problème critique pour certaines applications industrielles car, à cause de la présence d'une excitation permanente des aimants au rotor, un défaut de court-circuit au stator de la machine est entretenu tant que la machine est en rotation. La détection de ce type de défaillance doit donc être réalisée au plus tôt avec un bon taux de confiance pour permettre une sécurisation rapide afin d'éviter la propagation de défaut aux autres composants du système [23].

Il existe plusieurs types de MSAP qui dépendent du placement des aimants permanents sur le rotor de la machine. En effet, la disposition des aimants a une influence directe sur la saillance de la machine [22].

Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [25].

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la GSAP est le coût des aimants utilisés. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix [24].

La figure I(12) et représente un rotor pour une machine synchrone à aiment permanent.



**Figure I(12) : Rotor à aiment permanent [20]**

## **b.2. Rotor bobiné**

Les rotors sont à pôles saillants ou à pôles lisses selon qu'ils sont entraînés à basse vitesse par des turbines hydrauliques ou à grande vitesse par des turbines à vapeur ou bien des turbines à gaz. Le rotor supporte un bobinage monophasé alimenté par un courant continu [24].

### **b.2.1. Rotor à pôles saillants**

Pour les machines à rotors à pôles saillants les bobines inductrices sont montées autour de noyaux polaires massifs ou feuilletés. Pour ces machines, le rotor est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine [3].

Cette technologie de construction du rotor est utilisée avec les alternateurs synchrones à faible vitesse périphérique de l'arbre mécanique (alternateurs hydroélectriques).

Une vitesse d'entraînement faible donc un nombre de paires de pôles élevé est nécessaire pour la création d'un système de courant triphasé à 50 Hz en régime permanent.

Le diamètre du rotor, proportionnelle à  $2p$ , augmente alors avec le nombre de paires de pôles pour atteindre 7 à 8 mètres lorsque ce dernier est de l'ordre de 40 à 60 pôles.

L'axe est relativement de petite longueur et le plus souvent vertical. Pour obtenir des puissances électriques assez élevées à vitesse basse on doit augmenter le couple électromagnétique donc l'induction magnétique créée dans l'entrefer par les enroulements inducteurs [25].



**Figure I(13) : Rotor à pôle saillant [25]**

La figure I(13) c'est un rotor à pôle saillant pour un alternateur d'un groupe électrogène de 1500tr/min. Si la technologie de construction du rotor est celle à pôles saillants à entrefer variable, des inconvénients se présentent :

-Les pôles sont relativement éloignés donc un volume d'air notable inter polaire augmente la résistivité de l'air et alors les pertes mécaniques.

-A vitesse très élevée, la vibration des particules d'air inter polaires est importante ce qui augmente le bruit acoustique [25].

### **b.2.2. Rotor à pole lisse**

Dans la machine synchrone à rotor à pole lisse le bobinage est dans ce cas logé dans des encoches pratiquées dans la masse du rotor est fermées par des clavettes en acier amagnétique. Les têtes de bobines inductrices sont maintenues en place par des frettes en acier amagnétique [3].

Les alternateurs synchrones à pôles lisses, entraînés par des turbines à gaz ou à vapeur, sont appelés "turboalternateurs", il s'agit d'une machine synchrone, de très grandes puissance, dont le rotor tourne avec une vitesse élevée qui peut dépasser 1000 tr/min. Une fréquence de rotation mécanique élevée ( $N$  : tr/min) implique un faible nombre de pair de pôles.

Une disposition appropriée permet d'obtenir des f.e.m sinusoïdales à très faible taux d'harmoniques [25].

La figure I(14) contient un rotor à pole lisse pour un turboalternateur.



**Figure I(14) : Rotor à pole lisse [27]**

### **b.3. Autres composants du rotor d'un générateur synchrone**

Le rotor de l'alternateur est divisé en plusieurs parties sont [18] :

#### **a- Arbre**

Il supporte le rotor et assure la transmission du couple mécanique du système d'entraînement mécanique au rotor.

#### **b- Enroulements du rotor**

Il est formé d'un empilage de spires domiciliées dans les encoches du rotor.

#### **c- Frettes**

Les frettes sont des cylindres en acier maintenant les têtes de bobines contre les effets de la force centrifuge et les plateaux porte frettes sont des anneaux montés avec serrage à l'extrémité de la frette.

#### **d- Connexions d'excitation**

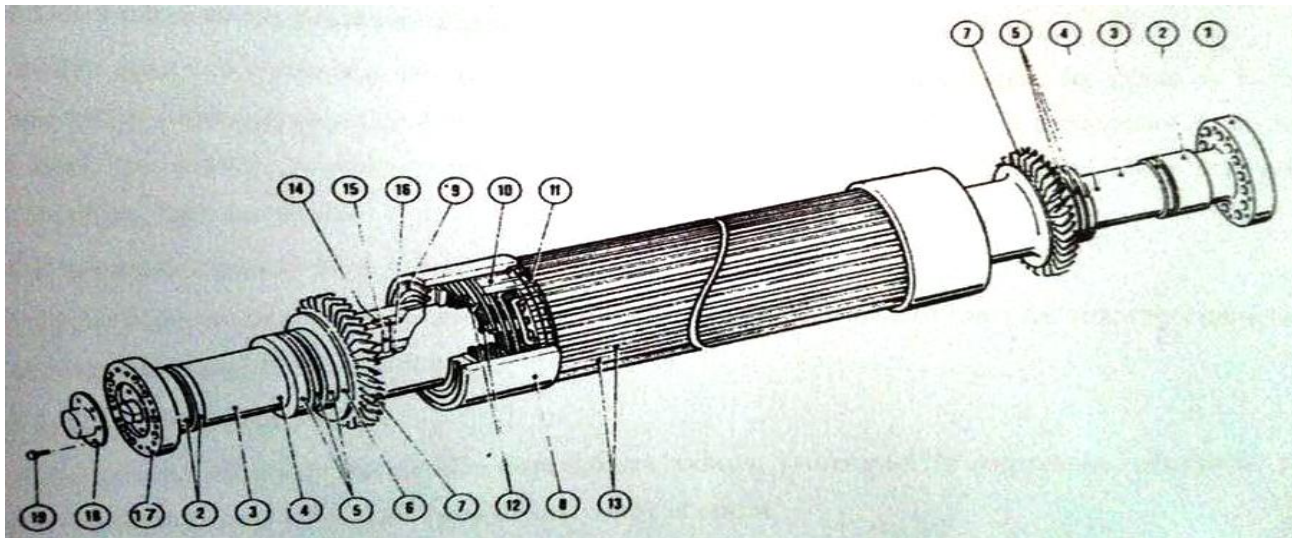
Le système d'excitation fournit un courant qui alimente l'enroulement rotor à l'aide des connexions reliées directement aux bobines rotor.

#### **e- Ventilateurs axiaux**

Sur chaque côté du rotor sont montés les ventilateurs axiaux, pour créer la surpression nécessaire pour

obtenir une circulation d'air traverse le circuit rotor et stator.

La figure suivante présente les différents éléments qui composent un rotor à pôles lisses.



- |                                       |                               |  |
|---------------------------------------|-------------------------------|--|
| 1-plateau d'accouplement coté turbine | 7-ventilateurs axiaux.        | 13-encoches longitudinales.                |
| 2-portée des couvercles extérieurs.   | 8- frettes.                   | 14-connexion extérieure.                   |
| 3-fusées.                             | 9-plateau porte frette.       | 15-tiges de connexion radiale.             |
| 4-sans objet.                         | 10-amortisseur.               | 16-connexion centrale.                     |
| 5-portée des couvercles intérieurs.   | 11-verrou de frettes.         | 17-plateau d'accouplement coté excitation. |
| 6-plateau porte ventilateurs.         | 12-Calage des têtes de bobine | 18-couvercle de protection.                |

**Figure I(15) : Principaux composants d'un rotor à pôle lisses [27]**

### I.3.3.2. Principe de fonctionnement d'un générateur synchrone

Les alternateurs commerciaux sont construits avec un inducteur fixe ou un inducteur rotatif. L'inducteur est composé de deux ou de plusieurs pôles produisant un champ magnétique constant.

Un alternateur à inducteur fixe a la même apparence extérieure qu'une génératrice à courant continu. Les pôles saillants produisent le champ magnétique qui est coupé par les conducteurs situés sur l'induit. L'induit porte un enroulement triphasé dont les bornes sont connectées à trois bagues montées sur l'arbre [2].

Un alternateur à inducteur tournant possède un induit fixe, appelé stator. Cette construction est plus avantageuse car elle permet d'alimenter directement le circuit d'utilisation sans passer par les bagues de fortes dimensions qui seraient requises avec un induit tournant. De plus, l'isolement des bobinages du stator est grandement simplifié du fait qu'ils ne sont soumis à aucune force centrifuge.

Une génératrice à courant continu, appelée excitatrice, Habituellement montée sur le même arbre que l'alternateur, fournit le courant d'excitation aux électroaimants inducteurs [21].

## a. Nombres de pole

Le nombre de pôles d'un alternateur est imposé par la vitesse du rotor et par la fréquence du courant à produire. Ainsi, considérons un conducteur de l'induit devant lequel se déplacent les pôles nord et les pôles sud du rotor.

Si la tension induite dans ce conducteur prend une série de valeurs positives pendant le passage d'un pôle nord, elle prendra une série de valeurs égales, mais négatives, pendant le passage d'un pôle sud. Chaque fois qu'une paire de pôles se déplace devant un conducteur, la tension induite décrit donc un cycle complet. On en déduit que la fréquence est donnée par l'équation [2] :

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \quad (\text{I.1})$$

f : Fréquence de la tension induit. En [Hz]

p : Nombre de pole du rotor.

n : Vitesse de rotation de rotor. En [tr/min]

## b.1 Force électromotrice

Une génératrice synchrone transforme de l'énergie mécanique ( $C, \Omega$ ) en énergie électrique ( $V, I$  avec la fréquence  $f$ ).

Un rotor tourne à la fréquence  $n_s$  la spire est traversée par un flux variable  $\Phi(t)$  d'où la création d'une f.é.m. induite [21]:

$$e(t) = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{I.2})$$

Pour expliquer le phénomène on a deux conducteur d'une même spire occupent à la même instant la même position par rapport à deux pôles consécutifs, compte tenu du couplage, les deux f.é.m.

S'additionnent arithmétiquement.

Si les différentes spires sont superposées, donc tous les conducteur d'un même pole sont dans la même encoche, la valeur efficace de la f.é.m. totale est la somme arithmétique des valeurs efficace, soit  $N$  le nombre totale de conducteur, il ya  $N/2$  spires [26] :

Ou :

$$E = 4.44 f \Phi \frac{N}{2} \quad (\text{I.3})$$

Alors :

$$E = 2.22 f \Phi N \quad (\text{I.4})$$

$N$  : Nombre total de conducteur.

$\Phi$  : Flux total sous un pole.

Il peut remplacer  $f$  par  $(p \cdot n)$  pour trouver  $m$  :

$$E = 2.22 p n N \Phi \quad (\text{I.5})$$

$P$  : Nombre de paires de pôles.

$n$  : Vitesse de rotation en tr/min.

## b.2. Force électromotrice réelle

L'expression suivante montre la force électromotrice réelle [26] :

$$E = 2.22 K_d K_f f N \phi \quad (I.6)$$

Ou :

$K_d$  : Facteur de distribution.

$K_f$  : Facteur de forme.

Le produit ( $k = 2.22 K_d K_f$ ) est nommé coefficient de  $K_{app}$ . Il doit être évalué pour chaque alternateur. Notons cependant que pour un alternateur triphasé,  $K_d < 1$  et  $K_f > 1$  ont un produit voisin de l'unité. La f.é.m. réelle ne diffère de la théorique que de quelques pour cent. Finalement, on exprime la f.é.m. réelle par la relation suivant :

$$E = K f N \phi \quad (I.7)$$

### I.3.3.3. Système d'excitation du générateur synchrone

L'excitation d'un alternateur constitue un de ses éléments les plus importants .En générale l'excitation des alternateurs est effectué par une génératrice à courant continu entrainé par l'arbre ou par le réducteur de vitesse pour les puissances élevé (jusqu'à 250 MW) [27].

Afin d'obtenir une réponse rapide, on utilise deux excitatrices : une excitatrice principale et une excitatrice pilote. L'excitatrice principale fournit le courant d'excitation de l'inducteur, habituellement par l'intermédiaire de balais et de bagues. En régime normal, la tension générée est comprise entre 125 V et 600 V. On peut la régler manuellement ou automatiquement en faisant varier l'intensité du champ inducteur, c'est-à-dire en agissant sur le courant d'excitation, provenant de l'excitatrice pilote. La puissance nominale de l'excitatrice principale dépend surtout de la capacité et de la vitesse de l'alternateur qu'elle alimente [2].

Le système d'excitation ou excitatrice est en fait un alternateur inversé où le circuit d'excitation est placé sur le stator. Le rotor comporte un système d'enroulement triphasé dont les courants sont redressés afin d'alimenter l'inducteur de l'alternateur [21]. La figure I(16) présente une excitatrice à courant continu portée sur le même arbre principal.



Figure I(16) : Excitatrice [21]

En régime normal, l'excitation est commandée automatiquement suivant les fluctuations de la charge pour garder la tension constante ou, encore, pour changer la puissance réactive débitée par l'alternateur.

Une perturbation grave sur un réseau peut occasionner une baisse subite de la tension aux bornes de l'alternateur. L'excitatrice doit alors répondre très rapidement pour soutenir la tension. Par exemple, la tension d'excitation peut doubler par rapport à sa valeur nominale en 300 ou 400 ms, ce qui représente une réaction extrêmement rapide, si l'on considère que la puissance des excitatrices est de quelques milliers de kilowatts.

Le déclenchement de la machine initialement en charge produit une surtension, dans la limite non dangereuse, le système d'excitation doit alors désexciter de manière à maintenir la surtension aux bornes de la machine [18].

La figure I(17) présente le schéma du système d'excitation dans un alternateur de production de l'énergie électrique.

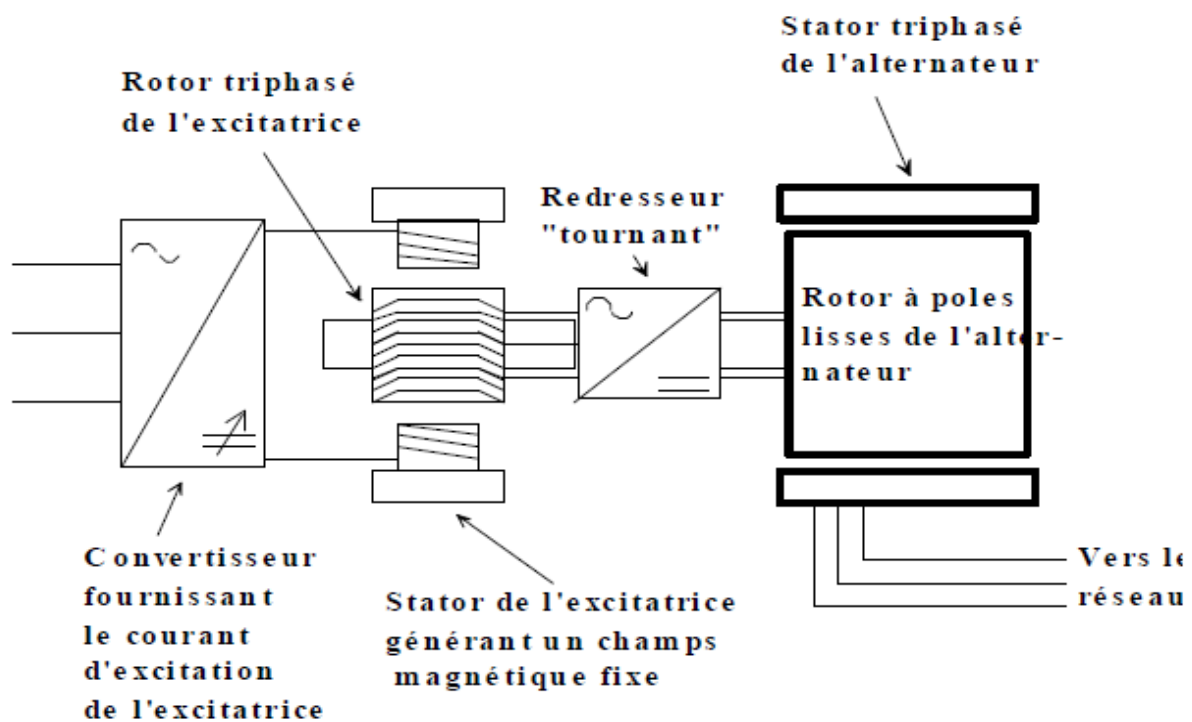


Figure I(17) : Système d'excitation d'une machine synchrone [26]

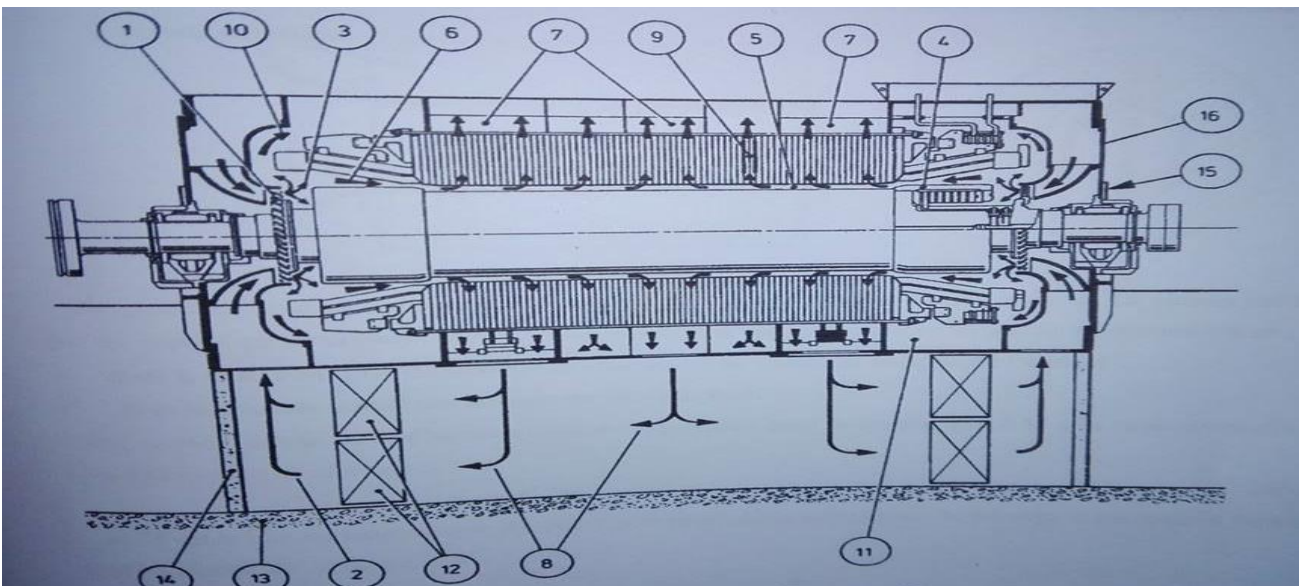
### I.3.4. Refroidissement des machines synchrones de grande puissance

Même si le rendement des alternateurs est excellent (proche de 99% pour un alternateur 1000MW) les puissances dissipées sous forme pertes joules sont énormes (proche de 1MW pour un alternateur 1000MW) et ceci dans un volume restreint. Il est donc nécessaire de mettre en place des systèmes d'évacuation des calories basés sur l'utilisation de fluides caloporteurs circulants dans le stator, dans le rotor ainsi que dans les conducteurs statorique [3].

Les pertes joule du rotor et du stator, ainsi que les pertes fer sont quittées par la circulation d'air à l'intérieur de l'alternateur. la mise en circulation de l'air est faite par les ventilateurs axiaux, trois circuits principaux en parallèle sont alimentés par le débit de chaque ventilateur :

- 1-le circuit rotor, entrant sous la frette et sortant dans l'entrefer.
- 2-le circuit noyau magnétique composée par l'entrefer, les canaux radiaux du noyau magnétique et le compartiment retour.
- 3-le circuit tété de bobine, formé par les têtes des bobines, les compartiments intermédiaires de la carcasse et les compartiments retour [27].

En présente les différents élément qui formé le circuit de refroidissement d'un alternateur dans la figure I(18)



- |   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| 1-ventilateurs axiaux.                      | 9-canaux radiaux.                 |
| 2-entrée d'air.                             | 10-circuit de ventilation.        |
| 3-circuit de ventilation (rotor).           | 11- compartiments intermédiaires. |
| 4-frette.                                   | 12- réfrigérants.                 |
| 5-entrefer.                                 | 13- massif.                       |
| 6-circuit de ventilation (noyau magnétique) | 14- cloisons de fermeture.        |
| 7-compartiments retour.                     | 15- filtres.                      |
| 8-sortie de la carcasse.                    | 16- demi flasque palier supérieur |

**Figure I(18) : Circuit de refroidissement de l'alternateur [27]**

### I.3.5. Couplage des alternateurs sur le réseau

Pour brancher un alternateur sur le réseau ou le coupler avec un autre alternateur, il faut respecter les conditions suivantes [2] :

- 1-la tension de l'alternateur doit être égale à celle du réseau.
- 2-la fréquence de l'alternateur doit être la même que celle du réseau.
- 3- la tension de l'alternateur doit être en phase avec celle du réseau .

La procédure de synchronisation en agissant sur le régulateur de vitesse de la turbine, on amène tout d'abord l'alternateur à une vitesse voisine de la vitesse synchrone, afin que sa fréquence soit proche de celle du réseau. On règle ensuite l'excitation de façon que la tension induite soit égale à celle du réseau. On observe que les tensions ont même fréquence et même phase au moyen d'un synchronoscope [2].

Une fois couplé à un grand réseau (réseau infini), un alternateur fait partie d'un système comprenant des centaines d'autres alternateurs qui alimentent des milliers de charges. Il est alors impossible de préciser la nature de la charge (grosse ou petite, résistive, inductive ou capacitive) branchée aux bornes de cet alternateur en particulier.

La tension et la fréquence appliquées aux bornes de la machine étant constantes, on ne peut plus faire varier que deux paramètres [21] :

- 1- le courant d'excitation.
- 2- le couple mécanique exercé par le système d'entraînement mécanique du rotor.

La figure I(19) représente le couplage d'un alternateur sur le réseau électrique en utilisant la technique de synchronisation avec des lampes.

