

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -  
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence : ...../MM/ 2023

المرجع : ...../م/ 2023

# Mémoire de Master

Présenté au

Département: Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Réalisé par :

**KHOUANI Abdelkader**

Et

**HANI Yacine**

## Thème

### Détection de défaut de la génératrice asynchrone a double alimentation

Soutenu le: **25/06/2023**

Devant le Jury composé de :

BOUZIDA Ahcene	M.C. A	Univ. Bouira	Président
MELLAH Hacene	M.C. A	Univ. Bouira	Encadreur
YAHIOU Abdelghani	M.C. A	Univ. Bouira	Examineur



## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة): هني ياسين الصفة: طالب.

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: ...119756532..... والصادرة بتاريخ: 2021/02/15.

المسجل(ة) بكلية: العلوم والعلوم التطبيقية. قسم: الهندسة الكهربائية

والمكلف(ة) بإنجاز أعمال مذكرة ماستر عنوانها: Détection de défaut de la génératrice

Asynchrone a double alimentation

تحت إشراف الأستاذ: ملاح أحسن

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية  
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023 /06/ 25

توقيع المعني(ة)

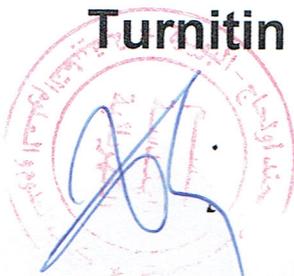
### رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

Turnitin

% 14

النسبة:

الامضاء:





## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة): خواني عبد القادر  
الصفة: طالب.

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: ...120396880..... والصادرة بتاريخ: 2021/04/21.

المسجل(ة) بكلية: العلوم والعلوم التطبيقية. قسم: الهندسة الكهربائية

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال مذكرة ماستر عنونها: Détection de défaut de la génératrice

Asynchrone a double alimentation

تحت إشراف الأستاذ: ملاح أحسن

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية  
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

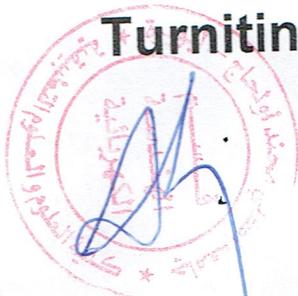
التاريخ: 2023 /06/ 25

توقيع المعني(ة)

### رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

% 14

النسبة:



الامضاء:

# DÉDICACE



Je dédie ce travail



Avant tout à l'âme de ma mère **ELYAKOUT**

A mon père **ZARROUK**

A ma sœur et mon deuxième mère **DALILA**

Et aussi à mes sœurs et mes frères **AYACHE, AHMED, RATIBA,**

**NAZIHA, ABDALLAH, MUSTAPHA**

A ma belle-mère **HAMIDA** et ma belle sœurs **SOUMLA** et ses fils **YACINE,**

**YOUNES**

Au Les maris de mes sœurs **RAFIK, REDHA ET AHMED EL YOUNES**

Et mes nièces **MILLISA, RIMAS, SIRINE**

A tous mes amis **ABDESLAM, RAZIKA (BAZIKA), SARA**

**(DJEDDA), MANAL, YASSINE (KHECHIN, PRIME, WLID-**

**KHALTI), MAHFOUD, WALID, HADDA, FATIHA, BOUB,**

**ISMAIL, GHILLAS, AMER(FRR), BILOU, GAMOZI, AMAZIGH,**

**AZZEDIN, HAJOUJ, REDHA, BASSAM, FAYCAL, SEROUR,**

**ILHAM**

Et les amis de travail **HOUSSAM, MOUSSA, FAROUK, SALLAH**

**KADIROU**

# DÉDICACE



Je dédie ce travail

A mon père **RABAH**

A ma chère mère **AICHA**



Et aussi à mes sœurs et mes frères **FARIDA ET OMAR**

Ma tante et ma deuxième mère **DALILA**

Et mes nièces **RIMA (MAYA), YANICE ET NADA**

A tout la famille **HANI**

A tous mes amis **ABDESLAM, MADJID, RAZIKA, SARA, MANAL,**

**HADDA, FATIHA, YASSINE (KHECHIN, PRIME), MAHFOUD,**

**WALID, BOUB,**

**AHMED, ISMAIL, GHILLAS, ELOUANAS,**

**ABDERRAHMANE, LAMINE**

**YACINE**

# REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de ma formation et qui m'ont aidé à rédiger cette lettre. Tout d'abord, je voudrais remercier l'encadreur **D<sup>r</sup> MELLAH Hacene**, professeur d'électrotechnique à l'université de Bouira, pour sa patience, sa disponibilité et surtout pour ses conseils judicieux qui ont alimenté ma réflexion, je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université de Bouira et les intervenants professionnels responsables de mon enseignement, pour avoir introduit la partie théorique.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes qui nous ont apporté toute l'aide nécessaire pour réaliser cette mémoire :

- Tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

Dr : BOUZIDA Ahcene.

Mr. AHMIA Abderrahmane,

Dr: YAHIOU Abdelghani

- À tous les amis qui ont fait part de notre souffrance et nous ont soutenus pour toute leur aide.
- A nos pères qui ont été la raison pour laquelle nous avons atteint ce stade de notre vie ; nous remercions pour tout ce qu'ils nous ont donné dans notre vie et pour leurs sacrifices

## Resumé

Dans l'industrie, la génératrice asynchrone est très importante car elle présente des avantages tels qu'un coût bas et une maintenance facile. Malheureusement, on rencontre des problèmes lorsqu'on utilise cette machine de manière continue sans rencontrer de difficultés. Ces problèmes sont connus sous le nom de défauts.

Parmi ces défauts, le court-circuit entre spires représente une menace considérable pour la sécurité et l'efficacité du générateur. Dans cette étude, nous avons développé un modèle de simulation permettant de diagnostiquer les courts-circuits entre spires dans les enroulements du stator. Ce modèle de simulation repose sur la méthode des éléments finis (FEM) et a été conçu à l'aide du logiciel ANSYS (Maxwell). Le courant du stator est utilisé pour calculer des paramètres tels que vecteur de Park et spectre de courant et pour créer une comparaison par la valeur efficace

En conclusion, selon les trois méthodes utilisées (le vecteur de Park, l'analyse spectrale de courant FFT et la comparaison valeurs efficace du courant statorique des valeurs en état sain puis en état de défaut), l'augmentation du courant de court-circuit provoque une déformation et une augmentation importante du courant dans le stator.

Mots clés : MAS, court-circuit, GADA, détection de défauts, diagnostic.

## ملخص

في صناعة الطاقة، تعد المولدة الغير متزامنة ذات أهمية كبيرة نظراً لمزاياها مثل تكلفة منخفضة وصيانة سهلة. للأسف، تظهر مشاكل عند استخدام هذه الماكينة بشكل متواصل بدون مواجهة صعوبات. وتعرف هذه المشاكل بمصطلح العيوب.

من بين هذه العيوب، يشكل انقطاع التيار بين لفات خطراً كبيراً على سلامة وكفاءة المولدة. في هذه الدراسة، قمنا بتطوير نموذج محاكاة لتشخيص انقطاعات التيار بين لفات القواطع في لفات الساق الثابتة. يعتمد هذا النموذج على طريقة العناصر المحدودة (FEM) وتم تصميمه باستخدام برنامج ANSYS (Maxwell). يتم استخدام التيار في الساق الثابتة لحساب معاملات مثل مسار الفيكتور بارك وطيف التيار، بالإضافة إلى إنشاء مقارنة بناءً على قيمة الجذر المتوسط. في الختام، استناداً إلى الأساليب الثلاث المستخدمة (فيكتور بارك، تحليل طيف التيار باستخدام FFT ومقارنة قيم الجذر المتوسط لتيار الساق الثابت في الحالة الصحية والحالة المعيبة)، يؤدي زيادة التيار في الانقطاعات إلى تشوه وزيادة كبيرة في التيار في الساق الثابتة.

## Abstract

In the industry, the asynchronous generator is highly important due to its advantages such as low cost and easy maintenance. Unfortunately, problems arise when using this machine continuously without encountering difficulties. These problems are known as defects.

Among these defects, short-circuit between windings poses a significant threat to the safety and efficiency of the generator. In this study, we have developed a simulation model to diagnose short-circuits between windings in the stator coils. This simulation model is based on the finite element method (FEM) and was designed using ANSYS (Maxwell) software. The stator current is used to calculate parameters such as the Park vector trajectory and current spectrum, as well as to create a comparison based on the root-mean-square value.

In conclusion, based on the three methods used (Park vector, FFT current spectral analysis, and comparison of root-mean-square values of stator current in healthy and faulty states), an increase in short-circuit current leads to deformation and a significant increase in current in the stator.

**Keywords:** asynchronous generator, short-circuit, DFIG, fault detection, diagnosis.

## Table des matières

Dédicace .....	I
Resumé.....	II
Table des matières.....	IV
Liste de figure.....	VII
Liste de Tableaux .....	IX
Listes des Acronymes et Symboles.....	X
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur génératrice asynchrone a double alimentation</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Histoire de la machine électrique.....	3
I.3. Description de la machine asynchrone à double alimentation.....	4
I.4. Principe de fonctionnement et performances de génératrice asynchrone a doublé alimentation.....	5
I.5. Application des génératrice asynchrones à double alimentation .....	6
I.6. Construction du GADA .....	6
I.6.1. Le stator .....	6
I.6.2. Le rotor.....	7
I.7. Avantages et inconvénients de GADA .....	7
I.7.1. Avantages.....	7
I.7.2. Inconvénients .....	8
I.8. État de l’art du diagnostic de la machine asynchrone.....	8
I.8.1. Cause de défaut .....	9
I.9. Présentation des défauts .....	9
I.9.1. Défauts affectant le stator .....	10
I.9.2. Défauts affectant le rotor.....	11
I.10. Méthodes de diagnostic des machines électriques.....	12

I.10.1. Méthodes internes .....	12
I.10.2. Méthodes externes .....	14
I.10.3. Les méthodes inductives .....	15
I.10.4. Les méthodes déductives .....	15
I.11. Conclusion .....	15

## Chapitre II : Simulation de GADA dans ANSYS (maxwell)

II.1. Introduction .....	17
II.2. Méthode d'élément finis .....	17
II.2.2. Les équations de Maxwell : .....	18
II.2.2.1 Définition : .....	18
II.2.2.2 Les équations : .....	18
II.3. Ansys (MAXWELL) .....	19
II.3.1. Génératrice asynchrone a double alimentation dans ansys .....	20
II.4. Résultat de simulation .....	21
II.4.1. GADA a fonctionnement à l'état sain .....	21
II.4.2. GADA en fonctionnement avec défaut de court-circuit entre les spires .....	23
II.4.2.1. Défaut dans la phase A .....	24
II.4.2.2. Défaut dans phase A et B .....	25
II.4.2.2. Défaut dans phase A et B et C .....	26
II.4.3. Comparaison des résultats .....	28
II.4.3.1. Comparaison par les pourcentages .....	28
II.4.3.2. Comparaison par les nombres de phase de défaut .....	31
II.5. conclusion .....	33

## Chapitre III : les méthodes de détection

III.1. Introduction .....	36
III.2. Méthode de vecteur Park ( $I_b=f(I_a)$ ) .....	36
III.2.1 Fonctionnement a l'état sain .....	37

III.2.2. Fonctionnement avec défaut de court-circuit entre les spires .....	37
III.2.2.1 Défaut dans la phase A .....	37
III.2.2.2. Défaut dans la phase A et B .....	38
III.2.2.3. Défaut dans la phase A, B et C.....	39
III.3. Analyse spectrale (FFT) .....	40
III.3.1. Fonctionnement a l'état sain .....	40
III.3.2.Fonctionnement avec défaut.....	41
III.3.2.1. Défaut dans la phase A.....	41
III.3.2.2. Défaut dans la phase A et B .....	42
III.3.2.3. Défaut dans la phase A, B et C.....	43
III.4. Comparaison par la valeur efficace .....	44
III.4.1. Défaut dans la phase A.....	44
III.4.1. Défaut dans la phase A et B .....	45
III.4.1. Défaut dans la phase A, B et C.....	45
III.5. Conclusion.....	46
Conclusion Générale .....	48
Reference Bibliographique .....	49

## Liste de figure

### Chapitre I : Généralités sur génératrice asynchrone a double alimentation

<b>Figure I. 1.</b> Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA.....	4
<b>Figure I. 2.</b> Modes de fonctionnement de la GADA .....	5
<b>Figure I. 3.</b> Le stator de MAS .....	7
<b>Figure I. 4.</b> Schéma d'un rotor bobiné .....	7
<b>Figure I. 5.</b> Répartition des différentes pannes .....	9
<b>Figure I. 6.</b> Défauts statoriques .....	10
<b>Figure I. 7.</b> Différents défauts statoriques de la machine asynchrone.....	11
<b>Figure I. 9.</b> Principe de la surveillance par analyse spectrale .....	15

### Chapitre II : Simulation de GADA dans ANSYS (maxwell)

<b>Figure II. 1.</b> GADA dans Ansys (Maxwell).....	20
<b>Figure II. 2.</b> 2D design de GADA dans ansys (Maxwell).....	21
<b>Figure II. 3.</b> Tension statorique de GADA en fonctionnement a l'état sain.....	21
<b>Figure II. 4.</b> Courant statorique en fonctionnement à l'état sain .....	22
<b>Figure II. 5.</b> Courant Rotorique en fonctionnement sain .....	22
Figure II. 6. Vitesse de rotation de GADA .....	22
<b>Figure II. 7.</b> Couple de GADA.....	23
<b>Figure II. 8.</b> Flux de GADA en fonctionnement à l'état sain .....	23
<b>Figure II. 9.</b> Courant statorique en fonctionnement avec 25% de défaut (PhA).....	24
<b>Figure II. 10.</b> Courant statorique en fonctionnement avec 75% de défaut (PhA).....	24
<b>Figure II. 11.</b> Courant statorique en fonctionnement avec 80% de défaut (PhA).....	25
<b>Figure II. 12.</b> Courant statorique en fonctionnement avec 25% de défaut (PhAB) .....	25
<b>Figure II. 13.</b> Courant statorique en fonctionnement avec 75% de défaut (PhAB) .....	26
<b>Figure II. 14.</b> Courant statorique en fonctionnement avec 80% de défaut (PhAB) .....	26
<b>Figure II. 15.</b> Courant statorique en fonctionnement avec 25% de défaut (PhABC) .....	27
<b>Figure II. 16.</b> Courant statorique en fonctionnement avec 75% de défaut (PhABC) .....	27
<b>Figure II. 17.</b> Courant statorique en fonctionnement avec 80% de défaut (PhABC) .....	28
<b>Figure II. 18.</b> Courant dans la phase A avec 25% de défaut.....	28
<b>Figure II. 19.</b> Courant dans la phase A avec 75% de défaut.....	29
<b>Figure II. 20.</b> Courant dans la phase A avec 80% de défaut.....	30

<b>Figure II. 21.</b> Courant dans la phase A avec le défaut dans phase A.....	31
<b>Figure II. 22.</b> Courant dans la phase A avec le défaut dans phase A et B .....	31
<b>Figure II. 23.</b> Courant dans la phase A avec le défaut dans phase A, B et C.....	32

### Chapitre III : les méthodes de détection

<b>Figure III. 1.</b> Forme $I_b=f(I_a)$ en fonctionnement a l'état sain .....	37
<b>Figure III. 2.</b> Forme $I_b=f(I_a)$ en fonctionnement avec défaut dans la phase A en différent pourcentage .....	38
<b>Figure III. 3.</b> Forme $I_b=f(I_a)$ en fonctionnement avec défaut dans la phase A et B en différent pourcentage .....	39
<b>Figure III. 4.</b> Forme $I_b=f(I_a)$ en fonctionnement avec défaut dans la phase A, B et C en différent pourcentage.....	40
<b>Figure III. 5.</b> Spectre de courant de la phase A en fonctionnement a l'état sain.....	41
<b>Figure III. 6.</b> Spectre de courant de la phase A avec défaut dans la phase A.....	41
<b>Figure III. 7.</b> Spectre de courant de la phase A avec défaut dans la phase A et B .....	42
<b>Figure III. 8.</b> Spectre de courant de la phase A avec défaut dans la phase A, B et C.....	43
<b>Figure III. 9.</b> Comparaison par la valeur efficace avec défaut dans la phase A .....	44
<b>Figure III. 10.</b> Comparaison par la valeur efficace avec défaut dans la phase A et B .....	45
<b>Figure III. 11.</b> Comparaison par la valeur efficace avec défaut dans la phase A, B et C .....	45
<b>Figure III. 12.</b> tout le résultat de comparaison de la valeur efficace.....	46

## Liste de Tableaux

### Chapitre II : Simulation de GADA dans ANSYS (maxwell)

<b>Tableau II. 1.</b> Paramétrés de GADA dans ansys .....	20
<b>Tableau II. 2.</b> Tableau pour définir les cas de défaut.....	23

## Listes des **Acronymes** et Symboles

### • **Acronymes**

GADA	Génératrice asynchrone à double alimentation
CC	Courts -circuits
MAS	Machine asynchrone
MCSA	Analyse de signature de courant de moteur
DFIG	<i>Doubly Fed Induction Generator</i>
EM	Champ électromagnétique
PhA	Phase A
PhAB	Phase A et B
PhABC	Phase A, B et C
FFT	<i>Fast fourrier transforme</i>
$I_{eff}$	La valeur efficace de courant
$I_{max}$	La valeur maximale de courant

### • **Symboles**

P	Nombre de pair de pôles	
$g$	Le glissement	
N	Entier naturel	
K	Entier naturel	
$P_s$	Puissance statorique de GADA	KW
$P_r$	Puissance rotorique de GAD A	KW
Q	La puissance réactive	KVar
$f_s$	La fréquence statorique imposée par le réseau	GHz

$f_r$	La fréquence des grandeurs rotorique imposée par le convertisseur	GHz
$f_m$	La fréquence de la vitesse mécanique de rotation du rotor	GHz
$f_{cc}$	Fréquence de court- circuit	GHz
$f_{exc}$	Fréquence d'excentricité	Hz
$f$	Fréquence d'alimentation	Hz
$\vec{H}$	Champ magnétique	A/m
$\vec{E}$	Champ électrique	V/m
$\vec{B}$	Induction magnétique	T
$\vec{j}$	Densité de courant	A/m <sup>2</sup>
$\vec{D}$	Induction électrique	C/m <sup>2</sup>
$\vec{\rho}$	Charge volumique	C/m <sup>3</sup>
$\frac{d\vec{D}}{dt}$	Densité de courant de déplacement	A/m <sup>2</sup>
$\vec{M}$	L'aimantation des aimants	A/m
$\mu_0$	Perméabilité magnétique du vide	H/m
$\mu$	Perméabilité magnétique absolue	H/m
$\mu_r$	Perméabilité magnétique relative du milieu	H/m

# **Introduction Générale**

## **Introduction générale**

Les machines asynchrones sont largement privilégiées dans l'industrie en raison de leur coût abordable, de leur taille compacte, de leur robustesse, de leur faible besoin d'entretien et de leur compatibilité avec une alimentation électrique aisément disponible. Bien qu'elles soient généralement fiables, ces machines peuvent néanmoins présenter différents types de défaillances ou de défauts, qui peuvent être attribués à des problèmes mécaniques ou électriques [1].

Un arrêt imprévu dû à un quelconque dysfonctionnement peut entraîner des pertes financières et matérielles significatives, telles que des pertes de production, la nécessité de réparer ou remplacer l'outil de production, ainsi que des retards de livraison. Par conséquent, il est vivement recommandé de détecter les défauts le plus tôt possible afin de pouvoir y remédier rapidement et minimiser les conséquences néfastes, notamment l'arrêt de la chaîne de production et les pertes de produits. Cette réalité a conduit la majorité des industriels à équiper leurs chaînes de production de systèmes sophistiqués de détection et de diagnostic des défauts. Ces systèmes permettent de surveiller en continu les performances de la machine asynchrone, afin de détecter toute anomalie et de prendre des mesures correctives dans les délais les plus courts [2].

