

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيـدة-

Université de Saida Dr Tahar Moulay –

Faculté de Science et Technologie

Département d'Electrotechnique et d'Automatisme



## **MEMOIRE**

Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

**En** : Électrotechnique

**Spécialité** : Électrotechnique industrielle

**Par** : MOHAND AMER Mohamed Elias et BENCHEIDA Karima

### **Sujet**

**Etude par simulation des défauts statoriques dans un alternateur triphasé**

Soutenue publiquement en **19 /06/2025** devant le jury composé de :

<b>Mr. AIMER Fethi</b>	MCA	Univ. Saida	Président
<b>Mme. DRIF Malika</b>	MAA	Univ. Saida	Rapporteur
<b>Mme. BELGACEM Kheira</b>	MCA	Univ. Saida	Examineur

Année universitaire 2024/2025

## **Résumé**

Les alternateurs triphasés sont des composants essentiels de la production électrique. Ce qui rend leur bon fonctionnement critique. Malgré leur fiabilité et leur robustesse, ils peuvent subir des contraintes sévères qui les exposent à des défauts dramatiques provoquant des événements catastrophiques.

Parmi les défauts les plus redoutés, les défauts statoriques représentent la majeure partie de défauts qui touchent les alternateurs triphasés. En effet, les déséquilibres de tensions, les courts-circuits entre spires statoriques qui se propagent vers des courts-circuits entre phases influent directement sur les performances de l'alternateur. Ils figurent comme des dégradations prématurées de ce dernier.

Le présent mémoire traite l'étude par simulation des défauts statoriques d'un alternateur triphasé. Le but de cette étude consiste en première lieu, à voir l'influence de ces défauts sur les caractéristiques électromécaniques de l'alternateur. Donc sur son comportement. Le suivi de ces grandeurs, en particulier le courant statorique, permis la détection et l'identification de ce type de défauts. Vu que le défaut de court-circuit de spires est un défaut naissant dans les enroulements statoriques, qui échappe aux dispositifs de protection de l'alternateur. La dernière partie de ce travail est consacré à la détection de ce type de défaut. Par emploi de deux techniques électriques de diagnostic. Ces techniques exploitent les courants statoriques dans le repère de Park. La première utilise le tracé des vecteurs de Park. La deuxième se base sur l'analyse de la signature du module de Park par la transformé de Fourier rapide (FFT).

## **Mots-clefs**

Alternateurs triphasés – défauts statoriques - courts-circuits entre spires statoriques - techniques électriques de diagnostic - signature du module de Park - tracé des vecteurs de Park.

# *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir donné la force, le courage et la volonté nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.*

*Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre encadrante, **Mme M. Drif**, pour avoir accepté de diriger ce travail avec une grande attention et une disponibilité constante. Nous la remercions également pour son aide précieuse, ses orientations, ses encouragements et tous les conseils qu'elle nous a prodigués tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Nous tenons également à exprimer notre gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail de fin d'études.*

*Nous sommes reconnaissants envers l'ensemble de nos enseignants, à qui nous devons notre formation en électrotechnique.*

*Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à tous nos amis et collègues pour leur soutien moral et matériel.*

## *Dédicace*

- ❖ *Je dédie ce travail à mes parents et à ma sœur, pour leur présence, leur soutien et leurs encouragements tout au long de mon parcours.*
- ❖ *Je remercie également mes amis pour leur accompagnement et leur aide durant ces années d'études.*
- ❖ *Une pensée particulière à mon binôme, pour sa collaboration et son engagement tout au long de ce projet.*

◆ *Mohand amer elias.*

## *Dédicace*

- ❖ *Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui grâce à leurs sacrifices et leur amour.*
- ❖ *À mes sœurs, mon frère et toute ma famille, pour leur soutien indéfectible.*
- ❖ *À mes ami(e)s, pour leur présence constante et leurs encouragements tout au long de ce parcours.*
- ❖ *Je remercie également mon binôme, pour son engagement, sa patience et l'esprit de collaboration que nous avons su entretenir tout au long de ce travail.*

◆ *Bencheida karima.*

Liste des figures	I
Liste des symboles	III
Introduction générale	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les alternateurs triphasés</b>	
I.1. Introduction	3
I.2. Constitution de l'alternateur	3
I.2.1. Stator (Induit)	4
I.2.2. Rotor (Inducteur)	4
I.2.2.1. Rotor bobiné	5
I.2.2.1.1. Rotor à pôles lisses	5
I.2.2.1.2. Rotor à pôles saillants	5
I.2.2.2. Rotor à aimant permanent	6
I.2.3. Enroulements amortisseurs	6
I.3. Principe de fonctionnement d'un alternateur	7
I.4. Différents modes d'emplois d'un alternateur dans les centrales de production	8
I.5. Différents systèmes d'excitation d'un alternateur	8
I.5.1. Excitation sans balais	8
I.5.2. Excitation statique	9
I.6. Défauts affectant l'alternateur triphasé	10
I.6.1. Défauts électriques	10
I.6.1.1. Défauts électriques statoriques	10
I.6.1.1.1. Défaut de type court-circuit entre spires	10
I.6.1.1.2. Défaut de type court-circuit entre phases	11
I.6.1.1.3. Défaut de type court-circuit entre phase et terre	11
I.6.1.2. Défauts électriques rotoriques	11
I.6.1.2.1. Ruptures des barres de l'amortisseur	11
I.6.1.2.2. Défaut de court-circuit entre spires rotoriques	12
I.6.2. Défauts mécaniques	12
I.6.2.1. Défauts de roulements	12
I.6.2.2. Défaut d'excentricité	13
I.7. Systèmes de protection des alternateurs	14
I.7.1. Protection électrique	14

I.7.1.1. Protection différentielle contre les défauts entre phases d'alternateur	14
I.7.1.2. Protection contre la surintensité	15
I.7.1.3. Protection contre les surtensions	15
I.7.1.4. Protection contre le retour de puissance	15
I.7.1.5. Protection contre les pertes d'excitation	15
I.7.2. Protection Mécanique	15
I.7.2.1 Protection contre les vibrations	15
I.7.2.2. Protection contre les contaminants	16
I.7.2.3. Protection contre les chocs	16
I.7.2.4. Protection contre la corrosion	16
I.7.2.5. Protection contre la surcharge	16
I.8. Conclusion	16

## **Chapitre II : Modélisation d'un alternateur triphasé sain et défaillant**

II.1. Introduction	18
II.2. Hypothèses simplificatrices	18
II.3. Mise en équations de l'alternateur triphasé sain dans les axes réels	18
II.3.1. Equation électriques	20
II.3.2. Equation mécaniques	22
II.3.3. Mise sous forme d'équation d'état du modèle de l'alternateur	23
II.4. Modélisation d'un alternateur triphasé avec défaut	23
II.4.1. Modélisation d'un alternateur à pôles saillants triphasé avec court-circuit de spires statoriques	23
II.4.2. Modélisation du déséquilibre de tensions	26
II.4.3. Modélisation du court-circuit monophasé	26
II.4.4. Modélisation du court-circuit biphasé	26
II.4.5. Modélisation du court-circuit triphasé	26
II.5. Conclusion	27

## **Chapitre III : Résultats de Simulation d'un alternateur sain et défaillant**

III.1. Introduction	29
III.2. Résultats de simulation d'un alternateur triphasé sain	29
III.3. Résultats de simulation d'un altérateur avec déséquilibre de tensions	32
III.4. Résultats de simulation d'un alternateur avec court-circuit de spires statoriques	35

III.5. Résultats de simulation d'un altérateur avec court-circuit de phases	38
III.5.1. Résultats de simulation d'un altérateur avec court-circuit monophasé	39
III.5.2. Résultats de simulation d'un altérateur avec court-circuit biphasé <b>Error! Bookmark not defined.</b>	42
III.5.3. Résultats de simulation d'un altérateur avec court-circuit triphasé <b>Error! Bookmark not defined.</b>	45
III.6. Conclusion	48

## **Chapitre IV : Détection des défauts statoriques par les approches des vecteurs de Park**

IV.1. Introduction	50
IV.2. Approches des vecteurs de Park	50
IV.2.1. Tracé des vecteurs de Park	51
IV.2.2. Analyse spectrale du module des vecteurs de Park	51
IV.3. Détection des défauts statoriques d'un alternateur par les approches des vecteurs de Park	51
IV.3.1. Cas de l'alternateur triphasé sain	52
IV.3.2. Cas de l'alternateur triphasé avec déséquilibre des tensions statoriques	53
IV.3.3. Cas de l'alternateur triphasé avec court-circuit de spires statoriques	54
IV.3.4. Cas de l'alternateur triphasé avec court-circuit monophasé	55
IV.3.5. Facteur de sévérité du défaut	57
IV.4. Interprétation des résultats	58
IV.5. Conclusion	58
Conclusion générale	60
Annexe A	62
Annexe B	64
Bibliographie	66

## Chapitre I

<b>Fig. I.1</b> : Différents éléments de l'alternateur	3
<b>Fig. I.2</b> : Stator d'un alternateur	4
<b>Fig. I.3</b> : Rotor à pôles lisses d'un alternateur	5
<b>Fig. I.4</b> : Rotor à pôles saillants d'un alternateur	6
<b>Fig. I.5</b> : Amortisseurs d'une machine synchrone	7
<b>Fig. I.6</b> : Défauts dans les enroulements statoriques	10
<b>Fig. I.7</b> : Vue d'un roulement à billes	13
<b>Fig. I.8</b> : Défauts mécaniques d'excentricité : (a) Pas d'excentricité. (b) Excentricité statique. (c) Excentricité dynamique. (d) Excentricité mixte	14

## Chapitre II

<b>Fig. II.1</b> : Représentation d'un alternateur triphasé à inducteur bobiné	19
<b>Fig. II.2</b> : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques d'un alternateur triphasé à inducteur bobiné	19
<b>Fig. II.3</b> : Court-circuit entre spires statoriques dans la phase « a »	24

## Chapitre III

<b>Fig. III.1</b> : Régime transitoire et permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé sain	31
<b>Fig. III.2</b> : Régime permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé sain	31
<b>Fig. III.3</b> : Régime transitoire et permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de déséquilibre de tensions	34
<b>Fig. III.4</b> : Régime permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de déséquilibre de tensions	34
<b>Fig. III.5</b> : Régime transitoire et permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit de spires statoriques	37
<b>Fig. III.6</b> : Régime permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit de spires statoriques	37
<b>Fig. III.7</b> : Régime transitoire et permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit monophasé	40
<b>Fig. III.8</b> : Régime permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit monophasé	40
<b>Fig. III.9</b> : Régime transitoire et permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit biphasé	43
<b>Fig. III.10</b> : Régime permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit biphasé	43

<b>Fig. III.11</b> : Régime transitoire et permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit triphasé	46
<b>Fig. III.12</b> : Régime permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit triphasé	46
<b>Chapitre IV</b>	
<b>Fig. IV.1</b> : Courants de Park de l'alternateur sain	52
<b>Fig. IV.2</b> : Module des courants de Park de l'alternateur sain	52
<b>Fig. IV.3</b> : Tracé des courants de Park de l'alternateur sain	52
<b>Fig. IV.4</b> : Spectre du module des courants de Park de l'alternateur sain	52
<b>Fig. IV.5</b> : Courants de Park de l'alternateur avec déséquilibre des tensions statoriques	53
<b>Fig. IV.6</b> : Module des courants de Park de l'alternateur avec déséquilibre des tensions statoriques	53
<b>Fig. IV.7</b> : Tracé des courants de Park de l'alternateur avec déséquilibre des tensions statoriques	53
<b>Fig. IV.8</b> : Spectre du module des courants de Park de l'alternateur avec déséquilibre des tensions statoriques	53
<b>Fig. IV.9</b> : Courants de Park de l'alternateur avec court-circuit de spires statoriques	54
<b>Fig. IV.10</b> : Module des courants de Park de l'alternateur avec court-circuit de spires statoriques	54
<b>Fig. IV.11</b> : Tracé des courants de Park de l'alternateur avec court-circuit de spires statoriques	54
<b>Fig. IV.12</b> : Spectre du module des courants de Park de l'alternateur avec court-circuit de spires statoriques	54
<b>Fig. IV.13</b> : Courants de Park de l'alternateur avec court-circuit monophasé	55
<b>Fig. IV.14</b> : Module des courants de Park de l'alternateur avec court-circuit monophasé	55
<b>Fig. IV.15</b> : Tracé des courants de Park de l'alternateur avec court-circuit monophasé	55
<b>Fig. IV.16</b> : Spectre du module des courants de Park de l'alternateur avec court-circuit monophasé	55
<b>Fig. IV. 17</b> : Facteur de sévérité du défaut de court-circuit de spires statoriques de <b>l'alternateur</b>	56

Symboles	Désignation
$\phi$	Flux fourni par un pôle
$f$	Fréquence de réseaux en Hz
$N$	Nombre des conducteurs de l'induit
$K_b$	Coefficient de bobinage de l'enroulement
$e$	Force électromagnétique
$\Omega$	La vitesse du rotor en rad/s
$ns$	La vitesse de rotation de synchronisme
$p$	Nombre de paires de pôles
$a, b, c$	Indice des trois phases statoriques
$P$	Puissance active
$Q$	Puissance réactive
$\theta$	Position du rotor par rapport au stator
$D$	Enroulement amortisseur longitudinal
$Q1$	Premier enroulement amortisseur transversal
$Q2$	Deuxième enroulement amortisseur transversal
$U_a, U_b, U_c$	Tensions des trois phases statorique
$R_a, R_b, R_c$	Résistance des trois phases statoriques
$i_a, i_b, i_c$	Courant des trois phases statoriques
$\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$	Flux des trois phases statoriques
$[U_s]$	Matrice des tensions statoriques
$[R_s]$	Matrice des résistances statoriques
$[i_s]$	Vecteur des courants statoriques
$[\Psi_s]$	Vecteur des flux statoriques
$[i_r]$	Vecteur des courants rotoriques
$[L_{ss}]$	Matrice des inductances statoriques
$[L_{sr}]$	Matrice des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques
$L_{a1a1}(\theta), L_{bb}(\theta), L_{cc}(\theta), L_{a2a2}(\theta)$	Inductances propres des phases statoriques
$M_{a1b}(\theta), M_{a1c}(\theta), M_{a1a2}(\theta),$ $M_{ba1}(\theta), M_{ba2}(\theta), M_{bc}(\theta),$ $M_{ca1}(\theta), M_{cb}(\theta), M_{ca2}(\theta),$ $M_{a2a1}(\theta), M_{a2b}(\theta), M_{a2c}(\theta)$	Inductances mutuelles entre les phases statoriques
$L_{ma1a1}, L_{m_{bb}}, L_{m_{cc}}, L_{ma2a2}, L_{ms}$	Inductances de magnétisation statoriques
$L_{fs}$	Inductance de fuite statorique
$L_{\Delta m}$	Grandeur de la variation de l'inductance due au non uniformité de l'entrefer
$M_{a1f}(\theta), M_{bf}(\theta), M_{cf}(\theta), M_{a2f}(\theta)$	Inductances mutuelles entre le stator et l'enroulement d'excitation rotorique
$M_{a1D}(\theta), M_{bD}(\theta), M_{cD}(\theta), M_{a2D}(\theta)$	Inductances mutuelles entre le stator et l'enroulement amortisseur D
$M_{a1Q1}(\theta), M_{bQ1}(\theta), M_{cQ1}(\theta), M_{a2Q1}(\theta)$	Inductances mutuelles entre le stator et l'enroulement amortisseur Q1
$M_{a2Q2}(\theta), M_{bQ2}(\theta), M_{cQ2}(\theta), M_{a2Q2}(\theta)$	Inductances mutuelles entre le stator et l'enroulement

$U_D, U_{Q1}, U_{Q2}$	amortisseur Q2 Tensions des trois enroulements amortisseurs D, Q1 et Q2
$R_D, R_{Q1}, R_{Q2}$	Résistances des trois enroulements amortisseurs D, Q1 et Q2
$i_D, i_{Q1}, i_{Q2}$	Courant des trois enroulements amortisseurs D, Q1 et Q2
$\Psi_D, \Psi_Q, \Psi_{Q2}$	Flux des trois enroulements amortisseurs D, Q1 et Q2
$U_f$	Tension de l'enroulement d'excitation rotorique
$R_f$	Résistance de l'enroulement d'excitation rotorique
$i_f$	Courant de l'enroulement d'excitation rotorique
$\Psi_f$	Flux de l'enroulement d'excitation rotorique
$[U_r]$	Vecteur des tensions rotoriques
$[R_r]$	Matrice des résistances rotoriques
$[i_r]$	Vecteur des courants rotoriques
$[\Psi_r]$	Vecteur des flux rotoriques
$[L_{rr}]$	Matrice des inductances propres rotoriques
$L_{DD}, L_{ff}, L_{QQ}$	Inductances propres des trois enroulements rotoriques
$M_{Df}, M_{DQ}, M_{fD},$ $M_{fQ}, M_{QD}, M_{Qf}$	Inductance mutuelle entre les trois enroulements rotoriques
$[U]$	Matrice des tensions statoriques et rotoriques
$[R]$	Matrice des résistances statoriques et rotoriques
$[I]$	Matrice des courants statoriques et rotoriques
$d$	Axe direct
$q$	Axe en quadrature
$\omega$	La vitesse angulaire du rotor
$J$	Moment d'inertie des parties tournantes.
$C_e$	Couple électromagnétique
$C_r$	Couple résistant
$U_{réf}$	Tension de référence
$I_{ref}$	Courant de référence
$P_{ref}$	Puissance de référence
$U_n$	Tension nominale
$I_n$	Courant nominale
$\omega_{ref}$	Pulsation de référence
$\omega_n$	Pulsation nominale
$f_n$	Fréquence nominale
$\Omega_{ref}$	Vitesse angulaire de référence
$W_{CO}$	Co-énergie
$C_{ref}$	Couple de référence
$Z_{ref}$	Impédance de référence
$\Psi_{ref}$	Flux de référence
$L_{ref}$	Inductance de référence
$\varphi$	Angle de rotation
$t$	Temps
$\sum C$	Couples agissant sur le système

$C_m$	Constante de temps mécaniques
$H$	Constante inertie
$R_{ref}$	Résistance de référence
$cc$	Rapport de court-circuit
$N_m$	Nombre de spires court-circuitées
$N_n$	Nombre de spires de la partie saine de la phase "a"
$N_s$	Nombre total de spires
$U_{a1}, U_{a2}$	Tensions de la partie saine et partie court-circuité de la phase "a"
$i_{a1}, i_{a2}$	Courant de la partie saine et partie court-circuité la phase "a"
$\Psi_{a1}, \Psi_{a2}$	Flux de la partie saine et partie court-circuité de la phase "a"
$U_m$	Tension statorique maximale

# INTRODUCTION GENERALE

Les alternateurs triphasés sont des composants essentiels de la production électrique. Présent dans les centrales (thermiques, hydrauliques, nucléaire), les navires, les avions, les groupes électrogènes de secours ou les énergies renouvelable (éoliennes), ils sont l'un des équipements les plus importants des réseaux électriques. Ce qui rend leur bon fonctionnement critique.

Les alternateurs sont des équipements très fiables, mais malgré leur robustesse, ils peuvent subir des contraintes sévères (vibrations, chocs thermiques, humidité vieillissement des isolants) qui les exposent à des défauts dramatiques provoquant des événements catastrophiques.

Parmi les défauts les plus redoutés, les défauts statoriques représentent la majeure partie de défauts qui touchent les alternateurs triphasés. Leur apparition progressive et leurs symptômes subtils les rendent particulièrement périlleux. En effet, les déséquilibres de tensions, les courts-circuits entre spires statoriques qui se propagent vers des courts-circuits entre phases influent directement sur les performances de l'alternateur. Ils figurent comme des dégradations prématurées de ce dernier.

Dans ce travail, nous allons simuler le comportement d'un alternateur triphasé avec prise en compte des défauts statoriques. Cette simulation a comme objectif, de montrer l'influence de ce type de défauts sur les caractéristiques électromécaniques de l'alternateur. Ensuite vient l'exploitation des courants statoriques pour détecter les défauts considérés. Pour ce faire, le développement d'un modèle mathématique de l'alternateur, dédié à sa simulation dans le cas sain et défaillant est nécessaire.

Dans ce but, le présent mémoire est structuré en quatre chapitres.

Le premier chapitre rappelle les éléments de constitution de l'alternateur et présente les différents défauts qui peuvent se produire au niveau de cet alternateur. Ainsi que ses différents systèmes de protection.

Le deuxième chapitre est consacré au développement d'un modèle mathématique de simulation. Nous utilisons un modèle basé sur le couplage magnétique des circuits électriques pour analyser le comportement de l'alternateur sain et avec défauts statoriques.

Le troisième chapitre est destiné à la validation des modèles mathématiques de simulation, par la présentation des résultats de simulation des différents cas de fonctionnement de l'alternateur.

Le quatrième chapitre aborde une application au diagnostic des défauts statoriques de l'alternateur. En particulier le défaut de court-circuit de spires. Par emploi de deux techniques électriques de diagnostic basées sur les vecteurs de Park.

Finalement, le mémoire se termine par une conclusion générale portant sur le travail effectué.

# CHAPITRE I

## Généralités sur les alternateurs triphases

## I.1. Introduction

Les machines synchrones sont des machines électriques tournantes réversibles qui peuvent fonctionner en moteur ou en génératrice. Lorsqu'une machine synchrone fonctionne en génératrice, c'est-à-dire transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique et fournit un courant alternatif, elle est appelée Alternateur. Pour l'alternateur synchrone triphasé, l'énergie électrique est produite sous forme triphasée, ainsi son induit peut être couplé en étoile ou en triangle. L'alternateur se décline en différentes puissances de quelques KVA à 250000 KVA. À ce titre il peut être intégré dans des systèmes embarqués, ainsi que dans des installations de puissance.

L'alternateur triphasé constitue l'élément principal des systèmes de production d'énergie électrique. Présent dans les centrales thermiques, hydrauliques, éoliennes ou nucléaires. L'alternateur à pôles saillants est principalement utilisé dans les centrales hydroélectriques, tandis que le turboalternateur (à pôles lisses) dans les centrales thermiques et nucléaires. Ainsi, il est la base de presque toute la production d'énergie électrique mondiale [1-3].

Dans ce chapitre on va présenter les éléments de constitution d'un alternateur triphasé. Donner son principe de fonctionnement et ses différents modes d'excitation. Ensuite on va exposer les différents défauts qui peuvent affecter ce type de machine et préciser ses différents dispositifs de protection.

## I.2. Constitution de l'alternateur

L'alternateur est constitué d'une partie mobile appelée le rotor et une partie fixe appelée le stator (Fig.I.1) [1].

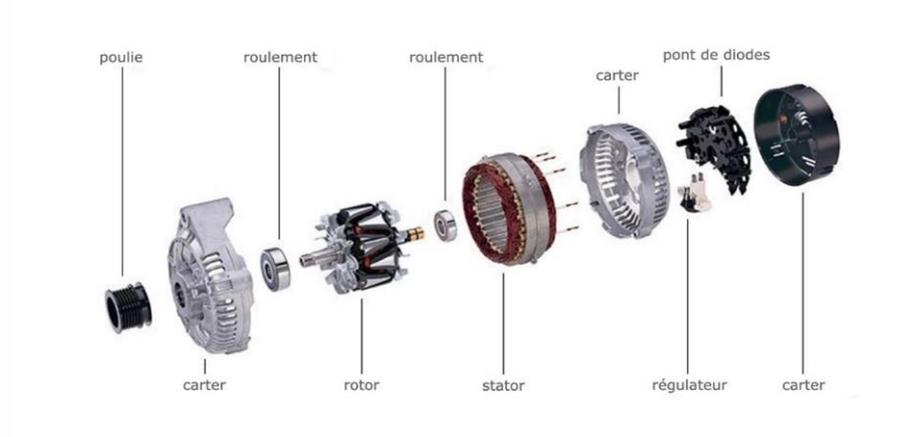


Fig. I.1 : Différents éléments de l'alternateur

### I.2.1. Stator (Induit)

Le stator d'une machine synchrone est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôles magnétiques qui contiennent des encoches dans lesquelles sont insérées les bobines.

Il est soumis à un flux magnétique tournant et doit être feuilleté, car il est le siège des pertes d'hystérésis et de courants de Foucault. Il est constitué de trois groupes de conducteurs logés (enroulement) dans des encoches formant trois circuits (un pour chaque phase) décalés les uns les autres d'un angle de  $120^\circ$ .

Chaque enroulement sera le siège d'une f.e.m induite due au flux magnétique variable de l'inducteur. Il est constitué d'un bobinage triphasé généralement couplé en étoile, découpé en  $p$  paire de pôles (Fig.I.2) [1-4].



Fig. I.2 : Stator d'un alternateur

### I.2.2. Rotor (Inducteur)

L'inducteur est un circuit tournant, portant les pôles inducteurs, produisant le champ magnétique. Le circuit rotorique est soit parcouru par un courant continu (alimenté en courant continu) et tourne à la même vitesse que le champ statorique. Il n'est donc pas nécessaire de le feuilleté. Pour des raisons économiques, il est souvent constitué de tôles épaisses. Soit il est constitué d'électroaimants parcourus par un courant d'excitation continu ou parfois simplement constitué d'aimants permanents (porté par le rotor). Il a pour rôle de créer un champ magnétique tournant à l'aide d'un rotor magnétisant mis en rotation. Il possède  $P$

paires de pôles. Le courant à l'inducteur est apporté par l'intermédiaire de bagues et de balais [1-4]. Il existe deux types d'inducteurs

### I.2.2.1. Rotor bobiné

Le rotor est constitué de noyaux magnétiques composés de tôles et de bobines enroulées autour de ces noyaux. Ces bobines correctement associées en série permettent d'obtenir des pôles nord et sud.

