

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Ecole Nationale Polytechnique**  
**Département d'Electrotechnique**

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



**Mémoire de projet de fin d'étude**  
**pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique**

Thème

**MODÉLISATION ET OPTIMISATION DU SYSTÈME D'EXCITATION**  
**DU GROUPE TURBINE-ALTERNATEUR**

Présenté par

**Abderrahmane ZITOUNI et Oussama BOUCHINA**

Sous la direction de **Pr. Kamel Bouhrara**

Présenté et soutenu publiquement le 26 juin 2023

**Composition du Jury:**

Président :	M. Lazhari NEZLI	Professeur	ENP
Promoteur:	M. Mohammed MALKI	Cadre Ingénieur	Sonelgaz
Co-Promoteur :	M. Kamel BOUGHRARA	Professeur	ENP
Examineur :	M. Omar TOUHAMI	Professeur	ENP

**ENP 2023**



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**Ecole Nationale Polytechnique**  
**Département d'Electrotechnique**

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



**Mémoire de projet de fin d'étude**  
**pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique**

Thème

**MODÉLISATION ET OPTIMISATION DU SYSTÈME D'EXCITATION**  
**DU GROUPE TURBINE-ALTERNATEUR**

Présenté par

**Abderrahmane ZITOUNI et Oussama BOUCHINA**

Sous la direction de **Pr. Kamel Boughrara**

Présenté et soutenu publiquement le 26 juin 2023

**Composition du Jury:**

Président :	M. Lazhari NEZLI	Professeur	ENP
Promoteur:	M. Mohammed MALKI	Cadre Ingénieur	Sonelgaz
Co-Promoteur :	M. Kamel BOUGHRARA	Professeur	ENP
Examineur :	M. Omar TOUHAMI	Professeur	ENP

ENP 2023

## ملخص

كان الهدف من هذا العمل هو تحسين نظام تنظيم الجهد (AVR) لمولد متزامن باستخدام الخوارزميات الجينية (AG). لهذا الغرض ، تم تطوير وتنفيذ نموذج كامل باستخدام برنامج Matlab / Simulink ، بناءً على المعادلات الكهربائية والميكانيكية لمجموعة المولد التوربيني. سمحت لنا استخدام الخوارزميات الجينية من تحسين معاملات تنظيم الجهد من أجل الحصول على أداء محسن. كانت النتائج التي تم الحصول عليها مع هذا النموذج مرضية ، مما يدل على فعالية النهج القائم على الخوارزميات الجينية لتنظيم الجهد للمولدات المتزامنة.

كلمات مفتاحية : مولد , نموذج , Matlab/Simulink, AVR, AG.

## Abstract

The objective of this work was to improve a voltage regulation system (AVR) for a synchronous generator using genetic algorithms (GA). For this, a complete model was developed and implemented using Matlab/Simulink software, based on the electrical and mechanical equations of the turbo-alternator group. The use of genetic algorithms has made it possible to optimize the voltage regulation parameters in order to obtain improved performance. The results obtained with this model were satisfactory, thus demonstrating the effectiveness of the approach based on genetic algorithms for the voltage regulation of synchronous generators.

**Key-words:** Turbo-Generator, model, AVR, GA, Matlab / Simulink.

## Résumé

L'objectif de ce travail était d'améliorer un système de régulation de tension (AVR) pour un générateur synchrone en utilisant des algorithmes génétiques (AG). Pour cela, un modèle complet a été développé et implémenté à l'aide du logiciel Matlab/Simulink, en se basant sur les équations électriques et mécaniques du groupe turboalternateur. L'utilisation des algorithmes génétiques a permis d'optimiser les paramètres de régulation de tension afin d'obtenir des performances améliorées. Les résultats obtenus avec ce modèle ont été satisfaisants, démontrant ainsi l'efficacité de l'approche basée sur les algorithmes génétiques pour la régulation de tension des générateurs synchrones.

**Mots-Clés :** Turboalternateur, Modèle, AVR, AG, Matlab / Simulink.

# *Remerciements*

Je tiens à exprimer ma gratitude envers le Dieu tout puissant et miséricordieux, qui m'a accordé la force et les capacités nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à notre chef de département, M. K. Boughrara, Professeur à l'École Nationale Polytechnique. Il a toujours été présent pour m'apporter son aide et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire. Grâce à lui, je n'ai jamais manqué de ressources et de conseils avisés.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers tous les enseignants qui ont contribué à ma formation, en particulier ceux du département d'Électrotechnique. Leurs connaissances et leur dévouement ont grandement enrichi mon parcours académique.

Un chaleureux merci à mes camarades et à mes amis, ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin dans cette aventure. Leur encouragement et leur soutien moral ont été d'une valeur inestimable.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils ont bien voulu me faire en acceptant d'examiner attentivement mon travail. Leur engagement et leur expertise ont été essentiels pour évaluer la qualité de mes recherches et de mes contributions.

Je conclus ces remerciements en exprimant ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de quelque manière que ce soit à la réalisation de ce mémoire. Leur soutien indéfectible a été une source d'inspiration et de motivation tout au long de ce parcours académique.

# Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des symboles

Introduction Générale..... 10

## Chapitre 1 Présentation de la centrale à cycle combinée de RAS-Djinet

1.1 Introduction..... 12

1.2 Présentation de la centrale électrique RDPP2 CCPP ..... 12

1.2.1 Généralités sur la centrale..... 12

1.3 La nouvelle station de la centrale à cycle combiné..... 14

1.3.1 Principaux équipements mécaniques de la centrale électrique..... 15

1.4 Principaux équipements électriques de la centrale électrique..... 20

1.4.1 Générateur..... 20

1.4.2 Disjoncteur du générateur..... 21

1.4.3 Transformateur principal (GSUT)..... 21

1.4.4 Générateur gazoil à démarrage à froid (BSDG)..... 21

1.5 Fonctionnement du circuit de localisation dans la centrale ..... 21

1.6 Conclusion..... 24

## Chapitre 2 Les systèmes d'excitation du groupe turbine-alternateur

2.1 Introduction ..... 26

2.2 Exigences d'un système d'excitation..... 26

2.3 Éléments d'un système d'excitation..... 27

2.4 Différents types de système d'excitation..... 28

2.4.1 Système d'excitation à courant continu (DC)..... 28

2.4.2 Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC)..... 29

2.4.3 Systèmes d'excitation statique ..... 30

2.5 Commande et circuits de protection des systèmes d'excitation ..... 31

2.5.1 Régulateurs AC et DC..... 33

2.5.2 Circuits de stabilisation d'un système d'excitation ..... 33

2.5.3 Stabilisateur de puissance (PSS)..... 33

2.5.4 Compensateur de charge..... 34

2.6 Conclusion..... 34

## **Chapitre 3 Modélisation de l'alternateur et du système d'excitation**

<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2 Modélisation de la génératrice synchrone.....</b>	<b>36</b>
3.2.1 Modèle de la génératrice synchrone dans le repère abc.....	37
3.2.2 Modèle de la génératrice synchrone dans le repère de Park (dq0) .....	38
<b>3.3 Modélisation du système d'excitation statique.....</b>	<b>41</b>
3.3.1 Modèle par la méthode DQ.....	41
3.3.2 Modèle IEEE type ST.....	47
<b>3.4 Régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone .....</b>	<b>48</b>
<b>3.5 Paramètres du régulateur PID.....</b>	<b>51</b>
<b>3.6 Régulation de la vitesse de rotation.....</b>	<b>51</b>
<b>3.7 Blocs Simulink.....</b>	<b>52</b>
<b>3.8 Conclusion.....</b>	<b>56</b>

## **Chapitre 4 Optimisation par les algorithmes Génétiques**

<b>4.1 Introduction.....</b>	<b>58</b>
<b>4.2 Principe de base d'un AG standard.....</b>	<b>58</b>
<b>4.3 Description des algorithmes génétiques.....</b>	<b>59</b>
4.3.1 Codage et initialisation.....	59
4.3.2 Evaluation.....	60
4.3.3 Sélection.....	60
4.3.4 Recombinaison.....	60
4.3.5 Critère d'arrêt.....	63
<b>4.4 Optimisation des paramètres du système d'excitation.....</b>	<b>63</b>
<b>4.5 Blocs simulink associés au scripte matlab (Annexe 6) .....</b>	<b>64</b>
<b>4.6 Conclusion.....</b>	<b>67</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>68</b>
<b>Référence .....</b>	<b>69</b>
<b>Annexe 1 .....</b>	<b>72</b>
<b>Annexe 2 .....</b>	<b>72</b>
<b>Annexe 3 .....</b>	<b>73</b>
<b>Annexe 4.....</b>	<b>74</b>
<b>Annexe 5.....</b>	<b>75</b>
<b>Annexe 6.....</b>	<b>76</b>

## Liste des tableaux

<b>TABLEAU 3- 1:PARAMETRES PID OBTENUS A PARTIR DU POINT CRITIQUE [31]</b> .....	<b>51</b>
<b>TABLEAU 4- 1:PARAMETRES DU REGULATEUR PID</b> .....	<b>64</b>

## Liste des figures

<b>FIGURE 1- 1:SCHEMA SYNOPTIQUE DE MODULE (GROUPE) DE LA NOUVELLE STATION [2]</b> .	<b>13</b>
<b>FIGURE 1- 2:SCHEMA SYNOPTIQUE DE LA CENTRALE ELECTRIQUE A CYCLE COMBINE [2]</b> .	<b>14</b>
<b>FIGURE 1- 3: SCHEMA SYNOPTIQUE DE LA TURBINE A GAZ [3]</b> .....	<b>16</b>
<b>FIGURE 1- 4 : GENERATEUR DE VAPEUR A RECUPERATION DE CHALEUR</b> .....	<b>17</b>
<b>FIGURE 1- 5: SCHEMA DE LA TURBINE A VAPEUR(ST)</b> .....	<b>18</b>
<b>FIGURE 1- 6: SCHEMA DES EQUIPEMENTS DU GENERATEUR</b> .....	<b>20</b>
<b>FIGURE 2- 1:SCHEMA FONCTIONNEL DU SYSTEME D'EXCITATION D'UNE GENERATRICE</b> .....	<b>27</b>
<b>FIGURE 2- 2: SYSTEME D'EXCITATION DE TYPE DC</b> .....	<b>29</b>
<b>FIGURE 2- 3:EXCITATION DE TYPE AC AVEC REDRESSEUR NON COMMANDE</b> .....	<b>29</b>
<b>FIGURE 2- 4:EXCITATION TYPE AC AVEC REDRESSEUR COMMANDE</b> .....	<b>30</b>
<b>FIGURE 2- 5:EXCITATRICE STATIQUE PAR REDRESSEUR COMMANDE A SOURCE DE TENSION [6]</b> .....	<b>31</b>
<b>FIGURE 2- 6:SYSTEME D'EXCITATION MUNI DE CIRCUITS DE PROTECTION</b> .....	<b>32</b>
<b>FIGURE 2- 7:SCHEMA DE STABILISATION ET REGULATION DE L'EXCITATION [6],[14]</b> .....	<b>33</b>
<b>FIGURE 2- 8:SCHEMA DU COMPENSATEUR DE CHARGE [6]</b> .....	<b>34</b>
<b>FIGURE 3- 1:SCHEMA EQUIVALENT DE LA MACHINE SYNCHRONE MUNI D'AMORTISSEUR [17],[18]</b> .....	<b>37</b>
<b>FIGURE 3- 2:MODELE DE LA MACHINE SYNCHRONE DANS LE REPERE (DQ0)</b> .....	<b>40</b>
<b>FIGURE 3- 3:CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT DU REDRESSEUR COMMANDE LIE AU RESEAU DANS LE REPERE DQ [24]</b> .....	<b>42</b>
<b>FIGURE 3- 4:CONVERTISSEUR AVEC REGULATEURS [25]</b> .....	<b>43</b>
<b>FIGURE 3- 5:REGULATION PAR PI</b> .....	<b>43</b>
<b>FIGURE 3- 6:CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT DU CONVERTISSEUR REGULE [25]</b> .....	<b>44</b>
<b>FIGURE 3- 7:TENSION D'EXCITATION <math>V_f</math> (<math>A = 10^\circ</math>)</b> .....	<b>45</b>
<b>FIGURE 3- 8:TENSION D'EXCITATION <math>V_f</math> (<math>A = 15^\circ</math>)</b> .....	<b>45</b>
<b>FIGURE 3- 9:CALCUL DES PARAMETRES <math>K_{PI}</math> ET <math>K_{II}</math></b> .....	<b>46</b>
<b>FIGURE 3- 10:CALCUL DES PARAMETRES <math>K_{PV}</math> ET <math>K_{IV}</math></b> .....	<b>46</b>

<b>FIGURE 3- 11:TENSION D'EXCITATION <math>V_f</math> REGULEE.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURE 3- 12:MODELE DU SYSTEME D'EXCITATION IEEE-TYPE ST1 .....</b>	<b>48</b>
<b>FIGURE 3- 13:REGULATION DE LA TENSION D'EXCITATION.....</b>	<b>48</b>
<b>FIGURE 3- 14:REGULATION DE LA TENSION DE SORTIE DE LA GENERATRICE .....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURE 3 -15:SCHEMA FONCTIONNEL D'UN CORRECTEUR PID CLASSIQUE .....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURE 3 -16:SCHEMA DE REGULATION DE TENSION SIMPLIFIE .....</b>	<b>50</b>
<b>FIGURE 3- 17:PRINCIPE DE LA REGULATION DE LA VITESSE [20] .....</b>	<b>52</b>
<b>FIGURE 3- 18:MODELE DE L'ALTERNATEUR .....</b>	<b>52</b>
<b>FIGURE 3- 19: SIMULINK DU MODELE GLOBAL .....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURE 3- 20:BLOC-SIMULINK DE REGULATION DE LA TENSION .....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURE 3- 21:TENSION DE SORTIE DE LA GENERATRICE <math>V_{SABC}</math> .....</b>	<b>54</b>
<b>FIGURE 3 -22:LA TENSION D'EXCITATION .....</b>	<b>54</b>
<b>FIGURE 3- 23:LE COURANT D'ENROULEMENT AMORTISSEUR SUR LES AXES D .....</b>	<b>54</b>
<b>FIGURE 3- 24:LE COURANT D'ENROULEMENT AMORTISSEUR SUR LES AXES Q .....</b>	<b>55</b>
<b>FIGURE 3- 25:LA VITESSE DE ROTATION .....</b>	<b>55</b>
<b>FIGURE 4- 1:ORGANIGRAMME D'UN AG STANDARD [33].....</b>	<b>59</b>
<b>FIGURE 4- 2:EXEMPLE D'UN CHROMOSOME EN CODAGE BINAIRE .....</b>	<b>60</b>
<b>FIGURE 4- 3:CROISEMENT MULTIPPOINTS (<math>P = 2</math>) EN CODAGE BINAIRE.....</b>	<b>61</b>
<b>FIGURE 4- 4:CROISEMENT UNIFORME EN CODAGE BINAIRE.....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURE 4- 5:MUTATION DANS LE CAS D'UN CODAGE BINAIRE.....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURE 4- 6:BLOC SIMULINK - OPTIMISATION DES PARAMETRES DU PID .....</b>	<b>64</b>
<b>FIGURE 4- 7:TENSION DE SORTIE DE LA GENERATRICE <math>V_{SABC}</math> (APRES OPTIMISATION) .....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURE 4- 8:LA TENSION D'EXCITATION (APRES OPTIMISATION) .....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURE 4- 9:COURANTS DES TROIS PHASES A <math>T = 0s</math> (AVANT OPTIMISATION).....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURE 4- 10: COURANTS DES TROIS PHASES A <math>T = 0s</math> (APRES OPTIMISATION).....</b>	<b>66</b>

## Liste des symboles

$V_{a,b,c}$	Les Tensions des phases a, b, c respectivement
$i_{a,b,c}$	Les courants des phases a,b,c respectivement
$\Psi_{a,b,c}$	Les flux magnétiques des trois enroulement statorique a,b,c respectivement
$V_{f,D,Q}$	Les Tensions d'excitation, d'enroulement d et d'enroulement q respectivement
$i_{f,D,Q}$	Les courants d'excitation, d'enroulement d et d'enroulement q respectivement
$r_{f,D,Q}$	Résistances des enroulements rotoriques $f, D$ et $Q$ respectivement
$\Psi_{f,D,Q}$	Les flux magnétiques d'excitation, d'enroulement d et d'enroulement q respectivement
$T_m$	Le couple mécanique
$T_e$	Le couple électromagnétique
$H$	Constante d'inertie
$D$	Coefficient d'amortissement
$w_s$	La vitesse de synchronisme
$w_r$	La vitesse de rotation
$\delta$	L'angle interne de l'alternateur
$w_{ref}$	Vitesse de rotation de référence
$L_d$	L'inductance propre d'axe direct
$L_q$	L'inductance propre d'axe quadrature
$L_D$	L'inductance propre d'amortisseur d'axe direct
$L_Q$	L'inductance propre d'amortisseur d'axe quadrature
$L_f$	L'inductance propre d'excitation
$L_0$	inductance homopolaire
$M_{fd}$	inductance mutuelle entre inducteur f et bobinage d
$M_{Dd}$	inductance mutuelle entre amortisseur D et bobinage d
$M_{Qq}$	inductance mutuelle entre l'amortisseur Q et bobinage q
$AVR$	Automatic Voltage Regulator (régulateur automatique de tension)

$PID$	Régulateur classique
$K_p$	Gain proportionnel du PID
$K_i$	Gain intégral du PID
$K_d$	Gain dérivée du PID
$IEEE$	Institute of Electrical and Electronics Engineer
$V_{ref}$	tension de référence
$ST$	Statique
$AC$	Courant alternatif
$DC$	Courant continu
$CPL$	Charge idéale
$R_{eq}, C_{eq}, L_{eq}$	Impédances équivalentes à l'entrée
$R_F, C_F, L_F$	Impédances liées au filtre à la sortie
$I_{ds}, I_{qs}$	Courants de source dans le repère dq
$V_{bus}$	Tensions de bus d'entrée
$I_{dc}$	Courant à la sortie du convertisseur
$I_{dc}^*$	Consigne du courant de sortie
$x_{kf1}$	Réactance de kany
$x_{md}, x_{mq}$	Réactances de magnétisation d'axe d et q
$x_f$	Réactance de fuite
$AG$	Algorithme Génétique
$P_c$	Probabilité de croisement
$P_m$	Probabilité de mutation
$f$	Fonction objective

# Introduction Générale

---

Le secteur de l'énergie est en constante évolution, confronté à des défis croissants en matière d'efficacité énergétique et de durabilité. Les centrales électriques à cycle combiné jouent un rôle essentiel dans la production d'électricité en utilisant efficacement les ressources disponibles. Au cœur de ces centrales se trouve le générateur, qui est responsable de la conversion de l'énergie mécanique en électricité. Pour assurer un fonctionnement optimal du générateur, le système d'excitation joue un rôle crucial en maintenant la tension et la stabilité du réseau électrique.

Ce travail se concentre sur l'optimisation du système d'excitation du générateur de la centrale à cycle combiné de RAS-Djinet. L'objectif principal de cette étude est d'améliorer les performances du système d'excitation en utilisant des algorithmes génétiques, une approche basée sur l'intelligence artificielle.

Le premier chapitre de ce travail présente la centrale à cycle combiné de RAS-Djinet. Nous examinerons son architecture, sa configuration et les principaux composants du système électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous étudions l'état de l'art des systèmes d'excitation des génératrices synchrones, en examinant les éléments constitutifs et les différents types d'excitatrices utilisées dans les groupes turbine-alternateur.

Le troisième chapitre se concentrera sur la modélisation du générateur et du système d'excitation, en utilisant des simulations sous MATLAB. Nous présenterons les principaux paramètres et équations nécessaires à la modélisation du générateur et du système d'excitation. Nous effectuerons des simulations pour évaluer les performances du système d'excitation actuel et analyserons les résultats obtenus.

Dans le quatrième chapitre, nous aborderons l'optimisation du régulateur de tension du système d'excitation à l'aide d'algorithmes génétiques. Nous expliquerons les concepts fondamentaux des algorithmes génétiques et comment ils peuvent être appliqués pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Nous détaillerons la méthodologie utilisée pour l'optimisation du régulateur de tension, y compris la définition des variables, des objectifs et des contraintes. Ensuite, nous présenterons les résultats obtenus après l'optimisation et les comparerons avec les résultats précédents pour évaluer les améliorations apportées.

En conclusion, ce travail vise à améliorer les performances du système d'excitation du générateur de la centrale à cycle combiné de RAS-Djinet en utilisant des algorithmes génétiques.

# **Chapitre 1**

## **Présentation de la centrale à cycle combinée de RAS-Djinet**

## 1.1 Introduction

Souvent les centrales électriques sont implantées à proximités des rivières ou des lacs pour assurer une quantité d'eau suffisante pour leur fonctionnement, tel que la centrale électrique à cycle combiné de cap djinet qui a été conçue pour fonctionner à base d'eau donc elle a été construite près de la mer.

Dans ce chapitre nous allons traité la description générale de la centrale électrique à cycle combiné et le cycle de production eau vapeur qui est à la base du fonctionnement de la centrale.

## 1.2 Présentation de la centrale électrique RDPP2 CCPP

### 1.2.1 Généralités sur la centrale

La Société Algérienne de Production de l'électricité («MAÎTRE D'OUVRAGE») a construit une centrale électrique de 1131,1 MW à cycle combiné, alimentée au gaz naturel, adjacente à la centrale électrique existante de 4x176 MW à Ras Djinet, située à environ 3 km au sud du village de Cap-Djinet et à 77 km par route à l'est d'Alger, en Algérie [1].

La centrale est située entre le rivage de la mer Méditerranée et le carrefour entre l'autoroute bordj-ménail et la route côtière(RN24).

DAEWOO E&C (constructeur) a été nommé prestataire ,ayant la meilleur offre suite à l'évaluation des appels d'offres par la société algérienne de production de l'électricité, des services de l'ingénierie, d'achat et de construction pour la construction et la mise en service de la centrale électrique à cycle combiné d'une capacité de 1131.1MW à Ras djinet.

La centrale électrique a cycle combine ras-djinet de 1131.1MW se compose principalement de 3 groupe (Module) [2] .

Chaque module de la CCPP est constitué de:

- (1)Turbine à gaz (modèle : SIEMENS SGT5-4000F)
- (1)Générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG)
- (1)Turbine à vapeur (Modèle : SIEMENS SST5-3000 H-IL)
- (1)Condenseur par surface à refroidissement par eau
- (1)Générateur commun refroidi par hydrogène (Modèle : SIEMENS SGEN 5-2000 H) situé sur le même arbre entre la turbine à gaz (GT) et la turbine à vapeur (ST).

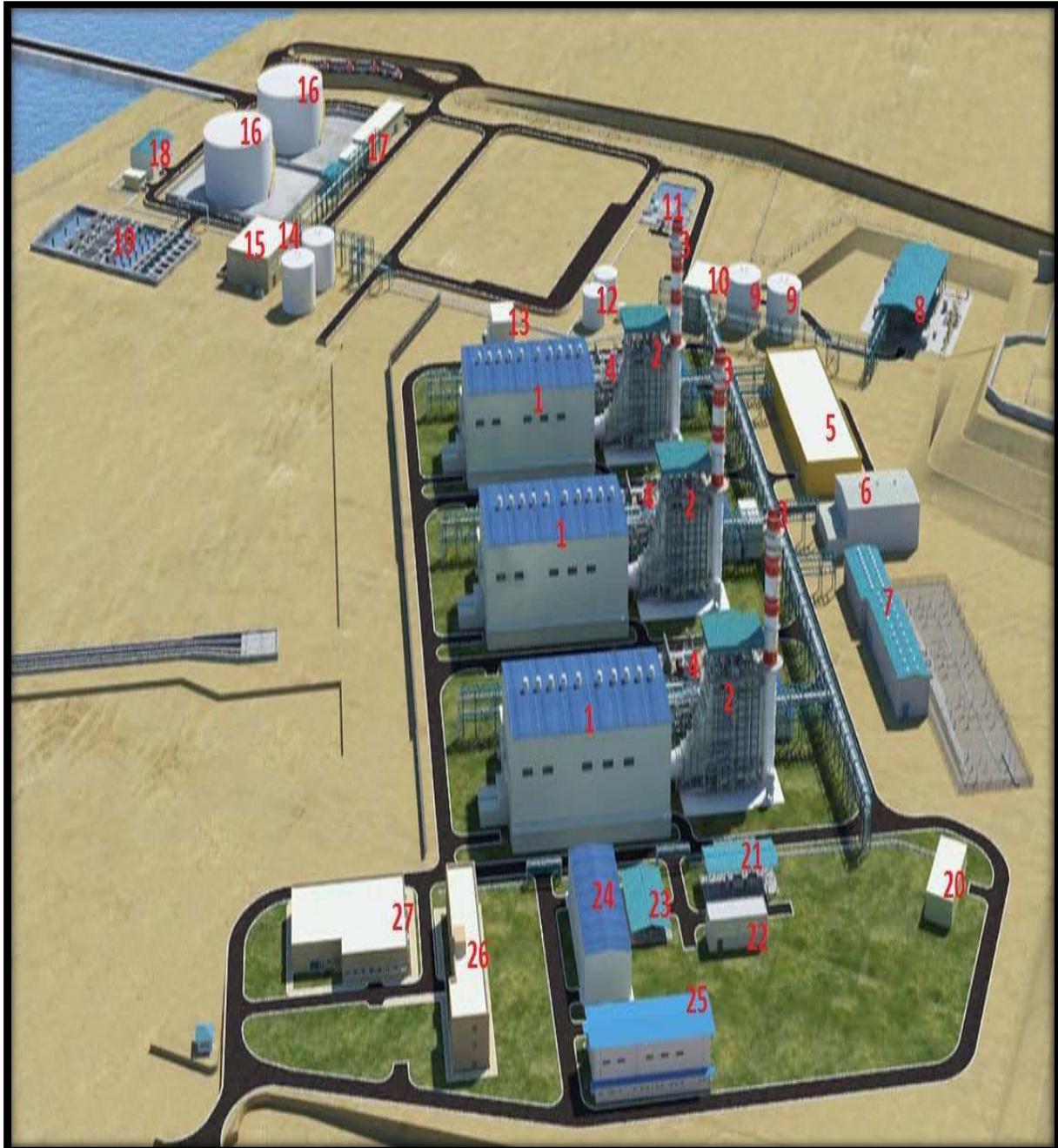
La forme générale de la nouvelle station de production de l'électricité cap djinet et résume sur la Figure1-1.