La détection précoce des défauts (maintenance préventive) est devenue essentielle pour éviter les défaillances complètes des machines électriques. De nombreuses études ont été menées sur ce nouveau type de maintenance, utilisant diverses techniques de diagnostic. La plupart de ces techniques se basent sur les grandeurs mécaniques telles que le couple, la vitesse, les vibrations, le bruit, etc., ce qui nécessite l'installation de capteurs au niveau de la machine. Cependant, cette approche s'avère difficile et coûteuse dans la plupart des cas [3].

Les défauts de court-circuit entre les bobines peuvent survenir lorsque les isolants se dégradent en raison d'une surintensité ou d'une surtension lors des commutations du convertisseur, entraînant ainsi un courant très élevé circulant dans les bobines en court-circuit. Ce type de défaut peut entraîner des courts-circuits entre les phases ou entre une phase et la terre, mais cela peut être évité grâce à une surveillance permanente de l'état de la génératrice [4].

La sortie du capteur de courant est amplifiée, filtrée, puis connectée à un synthétiseur de Park et un oscilloscope, ou reliée à un ordinateur. De plus, cette technique est utilisée en ligne pendant le fonctionnement du moteur, ce qui permet son application dans la surveillance des machines. L'objectif de cette étude est d'explorer l'utilisation de cette technique basée sur

le tracé des vecteurs de Park pour détecter les défauts de barres dans la machine asynchrones [3].

Il existe plusieurs approches possibles pour résoudre ce type de problème, mais notre étude se concentre spécifiquement sur la formulation magnétodynamique. La résolution des équations du magnétodynamique est réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis [5].

Pour ce faire, nous avons organisé les trois chapitres de la manière suivante :

**Le premier chapitre** est consacré à l'état de l'art de la machine asynchrone et du diagnostic des défauts asynchrones. Il présente une analyse des divers défauts susceptibles d'affecter le bon fonctionnement de la machine asynchrone, ainsi que les différentes méthodes de détection et de diagnostic de ces défauts.

**Le deuxième chapitre** sera consacré aux modèles électromagnétiques obtenus à partir des équations de Maxwell-Ansys de la machine asynchrone triphasée, en considérant à la fois son état sain et les défauts tels que les courts-circuits. Nous procéderons ensuite à une étude détaillée du contenu spectral du courant statorique afin de mieux comprendre son comportement dans ces différentes conditions.

**Le troisième chapitre** aborde la détection des défauts de court-circuit en utilisant des méthodes de traitement du signal appliquées au courant statorique. Cela comprend l'utilisation de la transformée de Fourier (FFT) ainsi que l'étude bidimensionnelle du vecteur de Park. Nous comparerons ces approches en examinant à la fois le cas d'une machine en bon état de fonctionnement et celui d'une machine présentant des défauts de court-circuit.

Enfin, ce travail se conclura par une conclusion générale.

**Chapitre I : Généralités sur  
génératrice asynchrone a double  
alimentation**

### I.1. Introduction

Ce chapitre introduit les aspects généraux de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) et est divisé en deux parties distinctes.

La première partie aborde les caractéristiques de la GADA, ses avantages et inconvénients, ainsi que ses principes de fonctionnement. De plus, un aperçu des domaines d'application les plus courants de la GADA dans les systèmes électriques est présenté.

La deuxième partie met en évidence l'état de l'art du diagnostic des machines asynchrones en général, en discutant des causes de défauts et des différentes méthodes de diagnostic utilisées pour identifier ces défauts.

### I.2. Histoire de la machine électrique

L'histoire des machines électromagnétiques commence réellement à la fin de 1819 à Copenhague, lorsqu'on a découvert l'effet à distance de la circulation d'un courant électrique sur une aiguille aimantée. Il est à noter que 80 ans auparavant, l'Abbé Nollet et Franklin avaient déjà remarqué que le courant électrique pouvait aimanter ou démagnétiser les aimants, mais ils n'ont pas eu la chance de voir une aiguille de boussole se déplacer lorsqu'ils produisaient des décharges électriques [6].

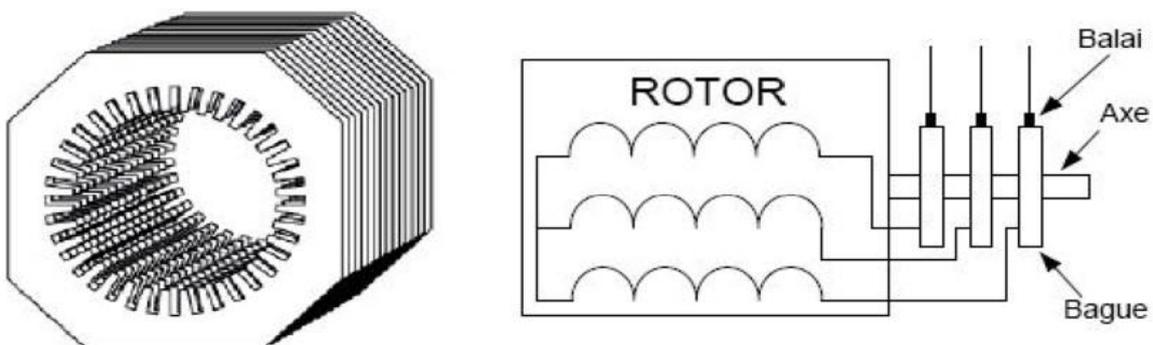
- ✓ En 1821, l'Anglais Michael Faraday a inventé le premier moteur électromagnétique, et en 1822, Peter Barlow a ajouté une roue dentée.
- ✓ En 1831, Faraday a formulé les principes de l'induction électromagnétique. En parallèle, Friedrich Emil Lenz en Russie et Joseph Henry aux États-Unis ont également effectué des travaux similaires, contribuant à la découverte et à la compréhension de ce phénomène. L'année suivante, Ampère et le constructeur français Hippolyte Paxi ont construit une génératrice à courant continu.
- ✓ En 1836, l'Anglais Hyde Clarke a conçu une machine dont la structure était inversée par rapport à celle de Paxi et Ampère, ce qui améliorait le commutateur redresseur.
- ✓ En 1842, Davidson a utilisé l'un des premiers moteurs à réactance variable.
- ✓ En 1848, les moteurs de Froment sont apparus, avec un couple atteignant 500 N.m. Ces moteurs ont été utilisés pour les applications industrielles.
- ✓ En 1860, la compagnie "l'Alliance" produisait industriellement des génératrices de structures complexes. En 1865, l'Italien Antonio Pacinotti a construit un prototype de machine à courant continu à induction en anneau et collecteur radial, dont le fonctionnement a été grandement amélioré.

- ✓ En 1888, Nikola Tesla a inventé le premier moteur à courant alternatif, qui a joué un rôle important dans le développement de l'industrie électrique. En 1889, l'Allemand Mikhail Dolivo-Dobrovolsky a conçu la première machine asynchrone triphasée. Celle-ci a largement dominé le domaine des machines électriques en raison de ses nombreux avantages, tels que sa simplicité de fabrication, son faible coût, sa faible exigence en matière d'entretien, son taux de défaillance très bas, sa grande quantité de production et sa grande échelle de puissances.
- ✓ Depuis la fin des années 1920, les machines électriques à deux enroulements triphasés dans le stator ont été introduites pour augmenter la puissance des alternateurs synchrones de grande puissance [7].

### **I.3. Description de la machine asynchrone à double alimentation**

La machine asynchrone à double alimentation possède un stator similaire à celui des machines triphasées traditionnelles (asynchrones à cage ou synchrones), généralement composé de tôles magnétiques empilées dotées d'encoches pour accueillir des enroulements décalés de  $120^\circ$  dans l'espace. Son rotor n'est plus une cage d'écureuil, mais se compose de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices qui entrent en contact avec des balais lorsque la machine tourne.

Ce genre de machines n'a besoin que d'une source d'alimentation qui peut être fournie des deux côtés de la machine. Cela constitue un avantage majeur, surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé en associant les convertisseurs de puissance du côté statorique, rotorique ou des deux. Cela dépend fondamentalement du facteur technico-économique de construction (figure I.1) [9].



**Figure I. 1.** Structure du stator et des contacts rotoriques de la GADA [9].

I.4. Principe de fonctionnement et performances de génératrice asynchrone a doublé alimentation

Un GADA est identique à un moteur asynchrone triphasé, sauf que le rotor a des enroulements similaires au stator et est connecté au réseau via un système redresseur-onduleur qui fournit une alimentation à tension et fréquence variables. Cette topologie dite de Scherbius adapte la fréquence du courant rotorique à la fréquence du réseau en fonction de la vitesse de rotation appliquée. Détails des principes de fonctionnement, de modélisation et de contrôle de la structure [10].

Selon le schéma de principe de la figure I.2, l'alimentation du rotor GADA est assurée par deux convertisseurs bidirectionnels afin d'échanger la puissance dite de glissement avec le réseau. La structure utilise deux onduleurs de tension en cascade équipés d'IGBT connectés via une liaison CC. Par conséquent, le contrôle du flux de puissance nous permet de définir le point de fonctionnement souhaité de la machine. En fait, la relation entre la puissance du rotor et celle du stator est donnée par :

$$P_s = \frac{P_r}{g} \tag{I.1}$$

$P_s$  : Puissances statorique de GADA

$P_r$  : Puissances rotorique de GADA

$g$  : Le glissement

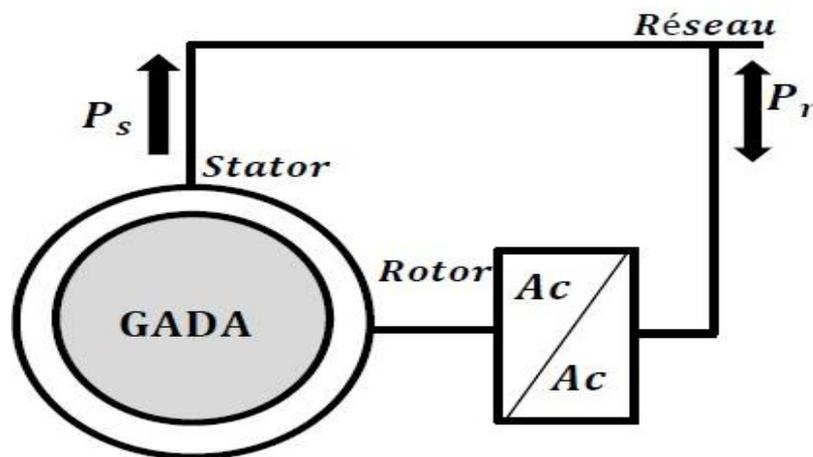


Figure I. 2. Modes de fonctionnement de la GADA [10].

Lorsque la vitesse rotorique est supérieure à la vitesse synchronisme, le glissement et la puissance de glissement deviennent négatifs. En d'autres termes, le convertisseur absorbe la puissance du rotor pour l'injecter dans le réseau selon le mode générateur super synchrone. En revanche, lorsque la vitesse est inférieure à la vitesse synchronisme, le glissement et la

puissance de glissement deviennent positifs. Par conséquent, le convertisseur injecte de la puissance dans le rotor selon le mode du générateur sous-synchrone. De plus, la machine peut fonctionner en mode synchrone et se comporter exactement comme une machine synchrone. Par conséquent, la relation de fréquence est donnée par :

$$f_s = f_r + f_m \quad (I.2)$$

$f_s$  : la fréquence statorique imposée par le réseau électrique.

$f_r$  : la fréquence des grandeurs rotorique imposée par le convertisseur.

$f_m$  : la fréquence de la vitesse mécanique de rotation du rotor.

### I.5. Application des génératrice asynchrones à double alimentation

La machine à double alimentation présente de nombreux avantages par rapport aux machines asynchrones classiques et synchrones, notamment en termes de plage de vitesse opérationnelle et de puissance d'entraînement ou de puissance générée en mode générateur. Elle est également souple en commande, ce qui lui permet d'avoir une large gamme d'applications, notamment dans les systèmes de génération d'énergie éolienne et hydraulique, les applications aérospatiales et navales, et pour l'entraînement de ventilateurs et de pompes à eau nécessitant une vitesse variable à fréquence constante [11].

### I.6. Construction du GADA

La MAS est constituée principalement de deux armatures coaxiales, l'une est fixe qu'on appelle inducteur (le stator) et l'autre est mobile qu'on appelle induit (le rotor) [12].

Et la construction de génératrice asynchrone à double alimentation pas différent de construction de génératrice asynchrone a rotor bobiné

#### I.6.1. Le stator

Le stator est la partie inductrice du moteur et est constitué d'une carcasse en acier qui abrite un empilage de tôles cylindriques identiques. Ces tôles sont perforées de trous le long de leur bord intérieur, créant ainsi des encoches où sont installés les bobinages du stator [12].



Figure I. 3. Stator de MAS [12].

### I.6.2. Le rotor

Le rotor, qui représente l'induit de la machine, n'est pas électriquement relié à une source d'énergie, qu'elle soit continue ou alternative. Il est séparé du stator par un très faible entrefer de 0,4 à 2 mm. Le rotor est composé d'un bobinage triphasé monté en étoile, qui est logé dans les encoches d'un circuit magnétique constitué de disques empilés sur l'arbre de la machine. Chaque extrémité de l'enroulement est reliée à une bague qui tourne avec l'arbre. Ces bagues permettent d'insérer une résistance en série avec chaque enroulement au démarrage du moteur, en utilisant trois balais. Lors du fonctionnement normal, les trois balais sont court-circuités [12].

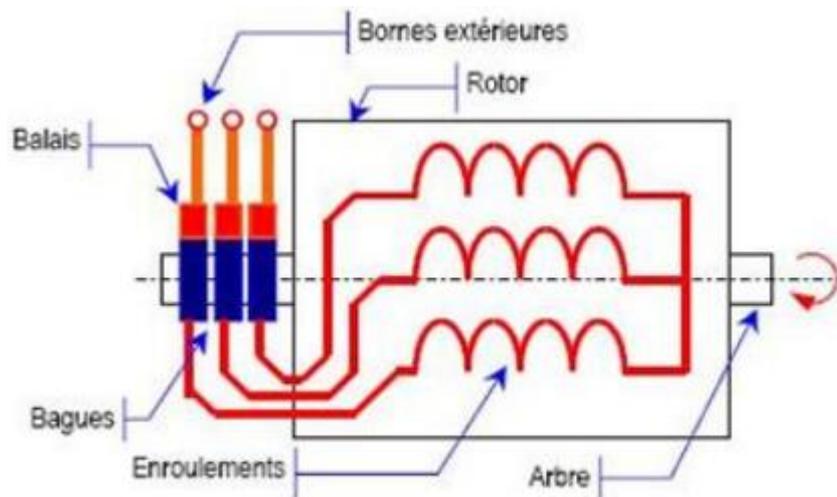


Figure I. 4. Schéma d'un rotor bobiné [12].

## I.7. Avantages et inconvénients de GADA

### I.7.1. Avantages

Il a la capacité de fonctionner à vitesse variable, de contrôler la puissance réactive et de réduire la puissance nominale du convertisseur. Du fait que le rotor présente des tensions

inférieures à 20% de celles du stator, le kVA minimum requis pour le convertisseur est d'environ 20% par rapport à une machine connectée à un convertisseur bidirectionnel [13].

La mesure des courants au niveau du stator et du rotor offre une plus grande souplesse et précision pour le contrôle du flux et du couple électromagnétique, contrairement à la machine à cage d'écurueil.

L'accès au stator et au rotor permet d'avoir plusieurs degrés de liberté pour mieux contrôler le transfert de puissance et le facteur de puissance.

Par conséquent, ce dispositif est économique et à la différence de la machine asynchrone à cage, il ne consomme pas de puissance réactive et peut même en fournir.

L'utilisation d'une GADA permet de réduire d'environ 70% la taille des convertisseurs en faisant varier la vitesse en agissant sur la fréquence d'alimentation des enroulements du rotor.

Le circuit rotorique de la GADA peut être commandé par un convertisseur de fréquence relativement faible par rapport au stator. Ainsi, un convertisseur à haute commutation peut être utilisé au niveau du rotor pour obtenir de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de réduction des harmoniques et d'amélioration de l'efficacité [14].

### **I.7.2. Inconvénients**

La nécessité d'interventions périodiques pour les balais entraîne une augmentation du coût de la maintenance [15].

La robustesse est légèrement réduite par la présence des systèmes à bagues et balais [14].

### **I.8. État de l'art du diagnostic de la machine asynchrone**

Les machines électriques sont largement utilisées dans l'industrie, en particulier la machine asynchrone, qui est considérée comme la machine la plus robuste et la moins coûteuse sur le marché en raison de sa conception. En raison de sa faible nécessité d'entretien, elle est utilisée dans tous les secteurs industriels, y compris les domaines avancés tels que l'aéronautique, le nucléaire, la chimie et les éoliennes. Cependant, bien que la machine asynchrone soit très résistante, elle peut subir des sollicitations au cours de sa durée de vie qui la rendent vulnérable à la défaillance. Cette défaillance peut avoir de graves conséquences sur le processus de production en général. Par conséquent, il est important de mettre en place une maintenance prédictive pour détecter les défauts potentiels tels que la mise en court-circuit de la phase statorique, la rupture de barres ou d'anneaux de court-circuit, les excentricités, les défauts de roulements, etc.

La machine électrique est considérée comme le maillon faible dans les chaînes de production industrielles, car sa panne peut entraîner une perte importante et paralyser immédiatement la production. Les efforts de recherche actuels visent à détecter les petits défauts, tels qu'un court-circuit entre spires, pour prévenir les pannes majeures.

Le diagnostic des défauts est généralement basé sur l'analyse du spectre des grandeurs électriques, qui dépendent du type de défaut, du glissement et du choix de l'alimentation.[4]

### I.8.1. Cause de défaut

Les effets sur le stator peuvent être attribuables principalement [16] :

- Un problème thermique (surcharge),
- Électrique (diélectrique),
- Mécanique (bobinage)
- Environnemental (agression)

Les effets sur le rotor peuvent être attribuables principalement :

- Thermiques (surcharge),
- Électromagnétiques (Force en fonction  $B^2(t)$ ),
- Résiduels (déformation),
- Dynamiques (arbre de transmission),
- Mécaniques (roulement)
- Environnementaux (agression).

Ces défauts se répartissent selon la figure suivante :

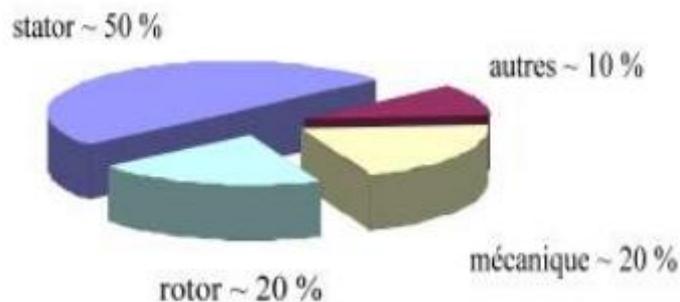


Figure I. 5. Répartition des différentes pannes [16]

### I.9. Présentation des défauts

La machine asynchrone est constituée de deux parties : le stator, qui est fixe et contient un enroulement triphasé placé dans les encoches du circuit magnétique, et le rotor, qui est mobile et constitué soit d'une cage, soit d'un enroulement court-circuité placé dans des encoches. Dans la suite, nous présenterons les différents défauts qui peuvent affecter la machine

asynchrone. Il y a deux types de défauts qui peuvent être distingués dans la machine asynchrone [4] :

- ❖ Défauts affectant le stator.
- ❖ Défauts affectant le rotor.

### I.9.1. Défauts affectant le stator

Les défauts les plus courants au niveau des enroulements statoriques (voir Figure I.6) sont dus à des anomalies de différentes natures, notamment :

- Des courts-circuits dans les spires d'une même phase.
- Des courts-circuits entre phases ou entre bobines.
- Des coupures de phase.
- Des défauts du circuit magnétique (rupture de tôles).
- Des défauts d'isolation de la masse.