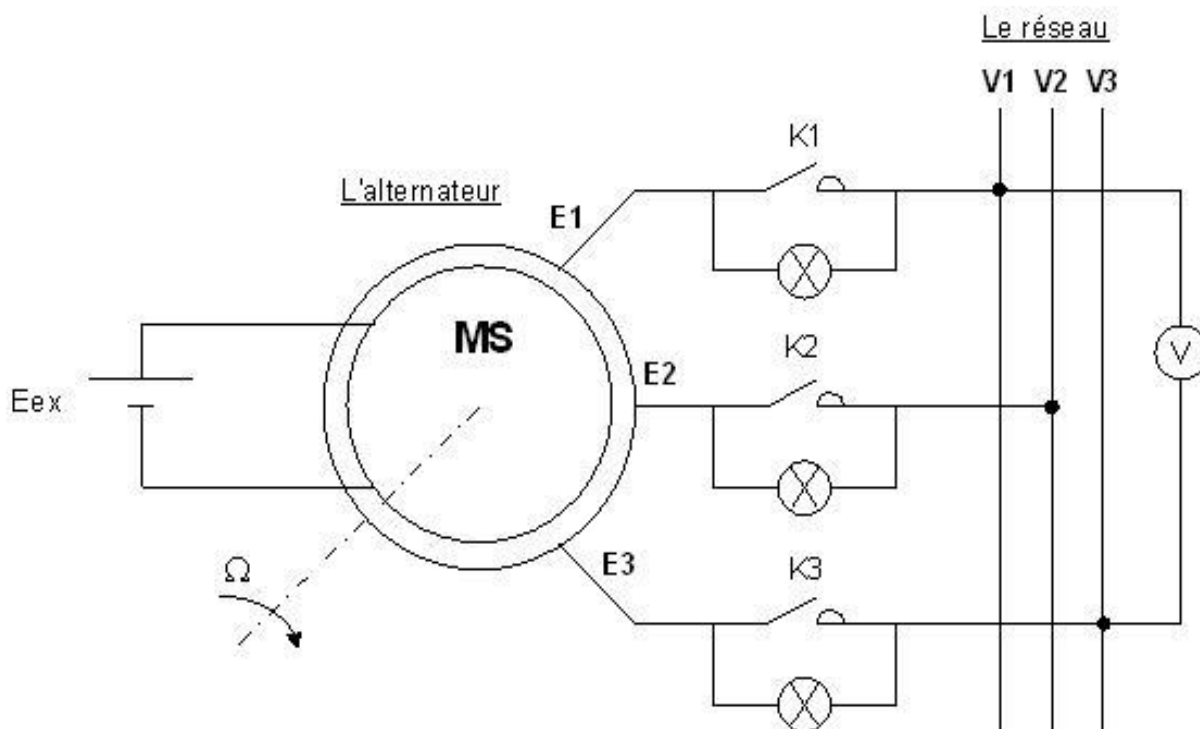


Figure I(19) : Couplage d'une machine synchrone sur un réseau [3]

### I.3.6. Bilan de puissance d'un alternateur

Les puissances aux différents niveaux de l'alternateur sont représentées sous forme de bilan de puissance comme le montre la figure I(20).

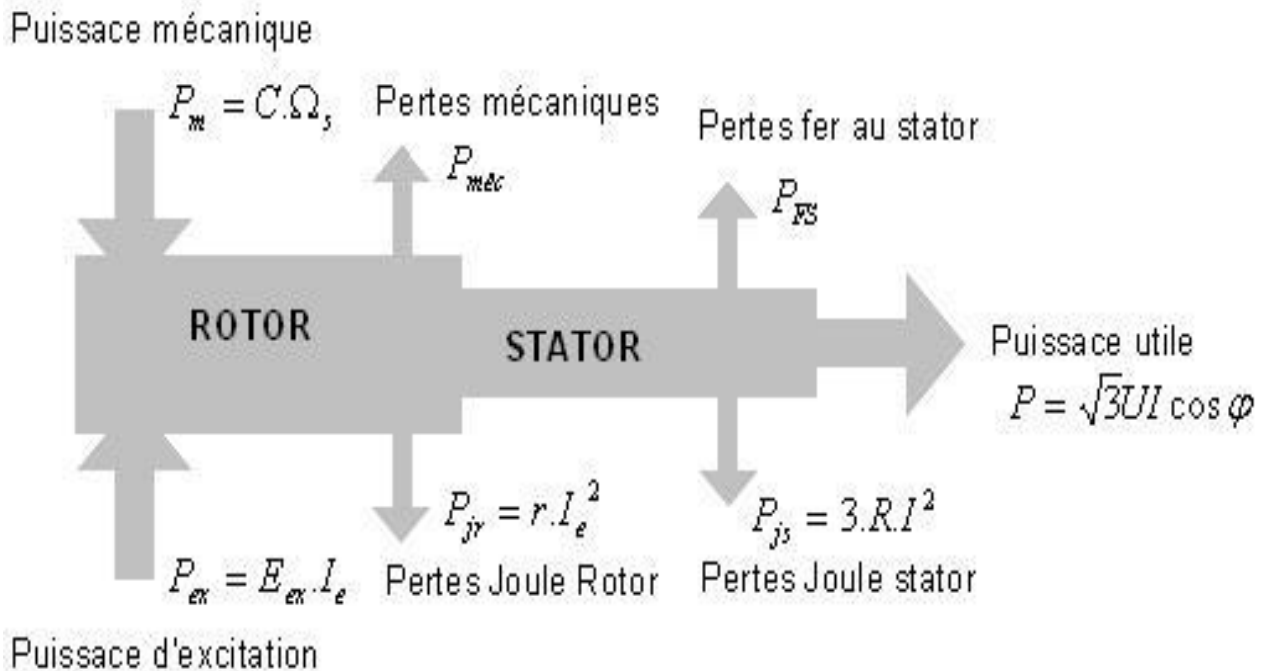


Figure I(20) : Bilan de puissance d'un générateur synchrone [21]

#### I.3.6.1. Puissance absorbée

La turbine quelle que soit leur type (à gaz, à vapeur, hydraulique ....) entraîne l'arbre le l'alternateur, c'est-à-dire cette turbine fournit une puissance mécanique à l'entrée de l'alternateur (puissance absorbée par l'alternateur) et on montre sa par la formule suivant [27] [21]:

$$P_a = C_m \Omega. \tag{I.8}$$

Ou :

$\Omega$  : Vitesse de rotation du champ tournant en rad/s.

$C_m$  : Couple utile sur l'arbre en N.m.

Dans notre travail l'alternateur n'est pas auto-excité, donc il faut prend en compte l'énergie électrique par le rotor à travers le système d'excitation.

$$P_a = C_m \Omega + E_{ex} I_{ex} \tag{I.9}$$

Avec :

$I_{ex}$  : Courant d'excitation.

$E_{ex}$  : Tension d'excitation.

### I.3.6.2. Puissance utile

Lors de fonctionnement à une vitesse constant l'alternateur produit une puissance utile électrique  $P_u$  qui dépend de la charge qui est connecté (influence du  $\cos\varphi$ ) [18].

$$P_u = \sqrt{3} UI \cos\varphi \quad (\text{I.10})$$

$$P_u = 3 VI \cos\varphi \quad (\text{I.11})$$

D'où :

U : tension composée.

V : tension simple.

### I.3.6.3. Bilan des pertes

#### a- Pertes de puissance mesurable

Les pertes de puissance mesurable sont décomposées en deux types [27] :

1- pertes par effet joules (en watts) dépendent de la charge et sont divisées comme suit :

- Pertes joule dans le stator :

$$P_{js} = \frac{3}{2} R I^2 \quad (\text{I.12})$$

Ou : R : Résistance entre deux borne de l'alternateur.

- Pertes joule dans le circuit inducteur (rotor).

$$P_{jr} = R_r I_{ex} \quad (\text{I.13})$$

$R_r$  : Résistance dans le circuit d'excitation

2- pertes constantes indépendantes de la charge :

- Les pertes fer dans les tôles de l'armature d'induit.
- Les pertes mécaniques  $P_m$  dans les paliers, bagues et ventilation.

Ces types des pertes on les détermine dans l'essai à vide.

#### b- Pertes supplémentaires

Ce sont les pertes dues à des phénomènes liés l'alternateur à savoir [27] :

- Concentration du courant vers l'extérieur du conducteur dans une encoche.
- Courant de Foucault induit dans un conducteur par le courant même qui le traverse.
- Supplément de pertes dans le fer du fait de la distorsion du flux en charge.
- Pertes par courant de Foucault dans les inducteurs des alternateurs monophasés.

## **I.4. Conclusion**

La génération d'électricité, la plupart du temps, est assurée par un alternateur entraîné en rotation par une turbine. Une turbine est un dispositif rotatif (turbomachine) destiné à utiliser la force d'un fluide (eau, vapeur, air, gaz de combustion). Un alternateur est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie mécanique.

Dans ce premier chapitre, nous avons fait une description générale sur l'association système d'entraîneur mécanique-générateur synchrone. En premier lieu, on a décrit les différents systèmes d'entraîneur mécanique (turbine, moteur diesel). La deuxième partie a été consacrée aux généralités sur les machines synchrones et spécialement en fonctionnement générateur. Ces généralités comprennent globalement la constitution des générateurs synchrones, leur fonctionnement, son excitation ainsi que son bilan de puissance.

Dans le chapitre suivant, on va modéliser les différentes parties de la chaîne de production hydro-électrique couplée au réseau électrique.

## Chapitre II :

# Modélisation de l'association turbine hydraulique-générateur synchrone couplé au réseau

### II.1.Introduction

L'étude d'un système est une tâche difficile et qui nécessite, avant tout, une bonne connaissance de son modèle dynamique afin de bien prédire son comportement, par voie de simulation. Dans ce sens et dans le cadre de ce mémoire, nous devons disposer de la modélisation mathématique des différents composants de l'association turbine-générateur [27]. Avant de passer à cette modélisation, on doit noter, nous avons adopté la turbine hydraulique comme un système mécanique d'entraînement du générateur synchrone.

Dans ce chapitre nous devons modéliser les différentes parties de la chaîne de production hydro-électrique, qui comporte (turbine hydraulique, générateur synchrone à rotor bobiné, transformateur, réseau électrique).

### II.2. Modélisation de la turbine hydraulique

Pour la modélisation de la turbine hydraulique, on a choisi le modèle non linéaire qui montre la relation entre les différentes grandeurs de sortie (la puissance mécanique ou bien le couple de la turbine) en fonction des paramètres d'entrée le débit d'eau, la pression et le coefficient de l'ouverture de la vanne.

L'eau, fournit un débit hydraulique  $q$  sur la turbine et en réaction reçoit une pression exercée par la turbine. Le produit de ces deux quantités est égal à la puissance hydraulique [28].

$$P_{hyd} = q.h \quad (II. 1)$$

Avec :

$q$  : Débit d'eau.

$h$  : Pression d'eau.

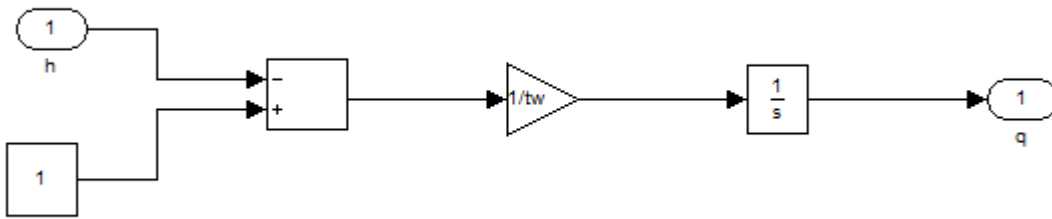
Le cas le plus simple d'une turbine est considéré avec une conduite et sans cheminée d'équilibre. L'eau est supposée se comporter en fluide incompressible. La dynamique du débit  $q$  dans la conduite, qui est d'une longueur  $L$  et d'une section  $A$ , est donnée par [28] :

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{T_w} (1 - h) \quad (II. 2)$$

Avec :

$T_w$  : Temps de lancer de la conduite.

Le modèle de débit de l'eau dans le Matlab simulink est donnée par :



**Figure II(1) : Modèle équivalent du débit d'eau**

La figure précédente représente le modèle permettant le calcul du débit d'eau en fonction de la pression.

La caractéristique de la vanne du contrôle du débit d'eau est donnée par [28] :

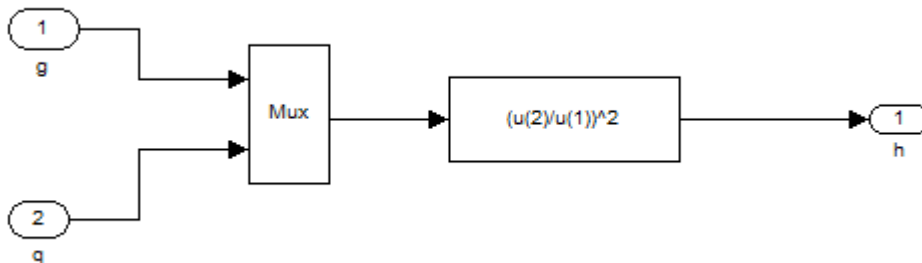
$$q = g\sqrt{h} \tag{II. 3}$$

g : Coefficient de l'ouverture de la vanne

L'expression de la pression h et donnée par :

$$h = \left(\frac{q}{g}\right)^2 \tag{II. 4}$$

Le modèle de la pression d'eau sous environnement Matlab/Simulink est présenté par :



**Figure II(2) : Modèle de calcul la pression d'eau sous environnement Matlab Simulink**

La turbine hydraulique et modélisée par sont puissance mécanique fournit en fonction de la

variation de débit d'eau et sa pression. L'équation non linéaire de la turbine est donnée par [28] :

$$P_m = q. (h - \beta) \tag{II. 5}$$

Avec :

$\beta$  : Constante de la turbine.

La figure II(3) représente le modèle final de la turbine hydraulique en fonction des entrées et des sortis.

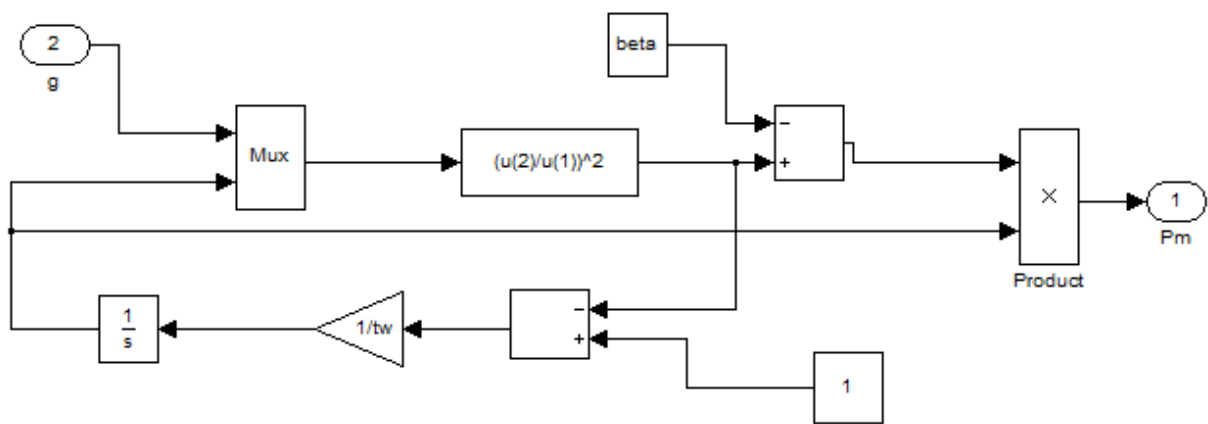


Figure II(3) : Modèle de la turbine hydraulique sous Matlab Simulink

### II.3. Modélisation de générateur synchrone à rotor bobiné

Les machines synchrones sont utilisées dans de nombreux domaines, comme dans les applications de moteur ou dans les applications de générateur. Les buts d'avoir un le modèle de machine synchrone à fin de simuler ou bien contrôler cette machine.

La structure de la machine synchrone à rotor bobiné comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation est crée par une excitatrice à courant continu au niveau de rotor, et dons notre travail en prend un machine non amortie (sons enroulement amortisseurs) [18].

Pour les machines électriques tournantes, la modélisation nécessite une parfaite connaissance de la structure électrique et de la structure mécanique (masse tournante, couple résistant, frottement visqueux).

### II.3.1. Structure générale d'une machine synchrone à rotor bobiné

La structure électrique d'une MSRBT triphasé est constituée au stator d'un enroulement triphasé montré par les trois axes (a, b, c) et au rotor d'un enroulement rotorique parcouru par un courant d'excitation [29].

La figure (II.4) montre le modèle de générateur synchrone à rotor bobiné qui sera développé dans notre travail.

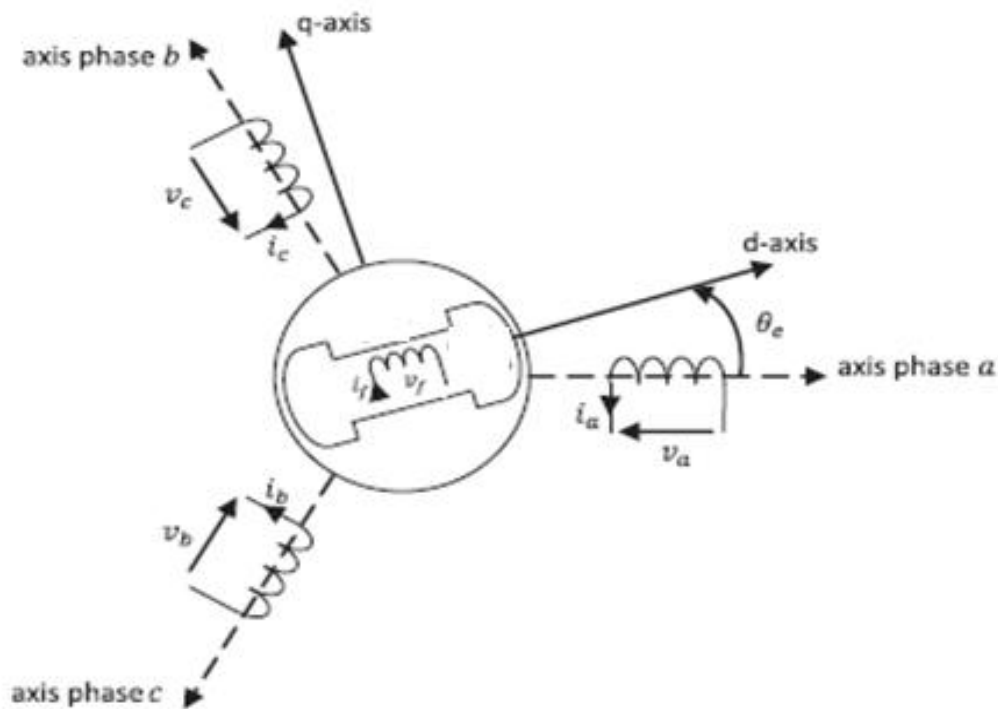


Figure II(4) : Schéma représentatif de générateur synchrone à modéliser [29]

Le stator comporte trois phases a, b, c identiques et décalées l'une par rapport à l'autre par un angle ( $\frac{2\pi}{3}$ ) électrique de part et d'autre le rotor comprend deux axes caractérisés par [26] [18] :

- Un axe d'animation rotorique longitudinal (d).
- Un axe inter-polaire en quadrature (q), déphasé de ( $\frac{\pi}{2}$ ) par rapport à l'axe (d).
- La position du rotor est localisée par l'angle électrique.

$$\theta = \theta_0 + \omega t \quad (\text{II.6})$$

$\theta_0$  : L'angle électrique initial

$\omega$  : Pulsation des grandeurs électriques

### II.3.2. Hypothèses simplificatrices

- Les enroulements de stator sont symétriques et ont une distribution sinusoïdale parfaite le long de l'entrefer.
- La perméance des chemins magnétiques sur le rotor est indépendante des positions du rotor.
- Les effets de saturation et d'hystérésis sont inexistant [29].

### II.3.3. Mise en équation de la machine

La base de la plus part des modèles de machine électrique les plus utilisée est sur ma théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques statorique et rotorique à un système cartésien d'axes, d et q dans le repère classique, il ya trois axes orienté suivant les axes des trois enroulements statorique de la machine [27].

#### II.3.3.1. Equation électrique

Les équations de tension des phases rotorique servent au point de départ pour l'élaboration du modèle de la machine.

Le système des équations suivant exprimé les tensions en fonction des courant et des flux [29] :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_a = -R_s I_a + \frac{d}{dt} \phi_a \\ V_b = -R_s I_b + \frac{d}{dt} \phi_b \\ V_c = -R_s I_c + \frac{d}{dt} \phi_c \\ V_f = R_f I_f + \frac{d}{dt} \phi_f \end{array} \right. \quad (\text{II.7})$$

La forme matricielle de système précédent est donnée par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$[v_a \ v_b \ v_c]^t$  : Vecteurs tension des phases statorique.

$[I_a \ I_b \ I_c]^t$  : Vecteurs courants des phases statorique.

$[\phi_a \ \phi_b \ \phi_c]^t$  : Vecteurs des flux totaux traversant les bobines statorique.

$R_s$  : Résistance des phrases statorique

$$V_f = R_f I_f + \frac{d}{dt} \phi_f \quad (\text{II.9})$$

$V_f$  : Tension d'excitation rotorique.

$I_f$  : Courant d'excitation rotorique.

$\phi_f$  : Flux rotorique.

$R_f$  : Résistance rotorique.

### II.3.3.2. Equation magnétique

Les flux sont liés au courant par [29] :

$$\phi = L \cdot I$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_a = L_a I_a + M_{ab} I_b + M_{ac} I_c + M_{af} I_f \\ \phi_b = M_{ba} I_a + L_b I_b + M_{bc} I_c + M_{bf} I_f \\ \phi_c = M_{ca} I_a + M_{cb} I_b + L_c I_c + M_{cf} I_f \\ \phi_f = M_{fa} I_a + M_{fb} I_b + M_{fc} I_c + L_f I_f \end{array} \right. \quad (\text{II.10})$$

La forme matricielle :

$$\begin{array}{l} \text{On prend que :} \\ M_{af} = M_f \cos(\theta) \\ M_{bf} = M_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cf} = M_f \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{array} \quad (\text{II.11})$$

Donc la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & M & M & M \\ M & L & M & M \\ M & M & L & M \\ M & M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$M$  : Mutuelle inductance entre phases du stator.

$L$  : Inductance propre d'une phase statorique.

$M_f$ : Mutuelle inductance du rotor.

$I_f$  : Courant d'excitation rotorique.

### II.3.4. Passage dans le repère de Park

La simplification du modèle dynamique de la machine est par l'application d'un changement de repère. Grâce à une transformation mathématique, on peut effectuer ce changement, alors elle transforme les trois bobines statorique déphasées de  $(\frac{2\pi}{3})$  en deux bobines fictives équivalentes diphasées  $(\frac{\pi}{2})$  de et situées sur le rotor [21].

Les deux bobines sur les axes (d, q) tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer du repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [18], [30].

La figure (II.5) montre le modèle de générateur synchrone à rotor bobiné dans le repère de Park

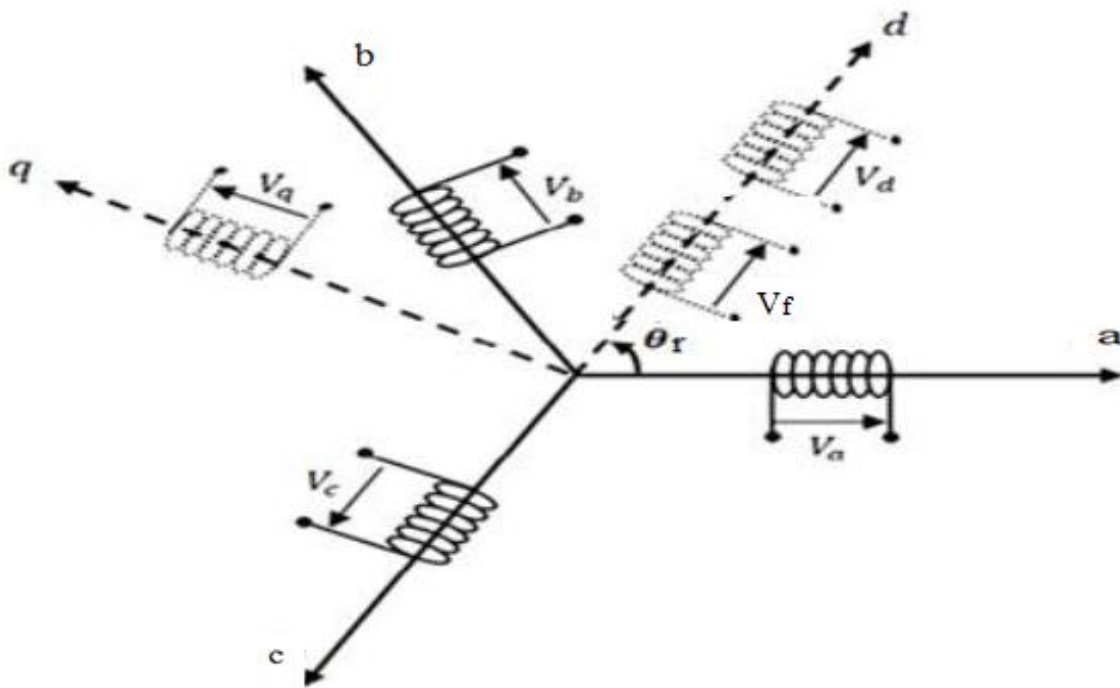


Figure II(5) : Transformation triphasé diphasé [29]

La matrice de Park est définie comme suit [29] :

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

Pour le passé le système dans le repère (d, q, o) vers (a, b, c) il faut utiliser la matrice inverse de Park  $P(\theta_r)^{-1}$  qui défini comme suit [13].

$$P(\theta_r)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$P(\theta_r)^{-1}$  : la matrice inverse de Park.