Figure 1- 1:Schéma synoptique de module (groupe) de la Nouvelle station [2]

### 1.3 La nouvelle station de la centrale à cycle combiné

La Figure 1-2 représente la nouvelle station de la centrale à cycle combinée.



**Figure 1- 2:Schéma synoptique de la centrale électrique à cycle combiné [2]**

1. Chaudières de récupération HRSG
2. Cheminée
3. Transformateur UAT
4. Bâtiment électrique et de commande des auxiliaires communs
5. Local diesel de secours
6. Poste d'évacuation d'Énergie (GIS)
7. Poste gaz (NGSS)
8. Stockage de l'eau anti incendie

9. Local des pompes d'incendie
10. Station de déminéralisation et station de traitement des eaux de rejet
11. Stockage de l'eau déminéralisée
12. Local des compresseurs
13. Stockage de l'eau dessalé
14. Station de dessalement et station de chaudière auxiliaire
15. Stockage de fuel (gasoil)
16. Local des pompes de fuel (gasoil)
17. Station d'électro chloration
18. Station de pompage
19. Station de production d'hydrogène
20. Local de stockage des bouteilles de gaz
21. Local de stockage des matières dangereuses
22. Stockage des fûts d'huile
23. Bâtiment administratif
24. Stockage des fûts d'huile
25. Magasin
26. Ateliers

### 1.3.1 Principaux équipements mécaniques de la centrale électrique

#### 1.3.1.1 Turbine à gaz (GT)

Les turbines à gaz à chambre de combustion annulaire Siemens AG sont des turbines à arbre unique. Il s'agit d'une turbine à gaz mono-arbre avec un rotor commun utilisé par le compresseur et la turbine. Le rotor est supporté par deux paliers qui se trouvent à l'extérieur de la zone sous pression. La turbine à gaz est conçue pour fonctionner en double allumage. Le gaz naturel (NG) doit être utilisé comme combustible primaire et le mazout doit être utilisé comme combustible de secours (Figure 1-3) [3].

Paramètres pour charge de base	Gaz	Mazout
Sortie nominale aux bornes du générateur	249.2MW	210.5MW
Efficacité nominale aux bornes du générateur	38.4%	36.9%
Consommation de combustible	14.3kg/s	13.2kg/s

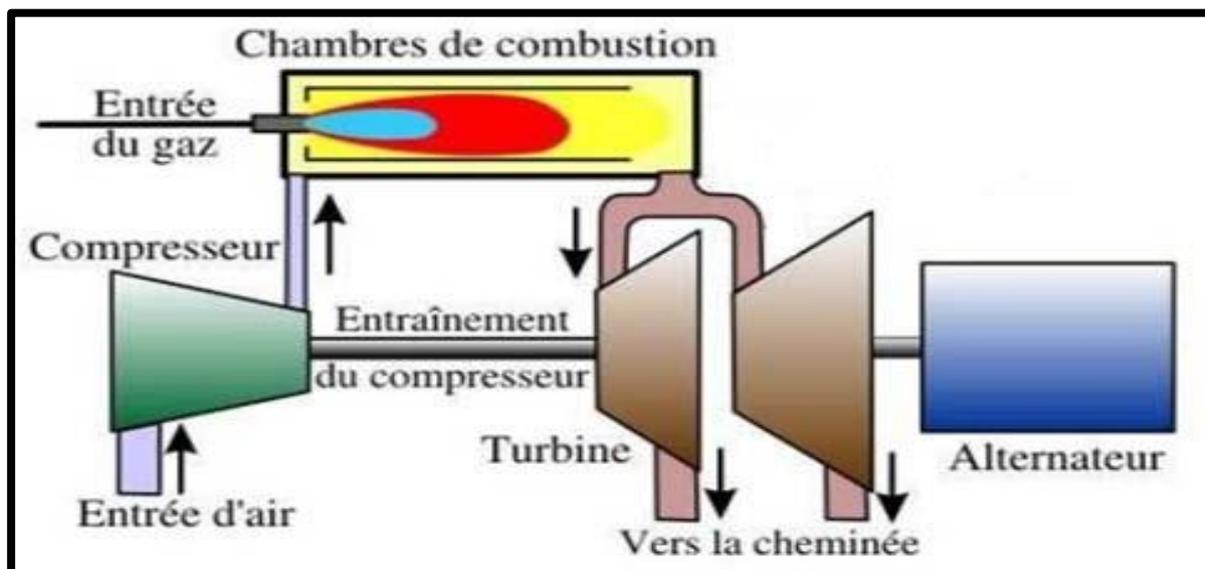


Figure 1- 3: Schéma synoptique de la turbine à gaz [3]

### 1.3.1.2 Générateur de vapeur à récupération de chaleur HRSG

La principale fonction du générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) est de générer la quantité et la qualité de vapeur requises en utilisant la chaleur perdue des gaz d'échappement du turbo-générateur à gaz (GTG). La vapeur générée par le HRSG sera fournie à la turbine à vapeur qui peut me donner une puissance nominale aux borne de générateur égale à 150MW [3].

#### ➤ Les principaux composants du générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG)

Le générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) est constitué plusieurs composants importants tel que :

##### a) Ballon vapeur haute pression (HP)

Le Ballon vapeur HP est conçu pour séparer le mélange de vapeur et d'eau pour fournir de la vapeur saturée de haute pureté au surchauffeur HP 1 et pour absorber les à coups de l'évaporateur pendant les transitoires de démarrage et de fonctionnement [3].

Nombre d'unités	Un pour chaque module
Pression nominale	139.6 Bar (g)
Température nominale	341°C

##### b) Ballon vapeur pression intermédiaire (IP)

Il est conçu pour séparer le mélange de vapeur et d'eau et pour fournir de la vapeur saturée de haute pureté au surchauffeur [3].

Nombre d'unités	Un pour chaque module
Pression nominale	35 Bar (g)
Température nominale	249°C

### c) Ballon vapeur basse pression (LP)

Le Ballon vapeur LP est conçu pour séparer le mélange de vapeur et d'eau et pour fournir de la vapeur saturée de haute pureté au surchauffeur [3].

Nombre d'unités	Un pour chaque module
Pression nominale	8 Bar (g)
Température nominale	180 °C

### d) Cheminée du HSRG

La cheminée du HSRG et son silencieux sont fournis pour acheminer les gaz d'échappement de la turbine à gaz depuis la sortie du HSRG vers l'atmosphère. Des ports d'échantillonnage sont fournis dans la cheminée pour le contrôle d'émission. Les gaz d'échappement chauds de la turbine à gaz font du bruit.

De ce fait, un silencieux est fourni afin de réduire le bruit en sortie de cheminée [3].

La Figure 1-4 représente un générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG).



Figure 1- 4 : Générateur de vapeur à récupération de chaleur

### 1.3.1.3 Turbine à vapeur (ST)

La turbine à vapeur se compose d'un cylindre HP de type cylindrique et d'un cylindre IP/LP à écoulement direct. La vapeur d'échappement sortante de la turbine à vapeur sera condensée dans le condenseur refroidi à eau. La turbine HP est de construction à simple flux et à double paroi avec un porte-lame fixe et un carter externe. Elle est munie d'une vanne d'arrêt et de contrôle de vapeur principale, soudée, soutenue par des supports supplémentaires.

Le carter extérieure est de type cylindrique. Le carter extérieur IP/LP est divisé en deux sections, la section du carter d'entrée moulé et la section du carter d'échappement soudé. Les deux sections sont divisées horizontalement. Les demi-carter sont boulonnés ensemble par des boulons d'assemblage. Les sections d'entrée et d'échappement sont également boulonnées ensemble [3].

La Figure 1-5 présente le schéma de la turbine à vapeur.

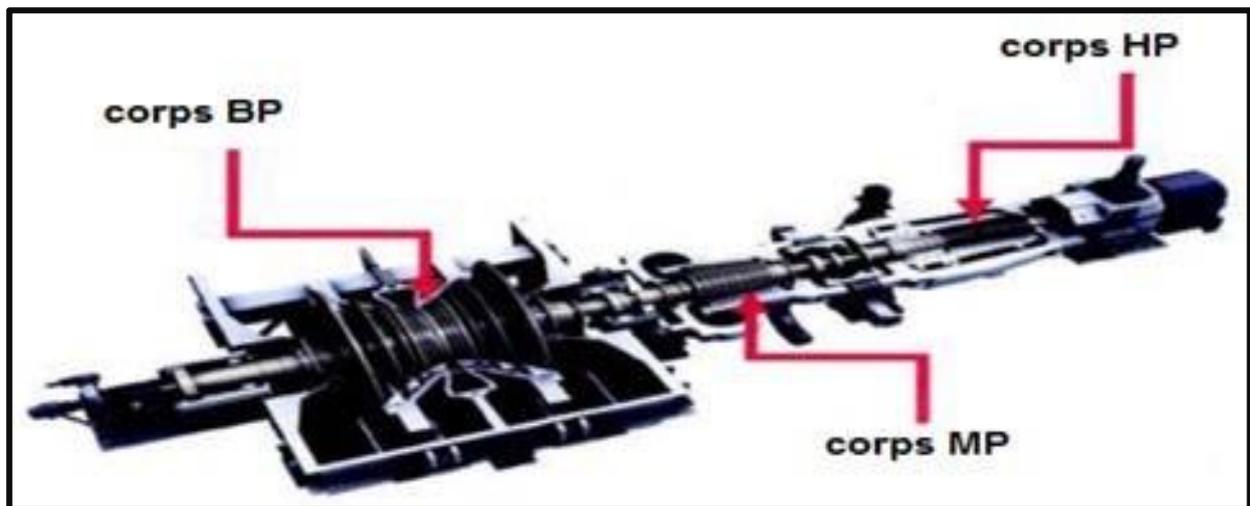


Figure 1- 5: Schéma de la turbine à vapeur(ST)

### 1.3.1.4 Pompe d'alimentation en eau de la chaudière

La fonction des pompes d'alimentation en eau de la chaudière est de fournir de l'eau du BallonLP, à la section économiseur haute pression (HP) du générateur de vapeur à récupération de chaleur, et par un étage intermédiaire, à la section économiseur pression intermédiaire (IP) du générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG). Les pompes d'alimentation en eau de la chaudière fournissent également de l'eau de pulvérisation désurchauffeur pour le système de by-pass HP et de l'eau de pulvérisation désurchauffeur pour le surchauffeur HP [3].

### 1.3.1.5 Pompe d'extraction de condensat

La fonction des pompes d'extraction de condensat est d'effectuer ce qui suit :

- Maintenir le niveau du puits du condenseur à son niveau normal en extrayant les condensats du puits du condenseur.
- Fournir de l'eau de condensation au dégazeur en passant par l'économiseur LP
- Fournir de l'eau pulvérisée désurchauffeur pour le système de by-pass IP, le système de by-pass de vapeur LP, la station auxiliaire de réduction de pression de vapeur et de désurchauffeur (PRDS) et d'autres auxiliaires de la turbine à vapeur.
- Fournir de l'eau d'étanchéité aux vannes pour empêcher l'entrée d'air dans le système [3].

### 1.3.1.6 Condenseur

Le condenseur axial refroidi à l'eau remplit la fonction de condenser la vapeur d'échappement de la turbine à vapeur et / ou du système de bypass de vapeur haute pression (HP), pression intermédiaire (IP) et basse pression (LP). Le condenseur reçoit la vapeur d'échappement de la turbine dans le sens horizontal.

Le condenseur est équipé d'une soupape de dépression, de transmetteurs de pression, de transmetteurs de température et de transmetteurs de niveau pour la protection du condenseur et de la turbine [3].

### 1.3.1.7 Éjecteur d'air à jet de vapeur

#### ➤ Éjecteur d'air à jet de vapeur (HOGGING)

La fonction de l'éjecteur est d'évacuer l'air et les autres gaz non condensables dans le condenseur lors de la mise en marche [3].

#### ➤ Éjecteur d'air à jet de vapeur (HOLDING)

La fonction de l'éjecteur d'air à jet de vapeur est d'évacuer l'air et les autres gaz non condensables dans le condenseur en fonctionnement normal [3].

### 1.3.1.8 Chaudière auxiliaire

La fonction de la chaudière auxiliaire est de fournir les besoins en vapeur auxiliaire lors du démarrage et le fonctionnement à faible charge de l'installation. La chaudière auxiliaire doit fournir de la vapeur pour l'étanchéité à la turbine du presse-étoupe ainsi que pour l'usine de dessalement [3].

Nombre de chaudières	Deux (2)
Carburant	Gaz naturel et fioul

### 1.3.1.9 Réservoirs de stockage de mazout

La fonction du réservoir de stockage de mazout est de stocker du mazout pour (Turbine à gaz). Le mazout est utilisé comme carburant alternatif pour les turbines à gaz [3].

### 1.3.1.10 Station de pompage

La station de pompage joue un rôle important car elle assure la quantité d'eau nécessaire au bon fonctionnement de la centrale.

L'eau pompée est divisée en deux parties, une partie est utilisée pour le refroidissement du condenseur et l'autre partie sera refoulée vers la station de dessalement.

### 1.3.1.11 Station d'électro-chloration

Dans cette station on produit du HCL qui sert au nettoyage et la protection des conduites d'eau de mer contre tout encrassement pouvant être causé par les micro-organismes marins.

### 1.3.1.12 Station de dessalement

Le rôle de cette station est la production de l'eau dessalé par un procédé thermique et qui sera stocké dans deux bâches de 2700m<sup>3</sup> chacune.

### 1.3.1.13 Station de déminéralisation

Deux chaînes de déminéralisation de 40m<sup>3</sup>/h chacune, terminent le traitement de l'eau avant son utilisation dans le cycle eau vapeur.

Le stockage de l'eau déminé se fait dans deux réservoirs de capacité de 1500 m<sup>3</sup> chacun.

### 1.3.1.14 Station d'hydrogène

Cette station produit l'hydrogène nécessaire au refroidissement des 3 alternateurs de la centrale.

## 1.4 Principaux équipements électriques de la centrale électrique

### 1.4.1 Générateur

Le générateur est l'équipement électrique le plus important de toute la centrale électrique. Le générateur est capables d'évacuer le courant de la sortie de la turbine à gaz (turbine à gaz + turbine à vapeur) à laquelle il est connecté sans dépasser la limite de température admissible stipulée par la norme pertinente sur l'ensemble de la plage de température ambiante du site [4].

La Figure 1-6 montre un schéma des équipements du générateur.

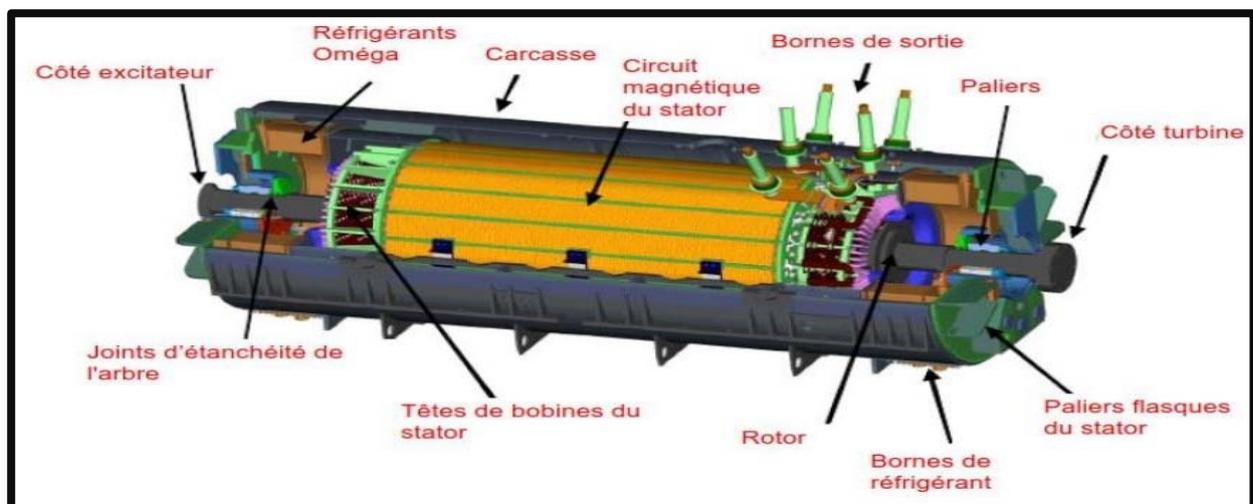


Figure 1- 6: Schéma des équipements du générateur

#### - Paramètres nominaux

Puissance apparente	431 MVA à 35 °C
Courant d'induit nominal	11 310 A
Tension d'induit nominale	22,00 kV ± 5 %
Vitesse	3 000 tr/min
Facteur de puissance	0,9 (inductif)
Excitation	Excitation statique
Type de refroidissement	refroidi à l'hydrogène

### 1.4.2 Disjoncteur du générateur

Le disjoncteur du générateur est destiné à isoler le générateur du secteur pendant l'arrêt normal ou en cas de panne de la turbine à gaz ou du générateur [4].

- **Paramètres nominaux**

Tension nominal	22 kV
Type de disjoncteur	SF6
Courant nominal	14 000 A
Courant d'ouverture	110 kA pendant 1 s
Courant de fermeture	305 Ka

### 1.4.3 Transformateur principal (GSUT)

Le transformateur principal (GSUT) est connecté entre le générateur et le poste d'évacuation d'énergie principal de 400 kV à isolation gazeuse.

La puissance générée par le générateur est élevée par le GSUT pour l'évacuation à 400 kV.

Cette même puissance est doit être utilisée pour l'alimentation des charges auxiliaire de la centrale provenant du réseau de 400 kV pendant le démarrage [4].

- **Paramètres de base**

Puissance nominale	306/408/510 MVA
Rapport de transformation	420/22 kV
Température type	20 °C
Méthode de refroidissement	ONAN/ONAF/OFAF

### 1.4.4 Générateur gasoil à démarrage à froid (BSDG)

Un générateur gasoil à démarrage à froid est fourni pour la prise en charge des charges suivantes :

- Les charges de secours du STG et du GTG
- Les exigences de Charge de démarrage de l'unité (400 V auxiliaire, charges d'excitation, pompes CW, pompes à condensat, pompes à eau d'alimentation HP et compresseurs)
- Deux (2) générateurs diesel sont envisagés pour trois (3) unités de production [5].

**-Paramètres nominaux**

Puissance nominale	2 x 7 MVA
Tension nominale	6 kV
Facteur de puissance	0,8

## 1.5 Fonctionnement du circuit de localisation dans la centrale

La production d'électricité se fait par 2 procédés:

- **Le procédé thermique au niveau de la station de dessalement**
- **Le procédé chimique au niveau de la station de déminéralisation**

Et par 3 transformations d'énergie:

- **Énergie calorifique au niveau de la chaudière**

- **Énergie mécanique au niveau de la turbine**
- **Énergie électrique au niveau de l'alternateur**

Le circuit de localisation dans la centrale a commencé par un poste de gaz qu'est situé à l'Est de la centrale, la fonction de ce poste est pour recevoir le gaz combustible du HASI RMEL et le faire des séparations, filtrations et aussi augmentation de température et dilatation de ce gaz (52 bars → 35 bars).

Avant d'alimenter la turbine en combustible, ce gaz passe dans Filtre de dernière Chambre, ce filtre est fourni après le chauffage de performance pour la protection finale GT contre la condensation.

Le filtre ultime est utilisé pour fondre les gouttelettes de condensat ou les bouchons de liquide pouvant se former dans le pipeline et éliminer les particules solides (telles que les produits de corrosion des tuyaux).

Des éléments filtrants à haute efficacité sont fournis pour éliminer les particules solides et les gouttelettes de liquide de 0,3 microns ou plus des courants gazeux.

On a continué le circuit dans la salle de machines de module 50, le début était de Condenseur et leurs pompes d'extractions (CEP1 et CEP2) qui permettent l'extraction d'eau condensé pour alimenter les ballons LP, IP et HP (First Filling) d'un côté et d'autre côté pour le passage d'eau condensée dans un préchauffage dans HRSG (la chaudière) avant d'entrée dans le ballon LP, le circuit de préparation la vapeur.

La condensation arrive par les éjecteurs de démarrage et les éjecteurs de services qui permettent la création de vide dans le condenseur pour obtenir l'eau condensée.

L'eau de refroidissement vient de la mer dans deux tuyaux provenant de deux pompes pour chaque unité utilisée pour la refroidissement de vapeur en condenseur, ce l'eau également utilisée pour le refroidissement de l'eau démine que est utilisée dans un circuit fermée (CCW) pour le refroidissement des équipements, huile de graissage...

Les pompes alimentaires (BFP1 et BFP2) sont utilisées pour extraire l'eau de ballon LP vers les ballons IP et HP à travers deux tuyaux différents.

Dans la chaudière de récupération (HRSG) il y a 15 tubes que sont divisés en cinq sections, dans chaque section l'eau condensée se réchauffe et se transforme en vapeur.

Après vaporisation dans HRSG le vapeur de ballon LP et HP attaque les corps LP et HP dans turbine à vapeur (salle de machine), la vapeur HP qui sort le corps HP est mélangée a vapeur de ballon IP (Cold ReHeater CRH) dont elle se rechauffe une autre fois dans HRSG (reheater 1 et reheater2) pour produire HRH (heatReHeater) après elle attaque le corps IP, cette vapeur fait tourner l'arbre de la turbine à vapeur qu'est attaché le générateur et turbine à gaz dans même arbre et permet la production d'électricité de 22kv.

Le réchauffement de l'eau condensée dans la chaudière se produit par réchauffage de l'air compressé (avec compresseur) dans turbine à gaz a cause de la combustion du gaz ou fioul au niveau de chambre de combustion (plus de 500° C).

La prochaine tour était au niveau de dessalement pour suivre la formation de l'eau qu'est utilisé dans la vaporisation. En dessalement il y a une chaudière auxiliaire qui fait bouillir l'eau de mer avant vaporisation au niveau de évaporateur1 et évaporateur 2. Après la vaporisation, l'eau de mer est utilisé dans l'évaporateur pour condensé ce vapeur pour produise l'eau dessalée qui est conservé dans deux grandes réservoir.

L'eau dessalée est traitée au niveau de démine, ce traitement est élimination des minéraux de l'eau dessalée en ajoutant HCl+ et NaOH- pour produisez l'eau déminée qui est conservé dans deux grandes réservoir, elle est utilisée par condenseur.

Il y a aussi une salle d'électro chloration, la fonction du système d'électro chloration est de produire une solution d'hypochlorite de sodium à partir de l'eau de mer, de la stocker et d'injecter la quantité adéquate de NaOCl dans le système d'admission pour contrôler la croissance biologique de l'eau de mer. L'hypochlorite de sodium est produit par électrolyse.

La tension générée (22 kV) est augmentée jusqu'à 400 kV par le transformateur d'unité pour l'évacuation de l'énergie vers le réseau national. La tension générée (22 kV) est abaissée à 6 kV par le transformateur abaisseur pour alimenter les équipements auxiliaires.

La tension de 6 kV (MT) est abaissée à 400 V (BT) par des transformateurs de type sec refroidis à l'air et installés en intérieur.

Les transformateurs d'unité et abaisseurs sont de type refroidis à l'huile. Ces transformateurs sont installés en extérieur.

Il ya aussi des équipements axillaires complémentaires:

- **Compresseur d'air** : Le système d'air comprimé fournit de l'air comprimé pour répondre aux exigences du système d'air de service (le nettoyage et à plusieurs fins) et du système d'air d'instrumentation (les instruments et les vannes pneumatiques) de la centrale.
- **Poste d'incendie** : Le système d'alarme et de détection des incendies est conçu pour assurer une détection précoce des incendies, l'avertissement du personnel et une activation automatique des systèmes d'extinction. Il y a deux réservoirs de l'eau d'incendie et 6 pompes qui sont alimentées par gasoil ou électricité (6kv/400v).
- **Station d'hydrogène** : l'hydrogène est utilisé pour le refroidissement des générateurs.
- **Système d'huile de turbine** : L'huile de turbine comprend principalement de l'huile de lubrification, de l'huile de levage et de l'huile hydraulique (huile de commande).
- **Système de refroidissement d'huile** : il sert à refroidir l'huile de graissage, l'huile hydraulique et l'huile de commande destiné à la réutilisation.