Des études théoriques ont montré que la présence d'un court-circuit au stator enrichit le spectre du courant statorique, les fréquences correspondantes étant déterminées par la relation suivante [17]:

$$f_{cc} = [(n/p)(1 - g) \pm k]. f \quad (\text{Hz}) \quad (\text{I.3})$$

Où :

- $f_{cc} \Rightarrow$  Fréquence de court-circuit.
- $f \Rightarrow$  Fréquence d'alimentation.
- $n \Rightarrow 1,2,3, \dots, n \in \mathbb{N}$ .
- $g \Rightarrow$  glissement.
- $p \Rightarrow$  nombre de pair de pôles.
- $k \Rightarrow 1,2,3, \dots, k \in \mathbb{N}$ .

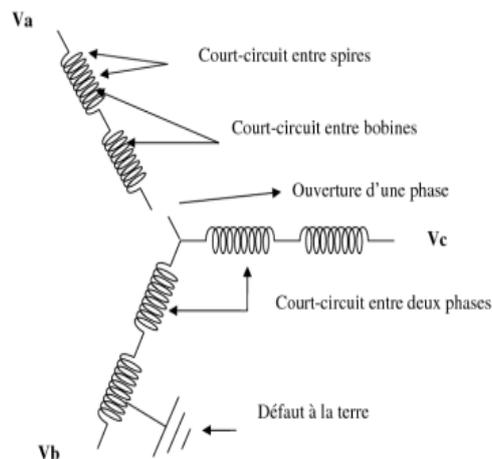
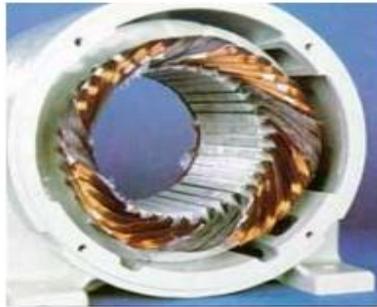
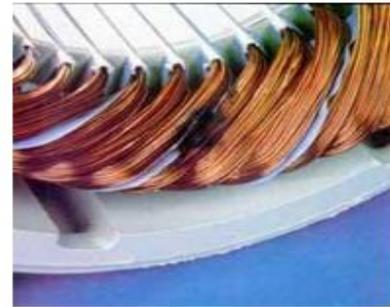


Figure I. 6. Défauts statoriques [17]

La Figure I.7 présente des exemples de différents défauts dans le stator de la machine asynchrone.



Ouverture dans une phase de l'alimentation



Courts-circuits entre - phase



Déséquilibre de l'alimentation



Endommagement dû à la surcharge



Masse dans l'encoche



Dégradation causée par une surtension

**Figure I. 7.** Différents défauts statoriques de la machine asynchrone [18]

### **I.9.2. Défauts affectant le rotor**

Nous discutons ici des divers défauts possibles pouvant affecter le rotor de la machine asynchrone.

### I.9.2.1. Défaut de courts-circuits :

La détection de courts-circuits entre spires dans les générateurs de puissance à rotor bobiné est généralement effectuée en mesurant les courants statoriques et en analysant les harmoniques du courant. Les courts-circuits entre spires peuvent être détectés en observant la présence d'harmoniques de courant impaires dans le spectre de courant.

Les techniques de détection incluent également l'utilisation de méthodes de diagnostic avancées telles que l'analyse de la réponse en fréquence, l'analyse spectrale, l'analyse de l'ondelette et l'analyse des composantes principales pour identifier les signatures des défauts de courts-circuits entre spires. Ces méthodes sont capables de détecter des défauts même à un stade précoce, permettant ainsi des réparations préventives avant que le défaut ne s'aggrave et n'affecte le fonctionnement de la machine [19].

### I.9.2.2. Défaut de contact balai – bague :

Lorsqu'il y a un défaut de contact entre les balais et les bagues, cela crée un déséquilibre de résistance entre les trois phases rotoriques. Cela a un impact négatif sur les performances du système, car la commande est sensible à la constante de temps rotorique et cela peut entraîner une augmentation des pertes [4].

## I.10. Méthodes de diagnostic des machines électriques

Les méthodes de diagnostic peuvent être classées en deux grandes catégories, à savoir les méthodes internes et externes, ainsi que les méthodes inductives et déductives. Les méthodes internes utilisent des outils mathématiques pour modéliser les systèmes et les symptômes de défaillance, tandis que les méthodes externes reposent sur l'intelligence artificielle pour reproduire les modes de raisonnement humain. Les méthodes inductives sont basées sur l'observation et la généralisation, tandis que les méthodes déductives sont basées sur le raisonnement logique à partir de prémisses connues [20].

### I.10.1. Méthodes internes

Ces méthodes impliquent la comparaison entre les mesures réelles prises sur le système à surveiller et les informations fournies par le modèle. Les différences entre les deux caractérisent le fonctionnement du système :

Si les différences sont nulles, le système fonctionne normalement.

Si les différences sont non nulles, le système est considéré comme défaillant. Les méthodes internes se divisent en deux catégories principales : les méthodes de redondance

analytique, qui utilisent des techniques d'estimation d'état, et les techniques d'estimation paramétrique, qui visent à estimer les paramètres des modèles [21].

Les méthodes de diagnostic internes se différencient en fonction des modèles utilisés.

- a) **Modèle de simulation** : Il s'agit d'une description de la structure physique et du comportement du système. Les modèles analytiques utilisés dans ce type de diagnostic sont représentés par des équations d'état ou des fonctions de transfert. Les perturbations sont incluses de manière additive à travers des matrices, tandis que les défauts sont pris en compte de la même manière ou en modifiant la structure du modèle lui-même. C'est dans cet esprit que nous avons développé notre modèle de simulation [21].
- b) **Modélisation des signaux** : Dans cette méthode, le contenu spectral et l'évolution temporelle des variables mesurées sont utilisés pour détecter et localiser les défauts. L'analyse spectrale, en particulier, est utilisée depuis de nombreuses années pour détecter les défaillances dans les machines électriques. Cette approche est particulièrement adaptée aux cas où de nombreux défauts (tels que la rupture de barres ou la dégradation des roulements) se traduisent par l'apparition de fréquences caractéristiques directement liées à la vitesse de la machine.[20]
- c) **Observateurs** : Un module qui est capable de générer une approximation du vecteur d'état est appelé estimateur d'état ou observateur d'état. Le modèle est décrit sous une représentation de variables d'état. L'analyse du comportement des estimations des états qui ont un sens physique permet la réalisation du diagnostic.[22]
- d) **Equations de parité** : Une relation ou une équation qui produit un résidu est appelée relation ou équation de parité. Les équations de parité primaires peuvent être obtenues à partir des équations qui décrivent la structure et le comportement du système. Les équations de parité supplémentaires sont obtenues par des transformations afin d'améliorer la tâche de diagnostic [21].
- e) **Estimation paramétrique** : La détection et la localisation des défaillances par estimation paramétrique consistent à déterminer les valeurs numériques des paramètres structuraux d'un modèle de connaissance qui gouverne le comportement dynamique du système. La première étape consiste donc à élaborer un modèle mathématique de complexité raisonnable pour caractériser la machine en fonctionnement sain et dégradé. Le type de défaut que l'on pourra détecter dépend du choix du modèle. En effet, les défauts statoriques ou rotoriques doivent être discriminés au niveau des paramètres physiques estimés pour qu'on puisse les détecter et les localiser. Le modèle de Park est

souvent utilisé en diagnostic pour l'estimation paramétrique. Les cassures de barres provoquent une augmentation de la résistance rotorique apparente [20].

### I.10.2. Méthodes externes

Face à la difficulté de créer des modèles physiques représentatifs du fonctionnement d'un système et de ses différents composants, les méthodes externes ont souvent prouvé leur efficacité. Ces méthodes exploitent les informations fournies par les signaux des capteurs installés sur les machines, tels que les signaux vibratoires pour les machines tournantes, pour construire une image représentative de son mode de fonctionnement. Pour ce faire, les techniques de classification et d'intelligence artificielle sont les outils adéquats pour accomplir cette tâche.

Tout cela se fait en plusieurs étapes. Tout d'abord, les informations les plus complètes possibles sont extraites des signaux délivrés par les capteurs sous forme d'indicateurs. Ensuite, ces informations sont traitées à l'aide de techniques de transformation et de sélection d'indicateurs pour les rendre plus robustes et plus pertinentes. L'ensemble des indicateurs pertinents est ensuite utilisé comme vecteur d'entrée pour les classifieurs, qui permettent d'assigner les différentes instances et observations aux modes de fonctionnement. Ces méthodes semblent être les plus adaptées pour le diagnostic des défauts des machines tournantes, en exploitant au mieux les informations issues des capteurs installés sur les machines, sans avoir besoin de développer des modèles élaborés qui sont difficiles à créer dans ce cas complexe [23].

Nous nous concentrons sur des méthodes qui utilisent l'analyse fréquentielle pour mesurer les grandeurs suivantes [24] :

- La détection des vibrations à l'aide de capteurs de vibrations (accéléromètres...)
- La détection du couple électromagnétique.
- La détection du flux.
- L'analyse du courant de phase à l'aide de la méthode MCSA (Analyse de signature de courant de moteur) car les machines sont généralement équipées d'un capteur de courant.

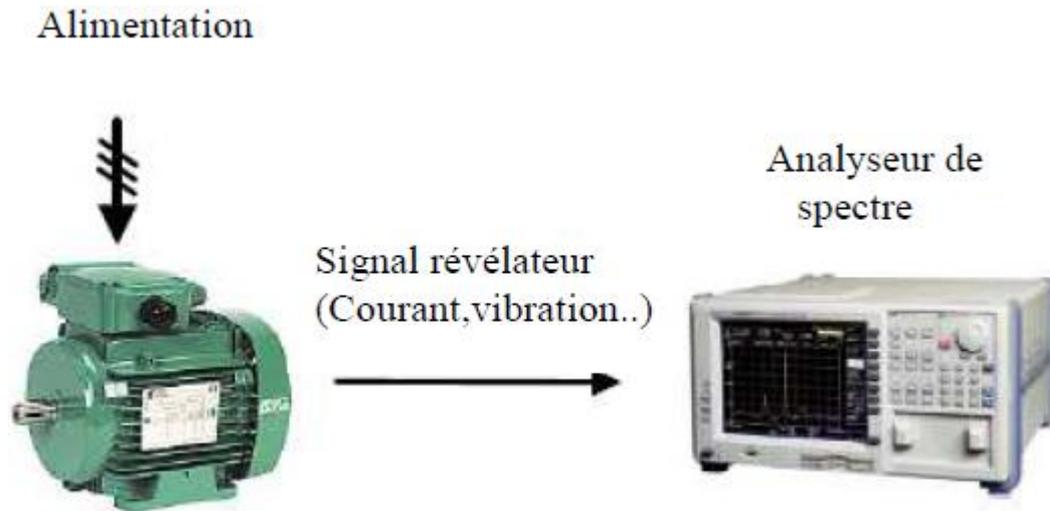


Figure I. 8. Principe de la surveillance par analyse spectrale [24]

### I.10.3. Les méthodes inductives

Ces méthodes correspondent à une approche ascendante ou de recherche vers l'avant. L'objectif est de trouver la cause du défaut à partir de ses effets sur le système. Pour ce faire, ces méthodes utilisent un mécanisme de raisonnement en avant qui consiste à interpréter les symptômes et leur combinaison afin de détecter le défaut [22].

### I.10.4. Les méthodes déductives

Le raisonnement en arrière est la principale caractéristique de ces méthodes. À partir d'une connaissance préalable du défaut, la méthode déductive doit déterminer quels sont les effets dans le système. Une vérification des "effets trouvés" par rapport aux "effets possibles" permet de confirmer ou d'infirmer l'existence du défaut, ce qui justifie notre raisonnement.

Le diagnostic peut utiliser soit un seul type de raisonnement (en avant ou en arrière) soit une combinaison des deux (en avant et en arrière). Dans ce dernier cas, le raisonnement est appelé raisonnement mixte ou en avant-arrière. La connaissance préalable de la cause (défaut) implique la connaissance de certains effets (symptômes) [21].

## I.11. Conclusion

En conclusion, ce chapitre a abordé différents aspects essentiels liés à la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). La première partie a présenté un aperçu historique des machines électriques, suivi d'une description détaillée de la GADA, de son principe de fonctionnement, de ses avantages et inconvénients, ainsi que de son domaine d'application. La deuxième partie s'est concentrée sur l'état de l'art du diagnostic des défauts de la GADA, en

mettant en évidence les différents types de défauts possibles et les méthodes de détection utilisées pour les identifier.

En somme, ce chapitre a jeté les bases nécessaires pour approfondir notre compréhension de la GADA, de ses caractéristiques et de ses défauts potentiels. La simulation à venir nous permettra d'approfondir davantage nos connaissances sur cette machine et de fournir des informations précieuses pour son diagnostic et sa maintenance.

Dans le prochain chapitre, nous poursuivrons notre étude en simulant la GADA à l'aide du logiciel Ansys (Maxwell) dans deux scénarios distincts : un cas sain et un cas avec présence de défaut entre les spires de stator. Nous analyserons les résultats de cette simulation afin de mieux comprendre le comportement de la GADA dans ces conditions et d'extraire des conclusions pertinentes.

# **Chapitre II : Simulation de GADA dans ANSYS (maxwell)**

## II.1. Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'utilisation de la méthode des éléments finis pour étudier la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Nous avons simulé un modèle de la GADA dans le logiciel Ansys Maxwell, en simulant deux scénarios distincts : un cas où la GADA est en bon état de fonctionnement et un cas où un défaut de court-circuit entre les spires du stator est présent. L'objectif est d'extraire des résultats pertinents à partir de cette simulation et de mener une discussion approfondie sur les changements observés au niveau de la génératrice.

## II.2. Méthode d'élément finis

La méthode décrite ici consiste à découper le circuit magnétique d'une machine en éléments de petite taille, de sorte que le matériau magnétique puisse être considéré comme linéaire sur ces surfaces. En se basant sur les équations locales de Maxwell, il est possible de formuler le problème à résoudre. La résolution analytique de ce problème est complexe et ne permet qu'une approximation de la saturation magnétique. Toutefois, les progrès réalisés dans le domaine des calculateurs ont rendu possible une résolution numérique plus précise. Il convient de noter que cette méthode a été historiquement développée pour analyser le champ électromagnétique et pour optimiser la conception et la taille des composants.

La méthode des éléments finis est largement utilisée pour simuler de manière précise et fidèle le comportement électromagnétique d'une machine, y compris la manifestation localisée des dysfonctionnements réels. Cette méthode se caractérise par les éléments suivants :

- Prise en compte de la géométrie de la machine.
- Prise en compte de l'effet de peau dans les barres rotoriques.
- Tenir compte des non linéarités des propriétés physiques dans les matériaux magnétiques.
- La méthode des éléments finis est capable d'examiner l'effet de saturation et les effets d'harmoniques de l'espace, cet avantage est très important particulièrement pour détecter les défauts en utilisant la technique d'analyse spectrale.
- De point de vue pratique, il est très facile de faire varier les conditions de fonctionnement de la machine (fréquence et flux magnétisant), en changeant simplement les données du programme de calcul d'où une grande souplesse d'utilisation.

Ainsi, malgré les ressources et le temps de calcul considérables qu'elle requiert, la méthode des éléments finis se révèle être la plus fidèle en termes de comportement électromagnétique de la machine. C'est précisément cette fidélité qui a orienté et justifié notre choix de cette méthode pour notre étude [25].

## II.2.2. Les équations de Maxwell :

### II.2.2.1 Définition :

Les équations de Maxwell représentent la formulation mathématique complète qui régit tous les phénomènes électromagnétiques dans tous les dispositifs. Ces équations sont généralement interdépendantes, ce qui signifie que les phénomènes magnétiques et électriques sont étroitement liés [26].

### II.2.2.2 Les équations :

#### 1) Equation de Maxwell-Faraday :

Le champ électrique induit est utilisé dans de nombreux générateurs électriques. Lorsqu'un aimant permanent tourne et crée un champ magnétique en mouvement, cela génère un champ électrique dans un fil situé à proximité.

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (\text{II.1})$$

#### 2) Equation de Maxwell-Ampère :

Les champs magnétiques peuvent être générés de deux manières : par la variation d'un champ électrique ou par le passage de courants électriques.

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (\text{II.2})$$

#### 3) Equation de conservation de flux magnétique :

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.3})$$

#### 4) Equation de Maxwell-Gauss :

Un champ électrique est généré par la présence de charges électriques. Ce champ électrique est orienté de manière à partir des charges positives et se diriger vers les charges négatives. Plus précisément, cette loi établit une relation entre le flux électrique à travers n'importe quelle surface de Gauss fermée.

$$\text{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$\vec{H}$  : Champ magnétique (A/m)

$\vec{E}$  : Champ électrique (V/m)

$\vec{B}$  : Induction magnétique (T)

$\vec{J}$  : Densité de courant (A/m<sup>2</sup>)

$\vec{D}$  : Induction électrique (C/m<sup>2</sup>)

$\rho$  : Charge volumique (C/m<sup>3</sup>)

$\frac{dD}{dt}$  : Densité de courant de déplacement (A/m<sup>2</sup>)

Ces équations sont applicables indépendamment du milieu considéré.

Ce sont des équations locales, ce qui signifie qu'elles établissent des relations entre les valeurs locales (ponctuelles) des grandeurs et de leurs dérivées.

Les distributions de  $\rho$  (densité de charge) et  $J$  (densité de courant) sont des distributions réelles et sont supposées être connues.

Les grandeurs ***E et D, H et B, J et E*** ne sont pas (respectivement) indépendantes entre elles car elles sont liées par les lois de comportement des milieux, appelées aussi relations constitutives.

Ces lois, qui dépendent du milieu considéré, expriment la réponse de la matière aux champs électromagnétiques. Elles sont établies à partir de l'expérience et ne sont que des approximations. En plus des équations de Maxwell, des relations supplémentaires doivent être prises en compte en fonction des propriétés spécifiques des milieux auxquels elles s'appliquent. Ces relations sont connues sous le nom d'équations constitutives, et dans le cas général, elles sont exprimées sous la forme suivante :

$$B = \mu * H + \mu_0 * M \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$\mu = \mu_0 * \mu_r \quad (\text{II.6})$$

$\vec{M}$  : L'aimantation des aimants (A/m).

$\mu_0$  : Perméabilité magnétique du vide (H/m).

$\mu$  : Perméabilité magnétique absolue (H/m).

$\mu_r$  : Perméabilité magnétique relative du milieu.

### II.3. Ansys (MAXWELL)

Ansys Maxwell est un solveur de champ EM pour les machines électriques, les transformateurs, la charge sans fil, les verrous à aimant permanent, les actionneurs et autres dispositifs mécaniques électriques. Il résout les champs magnétiques et électriques statiques,

fréquentiels et variant dans le temps. Maxwell propose également des interfaces de conception spécialisées pour les machines électriques et les convertisseurs de puissance [27].

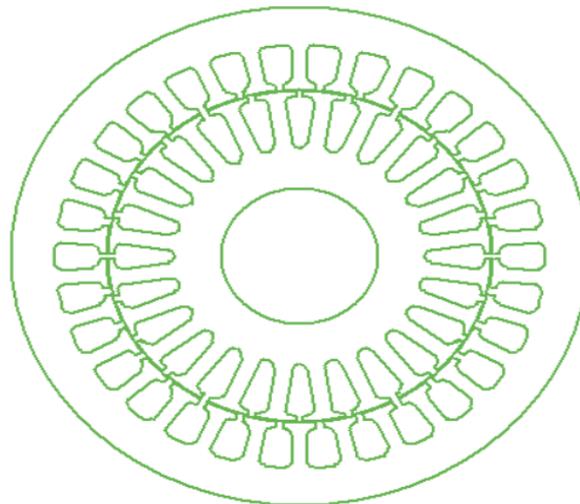
### II.3.1. Génératrice asynchrone a double alimentation dans ansys

Nous avons découvert cette simulation dans les exemples d'Ansys Maxwell, et nous avons également identifié les paramètres correspondant à notre GADA dans cet exemple.