#### I.2.2.1.1. Rotor à pôles lisses

Ce mode de construction assure une grande robustesse mécanique, Il permet d'obtenir des fréquences de rotation élevées (3000 et 1500 tr/min). Il est systématiquement adopté pour les alternateurs de fortes puissances et utilisé pour la production d'énergie électrique dans les centrales thermiques et les centrales nucléaires. Le rotor est un cylindre plein dans lequel on a usiné des encoches. Il possède le plus souvent 2 pôles (Fig.I.3) [1-4].

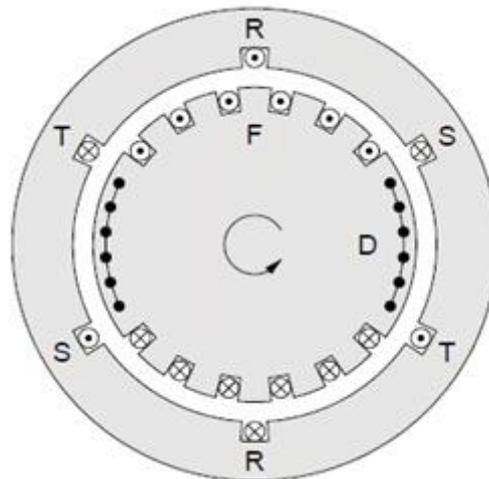


Fig. I.3 : Rotor à pôles lisses d'un alternateur

#### I.2.2.1.2. Rotor à pôles saillants

Ce type de construction n'autorise pas de grandes vitesses de rotation (<1500 tr/min), et de ce fait fournissant moins de puissance, il est utilisé pour la production d'énergie de 50 à 400 Hz dans les centrales hydrauliques et les groupes électrogènes. C'est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine (Fig.I.4) [1-4].

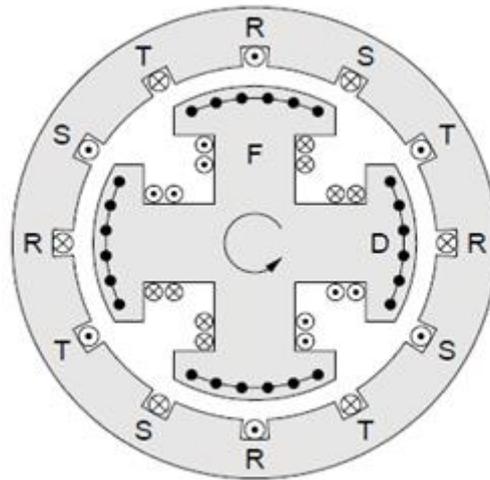


Fig. I.4 : Rotor à pôles saillants d'un alternateur

### I.2.2.2. Rotor à aimant permanent

Le rotor est constitué en partie d'un aimant naturel (matériaux diamagnétiques qui composent la roue polaire), l'aimantation est naturelle. Il n'est donc pas nécessaire de posséder une autre source d'énergie électrique pour créer un champ constant dans le rotor contrairement au rotor bobiné [3][4].

### I.2.3. Enroulements amortisseurs

Les enroulements d'amortisseur jouent un rôle crucial dans le fonctionnement d'un alternateur triphasé synchrone. Ces enroulements sont généralement placés sur le rotor de l'alternateur et sont conçus pour fournir une réactance négative afin de contrôler les phénomènes d'oscillation et d'instabilité qui pourraient survenir pendant le fonctionnement de l'alternateur. Les enroulements d'amortisseur sont constitués de barres en cuivre placées dans des rainures du rotor, et ces barres sont couramment reliées entre elles par des anneaux de court-circuit en cuivre. Lorsque l'alternateur est en marche, des courants sont induits dans les enroulements d'amortisseur à partir du champ magnétique tournant créé par les enroulements de champ. Ces courants induits produisent un champ magnétique opposé à celui des enroulements de champ, ce qui permet de stabiliser l'alternateur et d'éviter les vibrations et les oscillations indésirables. En somme, les enroulements d'amortisseur sont essentiels pour assurer le bon fonctionnement et la stabilité d'un alternateur triphasé synchrone [2][3].

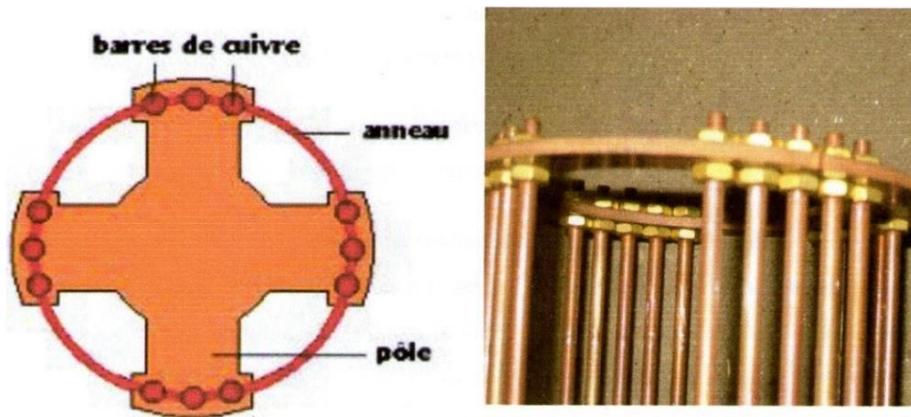


Fig. 1.5 : Amortisseurs d'une machine synchrone

### I.3. Principe de fonctionnement d'un alternateur

L'inducteur est entraîné par une turbine tournante à la vitesse  $N_s$ , l'alimentation du rotor en courant continu crée dans l'entrefer de la machine un champ tournant à la vitesse  $N_s$ . D'après la loi de Faraday, toute variation de flux magnétique à travers une bobine crée aux bornes de la bobine une f.é.m. induite. Ainsi, ce champ tournant induit aux bornes de l'induit (stator) une tension triphasée de fréquence  $f$ . Le rotor et le champ tournant ont la même vitesse  $N_s$ . Ils sont synchrones. La fréquence  $f$  de la f.é.m. ou du courant de l'induit et la vitesse de synchronisme  $N_s$  sont liées par la relation suivante [2][3] :

$$N_s = \frac{f}{p} \quad (\text{I.1})$$

$N_s$ : vitesse de rotation du champ tournant en

$f$ : fréquence des courants alternatifs

$p$ : nombre de paires de pôles

L'enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m. de valeur efficace.

$$E = K\Phi N_s \quad (\text{I.2})$$

$E$ : f.é.m. induite (V)

$K$ : constante

$\Phi$ : Flux maximum à travers un enroulement (Wb)

L'enroulement du stator est disposé de telle façon que la f.é.m. soit le plus possible sous forme sinusoïdale.

$$K = 2,22 \cdot K_d K_f \quad (\text{I.3})$$

$K_d$ : facteur de distribution voisin de 0,7

$K_f$  : facteur de forme voisin de 1,05

$K = 2,22$  est idéal. En réalité  $K \neq 2,22$ . Car les spires sont bobinées sur plusieurs encoches, elles n'embrassent pas le même flux (facteur d'enroulement  $K_d < 1$ ) et le champ dans l'entrefer n'est pas parfaitement sinusoïdal (facteur de forme  $K_f > 1$  en général).

#### I.4. Différents modes d'emplois d'un alternateur dans les centrales de production

En utilisant une turbine pour faire tourner le rotor d'alternateur et produire de l'électricité, le type de turbine utilisé dépendra de la source d'énergie utilisée pour faire tourner la turbine [2][3].

- **Les turbines à vapeur** sont couramment utilisées pour alimenter les alternateurs dans les centrales thermiques. Dans ce type de centrale on utilise une source de chaleur comme la combustion de charbon, de gaz ou de pétrole pour faire bouillir l'eau et produire de la vapeur. La vapeur est ensuite dirigée vers une turbine à vapeur qui fait tourner un rotor d'alternateur pour produire de l'électricité.
- **Les turbines hydrauliques** sont utilisées pour alimenter les alternateurs dans les centrales hydroélectriques. Dans ce type de centrale, l'eau est canalisée à travers une turbine hydraulique, qui utilise la pression de l'eau pour faire tourner le rotor de l'alternateur et produire de l'électricité.
- **Les turbines éoliennes** sont également utilisées pour alimenter les alternateurs. Dans ce cas, les pales de la turbine sont actionnées par le vent, faisant tourner le rotor de l'alternateur pour produire de l'électricité.

En somme, une turbine qui alimente un alternateur est un système clé de production d'électricité, permettant de convertir différentes sources d'énergie en électricité utilisable.

#### I.5. Différents systèmes d'excitation d'un alternateur

Pour générer le champ magnétique requis, le courant continu est généralement fourni à l'enroulement du rotor par une source externe, appelée une excitatrice. Selon le type de l'alternateur, deux des types de systèmes d'excitation utilisés sont sans balais ou statiques. Les deux jouent le même rôle [2][3][5].

##### I.5.1. Excitation sans balais

Lorsqu'un système d'excitation sans balais est utilisé, l'excitation est produite par une machine à induit tournant couplée à l'arbre de l'alternateur.

Le courant alternatif provenant de l'enroulement triphasé est redressé dans un pont de diode rotatif triphasé (rotor) et le courant continu est distribué à l'enroulement de champ de l'alternateur qui est aussi dans le rotor. L'enroulement du stator l'excitatrice est alimenté à partir des bornes de l'alternateur, en passant ensuite par un transformateur d'excitation et un redresseur. Les circuits électroniques du régulateur de tension sont aussi alimentés à partir des bornes de l'alternateur.

### **I.5.2. Excitation statique**

L'excitation statique d'un alternateur triphasé est un système d'excitation qui utilise des dispositifs électroniques pour contrôler la tension d'excitation du rotor de l'alternateur. Ce système est utilisé dans les applications où une tension de sortie précise et stable est requise, comme dans les centrales électriques et les installations industrielles.

Le système d'excitation statique d'un alternateur triphasé est composé des éléments suivants :

✓ **Le régulateur de tension :**

Le régulateur de tension est le composant clé du système d'excitation statique. Il surveille la tension de sortie de l'alternateur et ajuste la tension d'excitation du rotor pour maintenir une tension de sortie constante. Il utilise des dispositifs électroniques, tels que des thyristors ou des transistors, pour contrôler la tension d'excitation.

✓ **Le transformateur de courant :**

Le transformateur de courant mesure le courant généré dans les bobines triphasées du stator de l'alternateur. Le courant mesuré est utilisé par le régulateur de tension pour ajuster la tension d'excitation du rotor.

✓ **Le pont de diodes :**

Le pont de diodes est utilisé pour convertir le courant alternatif généré par le stator en courant continu utilisable.

Les avantages de l'excitation statique d'un alternateur triphasé incluent une tension de sortie stable et précise, une efficacité élevée et une maintenance réduite. Le système est également capable de répondre rapidement aux variations de charge, ce qui permet de maintenir une tension de sortie constante même en cas de fluctuations de charge. Cependant, le système est plus complexe que les systèmes d'excitation traditionnels et nécessite des régulateurs électroniques sophistiqués pour maintenir la tension de sortie constante [5].

## I.6. Défauts affectant l'alternateur triphasé

### I.6.1. Défauts électriques

#### I.6.1.1. Défauts électriques statoriques

Le court-circuit de spires est le défaut le plus nuisible et le plus fréquemment rencontré au stator, même si les risques d'ouverture de phase (conducteur coupé) demeurent physiquement réalisables. Un court-circuit entre phases provoquerait un arrêt net de la machine. Cependant un court-circuit au bobinage près du neutre, ou entre spires n'a pas un effet aussi radical sur la machine. Il conduit à un déséquilibre des phases, ce qui a une répercussion, directe sur le couple de la machine [2][6].

Les défauts statoriques sont classifiés comme suit :

- court-circuit entre spires,
- court-circuit entre bobines,
- court-circuit entre phases,
- ouverture d'une phase,
- court-circuit phase/terre.

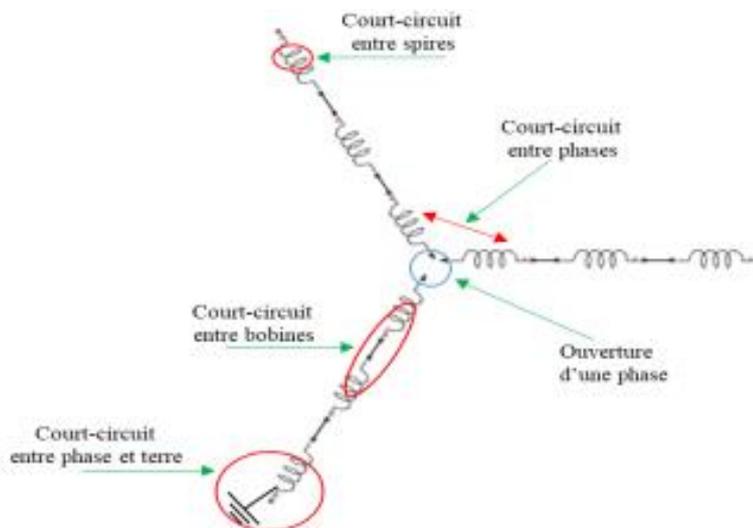


Fig. I.6 : Défauts dans les enroulements statoriques.

##### I.6.1.1.1. Défaut de type court-circuit entre spires

Le court-circuit entre spires de la même phase est un défaut fréquent qui peut apparaître soit au niveau des têtes de bobines soit dans les encoches, ce qui entraîne une diminution du nombre de spires effectives de l'enroulement. Il entraîne aussi une augmentation des courants statoriques dans la phase affectée et une légère variation de l'amplitude sur les autres phases.

Dans ces conditions de fonctionnement, le moteur peut tomber en panne après quelques minutes. En effet, et selon une règle générale, toute augmentation de 10°C de température par rapport à sa valeur nominale, réduit la durée de vie des conducteurs deux fois plus vite [2][3].

#### **I.6.1.1.2. Défaut de type court-circuit entre phases**

Ce type de défaillances peut arriver en tout point du bobinage, cependant les répercussions ne seront pas les mêmes selon la localisation. Cette caractéristique rend difficile une analyse de l'incidence de ce défaut sur le système. L'apparition d'un court-circuit proche de l'alimentation entre phase, induirait des courants très élevés qui conduiraient à la fusion des conducteurs d'alimentation et à la disjonction des protections. D'autre part, un court-circuit proche du neutre entre deux phases a de moins graves conséquences ; il engendre un déséquilibre des courants de phase avec un risque moindre de fusion des conducteurs [2][3].

#### **I.6.1.1.3. Défaut de type court-circuit entre phase et terre**

Une défaillance de l'isolation entre l'enroulement et la terre peut provoquer un courant de terre important, ce qui entraînerait des dommages irréversibles à la culasse de la machine. Ce défaut peut être si grave que la machine peut même devoir être mise hors service. Si le défaut est détecté à un stade précoce, la machine peut être remise en service en rebobinant simplement le stator [6].

### **I.6.1.2. Défautes électriques rotoriques**

#### **I.6.1.2.1. Ruptures des barres de l'amortisseur**

La cassure ou rupture de barre est un des défauts les plus fréquents au rotor de la machine synchrone. Elle peut se situer soit au niveau de son encoche soit à l'extrémité qui la relie à l'anneau de court-circuit rotorique.

La détérioration des barres réduit la valeur moyenne du couple électromagnétique et augmente l'amplitude des oscillations, qui elles-mêmes provoquent des oscillations de la vitesse de rotation, ce qui engendre des vibrations mécaniques et donc, un fonctionnement anormal de la machine. La grande amplitude de ces oscillations accélère la détérioration de la machine. Ainsi, le couple diminue sensiblement avec le nombre de barres cassées induisant un effet cumulatif de la défaillance. L'effet d'une cassure de barre croît rapidement avec le nombre de barres cassées [4][8].

### 1.6.1.2.2. Défaut de court-circuit entre spires rotoriques

Les court-circuits entre spires de l'enroulement d'excitation sont les plus communs. Des estimations montrent que plus de 50% des rotors des générateurs fonctionnent avec des courts-circuits entre spires. Ces défauts surviennent quand deux ou plusieurs spires de cuivre se touchent. Cette anomalie peut être due à une dégradation des isolations du cuivre telle que l'usure, comme il a été indiqué pour le cas de défaut de court-circuit statorique, le déplacement des isolants ou une surchauffe de l'isolant. Également, une imperfection dans le cuivre peut occasionner un défaut dans la jonction entre deux conducteurs ou une distorsion du cuivre.

Toutefois, un court-circuit peut résulter, à terme, en une dégradation du rotor. En général, un court-circuit entre spires conduit à une vibration du rotor et à un échauffement des spires, y compris celles qui sont saines, puisqu'un courant d'excitation plus élevé est nécessaire pour compenser les pertes dans le défaut [3][5].

## I.6.2. Défauts mécaniques

### I.6.2.1. Défauts de roulements

Les roulements dans l'alternateur sont, en général, composés d'une bague interne, d'une bague externe, d'un organe de roulement (constitué le plus souvent de billes maintenues dans une cage ou de rouleaux) ainsi que d'un dispositif de lubrification (Fig.I.7)

Les défauts de roulement, qui représentent une part non négligeable des défauts survenant dans l'alternateur, peuvent avoir des origines diverses

- ✓ Contraintes mécaniques dues à une surcharge.
- ✓ Mauvais assemblage.
- ✓ Défaut de lubrification.
- ✓ Contraintes environnementales (température, corrosion, poussières).

Ces défauts se manifestent le plus souvent, par des oscillations du couple de charge, une apparition de pertes supplémentaires et un jeu entre la bague interne et la bague externe du roulement entraînant des vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de l'alternateur ou par une fissure au niveau des bagues ou bien par une dégradation de l'organe de roulement (billes ou rouleaux) [2][3][6].



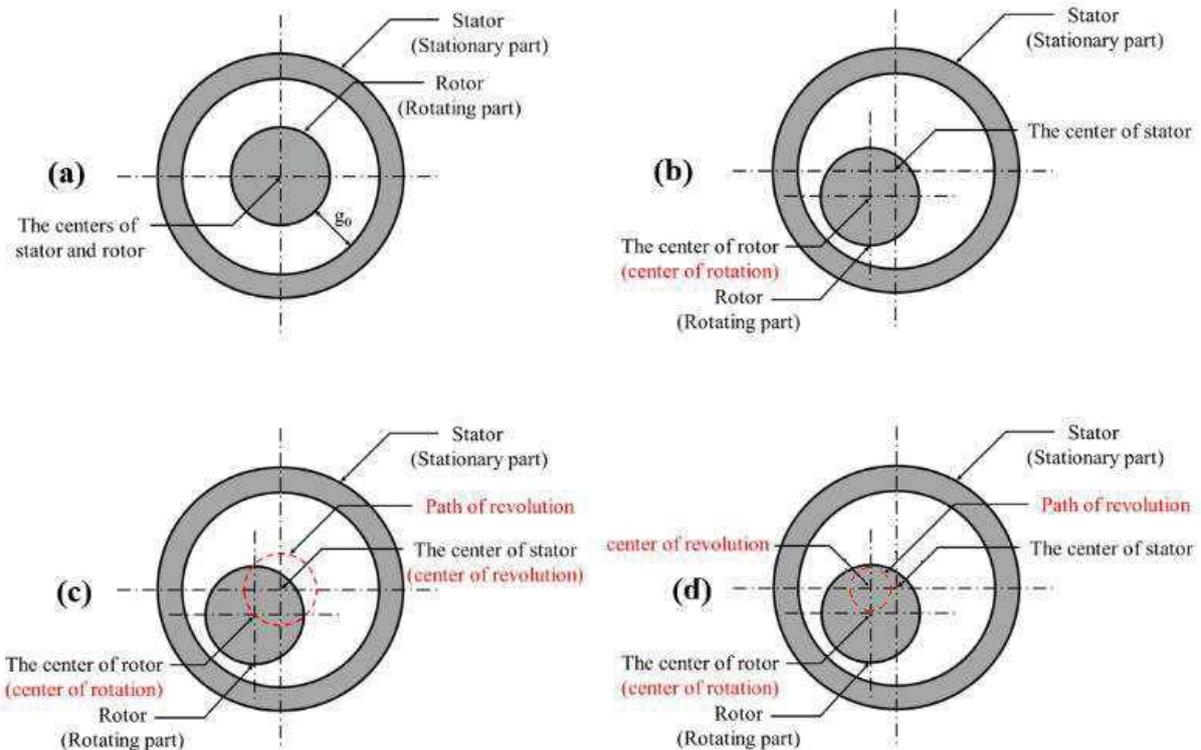
Fig. I.7 : Vue d'un roulement à billes.

### I.6.2.2. Défaut d'excentricité

En second lieu, une défaillance mécanique peut prendre la forme d'une d'excentricité de l'arbre dans l'alésage de l'alternateur. Comme évoqué dans le paragraphe précédent, un désalignement des arbres de l'alternateur et du moteur d'entraînement peut être à l'origine d'une excentricité côté alternateur. Ce défaut peut également apparaître à cause de déformations mécaniques au niveau du rotor de l'alternateur ou simplement à la suite de son mauvais positionnement dans l'entrefer. De nouveau, trois différents types d'excentricités peuvent être cités [2][3][6] :

- **L'excentricité statique** : elle correspond simplement à un écart fixe du centre de rotation du rotor par rapport au centre de l'alésage. La rotation de l'arbre est excellente, sans mouvement parasite, et la position du rotor dans l'entrefer est figée mais telle qu'elle engendre un entrefer non constant le long de l'alésage, avec un côté à faible entrefer et un autre à fort entrefer ;
- **L'excentricité dynamique** : elle désigne l'apparition d'un mouvement circulaire du centre de rotation du rotor autour du centre de l'alésage. La rotation de l'arbre provoque un déplacement de ce dernier dans la cavité du stator et, par là même, une évolution de la répartition de l'entrefer au court du temps. Ce type d'excentricité peut par exemple être due à une courbure de l'arbre sur sa longueur, ce dernier formant un léger arc de cercle et provoquant une excentricité dynamique sur sa partie centrale ;
- **L'excentricité mixte** : elle représente une composition des excentricités statique et dynamique. La révolution du rotor dans l'alésage autour du centre de la cavité observé dans le cas de l'excentricité dynamique est dans ce cas réalisée autour d'un point

déporté du centre de l'alésage, engendrant des écarts d'entrefer à la fois statiques (entrefer non constant autour de l'alésage) et dynamiques (valeur de l'entrefer en un point dépendante de la position angulaire du rotor).



**Fig. I.8 : Défauts mécaniques d'excentricité : (a) Pas d'excentricité. (b) Excentricité statique. (c) Excentricité dynamique. (d) Excentricité mixte**

## I.7. Systèmes de protection des alternateurs

### I.7.1. Protection électrique

L'alternateur est soumis à une surveillance électrique qui permet de signaler et de déclencher la machine à chaque fois qu'il y a un défaut électrique. Ce dispositif de surveillance est constitué d'un ensemble de relais de protection réalisé sous forme de carte électronique [4][5][9].

#### I.7.1.1. Protection différentielle contre les défauts entre phases d'alternateur :

La protection différentielle sert à protéger l'alternateur contre les courts-circuits internes pouvant se produire uniquement entre les deux capteurs qui délimitent la zone à

protégée. Son principe est basé sur la comparaison des courants à l'entrée et à la sortie de chaque phase qui devraient être égaux en cas d'absence de défaut.

#### **I.7.1.2. Protection contre la surintensité**

La protection contre les surintensités dans l'enroulement statorique est destinée à la prévention des surcharges. Elle peut aussi être utilisée en protection de secours contre les courts-circuits externes qui ne seraient pas éliminés par les relais de protection du réseau. Il est à noter que l'échauffement des conducteurs statoriques est également surveillé par des sondes thermométriques, ou par image thermique.

#### **I.7.1.3. Protection contre les surtensions**

Le rôle de la protection contre les surtensions est de protéger l'alternateur contre la rupture d'isolation au niveau du stator suite à une surtension. Elle a pour but de détecter ou éliminer les surtensions importantes qui peuvent endommager l'alternateur

#### **I.7.1.4. Protection contre le retour de puissance**

Le rôle de la protection contre le retour de puissance est d'éviter à l'alternateur de fonctionner en moteur d'entraînement de la turbine. Ce dernier absorbe la puissance du réseau au lieu d'en fournir.

#### **I.7.1.5. Protection contre les pertes d'excitation**

La mesure de la puissance réactive est la plus simple et la plus utilisée pour protéger les alternateurs de moyenne puissance. Elle permet de détecter à l'aide d'un relais directionnel de la puissance réactive toute absorption de puissance réactive.

### **I.7.2. Protection Mécanique**

La protection mécanique de l'alternateur est un aspect important de la maintenance et de la fiabilité de tout système électrique. Elle vise à éviter les dommages physiques à l'alternateur et à prolonger sa durée de vie en empêchant les éléments extérieurs de nuire à son fonctionnement. Voici quelques mesures de protection mécanique courantes utilisées pour protéger les alternateurs 4][5][9].

#### **I.7.2.1 Protection contre les vibrations**

Les vibrations excessives peuvent endommager l'alternateur. Des dispositifs tels que des supports antivibratoires et des amortisseurs sont utilisés pour limiter les vibrations et protéger l'alternateur.

**I.7.2.2. Protection contre les contaminants**

Les contaminants tels que la poussière, la saleté et l'humidité peuvent endommager l'alternateur. Des filtres et des couvercles de protection sont utilisés pour empêcher les contaminants d'entrer en contact avec l'alternateur.

**I.7.2.3. Protection contre les chocs**

Les chocs physiques peuvent endommager l'alternateur. Des dispositifs de Protection tels que des couvercles de protection et des barrières de sécurité sont utilisés pour empêcher les chocs physiques.