Le passage des grandeurs statorique  $X_{a,b,c}$  aux composants directe et en quadratures  $X_{d,q}$  est défini par :

$$\begin{cases} [X_{a,b,c}] = [P(\theta_r)^{-1}] [X_{d,q,o}] \\ [X_{d,q,o}] = [P(\theta_r)] [X_{a,b,c}] \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Ou :

$[P(\theta_r)]$  et  $[P(\theta_r)^{-1}]$  : sont les matrices de passage direct et inverse.

$X$  : les vecteurs de courant, tension ou flux.

$\theta_r$  : l'angle de la position de rotor.

### II.3.4.1. Choix de référentiel

Différentes possibilités sont existée pour choisir la direction du repère d'axes d, q qui dépendent couramment des objectifs de l'application.

L'angle électrique  $\theta$  est définit comme suit [18] :

$$\theta(t) = \int_a^t w(t) dt.$$

Sachant que l'angle électrique initial  $\theta_0 = 0$

Tel que :

$\theta$  : Angle entre l'axe magnétique (a) et l'axe longitudinal (d) ;

$w$  : Vitesse de rotation du référentiel choisi.

On distingue selon le choix de  $w$ , les références suivantes [18] :

#### 1-Référentiel lié au stator

Le stator est fixe, alors la vitesse du repère de Park est nulle comme illustre l'équation suivante :

$$W_\theta = W_s = 0 \quad (\text{II.16})$$

$W_s$  : Pulsation des tensions statorique.

#### 2-Référentiel lié au rotor

Dans le référentiel lié au rotor, la vitesse du repère (d, q) est égale à celle du rotor:

$$W_{\theta} = W_r \quad (\text{II.17})$$

### 3-Référentiel lié au champ tournant

Dans le référentiel lié au champ tournant, la vitesse du repère de Park est égale à la vitesse du champ tournant :

$$W_{\theta} = W \quad (\text{II.18})$$

$W$  : Pulsation de l'alimentation.

## II.3.5. Modèle de la machine synchrone à rotor bobiné dans le repère de Park :

La figure II(5) précédente est montrée le schéma simplifié de l'alternateur dans le repère de Park, (par l'application de la transformation de Park sur le système d'équations dans un repère lié au rotor) les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques sont définies dans le modèle de l'alternateur [29] [30].

### II.5.1. Equation électrique :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d = -R_s I_d - W_r \phi_q + \frac{d\phi_d}{dt} \\ V_q = -R_s I_q + W_r \phi_d + \frac{d\phi_q}{dt} \\ V_f = R_f I_f + \frac{d\phi_f}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$V_d, V_q$ : Composantes de la tension au stator dans le repère de Park.

$V_f$ : Composantes de la tension rotorique dans le repère de Park.

$I_d, I_q$ : Composantes du courant statorique dans le repère de Park

$I_f$ : Composantes du courant rotorique dans le repère de Park

$\phi_d, \phi_q$  : Composantes du flux statorique dans le repère de Park

$\phi_f$  : Flux d'excitation.

$W_r$  : Pulsation électrique rotorique.

### II.3.5.2. Equation magnétique

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_d = -L_d I_d + M_{sf} I_f \\ \phi_q = -L_q I_q \\ \phi_f = L_f I_f - M_{sf} I_d \end{array} \right. \quad (\text{II.20})$$

Où:

$L_d, L_q$ : Inductances de l'enroulement de stator d'axe (d) et d'enroulement de stator d'axe de q.

$L_f$  : Inductance du bobinage de champ principal.

$M_{sf}$  : Inductance mutuelle entre l'enroulement de champ et l'enroulement de stator d'axe (d)

### II.3.6. Expression du couple électromagnétique

La puissance transmise est exprimée par la relation suivante [18] [31].

$$P(t) = (V_d I_d + V_q I_q) \quad (\text{II. 21})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - W_r \phi_q + \frac{d\phi_d}{dt} \\ V_q = -R_s I_q + W_r \phi_d + \frac{d\phi_q}{dt} \end{cases}$$

En remplace ( $V_d, V_q$ ) par leur expression dans l'équation (II.21) :

$$P(t) = (-R_s I_d - W_r \phi_q + \frac{d\phi_d}{dt}) I_d + (-R_s I_q + W_r \phi_d + \frac{d\phi_q}{dt}) I_q \quad (\text{II. 22})$$

$$P(t) = [ -R_s( I_d^2 + I_q^2 ) + ( I_d \frac{d\phi_d}{dt} + I_q \frac{d\phi_q}{dt} ) + ( - W_r \phi_q I_d + W_r \phi_d I_q ) ] \quad (\text{II. 23})$$

On à :

$$W_r = \frac{d\theta_r}{dt} . \quad (\text{II. 24})$$

Donc l'expression (II.23) devient :

$$P(t) = [ -R_s( I_d^2 + I_q^2 ) + ( I_d \frac{d\phi_d}{dt} + I_q \frac{d\phi_q}{dt} ) + \frac{d\theta_r}{dt} ( -\phi_q I_d + \phi_d I_q ) ] \quad (\text{II. 25})$$

$R_s( I_d^2 + I_q^2 )$  : Représente la puissance dissipée par effet Joule.

$( I_d \frac{d\phi_d}{dt} + I_q \frac{d\phi_q}{dt} )$  : La variation de l'énergie emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{d\theta_r}{dt} ( -\phi_q I_d + \phi_d I_q )$  : La puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$P = C_{em} \Omega \quad \text{et} \quad w = p \Omega .$$

$\Omega$  : vitesse mécanique On déduit l'expression du couple électromagnétique et est donnée par :

$$C_{em} = P ( \phi_d I_q - \phi_q I_d ) \quad (\text{II. 26})$$

Donc :

$$C_{em} = P (\varphi_d I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \quad (\text{II. 27})$$

$P (\varphi_d I_q)$  : Couple que l'on obtiendrait avec une machine à pôles lisses.

$P ((L_d - L_q) I_d I_q)$  : Couple supplémentaire dû à la saillance des pôles.

### II.3.7. Equations mécanique

Le modèle mécanique de la machine synchrone est illustré comme suit [31] :

$$C_m - C_{em} - C_f = j \frac{dWr}{dt} \quad (\text{II. 28})$$

Ou:

$$C_f = f\Omega$$

Tel que :

$C_m$  : Couple moteur avec (couple mécanique d'un turbine).

$C_f$ : Couple de frottements visqueux.

$f$ : Coefficient des frottements visqueux.

$J$ : Moment d'inertie de la machine.

### II.4. Modélisation de transformateur

Un transformateur de l'énergie électrique est représenté par un quadripôle en  $\pi$  non symétrique, les grandeurs associées sont le rapport de transformation ( $\alpha$ ) et deux impédances, du primaire du secondaire du transformateur.

Le modèle du transformateur est représenté dans la figure II (6), [32].

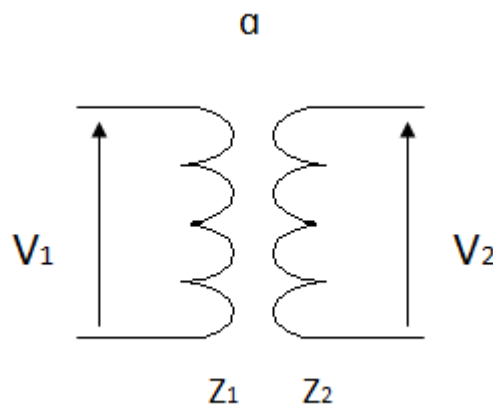


Figure II(6) : Modèle d'un transformateur

$V_1$  : Tension de primaire.

$V_2$  : Tension de secondaire.

$Z_1$  : Impédance de primaire.

$Z_2$  : Impédance de secondaire.

$\alpha$  : Rapport de transformation.

## II.5. Modélisation du réseau électrique

Un réseau électrique peut être considéré comme l'association en série d'une résistance et une inductance avec une source de tension sinusoïdale, avec une conductance et une capacité dans le sens transversal qui sont souvent négligeables. Le schéma équivalent réseau électrique représenté par la figure suivante [33].

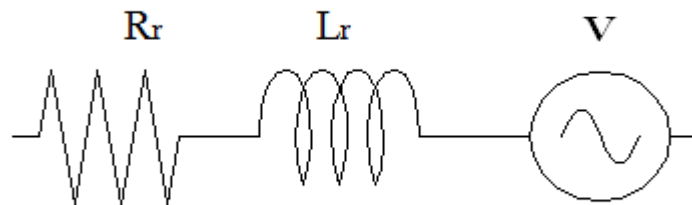


Figure II(7) : Modèle du réseau électrique

Avec :

$R_r$  : Résistance de réseau.

$L_r$  : Inductance de réseau.

$V$  : Source de tension sinusoïdal.

## **II.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons modélisé la chaîne de la production d'électricité composée de : turbine hydraulique, générateur synchrone, transformateur de couplage et réseau électrique. Le générateur synchrone est modélisé dans son repère triphasé réel et dans le repère fictif de Park. Ce changement de repère permet la simplification des équations électriques est magnétique du générateur en réduisant le nombre des équations et en minimisant les termes de couplage.

Après modélisation de l'association turbine hydraulique-générateur synchrone,-réseau électrique, le chapitre suivant sera consacré à la commande en puissance et en vitesse de cette association.

## **Chapitre III :**

# **Commande en puissance active de l'association turbine hydraulique-générateur synchrone couplé au réseau**

### **III.1. Introduction**

La commande des machines à courant alternatif est aujourd'hui une réalité industrielle. Depuis les années 1980, de nombreux laboratoires de recherche se sont penchés sur ce thème.

Le problème des commandes de puissance est très important dans toutes les applications nécessitant la transformation d'une énergie mécanique en énergie électrique, ou bien dans les domaines de la production de l'énergie électrique [3].

La conduite et le fonctionnement des réseaux sont très complexes. Au niveau de l'ensemble, le total de la production doit être égal au totale de la consommation, (elle inclut avec elle les pertes).

Une machine synchrone, utilisée en alternateur, est destinée à fonctionner soit en parallèle avec d'autres alternateurs dans un réseau interconnecté, soit en générateur autonome destiné à alimenter une charge séparée. Dans notre travail on a choisir un alternateur couplé dans un réseau électrique.

Pour faire régler et commandé la puissance active débité par un générateur synchrone il faut agir sur le couple mécanique ou bien la puissance mécanique du la turbine qui entraînée l'alternateur [2].

Dans ce troisième chapitre on a fait la commande de la puissance active injecté par un générateur synchrone à rotor bobiné couplé au réseau électrique cette commande et basé sur la commande de la puissance mécanique d'une turbine hydraulique par système de la régulation qui réglé la vitesse de la turbine par le débit d'eau appliqué sur la turbine hydraulique.

### **III.2. Equilibre entre la production et la consommation**

La production de l'énergie électrique doit être égale à tout instant à la consommation. C'est pour cela que la turbine doit avoir des organes et des mécanismes qui lui permettent de faire varier sa puissance suivant la consommation c'est-à-dire que la turbine doit avoir un mécanisme de commande.

Cet équilibre doit être réalisé à tout instant car les écarts ont des répercussions sur la valeur de la fréquence et de la puissance. Cet équilibre n'est pas facile à réaliser et à conserver la tension nominale.

- 1- Des fluctuations instantanées de la consommation des clients.
- 2- Des incertitudes concernant l'évolution de cette demande.
- 3- Des indisponibilités des groupes de production.

Pour résoudre ce problème complexe, l'exploitant dispose d'un système de régulation qui surveille la fréquence et l'écart de puissance entre demande et consommation [34].

### **III.3. Fonctionnement des réseaux électriques**

Le stockage massif de l'énergie électrique sous une forme immédiatement disponible n'est, actuellement, pas possible. Le problème majeur des exploitants est donc de maintenir en permanence l'équilibre entre l'offre disponible et les demande potentielle, étant entendu que l'équilibre instantané

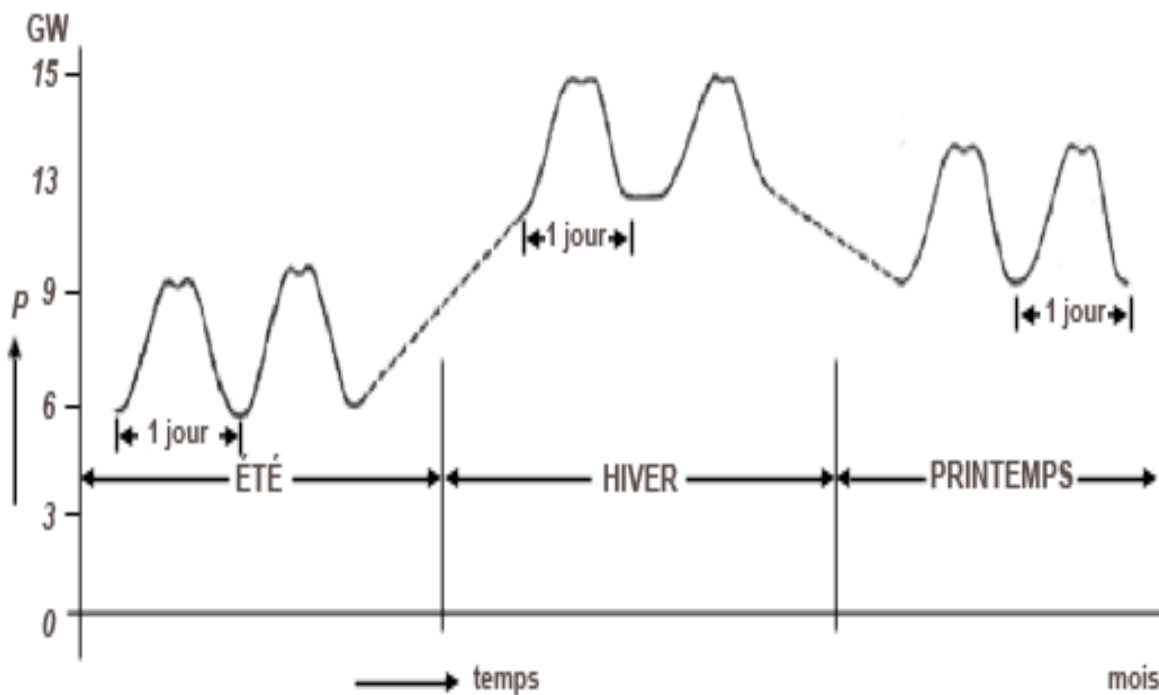
entre production et consommation est une condition nécessaire de fonctionnement du système production-transport- consommation, appelé souvent système électrique plutôt que réseau.

Pour des raisons économiques et techniques, les unités de production sont souvent géographiquement concentrées. Par contre, la consommation est beaucoup plus dispersée. Les réseaux de transport et d'interconnexion assurent l'acheminement de l'énergie depuis ces unités vers les lieux de consommation à travers des lignes électriques (aériennes/ou souterraine) [35].

La conduite et le fonctionnement des réseaux sont très complexes. Au niveau de l'ensemble, le total de la production doit être égal au totale de la consommation, en incluant les pertes. Donc, dans le domaine de l'énergie électrique, qui n'est pas stockable, dès que l'énergie produite ne peut pas être fournie, cela peut conduire à une perte de synchronismes entre les différents alternateurs, et la mise hors service d'un ouvrage. Pour éviter ce genre de cassure, le contrôle et la surveillance du système veillent à la bonne marche de l'ensemble [34].

### III.3.1. Appel de puissance d'un réseau électrique

La puissance demandée par l'ensemble des clients d'un réseau subit de grandes fluctuations selon l'heure de la journée et selon les saisons [2].



**Figure III(1) : Fluctuations typiques de l'appel de puissance durant une année [2]**

La figure III(1), montre des variations quotidiennes et saisonnières typiques pour un réseau.

On remarque que l'appel de puissance active d'un réseau n'est pas constant, contenant plusieurs fluctuations durant l'année,

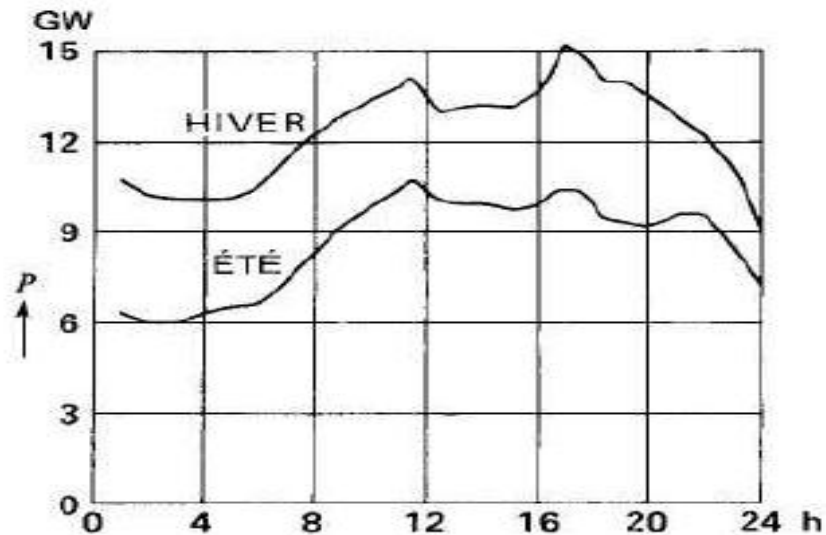


Figure III(2) : Fluctuation de l'appel de puissance durant une journée [2]

La figure III(2) montre, pour le même réseau, la variation horaire de l'appel de puissance pour une journée d'hiver et pour une journée d'été. On remarque, dans cet exemple, que la pointe de 15 GW en hiver se produit vers 17 h, car c'est à ce moment que les lumières sont allumés dans toutes les maisons et que plusieurs usines ont encore en marche. Par contre, le creux de la demande arrive aux petites heures du matin.

### III.3.2. Puissance active débitée

La puissance active est la puissance utile qui est transformée par les récepteurs sous forme mécanique (moteur électrique), calorifique (chauffage électrique), lumineuse (lampe électrique). Dans le cas d'un alternateur, cette puissance active débitée est donnée par [2] :

$$p = \frac{E_0 E_1}{X_S} \sin \delta \quad (\text{III. 1})$$

$p$  : Puissance active débitée par phase en [w].

$E_0$  : Tension induit par phase en [v].

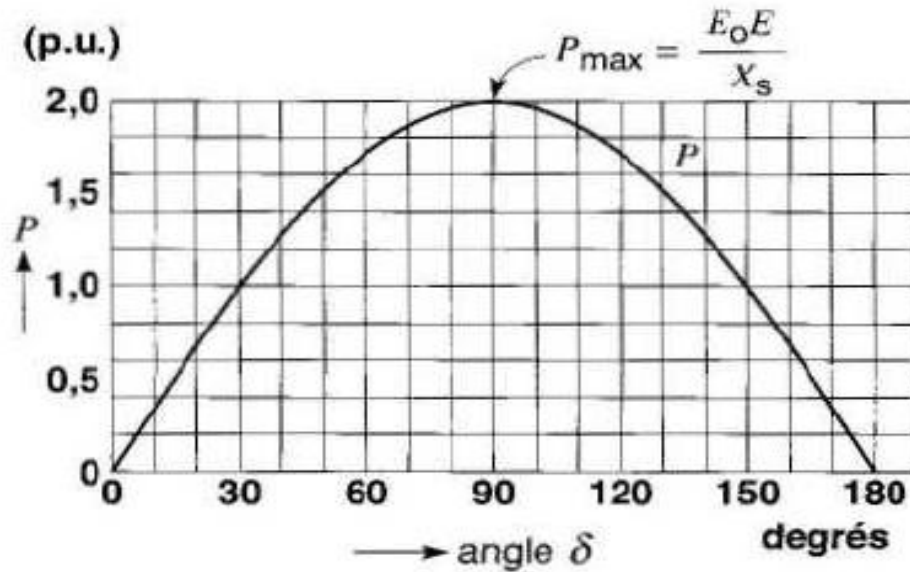
$E_1$  : Tension ou borne par phase en [v].

$X_S$  : Réactance synchrone par phase [ $\Omega$ ].

$\delta$ : L'angle de déphasage entre  $E_0$   $E_1$  en degré électrique.

Dans l'équation précédente, la tension  $E_1$  est fixe (imposé par le réseau). Supposons que le courant d'excitation  $I$  de l'alternateur soit maintenu constant, de sorte que la tension induite  $E_0$  est constante. La puissance active  $P$  que le générateur débite dans le réseau variera selon le sinus de l'angle  $\delta$ .

Dans notre travail, il s'agit d'un alternateur entraîné par une turbine hydraulique ; plus en augment le débit d'eau, plus l'angle  $\delta$  augment ce qui augmente la puissance active p.



**Figure III(3) : Relation entre la puissance active débitée par un alternateur et l'angle  $\delta$ [2]**

La figure précédente représente la courbe de variation de la puissance active p en fonction de l'angle  $\delta$ . La puissance maximale correspond à un angle interne de 90°. La puissance active maximale est alors :

$$P_{max} = \frac{E_0 E_1}{X_s} \tag{III. 2}$$

La figure III(3) indique que la puissance active débitée par l'alternateur augmente lorsque le déphasage entre la tension  $E_1$  du réseau et la tension induite  $E_0$  augmente.

Tout d'abord, les courants triphasés circulant dans le stator créent un champ tournant identique à celui créé dans le stator d'un moteur asynchrone. Dans un alternateur, ce champ tourne à la même vitesse et dans le même sens que les pôles du rotor. Les champs du rotor et du stator sont donc stationnaires l'un par rapport à l'autre [2].

Si l'on applique à l'alternateur un couple tendant à le faire accélérer, le rotor avance d'un angle mécanique  $\alpha$  par rapport à l'axe central du stator. Ce décalage provoque la circulation d'un courant dans le stator. Il se développe alors des forces d'attraction et de répulsion entre les pôles N,S du stator et les pôles N,S du rotor. Ces forces produisent un couple qui tend ramené le rotor à sa position originale. C'est précisément ce couple que la turbine doit vaincre pour maintenir l'angle de décalage  $\alpha$ . Il existe une relation entre l'angle de décalage mécanique  $\alpha$  et le déphasage électrique  $\delta$ . Cette relation est donnée par l'équation [2] :

$$\delta = \frac{p \cdot \alpha}{2} \tag{III.3}$$

p : nombre de paires de pôles.