**Tableau II. 1.** Paramétrés de GADA dans ansys

Paramètres électriques et dimensionnels	Valeur
Puissance de sortie nominale	550 W
Tension nominale	220 V
la vitesse nominale	1500 tr/min
Nombre de paires de pôles	2
Nombre d'encoches du stator	30
Nombre d'encoches du Rotor	24

Remplir le reste des valeurs de Gada se présente sous la forme dans la figure II.1



**Figure II. 1.** GADA dans Ansys (Maxwell)

Ensuite, nous créons une forme 2D design comme indiqué dans la figure suivante

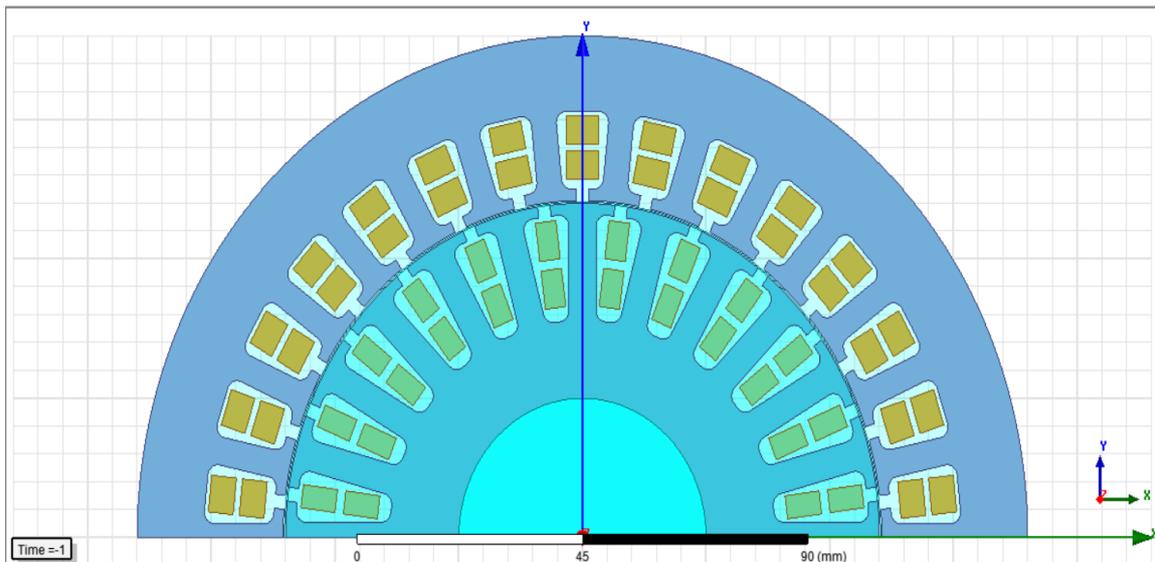


Figure II. 2. 2D design de GADA dans ansys (Maxwell)

## II.4. Résultat de simulation

Après avoir exécuté la simulation, les résultats suivants apparaissent

### II.4.1. GADA a fonctionnement à l'état sain

#### A. Tension de stator

La figure II.3 montre les résultats de la tension de stator en l'état sain

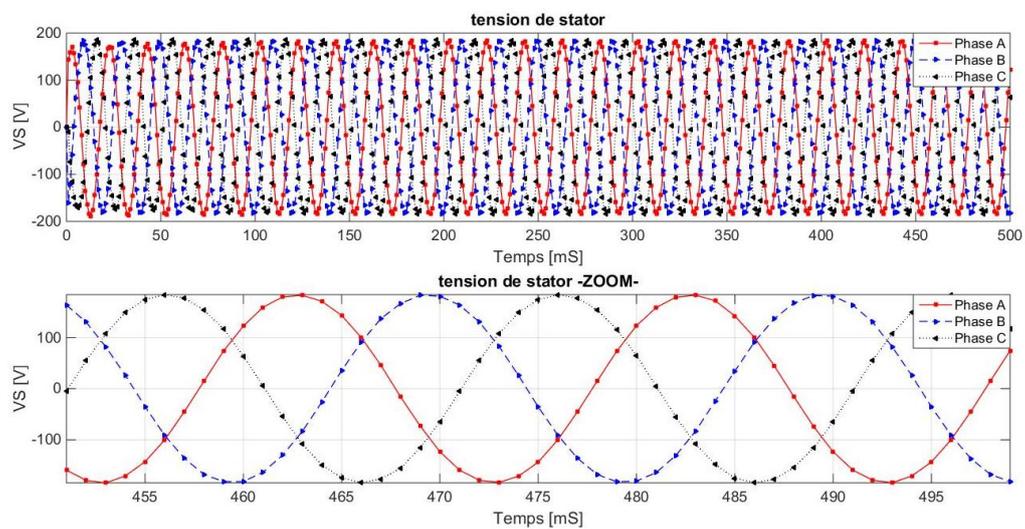


Figure II. 3. Tension statorique de GADA en fonctionnement a l'état sain

#### B. Courant statorique

La figure II.4 montre les résultats du courant statorique en l'état sain

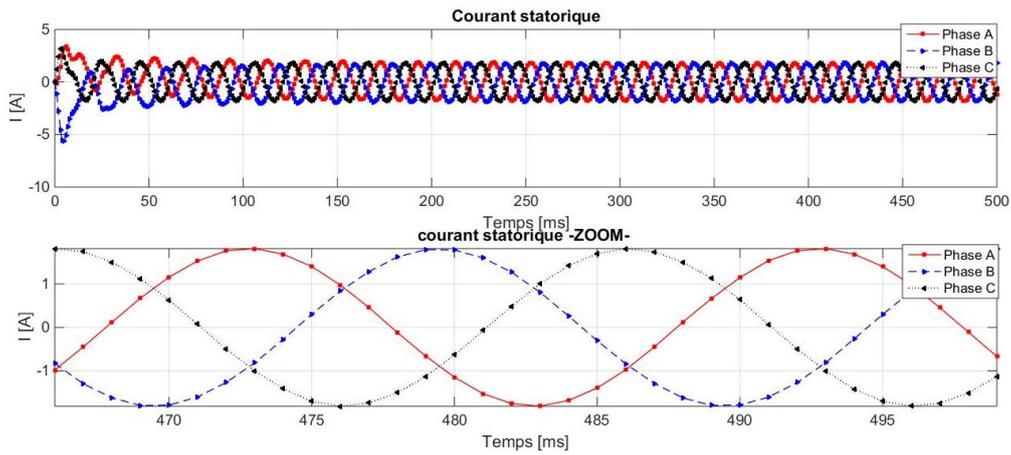


Figure II. 4. Courant statorique en fonctionnement à l'état sain

**C. Courant rotorique**

La figure II.5 montres les résultats du courant Rotorique en l'état sain

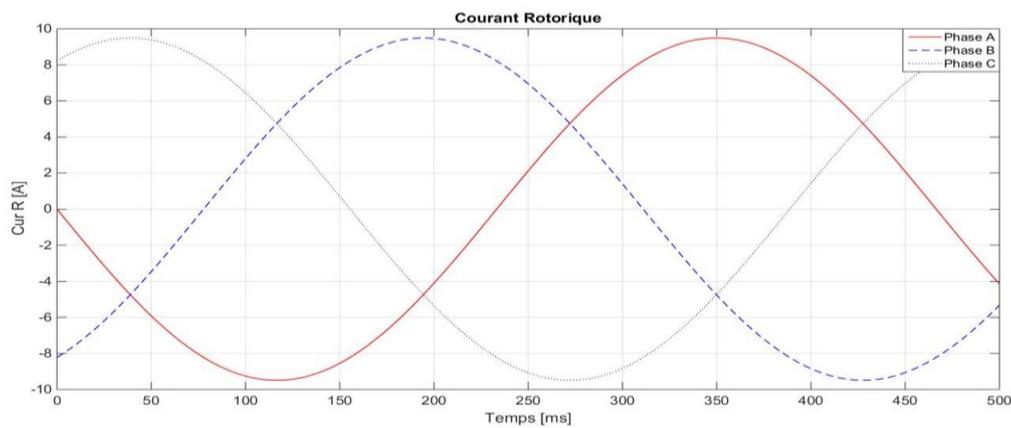


Figure II. 5. Courant Rotorique en fonctionnement sain

**D. Vitesse de rotation**

La figure II.6 montres les résultats du Vitesse de rotation en l'état sain

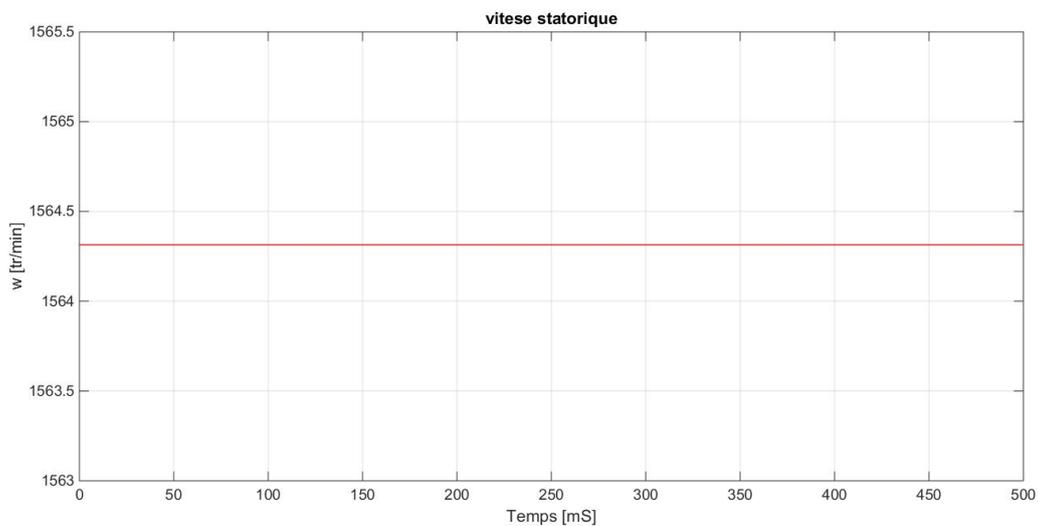
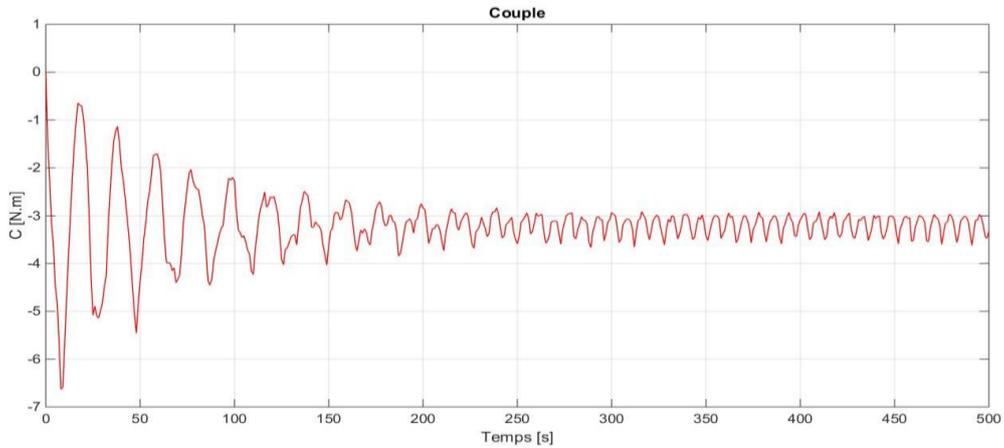


Figure II. 6. Vitesse de rotation de GADA

**E. Le Couple**

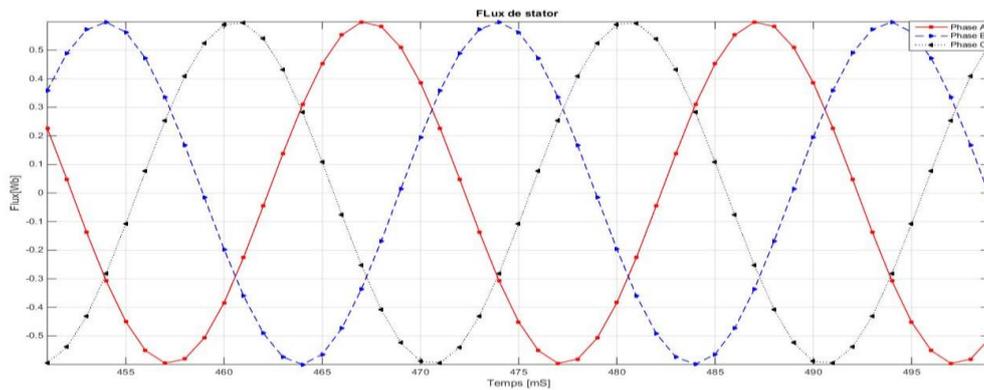
la figure II.7 montres les résultats du Couple en l'état sain



**Figure II. 7.** Couple de GADA

**F. Flux**

La figure II.8 montres les résultats du Flux en l'état sain



**Figure II. 8.** Flux de GADA en fonctionnement à l'état sain

**II.4.2. GADA en fonctionnement avec défaut de court-circuit entre les spires**

Dans le but d'obtenir les résultats actuels pour le stator en fonctionnement avec défaut, nous avons délibérément réduit le nombre de spire dans encoche de GADA, en utilisant différentes phases et pourcentages qui sont indiqués dans le tableau II.2

**Tableau II. 2.** Tableau pour définir les cas de défaut

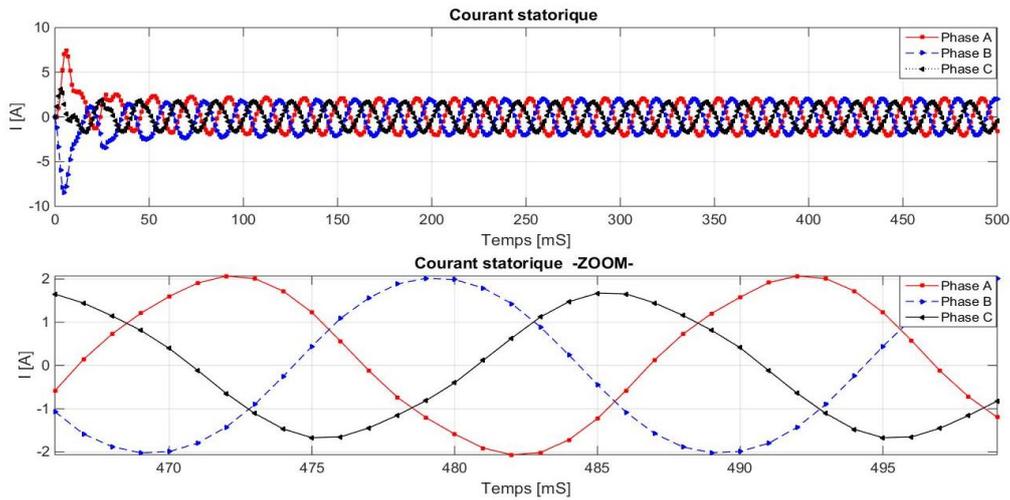
N° Cas	Pourcentage
1 <sup>er</sup> Cas	25%
2 <sup>em</sup> Cas	75%
3 <sup>em</sup> Cas	80%

### II.4.2.1. Défaut dans la phase A

Suite à la modification des nombres de spires dans les encoches de la phase A en utilisant divers pourcentages, un défaut de court-circuit se produit, ce qui conduit aux résultats suivants :

#### 1) 1<sup>er</sup> Cas :

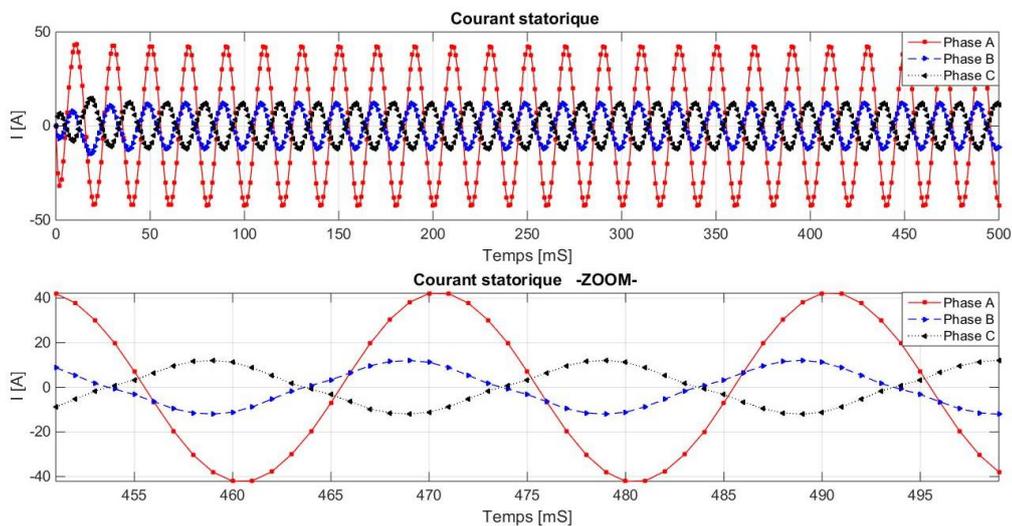
La figure II.9 montre les résultats du courant statorique en fonctionnement avec défaut (25%)



**Figure II. 9.** Courant statorique en fonctionnement avec 25% de défaut (PhA)

#### 2) 2<sup>em</sup> Cas :

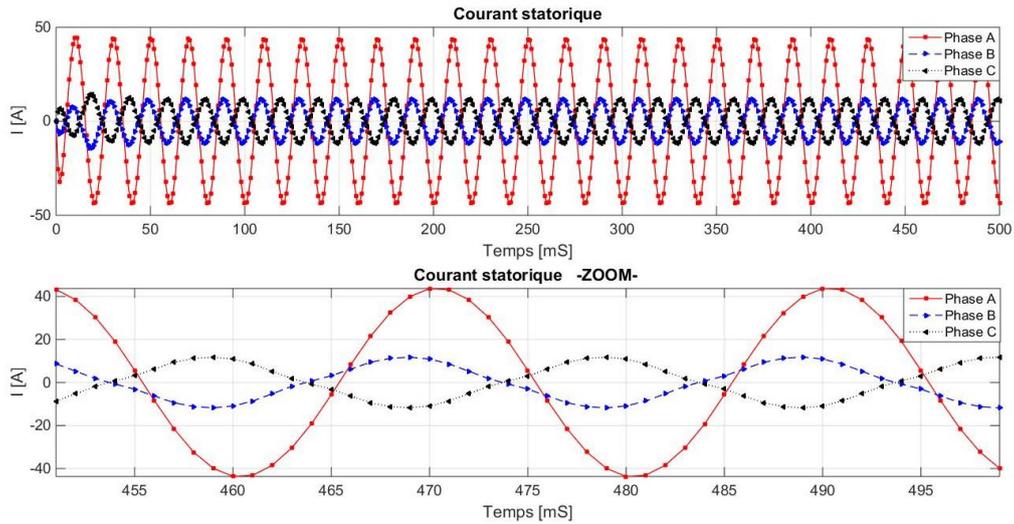
La figure II.10 montre les résultats du courant statorique en fonctionnement avec défaut (75%)



**Figure II. 10.** Courant statorique en fonctionnement avec 75% de défaut (PhA)

#### 3) 3<sup>em</sup> Cas :

La figure II.11 montre les résultats du courant statorique en fonctionnement avec défaut (80%)