**I.7.2.4. Protection contre la corrosion**

La corrosion peut endommager les parties métalliques de l'alternateur. Des revêtements et des lubrifiants sont utilisés pour protéger les parties métalliques de l'alternateur contre la corrosion.

**I.7.2.5. Protection contre la surcharge**

La surcharge peut causer des dommages physiques à l'alternateur. Des dispositifs de protection tels que des limiteurs de surcharge sont utilisés pour empêcher la surcharge de l'alternateur.

**I.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les éléments de constitution d'un alternateur triphasé, son principe de fonctionnement et ses modes d'excitation. Pour passer par la suite à exposer les différents défauts qui peuvent surgir au niveau de cet alternateur. Ainsi que les dispositifs de protection existant.

Comme l'objectif de ce travail est l'étude par simulation des défauts statoriques de l'alternateur triphasé. Le prochain chapitre est consacré à la modélisation de ce dernier, afin de simuler son comportement dans le cas sain et avec défauts.

# CHAPITRE II

**Modélisation d'un alternateur triphasé  
sain et défaillant**

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le modèle mathématique d'un alternateur triphasé, qui permet l'étude par simulation de son comportement électromécanique sain et avec défauts statoriques. La mise en équation de la machine est basée sur la théorie des circuits électriques couplés magnétiquement.

Le modèle proposé permet de développer les équations des circuits électriques statoriques et rotoriques et les équations mécaniques dans les axes réels. Pour formuler par la suite le système d'équations d'état de l'alternateur sain et avec défauts. Dans ce cas, la modélisation porte pour les cas suivants :

- ✓ Alternateur triphasé sain ;
- ✓ Alternateur avec court-circuit de spires statoriques ;
- ✓ Alternateur avec déséquilibre des tensions ;
- ✓ Alternateur avec court-circuit monophasé ;
- ✓ Alternateur avec court-circuit biphasé ;
- ✓ Alternateur avec court-circuit triphasé.

Cependant, tout type de modélisation ne peut se faire sans effectuer quelques hypothèses simplificatrices, qui font l'objet de la première partie de ce chapitre [1].

## II.2. Hypothèses simplificatrices

La mise en équations des machines électriques est trop complexe à la suite de la géométrie de ces machines et aux phénomènes qui prennent naissance durant leur fonctionnement. Pour simplifier la mise en équation de l'alternateur triphasé. On considère les hypothèses suivantes, en négligeant [1][10] :

- la saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault ;
- l'effet de peau qui augmente les résistances et diminue les inductances ;
- les couplages capacitifs entre enroulements ;
- l'effet de la température sur la valeur des résistances ;
- les effets d'encoche et d'inclinaison des encoches ;
- l'influence des pièces massives.

On admet que les FMM des enroulements statoriques sont à répartition sinusoïdale.

## II.3. Mise en équations de l'alternateur triphasé sain dans les axes réels

Les figures (II.1 et II.2) représentent un schéma simplifié de l'emplacement des enroulements statoriques et rotoriques d'une machine synchrone triphasée à pôles saillants.

L'enroulement statorique comporte trois phases identique décalées entre elles dans l'espace de la machine d'un angle électrique égal à  $2\pi/3$ , Ces trois phases sont désignées respectivement par a, b, c.

La structure électrique du rotor est réalisée par un enroulement monophasé excité en courant continu (f) sur l'axe polaire "D", et des enroulements amortisseurs en quadrature ; un enroulement D sur l'axe polaire et deux autres Q1 et Q2 sur l'axe interpolaire "Q" [1][11].

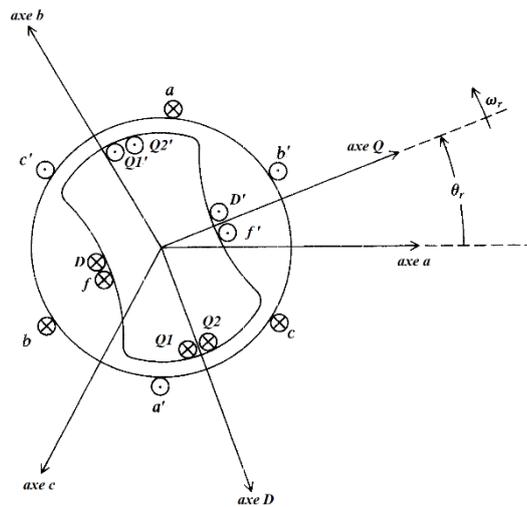


Fig. II.1 : Représentation d'un alternateur triphasé à inducteur bobiné

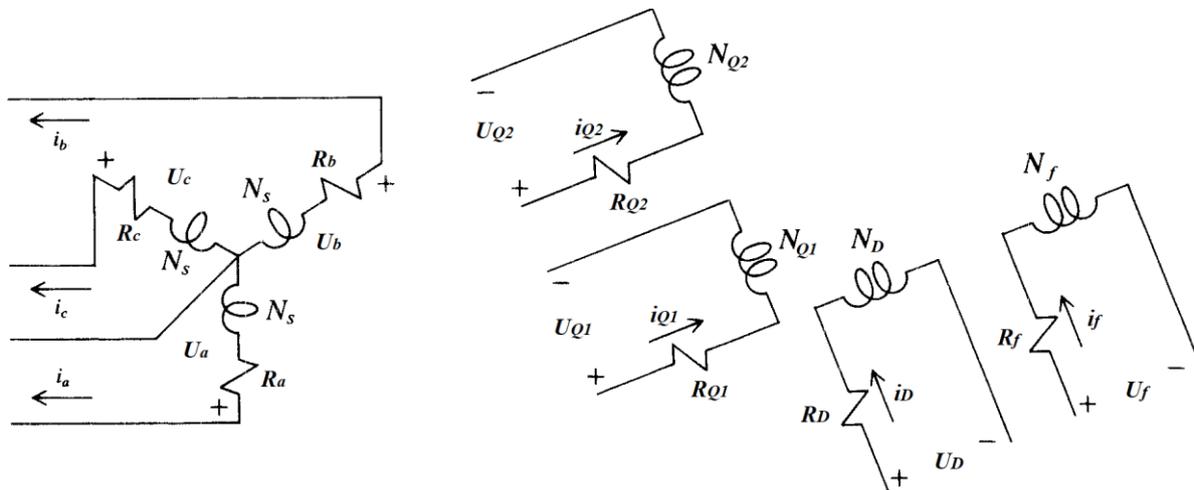


Fig. II.2 : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques d'un alternateur triphasé à inducteur bobiné

Afin de comparer commodément les caractéristiques de machines électriques de puissances et de tensions très différentes, il est plus convenable d'exprimer les paramètres et les variables de la machine synchrone en per-unitage (valeurs relatives). On utilise des grandeurs relatives

adimensionnelles obtenues en divisant des grandeurs physiques, telles que puissance, tension, courant, vitesse, etc., par des grandeurs de référence. Les grandeurs relatives facilitent le calcul et le contrôle des valeurs numériques [1][11]. Ces grandeurs sont données dans l'annexe A.

### II.3.1. Equation électriques

Les équations générales des tensions sont obtenues sur la base de la théorie des circuits électriques couplés magnétiquement [1][11].

En appliquant la loi des mailles de Kirchhoff pour chaque enroulement de l'alternateur sain avec rotor à pôles saillants, on obtient :

#### ➤ Stator

$$\begin{cases} U_a = -R_a i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} \\ U_b = -R_b i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} \\ U_c = -R_c i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

#### ➤ Rotor

$$\begin{cases} U_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \\ U_D = R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} = 0 \\ U_{Q1} = R_{Q1} i_{Q1} + \frac{d\Psi_{Q1}}{dt} = 0 \\ U_{Q2} = R_{Q2} i_{Q2} + \frac{d\Psi_{Q2}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

En rassemblent les deux systèmes d'équations (II.1) et (II.2) sous forme matricielles en on obtient :

$$[U] = [R][I] + \frac{1}{\omega} \frac{d}{dt} [\Psi] \quad (\text{II.3})$$

avec :

$[U]$ ,  $[I]$  et  $[\Psi]$  représentent respectivement le vecteur des tensions, le vecteur des courants et le vecteur des flux totaux produits par les courants de l'alternateur, tels que :

$$\begin{cases} [U] = [-U_a \ -U_b \ -U_c \ U_f \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ [I] = [i_a \ i_b \ i_c \ i_f \ i_D \ i_{Q1} \ i_{Q2}]^T \\ [\Psi] = [\Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c \ \Psi_f \ \Psi_D \ \Psi_{Q1} \ \Psi_{Q2}]^T \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

$[R]$  représente la matrice des résistances statoriques et rotoriques de l'alternateur qui est donnée par :

$$[R] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{Q1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{Q2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Pour un alternateur symétrique, on a :  $R_a = R_b = R_c = R_s$ .

Le vecteur des flux de l'alternateur,  $[\Psi]$  est donné par :

$$[\Psi] = [L] \cdot [I] \quad (\text{II.6})$$

où :

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

avec :  $[L]$  : la matrice des inductances de l'alternateur,  $[L_{ss}]$ ,  $[L_{rr}]$  sont respectivement les matrices des inductances statoriques et rotoriques, et  $[L_{sr}]$  est la matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

$[L_{ss}]$  est donnée par :

$$[L_{ss}(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta) & M_{ab}(\theta) & M_{ac}(\theta) \\ M_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & M_{bc}(\theta) \\ M_{ca}(\theta) & M_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

avec :

$$\begin{cases} L_{aa}(\theta) = L_{fs} + L_{m1} + L_{m2} \cos(\theta) \\ L_{bb}(\theta) = L_{fs} + L_{m1} + L_{m2} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ L_{cc}(\theta) = L_{fs} + L_{m1} + L_{m2} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

et :

$$L_{m1} = \frac{L_d + L_q}{2}, \quad L_{m2} = \frac{L_d - L_q}{2}$$

$L_{fs}$  est l'inductance de fuite du stator.

$$\begin{cases} M_{ab}(\theta) = -\frac{1}{2}L_{m1} + L_{m2} \cos(\theta) \\ M_{bc}(\theta) = -\frac{1}{2}L_{m1} + L_{m2} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ M_{ca}(\theta) = -\frac{1}{2}L_{m1} + L_{m2} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

$[L_{rr}]$  : est la matrice des inductances rotoriques, elle est composée des inductances propres ( $L_{ij}$ ), et les inductances mutuelles ( $M_{ij}$ ) des enroulements rotoriques sur les deux axes « D » et « Q », ou les inductances propres  $L_{DD}$ ,  $L_{ff}$ ,  $L_{Q2Q1}$ ,  $L_{Q1Q2}$  sont constantes, on peut écrire cette matrice sous la forme suivante :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ff} & M_{fD} & M_{fQ1} & M_{fQ2} \\ M_{Df} & L_{DD} & M_{DQ1} & M_{DQ2} \\ M_{Q1f} & M_{Q1D} & L_{Q1Q1} & M_{Q1Q2} \\ M_{Q2f} & M_{Q2D} & M_{Q2Q1} & L_{Q2Q2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

avec :

$$M_{Df} = M_{fD} = \text{constante et } M_{Q1Q2} = M_{Q2Q1} = \text{constante.}$$

$$M_{Q1D} = M_{Q2D} = M_{Q1f} = M_{Q2f} = M_{DQ1} = M_{DQ2} = M_{fQ1} = M_{fQ2} = 0$$

Les éléments de la matrice des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques  $[L_{sr}]$  sont en fonction de l'angle «  $\theta$  », avec l'axe de phase « a » pris comme référence et l'axe « D ». Cette matrice est donnée par :

$$[L_{sr}(\theta)] = \begin{bmatrix} M_{af}(\theta) & M_{aD}(\theta) & M_{aQ1}(\theta) & M_{aQ2}(\theta) \\ M_{bf}(\theta) & M_{bD}(\theta) & M_{bQ1}(\theta) & M_{bQ2}(\theta) \\ M_{cf}(\theta) & M_{cD}(\theta) & M_{cQ1}(\theta) & M_{cQ2}(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

ses différents éléments sont :

➤ les inductances mutuelles entre le stator et l'enroulement de l'excitation :

$$\begin{cases} M_{af}(\theta) = m_{af} \sin(\theta) \\ M_{bf}(\theta) = m_{bf} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cf}(\theta) = m_{cf} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

➤ les inductances mutuelles entre le stator et l'amortisseur D :

$$\begin{cases} M_{aD}(\theta) = m_{aD} \sin(\theta) \\ M_{bD}(\theta) = m_{bD} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cD}(\theta) = m_{cD} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

➤ Les inductances mutuelles entre le stator et l'amortisseur Q1 :

$$\begin{cases} M_{aQ1}(\theta) = m_{aQ1} \cos(\theta) \\ M_{bQ1}(\theta) = m_{bQ1} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cQ1}(\theta) = m_{cQ1} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

➤ Les inductances mutuelles entre le stator et l'amortisseur Q2 :

$$\begin{cases} M_{aQ2}(\theta) = m_{aQ2} \cos(\theta) \\ M_{bQ2}(\theta) = m_{bQ2} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{cQ2}(\theta) = m_{cQ2} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

avec :

$$[L_{rs}(\theta)] = [L_{sr}(\theta)]^T \quad (\text{II.17})$$

### II.3.2. Equation mécaniques

L'équation de la vitesse de rotation du rotor exprimée en p.u, est donnée par :

$$2H \frac{d\omega_m}{dt} = (C_r - C_e - fv \cdot \omega_m) \quad (\text{II.18})$$

L'équation de la position du rotor par rapport au stator :

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m \cdot \omega \quad (\text{II.19})$$

avec :

$f_v$  : coefficient de frottement

$\omega_m$  : vitesse angulaire du rotor.

$2H$  : constante d'inertie

$C_e$  : couple électromagnétique.

$C_r$  : couple de la turbine

L'expression du couple électromagnétique " $C_e$ " est obtenue par la dérivation de la co-énergie qui est considérée dans ce cas égale à l'énergie stockée " $W_s$ " :

$$C_e = \left[ \frac{dw_{co}}{d\theta} \right] \quad (\text{II.20})$$

avec :

$$W_s = w_{co} = \frac{1}{2} [I]^T \cdot [L] \cdot [I] \quad (\text{II.21})$$

après substitution et simplification, l'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_e = \frac{1}{2} [I]^T \cdot \left\{ \frac{d[L]}{d\theta} \right\} \cdot [I] \quad (\text{II.22})$$

### II.3.3. Mise sous forme d'équation d'état du modèle de l'alternateur

Le système électrique des équations différentielles gouvernent le fonctionnement de l'alternateur à rotor bobiné dans le cas sain est mis sous la forme d'état [1][12] :

$$[U] = [R] \cdot [I] + \frac{1}{\omega} \cdot \frac{d}{dt} \{ [L] \cdot [I] \} \quad (\text{II.23})$$

$$\frac{d[I]}{dt} = [L]^{-1} \left[ [U] - \left( [R] + \omega_m \cdot \frac{d[L]}{d\theta} \right) \cdot [I] \right] \cdot \omega \quad (\text{II.24})$$

Les tensions statoriques peuvent être celles de réseau électrique si l'alternateur est couplé au réseau. Elles sont données dans ce cas par :

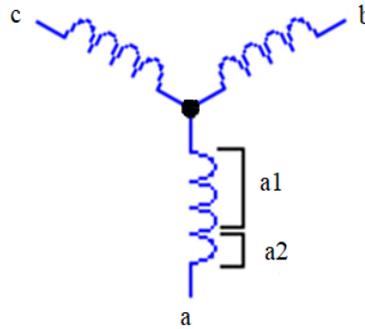
$$\begin{cases} -U_a = V_m \cos(\omega t) \\ -U_b = V_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ -U_c = V_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

## II.4. Modélisation d'un alternateur triphasé avec défaut

### II.4.1. Modélisation d'un alternateur à pôles saillants triphasé avec court-circuit de spires statoriques

Si un défaut de court-circuit entre spires se produit dans la phase statorique « a » d'un alternateur triphasé à rotor bobiné. Cette phase se devise en deux parties. Une partie saine  $a_1$  et l'autre

court-circuitée a<sub>2</sub> qui forme un circuit supplémentaire créant un champ magnétique stationnaire (Fig .II.3) [1][12][13].



**Fig. II.3 : Court-circuit entre spires statoriques dans la phase « a »**

Ce nouveau champ magnétique modifie le champ principal, en ajoutant une quatrième branche magnétique dans le système pour tenir en compte la portion court-circuitée a<sub>2</sub> de la phase « a ». La même procédure sera appliquée si le défaut se produit dans les autres phases.

Le rapport  $\mu$  du nombre de spires court-circuitées  $n_{cc}$  par rapport au nombre de spires totale d'une phase saine  $n_t$  est donné par :

$$\mu = \frac{n_{cc}}{n_t} \tag{II.26}$$

La partie a<sub>2</sub> court-circuitée est prise en compte dans les équations de tension statoriques par l'ajout d'une quatrième équation dépendant du rapport «  $\mu$  » tel que :

$$\begin{cases} [U] = [-U_{a1} - U_b - U_c -U_{a2} U_f 0 0 0]^T \\ [I] = [i_{a1} i_b i_c i_{a2} i_f i_D i_{Q1} i_{Q2}]^T \\ [\Psi] = [\Psi_{a1} \Psi_b \Psi_c \Psi_{a2} \Psi_f \Psi_D \Psi_{Q1} \Psi_{Q2}]^T \end{cases} \tag{II.27}$$

$-U_{a1}$  et  $-U_{a2}$ , sont respectivement les tensions aux bornes de la partie saine a<sub>1</sub> et court-circuitée a<sub>2</sub> de la phase statorique « a ».

Le problème fondamental est de savoir comment calculer les nouveaux paramètres en se basant sur le rapport «  $\mu$  ».

La matrice de résistances statorique devient alors :

$$[R_{Scc}] = \begin{bmatrix} (1-\mu)R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu \cdot R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{Q1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{Q2} \end{bmatrix} \quad (II.28)$$

La matrice des inductances statorique devient :

$$[L_{SScc}(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{a1}(\theta) & M_{a1b}(\theta) & M_{a1c}(\theta) & M_{a1a2}(\theta) \\ M_{ba1}(\theta) & L_{bb}(\theta) & M_{bc}(\theta) & M_{ba2}(\theta) \\ M_{ca1}(\theta) & M_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) & M_{ca2}(\theta) \\ M_{a2a1}(\theta) & M_{a2b}(\theta) & M_{a2c}(\theta) & L_{a2}(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.29)$$

$$[L_{SScc}(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{a1}(\theta) & (1-\mu) \cdot M_{ab}(\theta) & (1-\mu) \cdot M_{ac}(\theta) & L_{a1a2}(\theta) \\ (1-\mu) \cdot M_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & M_{bc}(\theta) & \mu \cdot M_{ba2}(\theta) \\ (1-\mu) \cdot M_{ca}(\theta) & M_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) & \mu \cdot M_{ca2}(\theta) \\ L_{a2a1}(\theta) & \mu \cdot M_{ab}(\theta) & \mu \cdot M_{ac}(\theta) & L_{a2}(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.30)$$

avec :

$$\begin{cases} L_{a1} = (1-\mu)^2 \cdot L_{ms} + (1-\mu) \cdot L_{fs} \\ L_{a2} = \mu^2 \cdot L_{ms} + \mu \cdot L_{fs} \\ L_{a1a2} = \mu \cdot (1-\mu)^2 \cdot (L_{ms} + L_{fs}) \end{cases} \quad (II.31)$$

La matrice  $[L_{rr}]$  ne change pas puisqu'il n'y a pas de défaut au rotor, Cependant la matrice des inductances mutuelles  $[L_{sr}(\theta)]$  devient :

$$[L_{Srcc}(\theta)] = \begin{bmatrix} M_{a1f}(\theta) & M_{a1D}(\theta) & M_{a1Q1}(\theta) & M_{a1Q2}(\theta) \\ M_{bf}(\theta) & M_{bD}(\theta) & M_{bQ1}(\theta) & M_{bQ2}(\theta) \\ M_{cf}(\theta) & M_{cD}(\theta) & M_{cQ1}(\theta) & M_{cQ2}(\theta) \\ M_{a2f}(\theta) & M_{a2D}(\theta) & M_{a2Q1}(\theta) & M_{a2Q2}(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.32)$$

où  $[L_{Srcc}(\theta)]$  devient :

$$[L_{Srcc}(\theta)] = \begin{bmatrix} (1-\mu) \cdot M_{af}(\theta) & (1-\mu) \cdot M_{aD}(\theta) & (1-\mu) \cdot M_{aQ1}(\theta) & (1-\mu) \cdot M_{aQ2}(\theta) \\ M_{bf}(\theta) & M_{bD}(\theta) & M_{bQ1}(\theta) & M_{bQ2}(\theta) \\ M_{cf}(\theta) & M_{cD}(\theta) & M_{cQ1}(\theta) & M_{cQ2}(\theta) \\ \mu \cdot M_{af}(\theta) & \mu \cdot M_{aD}(\theta) & \mu \cdot M_{aQ1}(\theta) & \mu \cdot M_{aQ2}(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

La nouvelle matrice des inductances de l'alternateur devient :

$$[L_{Scc}] = \begin{bmatrix} [L_{SScc}] & [L_{Srcc}] \\ [L_{rScc}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

avec :

$$[L_{rScc}(\theta)] = [L_{Srcc}(\theta)]^T \quad (\text{II.35})$$

La nouvelle équation du couple est :

$$C_e = \frac{1}{2} [I]^T \cdot \left\{ \frac{d[L_{Scc}]}{d\theta} \right\} \cdot [I] \quad (\text{II.36})$$

Dans ce cas de court-circuit de spires dans une phase statorique, l'ordre du système d'équations est augmenté d'une équation par rapport à celui de l'alternateur sain, il devient :

$$\frac{d[I]}{dt} = [L_{Scc}]^{-1} \left[ [U] - \left( [R_{Scc}] + \omega_m \cdot \frac{d[L_{Scc}]}{d\theta} \right) \cdot [I] \right] \cdot \omega \quad (\text{II.37})$$

#### II.4.2. Modélisation du déséquilibre de tensions

Le déséquilibre de tensions de l'alternateur est modélisé par l'augmentation, ou la diminution, de la tension d'une phase ou plus. Nous avons, dans cette étude introduit le déséquilibre des tensions par diminution de la tension de la phase « a » de 2% et l'augmentation de la tension de la phase « c » de 2% aussi, et ça par rapport à la tension de la phase (b) qui reste sous tension équilibré [1][12].

#### II.4.3. Modélisation du court-circuit monophasé

Le défaut de court-circuit monophasé est modélisé par l'élimination de la tension d'une phase statorique [12][13].

#### II.4.4. Modélisation du court-circuit biphasé

Le court-circuit biphasé est introduit dans le modèle mathématique du moteur, par l'élimination des tensions de deux phases statoriques [12][13].

#### II.4.5. Modélisation du court-circuit triphasé

La modélisation du défaut de court-circuit triphasé est considérée par l'élimination des tensions des trois phases statoriques en même temps [12][13].

Nous avons ainsi décrit un modèle mathématique de l'alternateur triphasé sain et avec défauts statoriques, permettant ainsi la simulation de son comportement dans les deux cas.

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique sous forme d'équations différentielles d'un alternateur triphasé sain et défaillant. Le modèle établi va permettre d'étudier le comportement électromécanique de cet alternateur dans le cas sain et avec défauts statoriques.

Le prochain chapitre est consacré à la présentation des résultats de simulation des différents cas de fonctionnement de l'alternateur.

# CHAPITRE III

**Résultats de simulation d'un  
alternateur sain et défaillant**

### III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats de simulation. Pour ce faire, nous avons exploité les modèles mathématiques du cas de l'alternateur triphasé sain et avec défauts statoriques ; établis dans le chapitre précédent. Les modèles à simuler représentent des systèmes d'équations différentielles, qui sont résolus par l'emploi de la méthode de Runge kutta d'ordre 4 sous Matlab. Les paramètres de l'alternateur simulé sont donnés dans l'annexe B.

Les simulations sont effectuées dans le but de montrer l'effet des défauts statoriques sur les grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé. Elles ont porté sur les cas de fonctionnement suivants :

- alternateur sain ;
- alternateur avec déséquilibre de tensions;
- alternateur avec court-circuit de spires statoriques ;
- alternateur avec court-circuit monophasé ;
- alternateur avec court-circuit biphasé ;
- alternateur avec court-circuit triphasé.

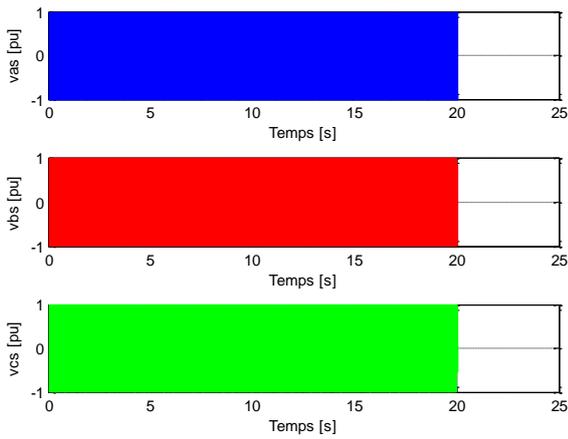
La simulation du modèle d'un alternateur sain et avec les cinq défauts considérés ; a permis de tracer les courbes des grandeurs électromécaniques en régime transitoire et permanent, ainsi que les zooms d'une partie de leurs régimes permanents. Les grandeurs exploitées sont les tensions statoriques, les courants de phase statoriques, le courant rotorique (courant d'excitation), les courants des amortisseurs, la puissance active, la puissance réactive, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation.