## **III.4. Commande de la puissance active débitée**

La commande de la puissance, considérons une centrale hydraulique unique alimentant une charge. L'eau disponible derrière un barrage fait tourner une turbine qui entraîne un alternateur. La puissance  $P_m$  développée par la turbine dépend essentiellement de l'ouverture des vannes plus l'ouverture est grande, plus la puissance développée est grande, Cette puissance est transmise intégralement au rotor de l'alternateur [2].

D'autre part, la puissance  $P$  débitée par l'alternateur dépend exclusivement de l'appel de puissance imposé par la charge. Lorsque la puissance mécanique  $P_m$  fournie au rotor est égale à la puissance électrique  $P$  débitée par le stator, l'alternateur est en équilibre et sa vitesse demeure constante et la fréquence aussi constante. On dit alors que le réseau est stable [2].

Le système de commande est un système qui règle la vitesse de la turbine et donc la fréquence et la puissance active en réponse à la variation de charge. Le régulateur de turbine règle l'entrée d'eau dans une turbine, qui tourne à son tour le générateur pour produire de l'électricité [36].

### **III.4.1. Commande de la puissance par la régulation de la turbine**

Les systèmes de régulation des turbines hydroélectriques sont fortement influencés par les effets de l'inertie de l'eau, La fonction principale du système de régulation de la turbine est de réguler la vitesse. Le mécanisme de commande de vitesse comprend des équipements tels que des relais, des servomoteurs, des dispositifs d'amplification de pression ou de puissance, il ya des liaisons entre le contrôleur de vitesse et les portes ou bien les vannes commandées par le régulateur. Le régulateur de vitesse actionne normalement les vannes d'eau contrôlées par le régulateur qui régulent l'entrée d'eau dans la turbine à travers le mécanisme de commande de la vitesse [36].

Le servomoteur, actionnée le distributeur ou la vanne principale, à haute puissance. Le servomoteur dispos d'une soupape contrôlée par un régulateur mécanique ou par un régulateur électronique. La sortie des dispositifs de détection de vitesse est l'écart par rapport à la vitesse de référence [36].

#### **III.4.1.1. Boucle de régulation de vitesse**

La boucle de régulation de la vitesse de l'association turbine-générateur est composée, d'un régulateur PI de la vitesse rotorique, et d'un servomoteur qui agit sur la position de la vanne du contrôle du débit d'eau alimentant de la turbine.

Le principe de la régulation de la vitesse de l'association turbine hydraulique-alternateur est illustrés par les figures (figure III(4) et figure III(5)). L'erreur entre la vitesse rotorique et sa référence passe par un régulateur PI pour avoir le signal de commande du servomoteur, afin de contrôler la position de la vanne de contrôle du débit d'eau permettant la minimisation de cette erreur.

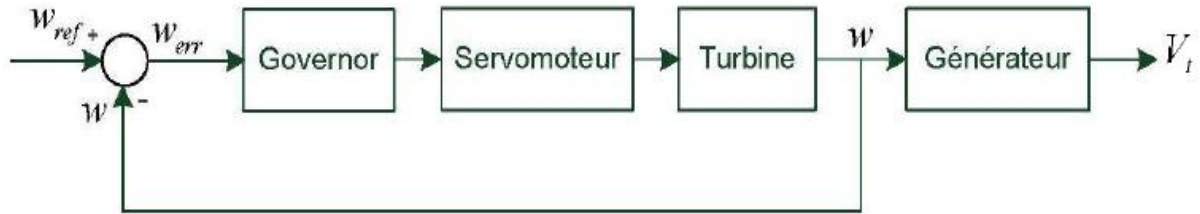


Figure III(4) : Principe de la régulation [37]

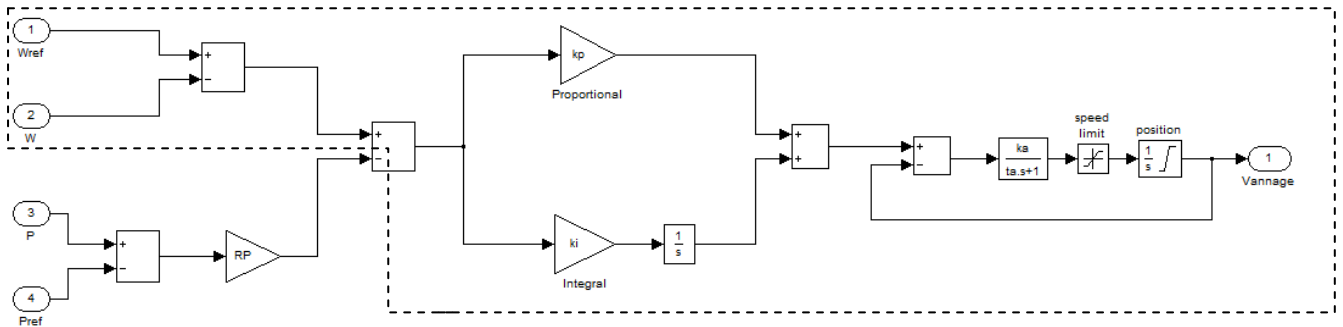


Figure III(5) : Schéma bloc de régulation de la vitesse de l'hydro-générateur sous Matlab/Simulink

Le régulateur (governor) est souvent représenté par un régulateur classique PI, (Proportionnel, intégral). Le PI agit sur la position du vannage de la turbine en fonction de la variation de la vitesse par rapport à sa valeur nominale [37].

Le terme proportionnel produit une action de contrôle proportionnelle, La réponse proportionnelle à une influence significative sur la stabilité du système contrôlé, Le terme intégral produit une action de contrôle qui s'accumule à un taux proportionnel à la taille d'erreur d'entrée. Le terme intégral permet également d'effacer l'erreur d'entrée au régulateur pour déterminer la précision d'état stationnaire du système de commande.

La figure III(6) présente le schéma bloc de simulation sous Matlab/Simulink du régulateur PI de la vitesse rotorique de l'hydro-générateur.

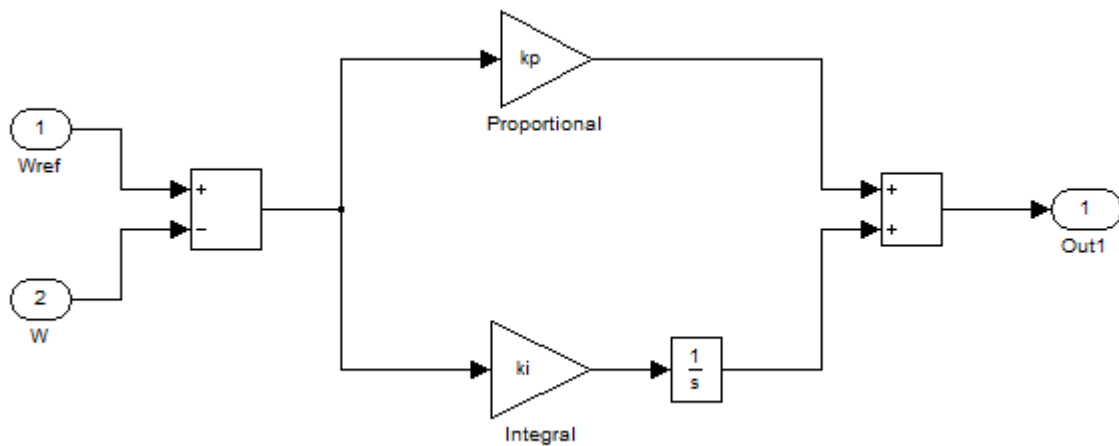


Figure III(6) : Schéma de bloc d'un régulateur PI sous Matlab Simulink

### III.4.1.2. Servomoteur

Le servomoteur est un dispositif contrôlable, qui de contrôler la position de la vanne de contrôle du débit d'eau (figure III(7)). Il peut être électrique (électrovanne) ou pneumatique (vanne contrôlé par un vérin).

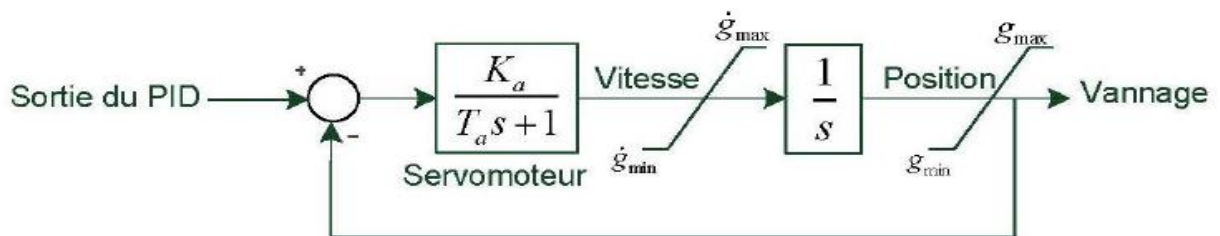


Figure III(7) : Schéma de bloc servomoteur [37]

Le modèle équivalent du servomoteur est décrit par une fonction de transfert simple du premier ordre  $\frac{k_a}{T_a s + 1}$  [37].

Le schéma bloc du servomoteur sous forme Matlab simulink est montré dans la figure suivante:

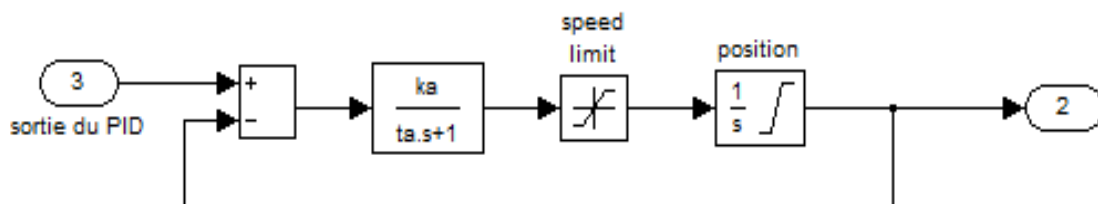


Figure III(8) : Schéma bloc du servomoteur sous Matlab/Simulink

### III.4.1.3 Boucle de régulation de la puissance

La boucle de régulation de la puissance de l'association turbine-générateur est assurée par une technique dite « permanent reference droop », ou on ajout l'erreur entre la puissance active et sa référence après pondération par le coefficient RP à l'erreur de vitesse avant de passe par le régulateur PI de la vitesse (figure III(9)).

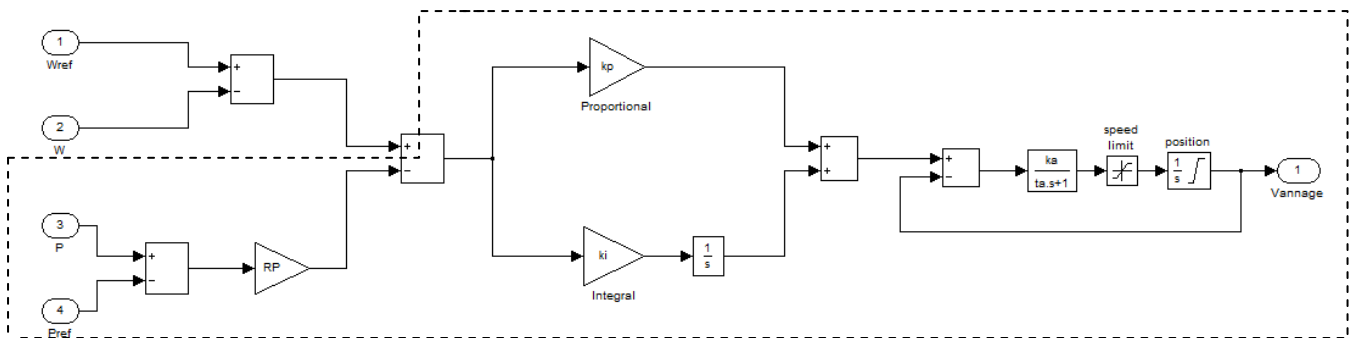


Figure III(9) : Schéma bloc de régulation de la puissance de l'hydro-générateur sous Matlab/Simulink

Les boucles de régulation de la vitesse et de la puissance active de l'hydro-générateur sont regroupés sous forme d'un seul schéma bloc comme présenté par la figure suivante.

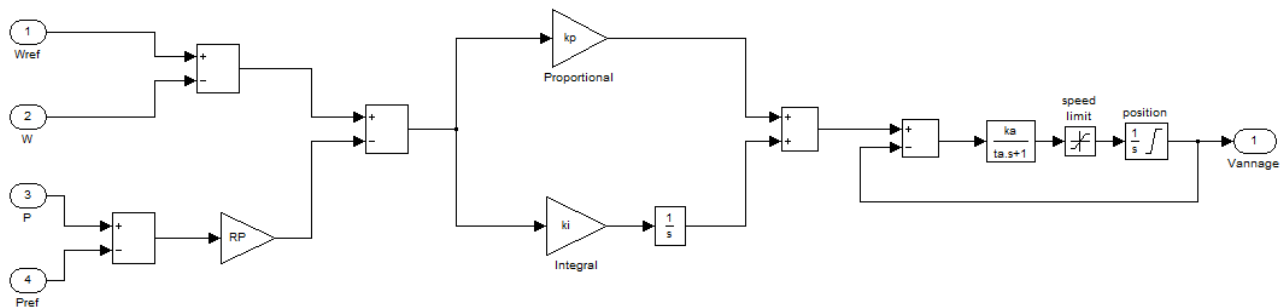


Figure III(10) : Schéma bloc global de régulation de la vitesse et de la puissance de l'hydro-générateur sous Matlab/Simulink

### III.5. Simulation de Commande en puissance active de l'association turbine hydraulique-générateur synchrone couplé au réseau

A l'aide du logiciel Matlab-simulink, on a fait la simulation de la commande de la puissance active débitée par l'hydro-générateur synchrone à rotor bobiné connecté sur le réseau électrique (Figure III(11)). Cette commande est basée sur l'imposition du couple mécanique (ou bien la puissance mécanique) par turbine sur le générateur.

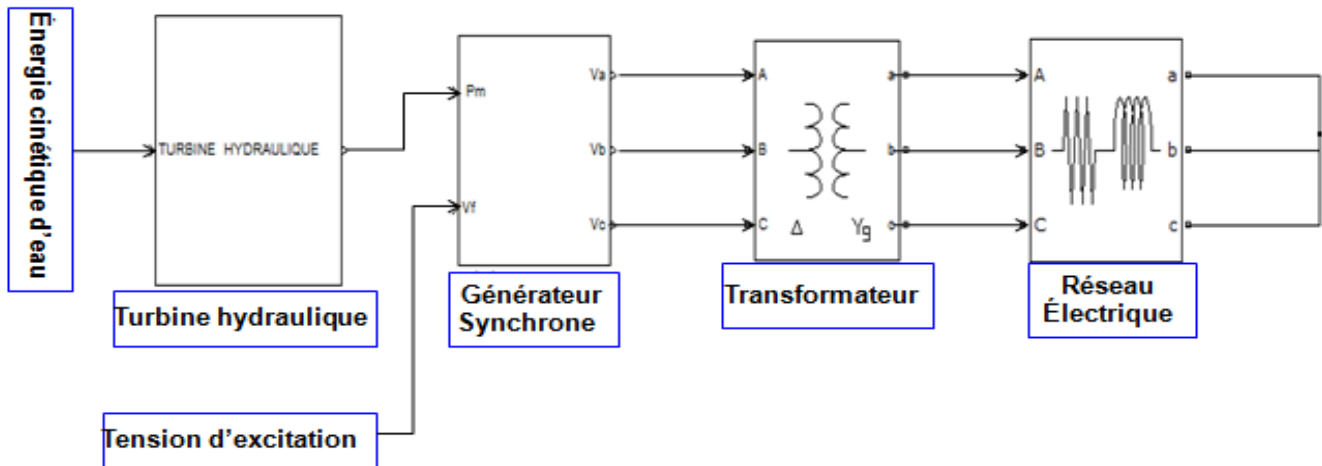


Figure III(11) : Schéma block de la l'association Turbine hydraulique, générateur synchrone-réseau

La puissance active que la machine peut débiter est de 150 MW avec une tension de 13.8 kV et une puissance apparente de 200 MVA, la tension d'excitation de la machine est fixé à une valeur de 125 v . Le transformateur raccordant le générateur au réseau est de puissance apparente de 210 MVA, avec une tension primaire (côté générateur) de 13.8 kV et une tension secondaire (côté réseau) de 230 kV et une fréquence de 50 Hz.

Les résultats de la simulation de l'association turbine hydraulique-générateur synchrone couplé au réseau sont présentés dans les figures ci-dessous.

#### III.5.1. Résultat de simulation

##### III.5.1.1. Cas de deux augmentations consécutives de puissance

Les résultats de simulation présentés dans les figures (Fig. III(12) jusqu'à Fig III(24)) sont ceux obtenus dans le cas de deux échelons consécutives de la puissance de référence ; le premier est de 112.5 MW à 120 MW et le deuxième est de 120 MW à 140 MW.

Il faut noter que l'hydro-générateur est considéré opérationnel avec une puissance initiale de 112.5 MW qui représente 75% de la puissance nominale (150 MW), et une vitesse de synchronisme de 1500 tr/mis correspondant à la fréquence du réseau électrique de 50 Hz.

On remarque que la puissance active produite par le l'hydro-générateur suit sa référence après un régime transitoire lors de la variation de cette référence (Figure III(12)). Cette phase transitoire est

Principalement due à la nature lente de la dynamique de l'hydro-turbine, et en particulier la limitation en vitesse du servomoteur gouvernant la vanne hydraulique alimentant la turbine en eau.

La puissance mécanique fournie par la turbine hydraulique au générateur synchrone prend la même forme que la puissance active débitée, mais elle légèrement supérieure à cette dernière (Figure III(13)). Cette différence est due aux pertes dans le générateur synchrone.

On note une bonne concordance entre la vitesse rotorique et sa référence comme le montre la figure III(14) avec une légère perturbation lors de la variation de la puissance active ((Figure III(15)).

Suite au maintien de la vitesse rotorique constante, le couple mécanique fournie par la turbine hydraulique prend une allure similaire à celle de la puissance mécanique, comme illustré sur la figure III(16).

Les courants statoriques sont présentés dans la figure III(17) et la figure III(18). On remarque que l'amplitude des courants augmente lorsque la puissance active injectée au réseau augmente.

Les tensions statoriques sont présentés dans la figure III(19) et la figure III(20). On remarque que la tension statorique maintient son amplitude constante quelque soit la variation de la puissance active débitée. En fait, cette tension est imposée par le réseau via le transformateur de couplage (la tension primaire du transformateur).

Les courants du réseau électrique (côté secondaire du transformateur) sont présentés dans la figure III(21) et la figure III(22). On remarque que l'amplitude des courants augmente lorsque la puissance active injectée au réseau augmente. Cette augmentation est similaire celle des courants statoriques du générateur, avec une différence qui représente le rapport de transformation du transformateur.

Les tensions du réseau électrique (côté secondaire du transformateur) sont présentés dans la figure III(23) et la figure III(24). On remarque ces tensions maintiennent leurs amplitudes constantes quelque soit la variation de la puissance active débité. En fait, ces tensions sont imposées par le réseau électrique.

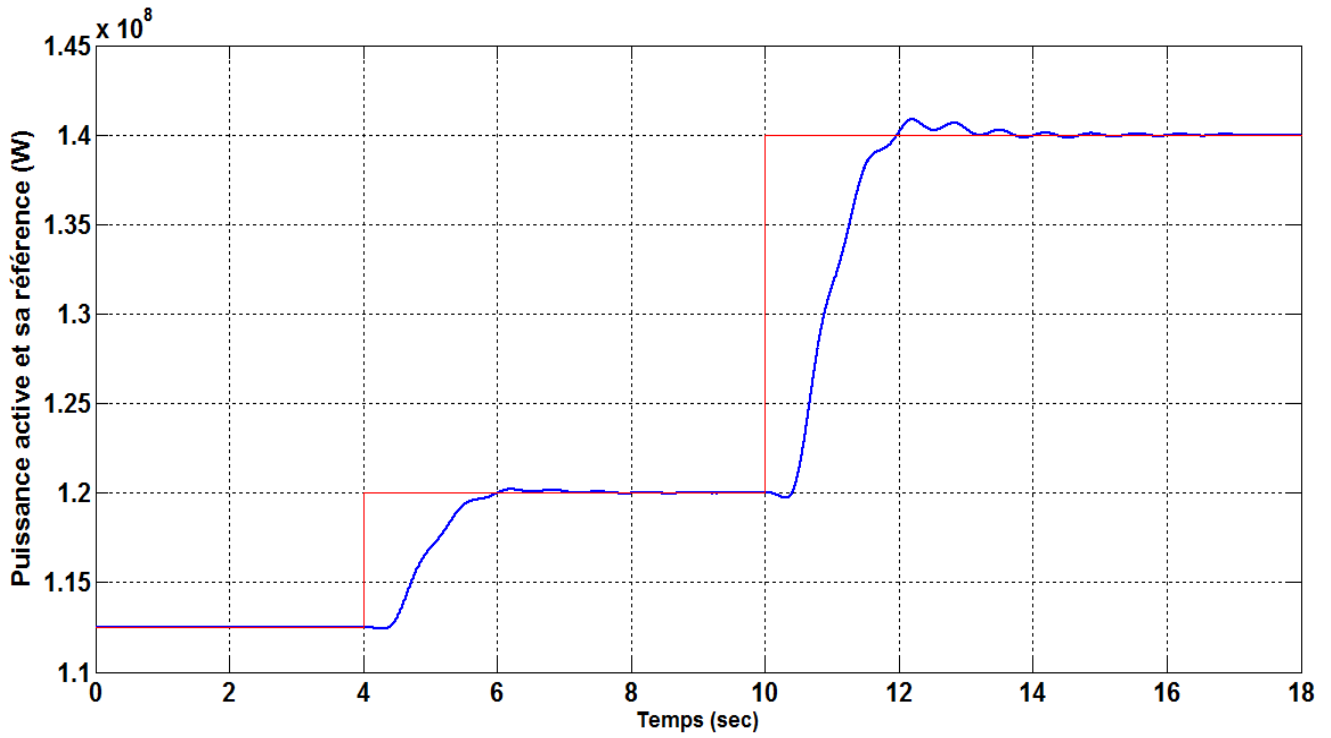


Figure III(12) : Puissance active débitée par le générateur et sa référence

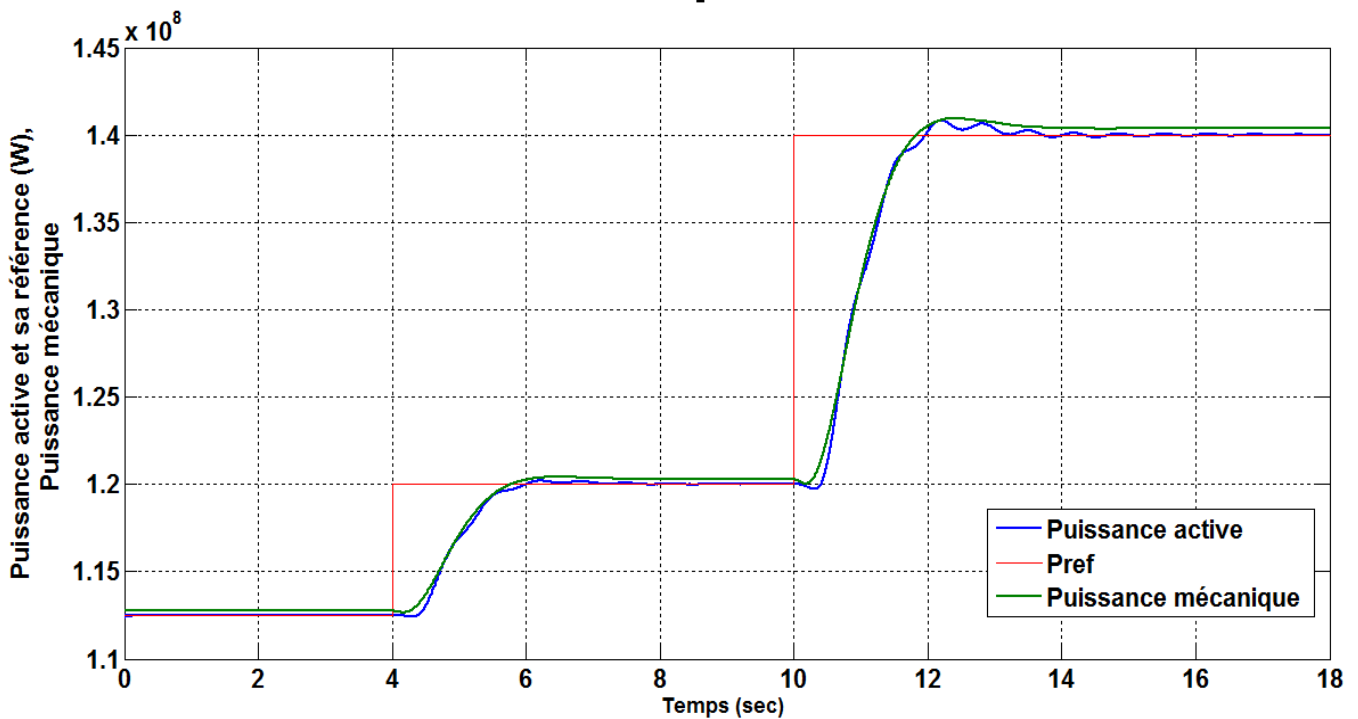


Figure III(13) : Puissance active débitée et sa référence avec la puissance mécanique de la turbine