Tous les équipements sont contrôlés au niveau de salle de commande CCR .

Dans la salle de commande, il y a l'équipe de quart composée de 2 ingénieurs de production qui gèrent la production d'électricité avec les TPCC qui gèrent les équipements de chaque module à distance en utilisant les Postes d'exploitation (OWS) de salle commande. Ils sont programmés avec 2 principal systèmes de commande DCS (Distributed Control System) OVATION EMERSON pour la commande des équipements de HRSG et BOP (les équipements auxiliaire) et SPPA T3000 SIEMENS pour la commande du Turbine à vapeur, Turbine à gaz et générateur, il y a aussi dans l'équipe les TCA qui contrôlent les équipements sur terrain de site.

Il y a une architecture spécifique de chaque hardware de DCS, le hardware d'Ovation Emerson est situé dans la salle de commande et le hardware de SPPA T3000 dans PCC (Power Control Center) de chaque groupe avec les serveurs d'Automatisation SIMATIC S7.

L'OPS (Contrôle Processus de Liaison et Incorporation d'Objet) est l'interconnexion entre les serveurs d'Ovation Emerson et les serveurs de Siemens, c'est situé dans CCR dans même salle avec les serveurs d'Ovation Emerson [5].

## **1.6 Conclusion**

Dans cette partie nous avons décrit l'historique, le fonctionnement général, et les constituants de la centrale électrique à cycle combiné de production d'énergie électrique de Cap Djinet.

Cette description nous a permis de bien comprendre le fonctionnement des unités de production et leur inter-connectivité.

# **Chapitre 2**

## **Les systèmes d'excitation du groupe turbine-alternateur**

## 2.1 Introduction

Le système d'excitation du groupe turbine-alternateur est un élément clé dans la production d'électricité dans une centrale électrique. Il a pour rôle de fournir la puissance électrique nécessaire à l'excitation de l'alternateur, ce qui permet de générer un champ électromagnétique qui induit un courant électrique dans les bobines de l'alternateur, produisant ainsi de l'électricité.

Le système d'excitation peut être de différents types, tels que le système d'excitation à aimants permanents, le système d'excitation à excitatrice séparée ou le système d'excitation à auto-excitation. Chacun de ces systèmes a ses propres caractéristiques et avantages, mais tous ont pour objectif commun de maintenir le voltage et la fréquence du réseau électrique stable et constant.

Le contrôle et la régulation du système d'excitation sont également d'une grande importance, car ils permettent de maintenir la stabilité du système électrique global et d'assurer une alimentation électrique fiable et efficace. Les techniques modernes de contrôle utilisent souvent des algorithmes avancés de régulation et de surveillance, ainsi que des technologies de communication avancées pour optimiser la performance du système.

## 2.2 Exigences d'un système d'excitation

Les performances d'un système d'excitation sont déterminées principalement par les caractéristiques de la génératrice synchrone et du circuit d'alimentation. La condition fondamentale pour un système d'excitation est d'ajuster le courant de champ pour exciter la génératrice synchrone et maintenir la tension de sortie à la consigne.

La fonction de base de l'excitation est alors de fournir le courant continu aux bobines créant un champ au rotor de la machine synchrone; de plus, l'excitation assure le contrôle de la tension et de la puissance réactive [6],[7], ainsi que certaines fonctions protectrices du réseau (respect des limites des machines), le tout par le biais de la tension d'excitation.

D'un point de vue d'installation électrique, le système d'excitation devrait contribuer au contrôle efficace de la tension et à l'amélioration de la stabilité du système [6],[8]. Cela implique aussi le maintien de la stabilité transitoire en cas de perturbations et de faibles signaux.

Le rôle du système d'excitation dans l'amélioration des performances du système de production n'a cessé de se développer au fil du temps. À l'époque où les systèmes d'excitation étaient encore manuels, ils étaient utilisés pour réguler et maintenir constante la tension et la puissance réactive en sortie des génératrices. Lorsque le contrôle de la tension de sortie a été automatisé pour la première fois, il était lent. Cependant, au début des années 1920, l'intégration de régulateurs continus dans les systèmes d'excitation a permis d'obtenir de meilleurs résultats et suscité l'intérêt d'un grand nombre d'industriels, contribuant ainsi au développement des systèmes d'excitation. Depuis lors, le système d'excitation a connu une évolution continue. À partir des années 1960, l'importance et le rôle du système d'excitation ont été élargis en utilisant des signaux de stabilisation auxiliaires pour amortir les oscillations de puissance du système et améliorer la stabilité. En plus de la régulation de tension de sortie, l'excitation permettait d'amortir les oscillations de puissance du système à l'aide de stabilisateur de puissance (*power system stabilizer*) [9],[10].

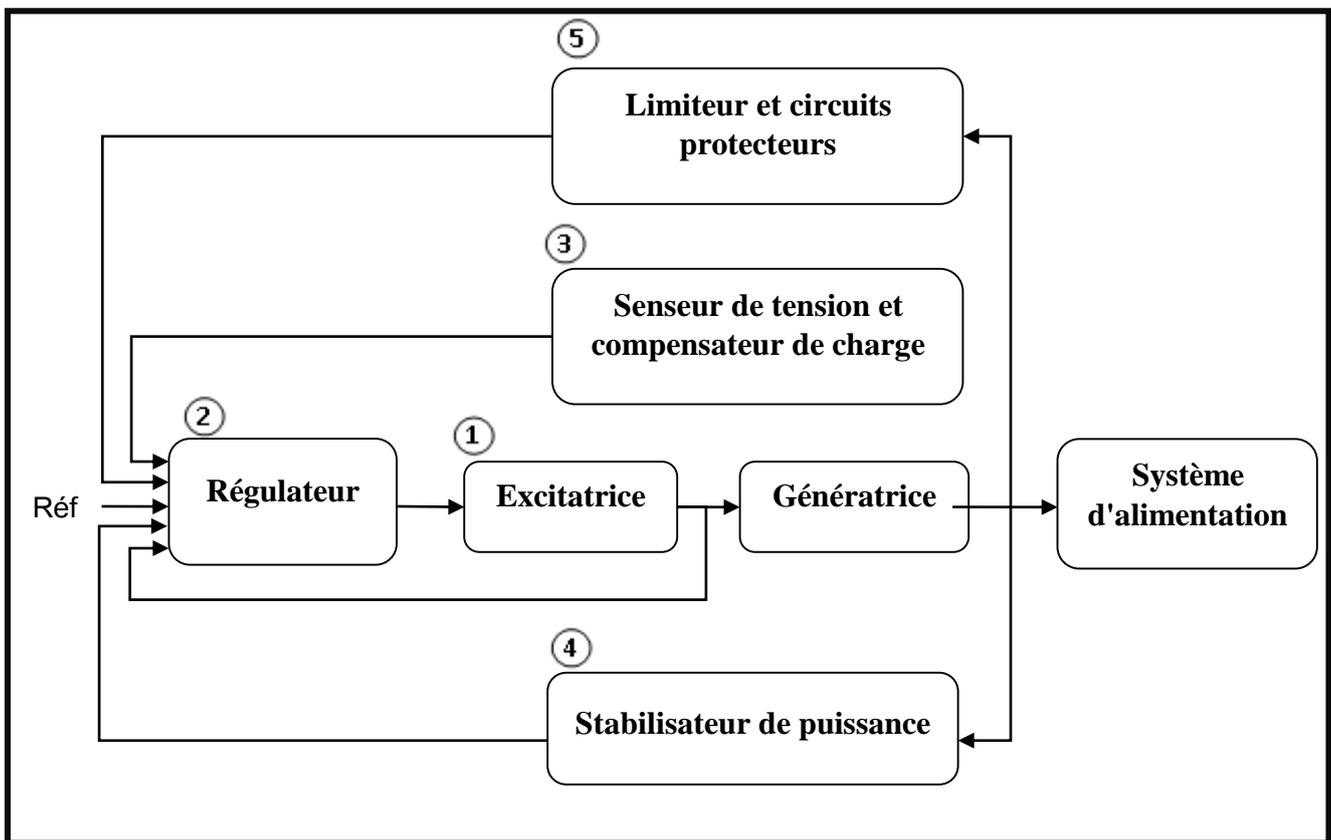
Les systèmes d'excitation modernes sont actuellement capables de fournir une réponse pratiquement instantanée même avec des tensions élevées (HT) [6].

Pour remplir son rôle de manière satisfaisante, le système d'excitation doit répondre aux exigences suivantes [6]:

- Respecter les critères souhaités du cahier de charge.
- Fournir les limitations nécessaires afin d'assurer la protection de l'excitatrice elle-même, de la génératrice, et des autres équipements (turbine, réseau, ... etc).
- Respecter les exigences tout en assurant une flexibilité d'opération (régulation, stabilisation, ... etc).
- Assurer la fiabilité et la validité des équipements.

### 2.3 Éléments d'un système d'excitation

Le schéma ci-dessous (Figure 2-1) illustre les différentes parties et éléments d'un système d'excitation appliqué aux générateurs synchrones.



**Figure 2- 1:Schéma fonctionnel du système d'excitation d'une génératrice**

- (1) L'excitatrice : elle fournit la puissance nécessaire aux bobines pour créer le champ au rotor. Pour un générateur de 600 MW, une excitatrice d'environ 1 MW est typiquement requise.
- (2) Le régulateur : il permet de contrôler et de stabiliser le signal d'entrée de l'excitatrice.
- (3) Le senseur de tension : il mesure la tension aux bornes de la machine, la filtre et la redresse en une valeur continue. Ensuite, cette mesure est comparée à la référence de tension

souhaitée aux bornes de la machine.

- (4) Le stabilisateur de puissance (PSS) : il fournit un signal d'entrée supplémentaire au régulateur du système d'excitation pour amortir les oscillations de puissance à basse fréquence du réseau électrique.
- (5) Les limiteurs et les circuits protecteurs : ils constituent une série de dispositifs qui garantissent que les limites du circuit d'excitation et du générateur ne sont pas dépassées. Par exemple, le limiteur de courant d'excitation, le limiteur de sur-excitation, le limiteur de tension et le limiteur de sous-excitation.

## 2.4 Différents types de système d'excitation

Selon la source d'alimentation, il existe trois types essentiels de systèmes d'excitation pour les génératrices synchrones [6],[11]:

- les systèmes d'excitation à courant continu (DC).
- les systèmes d'excitation à courant alternatif (AC).
- les systèmes d'excitation statiques.

Nous allons maintenant décrire la forme et la structure générale de chacun de ces types d'excitation.

### 2.4.1 Système d'excitation à courant continu (DC)

L'excitation à courant continu est une technique d'excitation dans laquelle une machine à courant continu est utilisée comme source d'excitation pour fournir le courant au niveau du rotor de la génératrice synchrone à travers des bagues collectrices. La machine à courant continu est entraînée par un moteur de l'arbre de la génératrice et peut être auto-excitée ou excitée séparément. Cette méthode a été la première utilisée, depuis les années 1920 jusqu'aux années 1960, où elle a été progressivement remplacée par l'excitation de type AC [6].

Actuellement, l'excitation à courant continu est rarement utilisée à des fins d'étude de la stabilité, car elle nécessite une modélisation complexe. Elle est souvent remplacée par l'excitation de type AC ou l'excitation statique ST [6].

La Figure 2-2 montre l'excitation de type DC.

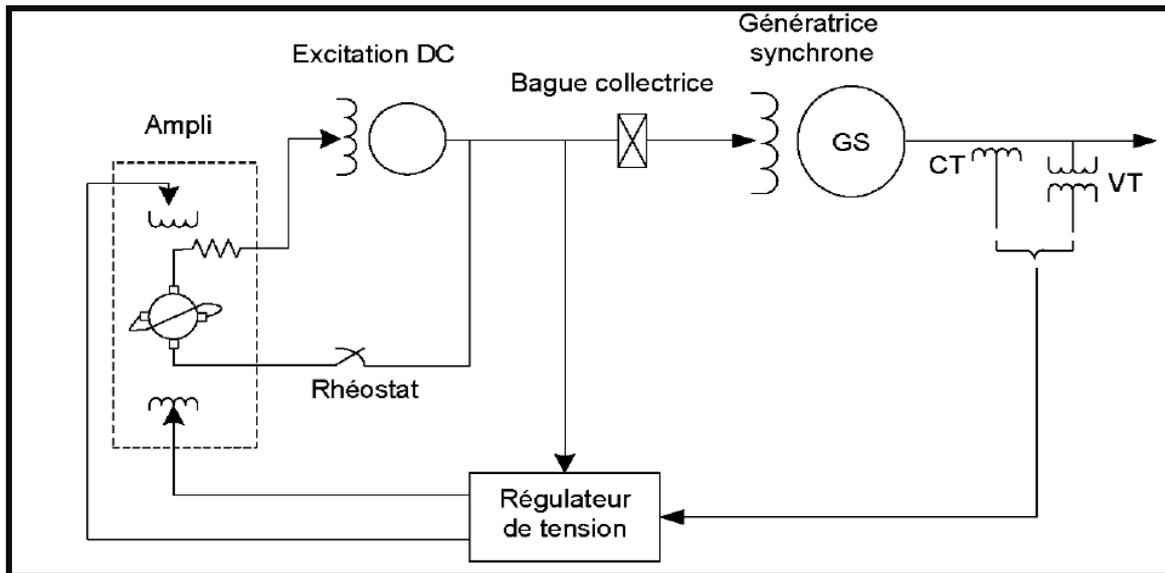


Figure 2- 2: Système d'excitation de type DC

### 2.4.2 Systèmes d'excitation à courant alternatif (AC)

L'excitatrice à courant alternatif utilise un alternateur associé à un redresseur stationnaire ou tournant pour produire le courant de champ excitant la machine synchrone. Le redresseur utilisé peut être soit commandé, soit non commandé. Dans le cas d'un redresseur non commandé, le réglage s'effectue sur les enroulements de champ au niveau de l'excitatrice AC.

Les excitatrices de type AC sont plus simples à entretenir et à réparer que les excitatrices à courant continu et ont remplacé celles-ci à partir des années 1960. De plus, leur commande est plus rapide et plus précise que celle des excitatrices à courant continu.

Les figures 2-3 et 2-4 montrent l'excitatrice de type AC muni d'un redresseur stationnaire non commandé et commandé respectivement.

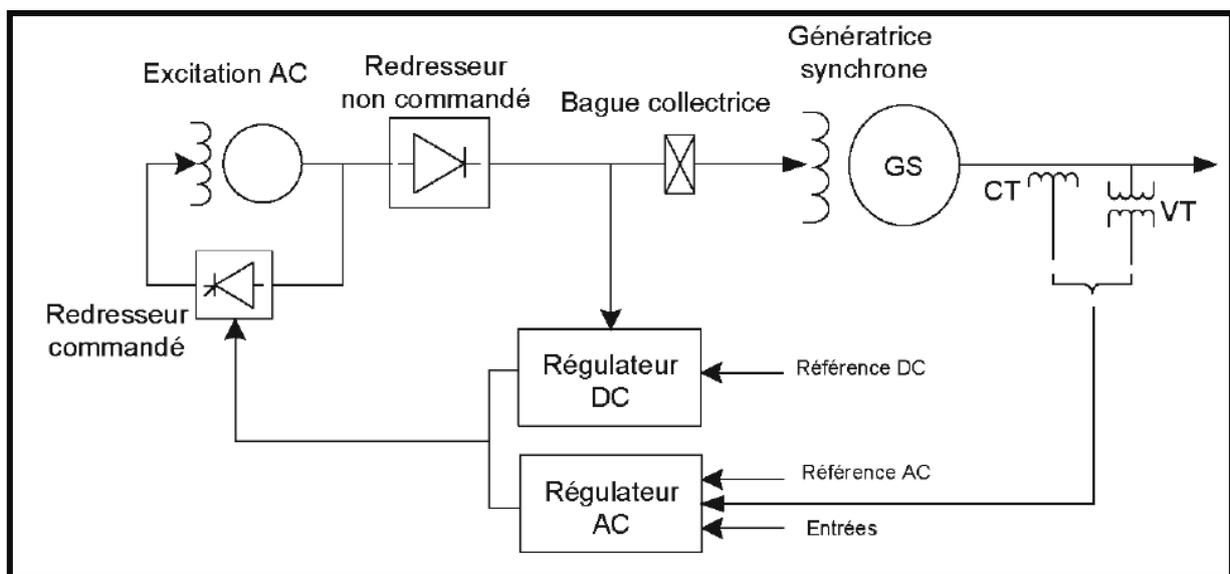


Figure 2- 3: Excitation de type AC avec redresseur non commandé

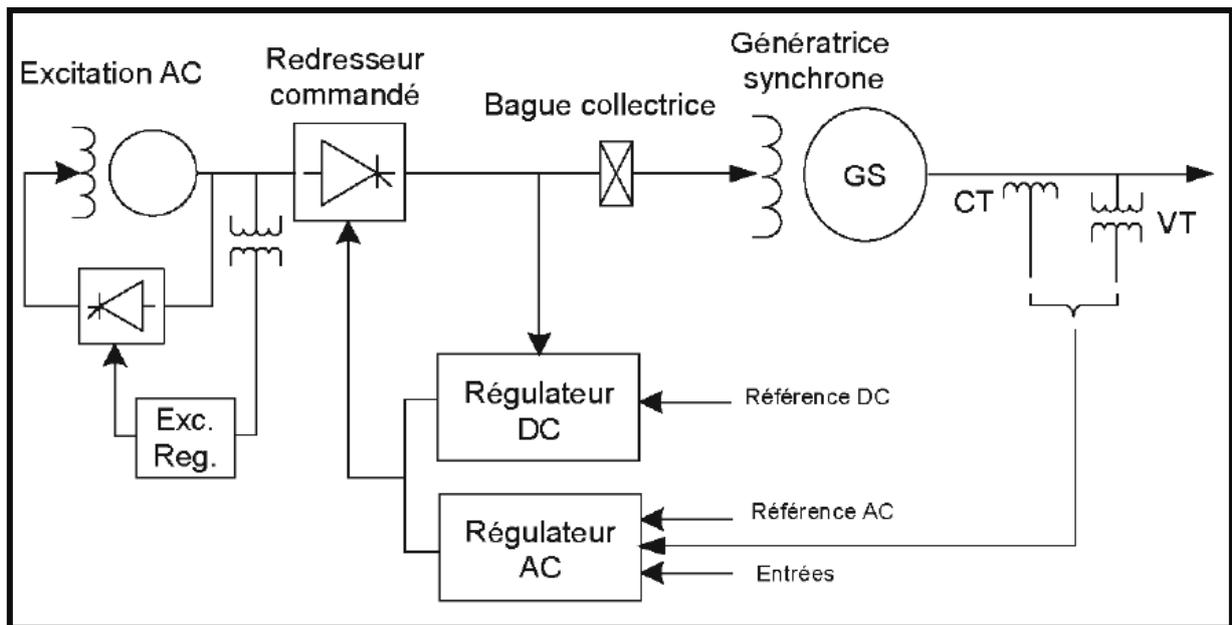


Figure 2- 4: Excitation type AC avec redresseur commandé

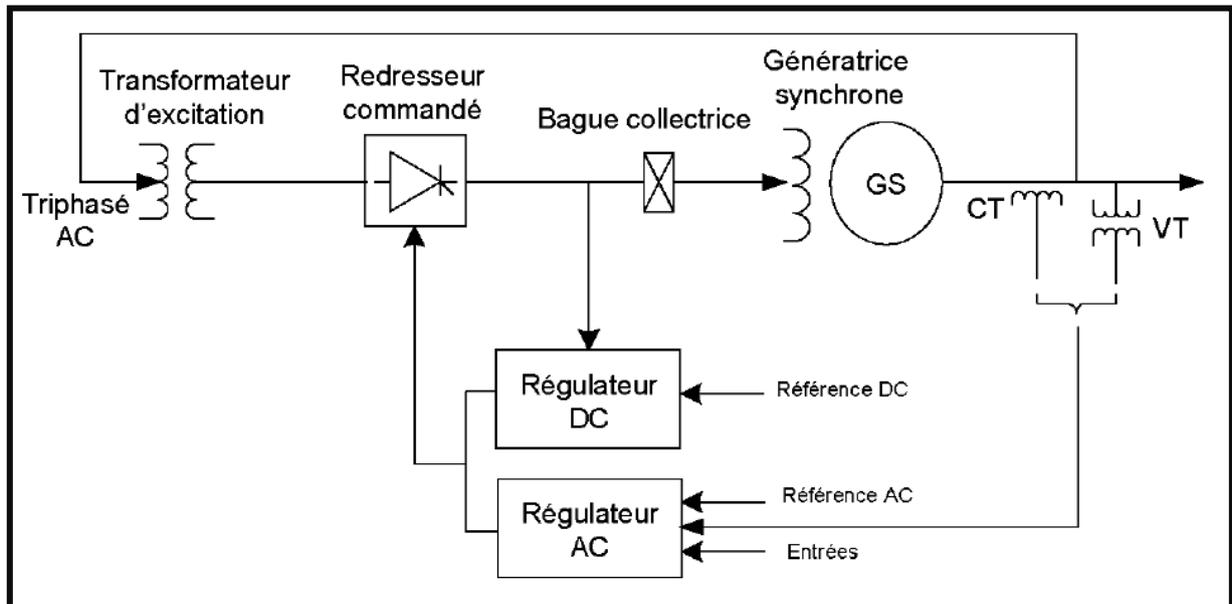
### 2.4.3 Systèmes d'excitation statique

Dans ce type de système d'excitation, tous les composants sont statiques ou stationnaires. Le courant d'excitation de la génératrice synchrone est fourni par un redresseur statique alimenté par la génératrice synchrone à travers un transformateur d'excitation. Cependant, il existe trois types d'excitation statique :

(a) Excitation statique avec redresseur commandé à source de tension : ce système utilise un redresseur commandé qui régule la tension de sortie en fonction de la tension de référence, fournissant un courant d'excitation constant.

(b) Excitation statique avec redresseur non commandé à source combinée : dans ce cas, la tension d'alimentation du redresseur est combinée à la tension de sortie de la génératrice synchrone pour fournir un courant d'excitation constant.

(c) Excitation statique avec redresseur commandé à source combinée : ce système combine les deux méthodes précédentes en utilisant un redresseur commandé à la fois pour réguler la tension de sortie et combiner les tensions d'alimentation et de sortie de la génératrice synchrone. Ce type d'excitation statique est couramment utilisé pour les grandes génératrices à haute tension.