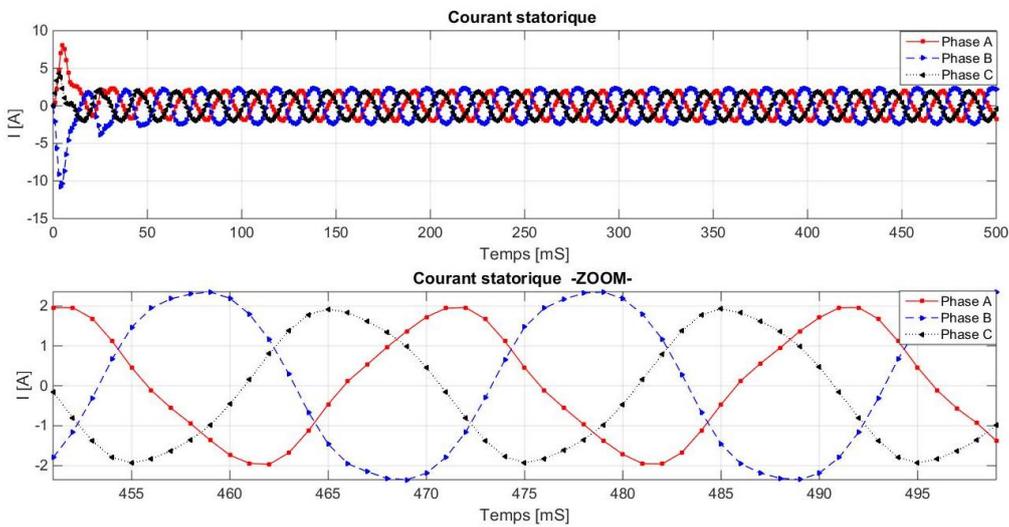
**Figure II. 11.** Courant statorique en fonctionnement avec 80% de défaut (PhA)

**II.3.2.2. Défaut dans phase A et B**

Suite à la modification des nombres de spires dans les encoches de la phase A et B en utilisant divers pourcentages, un défaut de court-circuit se produit, ce qui conduit aux résultats suivants :

**1) 1<sup>er</sup> Cas :**

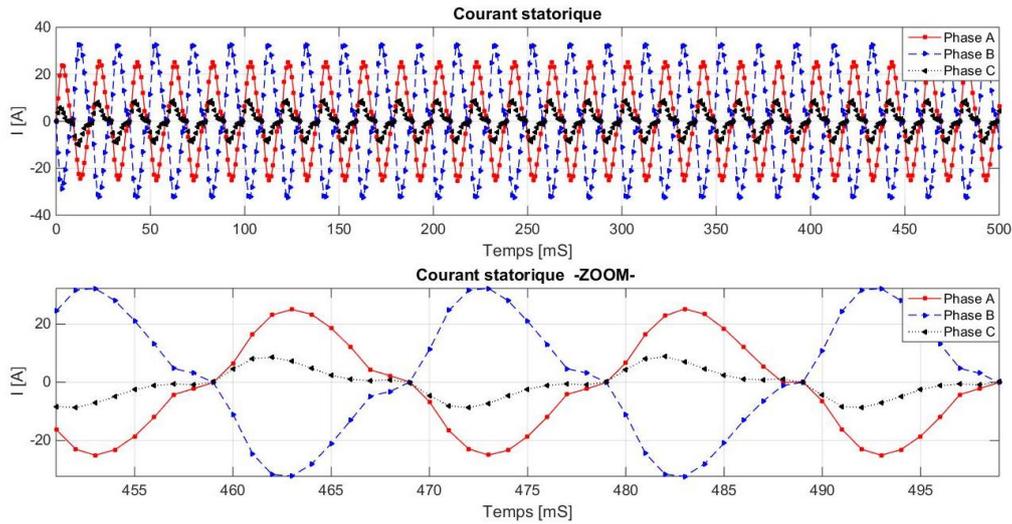
La figure II.12 montres les résultats du courant statorique en fonctionnement avec défaut (25%)



**Figure II. 12.** Courant statorique en fonctionnement avec 25% de défaut (PhAB)

**2) 2<sup>em</sup> Cas :**

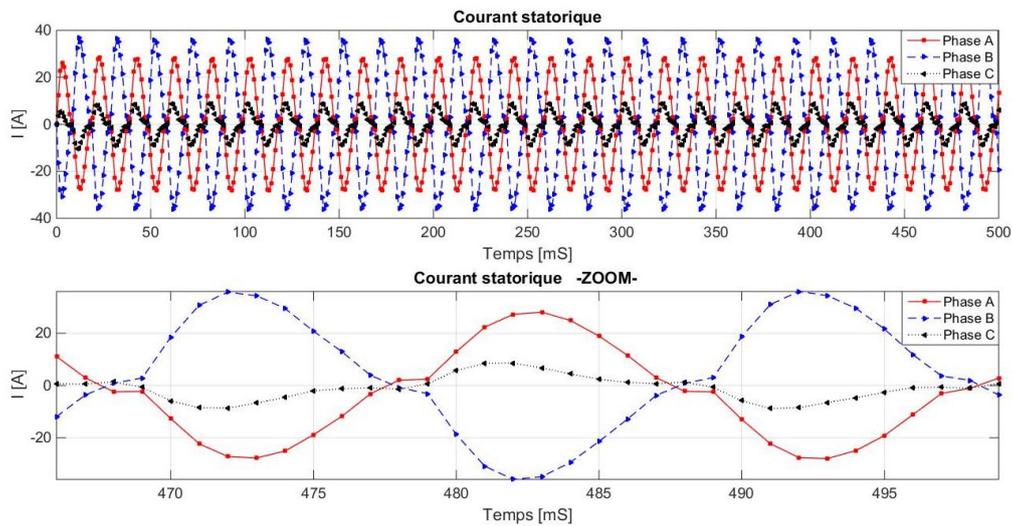
La figure II.13 montres les résultats du courant statorique en fonctionnement avec défaut (75%)



**Figure II. 13.** Courant statorique en fonctionnement avec 75% de défaut (PhAB)

**3) 3<sup>em</sup> Cas :**

La figure II.14 montres les résultats du courant statorique en fonctionnement avec défaut (80%)



**Figure II. 14.** Courant statorique en fonctionnement avec 80% de défaut (PhAB)

**II.4.2.2. Défaut dans phase A et B et C**

Suite à la modification des nombres de spires dans les encoches de la phase A et B et C en utilisant divers pourcentages, un défaut de court-circuit se produit, ce qui conduit aux résultats suivants :

**1) 1<sup>er</sup> Cas :**

La figure II.15 montres les résultats du courant statorique en fonctionnement avec défaut (25%)

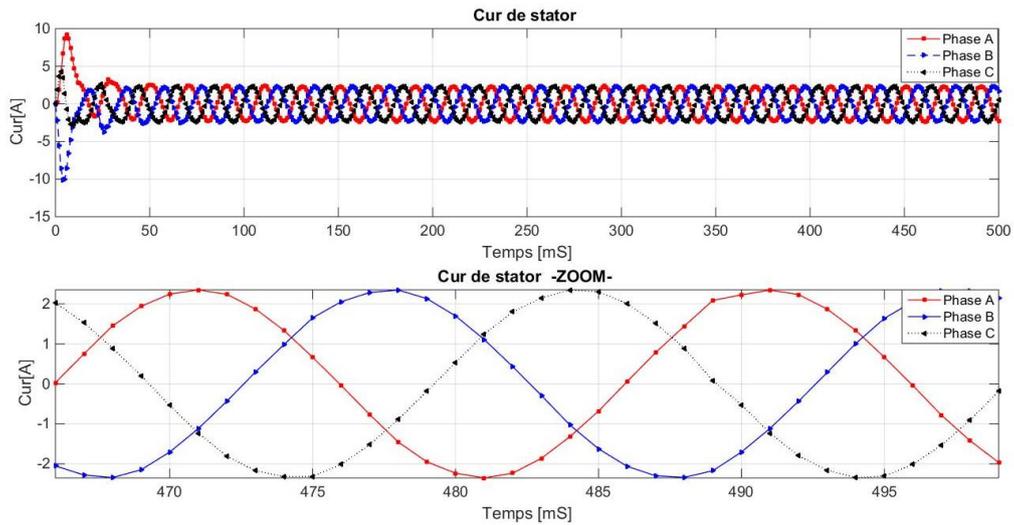


Figure II. 15. Courant statorique en fonctionnement avec 25% de défaut (PhABC)

2) 2<sup>em</sup> Cas :

La figure II.16 montres les résultats du courant statorique en fonctionnement avec défaut (75%)

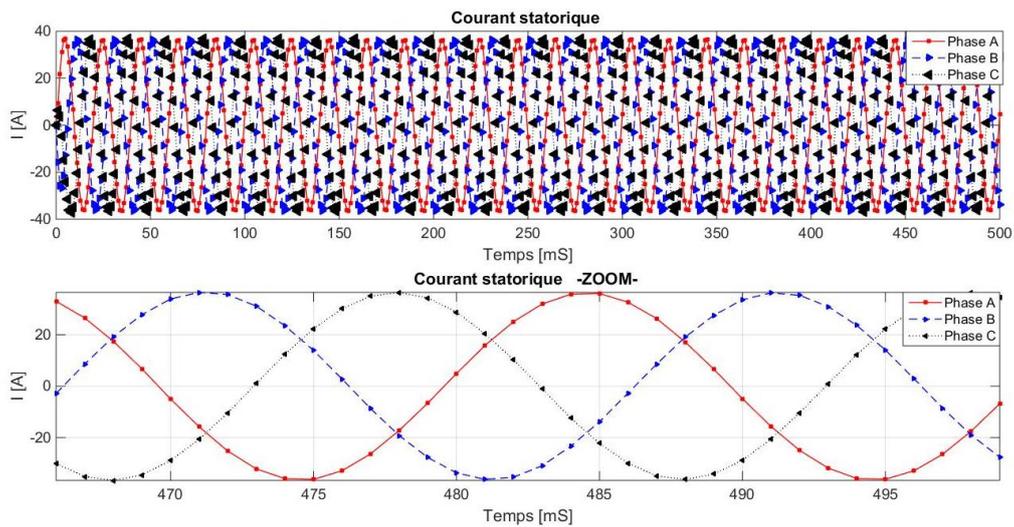
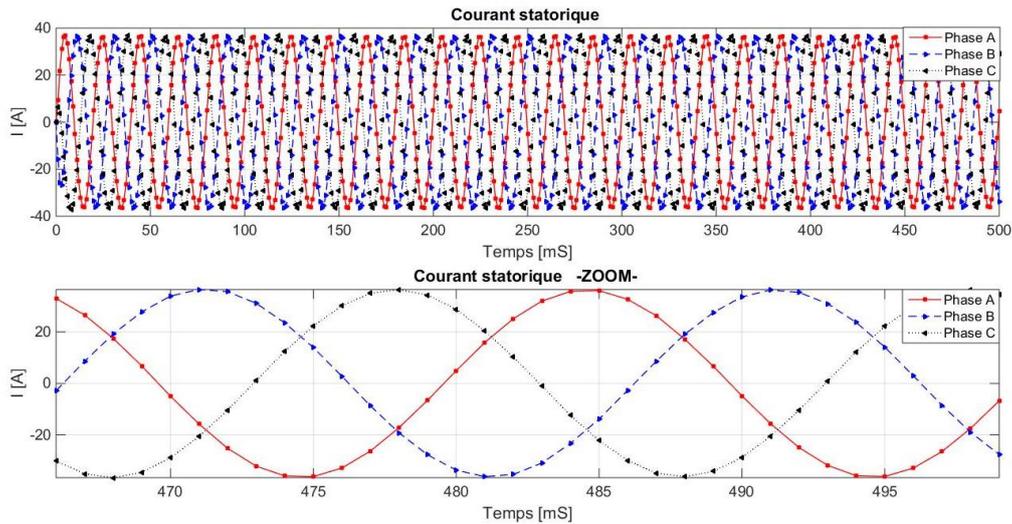


Figure II. 16. Courant statorique en fonctionnement avec 75% de défaut (PhABC)

3) 3<sup>em</sup> Cas :

La figure II.17 montres les résultats du courant statorique en fonctionnement avec défaut (80%)



**Figure II. 17.** Courant statorique en fonctionnement avec 80% de défaut (PhABC)

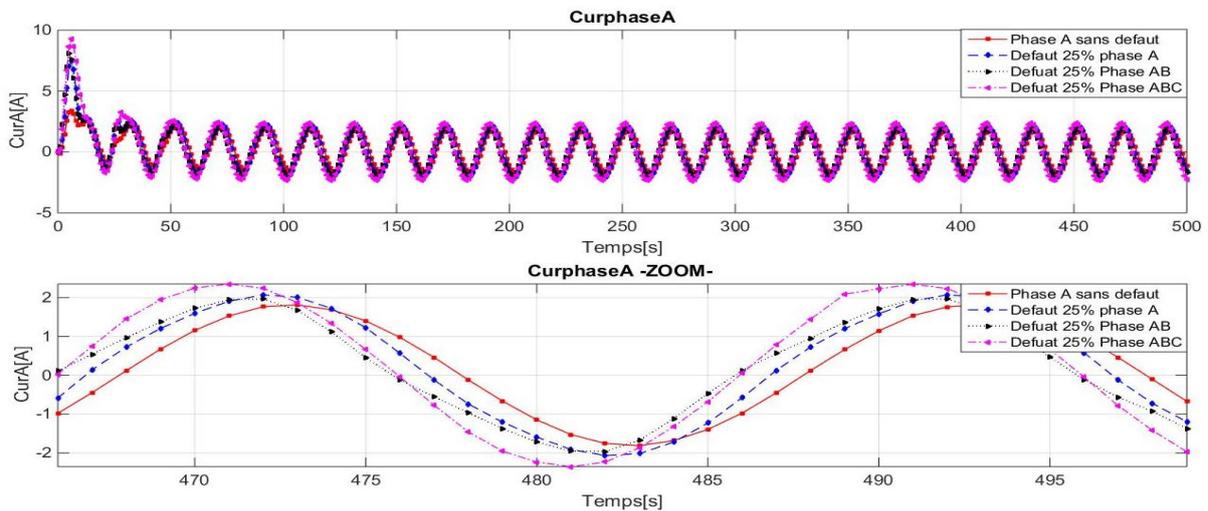
### II.4.3. Comparaison des résultats

Un des extraits de résultats, nous procédons à une comparaison en fonction du pourcentage de défaut, ainsi que du nombre de phases affectées par le de défaut

#### II.4.3.1. Comparaison par les pourcentages

##### 1) 1<sup>er</sup> Cas :

Après avoir généré un défaut de 25% dans les différentes phases (A, B, C), nous avons recueilli les résultats et obtenu la figure ci-dessous :

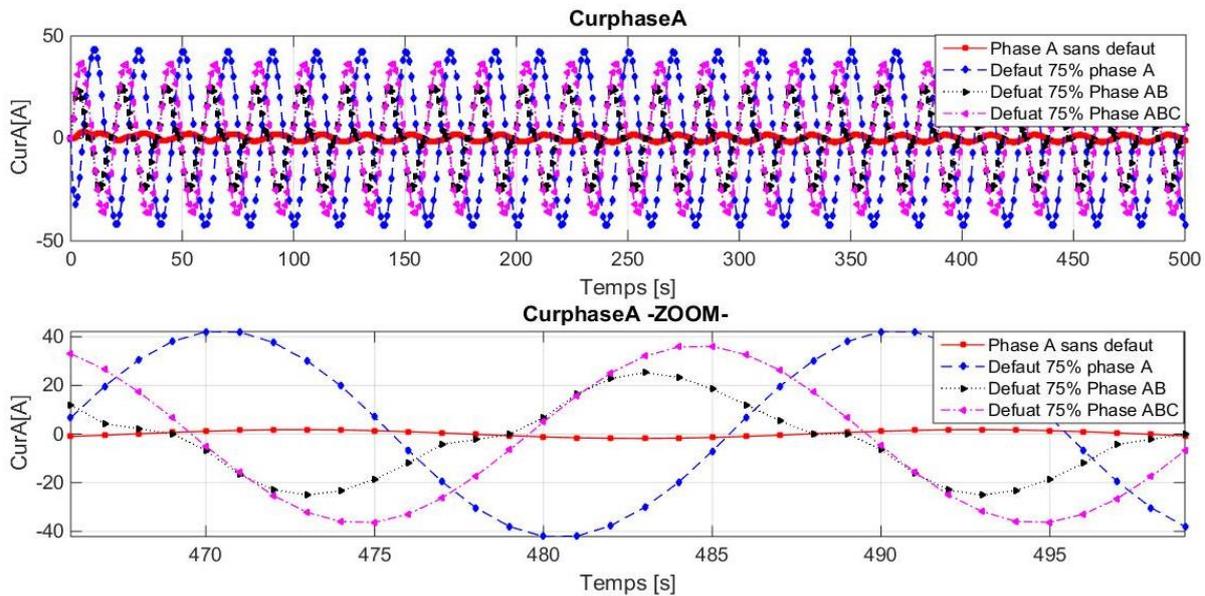


**Figure II. 18.** Courant dans la phase A avec 25% de défaut

Lors de l'observation du défaut de 25% dans les différentes phases, nous avons constaté une légère augmentation du courant de la phase A à mesure que le nombre de phases en défaut augmentait.

2) 2<sup>em</sup> Cas :

Après avoir généré un défaut de 75% dans les différentes phases (A, B, C), nous avons recueilli les résultats et obtenu la figure ci-dessous :



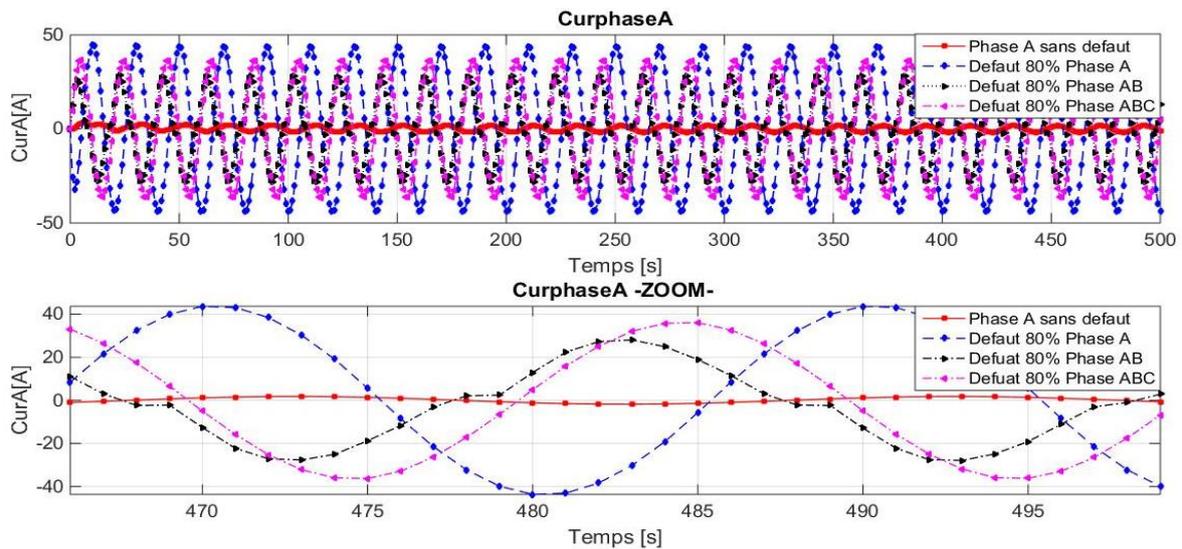
**Figure II. 19.** Courant dans la phase A avec 75% de défaut

Lors de l'observation d'un défaut de 75% dans les différentes phases, nous avons remarqué une augmentation significative du courant dans la phase A en fonction du nombre de phases défectueuses. Cette augmentation était nettement plus importante que celle observée pour les défauts précédents, en particulier lorsque le défaut se produisait dans la phase A.

Nous avons constaté une augmentation considérable du courant dans la phase A lorsque le défaut était limité à cette phase, par rapport aux cas où le défaut impliquait les phases A et B, ainsi que les phases A, B et C. Cela s'explique par le fait que lorsque le défaut était présent uniquement dans la phase A, les phases B et C étaient intactes, ce qui signifiait que la phase A supportait toute la charge du défaut. En revanche, lorsque le défaut était présent dans les phases A et B, ainsi que dans les phases A, B et C, le défaut se propageait aux différentes phases, répartissant ainsi la charge entre elles.

3) 3<sup>em</sup> Cas :

Après avoir généré un défaut de 80% dans les différentes phases (A, B, C), nous avons recueilli les résultats et obtenu la figure ci-dessous :



**Figure II. 20.** Courant dans la phase A avec 80% de défaut

Lors de l'observation d'un défaut de 75%, nous avons remarqué que la même observation s'est reproduite pour un défaut de 80%, avec une légère augmentation de la valeur du courant.