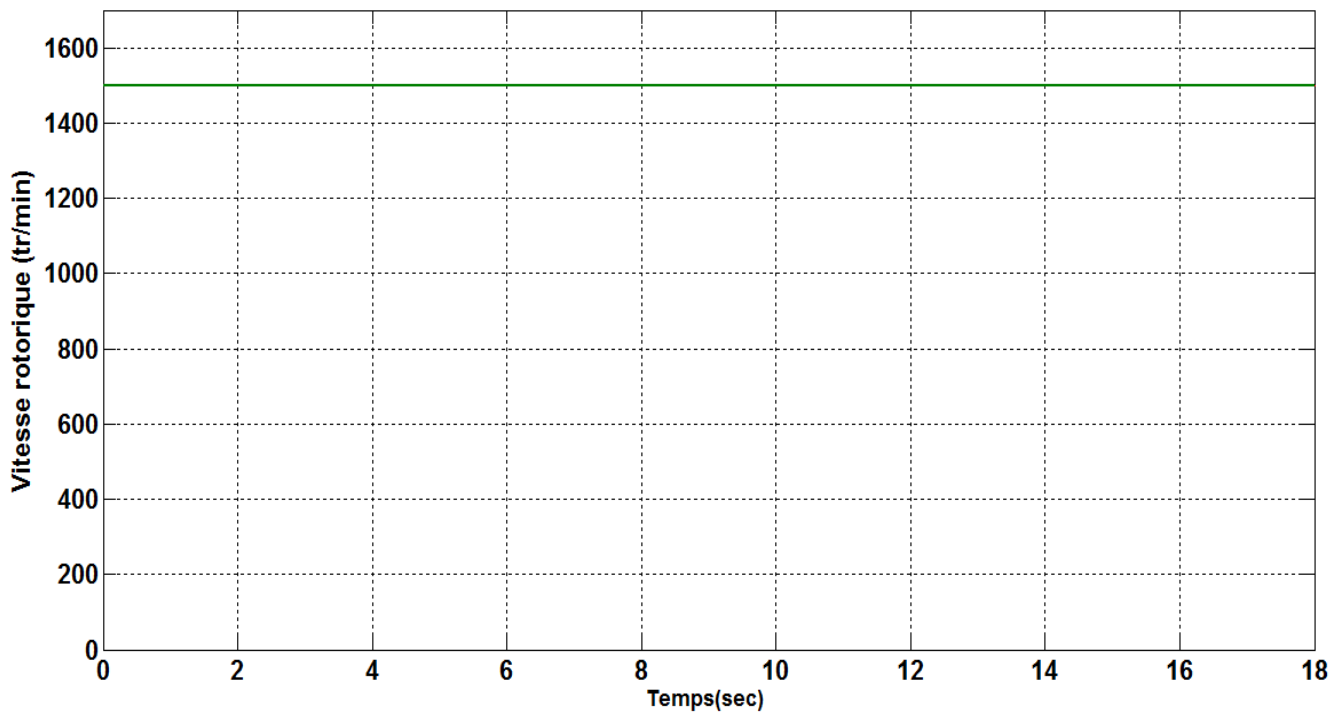


Figure III(14) : Vitesse rotorique du générateur synchrone

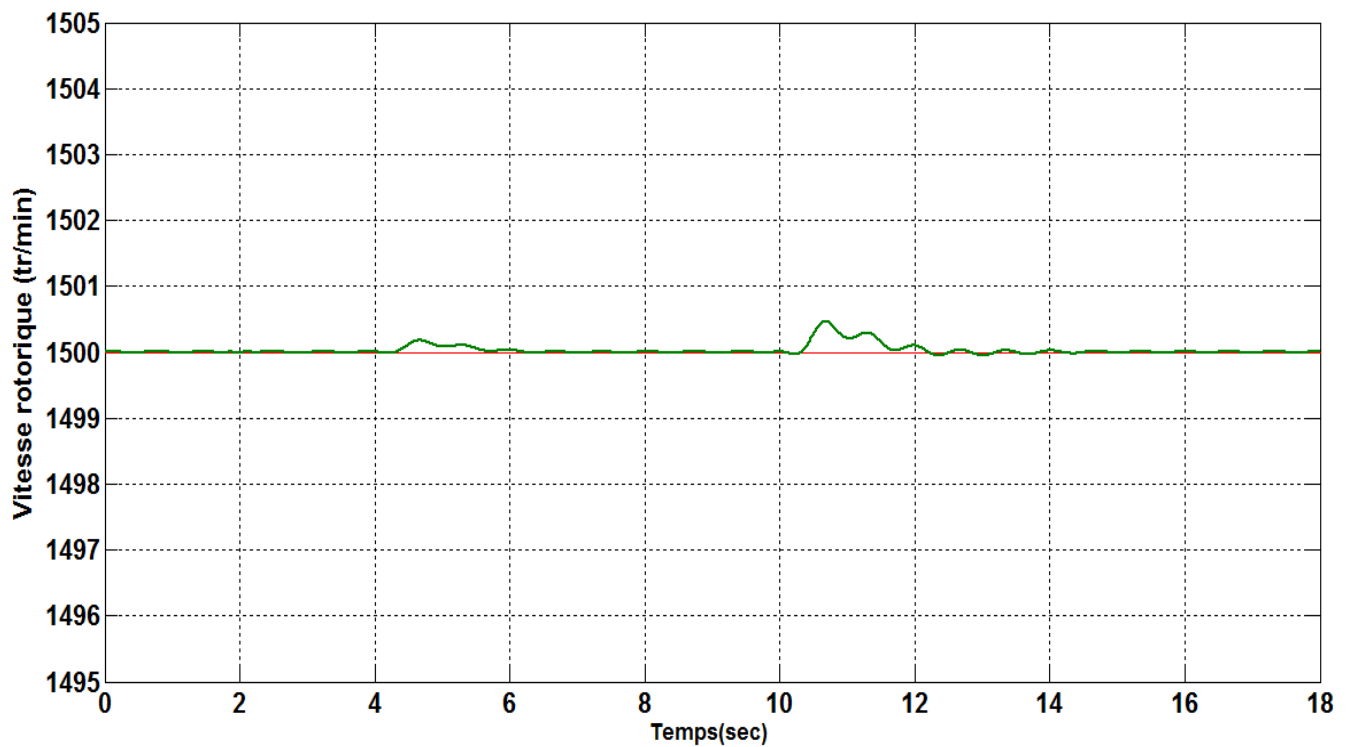


Figure III(15): Vitesse rotorique du générateur synchrone (Zoom)

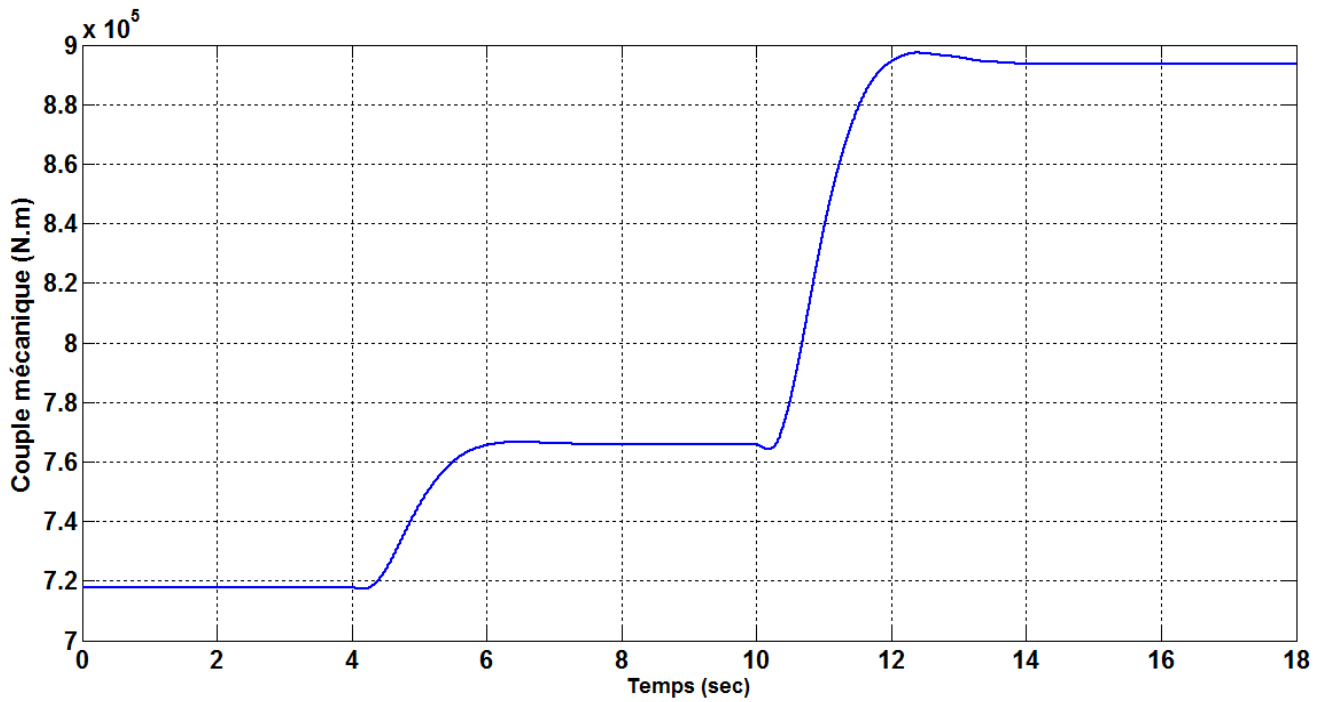


Figure III(16) : Couple mécanique fournie par la turbine hydraulique

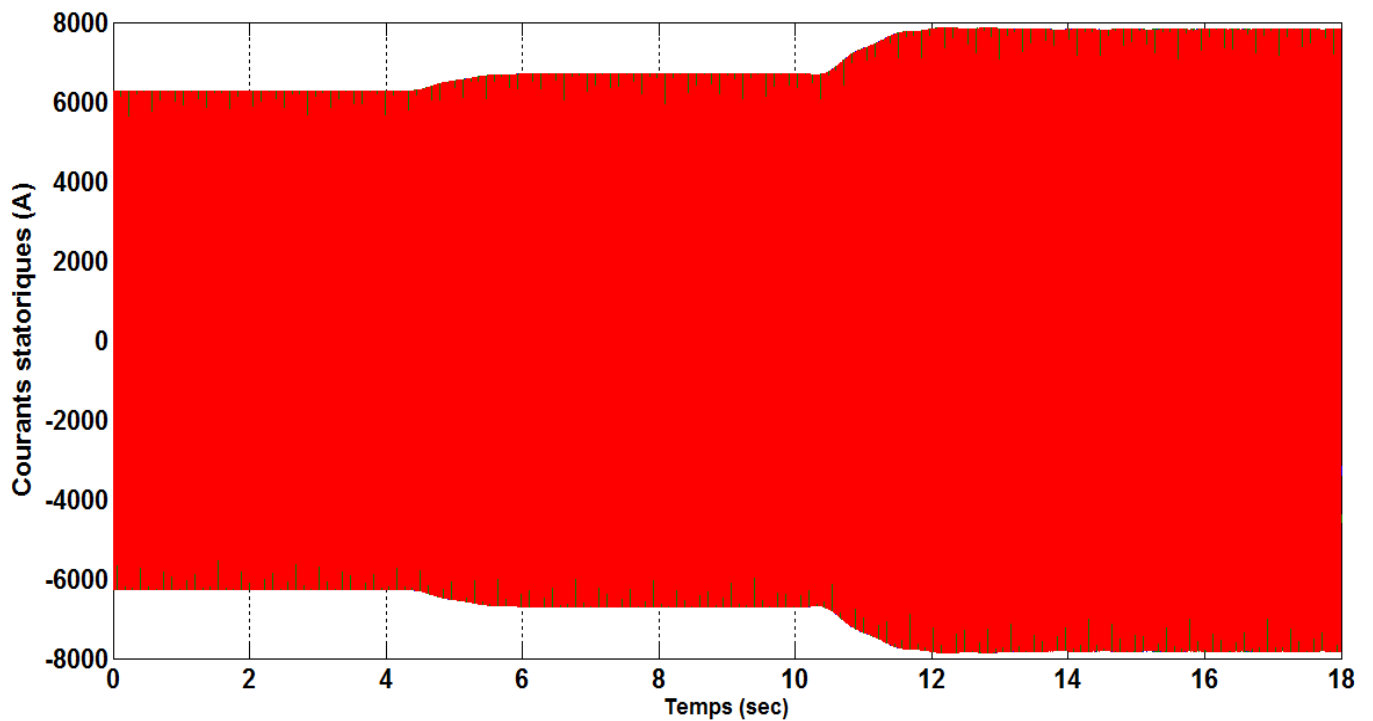


Figure III(17) : Courant statorique du générateur synchrone

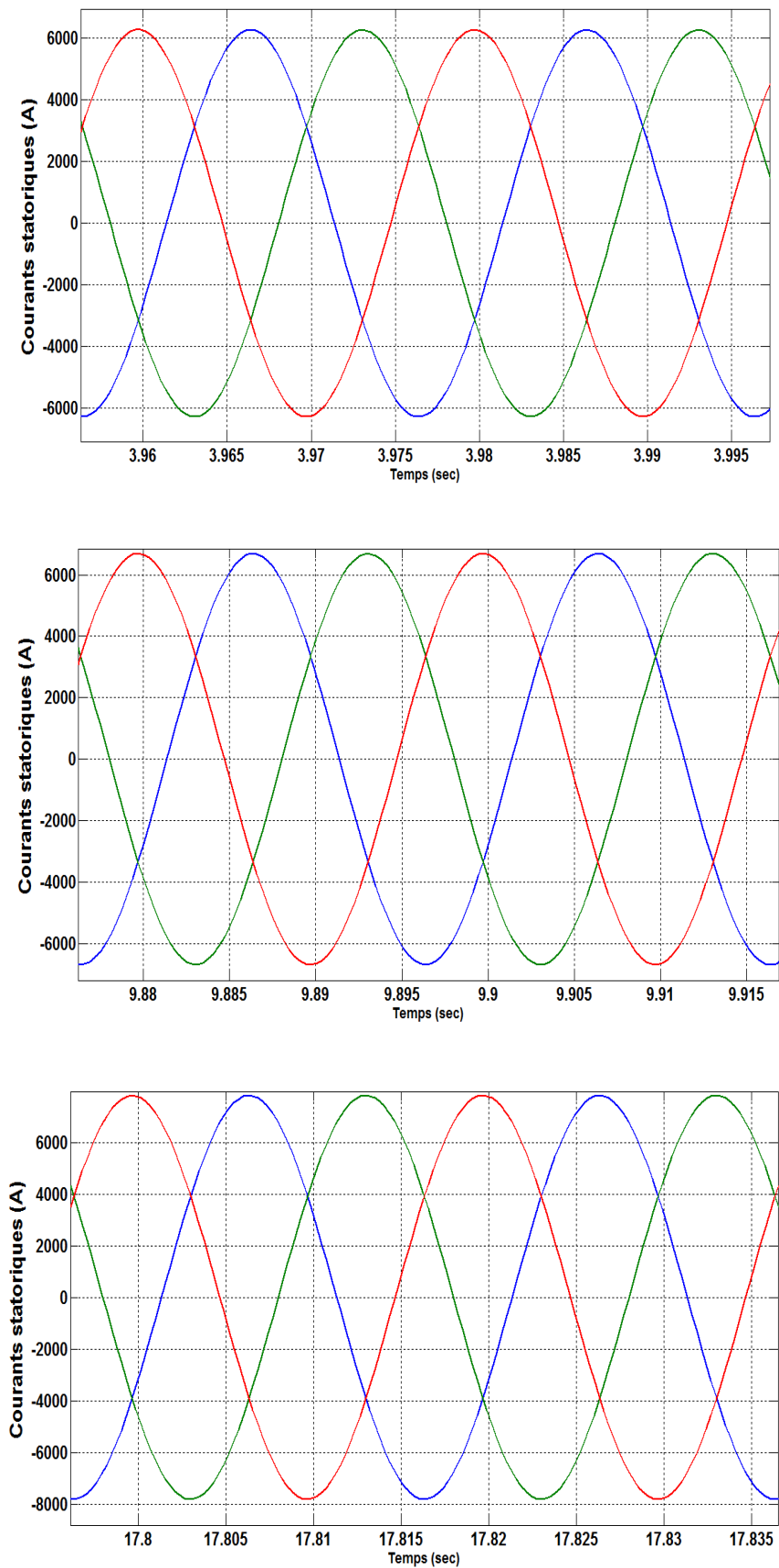


Figure III(18) : Courants statoriques du générateur (Zoom)

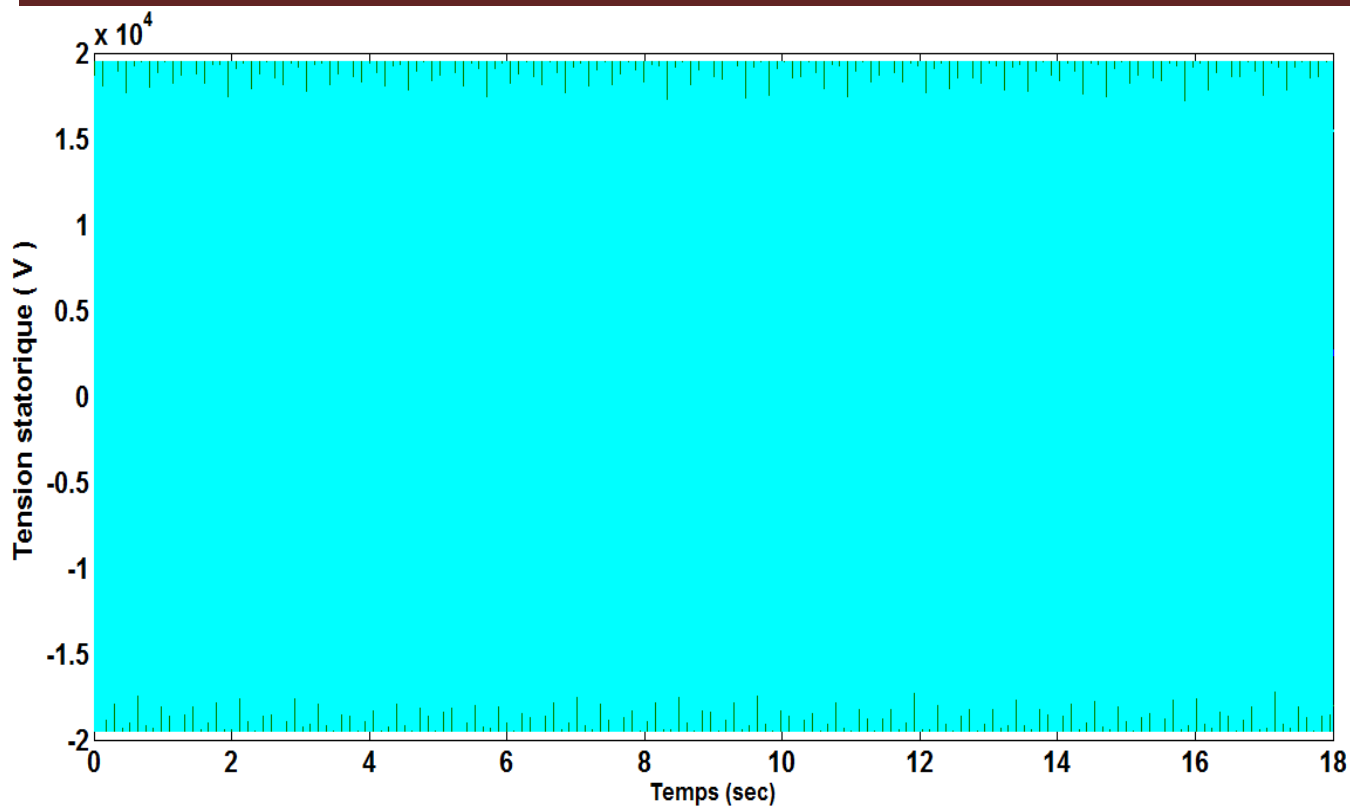


Figure III(19) : tensions statoriques du générateur

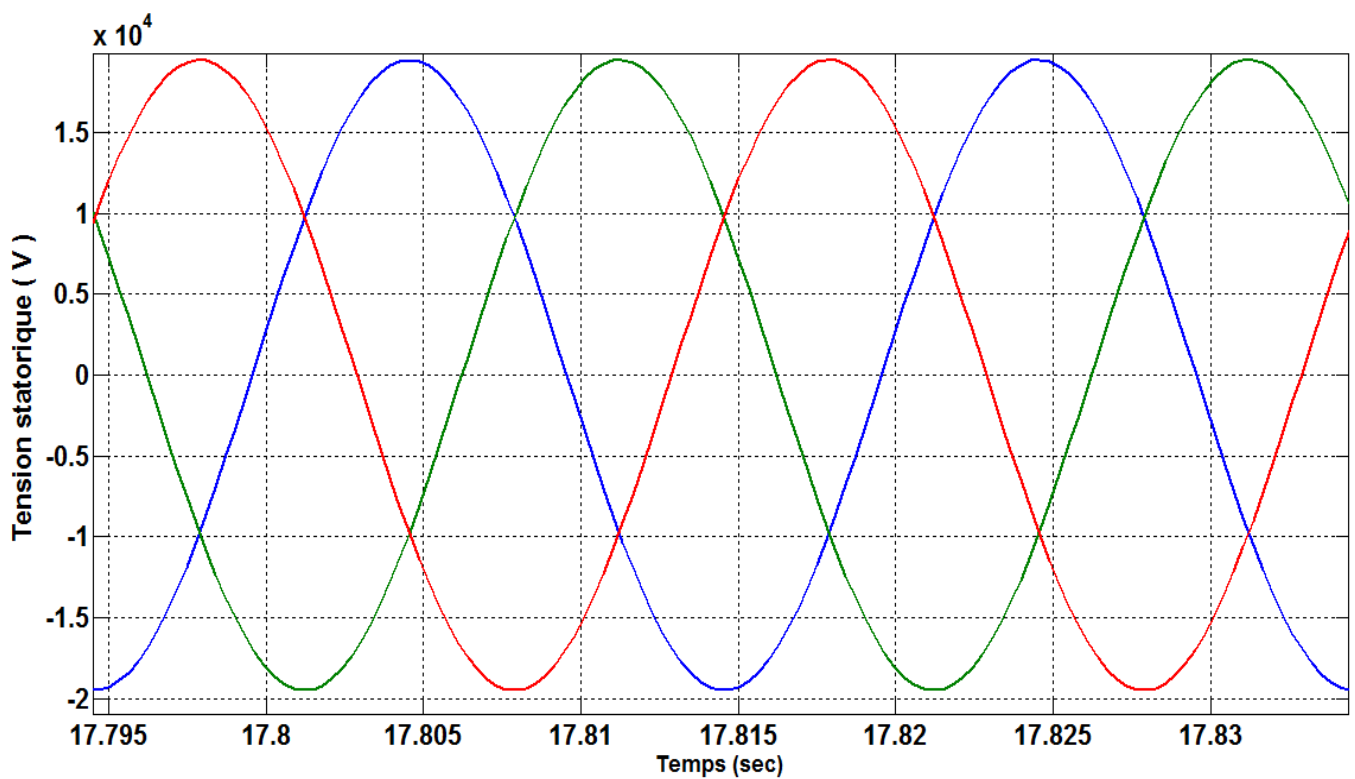


Figure III(20) : Tensions statoriques du générateur (Zoom)