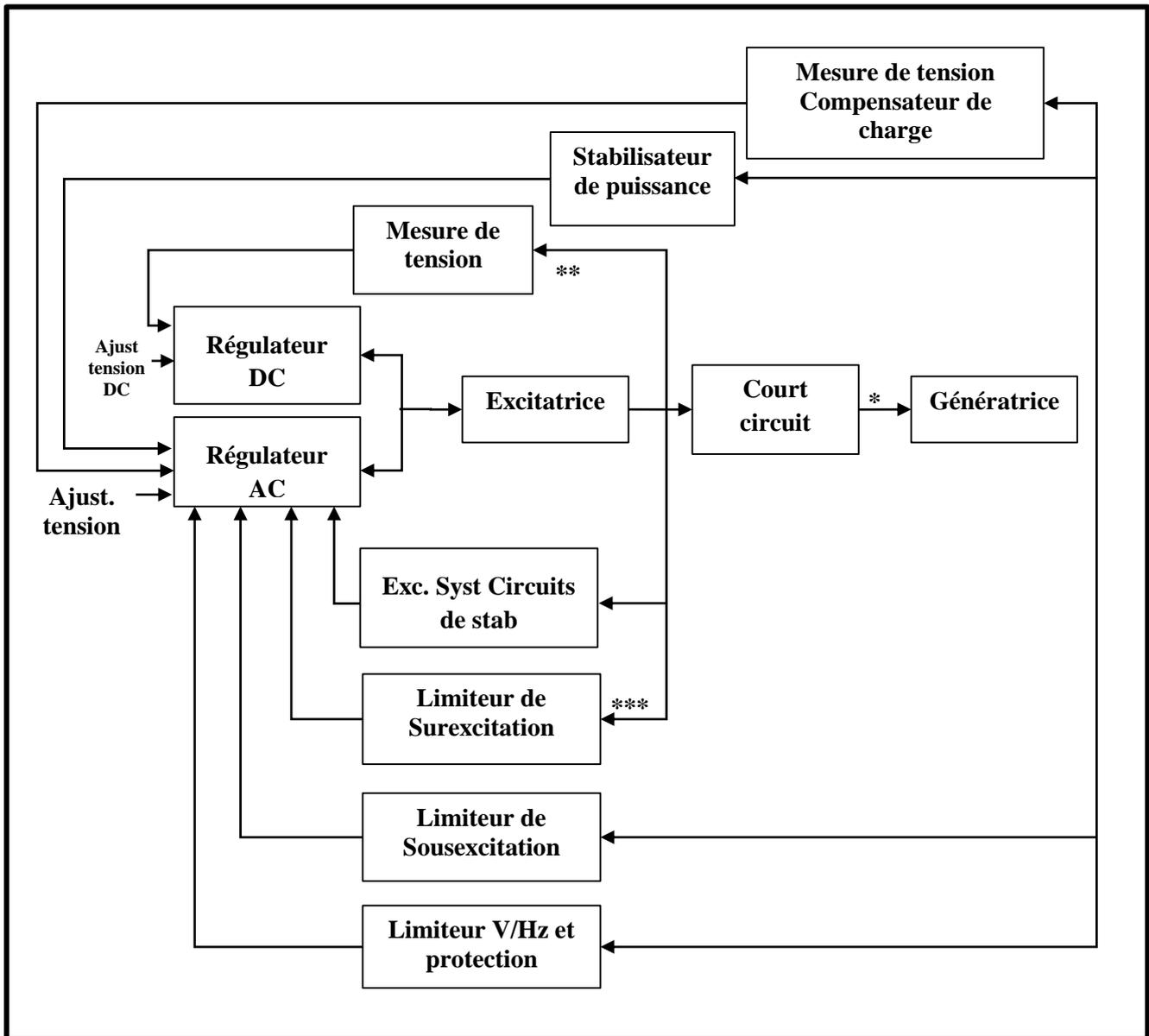
**Figure 2- 5:Excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension [6]**

L'excitatrice statique par redresseur commandé à source de tension (Figure 2-5) est la plus utilisée des trois, voici énumérés quelques unes de ses caractéristiques :

- ✓ Pas de partie tournante à part la machine.
- ✓ Utilisation d'un générateur de tension aux bornes, d'un autotransformateur d'excitation et d'un pont de thyristor pour le redressement de la tension AC d'entrée.
- ✓ Possibilité d'utilisation de plusieurs types de correcteurs et régulateurs (PI, PID, Flous, ... etc) [12].
- ✓ Moins coûteuse et facile à entretenir

## 2.5 Commande et circuits de protection des systèmes d'excitation

La commande d'un système d'excitation ne dépend pas uniquement du régulateur de tension, mais également des fonctions de limitation et de protection. Ces fonctions de limitation et de protection sont essentielles pour garantir une performance optimale du système d'excitation et prévenir les éventuels dommages au générateur. Les fonctions de limitation comprennent des limites de courant d'excitation, des limiteurs de tension, des limiteurs de surexcitation et des limiteurs de sous-excitation. Les fonctions de protection comprennent des dispositifs tels que des disjoncteurs, des relais de surintensité et des relais de sous-tension, qui protègent le système d'excitation contre les défauts électriques et les surcharges. En outre, le système d'excitation peut également inclure des fonctions de diagnostic et de surveillance pour permettre une détection précoce des pannes et une maintenance proactive [6].



\* Court-circuit : Applicable pour l'excitatrice type AC et statique seulement

\*\* Quelques systèmes ont un régulateur de en boucle ouverte

\*\*\* Limiteur surexcitation : peut être utilisé avec un régulateur DC

**Figure 2- 6: Système d'excitation muni de circuits de protection**

La Figure 2-6 présente les différentes fonctions et circuits de protection d'un système d'excitation qui peuvent être utilisées pour assurer la sécurité et la stabilité du système. Cependant, leur utilisation n'est pas obligatoire pour tous les types de systèmes d'excitation, car elles peuvent varier d'un système à l'autre en fonction des exigences de performance [8].

### 2.5.1 Régulateurs AC et DC

Le régulateur à courant alternatif (AC) est responsable de la régulation de la tension de sortie au niveau du stator de la génératrice synchrone, ainsi que de la mise en œuvre d'autres fonctions de contrôle et de protection, telles qu'illustrées dans la Figure 2-6. En revanche, le régulateur à courant continu (DC) contrôle la tension d'excitation et est souvent réalisé à l'aide d'un régulateur automatique de tension (AVR) [13].

D'autre part, différents types de correcteurs peuvent être utilisés pour les régulateurs à courant alternatif, tels que les correcteurs conventionnels tels que PI, PID, etc.

### 2.5.2 Circuits de stabilisation d'un système d'excitation

Les systèmes d'excitation comportent des circuits de stabilisation qui interviennent souvent en cas d'instabilité du système causée par un important temps de réponse (comme dans le cas des systèmes d'excitation de type DC ou AC) [7], ou lorsque le gain du régulateur de tension au niveau du stator est très faible. Le circuit de stabilisation est caractérisé par une compensation additionnelle à la boucle de régulation pour améliorer la performance dynamique du système. La Figure 2-7 illustre la compensation la plus fréquente, qui est définie par une fonction de transfert sous la forme  $\frac{sK_F}{1+sT_F}$ .

Les paramètres de la fonction de stabilisation peuvent alors être ajustés pour assurer le bon fonctionnement du système.

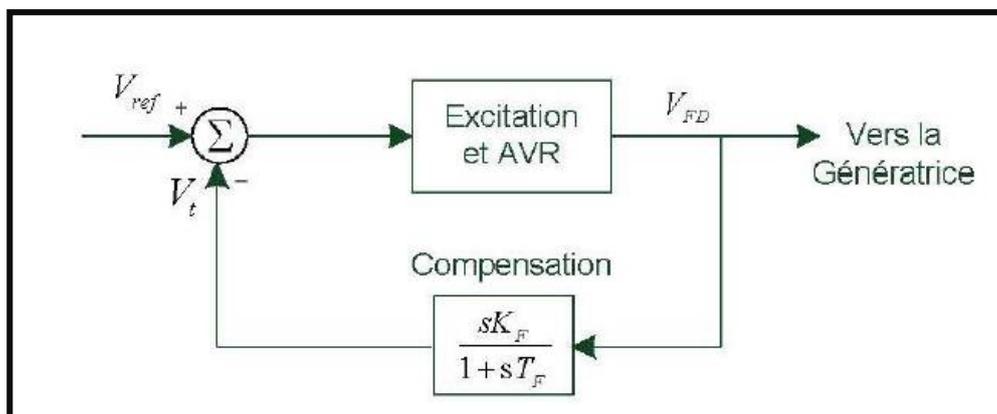


Figure 2- 7:Schéma de stabilisation et régulation de l'excitation [6],[14]

### 2.5.3 Stabilisateur de puissance (PSS)

Le stabilisateur de puissance (PSS) utilise des signaux de stabilisation supplémentaires pour améliorer les performances dynamiques du système électrique global en agissant sur le système d'excitation. Les grandeurs utilisées à l'entrée d'un stabilisateur de puissance sont généralement générées par la vitesse de rotation de l'arbre, la fréquence et la puissance [14],[15]. L'utilisation d'un stabilisateur de puissance dans les systèmes d'excitation est souvent requise, car cet élément permet principalement d'amortir les oscillations de puissance, en particulier dans le cas de faibles signaux, ce qui assure une meilleure stabilité.

### 2.5.4 Compensateur de charge

La tension de sortie de la génératrice est normalement réglée par le régulateur automatique de tension (AVR). Toutefois, il arrive parfois qu'un compensateur de charge soit ajouté pour réguler la tension [6]. La Figure 2-8 montre la composition d'un compensateur de charge, qui est composé d'une résistance  $R_c$  et d'une réactance  $X_c$  en série, toutes deux étant ajustables. En utilisant cette impédance, le courant de l'armature  $I_t$  et la tension  $E_t$  mesurée, la tension de compensation  $V_c$  est calculée en utilisant la formule suivante :

$$V_c = | \tilde{E}_t + (R_c + jX_c) \tilde{I}_t |$$

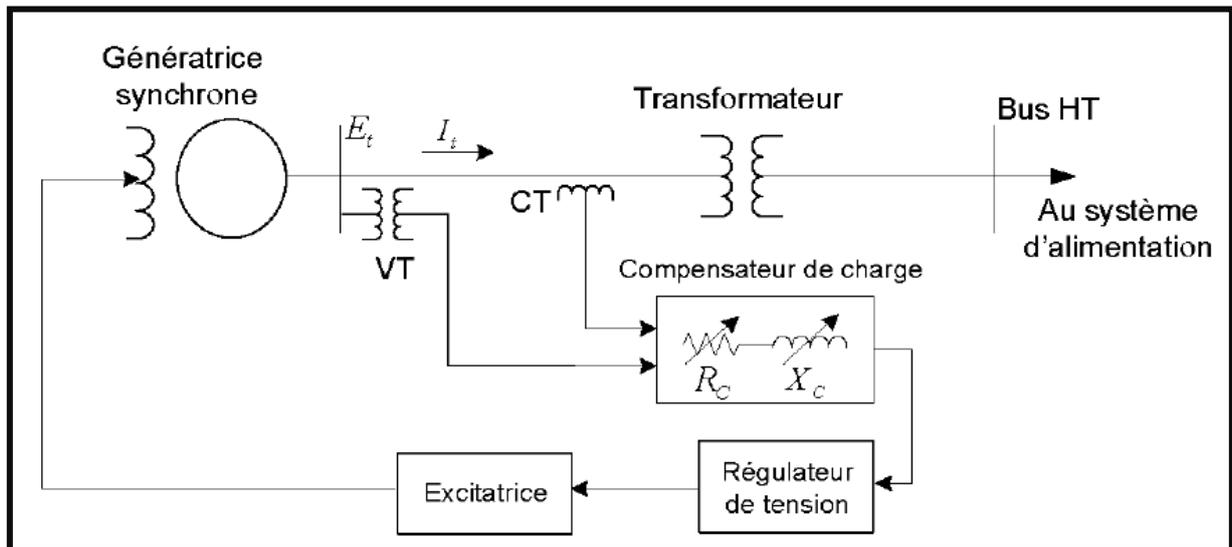


Figure 2- 8:Schéma du compensateur de charge [6]

## 2.6 Conclusion

En conclusion, les systèmes d'excitation sont des éléments essentiels des groupes turbine-alternateur, car ils assurent la régulation de la tension de sortie de la génératrice et contribuent à la stabilité du système électrique global. Les différents types de systèmes d'excitation tels que les systèmes d'excitation à courant continu, à courant alternatif et les systèmes hybrides ont été présentés, ainsi que les différentes fonctions de protection et de limitation qui sont souvent incluses dans ces systèmes.

Nous avons également vu que les systèmes d'excitation sont composés de différents éléments tels que le régulateur de tension, les circuits de stabilisation, les stabilisateurs de puissance et les compensateurs de charge. Ces éléments agissent ensemble pour assurer une régulation précise de la tension et une performance dynamique optimale du système.

Enfin, la modélisation du système d'excitation est une étape importante dans la conception et l'optimisation des groupes turbine-alternateur. Le choix du type d'excitation et l'élaboration d'un modèle mathématique précis permettent d'assurer une conception fiable et efficace des systèmes d'excitation.

# Chapitre 3

## Modélisation de l'alternateur et du système d'excitation

### 3.1 Introduction

Ce chapitre traite de la modélisation de l'alternateur et le système d'excitation. L'objectif est de présenter chaque modèle de manière indépendante, et plus particulièrement, de décrire le modèle mathématique du système d'excitation.

Dans un premier temps, le modèle mathématique de la génératrice synchrone est exposé, dans le repère triphasé abc, puis dans le repère de Park [6].

Ensuite, présentons le système d'excitation de type statique ST est modélisé suivant deux méthodes qui seront bien détaillées. Cette démarche permettra de réaliser différentes expérimentations et tests sur le système global, mettant en évidence l'importance de cette partie excitatrice.

### 3.2 Modélisation de la génératrice synchrone

Les machines synchrones peuvent être modélisées selon différentes méthodes, en fonction des objectifs recherchés.

Le modèle (a, b, c) est dérivé des équations différentielles à coefficients périodiques qui régissent le fonctionnement de la machine. Il est principalement utilisé pour l'étude des régimes permanents.

Le modèle basé sur la transformation de Park est couramment utilisé pour l'étude des régimes transitoires et pour la commande vectorielle des moteurs.

Dans ce chapitre, nous présenterons le modèle d'une machine synchrone à inducteur bobiné à pôles lisses en utilisant certaines hypothèses simplificatrices afin de faciliter la résolution des systèmes d'équations différentielles.

#### ✓ Hypothèses

- Les courants de Foucault sont supposés négligeables, ce qui permet d'exprimer tous les flux de la machine en fonction des courants, des inductances propres et mutuelles.
- Les résistances de la machine (d'induit et d'inducteur) sont considérées comme invariantes par rapport aux variations de la température.
- Le circuit magnétique est supposé parfaitement feuilleté, ce qui signifie que seuls les circuits inducteurs, induits et amortisseurs sont parcourus par des courants.
- On suppose que les forces magnétomotrices des enroulements du stator ont une répartition sinusoïdale, ce qui permet d'obtenir des expressions d'inductances relativement simples.
- La saturation du circuit magnétique ne sera pas prise en compte [16].

### 3.2.1 Modèle de la génératrice synchrone dans le repère abc

La machine de notre cas d'étude est équipée de trois enroulements statoriques, notés a, b et c, décalés de 120 degrés. Le rotor est constitué d'un nombre équivalent d'enroulements répartis le long de deux axes principaux : l'axe direct, qui est aligné avec l'enroulement d'excitation et comporte un deuxième enroulement fictif représentant l'effet des amortisseurs, et l'axe en quadrature, perpendiculaire au premier, qui possède également un enroulement fictif représentant l'effet des amortisseurs (Figure 3-1).

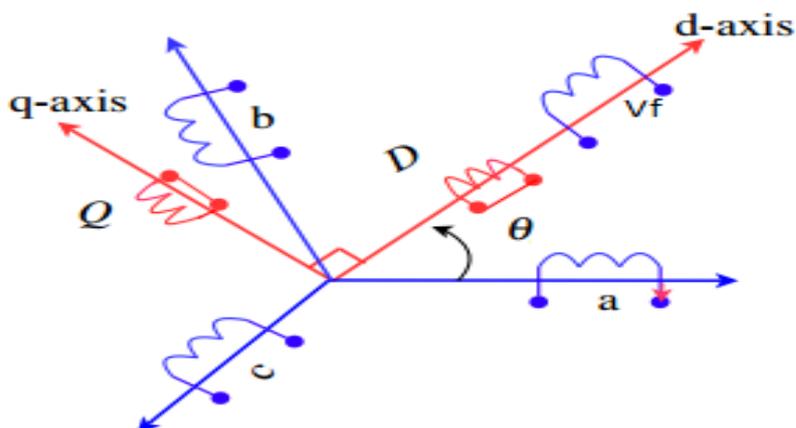


Figure 3- 1:Schéma équivalent de la machine synchrone muni d'amortisseur [17],[18]

Les équations de tensions sont formulées de la manière suivante [19] :

$$\text{Induit (stator)} \quad \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\text{Inducteur (rotor)} \quad \begin{bmatrix} V_f \\ V_D \\ V_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Comme les enroulements amortisseurs des deux axes sont court-circuités, les tensions correspondantes sont nulles. Ainsi, le système se réduit aux équations suivantes [18],[20]:

$$\begin{bmatrix} V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 \\ 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Les équations mécaniques qui décrivent le fonctionnement mécanique de l'alternateur synchrone sont les suivantes [19]:

$$\begin{cases} \frac{dw_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - Dw_r) \\ \frac{d\delta}{dt} = w_s (w_r - 1) \\ T_e = \Psi_q i_d - \Psi_d i_q \end{cases} \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Modèle de la génératrice synchrone dans le repère de Park (dq0)

La transformation de Park consiste en une conversion triphasée-diphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du référentiel fixe (abc) au référentiel mobile (dq0) afin de simplifier le modèle du système, étant donné la complexité de son étude.

Les enroulements du stator dans le référentiel abc sont ainsi remplacés par deux enroulements (dq0) en quadrature.

La matrice de transformation de Park  $[P(\Theta)]$  permet de convertir les grandeurs statoriques  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  et  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  en leurs composantes relatives  $V_o$ ,  $V_d$ ,  $V_q$  et  $i_o$ ,  $i_d$ ,  $i_q$ . Elle est définie par l'équation suivante [21]:

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \cos(\Theta + 2\pi/3) & \cos(\Theta + 4\pi/3) \\ -\sin(\Theta) & -\sin(\Theta + 2\pi/3) & -\sin(\Theta + 4\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

La matrice de passage de Park n'est pas orthogonale. Cependant, en divisant chaque vecteur colonne par sa norme, on peut obtenir une matrice orthogonale appelée transformation de Park modifiée  $[P_M(\Theta)]$ . Cette transformation permet de préserver l'invariance des puissances instantanées dans les deux systèmes d'axes (abc) et (dq0), assurant ainsi une équivalence physique [21]. Cela peut être exprimé par l'équation suivante :

$$[P_M] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \cos(\Theta + 2\pi/3) & \cos(\Theta + 4\pi/3) \\ -\sin(\Theta) & -\sin(\Theta + 2\pi/3) & -\sin(\Theta + 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

On pose :

$$[r] = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 \\ 0 & 0 & -r_a \end{bmatrix}; V_{dqo} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix}; \Psi_{dqo} = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix}; i_{dqo} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix}$$

Le système d'équations est décrit comme suit :

$$V_{dqo} = [r] * i_{dqo} + \frac{d}{dt} \Psi_{dqo} \quad (3.7)$$

$$\text{Avec} \quad \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_o \end{bmatrix} = [P_M] \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

En remplaçant (3.8), (3.9) et (3.10) dans (3.7), on obtient :

$$V_{dqo} = [r] * i_{dqo} + \frac{d}{dt} \Psi_{dqo} + w_s * \Psi_{dqo} * [P_M] * \frac{d}{d\theta} [[P_M]^{-1}] \quad (3.11)$$

Tel que

$$\frac{d}{d\theta} [[P_M]^{-1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta + 2\pi/3) & 0 \\ -\sin(\theta + 2\pi/3) & -\cos(\theta + 2\pi/3) & 0 \\ -\sin(\theta + 4\pi/3) & -\cos(\theta + 4\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

En remplaçant (3.12) dans (3.11), on obtient :

$$\begin{cases} V_d = -r_a i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - w_r \Psi_q \\ V_q = -r_a i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + w_r \Psi_d \\ V_o = -r_a i_o + \frac{d}{dt} \Psi_o + 0 \Psi_o \end{cases} \quad (3.13)$$

Comme l'axe homopolaire est nul

$$\begin{cases} V_d = -r_a i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - w_r \Psi_q \\ V_q = -r_a i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + w_r \Psi_d \end{cases} \quad (3.14)$$

Les équations suivantes représentent le système pour le rotor et le stator [22]:

$$\begin{cases} V_d = -r_a i_d + \frac{d}{dt} \Psi_d - w_r \Psi_q \\ V_q = -r_a i_q + \frac{d}{dt} \Psi_q + w_r \Psi_d \\ V_f = r_f i_f + \frac{d}{dt} \Psi_f \\ 0 = r_D i_D + \frac{d}{dt} \Psi_D \\ 0 = r_Q i_Q + \frac{d}{dt} \Psi_Q \end{cases} \quad (3.15)$$

La Figure 3-2 présente le nouveau modèle dans le repère (dq0) :

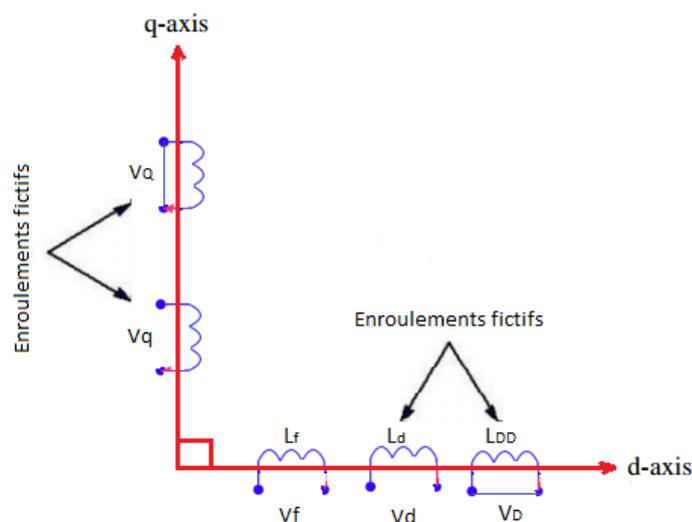


Figure 3- 2:Modèle de la machine synchrone dans le repère (dq0)

Les expressions des flux en fonction des courants [21],[23] :

$$\begin{cases} \Psi_d = -L_d i_d + M_{df} i_f + M_{dD} i_D \\ \Psi_q = -L_q i_q + M_{qQ} i_Q \\ \Psi_f = -M_{df} i_d + L_f i_f + M_{fD} i_D \\ \Psi_D = -M_{dD} i_d + M_{Df} i_f + L_D i_D \\ \Psi_Q = -M_{qQ} i_q + L_Q i_Q \end{cases} \quad (3.16)$$

On remplace les flux de la relation (3.16) dans le système d'équations (3.15)

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

$$+ \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & -M_{qQ} \\ -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

On pose

$$[R] = \begin{bmatrix} -r_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{qQ} \\ -M_{df} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ -M_{dD} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & -M_{qQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}$$

$$[B] = \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & -M_{qQ} \\ -L_d & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Donc 
$$V = [R] * I + [C] * \frac{dI}{dt} + [B] * I \quad (3.18)$$

L'équation suivante donne la tension aux bornes du générateur, notée  $V_t$  :

$$V_t = (V_d^2 + V_q^2)^{1/2} \quad (3.19)$$

### 3.3 Modélisation du système d'excitation statique

Dans cette partie, nous présentons le développement du modèle mathématique utilisé pour l'excitatrice statique en utilisant deux méthodes différentes : le modèle par méthode DQ et le modèle de type ST de IEEE.

#### 3.3.1 Modèle par la méthode DQ

Cette méthode implique la représentation du redresseur commandé de l'excitatrice statique (Figure 2-5) à l'aide d'un circuit électrique dans le cas d'une alimentation triphasée [24],[25].

En se basant sur le circuit équivalent illustré dans la Figure 3-3, l'effet des inductances équivalentes ( $L_{eq}$ ) en alternatif entraîne une chute de tension après le redressement, qui est définie par une résistance variable  $r_\mu = \frac{3\omega L_{eq}}{\pi}$ , où  $\omega$  est la fréquence de la source.

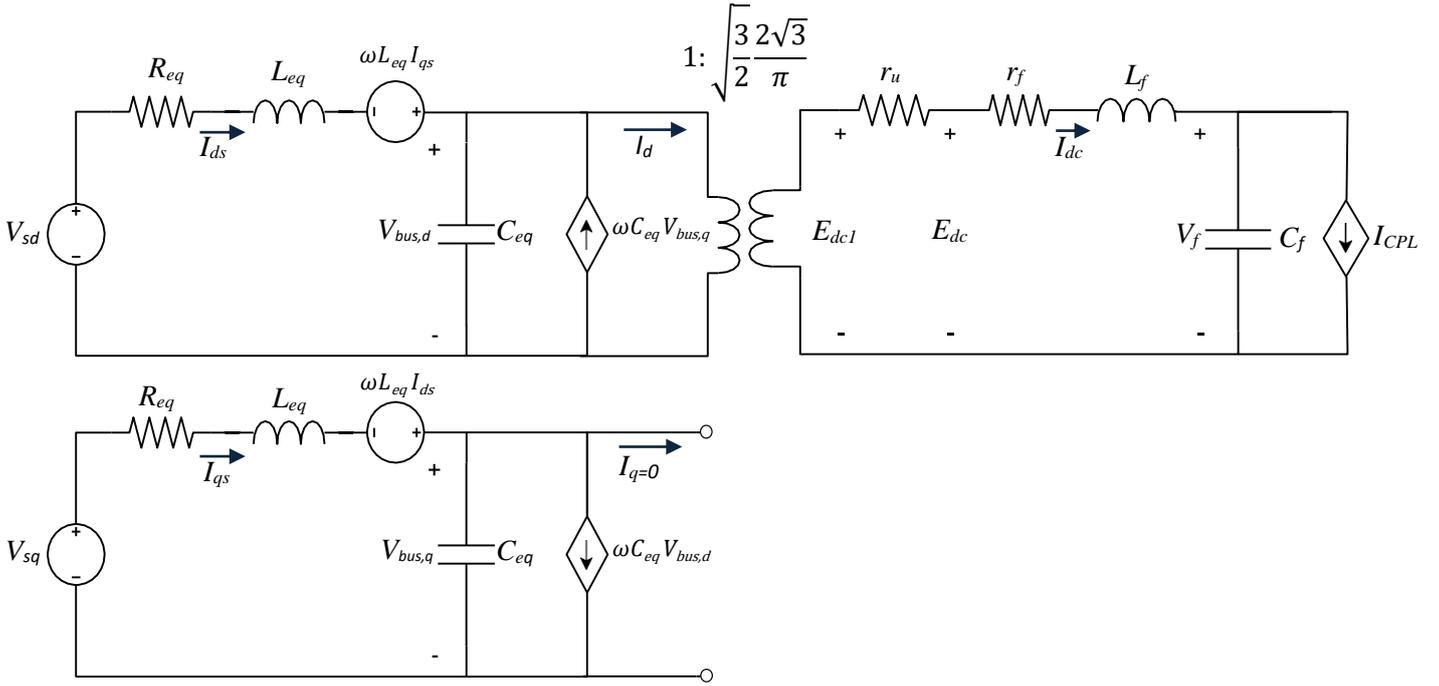


Figure 3- 3:Circuit électrique équivalent du redresseur commandé lié au réseau dans le repère dq [24]

- **Modèle d'état final du convertisseur commandé:**

En analysant le circuit électrique équivalent du redresseur commandé présenté dans la (Figure 3-3), et en appliquant la loi de Kirchhoff aux grandeurs électriques de tension et de courant, nous obtenons les équations suivantes [24],[25]:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(I_{ds}) = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + \omega I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{ds} \\ P(I_{qs}) = -I_{ds} \omega - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\ P(V_{bus,d}) = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} - \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\ P(V_{bus,q}) = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\ P(I_{dc}) = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_F} V_{bus,d} - \left( \frac{r_F + r_\mu}{L_F} \right) I_{dc} - \frac{1}{L_F} V_f \\ P(V_f) = \frac{1}{C_F} I_{dc} - \frac{1}{C_F} \frac{P_{CPL}}{V_f} \end{array} \right. \quad (3.20)$$

Le système d'équations est non linéaire, et pour faciliter son analyse, nous procédons à sa linéarisation en utilisant le terme du premier ordre des séries de Taylor autour d'un point d'équilibre (X0, U0) [26].