### **Interprétation :**

L'observation des défauts dans les différentes phases d'un système met en évidence des variations significatives du courant en fonction de la nature et de l'étendue des défauts.

Lors de l'observation d'un défaut de 25% dans les différentes phases, nous avons noté une légère augmentation du courant dans la phase A à mesure que le nombre de phases en défaut augmentait. Cela suggère que la présence de défauts dans d'autres phases peut avoir un léger impact sur le courant de la phase A.

Lorsque nous avons observé un défaut de 75% dans les différentes phases, nous avons remarqué une augmentation considérable du courant dans la phase A par rapport aux défauts précédents. Cette augmentation était particulièrement significative lorsque le défaut se produisait uniquement dans la phase A, car elle supportait toute la charge du défaut. Cependant, lorsque le défaut impliquait les phases A et B, ainsi que les phases A, B et C, la charge était répartie entre les différentes phases, ce qui atténuait l'augmentation du courant.

Il convient de noter que lors de l'observation d'un défaut de 75%, nous avons constaté des résultats similaires lors de l'observation d'un défaut de 80%. Bien que la légère augmentation de la valeur du courant puisse être attribuée à des facteurs spécifiques à la simulation, cela souligne la tendance générale selon laquelle une augmentation de l'ampleur du défaut conduit à une augmentation proportionnelle du courant.

Ces observations mettent en évidence l'importance d'analyser les différents scénarios de défauts dans un système, en tenant compte à la fois de l'ampleur et de la répartition du défaut.

Une compréhension approfondie de ces comportements est essentielle pour la détection et le diagnostic précis des défauts,

### II.4.3.2. Comparaison par les nombres de phase de défaut

Nous avons rassemblé les résultats précédents pour différents pourcentages de défaut lorsque le défaut se trouvait dans la phase A seule, ainsi que dans les phases A et B, et enfin dans les phases A, B et C.

#### 1) Défaut dans la phase A

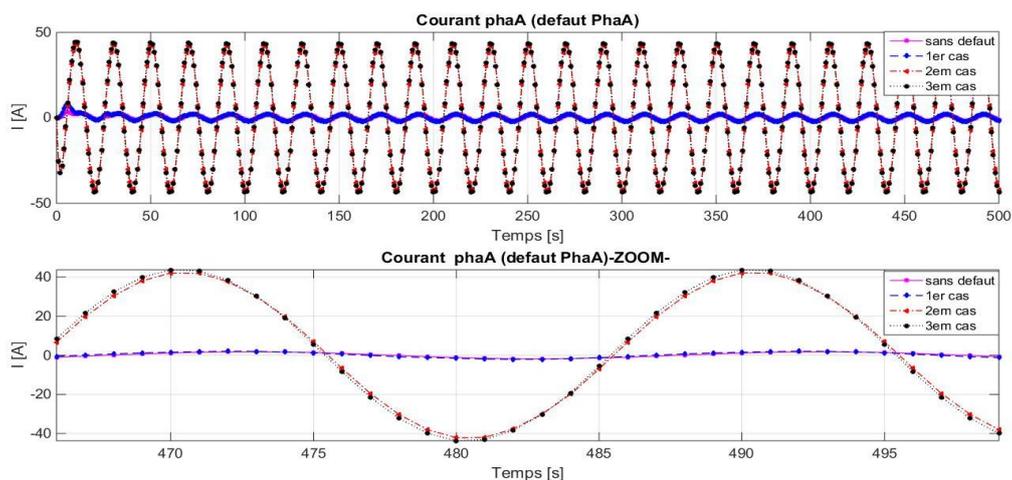


Figure II. 21. Courant dans la phase A avec le défaut dans phase A

Il est observé que lorsqu'un défaut se produit en phase A, le courant augmente en fonction de l'augmentation du pourcentage de défaut. Cependant, la différence entre les valeurs de courant pour les pourcentages de défaut de 75% et 80% est minime, car ces deux pourcentages de défaut sont proches l'un de l'autre.

#### 2) Défaut dans phase A et B

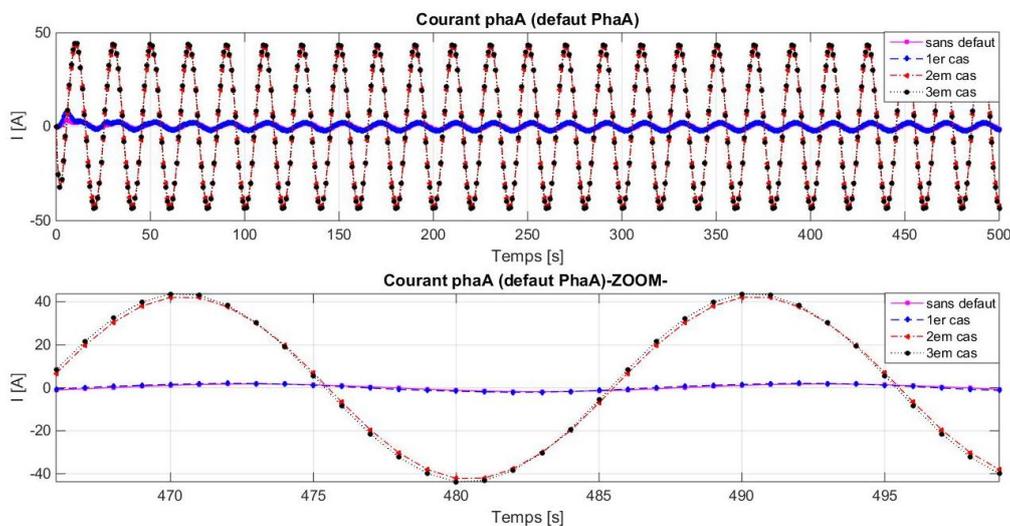
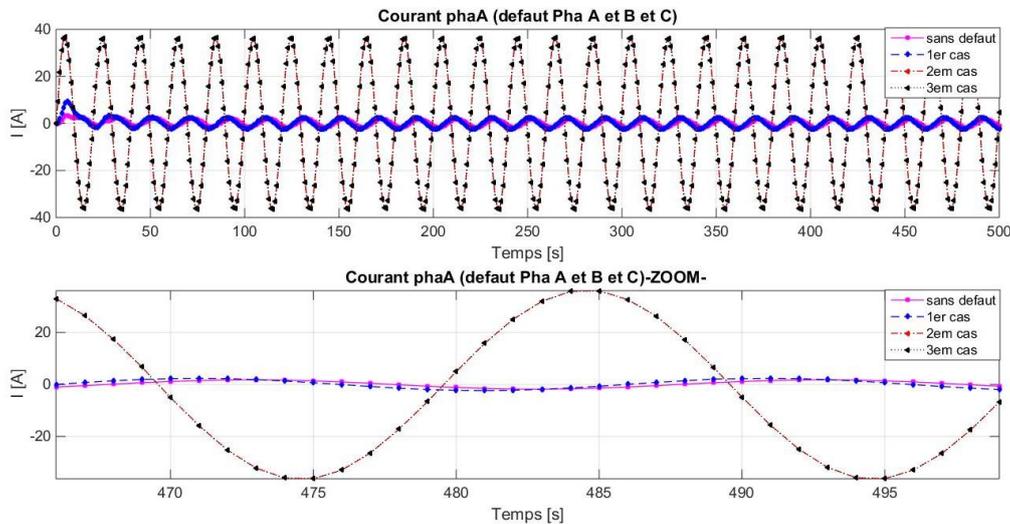


Figure II. 22. Courant dans la phase A avec le défaut dans phase A et B

nous avons observé que lorsqu'il y a un défaut simultané dans les phases A et B, les valeurs augmentent de manière similaire à celles du cas précédent.

### 3) Défaut dans phase A, B et C



**Figure II. 23.** Courant dans la phase A avec le défaut dans phase A, B et C

Lorsqu'un défaut se produit dans les phases A, B et C, on observe que la valeur du courant augmente par rapport à l'état sain à mesure que le pourcentage de défaut augmente. Cependant, ces valeurs sont inférieures à celles du défaut dans la phase A ou du défaut dans les phases A et B. Cela est dû au fait que le défaut est réparti entre les trois phases, et il est opposé aux cas précédents.

#### Interprétation :

Ces observations mettent en évidence différents comportements du courant en fonction des défauts présents dans les différentes phases d'un système.

Dans le cas d'un défaut dans la phase A, nous constatons une augmentation du courant en relation avec l'augmentation du pourcentage de défaut. Cependant, la différence entre les valeurs de courant pour les pourcentages de défaut de 75% et 80% est minime, indiquant que ces deux pourcentages de défaut sont proches l'un de l'autre.

Lorsqu'il y a un défaut simultané dans les phases A et B, les valeurs de courant augmentent de manière similaire à celles du cas précédent. Cela suggère que la présence d'un défaut dans plusieurs phases ne semble pas avoir d'effet significatif sur l'augmentation du courant par rapport à un défaut dans une seule phase.

En revanche, lorsque le défaut se produit dans les phases A, B et C, nous observons une augmentation du courant par rapport à l'état sain avec l'augmentation du pourcentage de défaut. Toutefois, les valeurs de courant dans ce cas sont inférieures à celles observées dans le cas d'un

défaut uniquement dans la phase A ou d'un défaut dans les phases A et B. Cette différence peut être attribuée à la répartition du défaut sur les trois phases et à son caractère opposé aux cas précédents.

### II.5. conclusion

En simulant la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) et en analysant les résultats du courant statorique dans différents scénarios, nous avons observé une corrélation entre le pourcentage de défaut et le nombre de phases affectées par le court-circuit, et l'amplitude du courant statorique.

L'objectif global de cette étude est de fournir une compréhension approfondie des caractéristiques et des comportements de la GADA en présence d'un défaut de court-circuit entre les spires du stator, ainsi que de proposer des méthodes de détection fiables pour identifier et localiser ce type de défaut. Ces informations sont essentielles pour la maintenance préventive et la fiabilité opérationnelle des génératrices asynchrones à double alimentation.

En conclusion, ce chapitre nous a permis de constater une corrélation entre les paramètres du défaut de court-circuit et le courant statorique. Dans le prochain chapitre, nous approfondirons l'analyse en utilisant différentes méthodes de détection pour identifier ce défaut et nous discuterons de leurs performances respectives.

Dans le prochain chapitre, nous nous concentrerons sur trois méthodes de détection de ce défaut spécifique. Nous utiliserons la méthode du vecteur de Park, l'analyse spectrale par transformée de Fourier (FFT) et la comparaison basée sur la valeur efficace pour détecter et caractériser ce défaut de court-circuit entre les spires du stator. Nous discuterons des performances de chaque méthode de détection et évaluerons leur efficacité dans la détection et le diagnostic précis de ce défaut.

# **Chapitre III : les méthodes de détection**

### III.1. Introduction

Ce chapitre se concentre sur la détection du défaut de court-circuit entre les spires du stator de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Nous avons utilisé trois méthodes de détection différentes, à savoir la méthode du vecteur de Park, l'analyse spectrale par transformée de Fourier (FFT) et la comparaison basée sur la valeur efficace du courant.

L'objectif principal de cette étude est de détecter et de caractériser précisément le défaut de court-circuit entre les spires du stator en utilisant ces différentes méthodes de détection. Nous comparerons également les résultats obtenus avec l'état sain de la génératrice afin de mettre en évidence les changements observés dans les courants.

En utilisant la méthode du vecteur de Park, nous analyserons les composantes directes du courant statorique pour identifier les variations significatives dues au défaut de court-circuit. Ensuite, nous utiliserons l'analyse spectrale par FFT pour étudier les caractéristiques fréquentielles du courant et identifier les composantes associées au défaut. Enfin, nous comparerons les valeurs efficaces du courant entre l'état sain et l'état défectueux pour détecter les changements et les écarts causés par le défaut.

Cette approche multiméthodes de détection nous permettra d'évaluer la robustesse et l'efficacité de chaque méthode dans la détection du défaut de court-circuit entre les spires du stator de la GADA. Les résultats obtenus nous aideront à comprendre les caractéristiques spécifiques du défaut et à identifier les signaux indicateurs les plus pertinents.

### III.2. Méthode de vecteur Park ( $I_b=f(I_a)$ )

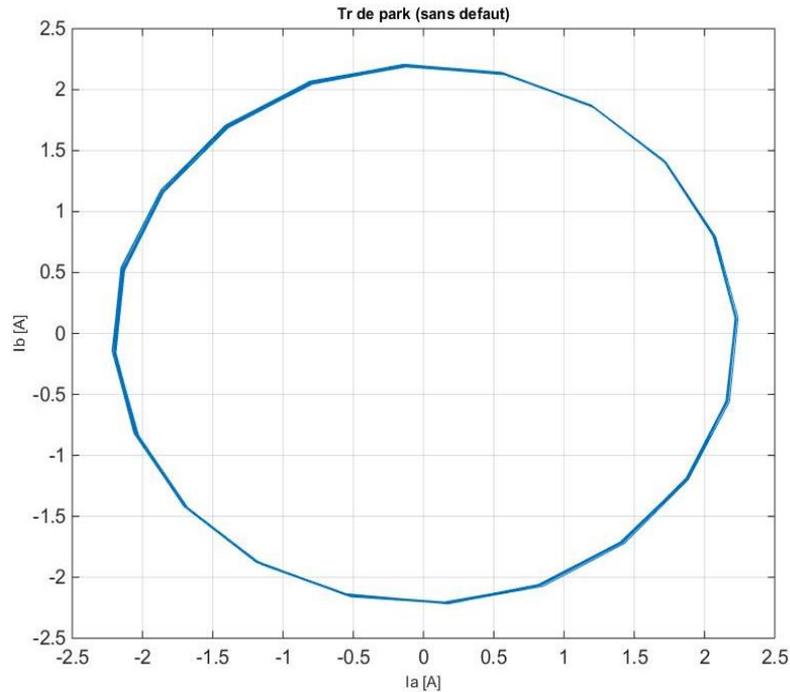
Les courants triphasés peuvent être facilement convertis d'un axe triphasé en une coordonnée d'axe biphasée en utilisant le principe de l'équilibre du potentiel magnétique. Ainsi, le vecteur  $I = i_a + j i_b$  est appelé vecteur de Park. Dans des conditions normales, la trajectoire du vecteur Park prend la forme d'un cercle centré sur l'origine. Cependant, lorsqu'un court-circuit se produit entre les spires, il se transforme en ellipse. et l'équation de transforme utilisée est [28] :

$$\begin{cases} I_a = \sqrt{\frac{2}{3}} I_A - \frac{1}{\sqrt{6}} I_B - \frac{1}{\sqrt{6}} I_C \\ I_b = \frac{1}{\sqrt{2}} I_B - \frac{1}{\sqrt{2}} I_C \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

on a utilisé cette transforme pour l'état sain et l'état avec défaut en différente cas

### III.2.1 Fonctionnement a l'état sain

La forme du  $I_b=f(I_a)$  du courant statorique représentée par la figure (III.1) est de forme circulaire

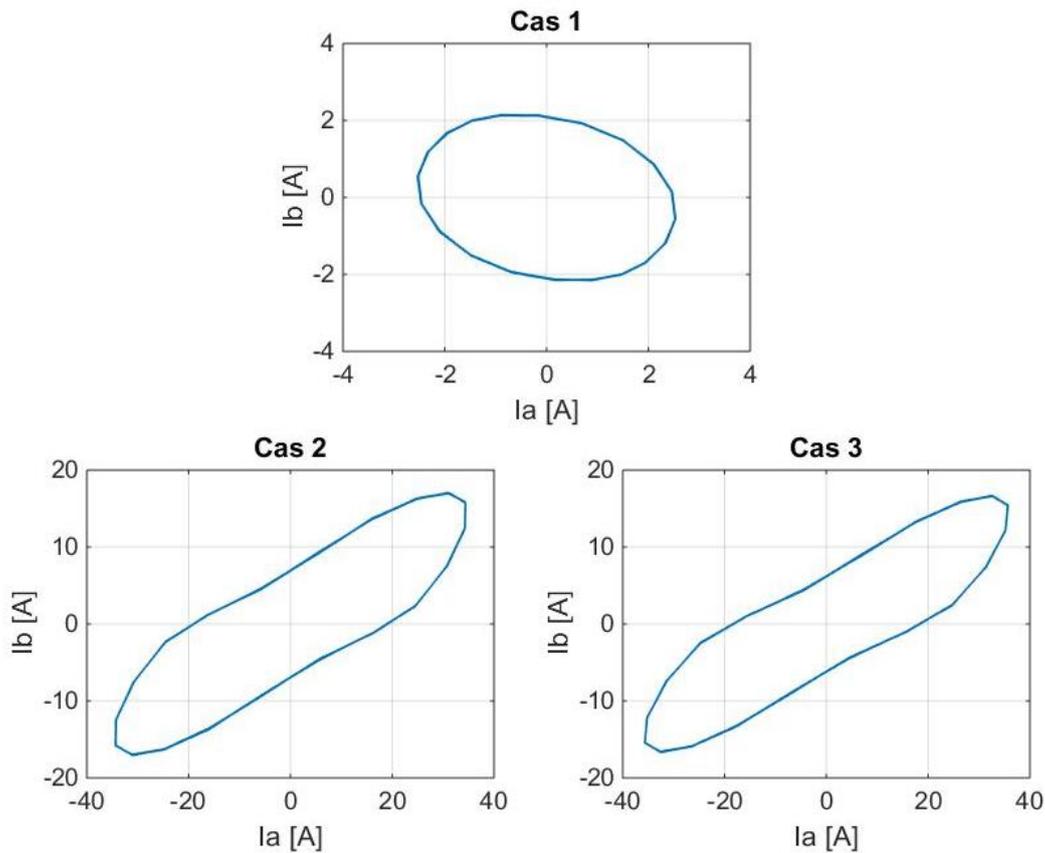


**Figure III. 1.** Forme  $I_b=f(I_a)$  en fonctionnement a l'état sain

### III.2.2. Fonctionnement avec défaut de court-circuit entre les spires

#### III.2.2.1 Défaut dans la phase A

La figure (III.2) représente la forme  $I_b=f(I_a)$  du courant statorique avec un défaut de court-circuit entre spire. Contrairement à la forme circulaire habituelle, cette forme est déformée en raison de l'effet du défaut de court-circuit statorique.

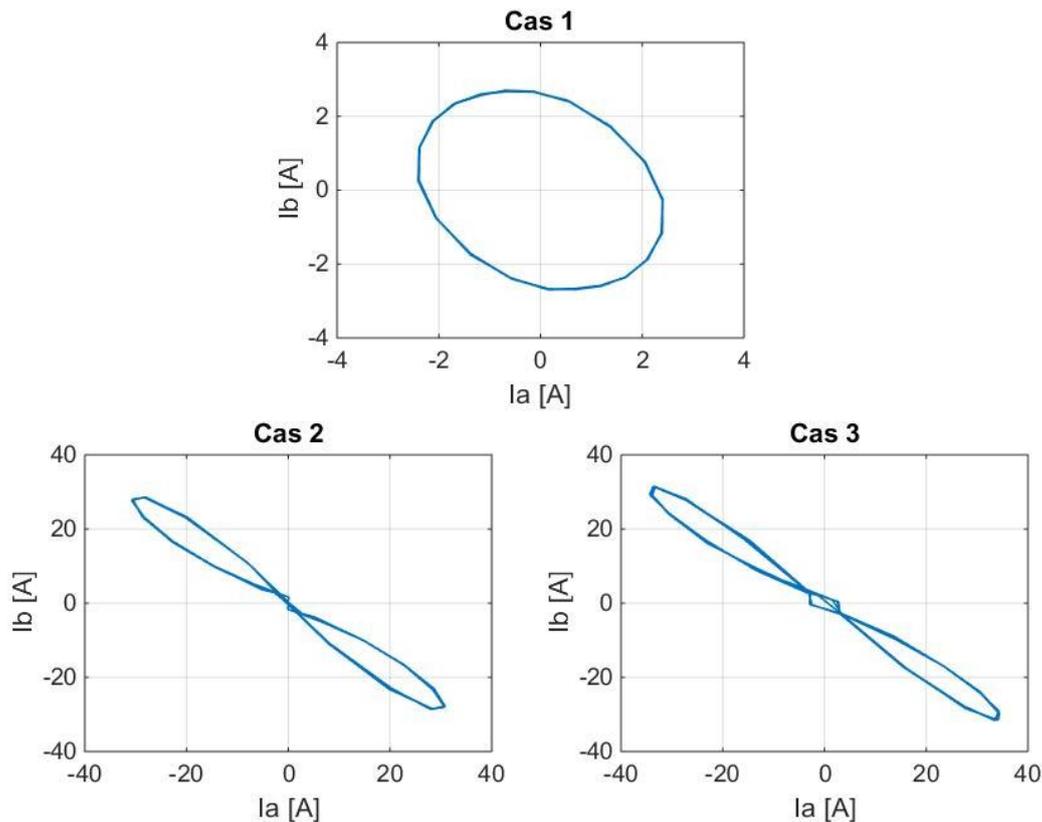


**Figure III. 2.** Forme  $I_b=f(I_a)$  en fonctionnement avec défaut dans la phase A en différent pourcentage

Comme illustré sur la figure (III.2), lorsqu'un défaut se produit dans la phase A, la forme circulaire se transforme en des formes ellipse. Cette transformation se produit à mesure que le pourcentage de défaut augmente. De plus, nous avons également constaté qu'à chaque fois que le pourcentage de défaut dépasse 25%, la forme ne conserve pas sa circularité, mais adopte plutôt une forme ellipse .