### III.2. Résultats de simulation d'un alternateur triphasé sain

L'alternateur est entraîné à la vitesse nominale par la turbine. Il est excité à  $t=0s$ , afin d'avoir les tensions à vide à ses bornes. Ce qui permet d'avoir les tensions et la fréquence correspondantes à celles du réseau dont il est couplé. Une fois l'alternateur couplé au réseau, ses tensions et sa fréquence sont maintenues par le réseau. Il est prêt à débiter sa puissance active et réactive. On fait augmenter son courant d'excitation et le couple de la turbine à  $t=3s$  et  $t=6s$  respectivement, pour que l'alternateur puisse fournir ses deux puissances au réseau.

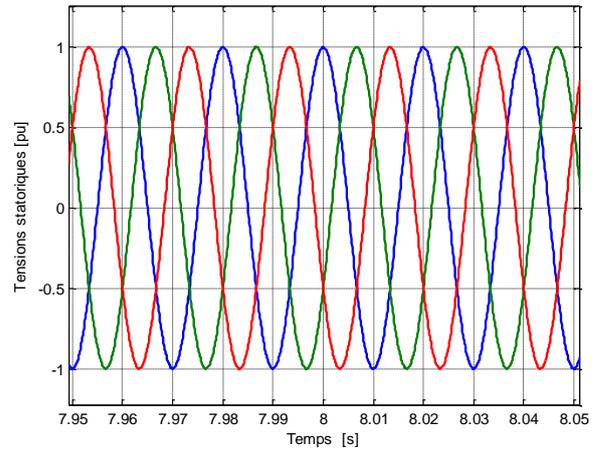
Après l'instant  $t=6s$ , l'alternateur couplé au réseau, fonctionne en charge. Ces caractéristiques électromécaniques présentées par les figures (III.1 et III.2) reflètent le cas sain de son fonctionnement. On retrouve donc des tensions et des courants statoriques équilibrés (Fig. III.2 (a) et (b)). Un courant d'excitation constant (Fig. III.2 (c)), ainsi que des courants d'amortisseurs nuls (Fig. III.2 (d)), Les deux puissances active et réactive sont stables (Fig. III.2 (e) et (f)), le couple électromagnétique et la vitesse de rotation constants (Fig. III.2 (g) et (h)).

Tensions statoriques



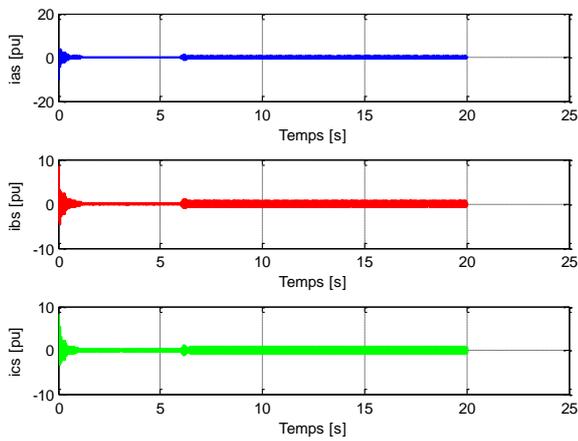
(a)

Tensions statoriques



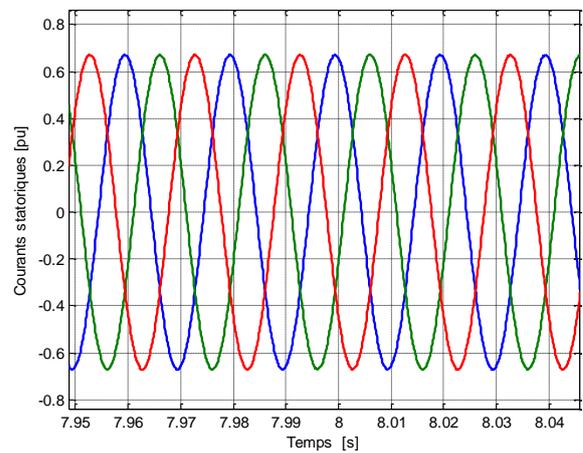
(a)

Courants statoriques



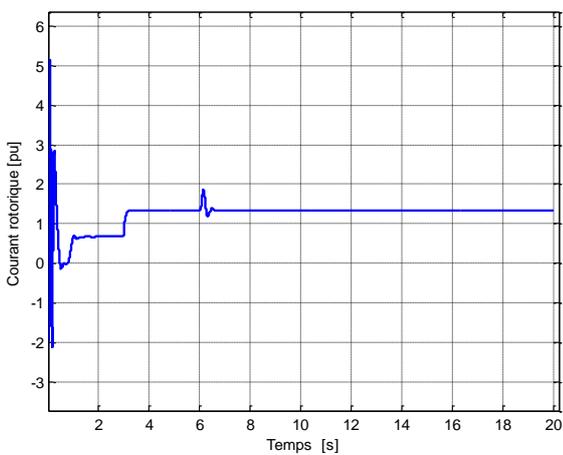
(b)

Courants statoriques



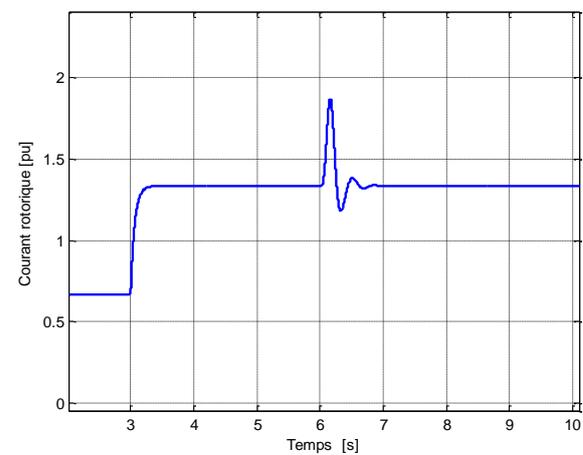
(b)

Courant rotorique



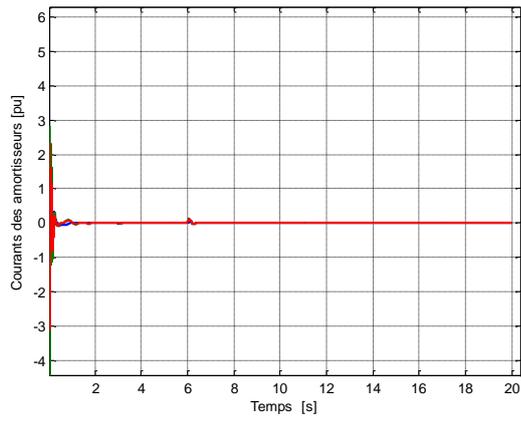
(c)

Courant rotorique



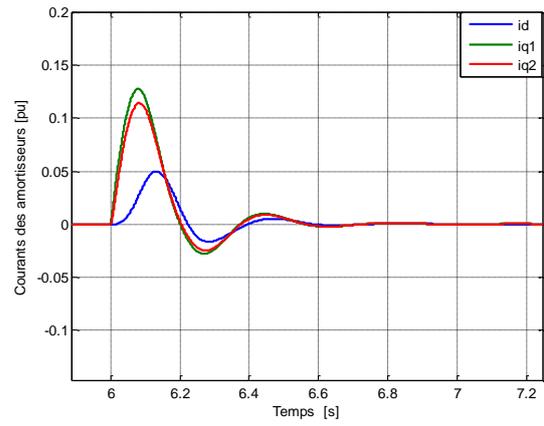
(c)

Courants des amortisseurs



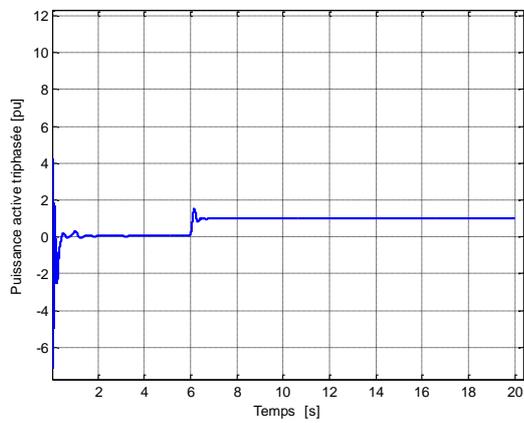
(d)

Courants des amortisseurs



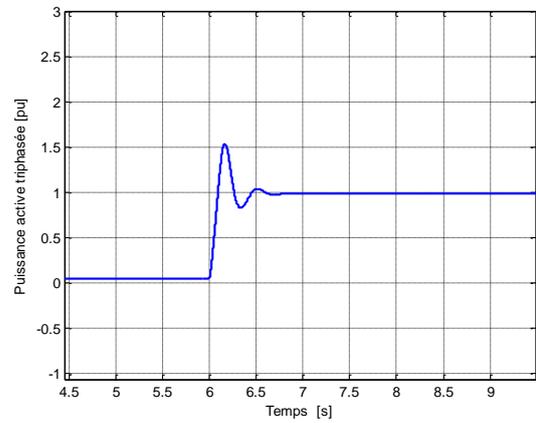
(d)

Puissance active



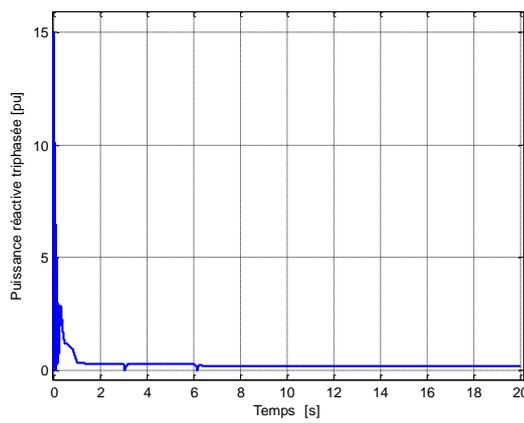
(e)

Puissance active



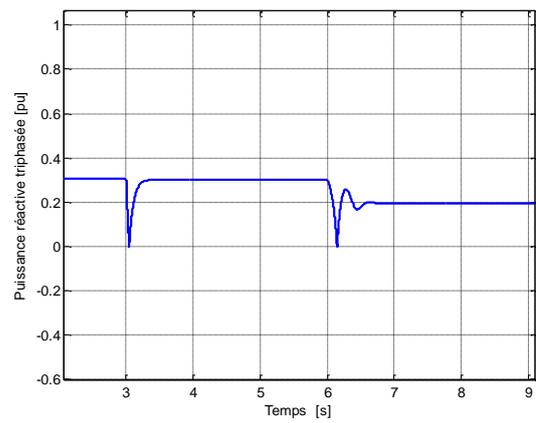
(e)

Puissance réactive

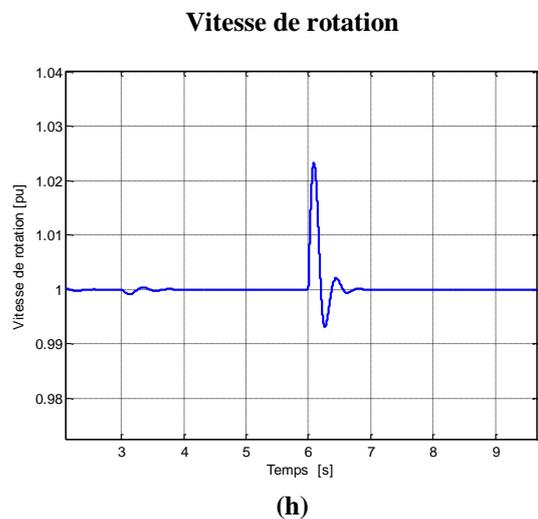
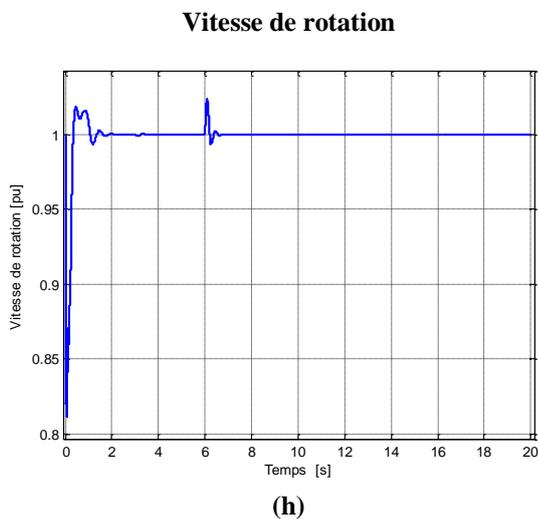
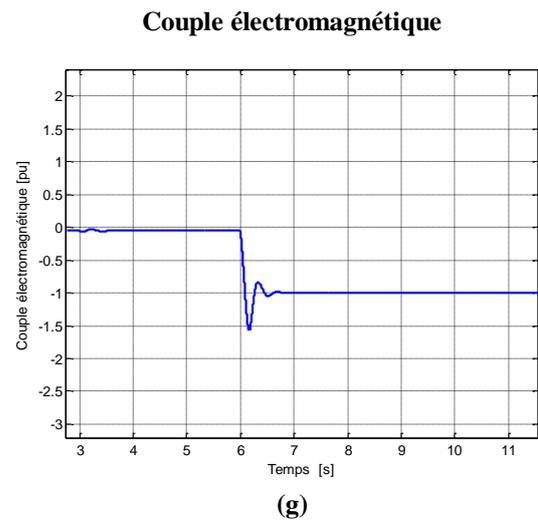
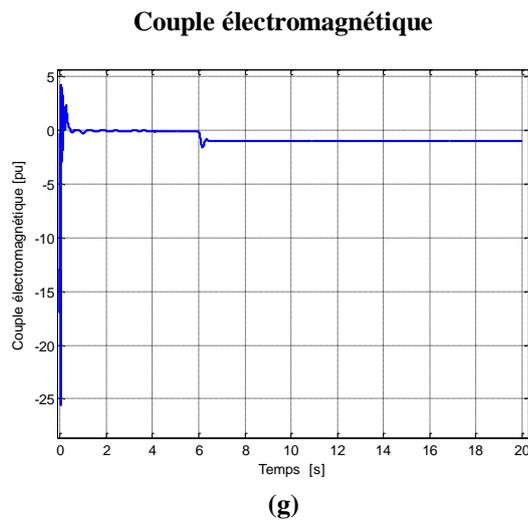


(f)

Puissance réactive



(f)



**Fig. III.1 : Régime transitoire et permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé sain**

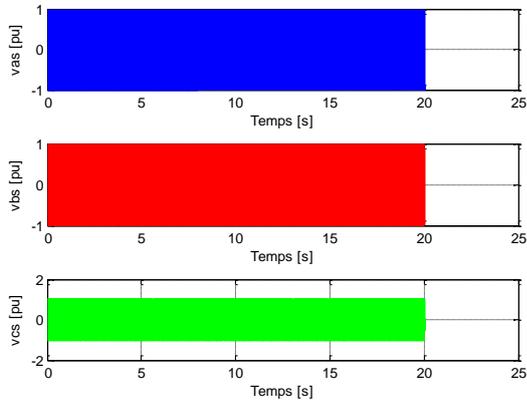
**Fig. III.2 : Régime permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé sain**

### III.3. Résultats de simulation d'un alternateur avec déséquilibre de tensions

Le défaut du déséquilibre de tensions est introduit à l'instant  $t=8s$ , par la diminution de la tension de la phase « a » de 2% de sa valeur et l'augmentation de la phase « c » de 2%. Les grandeurs électromécaniques de l'alternateur répondent à ce déséquilibre par un changement par rapport à leur état initial. Ce changement est illustré par les figures (III.3 et III.4), où on retrouve un déséquilibre dans les courants statoriques (Fig. III.4 (b)). Des oscillations au niveau du courant rotorique (Fig. III.4 (c)), des courants d'amortisseurs (Fig. III.4 (d)), de la puissance active (Fig. III.4 (e)), de la puissance réactive (Fig. III.4 (f)) et du couple (Fig. III.4 (g)). Ces oscillations sont moins importantes dans l'allure de la vitesse (Fig. III.4 (h)). Il faut noter, que l'influence de ce type de défaut prononce de faibles oscillations surtout dans les courants statoriques et d'excitation, ce qui ne permet pas d'évoquer les

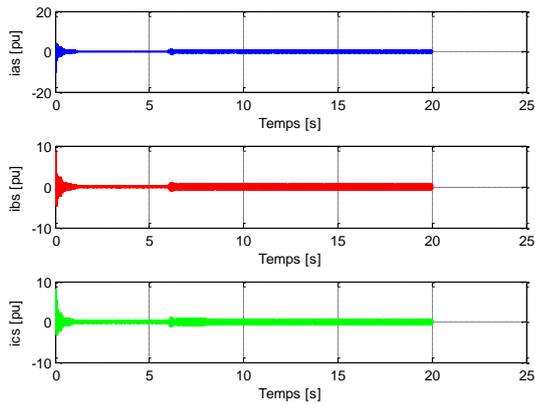
appareils de protection. Le déséquilibre des tensions est toujours présent dans le réseau électrique à cause des charges monophasés appliquées.

Tensions statoriques



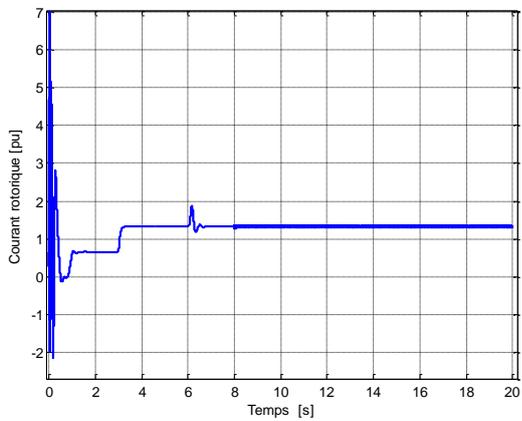
(a)

Courants statoriques



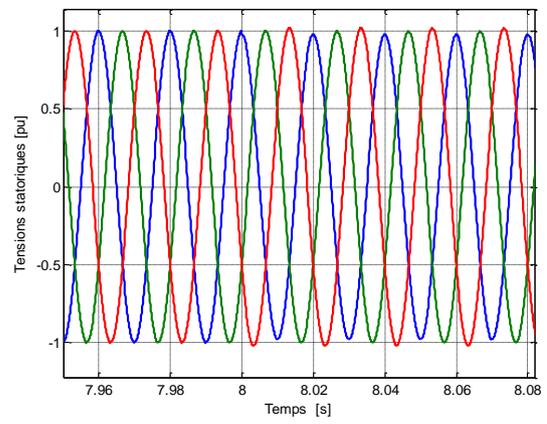
(b)

Courant rotorique



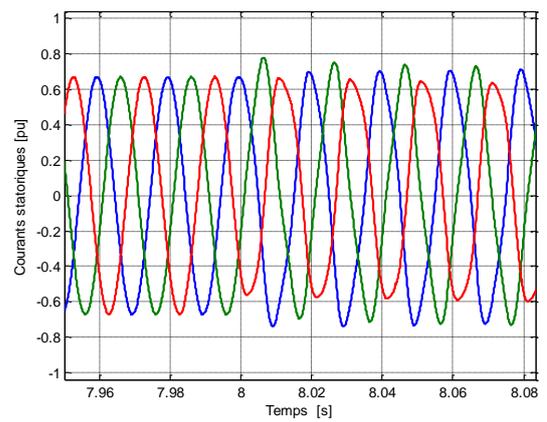
(c)

Tensions statoriques



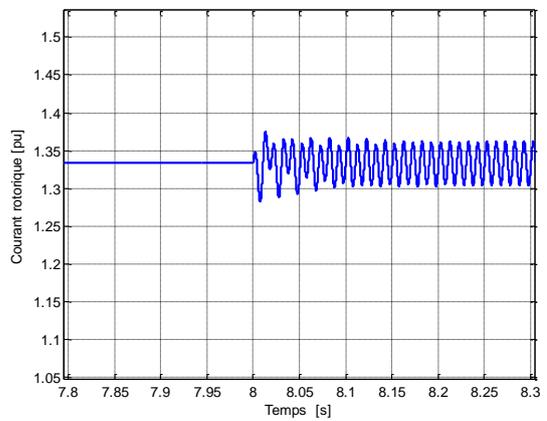
(a)

Courants statoriques



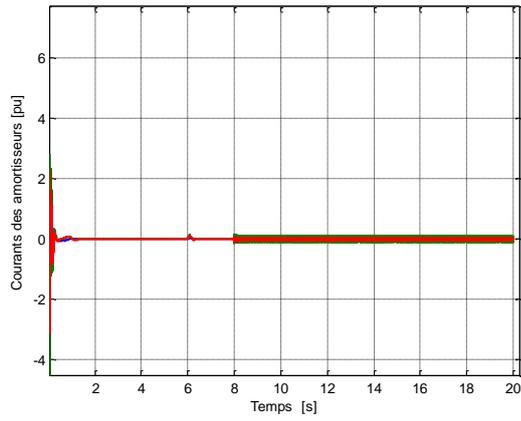
(b)

Courant rotorique



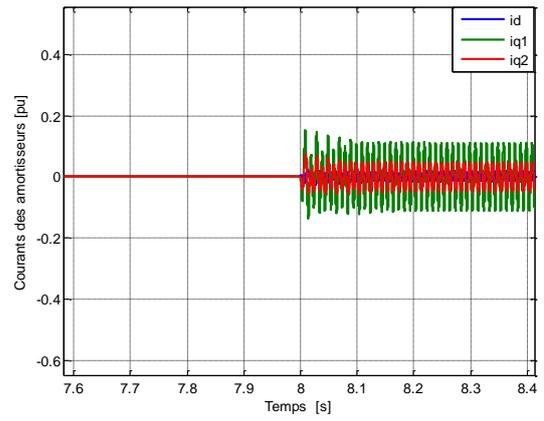
(c)

Courants des amortisseurs



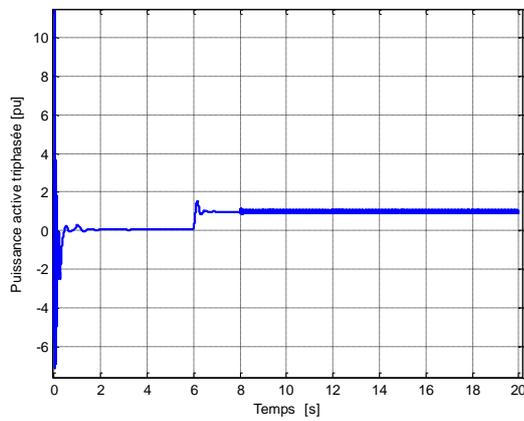
(d)

Courants des amortisseurs



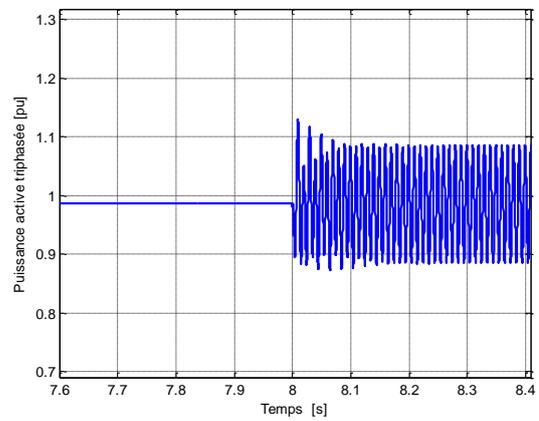
(d)

Puissance active



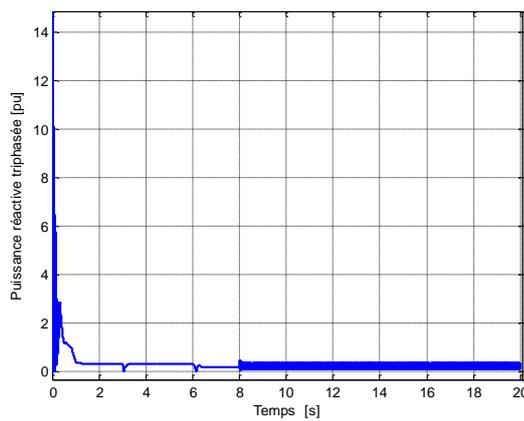
(e)

Puissance active



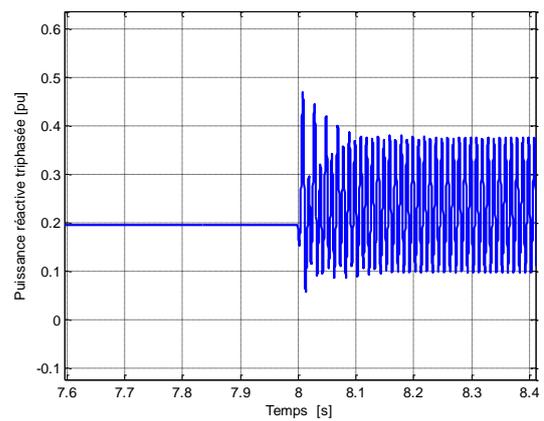
(e)