• **Modèle d'état du convertisseur commandé avec régulation de l'excitation**

Pour réguler la tension d'excitation  $V_f$ , il est courant d'utiliser des régulateurs classiques de type PI. Le circuit électrique du convertisseur statique avec régulation est représenté dans la Figure 3-4 [27].

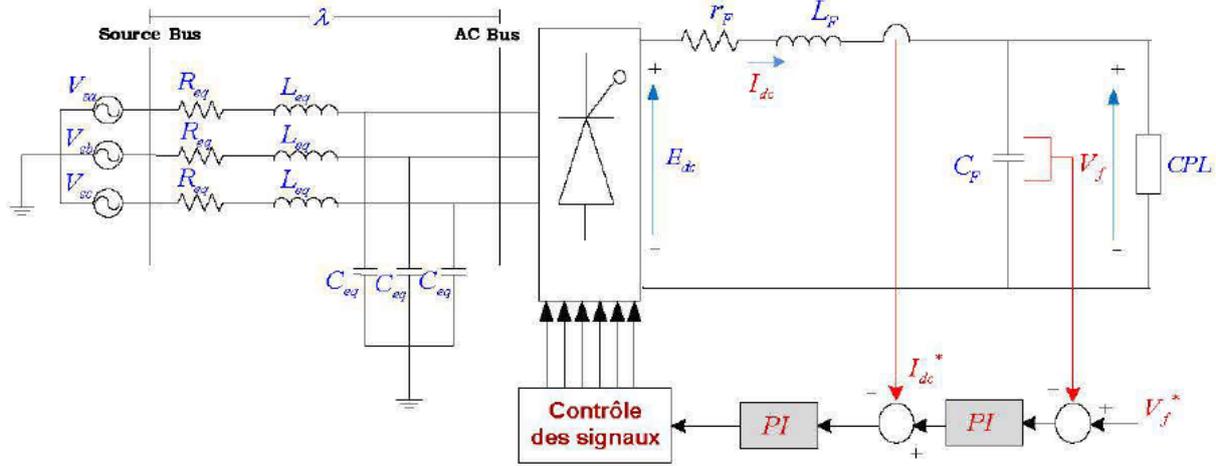


Figure 3- 4: Convertisseur avec régulateurs [25]

Le schéma fonctionnel du régulateur PI est représenté par :

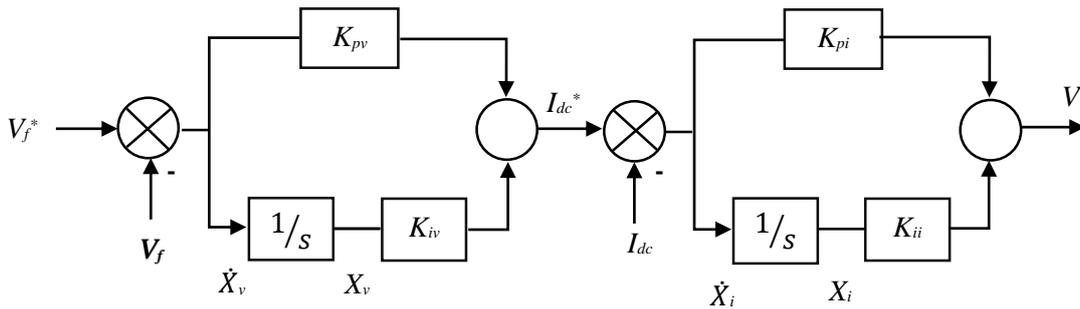


Figure 3- 5: Régulation par PI

En se basant sur le schéma de régulation PI présenté dans la Figure 3-5, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} V^* = -K_{pi}I_{dc} - K_{pv}K_{dc}V_f + K_{iv}K_{pi}X_v + K_{ii}X_i + K_{pv}K_{pi}V_f^* \\ P(X_v) = -V_f + V_f^* \\ P(X_i) = -I_{dc} - V_fK_{pv} + K_{iv}X_v + K_{pv}V_f^* \end{cases} \quad (3.21)$$

Le circuit électrique équivalent du convertisseur statique avec régulation de la tension d'excitation dans le repère dq est représenté par la Figure 3-6 :

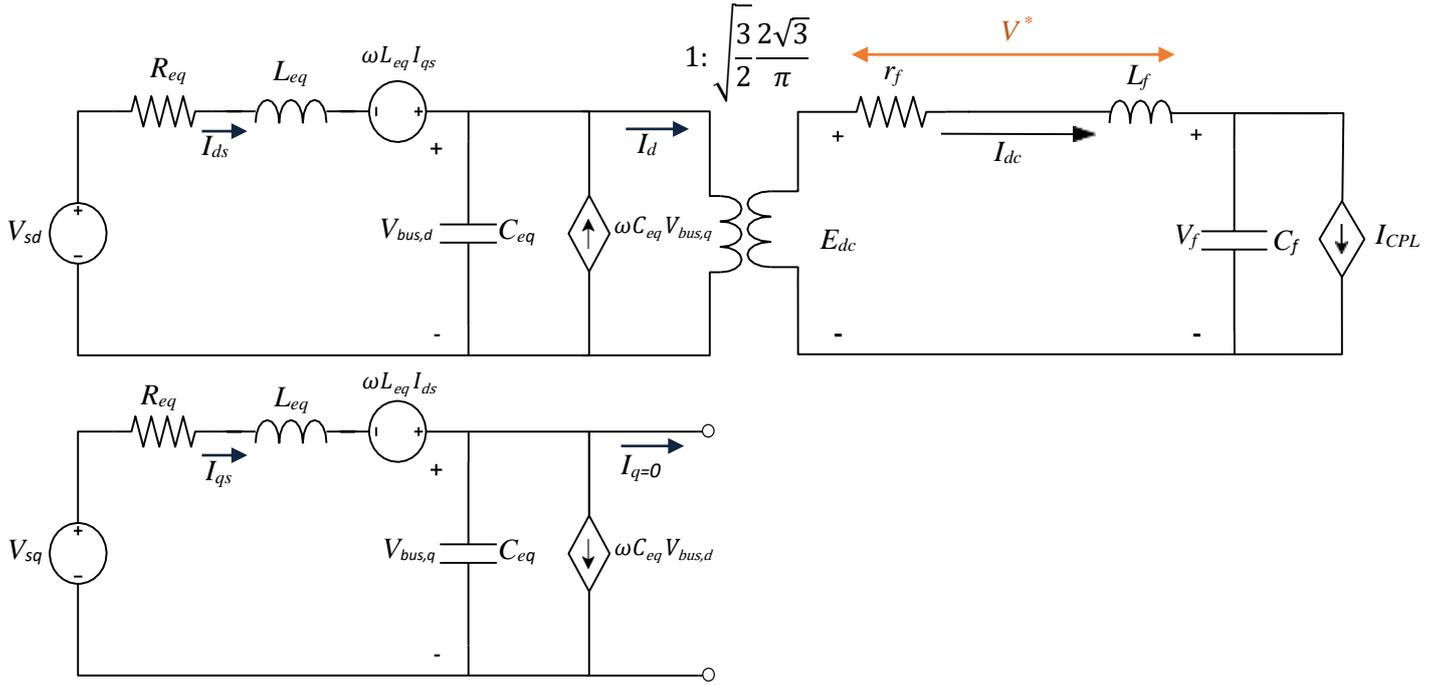


Figure 3- 6:Circuit électrique équivalent du convertisseur régulé [25]

À partir du circuit équivalent, nous pouvons écrire :

$$V^* = r_f I_{dc} + L_F P(I_{dc}) \quad (3.22)$$

En remplaçant  $V^*$  dans l'équation (3.21), on obtient :

$$P(I_{dc}) = -\left(\frac{r_F + K_{pi}}{L_F}\right) I_{dc} + \left(\frac{K_{iv} K_{pi}}{L_F}\right) X_v + \frac{K_{ii}}{L_F} X_i - \left(\frac{K_{pv} K_{pi}}{L_F}\right) V_f + \left(\frac{K_{pv} K_{pi}}{L_F}\right) V_f^* \quad (3.23)$$

En intégrant les équations supplémentaires (3.21) et (3.23) obtenues après les régulations, les équations deviennent les suivantes [25] :

$$\left\{ \begin{array}{l} P(I_{dc}) = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{ds} + I_{qs} \omega - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,d} + \frac{1}{L_{eq}} V_{ds} \\ P(I_{qs}) = -I_{ds} \omega - \frac{R_{eq}}{L_{eq}} I_{qs} - \frac{1}{L_{eq}} V_{bus,q} + \frac{1}{L_{eq}} V_{sq} \\ P(V_{bus,d}) = \frac{1}{C_{eq}} I_{ds} - \omega V_{bus,q} - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi C_{eq}} I_{dc} \\ P(V_{bus,q}) = -\omega V_{bus,d} + \frac{1}{C_{eq}} I_{qs} \\ P(I_{dc}) = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi L_F} V_{bus,d} - \left(\frac{r_F + r_\mu}{L_F}\right) I_{dc} - \frac{1}{L_F} V_f \\ P(V_f) = \frac{1}{C_F} I_{dc} - \frac{1}{C_F} \frac{P_{CPL}}{V_f} \\ P(X_v) = -V_f + V_f^* \\ P(X_i) = -I_{dc} - V_f K_{pv} + K_{iv} X_v + K_{pv} V_f^* \end{array} \right. \quad (3.24)$$

Le système d'équations est non linéaire, et pour faciliter son analyse, nous procédons à sa linéarisation en utilisant le terme du premier ordre des séries de Taylor autour d'un point d'équilibre ( $X_0, U_0$ ) [26].

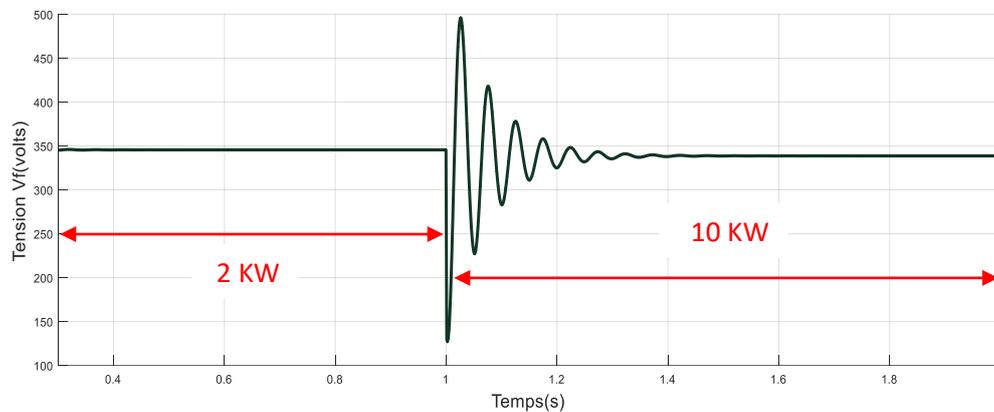
➤ **Exemple de simulation du modèle par méthode DQ :**

Dans le but de mettre en évidence la dynamique du convertisseur commandé basé sur le modèle obtenu à l'aide de la méthode DQ, nous allons présenter plusieurs tests de simulation réalisés dans MATLAB. (L'exemple d'application numérique et les scripts associés sont donnés en annexe 2 , 4 et 5 respectivement).

Pour une tension d'entrée  $V_s = 351$  V .

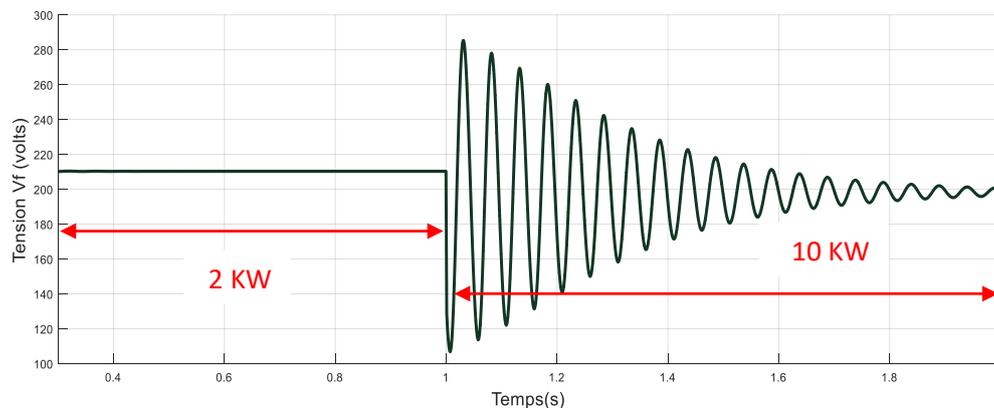
1) Redresseur connecté au réseau sans régulation de la tension d'excitation  $V_f$

- Pour une variation de charge à la sortie  $P_{cpl}$  de 2 kW à 10 kW, réalisée à  $t = 1$  s, avec un angle d'amorçage des thyristors égal à 10 degrés:



**Figure 3- 7:Tension d'excitation  $V_f$  ( $\alpha = 10^\circ$ )**

- Pour une variation de charge à la sortie  $P_{cpl}$  de 2 kW à 10 kW, réalisée à  $t = 1$  s, avec un angle d'amorçage des thyristors égal à 15 degrés:



**Figure 3- 8:Tension d'excitation  $V_f$  ( $\alpha = 15^\circ$ )**

Remarque:

- ✓ D'après les Figures 3-7 et 3-8, lorsque la charge  $P_{cpl}$  augmente, la tension d'excitation  $V_f$  diminue.
- ✓ Lorsque l'angle d'amorçage augmente, la tension d'excitation  $V_f$  diminue également, ce qui entraîne une diminution de la stabilité et de la réactivité du système (Figure 3-8).
- ✓ Les résultats obtenus soulignent la nécessité d'un contrôle de la sortie pour remédier à l'instabilité du système.

2) Redresseur lié au réseau, avec régulation de la tension d'excitation  $V_f$

Après la synthèse des correcteurs PI selon les schémas présentés dans les Figures 3-9 et 3-10 [25], nous obtenons les résultats suivants :

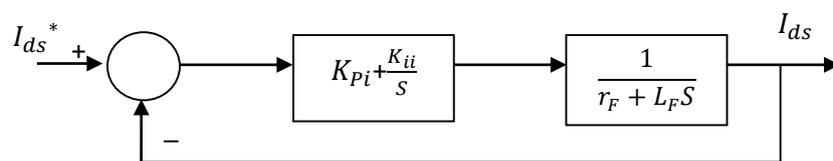


Figure 3- 9: Calcul des paramètres  $K_{pi}$  et  $K_{ii}$

Étant donné que le système est de deuxième ordre et peut être représenté par l'équation

$$S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2 \tag{3.25}$$

Où  $\omega_n$  représente la pulsation propre du système et  $\zeta$  est le coefficient d'amortissement, nous pouvons analyser ses caractéristiques et sa réponse en fonction de ces paramètres.

On déduit alors les paramètres du PI :

$$\frac{I_{ds}}{I_{ds}^*} = \frac{K_{ii} + SK_{pi}}{S^2 + \left(\frac{K_{pi} + r_F}{L_F}\right)S + \frac{K_{ii}}{L_F}} \quad \text{Donc} \quad \begin{cases} K_{pi} = 2\zeta\omega_n L_F - r_F \\ K_{ii} = \omega_n^2 L_F \end{cases} \tag{3.26}$$

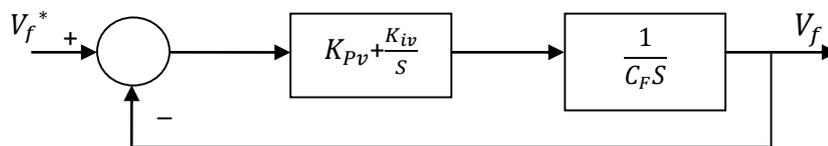
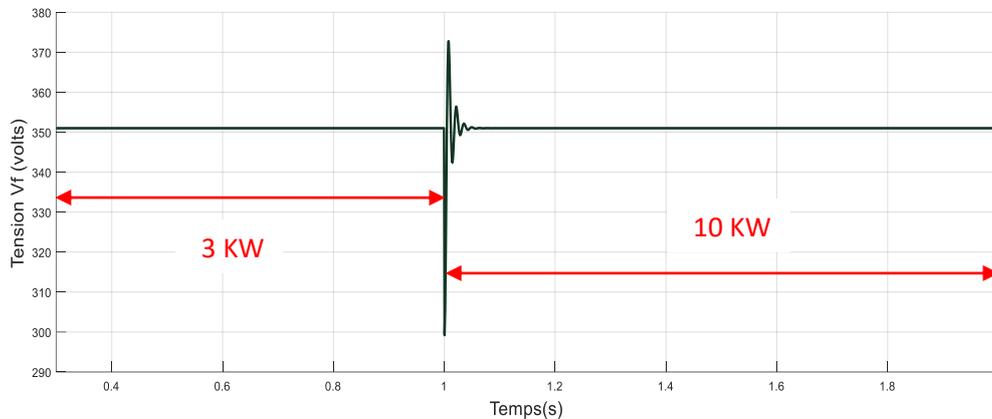


Figure 3- 10: Calcul des paramètres  $K_{pv}$  et  $K_{iv}$

$$\frac{V_f}{V_f^*} = \frac{K_{iv} + SK_{pv}}{S^2 + \left(\frac{K_{pv}}{C_F}\right)S + \frac{K_{iv}}{C_F}} \quad \text{Donc} \quad \begin{cases} K_{pv} = 2\zeta\omega_{nv} C_F \\ K_{iv} = \omega_{nv}^2 C_F \end{cases} \tag{3.27}$$

- Lors d'une variation de charge à la sortie Pcpl de 3 kW à 10 kW, effectuée à  $t = 1$ s, avec un angle d'amorçage des thyristors de 10 degrés et une consigne de tension  $V_f$  fixée à 351V.



**Figure 3- 11:Tension d'excitation  $V_f$  régulée**

D'après la Figure 3-11, le régulateur PI parvient à maintenir la tension d'excitation  $V_f$  à la valeur souhaitée  $V_f^*$  de 351 volts, même en présence d'une variation de la charge extérieure Pcpl.

#### ➤ Remarques

La méthode de modélisation du système d'excitation basée sur la méthode DQ présente des résultats satisfaisants en termes de régulation de la tension de sortie du convertisseur classique [25],[27]. Cependant, il convient de noter que cette méthode implique des calculs et des équations complexes pour représenter le convertisseur statique, ce qui peut entraîner des temps de simulation prolongés. Ce type de modèle, qui inclut le convertisseur statique, est couramment utilisé pour améliorer la stabilité face à une charge CPL [27]. Il offre une approche intéressante pour l'étude des systèmes de production plus complexes, tels que les génératrices synchrones.

### 3.3.2 Modèle IEEE type ST

Les modèles mathématiques des systèmes d'excitation jouent un rôle crucial dans divers aspects tels que l'évaluation des performances requises, l'optimisation, la conception et la coordination de commandes supplémentaires.

Dans cette section, nous présentons la modélisation du système d'excitation statique conformément au standard ST1 de IEEE [6],[28].

La Figure 3-12 représenté le modèle du système d'excitation IEEE-type ST1.

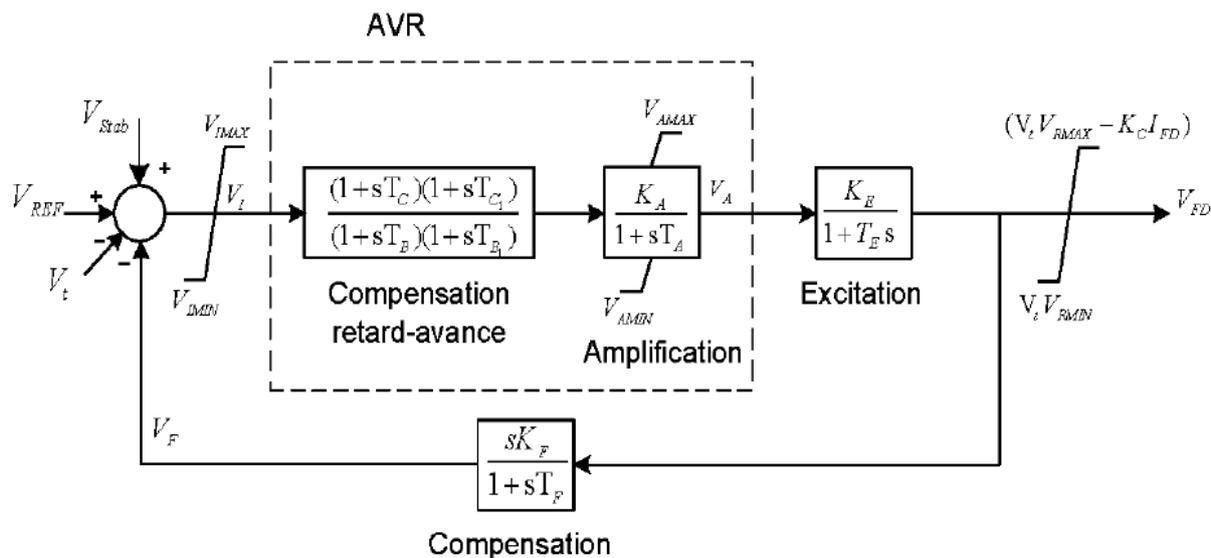


Figure 3- 12:Modèle du système d'excitation IEEE-type ST1

Afin de contrôler la tension d'excitation  $V_{FD}$ , le système simplifié ( $T_c$ ,  $T_{c1}$ ,  $T_B$ , et  $T_{B1}$  sont négligés) peut être représenté comme le montre la Figure 3-13 [6],[7] :

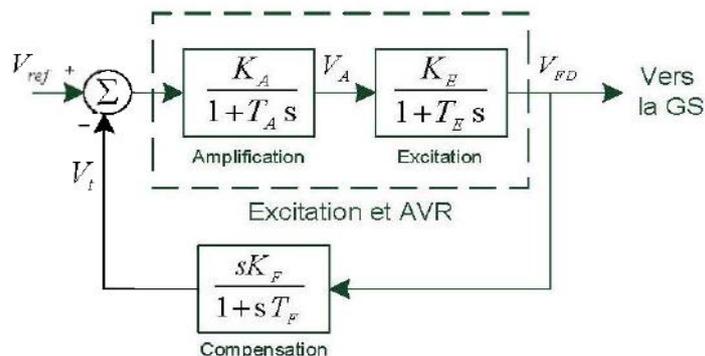


Figure 3- 13:Régulation de la tension d'excitation

### 3.4 Régulation de la tension de sortie de la génératrice synchrone :

Pour corriger la tension de sortie de la génératrice  $V_s$  ( Figure 3-14), il est courant d'intégrer un régulateur de type PID classique dans le système, car il combine de manière efficace les trois actions principales (proportionnelle, intégrale et dérivée) [29],[30], ce qui permet d'obtenir des réponses plus performantes ( Figure 3-15).