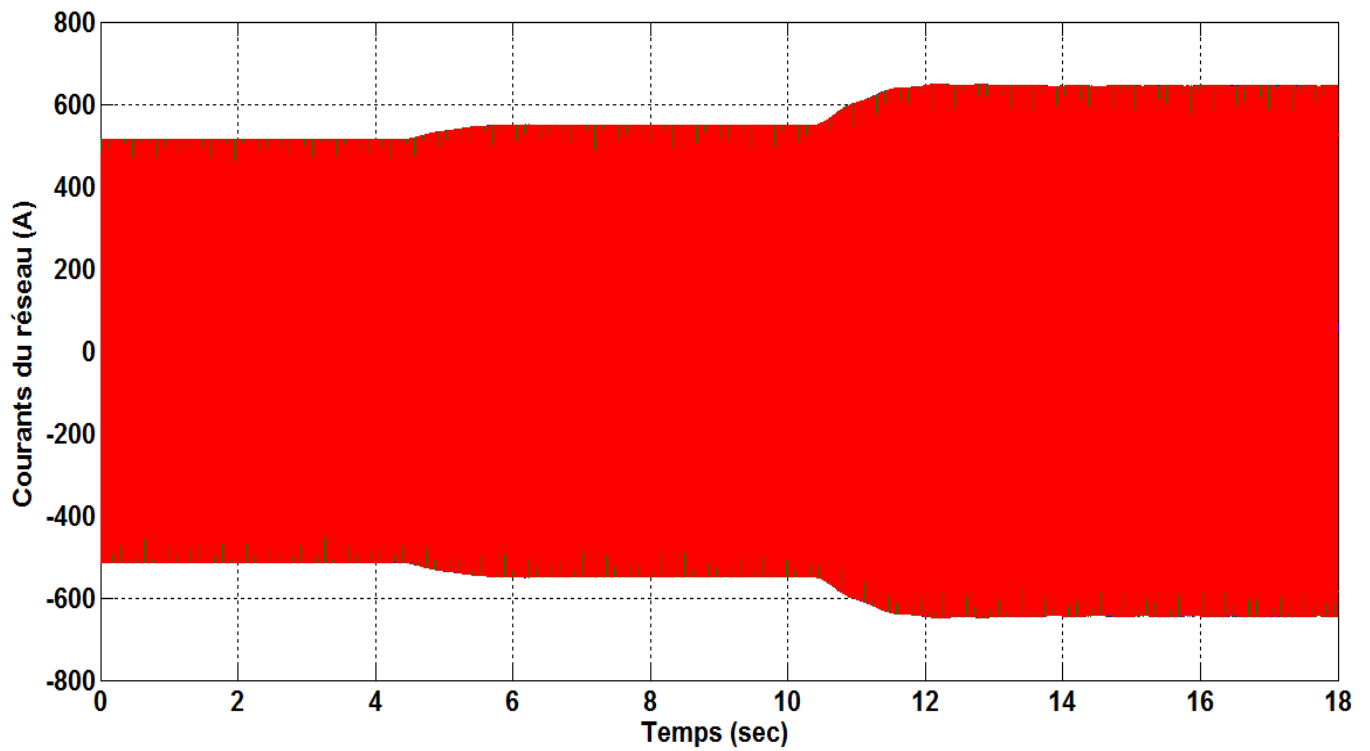


Figure III(21) : Courants du réseau électrique

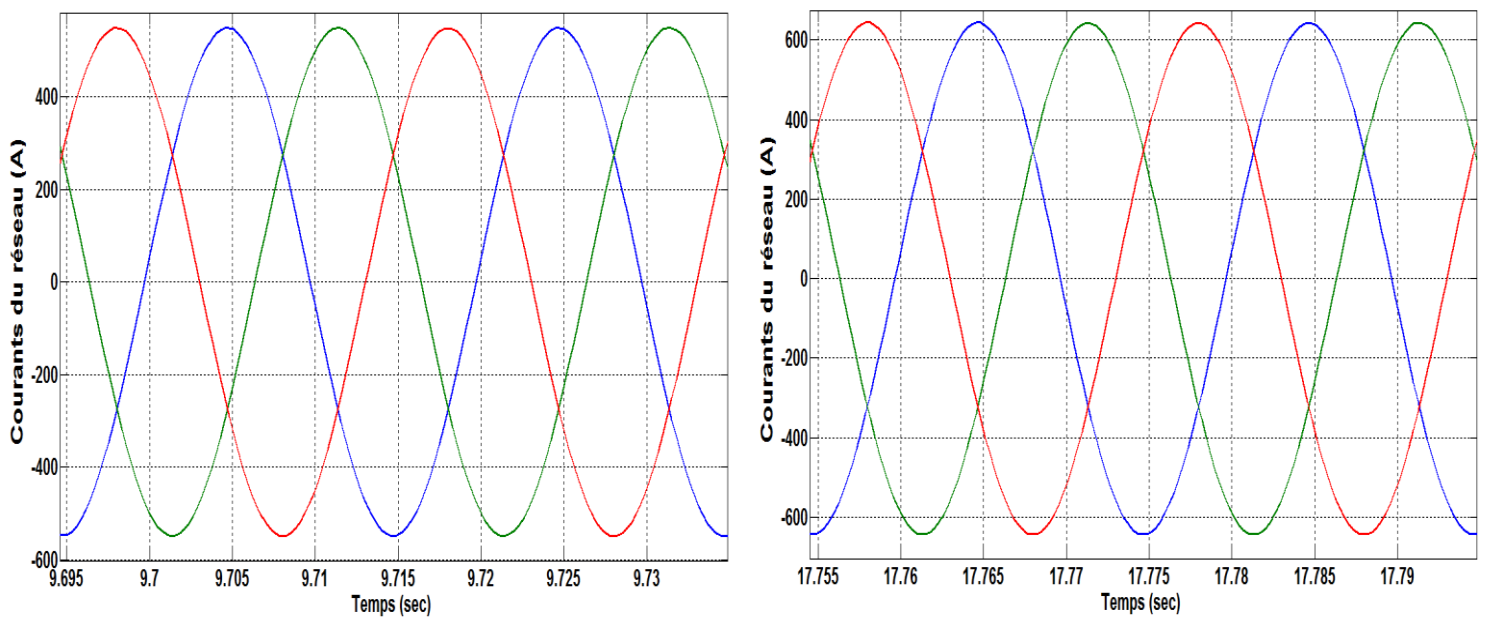


Figure III(22) : Courants du réseau électrique (Zoom)

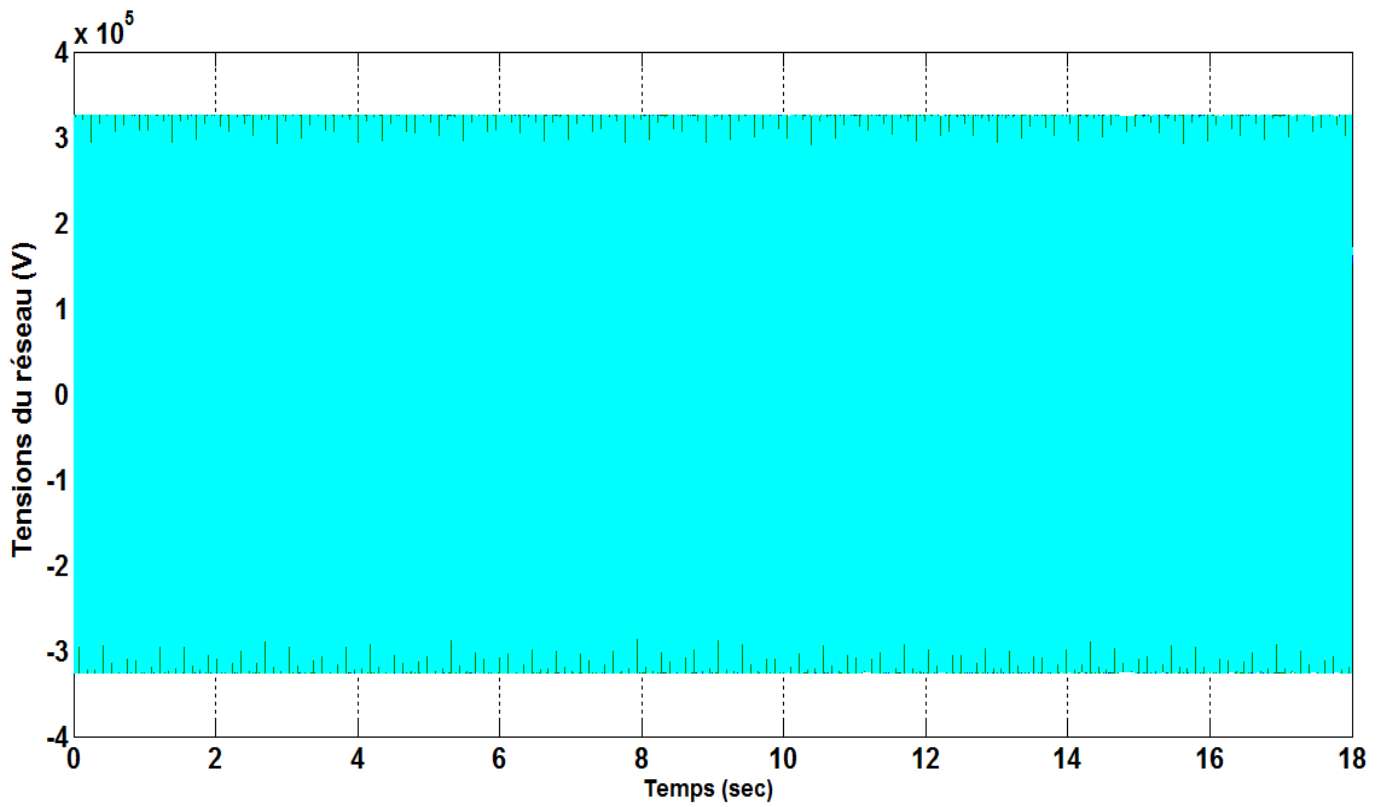


Figure III(23) : Tensions du réseau électrique

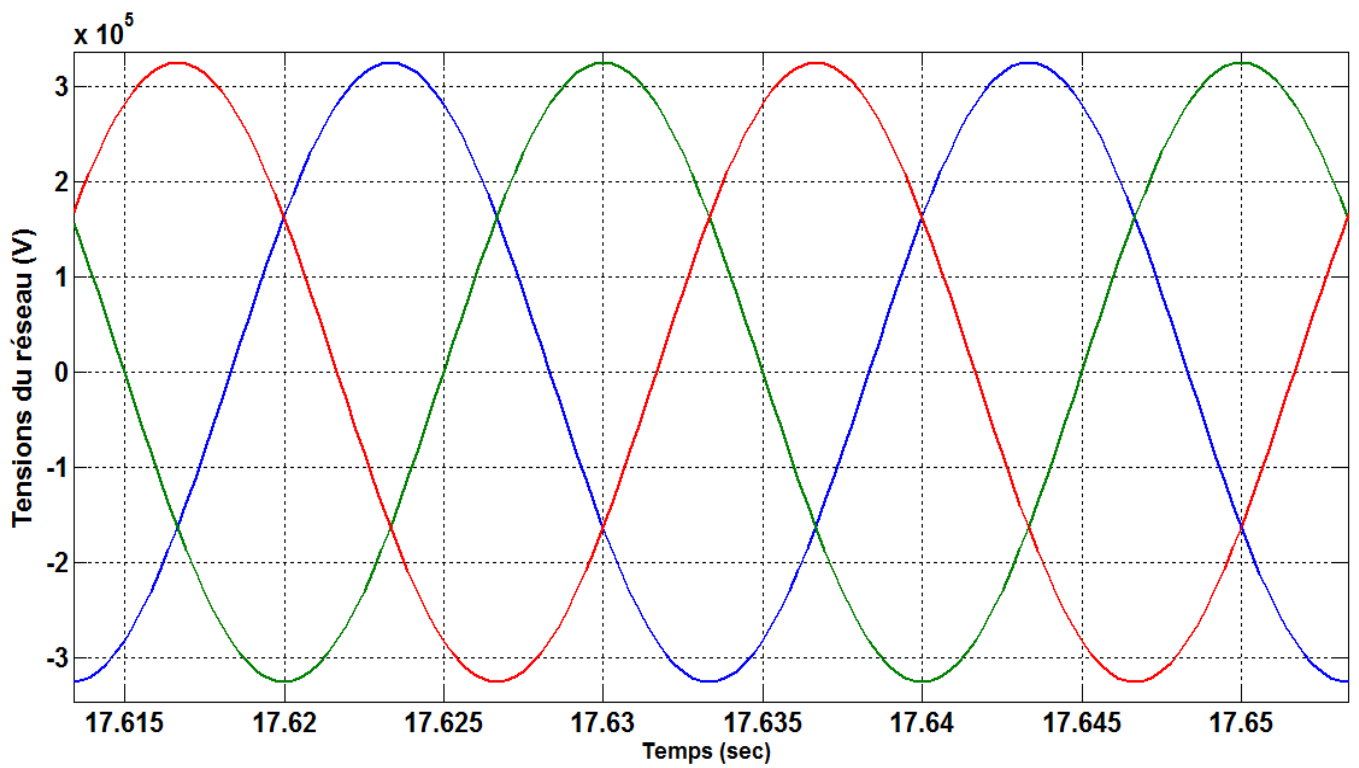


Figure III(24) : Tensions du réseau électrique (Zoom)

### III.5.1.2. Cas d'une augmentation suivie par une diminution de puissance

Les résultats de simulation présentés dans les figures (Fig. III(25) jusqu'à Fig III(35)) sont ceux obtenus dans le cas d'une augmentation suivie par une diminution de la puissance de référence ; le premier échelon varie de 112.5 MW à 120 MW et le deuxième varie de 120 MW à 90 MW.

Comme le cas précédent, l'hydro-générateur est toujours considéré opérationnel avec une puissance initiale de 112.5 MW qui représente 75% de la puissance nominale (150 MW), et une vitesse de synchronisme de 1500 tr/min correspondant à la fréquence du réseau électrique de 50 Hz.

On remarque que la puissance active produite par le l'hydro-générateur oscille autour de sa référence après une phase transitoire (Figure III(25)). Cette phase transitoire est principalement le résultat de la nature lente de la dynamique de l'hydro-turbine, et en particulier la limitation en vitesse du servomoteur gouvernant la vanne hydraulique alimentant la turbine en eau.

La puissance mécanique fournie par la turbine hydraulique au générateur synchrone prend toujours la même forme que la puissance active débitée, tout en étant légèrement supérieure à cette dernière (Figure III(26)). Cette différence est due aux pertes dans le générateur synchrone.

Une bonne concordance entre la vitesse rotorique et sa référence est noté comme le montre la figure III(27) avec une petite perturbation lors de la variation de la puissance active ((Figure III(28)).

Le couple mécanique fournie par la turbine hydraulique prend une forme proche à celle de la puissance mécanique, comme montré sur la figure III(29).

L'amplitude des courants statoriques, présentés dans la figure III(30) et la figure III(31), augmente lorsque la puissance active injectée au réseau augmente et vis-versa.

Les tensions statoriques, présentés dans la figure III(32) et la figure III(33), maintiennent leur amplitude constante même après variation de la puissance active débitée. En effet, cette tension est toujours imposée par le réseau électrique à travers le transformateur de couplage.

Les courants du réseau électrique (côté secondaire du transformateur), présentés dans la figure III(34), prennent une amplitude qui augmente avec l'augmentation de la puissance active injectée au réseau électrique et vis-versa.

Les tensions du réseau électrique (côté secondaire du transformateur) présentées dans la figure III(35), sont d'amplitude constante imposée par le réseau électrique.

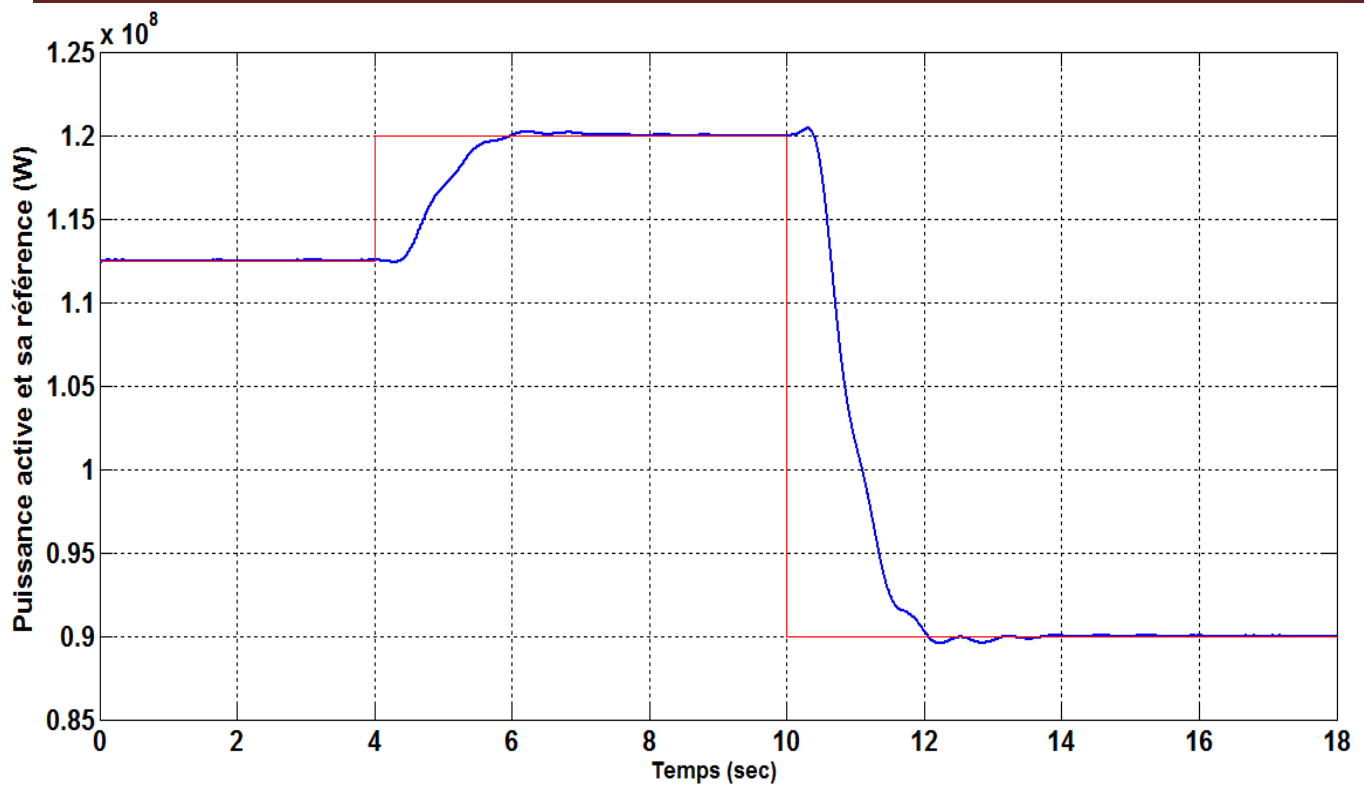


Figure III(25) : Puissance active débitée par le générateur et sa référence

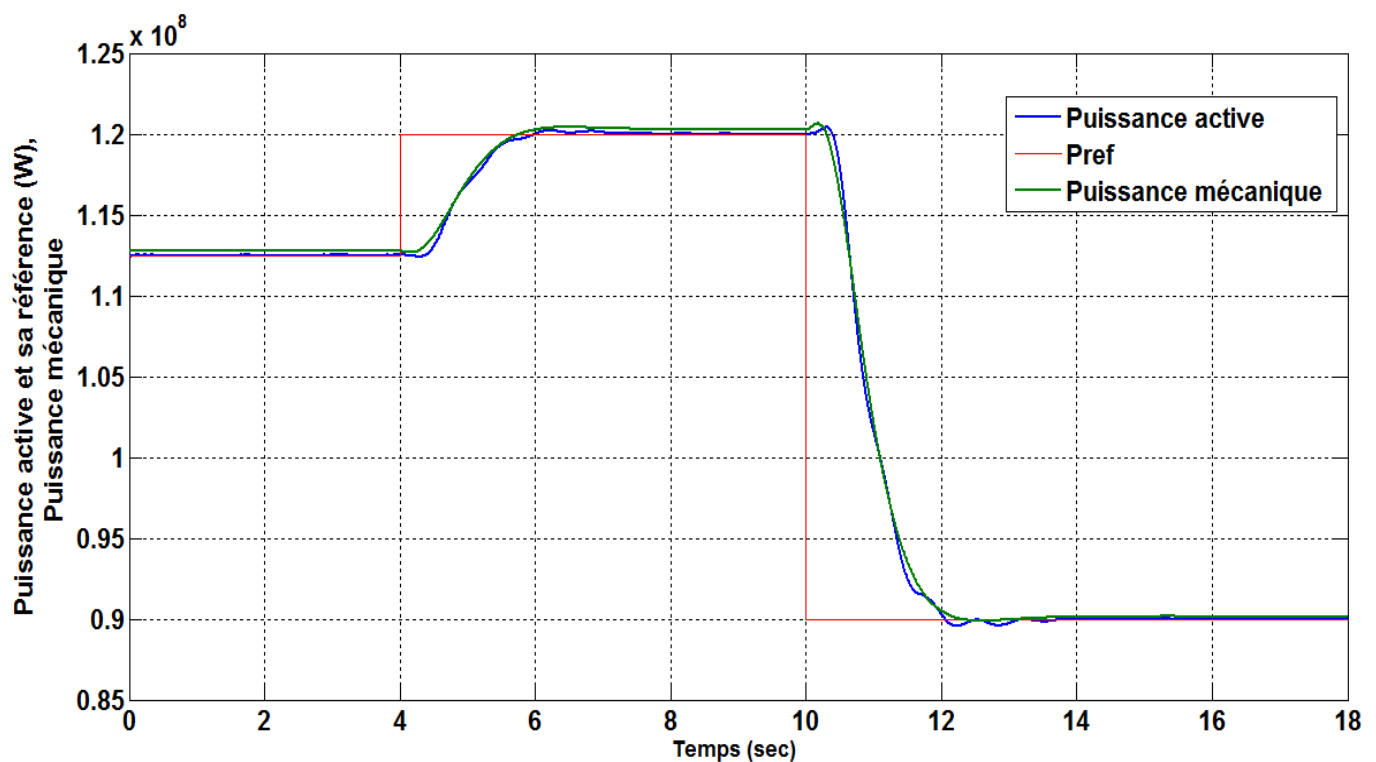


Figure III(26) : Puissance active débitée et sa référence avec la puissance mécanique de la turbine