Puissance réactive

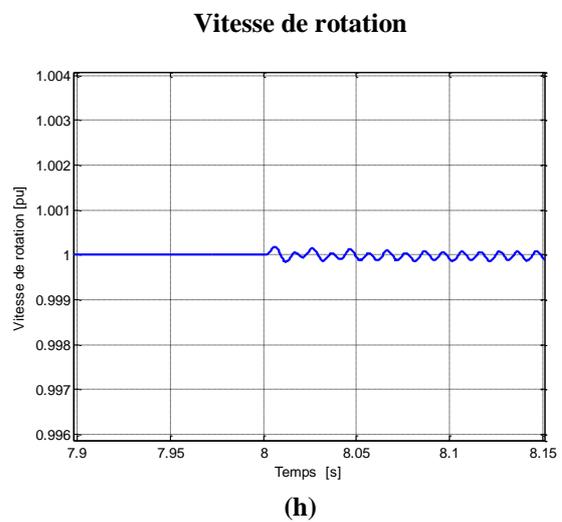
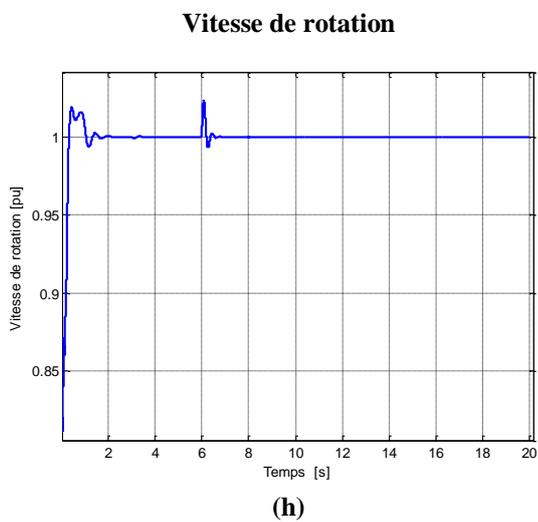
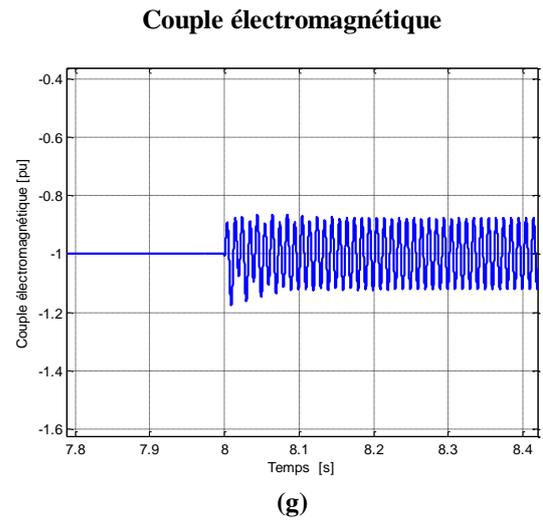
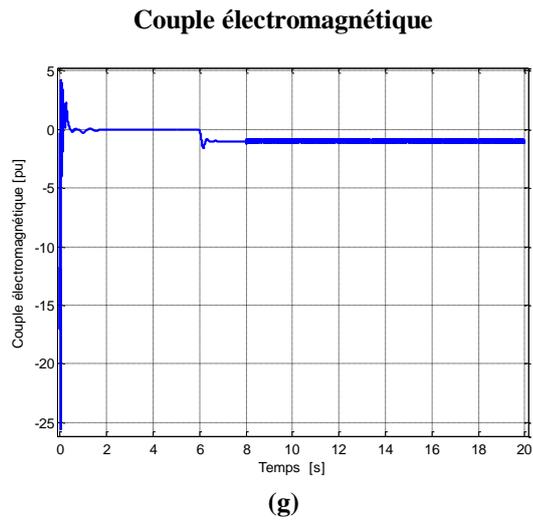


(f)

Puissance réactive



(f)



**Fig. III.3 : Régime transitoire et permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de déséquilibre de tensions**

**Fig. III.4 : Régime permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de déséquilibre de tensions**

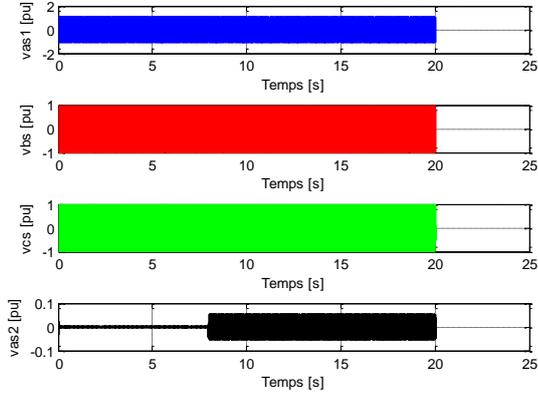
### III.4. Résultats de simulation d'un alternateur avec court-circuit de spires statoriques

Le défaut de court-circuit entre spires statoriques est introduit à l'instant  $t=8s$  d'un pourcentage de 5% de spires court-circuitées de la phase « a » du stator. Dans ce cas, cette phase se divise en deux ; une partie saine « as1 » et une partie court-circuitée « as2 ».

Les résultats de simulation de l'alternateur avec ce type de défaut, donnés par les figures (III.5 et III.6) montrent la présence d'une phase de tension et de courant statoriques additionnelles. La figure (III.6 (a)) présente l'allure des trois tensions déséquilibrées et celle de la portion court-circuitée avec une faible amplitude. Dans la figure (III.6 (b)) on retrouve les courants statoriques déséquilibrés avec une augmentation de l'amplitude de la partie court-circuitée. Le défaut de court-circuit de spires statoriques se prononce aussi par des oscillations dans le reste de grandeurs considérées ; le courant

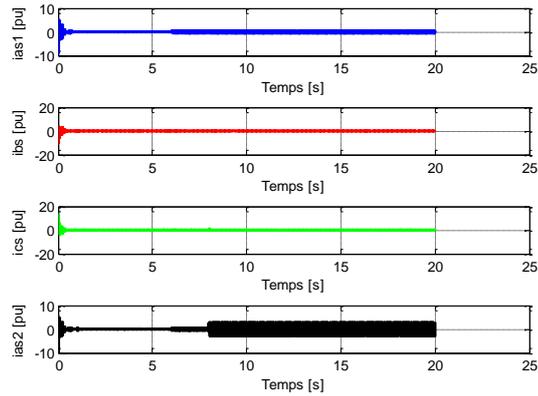
rotorique (Fig. III.6 (c)), les courants d'amortisseurs (Fig. III.6 (d)), les deux puissances (Fig. III.6 (e) et (f)), le couple et la vitesse (Fig. III.6 (g) et (h)).

Tensions statoriques



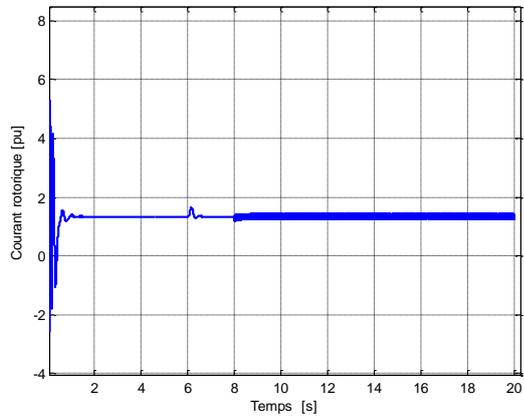
(a)

Courants statoriques



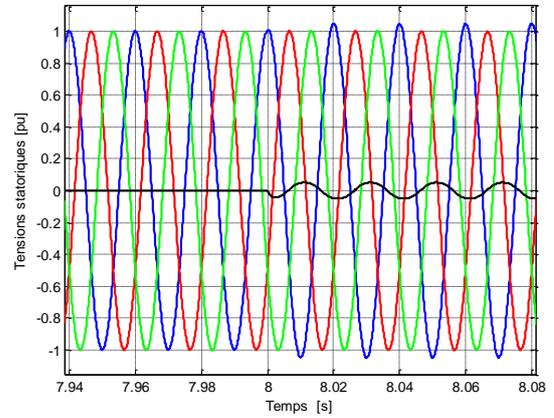
(b)

Courant rotorique



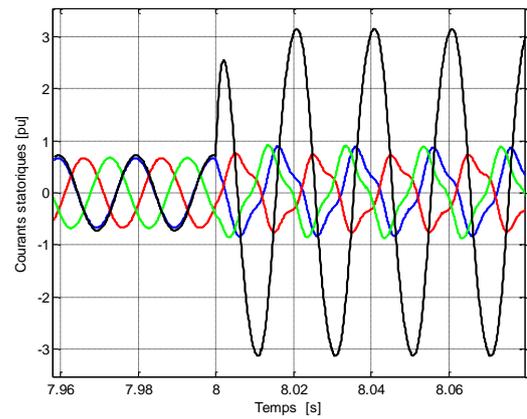
(c)

Tensions statoriques



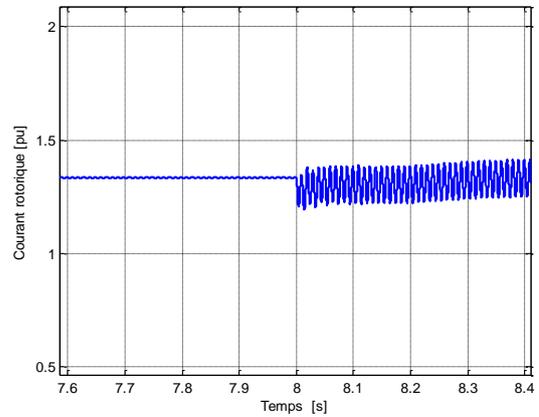
(a)

Courants statoriques



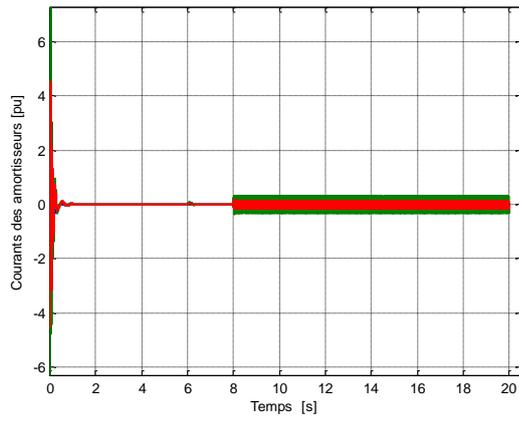
(b)

Courant rotorique



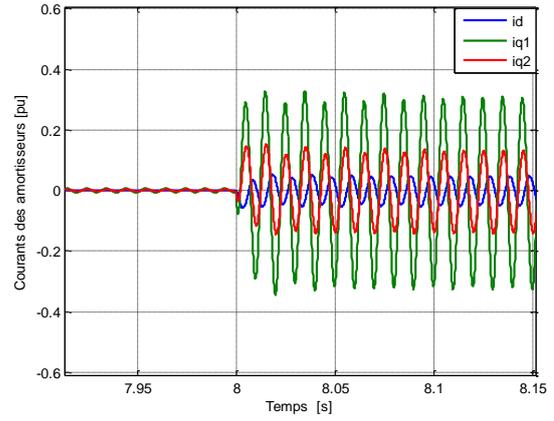
(c)

Courants des amortisseurs



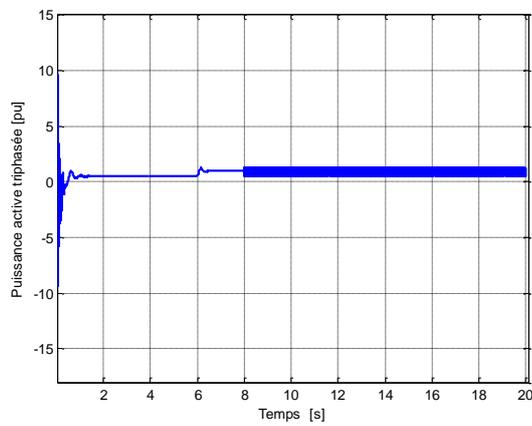
(d)

Courants des amortisseurs



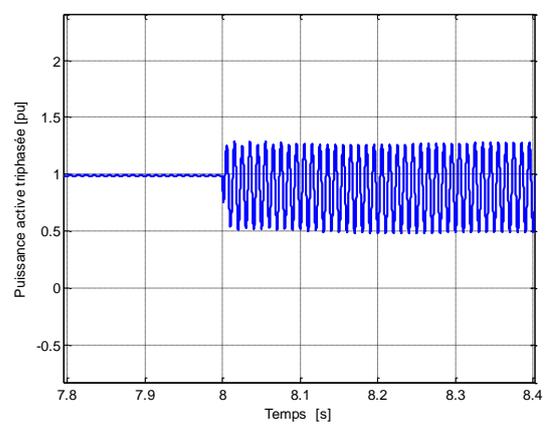
(d)

Puissance active



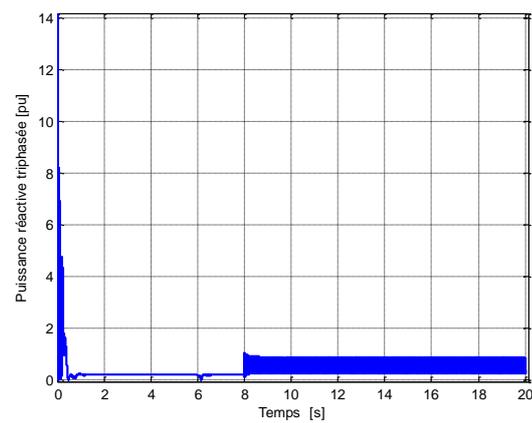
(e)

Puissance active



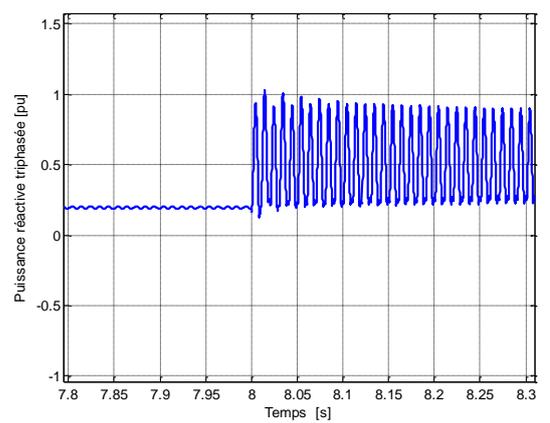
(e)

Puissance réactive

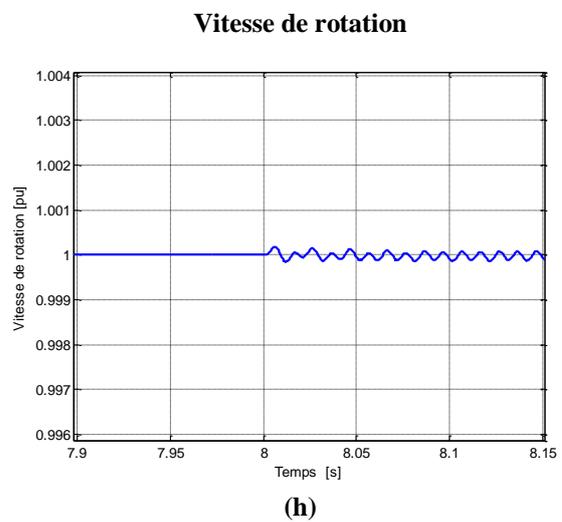
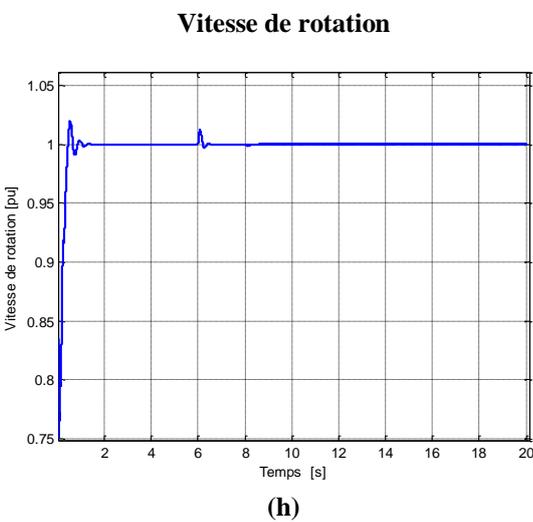
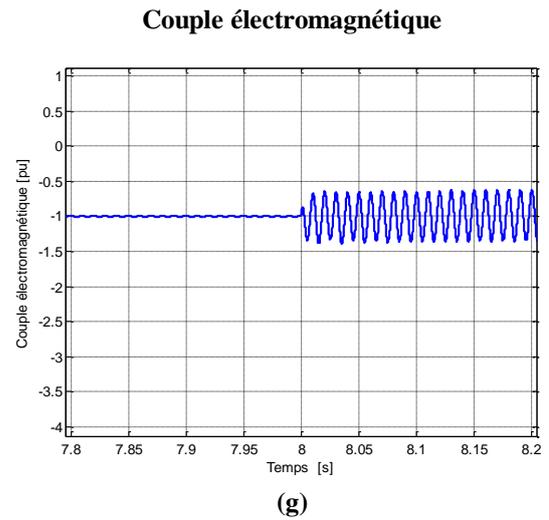
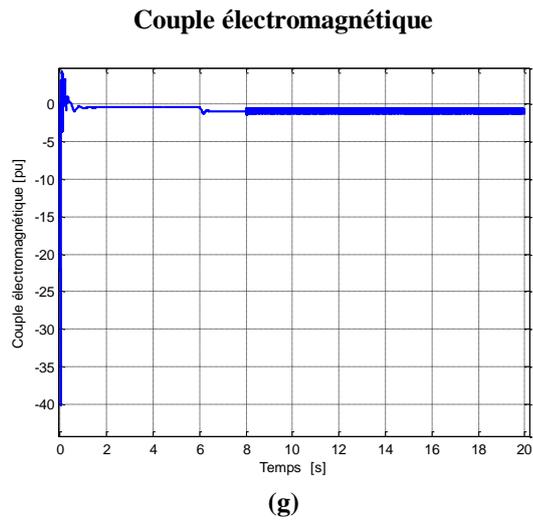


(f)

Puissance réactive



(f)



**Fig. III.5 : Régime transitoire et permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit de spires statoriques**

**Fig. III.6 : Régime permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit de spires statoriques**

### III.5. Résultats de simulation d'un altérateur avec court-circuit de phases

Parmi les défauts qui affectent le stator des alternateurs, on trouve les courts-circuits de phases statoriques. Ces types de défauts externes ont comme origine les courts-circuits internes entre spires d'une même bobine, entre bobines d'une même phase qui se propagent vers un court-circuit d'une phase ou entre phases. Ces défauts sont dangereux pour le fonctionnement de l'alternateur et l'intervention du système de protection est indispensable.

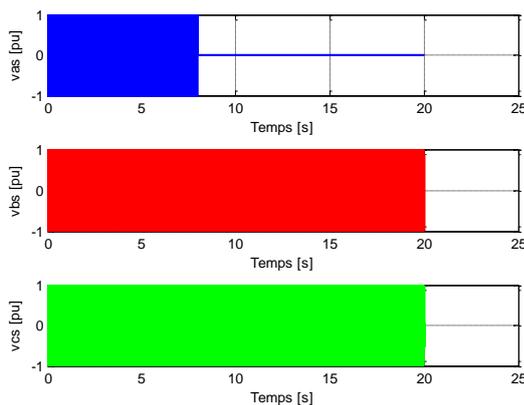
Trois cas de courts-circuits de phases sont imposés dans la partie qui suit à partir de l'instant  $t=8s$  :

- court-circuit monophasé ( $v_a=0$ ) ;
- court-circuit biphasé ( $v_a=0$  et  $v_b=0$ ) ;
- court-circuit triphasé ( $v_a=0$ ,  $v_b=0$  et  $v_c=0$ ) .

**III.5.1. Résultats de simulation d'un alterateur avec court-circuit monophasé**

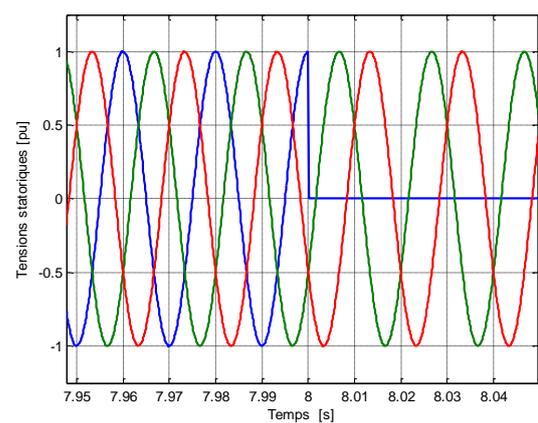
La simulation de l'alternateur avec un court-circuit monophasé statorique, c'est-à-dire lorsqu'une phase complète du stator est en court-circuit, montre des perturbations importantes visibles dans les figures (III.7 et III.8). Les courants statoriques (Fig. III.8 (b)), sont fortement déséquilibrés, avec une amplitude plus élevée du courant de la phase en défaut. Les figures qui donnent le courant rotorique, les courants d'amortisseurs ainsi que les puissances active et réactive (Fig. III.8 (c), (d), (e) et (f)) montrent des ondulations importantes au niveau de ces grandeurs au moment du défaut, ce qui indique un fonctionnement perturbé de l'alternateur. Le couple électromagnétique et la vitesse de rotation (Fig. III.8 (g) et (h)) présentent de fortes oscillations et une instabilité marquée. En comparaison avec le cas d'un court-circuit entre spires, ce défaut est plus sévère car il touche toute une phase, provoquant d'avantage de déséquilibre, de pertes, de chaleur et de risques de détérioration rapide.

**Tensions statoriques**



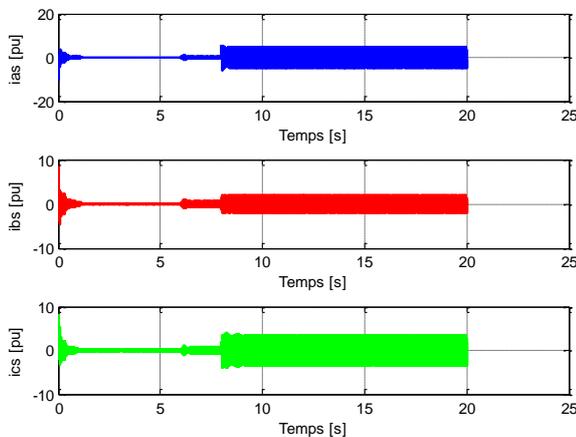
(a)

**Tensions statoriques**



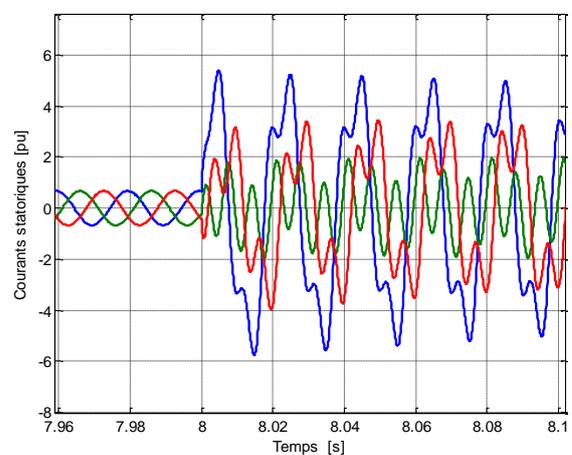
(a)

**Courants statoriques**



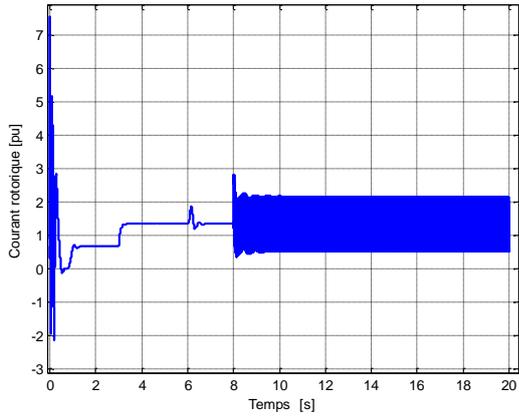
(b)

**Courants statoriques**



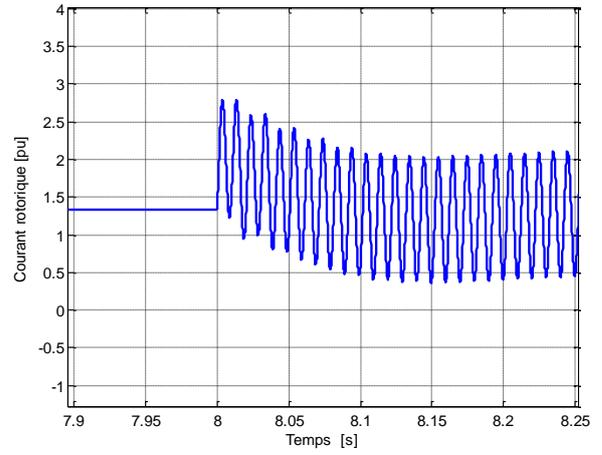
(b)

Courant rotorique



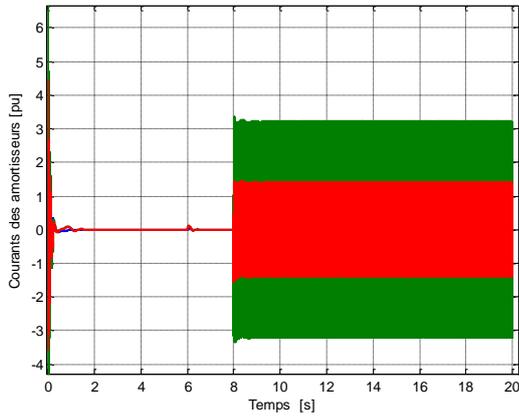
(c)

Courant rotorique



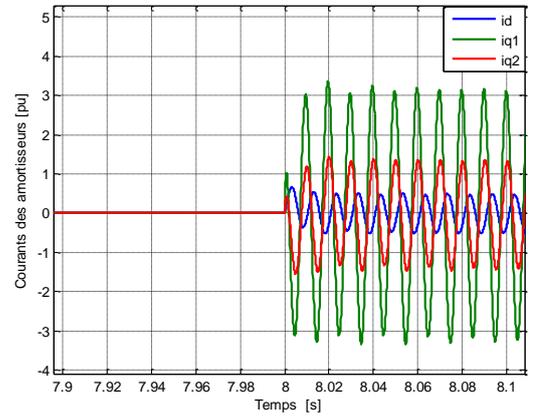
(c)