### III.2.2.2. Défaut dans la phase A et B

La figure (III.3) représente la forme  $I_b=f(I_a)$  du courant statorique avec un défaut de court-circuit entre spire. Contrairement à la forme circulaire habituelle, cette forme est déformée en raison de l'effet du défaut de court-circuit statorique.

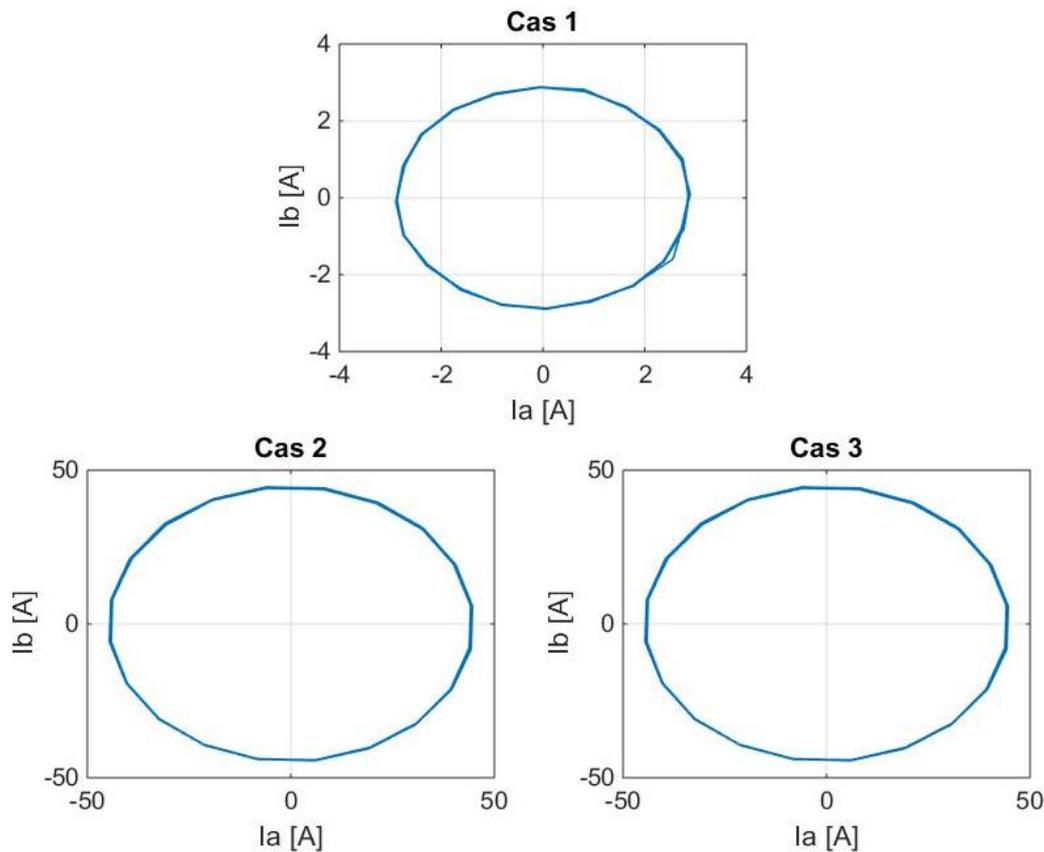


**Figure III. 3.** Forme  $I_b=f(I_a)$  en fonctionnement avec défaut dans la phase A et B en différents pourcentages

La forme de transformation présentée dans la figure (III.3) présente une variation par rapport à la figure précédente. Dans l'état précédent, le défaut était réparti exclusivement dans la phase A, tandis que dans l'état actuel, le défaut est maintenant réparti entre les phases A et B. De plus, nous avons également constaté qu'à chaque fois que le pourcentage de défaut dépasse 30%, la forme ne conserve pas sa circularité, mais adopte plutôt une forme aléatoire.

### III.2.2.3. Défaut dans la phase A, B et C

La figure (III.4) représente la forme  $I_b=f(I_a)$  du courant statorique avec un défaut de court-circuit entre spire. Contrairement à la forme circulaire habituelle, cette forme est déformée en raison de l'effet du défaut de court-circuit statorique.



**Figure III. 4.** Forme  $I_b=f(I_a)$  en fonctionnement avec défaut dans la phase A, B et C en différent pourcentage

Lorsque le défaut est survenu aux phases A, B et C, il s'est manifesté sous une forme divisée en trois phases distinctes, mais la configuration de la transformation de Park est restée la même (forme circulaire). Cependant, le rayon de cette forme circulaire a augmenté.

Par conséquent, nous pouvons conclure qu'un nouveau moteur a été créé avec un nombre de tours par degré et des valeurs mesurées différentes. Malheureusement, ce moteur est inutilisable car il a été créé à travers un défaut.

### III.3. Analyse spectrale (FFT)

Un utilise cette méthode seulement sur le régime permanent du courant dans Ansys Maxwell, il est possible d'effectuer une transformation de Fourier rapide (FFT) en utilisant une fenêtre de type Hamming.

#### III.3.1. Fonctionnement a l'état sain

La figure (III.5) montre que l'analyse spectrale de courant statorique

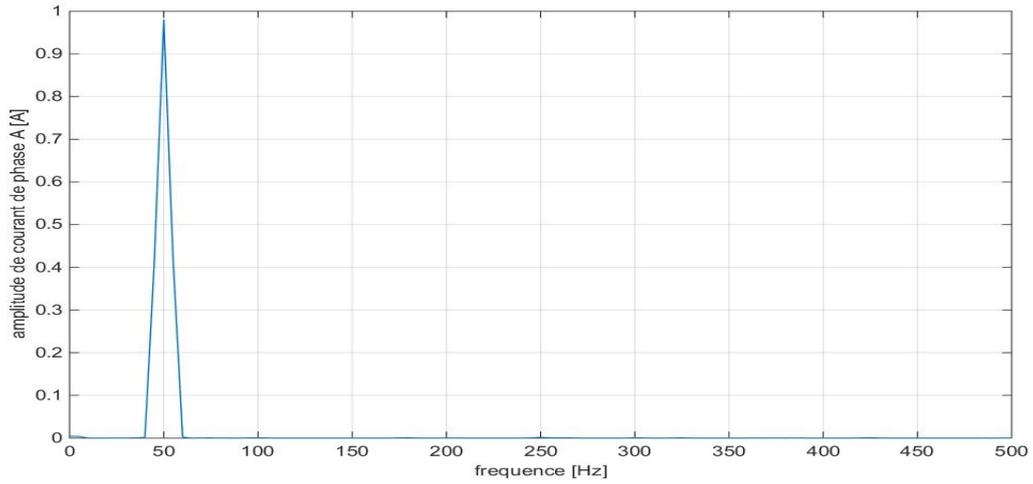


Figure III. 5. Spectre de courant de la phase A en fonctionnement à l'état sain

### III.3.2. Fonctionnement avec défaut

Après avoir créé le défaut dans plusieurs cas, nous extrayons les résultats suivants

#### III.3.2.1. Défaut dans la phase A

La figure (III.6) montre que l'analyse spectrale de courant statorique avec création de défaut dans la phase A

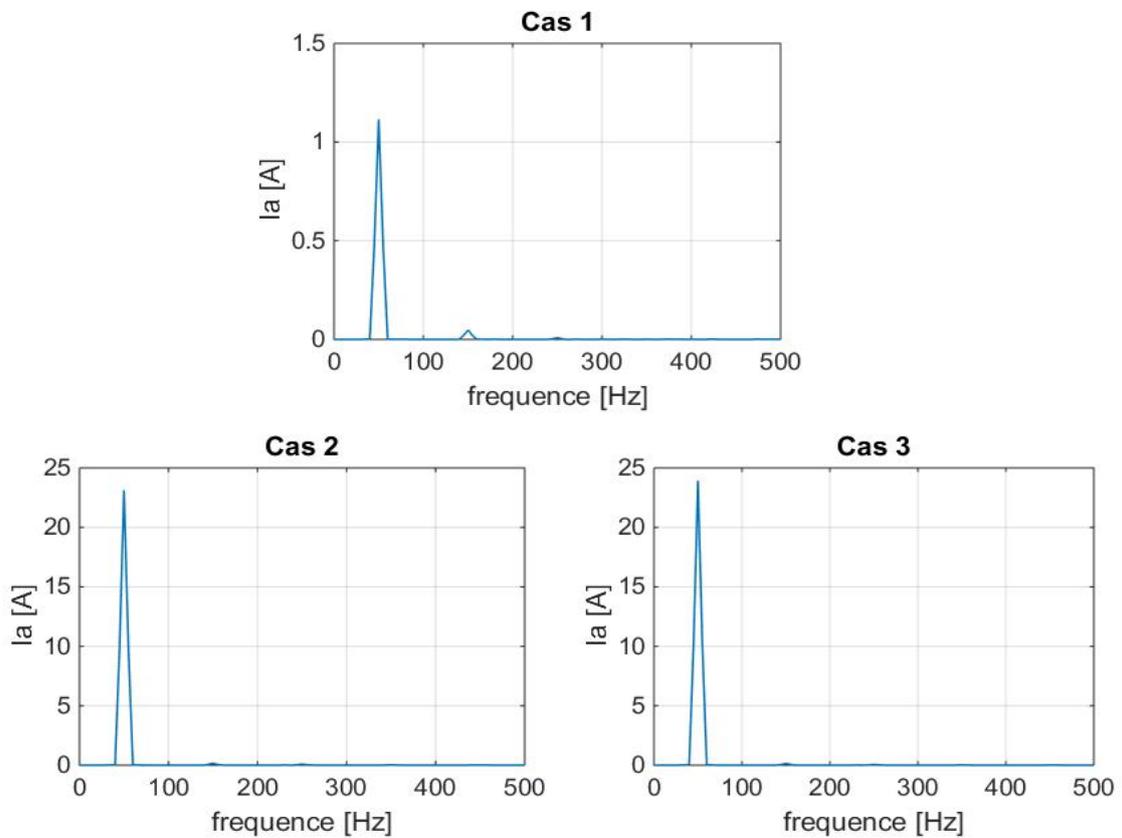


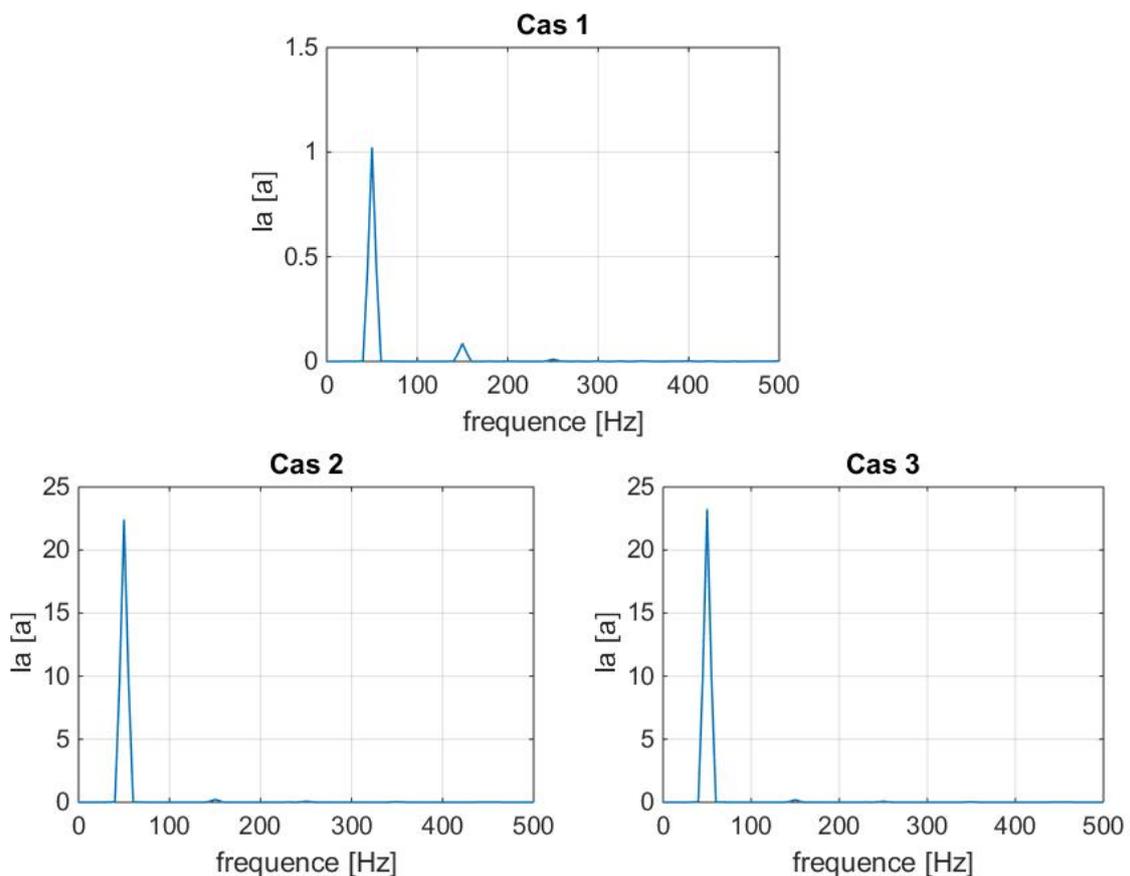
Figure III. 6. Spectre de courant de la phase A avec défaut dans la phase A

Nous observons une augmentation du spectre de courant en fonction de la gravité du défaut, et nous notons les points suivants :

- Dans le premier cas, à une fréquence de 50 Hz, le spectre de courant présente une augmentation par rapport à l'état de santé, atteignant une valeur de 150 avec une amplitude faible.
- Les 2<sup>em</sup> et 3<sup>em</sup> cas présentent une tendance similaire au premier cas, avec une augmentation significative du spectre de courant, et la différence entre les deux cas est très faible.

### III.3.2.2. Défaut dans la phase A et B

La figure (III.7) montre que l'analyse spectrale de courant statorique avec création de défaut dans la phase A et B

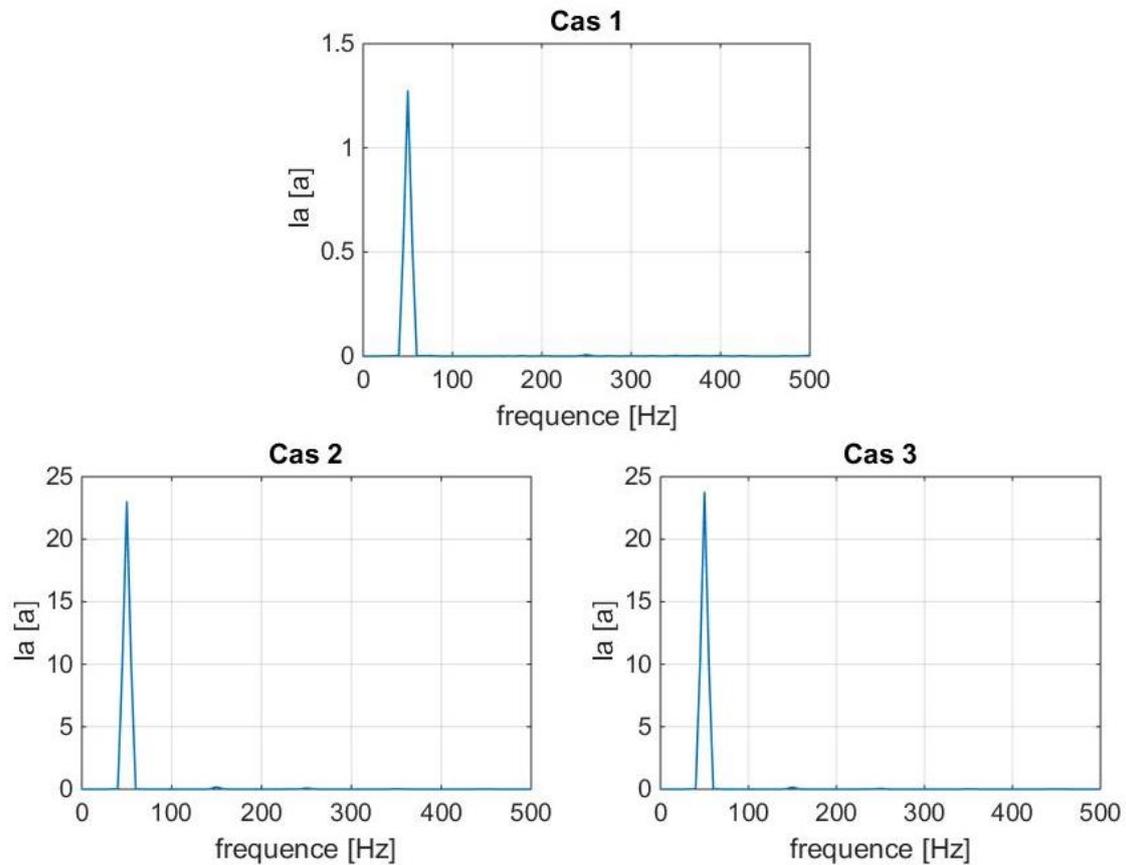


**Figure III. 7.** Spectre de courant de la phase A avec défaut dans la phase A et B

Dans le cas suivant, nous remarquons des résultats similaires à ceux du cas précédent, mais avec une augmentation de la valeur. De plus, dans le premier cas, nous notons l'apparition d'une valeur lorsque la fréquence atteint 150 Hz avec une amplitude faible.

### III.3.2.3. Défaut dans la phase A, B et C

La figure (III.8) montre que l'analyse spectrale de courant statorique avec création de défaut dans la phase A, B et C



**Figure III. 8.** Spectre de courant de la phase A avec défaut dans la phase A, B et C

Dans le cas suivant, nous constatons une similitude avec l'état sain, mais avec une augmentation significative de la valeur. De plus, nous remarquons l'apparition d'une valeur plus petite lorsque la fréquence atteint 150

#### **Interprétation :**

Cette observation met en évidence une relation claire entre la gravité du défaut et le spectre de courant. Nous pouvons voir que, dans tous les cas mentionnés, une augmentation du spectre de courant est observée par rapport à l'état de santé. Cette augmentation est plus marquée dans le troisième et quatrième cas, ce qui indique une gravité plus élevée du défaut. De plus, l'apparition d'une nouvelle valeur à des fréquences spécifiques, comme 150 Hz et 250 Hz, suggère une réponse distincte du système en présence du défaut.

Ces résultats soulignent l'importance de l'analyse du spectre de courant pour détecter et évaluer la gravité des défauts. La corrélation entre la fréquence et l'amplitude du spectre de

courant permet d'obtenir des informations précieuses sur l'état du système étudié. Une augmentation significative du spectre de courant indique généralement une détérioration accrue du système, tandis que l'apparition de nouvelles valeurs à des fréquences spécifiques peut être liée à des défauts particuliers ou à des perturbations dans le système.