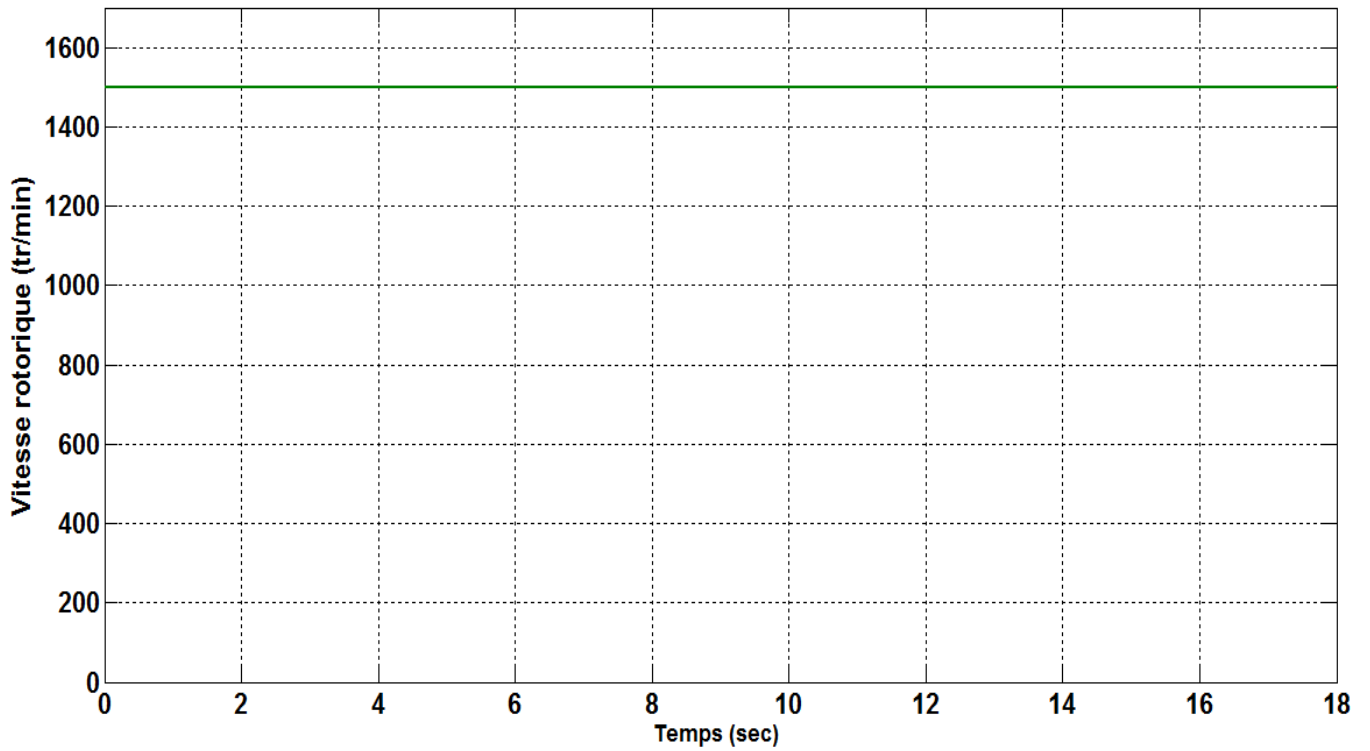


Figure III(27) : Vitesse rotorique du générateur synchrone

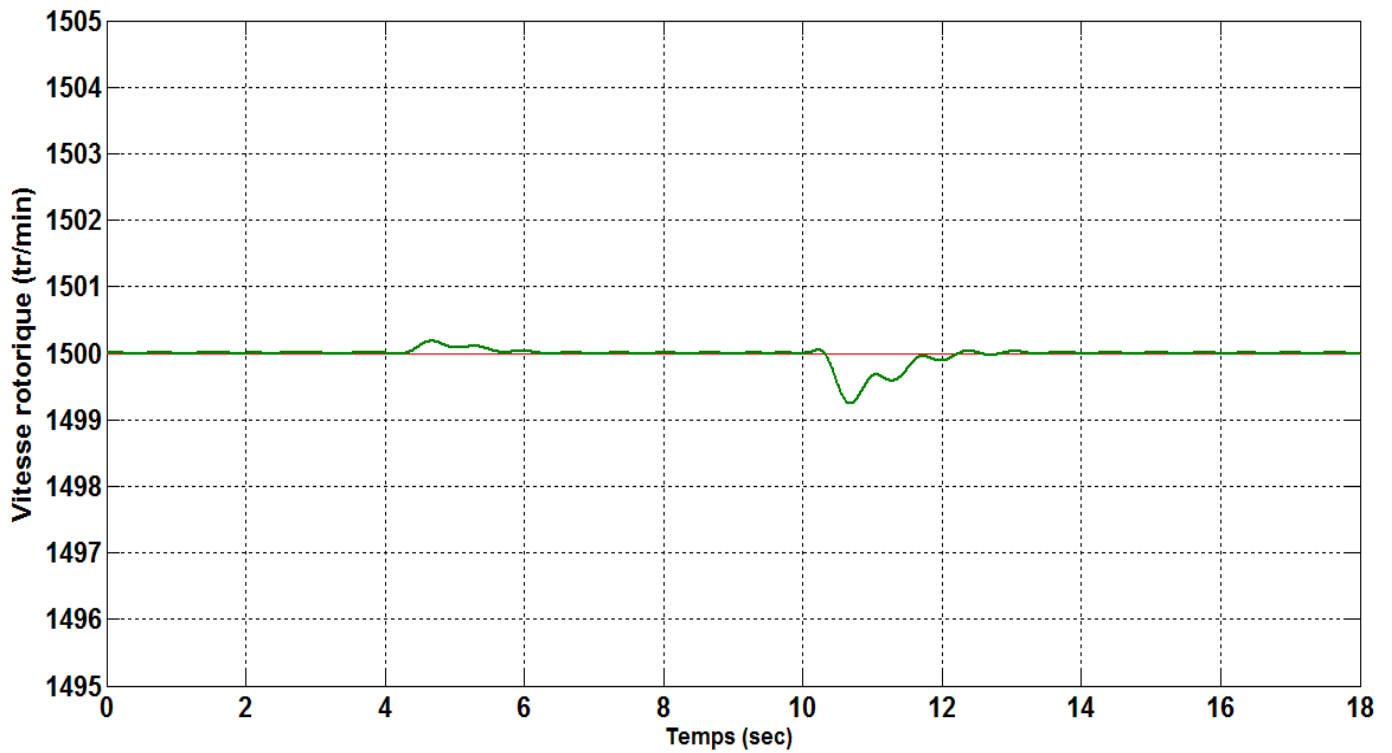


Figure III(28) : Vitesse rotorique du générateur synchrone (Zoom)

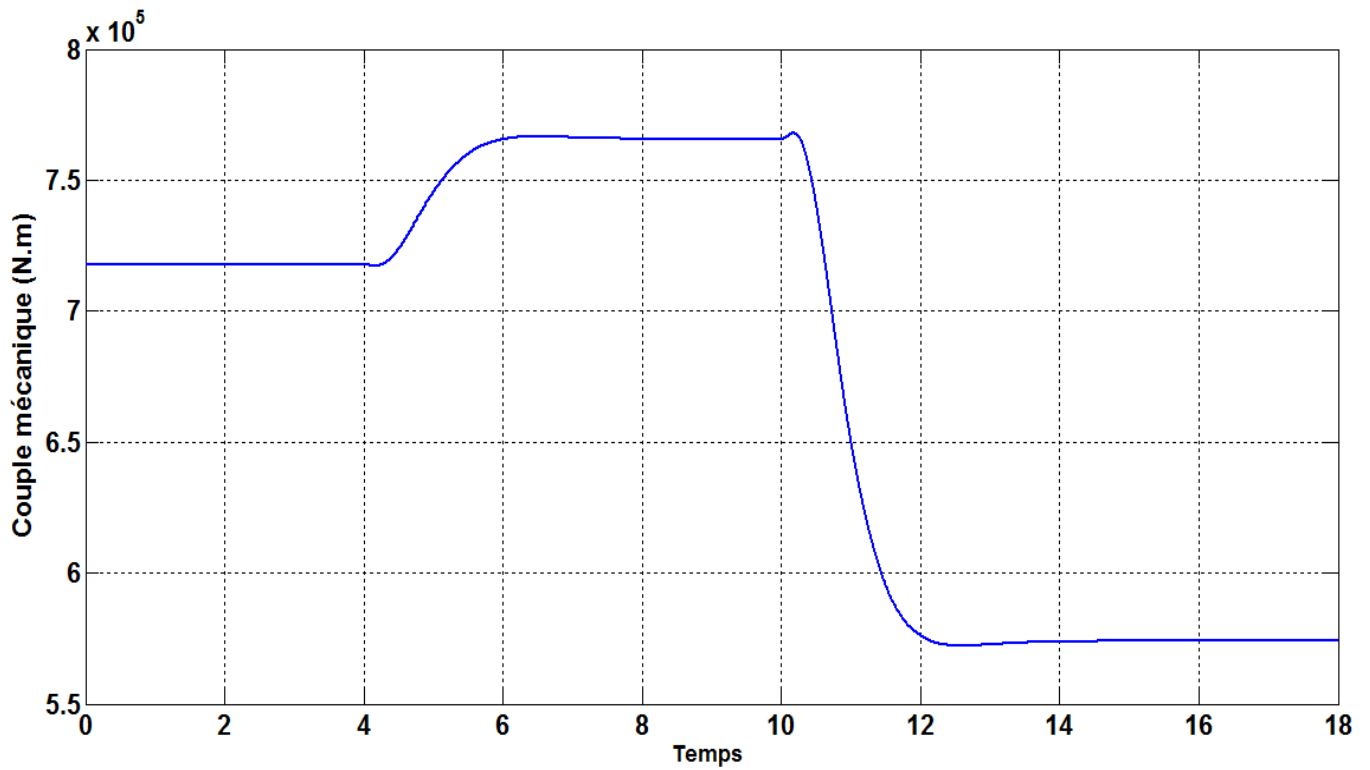


Figure III(29) : Couple mécanique fournie par la turbine hydraulique

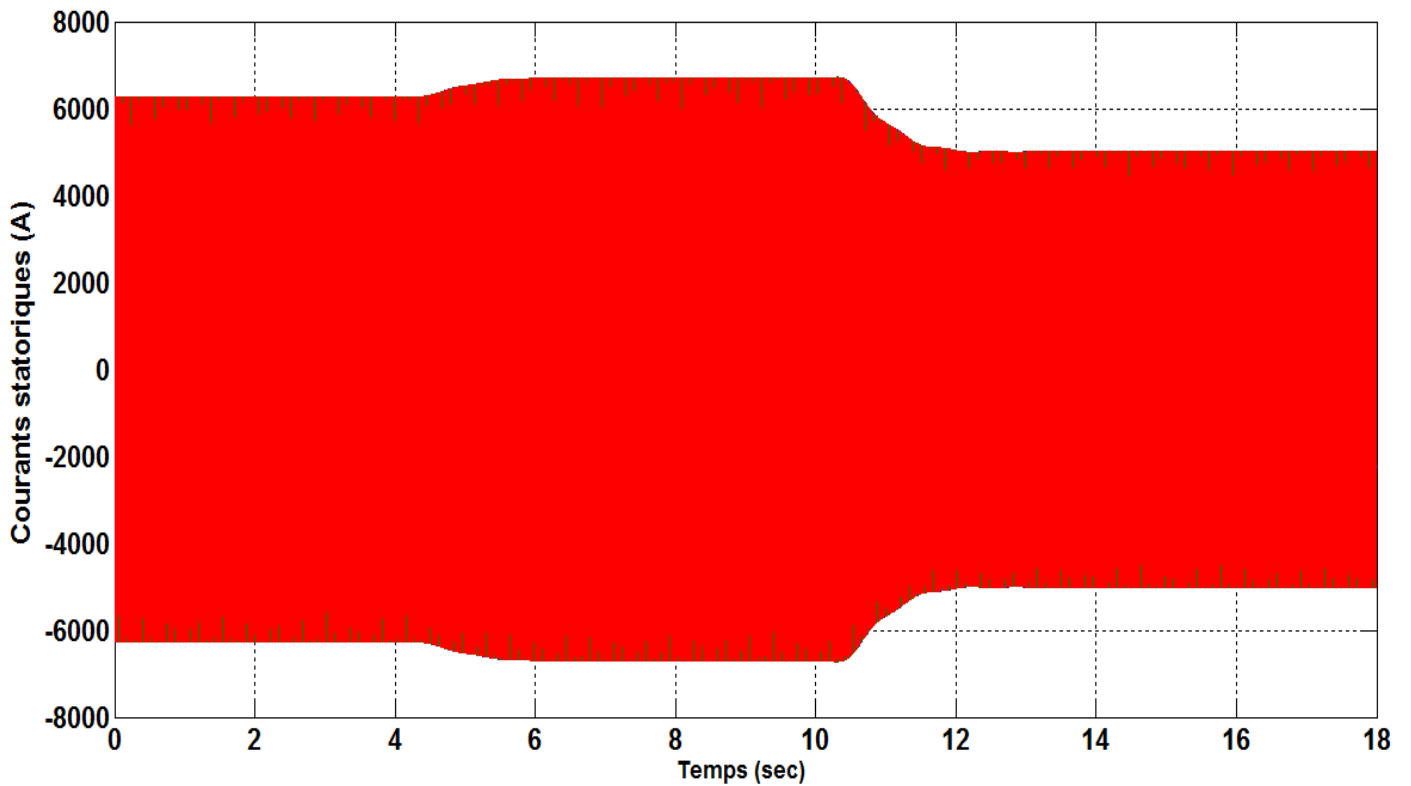


Figure III(30) : Courant statorique du générateur synchrone

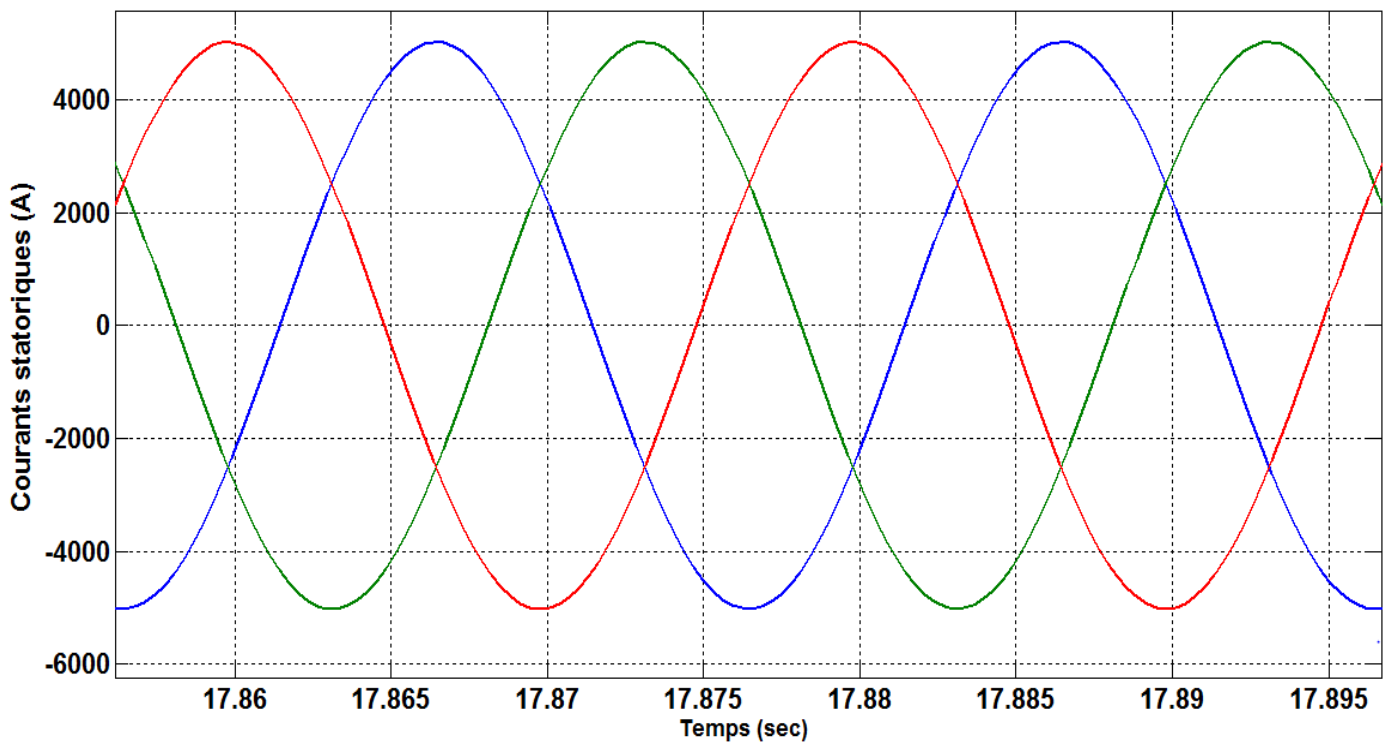
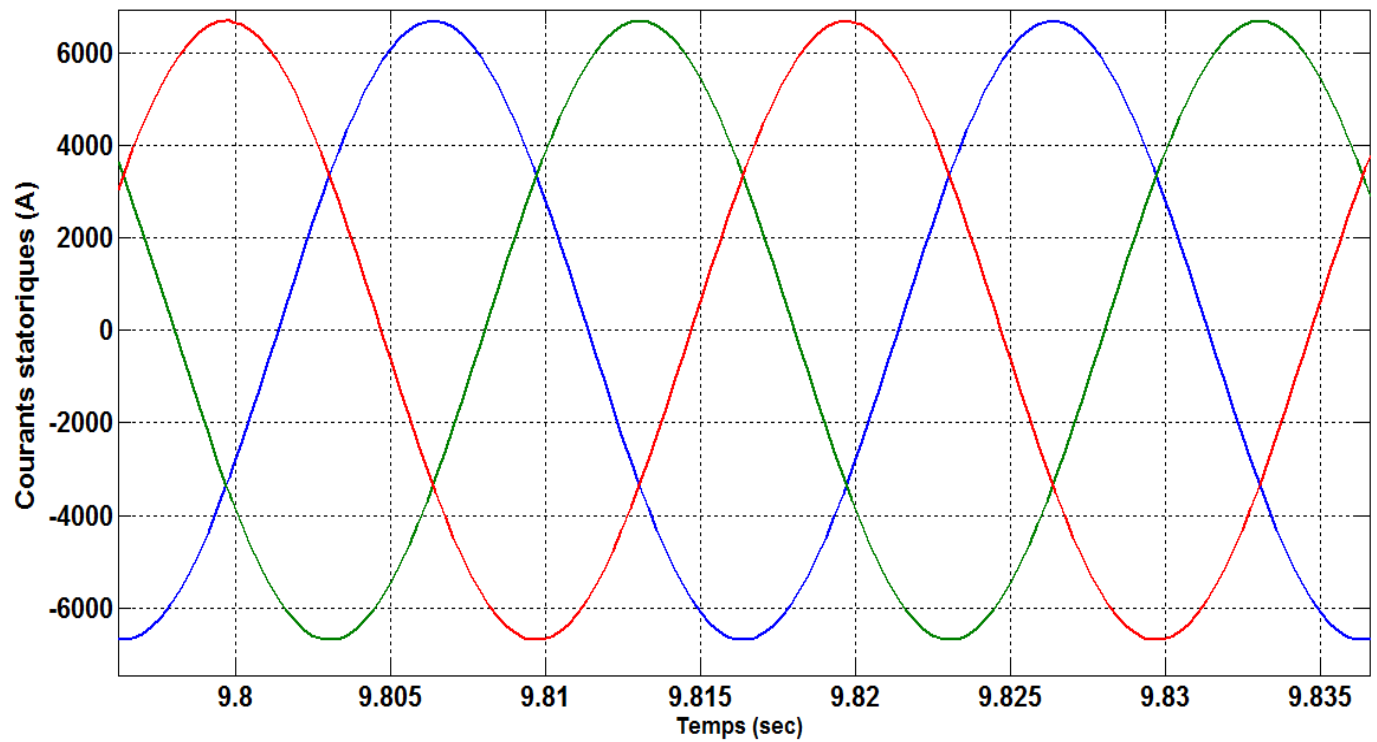


Figure III(31) : Courant statorique du générateur synchrone (Zoom)