Courants des amortisseurs



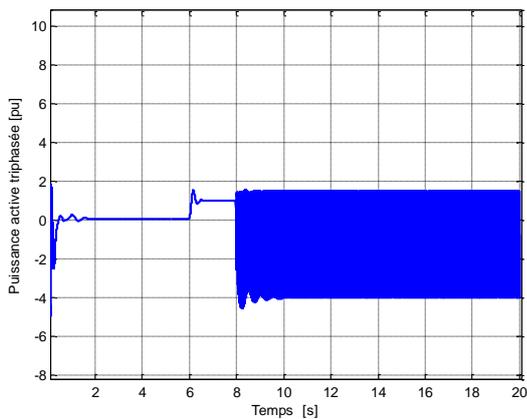
(d)

Courants des amortisseurs



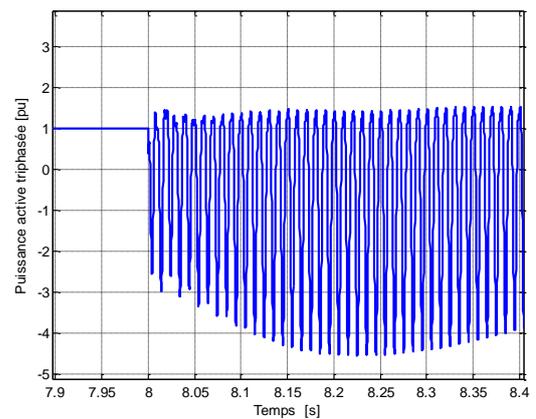
(d)

Puissance active

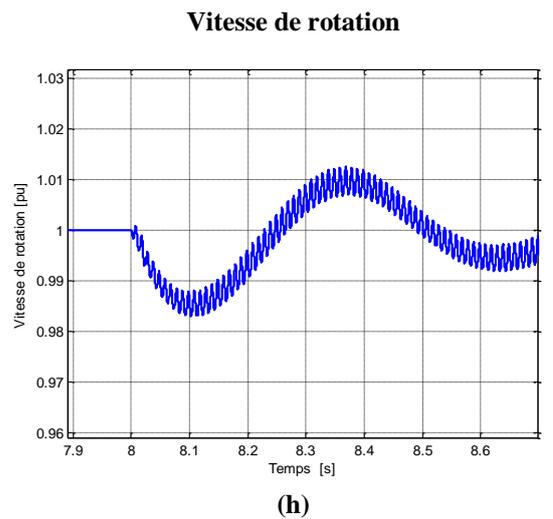
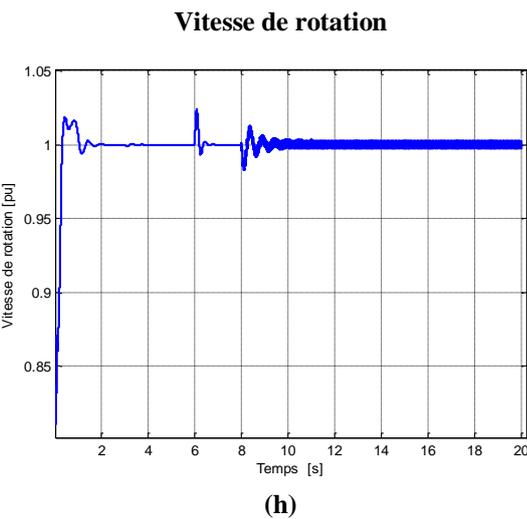
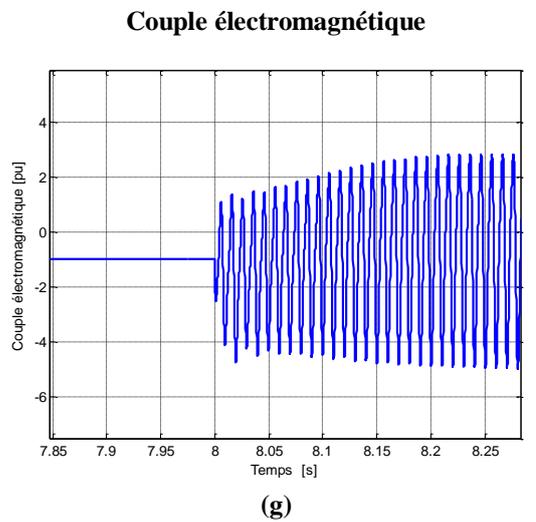
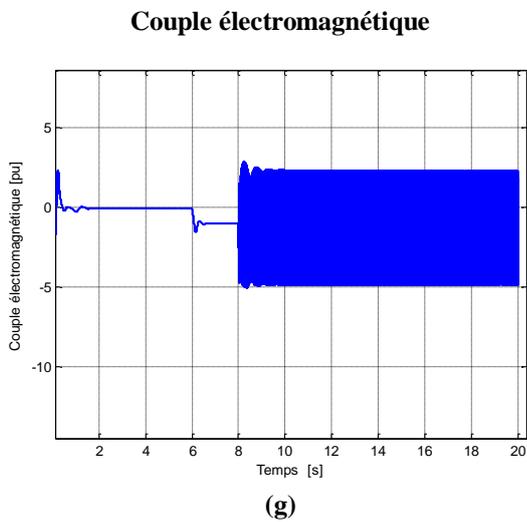
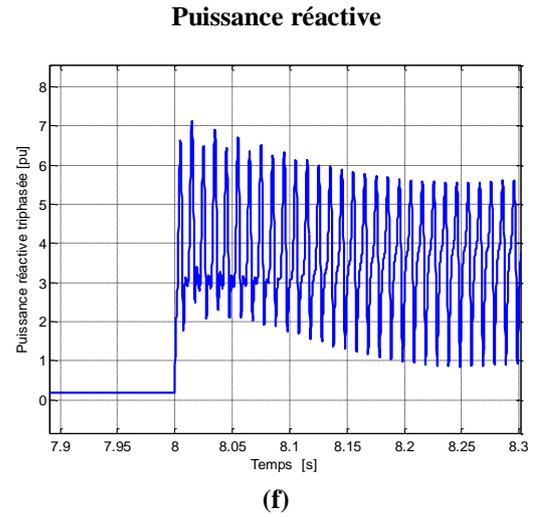
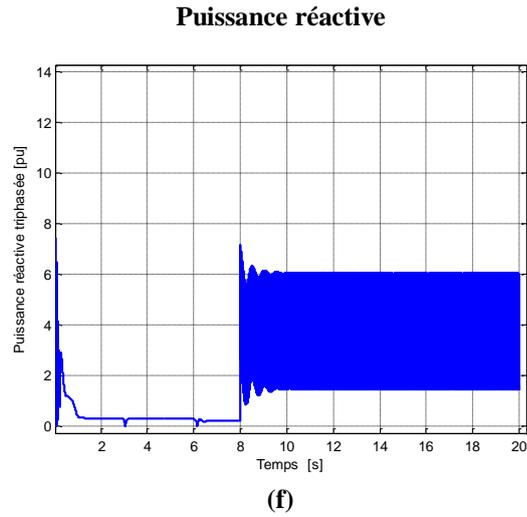


(e)

Puissance active



(e)

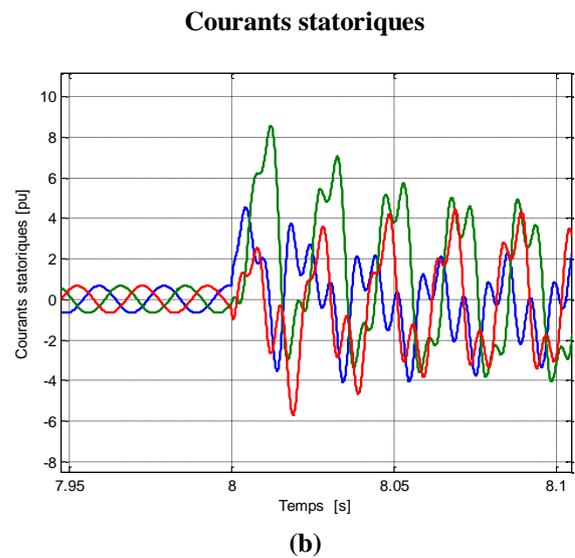
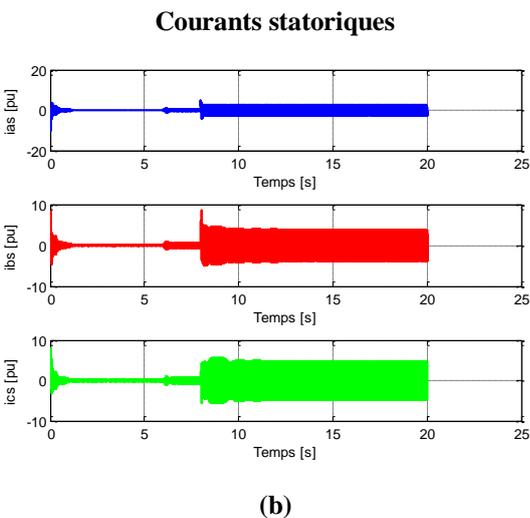
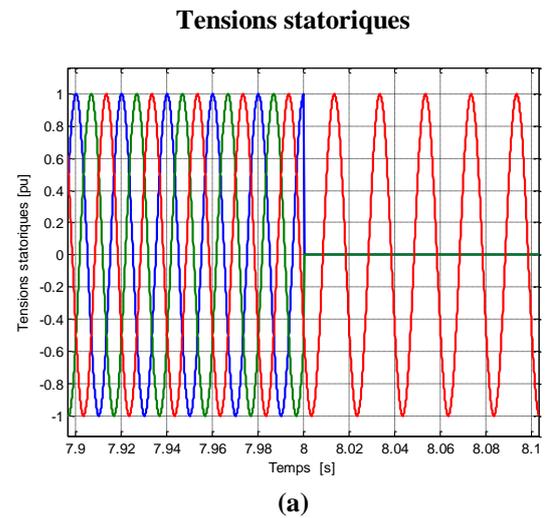
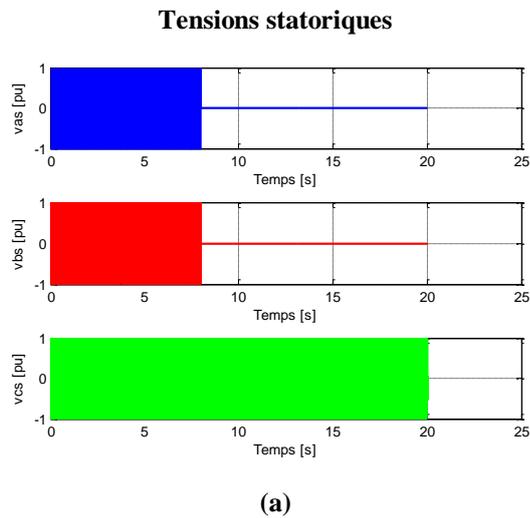


**Fig. III.7 : Régime transitoire et permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit monophasé**

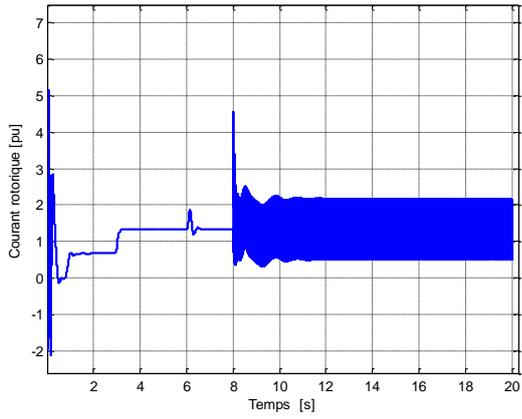
**Fig. III.8 : Régime permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit monophasé**

**III.5.2. Résultats de simulation d'un alternateur avec court-circuit biphasé**

Les résultats de simulation de l'alternateur avec un court-circuit biphasé, c'est-à-dire lorsque deux phases sont totalement court-circuitées (Fig. III.9 et III.10), montre un déséquilibres sévères dans les courants de phases statoriques (Fig. III.10 (b)). Avec des amplitudes élevées. Des perturbations encore plus graves du courant d'excitation et des courants amortisseurs (Fig. III.10 (c) et (d)). La puissance active et la puissance réactive deviennent très irrégulières (Fig. III.10 (e) et (f)), ce qui indique une perte significative de performance énergétique. Le couple électromagnétique et la vitesse de rotation (Fig. III.10 (g) et (h)) présentent des oscillations fortes et prolongées, traduisant une instabilité importante du système. En comparaison avec le court-circuit monophasé, le court-circuit biphasé provoque un déséquilibre plus marqué, une instabilité plus importante, des pertes plus élevées et un risque accru de surchauffe et de dommages.

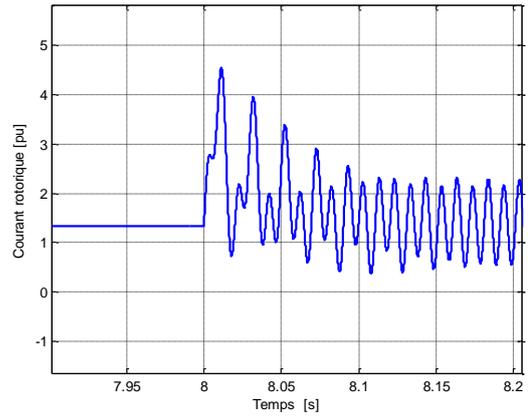


Courant rotorique



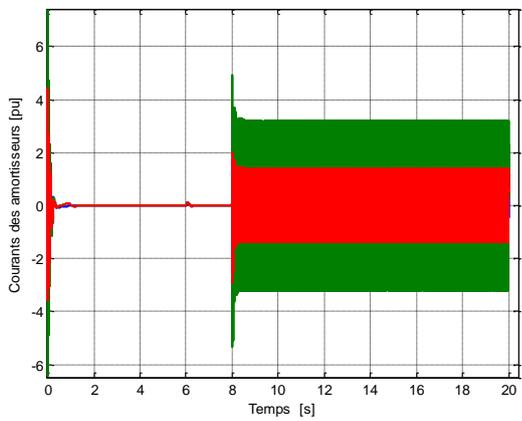
(c)

Courant rotorique



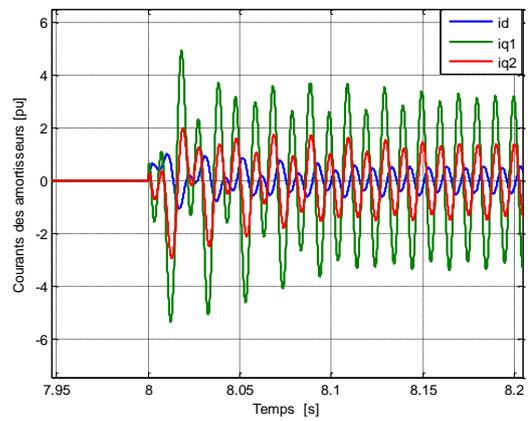
(c)

Courants des amortisseurs



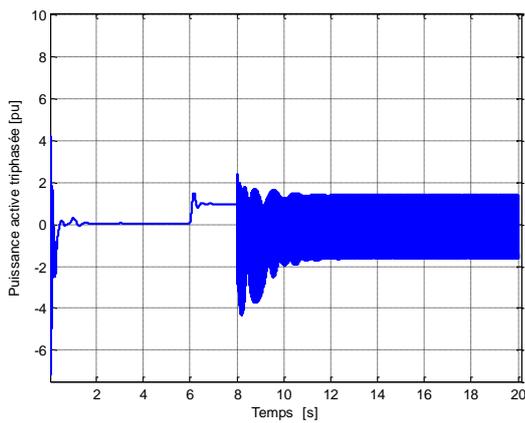
(d)

Courants des amortisseurs



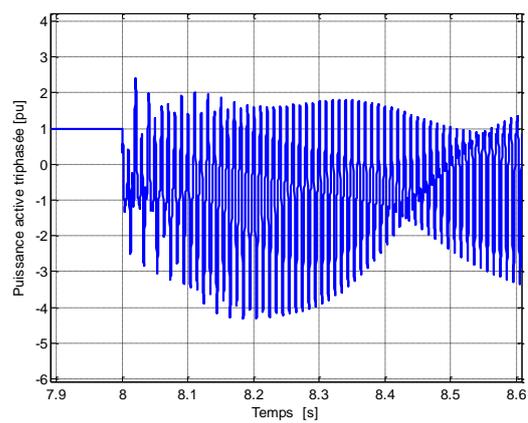
(d)

Puissance active

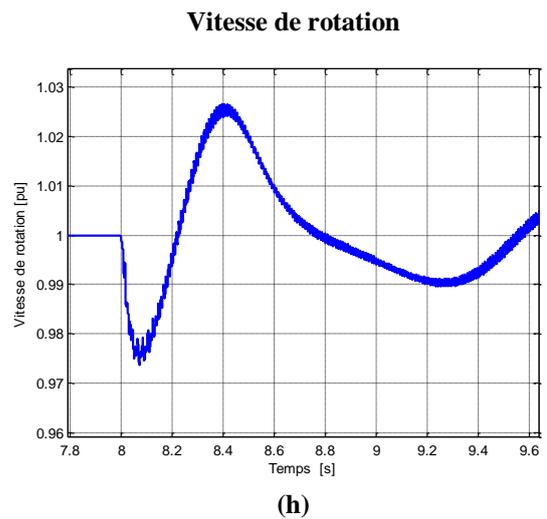
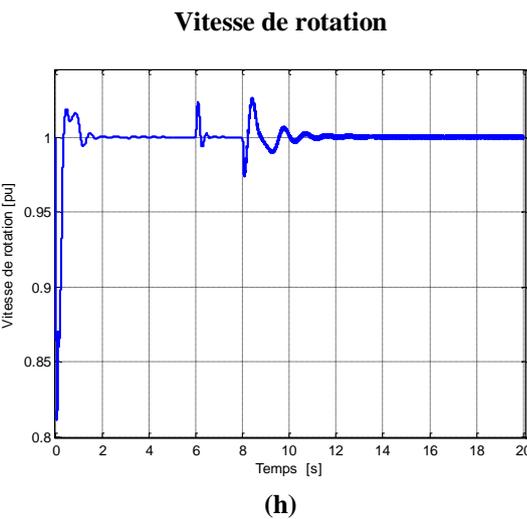
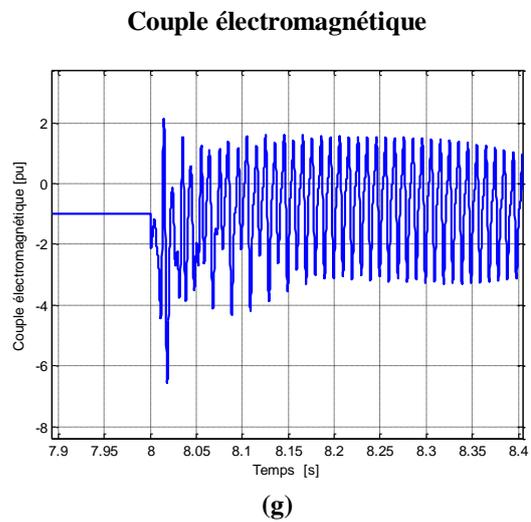
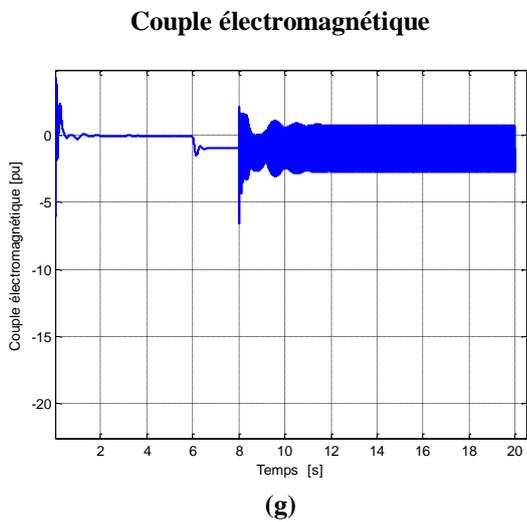
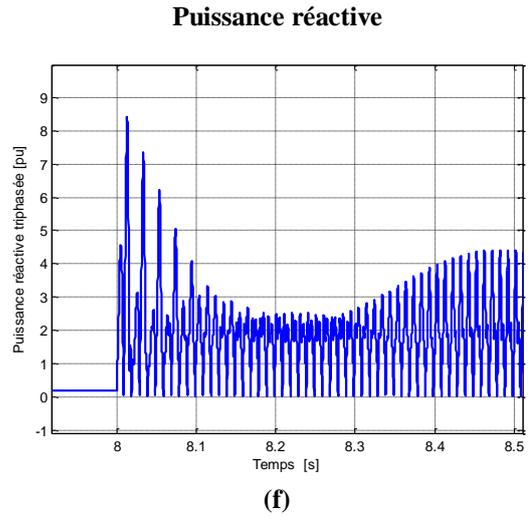
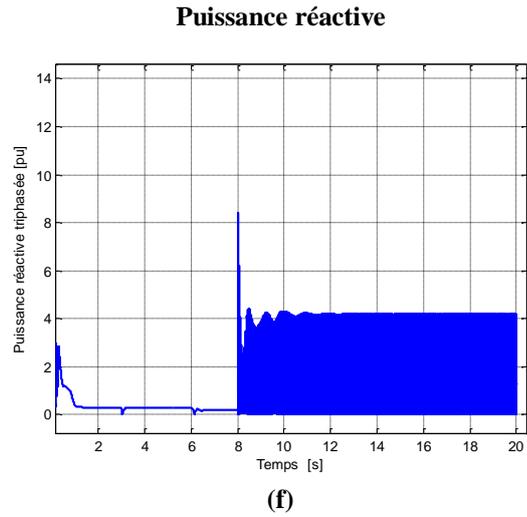


(e)

Puissance active



(e)



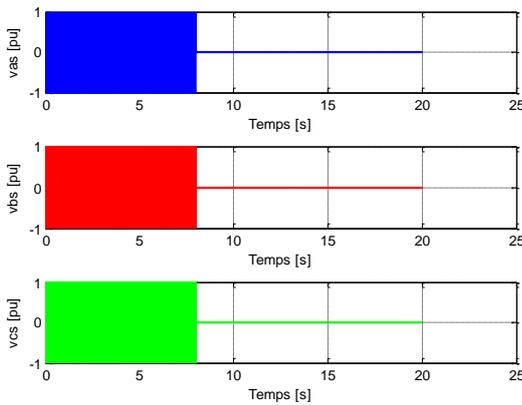
**Fig. III.9 : Régime transitoire et permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit biphasé**

**Fig. III.10 : Régime permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit biphasé**

**III.5.3. Résultats de simulation d'un alterateur avec court-circuit triphasé**

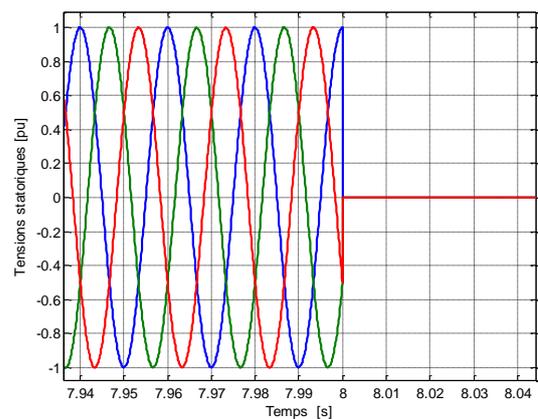
Dans les résultats de simulation de l'alternateur avec un court-circuit triphasé, où les trois phases sont totalement court-circuitées, on trouve un comportement très particulier et critique. D'après les figures (III.11 et III.12), on constate que contrairement aux cas de court-circuit monophasé et biphasé où il existe un fort déséquilibre, les courants statoriques (Fig. III.12 (b)) après le pic du défaut restent équilibrés, ce qui est spécifique à un court-circuit triphasé pur. Le courant rotorique (Fig. III.12 (c)) reste présent mais affecté par la chute du couple et des puissances. Les courants des amortisseurs (Fig. III.12 (d)) sont nuls, car le défaut est parfaitement symétrique et ne génère aucun courant de compensation. De plus, les puissances active et réactive (Fig. III.12 (e) et (f)) sont quasiment nulles, ce qui signifie que l'alternateur ne produit plus d'énergie. Le couple électromagnétique s'annule (Fig. III.12 (g)), tandis que la vitesse de rotation (Fig. III.12 (h)) devient instable, indiquant une perte de synchronisme. Ce type de défaut, bien que symétrique, est le plus dangereux car il entraîne la perte totale du fonctionnement de l'alternateur.