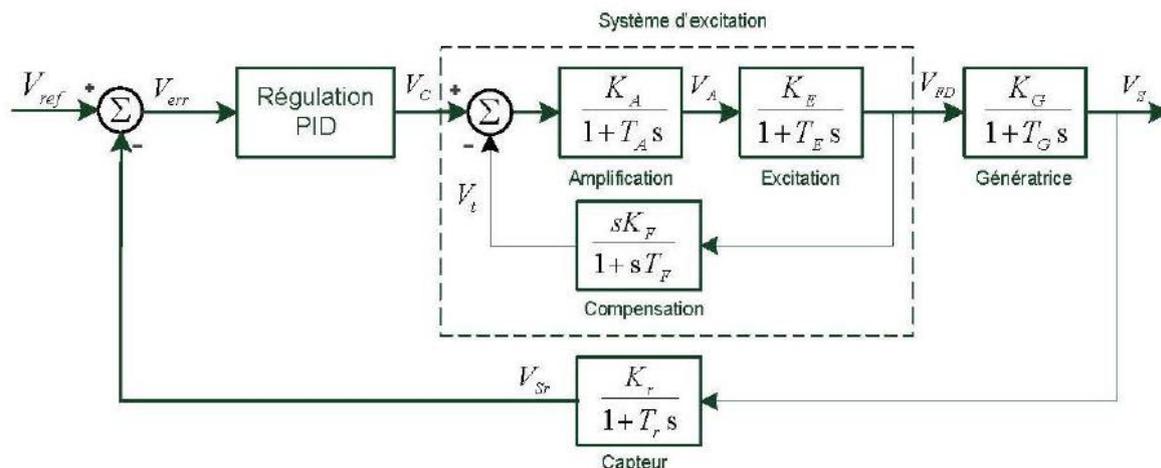


Figure 3- 14:Régulation de la tension de sortie de la génératrice

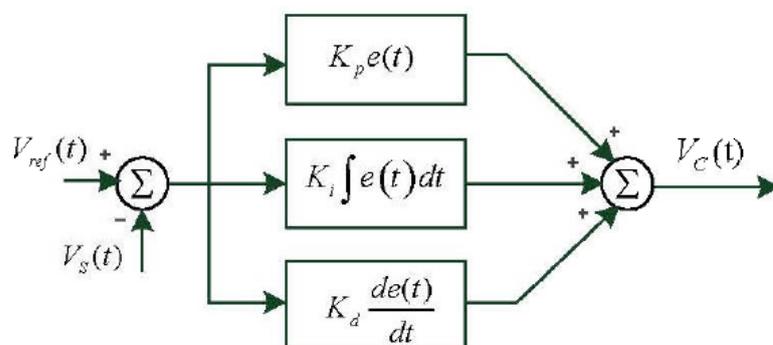


Figure 3 -15:Schéma fonctionnel d'un correcteur PID classique

La tension de sortie corrigée est donnée par :

$$V_c(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3.28)$$

Dans cette formulation, l'écart est représenté par  $e(t)$ , le gain proportionnel est noté  $K_p$ , la constante de temps intégrale est  $T_I$  et la constante de temps dérivée est  $T_D$ .

La fonction de transfert du correcteur PID s'écrit alors comme suit :

$$G_{PID}(S) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S \right) \quad (3.29)$$

La Figure 3-16 illustre le schéma de régulation de tension simplifié.

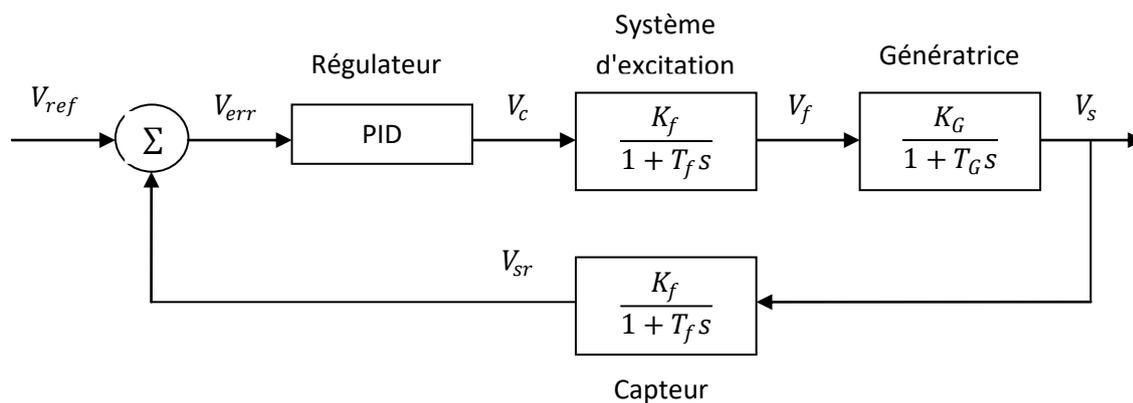


Figure 3 -16:Schéma de régulation de tension simplifié

- **Calcul des différents paramètres de chaque fonction de transfert :**
  - Fonction de transfert simplifiée de la Génératrice synchrone [6].

$$G_G(s) = \frac{K_G}{1 + T_G s}$$

Le calcul de  $K_G$  et  $T_G$  se fait comme suit :

$$\begin{cases} G_G(s) = \frac{1 + sT_{kd}}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} \\ K_G = \frac{x_{md}}{R_f}, \quad T'_{d0} = \frac{x_{md} + x_f + x_{kf1}}{r_f} \end{cases} \quad (3.30)$$

$$\text{Avec } x_f \gg x_{kf1}, x_{md} \rightarrow T_G = T'_{d0} \approx \frac{x_f}{R_f} \quad (3.31)$$

$T_{kd}$  et  $T''_{d0}$  sont négligées [6].

- Fonction de transfert simplifiée de système d'excitation [7].

$$G_f(s) = \frac{K_f}{1 + T_f s}$$

La relation entre la tension continue  $V_{SDC}$  obtenue après redressement par le convertisseur commandé, et la tension alternative entre phase  $V_{Sab}$  reçue par le réseau à travers le transformateur d'excitation est donnée comme suit:

$$\overline{V_{SDC}} = 1.35 \overline{V_{Sab-eff}} \cos \alpha \quad (3.32)$$

$$\begin{cases} V_f = 1.35 V_2 \cos \alpha = 1.35 K_e V_G \cos \alpha \\ V_c = V_{tb} \cos \alpha = K_{tb} V_G \cos \alpha \end{cases} \quad (3.33)$$

Où:  $V_f$  est la tension d'excitation (en courant continu),  $V_2$  la valeur efficace de la tension secondaire du transformateur utilisé,  $V_c$  tension corrigée à la sortie du régulateur PID, et  $V_{tb}$  définit la tension génératrice maximale ( $V_{base}$ ). Et  $K_e = V_2/V_G$  et  $K_{tb} = V_{tb}/V_G$  représente respectivement le ratio entre excitation/transformateur et le ratio entre génératrice/transformateur [7].

Le gain et la constante de temps est alors calculer comme suit [7] :

$$\begin{cases} K_f = 1.35 \frac{K_e}{K_{tb}} \\ T_f = \frac{T_e}{12} \end{cases} \quad (3.34)$$

$T_e$  : Période du signal d'entrée.

### 3.5 Paramètres du régulateur PID

- **Méthode du point critique**

Cette méthode repose sur la connaissance du point critique du processus. Expérimentalement, le processus est bouclé avec un simple régulateur proportionnel, dont le gain est augmenté jusqu'à ce que le système oscille de manière permanente, atteignant ainsi la limite de stabilité. Une fois le gain critique  $K_{cr}$  du régulateur et la période d'oscillation  $T_{cr}$  mesurés, on peut utiliser le Tableau 3.1 pour calculer les paramètres du régulateur choisi. Cependant, les valeurs proposées dans le tableau entraînent généralement un temps de montée relativement court, mais également un dépassement élevé. Cette situation n'étant pas toujours satisfaisante, il est possible de corriger les coefficients proposés, notamment en réduisant le gain  $K_p$ .

Type	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$		
PI	$0.4K_{cr}$	$0.8T_{cr}$	
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5T_{cr}$	$0.125K_{cr}$

**Tableau 3- 1:Paramètres PID obtenus à partir du point critique [31]**

Après l'application de la méthode du point critique les paramètres optimaux du régulateur PID pour la régulation de la tension de sortie sont les suivants :

$$K_p = 4.251 \times 10^{-4} \quad , \quad K_i = 5.083 \quad , \quad K_d = 8.339$$

### 3.6 Régulation de la vitesse de rotation

La Figure 3-17 présente le schéma illustrant le principe de régulation de la vitesse de rotation et de la puissance mécanique d'un groupe turbine-alternateur. La boucle de régulation comprend généralement un régulateur (gouverneur), un servomoteur et une turbine.

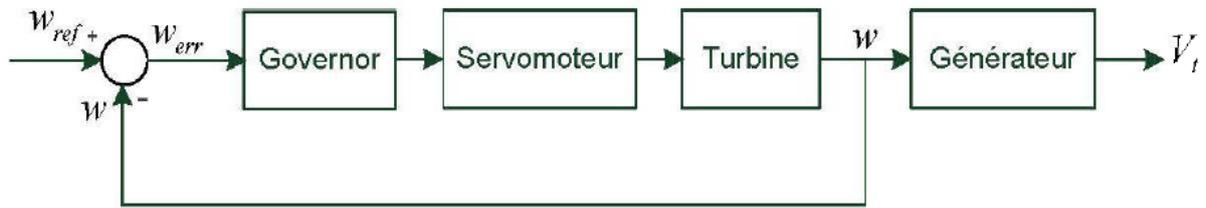


Figure 3- 17:Principe de la régulation de la vitesse [20]

### 3.7 Blocs Simulink

Les équations précédentes ont permis de déterminer le modèle de l'alternateur (Figure 3-18).

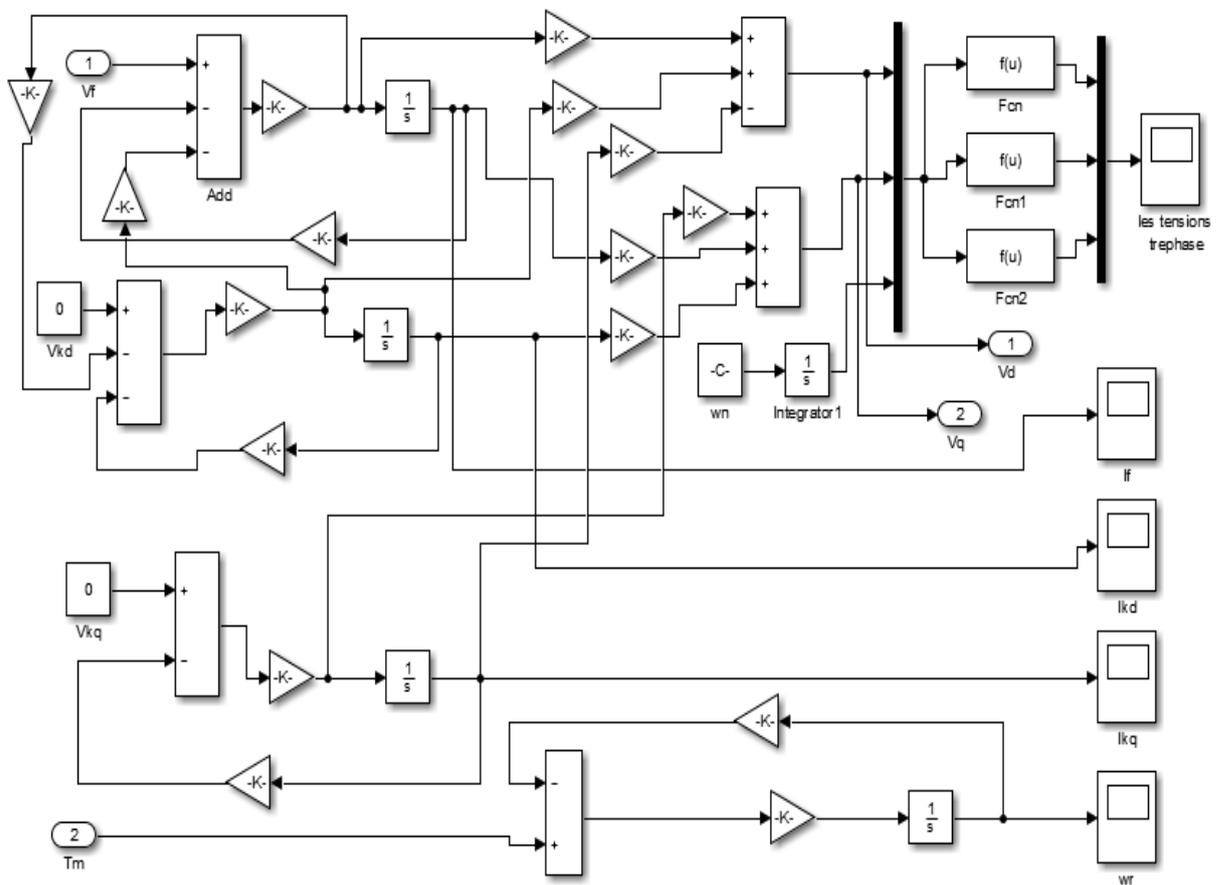


Figure 3- 18:Modèle de l'alternateur

Le modèle de l'alternateur et les blocs de régulation peut être représenté de la manière suivante (Figure 3-19) :

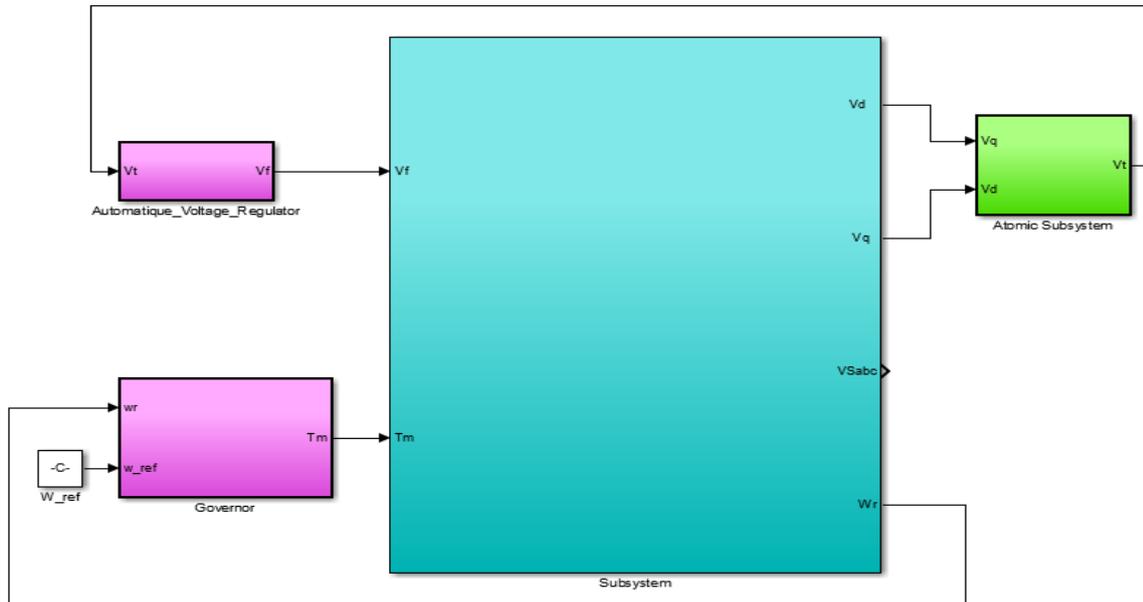


Figure 3- 19: simulink du modèle global

Le schéma bloc de régulation de la tension réalisé sous Matlab/Simulink est le suivant (Figure 3-20) :

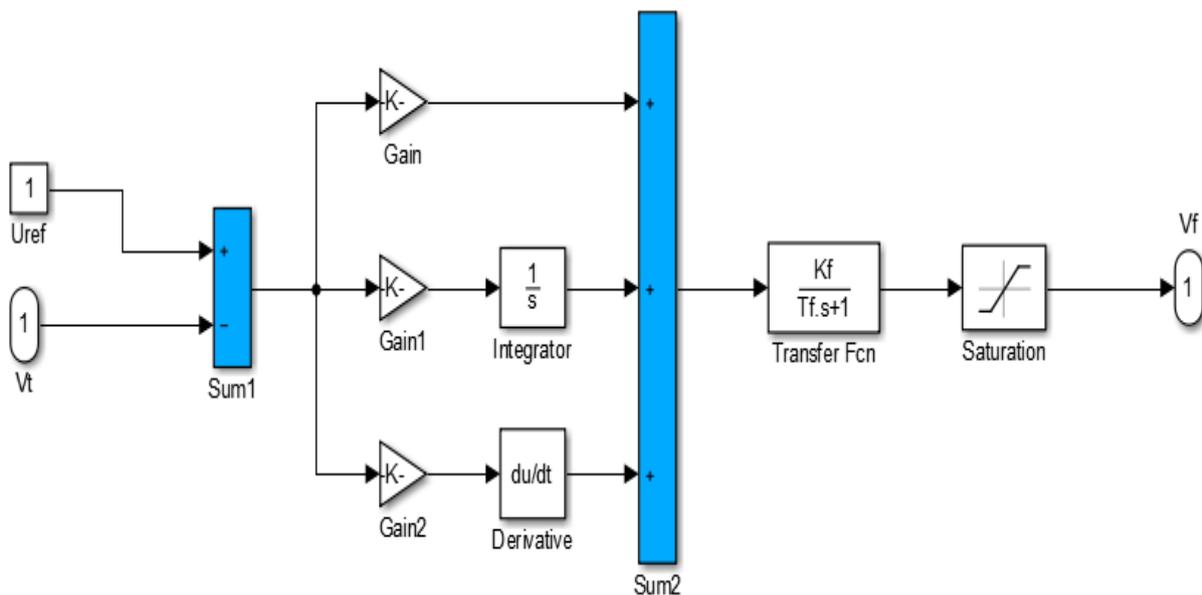
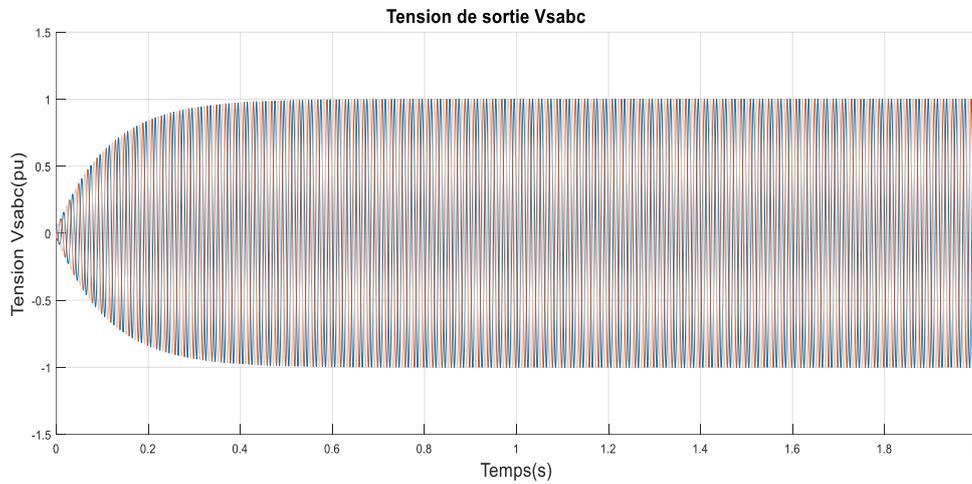


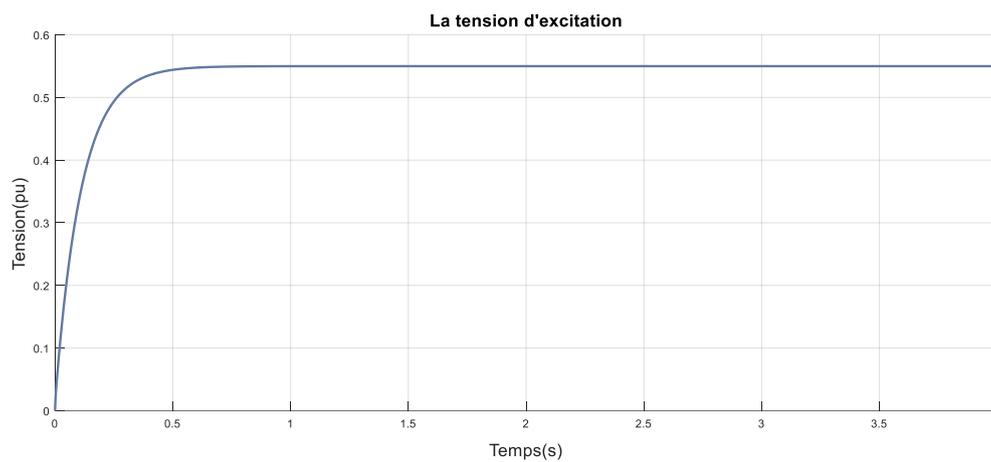
Figure 3- 20: Bloc-Simulink de régulation de la tension

- **Résultats de simulation**

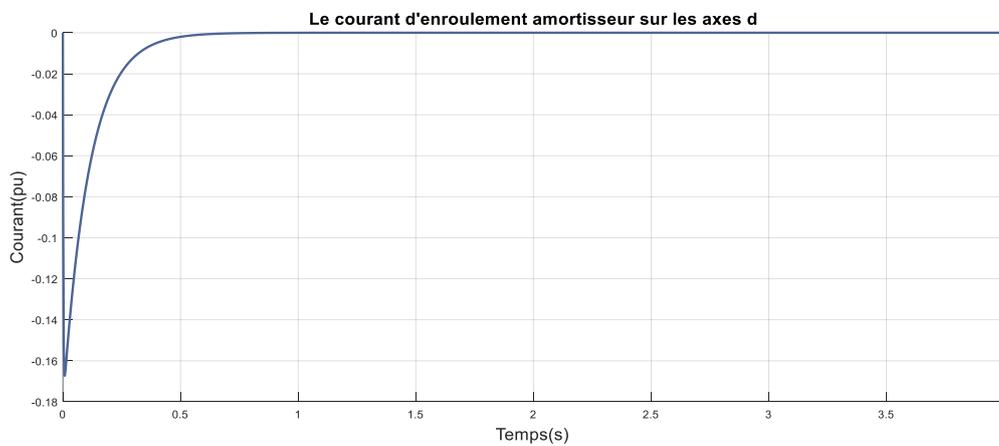
La tension de sortie, la tension d'excitation, le courant d'enroulement amortisseur sur les axes d et q, ainsi que la vitesse de rotation sont représentés respectivement dans les figures (3-21 et 3-22 et 3-23 et 3-25).



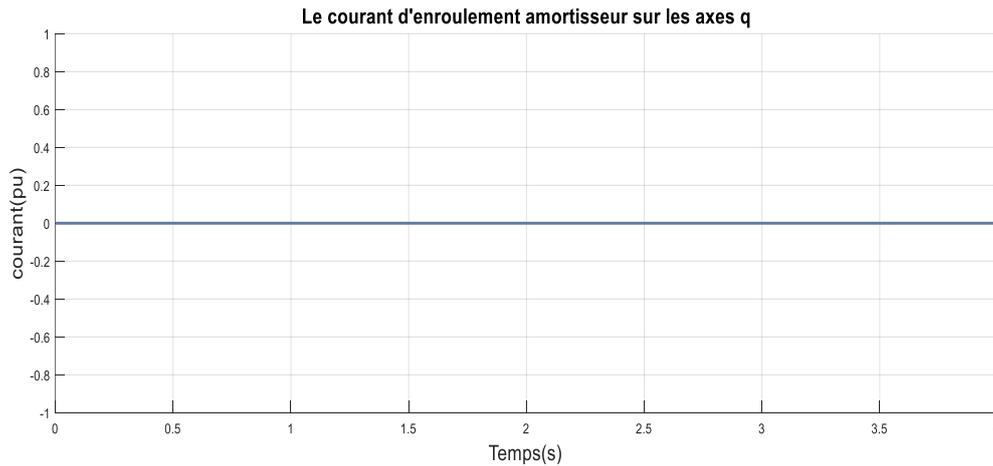
**Figure 3- 21:Tension de sortie de la génératrice Vsabc**



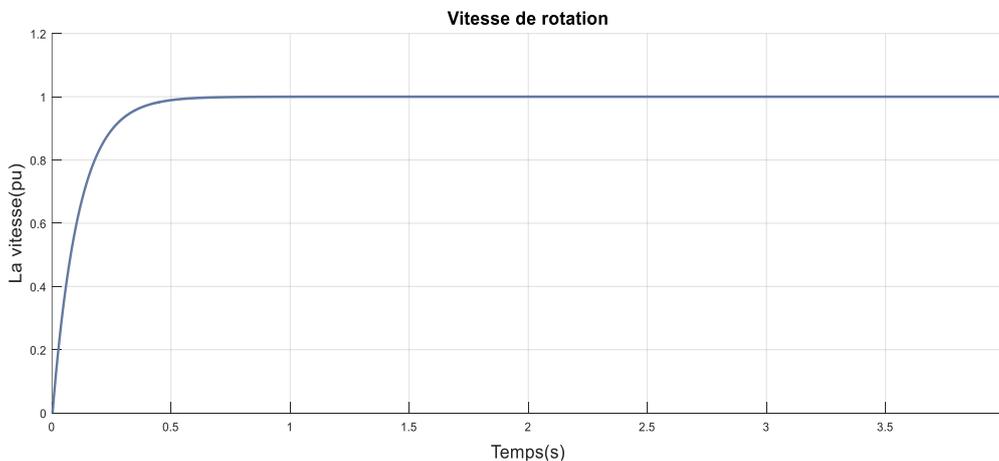
**Figure 3 -22:La tension d'excitation**



**Figure 3- 23:Le courant d'enroulement amortisseur sur les axes d**



**Figure 3- 24:Le courant d'enroulement amortisseur sur les axes q**



**Figure 3- 25:La vitesse de rotation**

- **Interprétation des résultats**

Le courant d'enroulement amortisseur sur l'axe d augmente progressivement pour atteindre une valeur de 0 en raison du fonctionnement normal de l'alternateur et de l'ajustement du système de régulation de la tension.