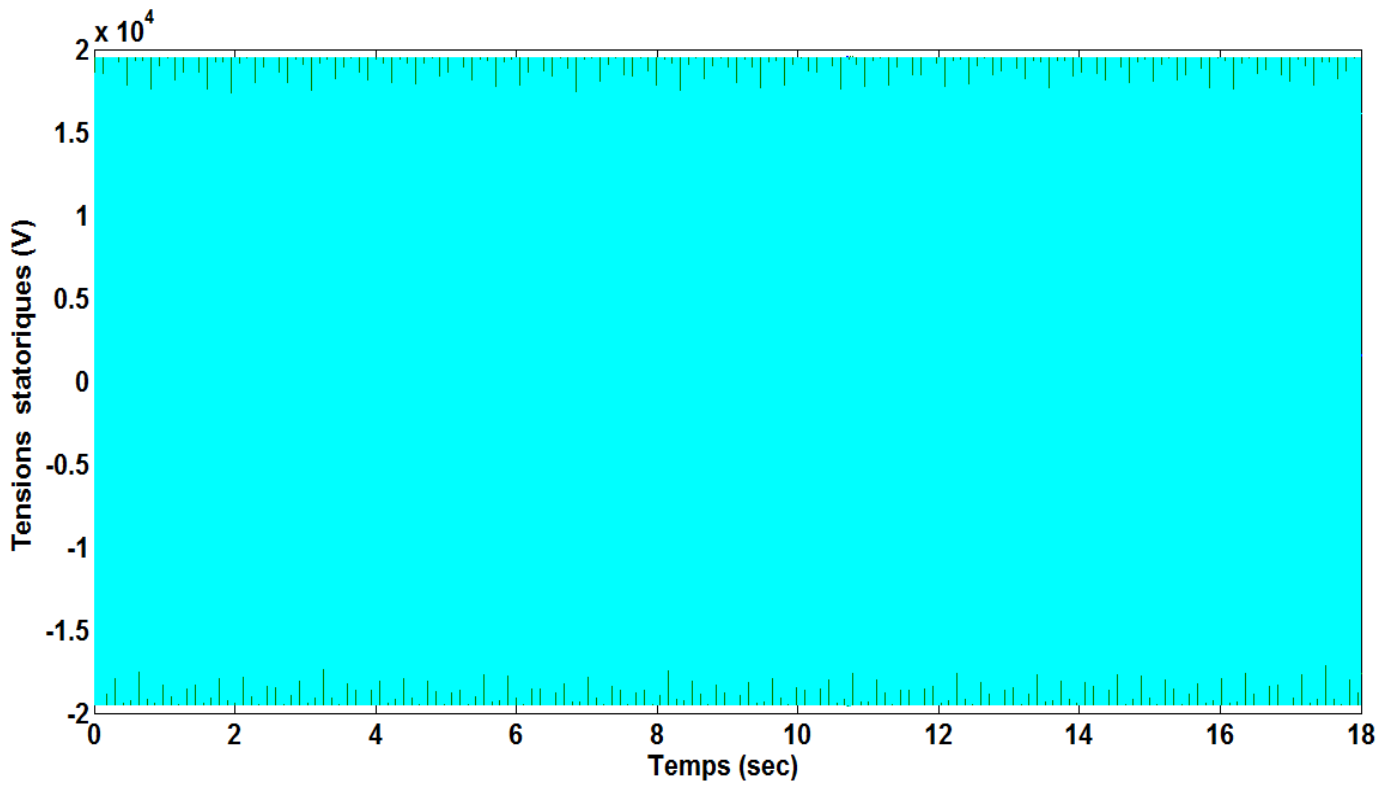


Figure III(32) : Tensions statoriques du générateur

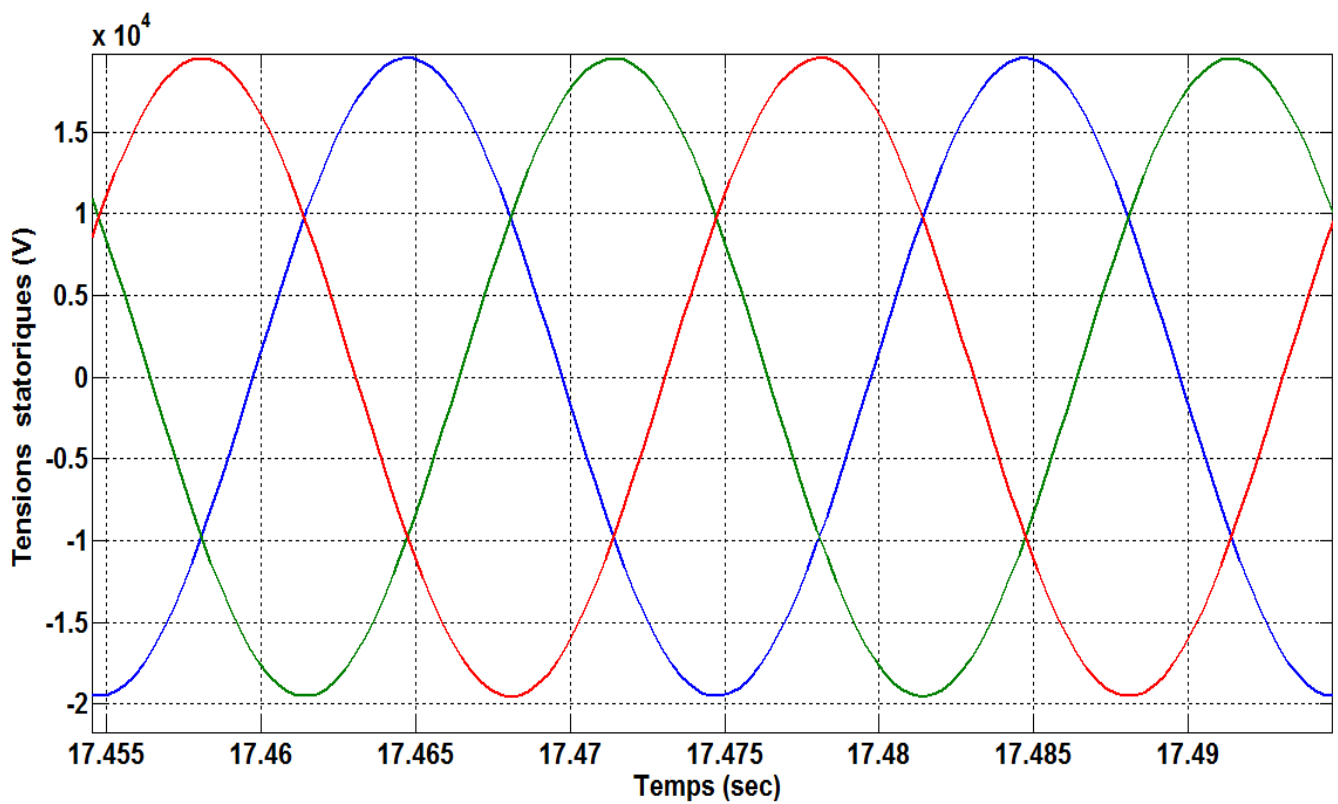


Figure III(33) : Tensions statoriques du générateur

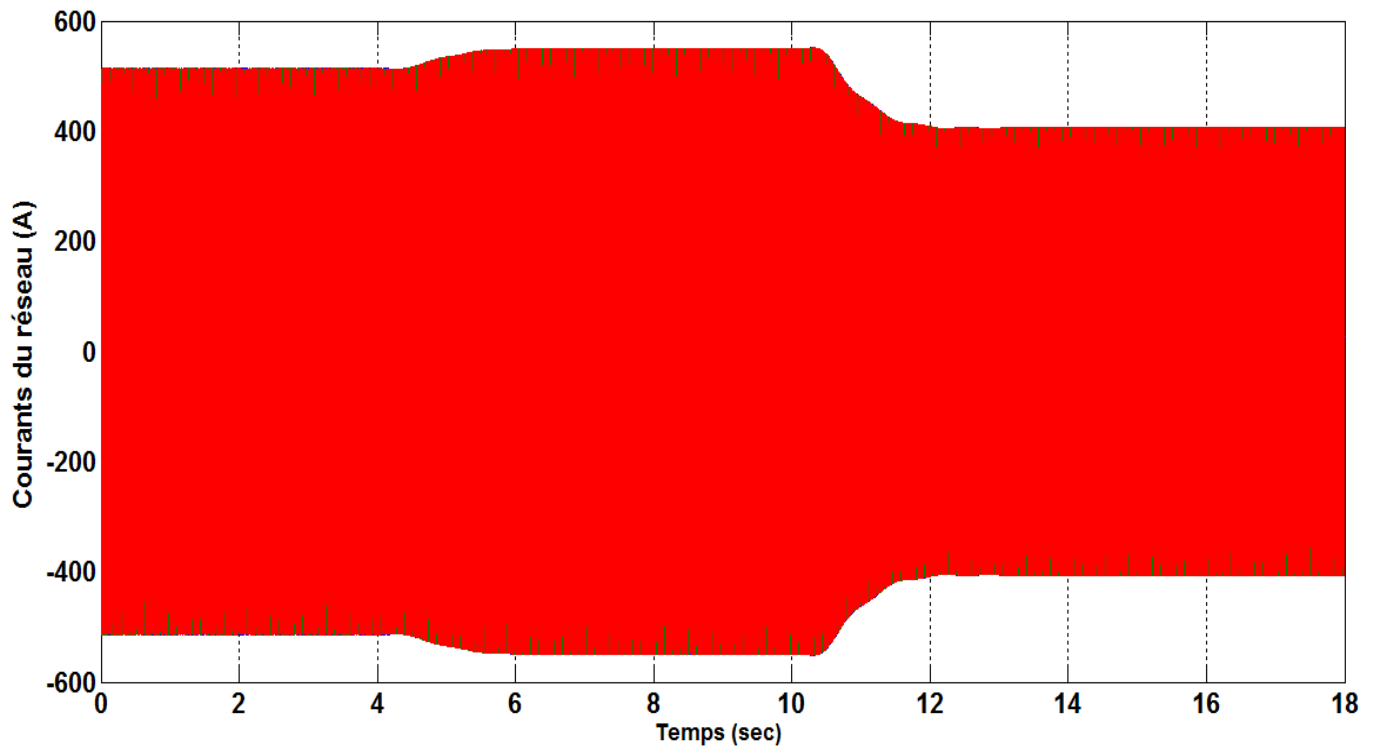


Figure III(34) : Courants du réseau électrique

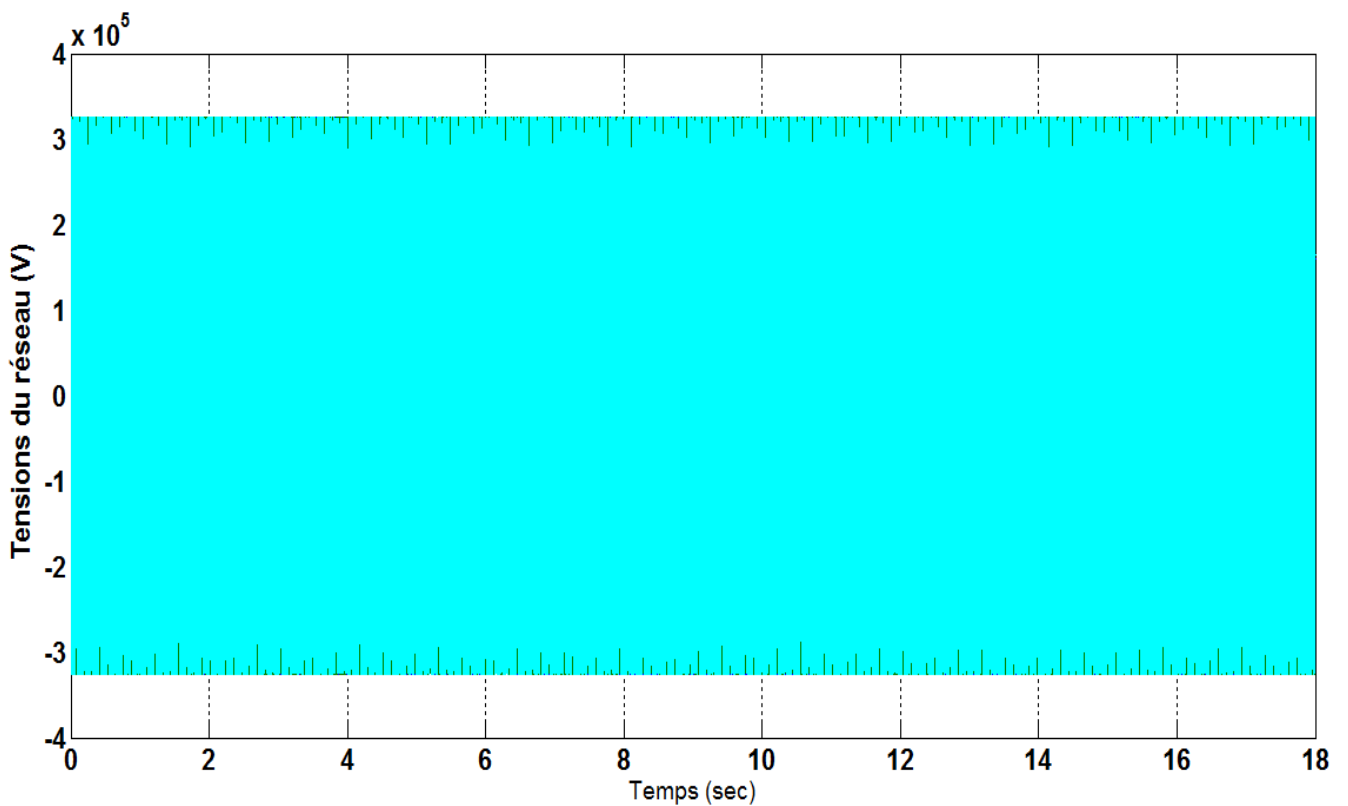


Figure III(35) : Tensions du réseau électrique

### **III.6. Conclusion**

La commande de la puissance active débitée par le générateur dans le réseau électrique est une tâche très importante dans les domaines de la production d'électricité, car elle permet le maintien de la stabilité du réseau et aussi la stabilité du générateur.

Dans ce chapitre nous avons étudié la régulation en vitesse et en puissance d'un système hydro-générateur raccordé à réseau électrique. La régulation en vitesse est garantie en utilisant un régulateur PI, alors que celle en puissance est assurée par la technique « permanent reference droop ». Les résultats de simulation ont manifesté que ces deux techniques de commande montrent des performances acceptables, vu que les systèmes hydro-générateurs ont généralement une dynamique limitée notamment dans le cas de la haute puissance.

### Conclusion générale

Les centrales de production d'énergie électrique, la plupart du temps, sont composées de deux systèmes. Le premier est un système mécanique transformant une énergie chimique (centrale thermique ou centrale diesel) ou cinétique (centrale hydraulique ou centrale éolienne) en énergie mécanique. Le deuxième système, souvent un générateur synchrone, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

L'objectif général de ce mémoire est l'étude de la commande de la puissance active débitée par un générateur synchrone à rotor bobiné couplé au réseau électrique. Cette commande est basée sur le contrôle du couple mécanique de la turbine en commandant de son débit d'eau, en utilisant une vanne hydraulique. Une deuxième boucle de régulation est établie pour asservir la vitesse rotative à sa référence correspondant à la fréquence du réseau électrique.

Après une description générale de l'association système d'entraîneur mécanique-générateur synchrone, et une présentation des différents systèmes d'entraînement mécanique (turbine, moteur diesel), on a choisi la turbine hydraulique comme système d'entraînement mécanique pour le générateur synchrone. Ensuite, on a exposé en détail la machine synchrone.

Ainsi nous avons modélisé toute la chaîne de la production d'électricité, en commençant par la modélisation turbine hydraulique. Ensuite, on a présenté la modélisation du générateur synchrone à rotor bobiné, dans un repère réel triphasé et dans le repère fictif de Park. On a aussi modélisé le transformateur de couplage et le réseau électrique. Suite à cette modélisation, on a établi la partie théorique de la commande en puissance active, par la méthode dite « permanent reference droop », et en vitesse en utilisant un régulateur PI. Enfin, et après simulation du système pour une vitesse de référence constante et une puissance active de référence variable, on a pu constater les performances du système vis-à-vis, ces exigences en vitesse et en puissance. Ces performances sont acceptables vu que le système hydraulique est généralement limité en qualité de réponse aux variations, ainsi que l'ampleur de la puissance du générateur (générateur de haute puissance).

Suite au travail réalisé dans ce mémoire, on propose les perspectives suivantes :

- Commande en puissance réactive via le contrôle de la tension d'excitation de rotor bobiné.
- Etude du diagnostic et la protection du système hydro-générateur.
- Amélioration des performances du système hydro-générateur, en adoptant d'autres techniques de commande.
- Considération d'autre type de système de production d'énergie électrique (moteur diesel-générateur, turbine à gaz-générateur, turbine éolienne-générateur, système hybride de production d'énergie électrique).
- Etude de la commande en puissance active d'un générateur synchrone à aimant permanent connecté au réseau avec d'autres types du système d'entraînement mécanique.

## Annexe

Les paramètres de simulation sont :

### Paramètres de la turbine hydraulique

$$\beta = 0.$$

$$T_w = 1.33 \text{ s.}$$

### Paramètres du Servomoteur

$$K_a = 3.33 ; T_a = 0.07 \text{ s.}$$

$$g_{\min} = 0.01 \text{ pu. ; } g_{\max} = 0.97 \text{ pu.}$$

$$V_{g\min} = -0.2 \text{ pu ; } V_{g\max} = 0.2 \text{ pu.}$$

### Paramètres du Régulateur PI

$$K_p = 0.163 ; K_i = 15.10 ;$$

$$R_p = 0.07$$

### Paramètres du générateur synchrone à rotor bobiné

$$V_n = 13.8 \text{ kV ; } S = 200 \text{ MVA ; } P = 150 \text{ MW ; } f = 50 \text{ Hz ; } p = 2 ;$$

$$R_s = 0.135 \Omega, L_d = 0.085 \text{ H, } L_q = 0.042 \text{ H ; } R_f = 1.95 \Omega ; V_f = 125 \text{ V ; } J = 0.006 \text{ Kg.m}^2$$

### Paramètres du transformateur

$$S = 210 \text{ MVA ; } f = 50 \text{ Hz ; } V_1 = 13.8 \text{ kV ; } V_2 = 230 \text{ kV ; } R_1 = 0.0074 \Omega ;$$

$$L_1 = 0.0007 \text{ H ; } R_2 = 0.68 \Omega ; L_2 = 0.064 \text{ H.}$$

### Paramètres du réseau électrique

$$R_r = 0.94 \Omega ; L_r = 0.03 \text{ H, } V_r = 230 \text{ kV.}$$

## Référence bibliographique

- [1] David Blaise Sanyo, « Modélisation et caractérisation d'une turbine hydraulique de tesla », Mémoire de master, Institue internationale de l'eau et l'environnement, France, 2011.
- [2] Théodore wildi, Gilbert Sybille «Electrotechnique quatrième édition », Livre, Edition de Boeck, Canada, 2005
- [3] Benchouia mohamed Toufik, « commande de la machine à courants alternatif par différents techniques de contrôle avancées » thèse de doctorat, Université de Biskra, Algérie,
- [5] B Jérémy, MD Thibault, « Comment produire l'électricité », Journal de technologie, Canada ,2009.
- [6] Siemens, «Turbines à vapeur pré-étudiées», Publication Siemens 2007
- [7] Benidir Abdelaali, «Calcul énergétique de l'installation hybride thermique pour la production d'électricité», Mémoire de master, Université de Biskra, Algérie, 2013.
- [8] Laissaoui mohammed, «Amélioration des performances d'une installation de turbine à gaz par refroidissement de l'air d'admission », Mémoire de magister, Université de Boumerdas, Algérie, 2012.
- [9] Mosli Hassen, Ben Seddik Djamal, «étude de turbine à gaz MS5002B», Mémoire de master professionnel, Université de Ouargla, Algérie, 2013.
- [10] Michel Moliere, «Turbine à gaz stationnaire technologie avancée », fichier technique de Général électrique à Université Marie et Curie Paris 2013.
- [11] Messalti sabir, « Production de l'électricité par les énergies hydrauliques », Cours, 2016.
- [12] Nasser Mohammed, «Supervision de source de production d'électricité hybride Hydraulique/Eolienne dans les réseaux interconnecté », Thèse de doctorat, Ecole nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Lille, France, 2011.
- [13] Hamacha Samira, «Etude et commande d'une Eolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanents », Mémoire d'ingénieur, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, 2013.
- [14] Saki Ali, Belaidi Mourad «Etude d'un Générateur asynchrone dans la production d'énergie électrique par éolienne», Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [15] Feddaoui Omar, « Contribution à l'étude des systèmes de génération hybride », Mémoire de magister, Université de Souk-Ahras, Algérie, 2014.
- [16] M. Desbazeille, «Diagnostic de groupes électrogènes diesel par analyse de la vitesse de rotation du vilebrequin», Thèse de doctorat, Université Jean Monnet, France, 2010.
- [17] Ananne Adel, «Analyse de comportement d'un moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable», Mémoire de magister, Université de Annaba, Algérie, 2010.

## Référence bibliographique

---

- [18] Bouzid Saadi, «Modélisation et amélioration de la sureté de fonctionnement d'un turboalternateur», Mémoire de master, université de Msila, Algérie, 2015.
- [19] Chibani Aziz, «Etude pour la conception d'une machine synchrone à rotor externe», Mémoire d'ingénieur, Université de Batna, Algérie, 2011.
- [20] D. Fodorean, A. Miraoui, «Dimensionnement rapide des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) », Techniques de l'ingénieur (D3554), Novembre, 2009.
- [21] Ould mouhamed ibrahim, «Etude d'un turbo-alternateur, modélisation et simulation de l'alternateur», Mémoire de master, Université de Msila, Algérie, 2010.
- [22] Bechkaoui Amar, « Diagnostic des défauts dans les machines synchrones à vitesse variable», Thèse de doctorat, Université de Annaba, Algérie, 2016.
- [23] S. Bachir, S. Tnani, J. C. Trigeassou, G. Champenois, « Diagnosis by parameter estimation of stator and rotor faults occurring in induction machines», IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, Issue 3, pp. 963 – 972, Jun. 2006.
- [24] Kaidi Ismahane, «Contribution à la mise en place d'un contrôle sante intégré sur un turboalternateur», Mémoire de magister, Université de Annaba, Algérie, 2009.
- [25] Moustafa Al ait, «Modélisation des machines synchrones à pôles saillants pour les études de la stabilité électromécanique», Mémoire d'ingénieur, Université Libanaise, Liban, 2013.
- [26] Saada Adil et Roubéche Toufik, «Etude de la protection des alternateurs», Mémoire d'ingénieur, Université de Msila, 2005.
- [27] Elkali Laid, «Etude et modélisation d'un turbo-alternateur», Mémoire de master, Université de Msila, Algérie, 2014.
- [28] Géorge Karinoitkis, « modélisation dynamique des systèmes électrique insulaires incluant des énergies renouvelable hydraulique-éolienne », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 23, N°1, pp. 245-197, 2013.
- [29] Abdallah Barkat, Salim Tnani, « analyses of synchronous machine modeling for simulation », Journal Simulation modelling practice and theory, Vol.145, N°18, pp.1382-1396, année 2010.
- [30] S. Belakehal, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla, «Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 13 N°1, pp 149-161 année 2010.
- [31] Lalouani Mohamed «Commande d'un aérogénérateur synchrone raccordé au réseau électrique», Mémoire de master, Université de Msila, Algérie, 2015.
- [32] Rekik Badri «Amélioration de la stabilité des réseaux électriques part transformateur déphaseur», Thèse de doctorat, Université de Annaba, Algérie, 2016.

## Référence bibliographique

---

[33] LAALA Zakaria « Commande d'un SVC pour le contrôle de la tension des lignes de transports d'énergie électrique », Mémoire de master, Université de Msila, Algérie, 2016.

[34] SONELGAZ, « Alternateurs fonctionnement et exploitation », Fichier technique, sonelgaz 2009.

[35] FRAHTIA Saad, « Calcul d'écoulement de puissance dans les réseaux électrique lors de l'intégration des fermes éolienne et des dispositifs FACTS », Mémoire de master, Université de Msila, Algérie, 2013.

[36] LUZ Alexandra lucero, « Hydro-turbine and Governor modelling», Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway 2010.

[37] Khaled Ouramadane, «Modélisation et optimisation du groupe turbine-alternateur Hydro-Québec», Mémoire de maitrise, Université de Québec, Canada, 2015.

## **Résumé :**

Dans ce travail, nous avons étudié la commande en puissance d'un système de production hydraulique d'électricité connecté au réseau électrique. Cette commande, en puissance active, est basée sur l'imposition du couple mécanique de la turbine hydraulique raccordée au générateur synchrone, tout en maintenant sa vitesse constant via un régulateur de vitesse de type PI. La simulation du system a montré une concordance acceptable, en régime permanent, entre la puissance active, la vitesse rotorique et leurs références. La phase transitoire lors des variations de la puissance active de référence est principalement due à la nature lente de dynamique de la l'hydro-turbine.

## **Mots clés :**

Générateur synchrone, turbine hydraulique, servomoteur, commande en puissance, commande vitesse.

## **ملخص:**

في هذه المذكرة قمنا بدراسة التحكم في الطاقة المنتجة لنظام إنتاج الطاقة الكهربائية الهيدروليكي و الموصول بالشبكة الكهربائية نظام التحكم هذا يعتمد على فرض عزم ميكانيكي متغير حسب الطاقة المرجوة على المولد الكهربائي المتزامن من طرف العنفة الهيدروليكية, كما يرتكز هذا النظام أيضا على تعديل سرعة المولد الكهربائي وجعلها ثابتة باستخدام معدل السرعة . قمنا بمحاكاة نظام التحكم و لاحظنا أن قيمة الطاقة المنتجة و سرعة دوران المولد تتبع قيمها المرجعية المقدمة بعد نظام انتقالي قصير ثم استنتجنا أن التغيرات التي تطرأ على منحنى الطاقة و السرعة في النظام الانتقالي راجعة إلى ردة الفعل الثقيلة للعنفة الهيدروليكية.

## **الكلمات المفتاحية:**

المولد التزامني, العنفة الهيدروليكية, التحكم في الطاقة, التحكم في السرعة