Ces observations ouvrent la voie à des méthodes de détection et de surveillance des défauts basées sur l'analyse du spectre de courant. En identifiant les caractéristiques distinctes du spectre de courant, il est possible de développer des techniques de diagnostic plus précises pour évaluer l'état de santé des systèmes et prendre des mesures appropriées pour prévenir les défaillances.

#### III.4. Comparaison par la valeur efficace

Dans cette méthode, nous commençons par extraire la valeur maximale du signal, puis nous calculons sa valeur efficace en utilisant la relation III.2.

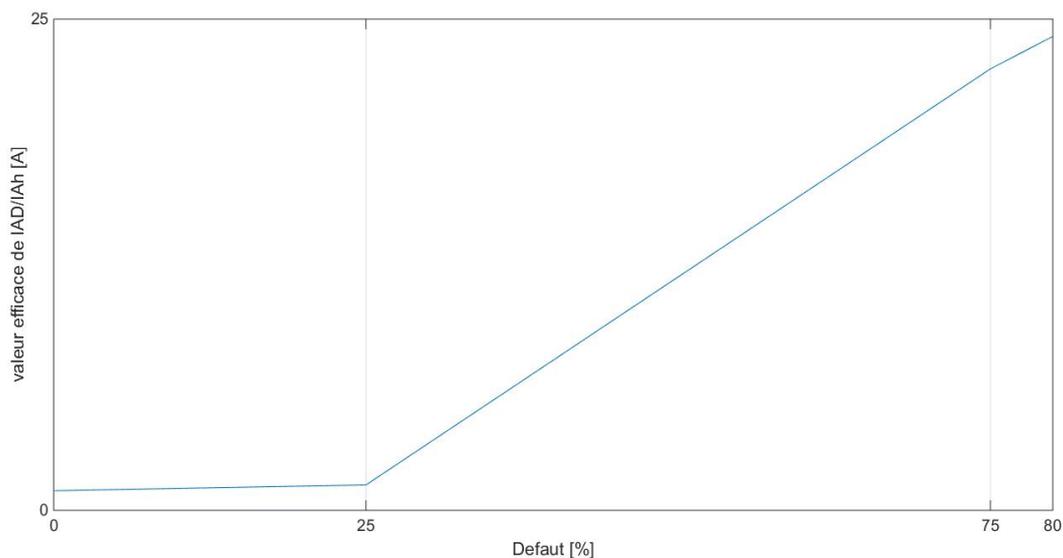
$$I_{eff} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \quad (III.2.)$$

Ensuite, nous utilisons la relation III.3 pour comparer la valeur efficace du signal en bon état avec celle du signal en présence de défaut, exprimée en pourcentage de défaut.

$$\frac{ID_{eff}}{IH_{eff}} = f(\%) \quad (III.3)$$

##### III.4.1. Défaut dans la phase A

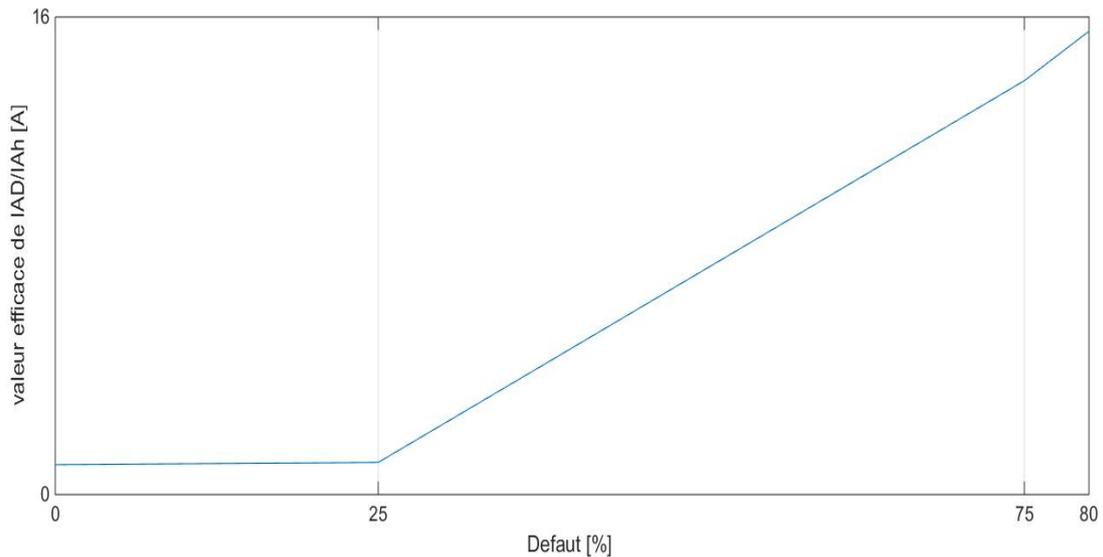
La figure (III.9) montre que comparaison par la valeur efficace avec création de défaut dans la phase A



**Figure III. 9.** Comparaison par la valeur efficace avec défaut dans la phase A

### III.4.1. Défaut dans la phase A et B

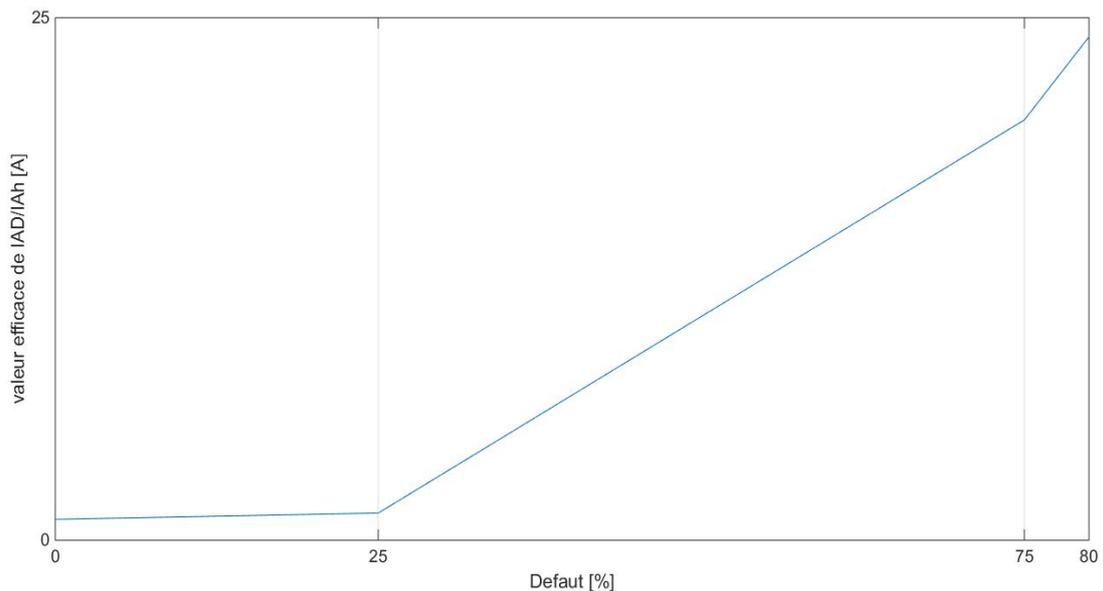
La figure (III.10) montre que comparaison par la valeur efficace avec création de défaut dans la phase A et B



**Figure III. 10.** Comparaison par la valeur efficace avec défaut dans la phase A et B

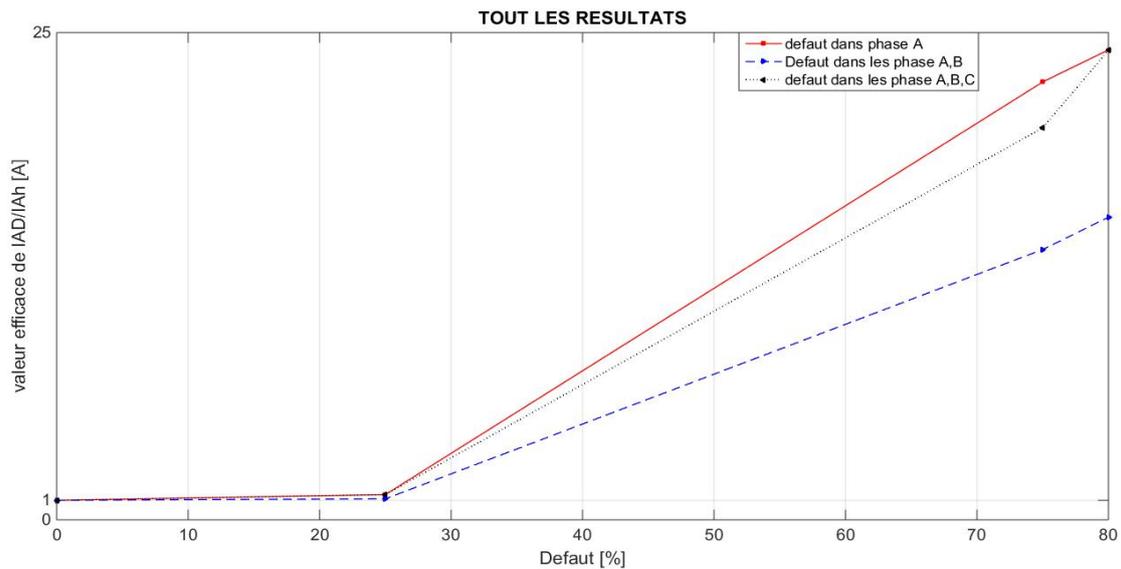
### III.4.1. Défaut dans la phase A, B et C

La figure (III.11) montre que comparaison par la valeur efficace avec création de défaut dans la phase A, B et C



**Figure III. 11.** Comparaison par la valeur efficace avec défaut dans la phase A, B et C

La figure III.12 combine tous les résultats de comparaison de la valeur efficace



**Figure III. 12.** tout le résultat de comparaison de la valeur efficace

Dans tous les cas observés, nous notons une légère augmentation de la valeur efficace jusqu'à ce que le pourcentage de défaut atteigne 50%. Ensuite, nous observons une augmentation significative pour les pourcentages de défaut supérieurs à 50%.

De plus, lorsque le défaut se situe uniquement dans la phase A, la valeur est plus élevée que dans les autres cas. Cela s'explique par le fait que la phase A contient l'intégralité du défaut, ce qui conduit à une augmentation plus importante de la valeur.

En revanche, lorsque le défaut est présent dans les phases A et B, nous constatons que la valeur est inférieure aux autres cas. Cela s'explique par le fait que le défaut est partagé entre les phases A et B, ce qui réduit son impact global et entraîne une augmentation moins prononcée de la valeur.

Ces observations mettent en évidence l'importance de prendre en compte à la fois la localisation du défaut dans une phase spécifique et sa répartition entre les différentes phases. Comprendre ces variations de valeur en fonction du pourcentage de défaut et de la configuration des phases permet d'interpréter de manière plus précise les résultats et d'identifier les caractéristiques spécifiques liées à chaque situation.

### III.5. Conclusion

Après avoir présenté les résultats des différentes méthodes de détection, nous avons observé que chaque méthode possède ses propres caractéristiques distinctes.

La méthode du vecteur de Park nous a permis de visualiser la forme de la fonction et de déterminer si elle était circulaire ou aléatoire. Cette méthode nous a fourni des indications

claires sur les signes de défaut en observant des variations significatives dans la forme du vecteur.

L'analyse spectrale par transformée de Fourier (FFT) nous a permis d'identifier les fréquences associées aux signes de dysfonctionnement. Nous avons remarqué que chaque fois que la valeur de fréquence était égale à  $50*n$ , avec  $n$  étant un nombre impair, des signes de défaut apparaissaient clairement.

En utilisant la méthode de comparaison basée sur la valeur efficace du courant, nous avons pu observer les variations dans l'amplitude du courant par rapport à l'état sain. Cette méthode nous a permis de détecter les augmentations significatives du courant dues au défaut de court-circuit. Après avoir évalué les résultats des trois méthodes, nous pouvons conclure que la méthode du vecteur de Park s'est avérée la plus efficace pour détecter et remarquer les changements sur la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Elle est relativement simple à mettre en œuvre et offre des indications claires sur les variations observées dans le système.

En conclusion, ce chapitre a mis en évidence l'importance de choisir la méthode de détection appropriée en fonction des caractéristiques du défaut et de la GADA. La méthode du vecteur de Park s'est révélée la plus pertinente dans notre étude. Ces résultats seront précieux pour le diagnostic précoce des défauts et pour une maintenance efficace des génératrices asynchrones à double alimentation.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

Ce mémoire se concentre sur l'étude du diagnostic de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) en ce qui concerne son fonctionnement normal ainsi que ses défauts de court-circuit statorique.

Des courts-circuits entre spires peuvent se produire lorsque les isolateurs se dégradent en raison d'une surintensité ou d'une surtension lors de la commutation du convertisseur, provoquant la circulation de courants extrêmement élevés dans la bobine en court-circuit. Ce type de défaut se traduit par un court-circuit entre phases ou entre phases et terre. Cependant, une surveillance permanente de l'état du générateur empêchera ces situations de se produire.

La première tâche de la première partie a été consacrée pour des généralités sur GADA, et dans la deuxième tâche nous avons montré que la machine asynchrone peut avoir diverses défaillances reviennent aux plusieurs causes.

Afin de prévenir ces problèmes techniques nous avons cité plusieurs méthodes fiables.

La deuxième partie consiste à traiter les résultats qui sont obtenus par la simulation de logiciel MAXWALL qui nous a donné la valeur de courant statorique dans l'état sain et l'état avec défaut de court-circuit dans ses différentes phases de fonctionnement. Dans cette dernière nous remarquons que la valeur de courant statorique augmente avec le défaut de court-circuit en même temps cette augmentation de courant est supérieur à l'état sain.

Dans troisième partie, nous avons présenté l'application de trois techniques pour la détection des défauts de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) : l'analyse spectrale du courant statorique FFT et du module du vecteur de Park, ainsi que la technique de la forme de Lissajous. Nous avons comparé les résultats obtenus dans l'état sain et en présence de défauts de court-circuit statorique, afin de mettre en évidence les variations observées.

Nos observations ont révélé que l'observation des amplitudes caractéristiques des harmoniques des défauts de court-circuit stator dans le spectre du courant stator et du coefficient du vecteur courant de Park permet de détecter les défauts et d'estimer leur sévérité. De plus, nous avons observé une déformation en forme de Lissajous en cas de défaut de court-circuit stator.

## Reference Bibliographique

- [1] AOUKLI.Z, "Technique de diagnostic des défauts dans les systèmes électriques par les réseaux de neurones (machine asynchrone)", mémoire de master, Université de Mohamed El-bachir El-Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, Département d'Électrotechnique, 2022.
- [2] SADKIN, "Simulation des défauts statoriques d'un moteur asynchrone", mémoire de master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Département Génie Électrique, Spécialité Machines électriques et Électronique de puissance, 2015.
- [3] Benouzza.M, Drif.M, Marques Cardos, A. J., & Dente, J. A. "Historique des machines électromagnétiques et plus particulièrement des machines à réluctance variable", Rev. Energ., 71-76, Ren : Valorisation, 1999.
- [4] TAMER.Y. "Détection de Défauts de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (DFIG)", mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Mohamed Boudiaf, Département d'Électrotechnique, 2011.
- [5] CHERFIOUIS, ADEM.R, "Etude et simulation d'un alternateur automobile", mémoire de master, Université Mouloud Mammeri, Université Tizi-Ouzou, Département d'Électrotechnique, 2018.
- [6] BERNARD, M. "Historique des machines électromagnétiques et particulièrement les machines à réluctance variable", Revue 3E. In°3, pp. 4, Juin 1995.
- [7] BOUKAIS.M, Aliouat.M, "Etude et modélisation d'une génératrice asynchrone à double Etoile: application dans un système éolien", mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Département d'Électrotechnique, 2014.
- [8] LOUCIF.M, "Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur", Thèse de Doctorat 3ème Cycle, Université Aboubaker Belkaïd, Tlemcen, Faculté de Technologie, Génie Electrique, 2016.
- [9] AHMIDAT.Z, Kouidri.Z, "Commande d'une éolienne à base d'une GADA par un onduleur multi-niveaux", mémoire de magister, Université Ahmed Draïa, Adrar, Département d'Électrotechnique, 2018.
- [10] KAIROUS.D, "Contribution à la commande robuste d'une GADA utilisée dans un système de conversion d'énergie éolienne", Thèse de Doctorat à l'Université du Québec, Canada, 2019.
- [11] DEHOUM.F, "Commande d'un système éolien basé sur une GADA par différentes techniques", mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Département de Génie Electrique, Commande Electrique, 2019.

Voici les références supplémentaires citées dans la forme correcte :

[12] GHARBI.S, SADI.A, "Réalisation d'un soft starter pour un moteur asynchrone triphasé de puissance", mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Département d'Électronique, 2010.

[13] MEGAMEZ. EL M, JOKA.T, "Modélisation et identification d'une génératrice asynchrone (GADA)", mémoire de magister, Université Saad Dahlab, Blida, Département d'Électronique, 2018.

[14] Zamouche.M, "Étude d'une éolienne utilisant une machine asynchrone double alimentation", mémoire de magister, Université Seddik Benyahia, Jijel, Département d'Électrotechnique, 2022.

[15] ZELACI.S, BEDDI.A, OMRAN.I, "Commande prédictive d'une génératrice asynchrone à double alimentation", mémoire de master, Université Hamma Lakhdar, El Oued, Département d'Électrotechnique, 2021.

[16] Hubert.R, "Le contenu spectral du courant absorbé par la machine asynchrone en cas de défaillance, un état de l'art", Green-UHP. Faculté des Sciences. Revue 3EI n°29-Juin 2002, pages 48-52.

[17] Harir.M, "Étude Des Défauts Dans La Machine Asynchrone A Cage D'écureuil Par L'emploi De La Fonction D'enroulement Modifiée", mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Département d'Électrotechnique, 2009.

[18] KHATIR.A, "Étude comparative des modèles des machines asynchrones utilisés en diagnostic des défauts", mémoire de magister, Université Ferhat Abbas - Sétif, Département d'Électrotechnique, 2009.

[19] Brahim.A, "Contribution au diagnostic de machines électromécaniques : Exploitation des signaux électriques et de la vitesse instantanée", thèse de doctorat, Université de Saint-Étienne, mars 2009.

[20] Belhamdi.S, "Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Contrôlée Par Différentes Techniques De Commande", Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, 2014.

[21] Merahi.S, "Diagnostic de défauts des machines électriques Présenté", mémoire de magister, Université Larbi Ben Mehidi, Oum El-Bouaghi, Département de génie électrique, 2020.

- [22] Labiod.L, Boutadjine.F, "Diagnostic des défauts rotoriques des machines asynchrones (Résultats expérimentaux et de simulation)", mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, Département de génie électrique, 2019.
- [23] Khelf.I, "Diagnostic Des Machines Tournantes Par Les Techniques De L'Intelligence Artificielle", Université Badji Mokhtar, Annaba, Département de génie mécanique, 2014.
- [24] Yassa.N, "Modélisation des machines asynchrones dédiée au diagnostic des défauts de court-circuit inter-spores et des cassures de barres et d'anneaux", mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Département d'Électrotechnique, 2009.
- [25] Halem.N, "Modélisation des machines asynchrones triphasées à cage en vue du diagnostic par méthode des éléments finis", Thèse de doctorat 3ème Cycle, Université Mohamed Khider, Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département Génie.
- [26] Kouriche.H, Deia.S, "Modélisation par élément finis d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil", mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Faculté de Technologie, Département de Génie Électrique, filière Électromécanique, 2022.
- [28] [Ansys Electronics Desktop Student Version | Free Software Download](#)
- [29] Chen.Y, et al, "Numerical Modeling, Electrical Characteristics Analysis and Experimental Validation of Severe Inter-Turn Short Circuit Fault Conditions on Stator Winding in DFIG of Wind Turbines", IEEE Access, vol. 9, pp. 13149-13158, 2021.