Au fur et à mesure que le système de régulation de la tension s'ajuste, le courant d'enroulement amortisseur sur l'axe d évolue pour atteindre finalement une valeur de 0. Cela indique que la régulation de la tension a été réalisée avec succès et que l'alternateur fonctionne de manière stable et conforme aux spécifications requises.

Le courant d'enroulement amortisseur sur l'axe q de l'alternateur est égal à 0 car l'enroulement amortisseur sur cet axe n'est pas sollicité par les composantes magnétiques de l'alternateur. L'axe q est perpendiculaire au flux magnétique principal de l'alternateur et le courant d'enroulement amortisseur sur cet axe n'a pas d'impact significatif sur les caractéristiques de l'alternateur.

La tension de sortie et la tension d'excitation passent par une période transitoire d'une durée d'environ 0,5 seconde. Une fois cette période écoulée, ces tensions atteignent un régime permanent.

### **3.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous allons introduire les différentes parties de la modélisation mathématique, en définissant les équations pour chaque composant du générateur synchrone et du système d'excitation. Ensuite, nous avons expliqué comment la tension de sortie du générateur synchrone peut être contrôlée par le système d'excitation, et nous avons effectué des simulations dans MATLAB pour valider ces concepts.

Dans la section suivante, nous chercherons à améliorer les résultats obtenus par les algorithmes génétiques.

# **Chapitre 4**

## **Optimisation par les algorithmes Génétiques**

## 4.1 Introduction

Ce chapitre présente la partie consacrée à l'optimisation, où nous définissons la méthode et la technique d'optimisation utilisée, connue sous le nom d'algorithmes génétiques. Le choix de cette méthode est justifié par la nécessité de trouver l'optimum global d'un problème d'optimisation qui implique des variables continues ou discrètes, et qui est représenté sous forme d'un système (système d'excitation statique ST) avec un modèle non linéaire, non dérivable ou ne disposant pas d'expressions analytiques.

L'optimisation par algorithmes génétiques est particulièrement adaptée dans ce cas, car elle tient compte de toutes les différentes contraintes d'optimisation. De plus, sa robustesse en fait une méthode qui offre généralement des résultats très fiables.

## 4.2 Principe de base d'un AG standard

Un algorithme génétique (AG) standard commence par le codage de l'ensemble des paramètres du problème d'optimisation en une chaîne de longueur finie. Le principe de base d'un AG est simple : il simule l'évolution d'une population d'individus jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

Pour commencer, une population initiale d'individus (solutions) est générée. À chaque génération, des individus sont sélectionnés pour la reproduction selon le principe de la survie du plus adapté. Ensuite, des individus "enfants" ou descendants sont générés en utilisant deux opérateurs génétiques : le croisement et la mutation. Ces enfants sont ajoutés à une nouvelle population  $P(t)$ , remplaçant en tout ou en partie la population de la génération précédente.

De nouvelles populations d'individus se succèdent ensuite, d'une génération ( $t$ ) à la génération suivante ( $t+1$ ), à chaque itération, jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint. L'organigramme d'un AG standard est présenté dans la Figure 4-1[32].

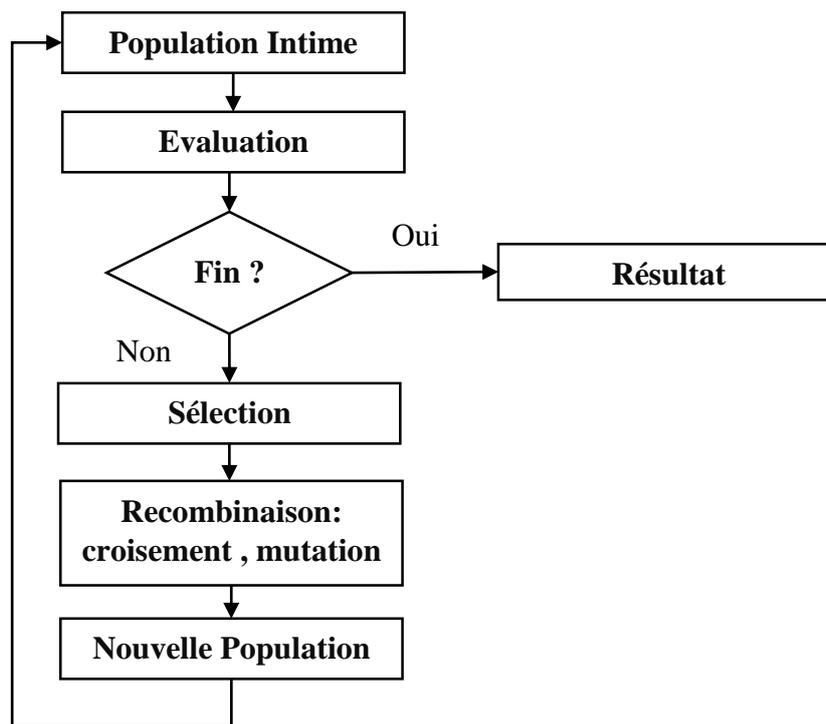


Figure 4- 1:Organigramme d'un AG standard [33]

### 4.3 Description des algorithmes génétiques

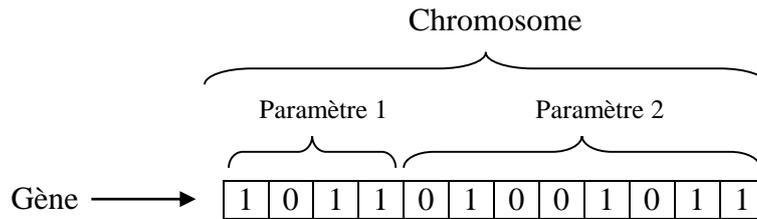
Dans la suite, nous allons examiner plus en détail les différentes étapes du schéma de l'algorithme génétique présenté dans la Figure 4-1.

#### 4.3.1 Codage et initialisation

Le codage joue un rôle crucial dans les algorithmes génétiques, car il permet de représenter les individus sous la forme d'un chromosome. Ce chromosome est composé de gènes qui peuvent prendre des valeurs dans un alphabet binaire ou non. Certains chercheurs font un parallèle avec la biologie en utilisant les termes "génotype" pour la représentation binaire d'un individu et "phénotype" pour sa valeur réelle correspondante dans l'espace de recherche [34].

Le choix du codage est une étape délicate, car il doit permettre de coder toutes les solutions possibles et faciliter la mise en œuvre des opérateurs de reproduction. C'est ainsi que le bon fonctionnement des algorithmes génétiques est assuré. Plusieurs types de codage sont utilisés, notamment le codage réel, le codage binaire et le codage Gray [32].

Le codage binaire est le plus couramment utilisé. Il consiste à représenter la solution sous la forme d'une chaîne de bits pouvant prendre les valeurs 0 ou 1 (Figure 4-2). Ce type de codage présente l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et permet de coder différents types d'objets tels que des nombres réels, des entiers, des chaînes de caractères, etc.



**Figure 4- 2:Exemple d'un chromosome en codage binaire**

### 4.3.2 Evaluation

L'évaluation consiste à mesurer la performance de chaque individu de la population en utilisant une fonction appelée fonction fitness, qui est directement liée à la fonction objective à optimiser. La fonction fitness est une fonction réelle positive qui reflète la qualité de l'individu. Un individu ayant une valeur fitness élevée représente une bonne solution au problème, tandis qu'un individu ayant une valeur fitness faible représente une solution moins satisfaisante. Par conséquent, quel que soit le problème traité, l'algorithme génétique vise à maximiser la fonction fitness des individus.

À la différence des méthodes d'optimisation classiques, les algorithmes génétiques ne nécessitent aucune condition de dérivabilité, de continuité, de convexité ou de concavité pour la fonction objective. Il suffit simplement que cette fonction attribue une valeur numérique finie à chaque individu. Cette caractéristique confère aux algorithmes génétiques un attrait particulier pour la résolution de problèmes dont les propriétés mathématiques sont inconnues ou difficiles à déterminer avec précision [33].

### 4.3.3 Sélection

L'opérateur de sélection vise à identifier les individus qui vont se reproduire en se basant sur leur aptitude mesurée par la fonction d'adaptation. L'objectif est de favoriser la sélection des individus les mieux adaptés, tout en écartant ceux qui le sont moins. Cela permet de privilégier les meilleurs éléments selon le critère d'optimisation (minimisation ou maximisation), qui dans notre cas est simplement défini par la valeur de la fonction objectif.

Il existe différentes méthodes de sélection, parmi lesquelles les plus connues sont la "roue de la fortune" ou roue biaisée, et la "sélection par tournoi". On peut également mentionner la sélection "élitiste" et la sélection stochastique [32],[35].

### 4.3.4 Recombinaison

La recombinaison agit directement sur la structure des chromosomes en modifiant leurs gènes pour créer de nouveaux chromosomes dans une nouvelle population. Ainsi, une nouvelle génération d'individus est créée (dans le contexte des algorithmes génétiques, le terme "génération" est utilisé au lieu de "itération"). Lors du passage d'une génération à l'autre, on s'attend à ce que le meilleur individu évolue pour atteindre l'optimum recherché, correspondant à une solution de très haute qualité pour notre problème.

Il existe deux catégories d'opérateurs de recombinaison : l'opérateur de croisement et l'opérateur de mutation.

➤ **Croisement**

Le croisement permet à un couple d'individus, sélectionnés parmi la population, d'échanger leurs informations génétiques, c'est-à-dire leurs gènes. Son principe est simple : deux individus sont choisis aléatoirement et désignés comme les parents. Ensuite, un nombre P est tiré aléatoirement dans l'intervalle [0, 1], puis comparé à une probabilité de croisement Pc.

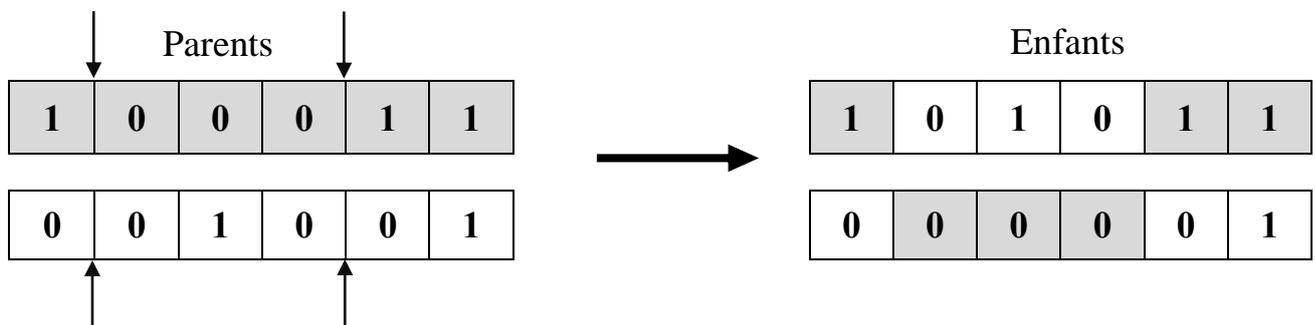
- Si  $P > P_c$ , le croisement n'a pas lieu et les parents sont directement copiés dans la nouvelle génération.
- Si  $P \leq P_c$ , le croisement se produit et les chromosomes des parents sont combinés pour créer deux enfants, qui remplaceront leurs parents dans la nouvelle génération.

Il existe différents types de croisement, les plus connus sont le croisement multipoints (Figure 4-3) et le croisement uniforme (Figure 4-4).

Pour le croisement multipoints, un certain nombre p de positions de croisement est choisi aléatoirement pour chaque couple, où p est un entier compris entre 1 et L-1, avec L représentant la taille du chromosome. Ensuite, les gènes situés entre deux positions de croisement successives sont échangés entre les deux parents, créant ainsi deux nouveaux individus appelés enfants. Les valeurs typiques de p sont généralement 1 (croisement à 1 point) ou 2 (croisement à 2 points).

Le croisement uniforme est une généralisation du croisement multipoints. Dans ce cas, chaque gène du chromosome peut être considéré comme un point de croisement. Un chromosome supplémentaire appelé masque, de même taille que les parents, est créé aléatoirement. Les valeurs des gènes du masque déterminent de quel parent chaque gène de l'enfant sera hérité.

Ainsi, le croisement multipoints et le croisement uniforme sont des méthodes de recombinaison qui permettent de mélanger les informations génétiques des parents pour générer de nouveaux individus dans la population. Ces méthodes favorisent la diversité génétique et l'exploration de l'espace des solutions lors de l'évolution de l'algorithme génétique [33].



**Figure 4- 3: Croisement multipoints (p =2) en codage binaire**

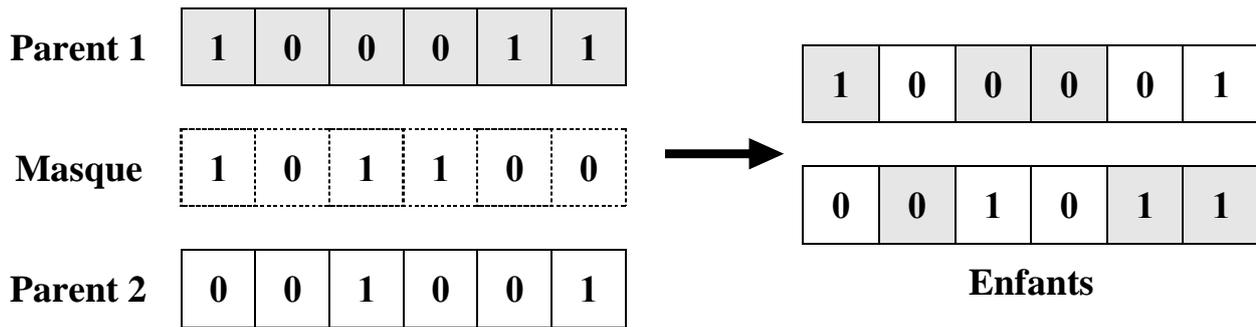


Figure 4- 4:croisement uniforme en codage binaire

➤ Mutation

L'opérateur de mutation joue un rôle important dans l'exploration de nouveaux points de l'espace de recherche et permet de s'éloigner des optima locaux. La mutation est appliquée à chaque gène de chaque individu avec une certaine probabilité de mutation  $P_m$ , selon le même principe que pour le croisement.

- Si  $P > P_m$ , aucune mutation n'a lieu et le gène reste inchangé.
- Si  $P \leq P_m$ , la mutation se produit et le gène est remplacé par une nouvelle valeur tirée aléatoirement parmi les différentes valeurs possibles. Dans le cas d'un codage binaire, cela correspond simplement à inverser la valeur du gène, c'est-à-dire remplacer un 0 par un 1 et vice versa, comme illustré dans la Figure 4-5.

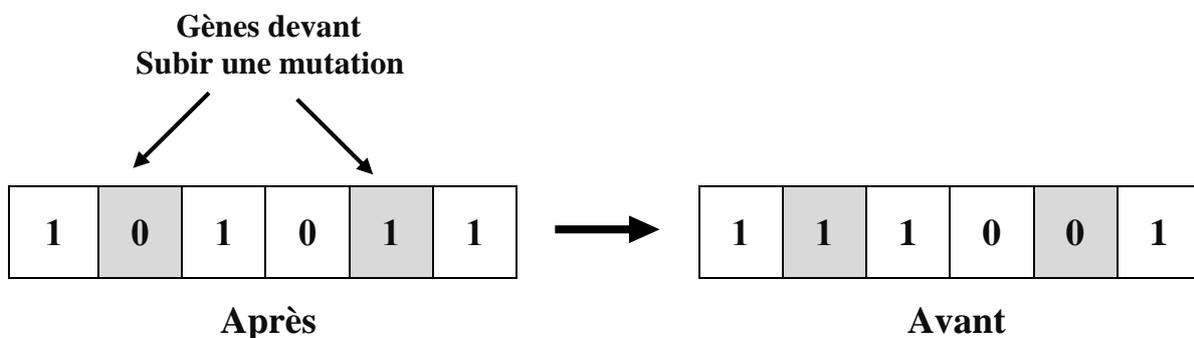


Figure 4- 5:Mutation dans le cas d'un codage binaire

L'opérateur de mutation introduit de la diversité dans la population en explorant de nouvelles régions de l'espace de recherche. Cela permet à l'algorithme génétique de rechercher des solutions potentiellement meilleures et d'éviter de rester bloqué dans des optima locaux suboptimaux [33].

Contrairement à l'opérateur de croisement, la mutation est souvent considérée comme secondaire ayant pour rôle de restaurer des informations génétiques perdues. Par exemple, si tous les chromosomes d'une population convergent vers un 0 à un emplacement donné, et que

la solution optimale possède un 1 à cet emplacement, l'opérateur de croisement ne pourra pas faire apparaître le 1, par contre il est possible que l'opérateur de mutation le fasse.

#### 4.3.5 Critère d'arrêt

Comme pour tout algorithme itératif, il est nécessaire de définir un critère d'arrêt pour l'algorithme génétique. Plusieurs critères d'arrêt peuvent être utilisés, parmi lesquels on peut citer :

- L'arrêt de l'algorithme lorsque le résultat atteint une solution satisfaisante, c'est-à-dire lorsque la valeur de la fonction objectif atteint un seuil prédéfini qui correspond à une solution considérée comme suffisamment bonne.
- L'arrêt si aucune amélioration n'est observée pendant un certain nombre de générations consécutives. Si la meilleure solution de la population n'évolue pas pendant un nombre prédéfini de générations, cela peut indiquer une stagnation de l'algorithme et justifier son arrêt.
- L'arrêt si un nombre maximal de générations est dépassé. Dans ce cas, l'algorithme s'arrête après avoir effectué un nombre fixe de générations, indépendamment de l'amélioration de la solution. Cette approche permet de limiter le temps d'exécution de l'algorithme.

Le choix du critère d'arrêt dépend du problème spécifique et des contraintes applicables. Il est souvent nécessaire de trouver un compromis entre le temps de calcul disponible et la qualité de la solution obtenue [33].

#### 4.4 Optimisation des paramètres du système d'excitation

Afin d'optimiser les différents paramètres du système d'excitation statique de type ST utilisé dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme génétique en raison de sa précision et de sa robustesse dans ce type d'optimisation.

Une fois les paramètres de l'excitatrice initialisés, notre objectif est d'améliorer les performances dynamiques du système. Pour ce faire, nous utilisons l'indice d'optimisation ITSE (Integral Time Square Error) qui est défini comme la fonction objectif que nous cherchons à minimiser. L'expression mathématique de cette fonction objectif est la suivante :

$$f = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt$$

Où le carré de l'erreur de tension  $e(t)$  est intégré.

Application des opérateurs de sélection, de croisement et de mutation de l'algorithme génétique a été réalisée à l'aide de la boîte à outils MATLAB [29],[36].

Pour la sélection des paramètres, nous avons utilisé la méthode de sélection stochastique (@selectionstochunif) afin de choisir les parents pour la nouvelle génération dans l'algorithme génétique.

En ce qui concerne le croisement des paramètres, nous avons utilisé le type de croisement uniforme (@crossover\_scattered) qui combine les informations génétiques de deux individus parents pour former les individus enfants de la nouvelle génération.

Quant à la mutation des paramètres, nous avons appliqué la mutation gaussienne (@mutation\_gaussian) qui permet un changement aléatoire du chromosome d'un individu dans une population, créant ainsi des individus enfants mutés pour la nouvelle génération.

Ces opérateurs de sélection, de croisement et de mutation ont été essentiels pour la diversification et l'exploration de l'espace de recherche, permettant ainsi d'améliorer progressivement les solutions au fil des générations.

#### 4.5 Blocs simulink associés au scripte matlab (Annexe 6)

La Figure 4-6 ci-dessous présente le bloc simulink - Optimisation des paramètres du PID.

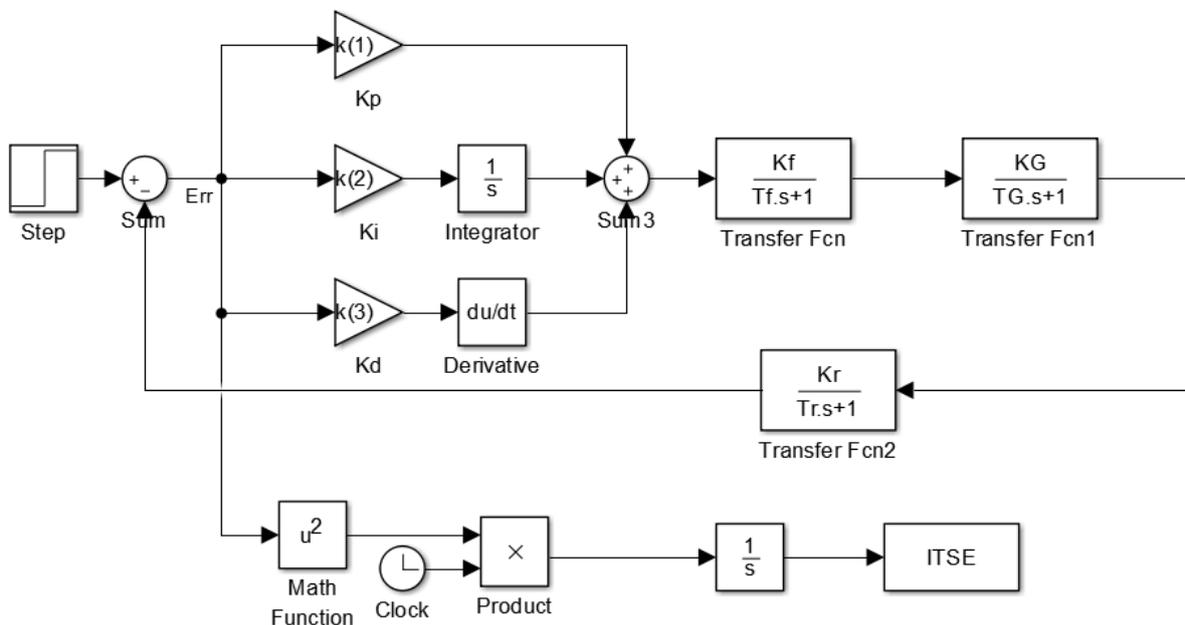


Figure 4- 6: Bloc simulink - Optimisation des paramètres du PID

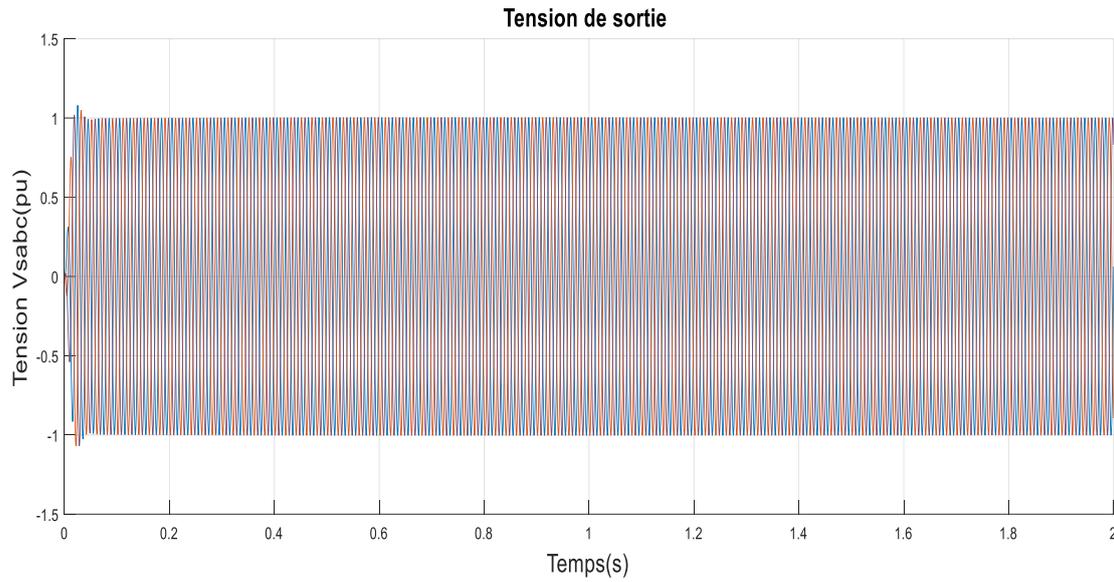
✓ paramètres du régulateur PID après optimisation

Le Tableau 4-1 représente les paramètres du régulateur PID après l'optimisation.