**Tensions statoriques**



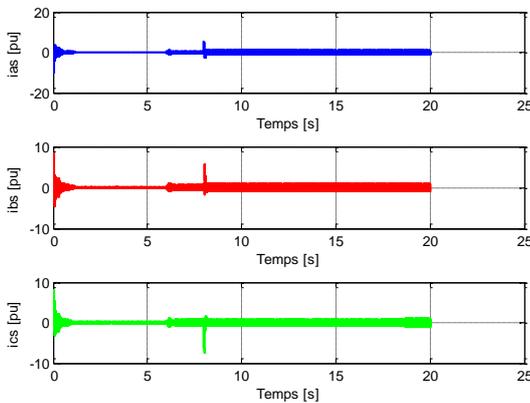
(a)

**Tensions statoriques**



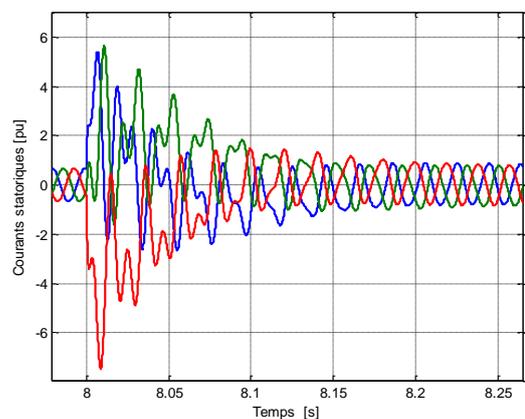
(a)

**Courants statoriques**



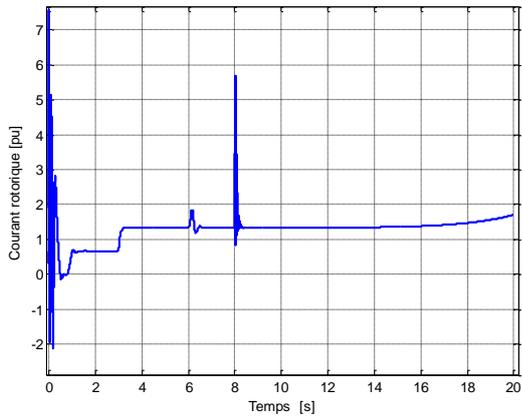
(b)

**Courants statoriques**



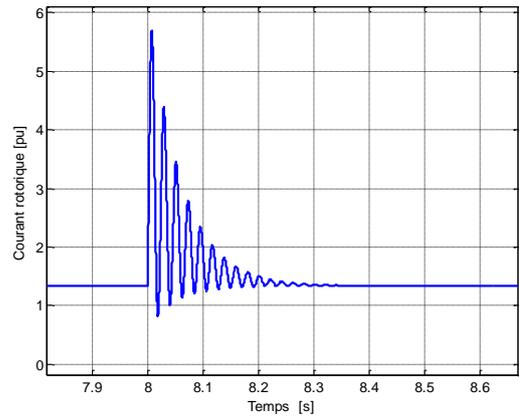
(b)

Courant rotorique



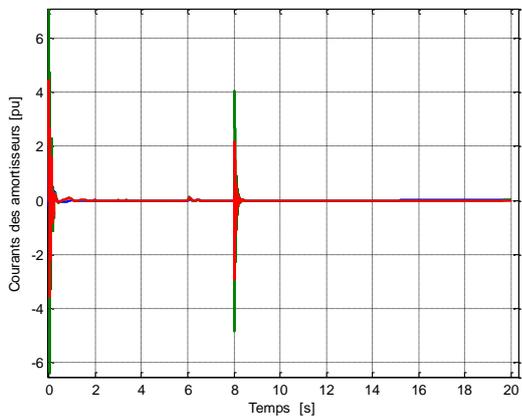
(c)

Courant rotorique



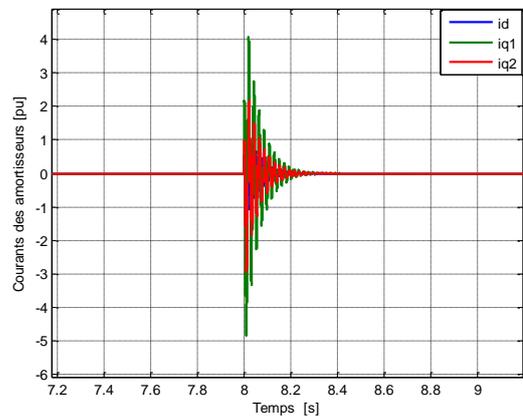
(c)

Courants des amortisseurs



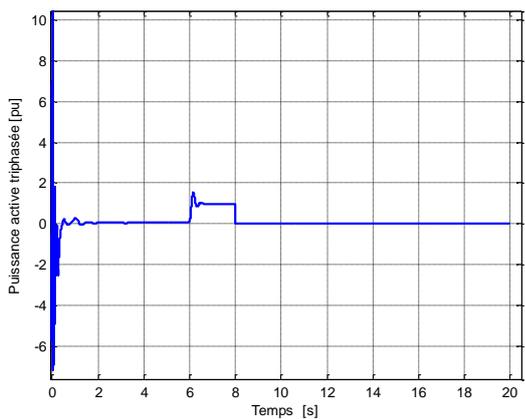
(d)

Courants des amortisseurs



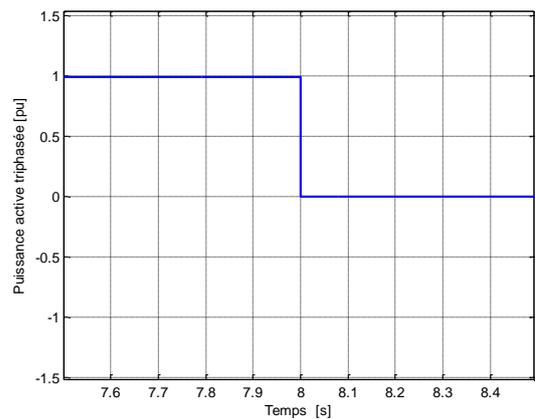
(d)

Puissance active

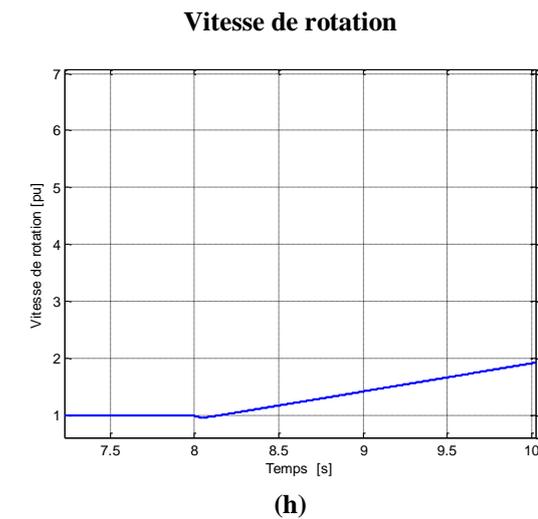
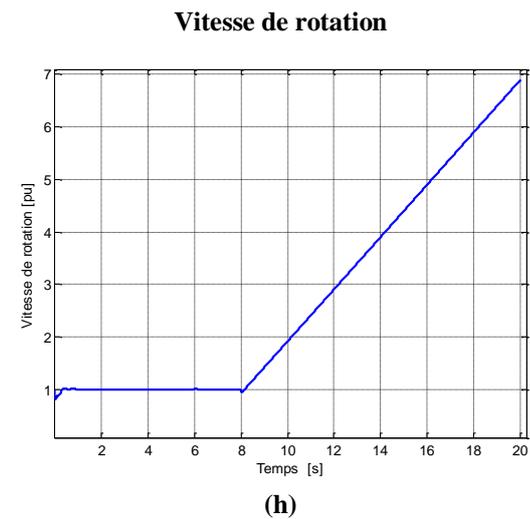
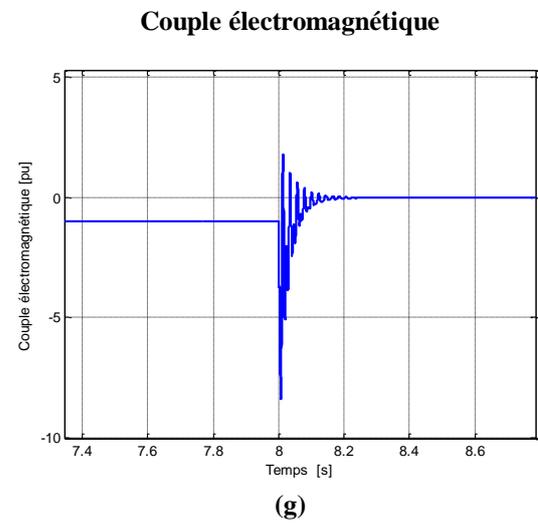
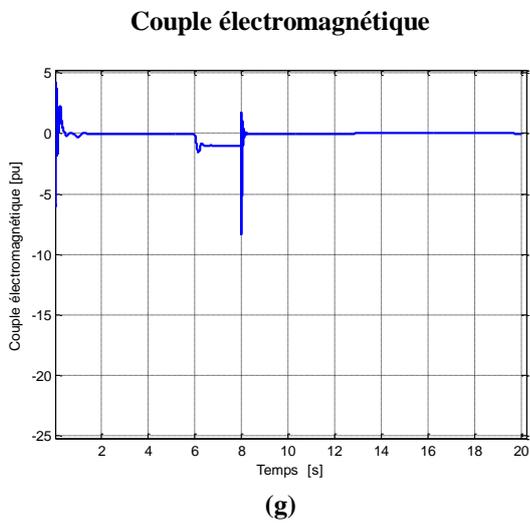
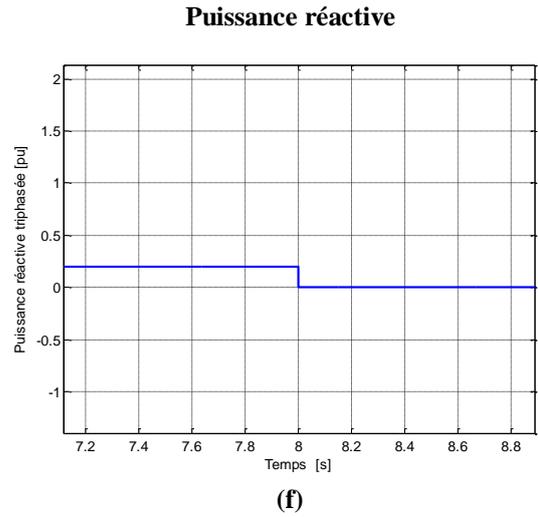
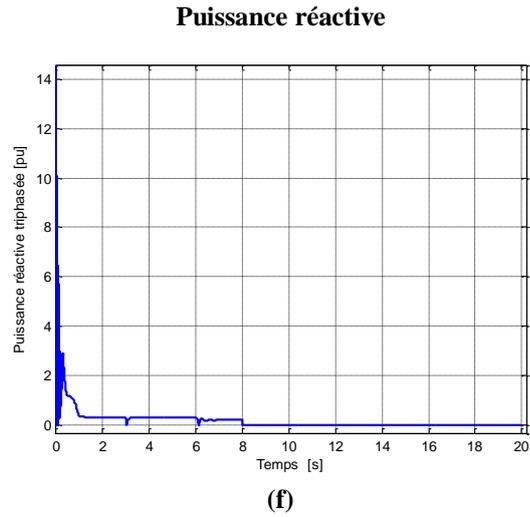


(e)

Puissance active



(e)



**Fig. III.11 : Régime transitoire et permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit triphasé**

**Fig. III.12 : Régime permanent des grandeurs électromécaniques d'un alternateur triphasé en cas de court-circuit triphasé**

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation d'un alternateur triphasé sain et avec défauts statoriques.

Les différentes simulations nous ont permis de réaliser un suivi des caractéristiques électromécaniques de l'alternateur. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'influence des différents défauts étudiés sur ces grandeurs et donc sur le comportement de l'alternateur.

Le défaut de court-circuit de spires statoriques est un défaut naissant qui se propage vers d'autres défauts plus grave, comme les courts-circuits de phases. Ce défaut échappe aux dispositifs de protection de l'alternateur. Il est donc nécessaire de détecter ce défaut dans son premier stade afin d'éviter de effets dangereux et couteux.

Le prochain chapitre traite la détection des défauts statoriques de l'alternateur. En particulier le court-circuit de spires statoriques, par emploi de deux approches de diagnostic basées sur les courants de Park.

# CHAPITRE IV

**Détection des défauts statoriques par  
les approches des vecteurs de Park**

### IV.1. Introduction

Bien que les alternateurs triphasés soient équipés de systèmes de protection sophistiqués (comme les relais différentiels, les protections de surcharge ou de terre) la détection précoce et fiable des défauts statoriques demeure un enjeu majeur pour la sûreté de fonctionnement et la disponibilité des installations électriques. Ces systèmes de protection conçus pour agir en ultime recours lors de défaillances avérées, présentent des limites intrinsèques face aux défauts localisés au sein du bobinage statorique. Ces défauts naissants, souvent imperceptibles aux dispositifs conventionnels, peuvent évoluer vers des dégradations prématurées, des arrêts intempestifs coûteux voire des défaillances catastrophiques. Ainsi, compléter les systèmes de protection par des méthodes avancées de diagnostic et de détection des défauts statoriques constitue une vigilance indispensable. Cette démarche permet d'anticiper les pannes, d'optimiser la maintenance et de garantir la continuité de service.

Dans ce but, la détection d'un défaut statorique naissant et envisagée dans cette étude. La démarche consiste à détecter le défaut de déséquilibre des tensions statoriques ainsi que le court-circuit de spires statoriques dans son premier stade. Sachant que l'évolution de ce dernier peut provoquer comme cas extrême ; un court-circuit monophasé, biphasé ou même triphasé. Pour ce faire, deux approches électriques de diagnostic, basées sur les vecteurs de Park, sont utilisées pour la détection des défauts statoriques présentés.

A ce titre, ce chapitre est consacré à la présentation des deux méthodes de diagnostic basé sur les vecteurs de Park. A savoir, le tracé des vecteurs de Park et l'analyse de la signature du module des vecteurs des Park. Ensuite, les résultats des simulations de l'alternateur sain et avec défauts statoriques sont donnés. Ces résultats reflètent l'exploitation des deux courants de Park dans le domaine temporel et la leur implémentation pour le diagnostic, dans le domaine fréquentiel par emploi de la transformé de Fourier rapide (FFT).

### IV.2. Approches des vecteurs de Park

L'approche des vecteurs de Park a été utilisée à l'origine comme méthode de diagnostic pour la détection des défauts des moteurs électriques. Cette méthode de diagnostic en ligne permet la détection précoce des défauts de court-circuit de spires, de court-circuit monophasé ou biphasé et de déséquilibre de tensions.

Une représentation en deux dimensions peut être utilisée pour décrire le phénomène des alternateurs triphasés. Elle repose sur le calcul des courants dits de Park. Cette méthode consiste à projeter les axes (a, b, c) triphasée sur deux axes : d axe direct et q axe en quadrature. On obtient par la

transformation de Park, les vecteurs de Park des courants. En fonction des courants de phase  $i_a, i_b$  et  $i_c$ , les courants de Park  $i_d$  et  $i_q$  peuvent être calculés grâce aux deux relations suivantes :

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a - \frac{1}{\sqrt{6}}i_b - \frac{1}{\sqrt{6}}i_c \quad (\text{IV.1})$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{2}}i_b - \frac{1}{\sqrt{2}}i_c \quad (\text{IV.2})$$

Sur la base de ces deux composantes de Park obtenues, deux techniques sont implantées en vue du diagnostic des défauts [14][15].

#### IV.2.1. Tracé des vecteurs de Park

Cette technique consiste à visualiser l'évolution de la composante en quadrature des courants de Park en fonction, de la composante directe  $i_q = f(i_d)$ . Pour un alternateur sans défaut, le tracé nous donne une forme circulaire centrée à l'origine. Ce cercle représente la forme spécifique au cas de l'alternateur sain.

La stratégie de cette méthode consiste à comparer deux formes pour les deux cas avec et sans défauts. Le fait que, pour l'alternateur défaillant, le cercle s'écarte de l'origine ou change de forme nous conduit à déduire l'existence d'un défaut, c.à.d. tout écart de la forme circulaire est interprété par l'existence d'une anomalie [14].

#### IV.2.2. Analyse spectrale du module des vecteurs de Park

Cette technique consiste à visualiser le module des vecteurs de Park ; donné par les équations (IV.3), dans le domaine fréquentiel (par Transformation de Fourier Rapide FFT).

$$mvp = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (\text{IV.3})$$

Pour le cas d'un alternateur sain, le contenu spectral du module des vecteurs de Park est uniquement la composante continue, correspondant à sa valeur moyenne. Pour un alternateur en défaut, le spectre du module des vecteurs de Park, en plus de la composante continue, contient des composantes spectrales qui apparaissent aux fréquences de perturbations. Dans le cas de court-circuit de spires et de déséquilibre de tensions, par exemple, on trouve un harmonique à la fréquence  $2f=100$  Hz [15].

### IV.3. Détection des défauts statoriques d'un alternateur par les approches des vecteurs de Park

Deux approches exploitant les vecteurs de Park sont utilisées, dans cette étude, pour la détection des défauts statoriques dans un alternateur triphasé. La première approche consiste à tracer le courant de Park en quadrature en fonction du courant direct. Le cas de l'alternateur sain se traduit par une

forme circulaire centré à l'origine (forme de Lissajou). En cas de défaut, le cercle se déforme ou son contour devient plus épais.

La deuxième approche est basée sur l'analyse de la signature du module des vecteurs de Park par FFT. Cependant, il faut noter que le spectre du module de Park d'un alternateur sain ne contient que la composante continue. Alors que les défauts statoriques se traduisent par la présence d'un harmonique à la fréquence  $2f = 100\text{Hz}$  dans ce spectre, ainsi que ses multiples. Cet harmonique est la composante caractéristique des défauts statoriques.

La démarche de détection et de diagnostic consiste, en premier lieu, à tracer les deux courants de Park et leur module. Ensuite, vient leur exploitation pour tracer la forme de Lissajou et le spectre du module par FFT. Les résultats sont donnés pour les quatre cas de fonctionnement suivants :

- ✓ alternateur triphasé sain ;
- ✓ alternateur triphasé avec déséquilibre des tensions statoriques ;
- ✓ alternateur triphasé avec court-circuit de spires statoriques ;
- ✓ alternateur triphasé avec court-circuit monophasé.

Il faut noter que, l'emploi des courants de Park permet de prendre tous les courants statoriques de l'alternateur en considération, et d'avoir une information sur la manifestation des défauts en exploitant les courants des trois phases.

Cependant, comme le but du diagnostic c'est la détection, l'identification et la localisation d'un défaut dans son premier stade, la démarche du diagnostic dans cette étude touche plus particulièrement le court-circuit des spires statoriques. Du moment que ce type de défaut naissant peut mener un défaut plus grave, comme le court-circuit monophasé, biphasé ou triphasé.

### IV.3.1. Cas de l'alternateur triphasé sain

Les figures (IV.1) et (VI.2) représentent respectivement la variation des courants de Park de l'alternateur dans le domaine temporel. D'après ces figures, on peut remarquer un équilibre entre les amplitudes des deux courants, ce qui reflète l'état sain de l'alternateur.

La simulation de l'alternateur, a permis de tracer aussi la courbe du module des courants de Park (Fig. IV.2). On peut remarquer l'élévation de son amplitude au premier instant de l'enclenchement avant d'atteindre le régime permanent. Ensuite, elle se stabilise jusqu'à l'instant  $t=6\text{s}$  où on passe à un couple de turbine de 1pu, lorsque l'amplitude augmente et se stabilise. C'est le cas d'un alternateur sain.

La figure (IV.3) donne le tracé des courants de Park,  $i_q$  en fonction de  $i_d$  pour un alternateur sain. Il s'agit d'une courbe où on trouve une forme circulaire centré à l'origine, révélatrice du cas sain.

La visualisation du spectre du module de Park par FFT est donnée par la figure (IV.4).  
 Suivant cette figure, on constate que le spectre de l'alternateur sain ne présente aucun harmonique de défaut.

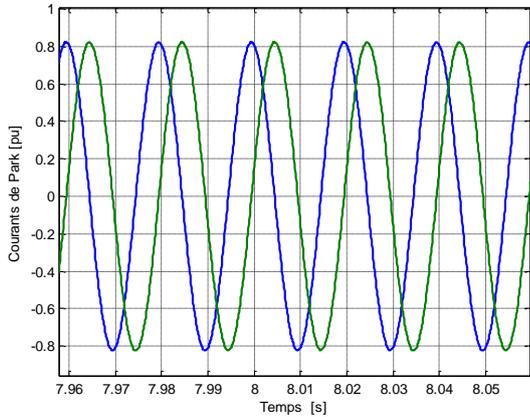


Fig. IV.1 : Courants de Park de l'alternateur sain

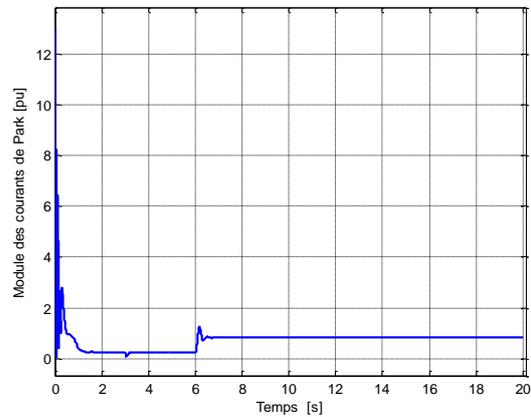


Fig. IV.2 : Module des courants de Park de l'alternateur sain

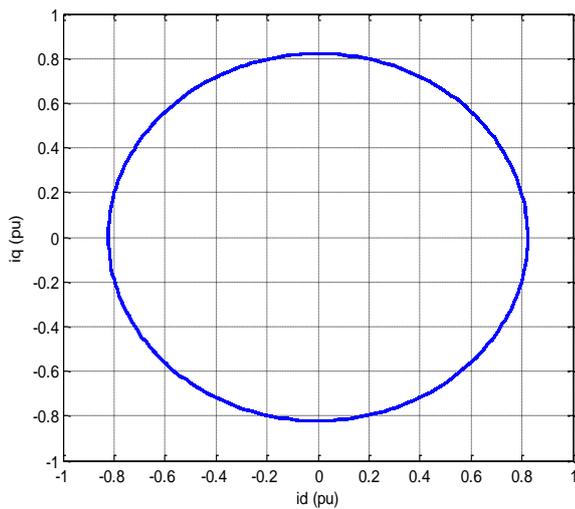


Fig. IV.3 : Tracé des courants de Park de l'alternateur sain

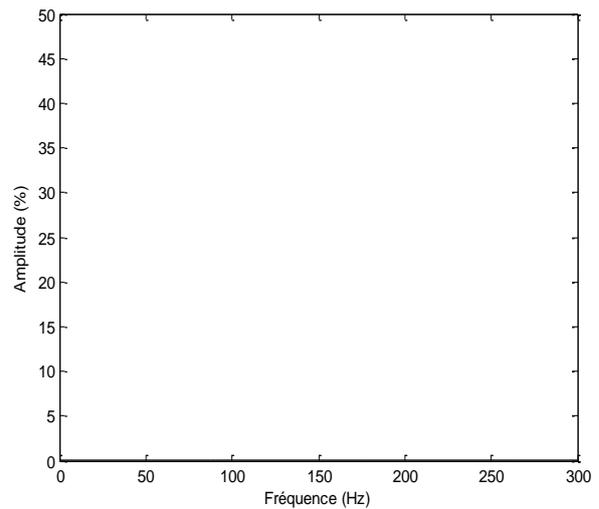


Fig. IV.4 : Spectre du module des courants de Park de l'alternateur sain

### IV.3.2. Cas de l'alternateur triphasé avec déséquilibre des tensions statoriques

Dans ce cas de défaut, les allures des figures (IV.5 et 6) montrent un déséquilibre des deux courants de Park et des oscillations dans leur module, à partir de l'instant  $t = 8s$  où le défaut de déséquilibre est introduit.

Le défaut se traduit aussi par une déformation dans l'allure du cercle qui représente le tracé des courants de Park (Fig. IV.7). Cette déformation est l'indicateur du défaut de déséquilibre des tensions.

Alors que, dans la figure (IV.8) qui illustre le spectre du module de Park, on constate que le défaut de déséquilibre des tensions se reflète par un harmonique caractéristique à la fréquence 100 Hz. Cet harmonique est l'indicateur de ce type de défaut.

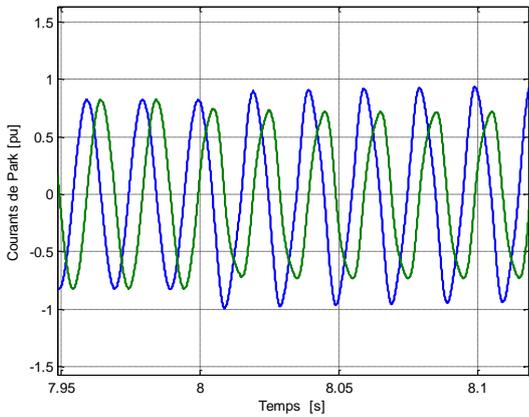


Fig. IV.5 : Courants de Park de l'alternateur avec déséquilibre des tensions statoriques

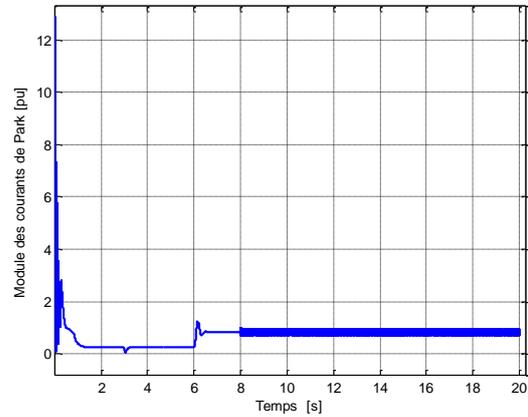


Fig. IV.6 : Module des courants de Park de l'alternateur avec déséquilibre des tensions statoriques

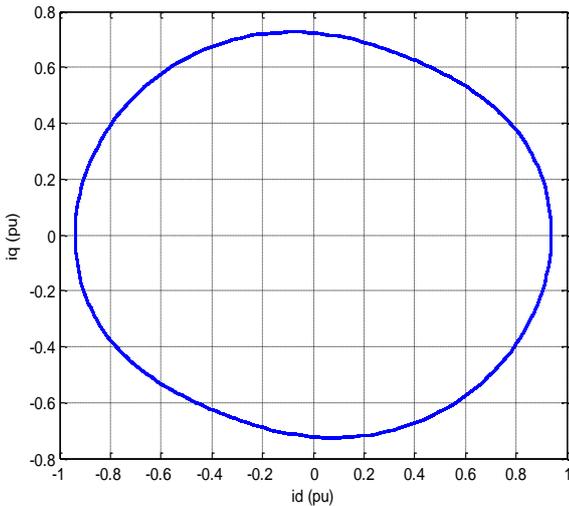


Fig. IV.7 : Tracé des courants de Park de l'alternateur avec déséquilibre des tensions statoriques

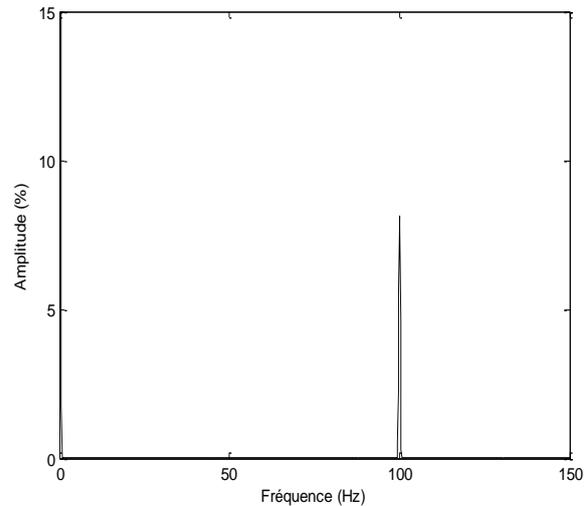


Fig. IV.8 : Spectre du module des courants de Park de l'alternateur avec déséquilibre des tensions statoriques

### IV.3.3. Cas de l'alternateur triphasé avec court-circuit de spires statoriques

Lors de la simulation de l'alternateur avec court-circuit de spires statoriques. Nous avons considéré le défaut de 5% de spires court-circuitées au niveau de la phase « a », à partir de l'instant  $t=8s$ .