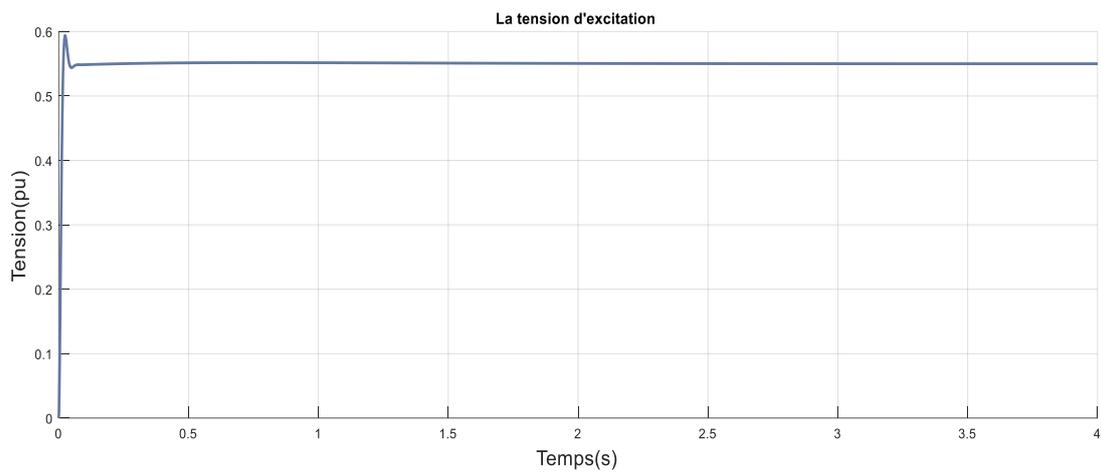
Paramètres du régulateur PID	Valeurs optimales
<b>K<sub>P</sub></b>	<b>1.084</b>
<b>K<sub>I</sub></b>	<b>3.514</b>
<b>K<sub>D</sub></b>	<b>0.048</b>

Tableau 4- 1: paramètres du régulateur PID

- Résultats de simulation

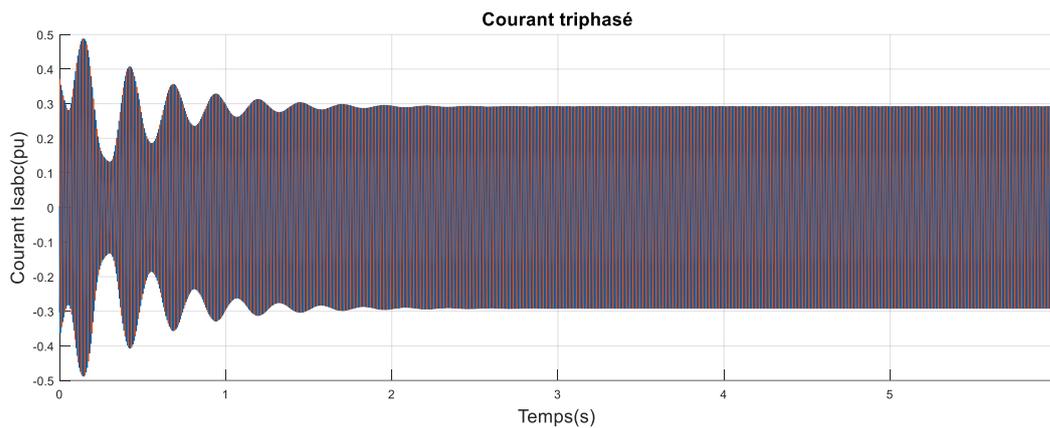


**Figure 4- 7:Tension de sortie de la génératrice  $V_{sabc}$  (après optimisation)**

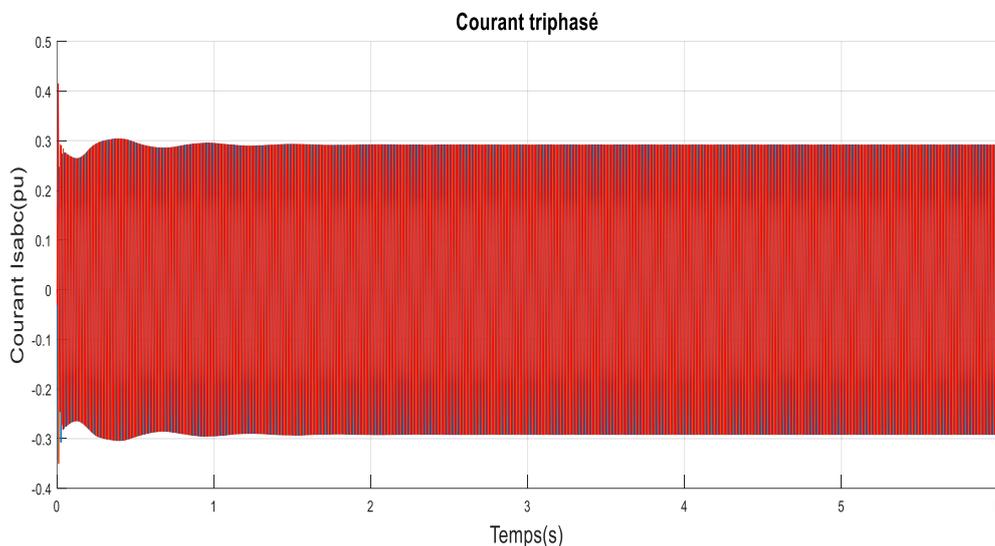


**Figure 4- 8:La tension d'excitation (après optimisation)**

**Commutation sur une charge à l'instant  $t = 0s$**



**Figure 4- 9: Courants des trois phases à  $t = 0s$  (avant optimisation)**



**Figure 4- 10: Courants des trois phases à  $t = 0s$  (après optimisation)**

Remarques et discussions des résultats :

La réponse optimale obtenue en utilisant les algorithmes génétiques est extrêmement satisfaisante, comme en témoignent les résultats comparatifs avant et après l'optimisation. Lorsque nous examinons les résultats de régulation de la tension génératrice  $V_{sabc}$  et de la tension d'excitation  $V_f$ , illustrés respectivement dans les Figures (3-21 et 3-22 / 4-7 et 4-8), nous pouvons conclure ce qui suit :

- Une amélioration significative de la rapidité, avec des temps de réponse réduits, est observée après l'optimisation.
- Les réponses de  $V_{sabc}$  et  $V_f$  démontrent une précision parfaite (Il y a très peu de dépassement au début, mais il est négligeable).
- Avant l'amélioration et lors de l'ajout d'une charge, les ondulations de courant étaient fréquentes et persistent pendant une durée prolongée de 2,5 secondes. Cependant, suite à l'amélioration, on observe une réduction significative de ces ondulations, et la stabilité

du courant est atteinte en environ 1 seconde seulement (Figures 4-9 et 4-10). Cette amélioration se traduit par une réponse plus rapide et plus stable du système, ce qui contribue à une meilleure qualité de la régulation de la tension et à une meilleure performance globale du système électrique.

Ces résultats confirment l'efficacité des algorithmes génétiques pour optimiser les performances du système d'excitation statique ST, permettant ainsi d'obtenir des réponses plus rapides et une régulation précise des tensions génératrices et d'excitation.

#### **4.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exploré de manière détaillée et précise les algorithmes génétiques, en mettant en évidence les résultats importants obtenus lors de la validation de la régulation et de l'optimisation des paramètres de l'excitatrice en utilisant l'algorithme génétique avec le modèle statique (ST). Ces résultats essentiels ont confirmé l'efficacité et la fiabilité de la méthode d'optimisation par algorithme génétique pour améliorer les performances dynamiques du système.

## Conclusion générale

---

En conclusion, ce travail a porté sur l'amélioration du système d'excitation du générateur de la centrale en utilisant des algorithmes génétiques. À travers une revue de l'état de l'art, nous avons exploré les systèmes d'excitation des génératrices synchrones, en mettant en évidence les éléments constitutifs d'un tel système ainsi que les différents types d'excitatrices pouvant être utilisés dans un groupe turbine-alternateur.

En analysant les différentes approches et technologies existantes, nous avons identifié les enjeux liés à l'optimisation du système d'excitation. Nous avons ensuite proposé une méthodologie basée sur les algorithmes génétiques pour améliorer les performances du système d'excitation du générateur de la centrale.

La modélisation du générateur et du système d'excitation, réalisée à l'aide de simulations sous MATLAB, nous a permis d'évaluer les performances du système d'excitation existant. Les résultats obtenus ont confirmé la nécessité d'une optimisation pour améliorer la stabilité et l'efficacité du générateur.

En utilisant les algorithmes génétiques, nous avons procédé à l'optimisation du régulateur de tension du système d'excitation. Les résultats obtenus après l'optimisation ont démontré une amélioration significative des performances du système d'excitation. Cette approche basée sur les algorithmes génétiques a permis de trouver des réglages optimaux du régulateur de tension, contribuant ainsi à l'amélioration globale du fonctionnement du générateur.

En conclusion, ce travail apporté des contributions importantes à l'amélioration du système d'excitation du générateur de la centrale. Les résultats obtenus démontrent le potentiel des algorithmes génétiques pour optimiser les performances des systèmes d'excitation dans le domaine de l'énergie. Cette recherche ouvre la voie à de nouvelles opportunités pour améliorer l'efficacité et la stabilité des centrales électriques, contribuant ainsi à un secteur de l'énergie plus durable et efficient.

# Référence

- [1] Rapport final année 2013-Sarl Asma Environnement (Étude d'Impact Relative à la Réalisation et Exploitation d'une Centrale à cycle combiné à Ras Djinet, W. Boumerdès).
- [2] Document cap djinet (BASIC-1 DESCRIPTION GÉNÉRALE DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE).
- [3] Document cap djinet (BASIC - 06 ASPECTS GÉNÉRAUX DE LA CENTRALE ÉLECTRIQUE -COMPOSANTS MÉCANIQUES MAJEURS).
- [4] Document cap djinet (BASIC - 07 PRINCIPAUX ÉLÉMENTS ÉLECTRIQUES).
- [5] Rapport d'activité N°1 : Service Exploitation Réalisé par : Mr. MALKI Mohammed Lamine (ING d'étude) année 2020.
- [6] P.Kundur. "Power System Stability and Control" , New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [7] Haj agos, L.M. ; Basler, M.J. "Recommended practice for excitation system models for power system stability studies". Changes to IEEE 421.5 Power Engineering Society y General Meeting 2005 IEEE.
- [8] M.S. Ghazizadeh, F. M. Hughs, "A Generator Transfer Function Regulator for Improved Excitation Control", IEEE Trans on. Power Systems, Vo1.13, N°2, May 1998, pp. 437- 441.
- [9] P.M.Anderson, A.A Fouad. "Power System Control and Stability", IEEE Press, 2003.
- [10] Prepared by the IEEE Working Group on Computer Modelling of Excitation Systems."Excitation system models for power system stability studies", IEEE committee report, February 1981.
- [11] Technical Report IEC International Electrotechnical Commission, ref.34-16-2, "Excitation systems for synchronous machines". First edition 1991-02.
- [12] N.Srikanth (M.Tech), Atejasri-M.Tech Dept of IEEE, GIET, Rajahmundry, A.P-India, "Enhancing power system stability by using thyristor controlled series compensator", Vo1.2, Issue 5, September-October 2012, pp 1817-18-24.
- [13] Bhumaiah Jula, M.Tech, Md.ASIF Assoc. Prof, Krishna Enugala, M.Tech. "Simulation for protection of Huge Hydra Generator from Short Circuit Faults", Vol.4, November 2012.
- [14] Wei, and Zheng Xu, Member, IEEE, "Excitation System Parameters Setting for Power System Planning". Power Engineering Society Summer Meeting IEEE 2002.
- [15] J.Machowski and S.Robak, J.W.Bialek, J.R.Bumby, "Excitation control for use with synchronous generators ". IEE Proc-Gener. Trans.distrib, Vo1.145, N° 5 september 1998.

- [16] Hemmami Mohammed Ilyes,' Commande sans capteur de vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) par l'utilisation de la commande directe du couple et d'un observateur de vitesse à mode glissant', Mémoire de Magister, univerversité de 2011
- [17] Emile Mouni \*,Slim Tnani , Gérard Champenois,' Synchronous generator modelling and parameters estimation using least squares method', Simulation Modelling Practice and Theory 16 (2008), pp 678 –689.
- [18] E. Mouni, S. Tnani, G. Champenois,'Comparative study of three models methods of synchronous generator', in: Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Paris, France, 2006.
- [19] Juste Tsotie Wamba, 'Modélisation et implémentation numérique du simulateur analogique de la centrale hydro-québec', Université du Québec en abitibi-témiscamingue, décembre, 2013, pp 26-27.
- [20] P. Subramaniam, O.P. Malik, 'Digital simulation of a synchronous generator in direct phase quantities', Proc. IEE 118 , january 1971 ,pp153–160.
- [21] J.Lesenne, F.Notelet, G.Séguier, 'Introduction à l'électrotechnique approfondie' Technique and documentation, Paris, 1981.
- [22] Rachid ABDESSEMED, 'Modélisation et simulation des machines électriques', Ellipses Technosup,Mai 2011,pp 115-121
- [23] John R.Smith, 'Response Analysis of A.C.Electrical Mahines', Computer Models and Simulation', Research Studies Press ltd, 1990
- [24] K.Chaijarumudomrung, K-N. Areerak, and K-L. Areerak School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, Thailand. "Modeling of Three-phase Controlled Rectifier using a DQ Method", 2010 International Conference on Advances in Energy Engineering.
- [25] Koson.Chaijarumudomrung, Kongpan.Areerak, and Kongpo.Areerak. School of Elect rical Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima,Thailand."The Controller Design of Three-Phase Controlled Rectifier using an Artificial Intelligence Technique" European Journal of Scientific Research ISSN 2011.
- [26] F. Rotella, "Commande des systèmes linéaires à plusieurs entrées". Notes de cours, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 2002, [rotella@enit.fr](mailto:rotella@enit.fr).
- [27] Koson.Chaijarumudomrung, Kongpan.Areerak and Kongpo.Areerak School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, Thailand. "The Stability Study of AC-DC Power System with Controlled Rectifier Including Effect of Voltage Control" European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216x vol.62 no.4 (2011).
- [28] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, USA. Copyright © 1992. "IEEE Recommended Practice for Excitation System Modelsfor Power System Stability Studies" .

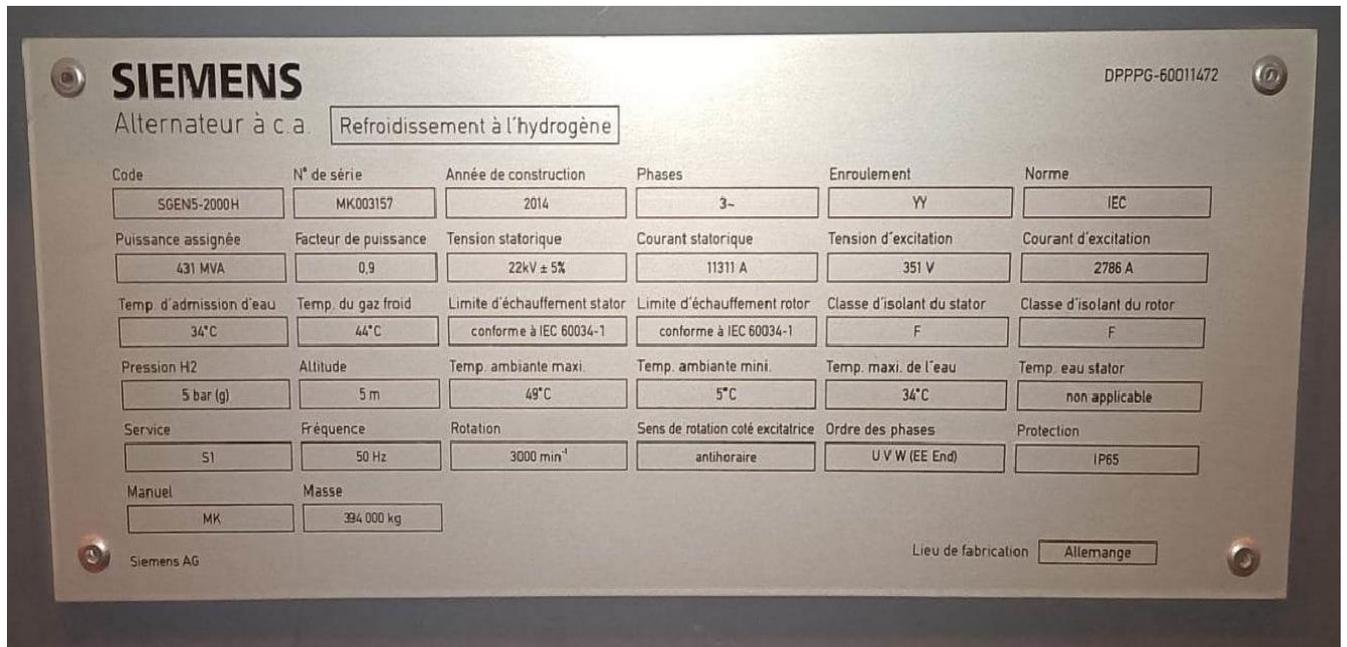
- [29] Cao Yuan, Ma Jin, "Research on PID Parameters Optimization of Synchronous Generator Excitation Control System", Critical infrastructure (CRIS), 2010 5th International Conference. 20-22 Sept. 2010.
- [30] Anant Oonsivilai and Padej Pao-La-Or. "Application of Adaptive Tabu Search for Optimum PID Controller tuning AVR System". Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, vol. 3, june 2008.
- [31] J.G. Ziegler, N.B. Nichols: "Optimum settings for automatic controllers". Trans. ASME, 64, pp. 759-768. 1942.
- [32] D.E. Goldberg, "Genetic algorithms in search, optimisation, and machine learning". London: Addison-Wesley, 1989.
- [33] A. Hellal , "Cours des Algorithmes génétiques" ,ENP 2020-2021 .
- [34] E.Lutton, "Darwinisme artificiel", INRIA Rocquencourt Equipe Complex Proj et Fractales, 2004.
- [35] L.Davis, Handbook of Genetic Algorithms.Van Nostrand Reinhold New York, 1991.
- [36] A.J.Chipperfield and P.J.Fleming. "The matlab genetic algorithm toolbox". Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield. From IEE colloquium on applied control techniques using MATLAB, Digest no.1995/014.

## Annexe 1

Conversion des grandeurs en (pu)

$$\text{valeur de la grandeur en pu} = \frac{\text{valeur de la grandeur actuelle}}{\text{valeur de la base de la grandeur}}$$

Plaque signalétique de l'alternateur :



## Annexe 2

Paramètres utilisés dans les simulations du modèle du convertisseur statique par la méthode DQ:

- Sans régulation de la tension  $V_f$  [24]:

$$\begin{bmatrix} R_{eq} = 0.15 \Omega & L_{eq} = 30 \mu H & C_{eq} = 2 nF \\ C_F = 1000 \mu F & r_F = 0.03 \Omega & L_F = 8 mH & \lambda = \frac{\pi}{3} \end{bmatrix}$$

- Avec régulation de la sortie  $V_f$  [25]:

$$\begin{bmatrix} R_{eq} = 0.15 \Omega & L_{eq} = 30 \mu H & C_{eq} = 2 nF \\ C_F = 8000 \mu F & r_F = 0.03 \Omega & L_F = 8 mH & \lambda = \frac{\pi}{3} \end{bmatrix}$$

### Annexe 3

Paramètres de chaque fonction de transfert de régulation de tension

- Fonction de transfert simplifiée de la Génératrice synchrone [6]

$$G_G(s) = \frac{K_G}{1 + T_G \cdot s} \quad \text{Avec : } \begin{cases} K_G = \frac{x_{md}}{R_f} = 1.714 \\ T_G = \frac{x_f}{R_f} = 0.188 \end{cases}$$

- Fonction de transfert simplifiée de système d'excitation [7]

$$G_f(s) = \frac{K_f}{1 + T_f \cdot s} \quad \text{Avec : } \begin{cases} K_f = 1.35 \frac{K_e}{K_{tb}} = 1.62 \\ T_f = \frac{T_e}{12} = 0.0087 \end{cases}$$

$K_e$  : Le ratio entre la tension excitation/transformateur.

$K_{tb}$  : Le ratio entre la tension génératrice/transformateur.

$T_e$  : Période du signal d'entrée.

- Fonction de transfert de capture

$$G_r(s) = \frac{K_r}{1 + T_r \cdot s} \quad \text{Avec : } \begin{cases} K_r = 1 \\ T_r = 0.006 \end{cases}$$

## Annexe 4

Code matlab du modèle par DQ du convertisseur statique non commandé :

```
% Define the parameters:

ids = x(1) ; iqs = x(2) ; vbusd = x(3) ;
vbusq= x(4) ; idc = x(5) ; vf = x(6) ;

Req = 0.15;
Leq = 30e-6;
Ceq = 2e-9;
Lf = 8e-3;
rf = 0.03;
rmu = 0.0108;
Cf =10000e-6;
w = 2*pi*50;
landha0 = pi/3;
alpha0=10*pi/180;
Vs=351;
Vm=sqrt(2)*Vs ;
vsd= sqrt(3/2)*cos(landha0 + alpha0)*Vm;
vsq= sqrt(3/2)*sin(landha0 + alpha0)*Vm;
tspan = [0 1];

% Define the function that returns the derivatives of the state variables:

f = @(t, x, pcpl) [-(Req/Leq).*x(1)+w*x(2)-(1/Leq).*x(3)+(1/Leq)*vsd;
                  -w.*x(1)-(Req/Leq).*x(2)-(1/Leq).*x(4)+(1/Leq)*vsq;
                  (1/Ceq).*x(1)+w.*x(4)-(3*sqrt(2)/(pi*Ceq)).*x(5);
                  - w.*x(3)+ (1/Ceq).*x(2);
                  (3*sqrt(2)/(pi*Lf)).*x(3)-((rf+rmu)/Lf).*x(5)-
                  (1/ Lf).*x(6);
                  (1/Cf).*x(1)-(1/Cf)*(pcpl./x(6))];

% Define the initial conditions:
x0 = [14.25 0 130.5 374.2 10.55 180.55];

% Solve the equations for pcpl = 1

pcpl1 = 2e3;
[t1, x1] = ode45(@(t, x) f(t, x, pcpl1), tspan, x0);
tspan = [1 2];

% Solve the equations for pcpl = 2

pcpl2 = 10e3;
[t2, x2] = ode45(@(t, x) f(t, x, pcpl2), tspan, x0);

% Concatenate the results:
t = [t1; t2];
x = [x1; x2];

% Plot the results
figure;
plot( t, x(:,6));
xlabel('Time');
ylabel('State Variables');
%----- FIN -----%
```

## Annexe 5

Code matlab du modèle par DQ du convertisseur statique avec régulation de l'excitation:

```
% Define the parameters:
ids = x(1) ; iqs = x(2) ; vbusd = x(3) ; vbusq= x(4) ;
idc = x(5) ; vf = x(6) ; Xv = x(7) ; Xi = x(8) ;

Req = 0.15;
Leq = 30e-6;
Ceq = 2e-9;
Lf = 8e-3;
rf = 0.03;
rmu = 0.0108;
Cf =10000e-6;
w = 2*pi*50;
landha0 = pi/3;
alpha0=10*pi/180;
Vs=230;
Vm =sqrt(2)*Vs ;
vsd= sqrt(3/2)*cos(landha0 + alpha0)*Vm;
vsq= sqrt(3 /2)*sin(landha0 + alpha0)*Vm;
vf_ref = 351;
e=0.8;
wni = 2*pi*50;
wnv = 2*pi*30;
kpV =2*e*wnv*Cf;
kiv = (wnv^2)*Cf;
kpi = 2*e*wni*Lf-rf;
kii = (wni^2)*Lf;
tspan = [0 1];
% Define the function that returns the derivatives of the state variables
f = @(t, x, pcpl) [-(Req/Leq).*x(1)+w*x(2)-(1/Leq).*x(3)+(1/Leq)*vsd;
-w.*x(1)-(Req/Leq).*x(2)-(1/Leq).*x(4)+(1/Leq)*vsq;
(1/Ceq).*x(1)+w.*x(4)-(3*sqrt(2)/(pi*Ceq)).*x(5);
-w.*x(3)+ (1/Ceq).*x(2);
-((rf+kpi)/Lf).*x(5)+((kiv*kpi)/Lf).*x(7)+
(kii/Lf).*x(8)-((kpV*kpi)/Lf).*x(6)+((kpV*kpi)/Lf)*vf_ref;
(1/Cf).*x(1)-(1/Cf)*(pcpl./x(6));
-x(6)+vf_ref;
-x(5)-kpV.*x(6)+kiv.*x(7)+kpV*vf_ref];

% Define the initial conditions
x0 = [14.25 0 130.5 374.2 10.55 300 0.009 2.7837e-4];
% Solve the equations for pcpl = 1
pcpl1 = 3e3;
[t1, x1] = ode45(@(t, x) f(t, x, pcpl1), tspan, x0);
tspan = [1 2];
% Solve the equations for pcpl = 2
pcpl2 = 10e3;
[t2, x2] = ode45(@(t, x) f(t, x, pcpl2), tspan, x0);
% Concatenate the results:
t = [t1; t2];
x = [x1; x2];
% Plot the results
figure;
plot( t, x(:,6));
xlabel('Time');
ylabel('State Variables');

%----- FIN -----%
```

## Annexe 6

Code matlab pour l'optimisation par AG :

```
% Genetic Algorithm to tune PID Parameters
% Initialization

no_var=3;
lb=[0 0 0];
ub=[200 200 200];
% GA Options
ga_opt= gaoptimset('Display','off','Generations',25,
                  'PopulationSize',50,'PlotFcns',@gaplotbestf);
obj_fn=@(k) optimization_PID(k);

% GA Command
[k,best]=ga((obj_fn),no_var,[],[],[],[],lb,ub,[],ga_opt)

function cost=optimization_PID(k)
assignin('base','k',k);
sim('pid_optim');
cost=ITAE(length(ITAE))
end
%----- FIN -----%
```