Suivant les résultats obtenus (Fig. IV.9), nous pouvons remarquer un déséquilibre dans les courants de Park à partir du moment où le défaut est imposé. Le défaut se traduit aussi par des ondulations au niveau du module de Park (Fig.IV.10). Ce déséquilibre et ces ondulations se traduisent

par une déformation apparente de Lissajou (Fig.IV.11). Ainsi que la présence de l'harmonique caractéristique du défaut à la fréquence 100 Hz, dans le spectre du module de Park (Fig.IV.12), avec une amplitude importante. Le multiple de cet harmonique est aussi présent.

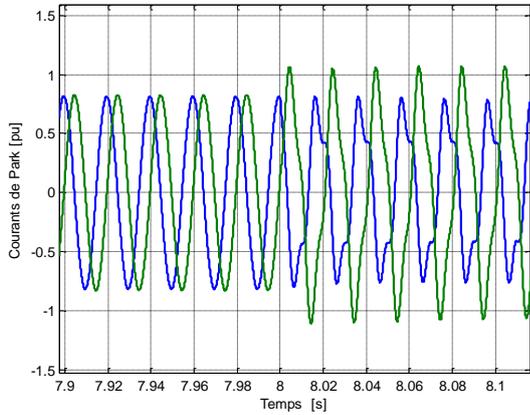


Fig. IV.9 : Courants de Park de l'alternateur avec court-circuit de spires statoriques

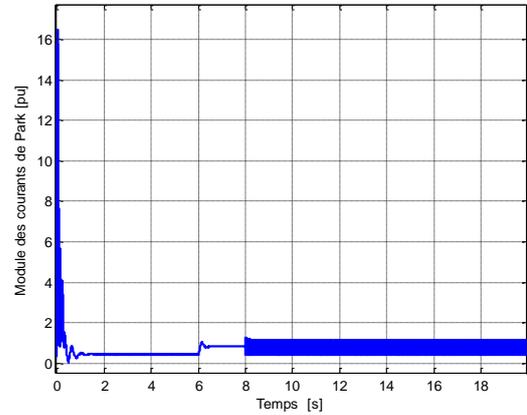


Fig. IV.10 : Module des courants de Park de l'alternateur avec court-circuit de spires statoriques

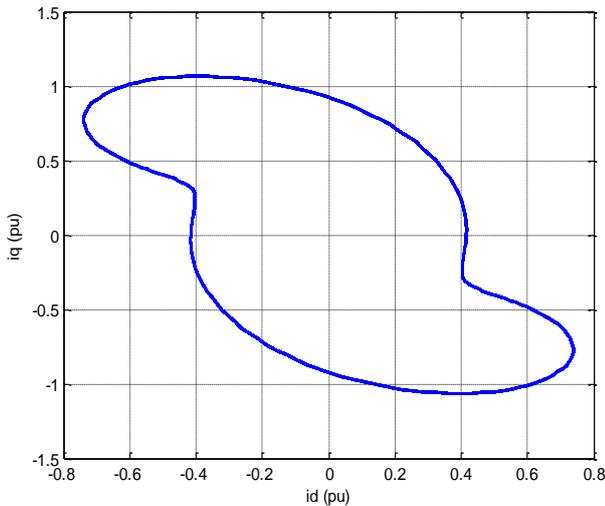


Fig. IV.11 : Tracé des courants de Park de l'alternateur avec court-circuit de spires statoriques

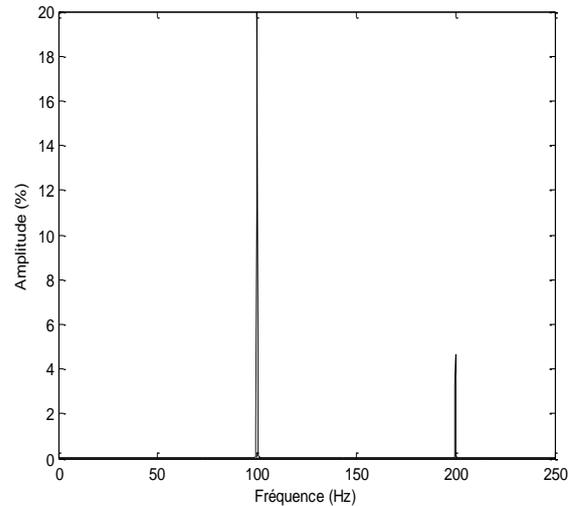


Fig. IV.12 : Spectre du module des courants de Park de l'alternateur avec court-circuit de spires statoriques

#### IV.3.4. Cas de l'alternateur triphasé avec court-circuit monophasé

Pour ce cas de simulation, le défaut de court-circuit monophasé est introduit au niveau de la de la phase « a »

Dans les figures (IV.13 et 14) qui montrent les courants de Park et leur module, le même phénomène est présent, c. à. d. le déséquilibre de ces courants et les oscillations dans le module à partir du moment où le défaut de court-circuit monophasé est introduit.

La figure (IV.15) donne le tracé des courants de Park de l'alternateur avec un défaut de court-circuit monophasé, montre une déformation dans l'allure du cercle. Cette déformation est significative de la présence du défaut.

La visualisation de l'enveloppe du module des courants de Park par FFT est donnée par la figure (IV.16). Suivant cette figure, on constate la présence de l'harmonique caractéristique du défaut à la fréquence 100 Hz, dans le spectre du module de Park. Cet harmonique est l'indicateur du défaut.

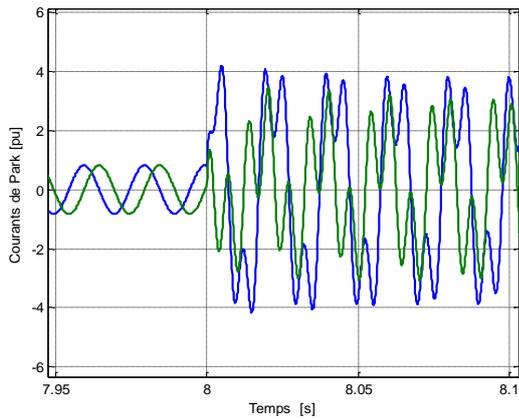


Fig. IV.13 : Courants de Park de l'alternateur avec court-circuit monophasé

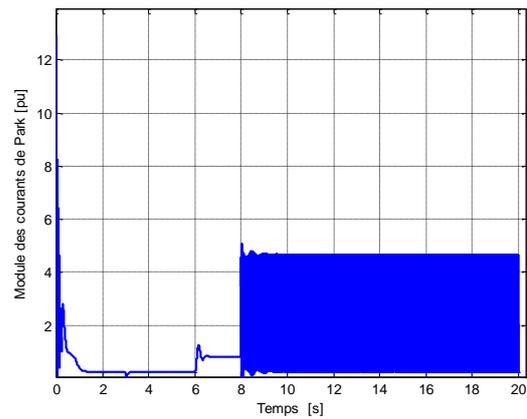


Fig. IV.14 : Module des courants de Park de l'alternateur avec court-circuit monophasé

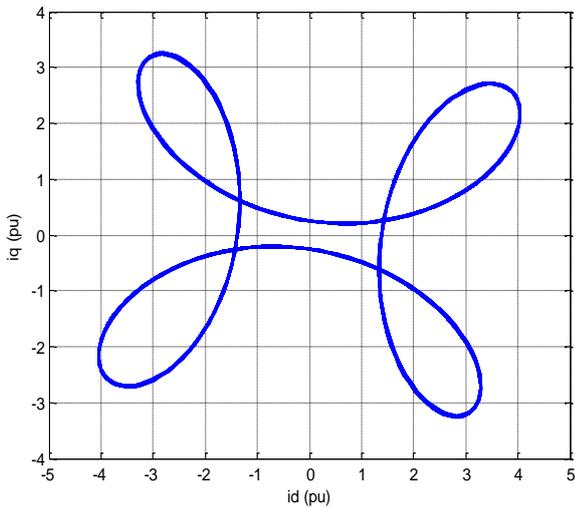


Fig. IV.15 : Tracé des courants de Park de l'alternateur avec court-circuit monophasé

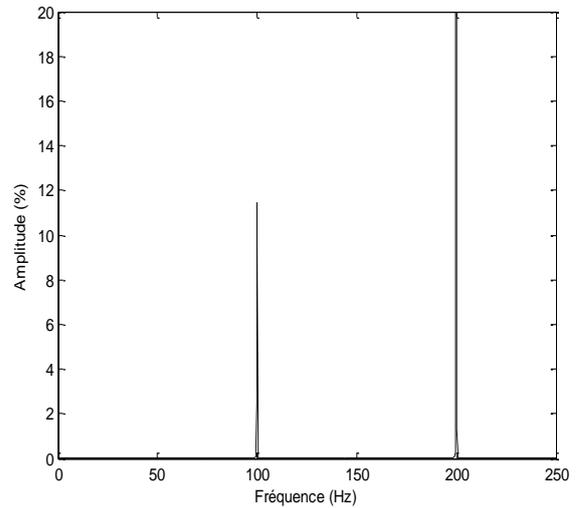


Fig. IV.16 : Spectre du module des courants de Park de l'alternateur avec court-circuit monophasé

**IV.3.5. Facteur de sévérité du défaut**

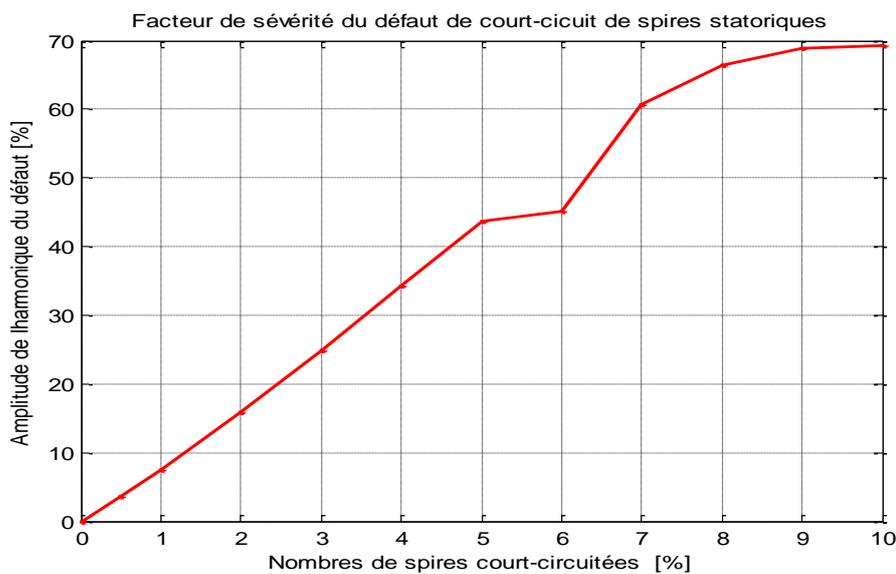
Les défauts de court-circuit entre spires d’une même bobine, se propagent vers un court-circuit entre bobines d’une même phase. Il peut provoquer aussi le court-circuit d’une phase ou entre phases, s’il n’est pas détecté à temps. Ce type de défaut n’est pas identifié par les dispositifs de protection, ils nécessitent d’autres techniques de maintenance et de surveillance qui permettent sa détection au premier stade, afin d’éviter ses conséquences graves sur le fonctionnement de l’alternateur.

Les deux méthodes de diagnostic utilisées dans cette étude. A savoir, le tracé des vecteurs de Park et l’analyse de la signature du module de Park, ont permis la détection du défauts de court-circuit de spires statoriques. La déformation de Lissajou et la présence de l’harmonique du défaut à la fréquence 100 Hz, dans le spectre du module sont les indicateurs de ce défaut.

Afin de valider la fiabilité de l’approche de l’analyse de la signature du module des vecteurs de Park, pour le diagnostic du défaut de court-circuit de spires et l’estimation de sa gravité. Un suivi de l’amplitude de l’harmonique caractéristique du défaut est effectué, à travers le tracé du facteur de sévérité. Ce facteur est défini comme étant la variation de l’amplitude de la composante caractéristique du défaut (l’harmonique de 100Hz) avec la variation du nombre de spires court-circuitées (Tableau IV.1).

N. S. CC (%)	0	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amp. (%)	0	3.67	7.54	15.83	24.78	34.20	43.74	45.03	60.72	66.34	68.82	67.22

**Tableau IV.1 : Amplitudes de l’harmonique 100 Hz en fonction du nombre de spire court-circuitées**



**Figure IV. 17 : Facteur de sévérité du défaut de court-circuit de spires statoriques de l’alternateur**

#### IV.4. Interprétation des résultats

Selon les résultats, on constate que les défauts statoriques de l'alternateur triphasé se manifestent par un déséquilibre des deux courants de Park. L'exploitation de ces courants, à travers l'utilisation des deux approches de Park pour le diagnostic des défauts statoriques. En particulier le défaut de court-circuit de spires statoriques, a permis de montrer que :

- la présence des défauts statoriques se caractérise par la déformation de Lissajou (tracé du vecteurs de Park);
- les défauts étudiés se caractérise aussi par la présence d'un harmonique significatif à la fréquence 100 Hz dans le spectre du module de Park;
- l'harmonique caractéristique est présent dans le spectre du module de Park pour un défaut de court-circuit de spires statoriques dans son premier stade (05% de spires court-circuitées).
- l'amplitude de l'harmonique caractéristique du défaut de court-circuit entre spires à la fréquence 100 Hz augmente avec l'augmentation de la sévérité du défaut.

#### IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation pour le diagnostic des défauts statoriques de l'alternateur triphasé. Un accent particulier est porté sur le défaut de court-circuit de spires statoriques. Du moment que ce type de défaut, qui échappe aux dispositifs de protection, se propage à des défaut plus graves

Les résultats de simulations obtenues montrent l'aptitude des deux approches basées sur les vecteurs de Park, proposées dans cette étude, à détecter les défauts statoriques. En effet, la déformation du tracé des vecteurs de Park et l'apparition de l'harmonique caractéristique, à la fréquence 100 Hz, dans le spectre du module de Park, rend possible l'identification de ces défauts.

Un suivi du facteur de sévérité du défaut de court-circuit de spires statoriques, a permis de prouver l'efficacité de la technique de l'analyse de la signature du module de Park utilisée, et de valider son aptitude à détecter, identifier et estimer la sévérité du défaut de court-circuit de spires dans un alternateur triphasé.

# CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire traite l'étude par simulation des défauts statoriques d'un alternateur triphasé. Le but de cette étude consiste en première lieu, à voir l'influence de ces défauts sur les caractéristiques électromécaniques de l'alternateur. Donc sur son comportement. Ensuite de pouvoir détecter ces défauts par exploitation des courants statoriques.

Dans la première partie de ce mémoire, après avoir rappelé les éléments de constitution de l'alternateur et précisé les différents défauts pouvant survenir au niveau de ce dernier. Nous avons exposé ses différents dispositifs de protection.

Le deuxième chapitre est marqué par la présentation du modèle mathématique de l'alternateur triphasé sain et avec cinq défauts statoriques. A savoir, le déséquilibre des tensions, le court-circuit des spires statoriques, le court-circuit monophasé, biphasé et triphasé. Le modèle est développé dans les axes réels et sur la base de la théorie des circuits électriques magnétiquement couplés.

Ce modèle de simulation nous a permis de suivre le comportement de l'alternateur, pour les différents cas de fonctionnement étudiés, à travers ses caractéristiques électromécaniques.

Les résultats de simulations obtenus ont montré que les défauts présentés provoquent le déséquilibre des courants statoriques et engendrent des fluctuations dans le courant rotorique, les courants d'amortisseurs, la puissance active, la puissance réactive, le couple électromagnétique et la vitesse de rotation.

Cependant, on peut dire que les caractéristiques électromécaniques de l'alternateur sont des indicateurs de défauts statoriques. Le suivi de ces grandeurs, en particulier le courant statorique, permis la détection et l'identification de ce type de défauts.

Sur la base de ces constatations, et vu que le défaut de court-circuit de spires est un défaut naissant dans les enroulements statoriques qui échappe aux dispositifs de protection de l'alternateur. C'est un défaut progressif qui se propage vers des défauts plus grave comme les courts-circuits entre phases. La dernière partie de ce travail est consacré à la détection de ce type de défaut. Par emploi de deux techniques électriques de diagnostic. Ces techniques exploitent les courants statoriques dans le repère de Park. La première utilise le tracé des vecteurs de Park. La deuxième se base sur l'analyse de la signature du module de Park par la transformé de Fourier rapide (FFT).

Les résultats trouvés ont montré l'efficacité et l'aptitude des deux approches ; à détecter les défauts statoriques ; par la déformation du contour du cercle des tracés des courants de Park. Ainsi que la présence de l'harmonique caractéristique des défauts statoriques dans le spectre du module de Park.

Enfin, dans un cadre plus général de modélisation et de diagnostic, il faudrait élargir cette étude pour d'autres types de défauts, tel que les défauts rotoriques et les défauts mécaniques des alternateurs.

# ANNEXES

## A. Grandeurs de référence

Eu égard aux phénomènes transitoires, il est d'usage d'utiliser comme référence l'amplitude des grandeurs alternatives afin de ne pas introduire systématiquement dans les relations le facteur  $\sqrt{2}$  [11].

On a ainsi comme liste de grandeurs de référence :

- Tension  $U_{\text{réf}} = \sqrt{2} U_n$  (A. 1)

- Courant  $I_{\text{réf}} = \sqrt{2} I_n$  (A. 2)

- Puissance  $P_{\text{réf}} = m U_n I_n$  (A. 3)

Pour un système triphasé on obtient :

$$P_{\text{réf}} = 3 U_n I_n = U_{\text{réf}} I_{\text{réf}} \quad (\text{A. 4})$$

- Pulsation  $\omega_{\text{réf}} = \omega_n = 2\pi f_n$  (A. 5)

- Vitesse angulaire  $\Omega_{\text{réf}} = \frac{\omega_{\text{réf}}}{p}$  (A. 6)

$p$  désigne le nombre de paires de pôles

- Couple  $C_{\text{réf}} = \frac{P_{\text{réf}}}{\Omega_{\text{réf}}}$  (A. 7)

- Impédance  $Z_{\text{réf}} = \frac{U_{\text{réf}}}{I_{\text{réf}}}$  (A. 8)

- Flux  $\Psi_{\text{réf}} = \frac{U_{\text{réf}}}{\omega_{\text{réf}}}$  (A. 9)

- Impédance  $Z_{\text{réf}} = \frac{U_{\text{réf}}}{I_{\text{réf}}}$  (A. 10)

- Inductance  $L_{\text{réf}} = \frac{Z_{\text{réf}}}{\omega_{\text{réf}}}$  (A. 11)

En régime permanent, la tension (ou le courant) de phase s'écrit :

$$u = \sqrt{2} U \exp[j(\omega t + \varphi)] \quad (\text{A. 12})$$

En valeur relative, on a :

$$\frac{U}{U_{\text{réf}}} = \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{2} U_n} \exp[j(\omega t + \varphi)] \quad (\text{A. 13})$$

La valeur relative « efficace » de  $u$  est égale à :

$$\frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{2}U_n} = \frac{U}{U_n} \quad (\text{A. 14})$$

De ce fait, en régime permanent, pour lequel il est usuel d'utiliser les valeurs efficaces, la tension (ou le courant) de référence est normalement la valeur efficace de la tension (ou le courant) nominale de phase.

### II.5.2. Equation du mouvement en valeurs relatives

Selon (II.26), l'équation du mouvement en grandeurs réelles s'écrit :

$$\sum C = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{A. 15})$$

où  $J$  représente le moment d'inertie total des masses tournantes en  $\text{kg.m}^2$ ,  $\Omega$  la vitesse angulaire mécanique en  $\text{rad/s}$  et  $\sum C$  la somme des couples agissant sur le système.

En divisant les 2 termes de (II.44) par  $C_{ref}$ , on obtient :

$$\frac{\sum C}{C_{ref}} = \frac{J}{C_{ref}} \frac{d\Omega}{dt} = \frac{J\Omega_{ref}^2}{P_{ref}} \frac{d}{dt} \left( \frac{\Omega}{\Omega_{ref}} \right) \quad (\text{A. 16})$$

En posant comme *constante de temps mécaniques* :

$$C_m = \frac{J\Omega_{ref}^2}{P_{ref}} \quad (\text{A. 17})$$

On obtient l'équation de mouvement en valeurs relatives :

$$\sum C = C_m \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{A. 18})$$

En variante on définit également la *constante d'inertie* :

$$H = \frac{1}{2} \frac{J\Omega_{ref}^2}{P_{ref}} = \frac{C_m}{2} \quad (\text{A. 19})$$

d'où :

$$\sum C = 2 \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{A. 20})$$

## Paramètres de l'alternateur simulé

Symbole	Description	Valeur	Unité
$f$	Fréquence d'alimentation	50	Hz
$V_m$	Tension maximale	1.0	pu
$R_s$	Résistance statorique	0.018	pu
$R_f$	Résistance rotorique	0.015	Pu
$R_{fs}$	Résistance de court-circuitage de l'enroulement rotorique	0.185	Pu
$R_D$	Résistance de l'enroulement l'amortisseur D	0.2	Pu
$R_Q$	Résistance de l'enroulement l'amortisseur Q	0.2	Pu
$L_D$	Inductance direct	1.15	Pu
$L_Q$	Inductance en quadrature	0.90	Pu
$L_{fs}$	Inductance de fuite	0.15	Pu
$L_f$	Inductance rotorique	1.2	Pu
$L_D$	Inductance de l'enroulement de l'amortisseur D	1.32	Pu
$L_{Q1}, L_{Q2}$	Inductances de l'enroulement de l'amortisseur D	1.26	Pu
$v_f$	Tension d'excitation	0.018	Pu
$C_r$	Couple de la turbine	1.0	Pu
J	Moment d'inertie	1.0	Pu
$f_v$	Coefficient de frottement	$10^{-6}$	N.m.s/rad

# BIBLIOGRAPHIE

**[1] ATA-E Rabbi**

« Detection of stator interturn fault of synchronous machine by rotor current analysis », Sweden, 2016.

**[2] M. Clement Filleau**

« Mise en place d'une méthodologie de modélisation en vue du diagnostic des défauts électriques des alternateurs », Thèse de doctorat, Toulouse, 2017.

**[3] H. Ehya and J. Faiz**

« Electromagnetic Analysis and Condition Monitoring of Synchronous Generators », IEEE Press. 2023

**[4] F. Holmgren**

« Damper Winding Fault Detection in Synchronous Machines », Thèse de doctorat, Uppsala, 2016.

**[5] K. Ouramdane**

« Modélisation et optimisation du système d'excitation du groupe turbine alternateur du simulateur analogique d'hydro-Quebec » Thèse de doctorat, Quebec, 2015.

**[6] B. Aubert**

« Détection des courts-circuits inter-spores dans les Générateurs Synchrones à Aimants Permanents : Méthodes basées modèles et filtre de Kalman étendu - Application à un canal de génération électrique en aéronautique », Thèse de doctorat, Toulouse, 2014.

**[7] B. A. T. Iamamura**

« Contribution à la détection de défauts dans les rotors des turboalternateurs », Thèse de doctorat, Lille 1, décembre 2011.

**[8] M. M. Rahimian**

« Broken bar detection in synchronous machines based wind energy conversion system », Thèse de doctorat, Texas, 2011

**[9] B. V. Phuong**

« Diagnostic des machines électriques par l'analyse du champ magnétique de fuite. Application à l'identification de défauts rotoriques d'un alternateur à vide », Thèse de doctorat, Grenoble, 2007.

- [10] **Xiaoping Tu**  
« Contribution à la modélisation et la simulation de la machine synchrone soumise à des défauts internes », Thèse de doctorat, Québec, 2005.
- [11] **J. Chatelain**  
« Machines électriques », Edition Georgi, Lausanne ,1983.
- [12] **M. Mostafaei and J. Faiz**  
« An overview of various faults detection methods in synchronous Generators » , IET Electric Power Applications, 2020.  
Mao, H.; Khorasani, K.;
- [13] **Y.Guo, H. Mao, K. Khorasani**  
« Analysis and Diagnosis of the Stator Turn-to-Turn Short-Circuit Faults in Wound-Rotor Synchronous Generators », Energies, 2025.
- [14] **S.M.A. Cruz, A. J. M. Cardoso**  
« Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors, by the Extended Park's Vector Approach ». IEEE Trans. Ind. Appl. 2001
- [15] **A.J. M. Cardoso**  
« On-line detection of airgap eccentricity in 3-phase induction motors, by Park's vector approach »., IEE 5th Int. Conf. Elect. Mach. Drives, London, UK, 1991.