



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Akli Mohand Oulhadj Bouira
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Domaine: Sciences et Technologies

Département : Génie Électrique

Filière: Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Numéro de série :

Thème

Modélisation et diagnostic de défaut de court-circuit entre spires dans une machine à induction double alimentation

Domaine: Sciences et Technologies

Département : Génie Électrique

Filière: Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Réalisé par :

Foudi Nouredine

Belhadi Merzak

JURY:

Mr. M. Rezki	MCA	Président
Mr. S. Issouani	MAA	Examineur
Mme.N. Yassa	MCA	encadreur
Mme. S. Madi	MCA	Co-encadreur

Dédicace

إلى من كانت لي وطنًا، وملجأً، ومصدرًا لا ينضب من الحنان والدعاء...
إلى أمي الحبيبة، رمز الصبر والتضحية، أهدي هذا العمل عربون محبة ووفاء.

إلى روح والدي الغالي، رحمه الله، الذي علمني معنى الإصرار، وترك في نفسي أثرًا لا يُمحى...
أسأل الله أن يجعل هذا العمل في ميزان حسناته.

إلى إخوتي وأخواتي الأعزاء، الذين كانوا لي عونًا وسندًا في كل مراحل حياتي، أشارككم ثمرة هذا الجهد بكل حب
وامتنان.

إلى أصدقائي الأعزاء، رفقاء الدرب، ومن تقاسمت معهم لحظات التعب والفرح، من كانوا لي أكثر من إخوة...
إلى من أضاعوا دربي بكلمة، وبابتسامة، وبوقفة صادقة...
أهدي لكم هذا العمل المتواضع عرفانًا بجميل صحبتكم، ووفاءً لسنوات لا تُنسى.

شكرًا لأنكم كنتم جزءًا جميلًا من هذه الرحلة.

مرزاق بلهادي

إلى أعظم نعمتين في حياتي...
إلى والدي العزيز، منبع القوة والإصرار، الذي لم يبخل عليّ يومًا بتوجيهاته ونصائحه...
إلى والدتي الغالية، نبع الحنان والدعاء، التي كانت دومًا سندي في كل خطوة.

إلى إخوتي وأخواتي الأعزاء، من شاركوني أفراحي وأحزاني، وكانوا لي دعمًا وسندًا في كل مراحل حياتي...
أهدي هذا العمل المتواضع عربون محبة ووفاء، وامتنان لا يوفيه الكلام حقه.

فودي نور الدين

Remerciements

في ختام هذا العمل، لا يسعني إلا أن أتوجه بخالص عبارات الشكر والامتنان لكل من ساهم في إنجاح هذا المشروع، من قريب أو بعيد.

أتوجه بالشكر الجزيل إلى الأستاذتين المشرفتين نصيرة ياسا و سعيدة مادي على توجيهاتهما القيمة، وصبرهما، ودعمهما المتواصل طيلة فترة إعداد هذه المذكرة.

كما أعرب عن امتناني العميق لجميع الأساتذة الذين درسوني طوال مسيرتي الجامعية، لما قدموه من علم ونصح.

ولا يفوتني أن أشكر عائلتي الكريمة، التي كانت سندي ودعمي الدائم، ماديا ومعنويا، طيلة هذه السنوات.

وأخيرا، أشكر زملائي وأصدقائي على دعمهم وتحفيزهم المستمر، فلكم مني كل التقدير والاحترام.

Résumé:

Cette étude présente un modèle d'une machine à induction à double alimentation (MADA) intégrant un défaut decourt-circuit entrelesspires au sein du stator. Enappliquant laméthode desCircuitsÉlectriquesMagnétiquementCouplés(CEMC), uneformulationd'état estélaboré e pour simuler l'impact du défaut sur les paramètres électriques, en particulier les courants. Un programmeMATLABestutilisépourobserverlesperturbationsengendrées, facilitantainsi le processus de diagnostic. Les résultats indiquent que le défaut introduit des asymétries et des harmoniques spécifiques, favorisant une détection précoce et contribuant de ce fait à l'amélioration de la fiabilité du système.

ملخص:

تقدم هذه الدراسة نموذجًا لألة حثية مزدوجة التغذية (DFIM) تتضمن عطلًا في الدائرة القصيرة بين الدورات داخل الجزء الثابت. من خلال تطبيق طريقة الدوائر الكهربائية المقترنة مغناطيسيًا (MCEC)، يتم تطوير صياغة حالة لمحاكاة تأثير الخطأ على الخصائص الكهربائية، وخاصة التيارات. يتم استخدام برنامج MATLAB لمراقبة الاضطرابات الناتجة، وبالتالي تسهيل عملية التشخيص. تشير النتائج إلى أن الخطأ يؤدي إلى ظهور عدم تناسق وتوافقيات محددة، مما يعزز الكشف المبكر وبالتالي يساهم في تحسين موثوقية النظام.

Abstract:

This study presents a model of a Doubly-Fed Induction Machine (DFIM) that incorporates an inter-turn short circuit fault within the stator. By applying the Magnetically Coupled Electrical Circuits (CEMC) method, a state-space model is developed to simulate the impact of the fault on electrical parameters, particularly the currents. MATLAB software is used to monitor the resulting disturbances, thus facilitating the diagnostic process. The results indicate that the fault leads to the emergence of specific asymmetries and harmonics, which promotes early detection and thus contributes to improved system reliability.

Sommaire

Chapitre I

Généralités sur les machines asynchrones double alimentation

Introduction Générale -----	1
I.1 Introduction -----	3
I.2 Structure de la machine asynchrone double alimentation : -----	3
I.3 Principe de fonctionnement: -----	3
I.4 Classification des machines asynchrone double alimentation : -----	5
I.4.1 La machine à double alimentation simple (rotor bobiné) : -----	5
I.4.2 Machine à double alimentation sans balais (sans collecteur) : -----	5
I.4.3 Machine à double alimentation en cascade : -----	6
I.4.3.1 Connectes mécaniquement (single doubly fed induction machine) : -----	6
I.4.3.2 Connectes mécaniquement électriquement (cascade doubly fed induction machin)-----	6
I.5 Modes de fonctionnement -----	7
I.5.1 Mode moteur : -----	7
I.5.1.1 Modes moteurs hypo- synchrones -----	7
I.5.1.2 Modes moteurs hyper-synchrones -----	8
I.5.2 Mode générateur : -----	9
I.5.2.1 Modes générateurs hypo-synchrones -----	9
I.5.2.2 Mode générateur hyper-synchrone -----	10
I.6 Domaines d'application de la Mada -----	11
I.7 Avantages et inconvénients de la Mada -----	12
I.7.1 Avantages -----	12
I.7.2 Inconvénients -----	12
I.8 Caus des défauts de Machine asynchrone double alimentation -----	13
I.9 Types des défauts de la MADA -----	16
I.9.1 Défauts de stator : -----	17
I.9.1.1 Problèmes d'isolement de masse -----	18
I.9.1.2 Court-circuit entre spire -----	18
I.9.1.3 Court-circuit entre phases -----	19
I.9.2 Défauts de Rotor -----	20
I.9.2.1 Défaut de contact balai – bague -----	20
I.9.2.2 Ruptures de barres -----	21
I.9.2.3 Ruptures d'anneaux -----	22
I.9.2.4 Défauts des mécaniques (roulements) -----	22
I.9.2.5 Défauts d'excentricité -----	24
I.10 Les méthodes de diagnostic : -----	25
I.10.1 Analyse des différents signaux -----	26
I.10.1.1 Analyse spectrale du courant statorique -----	26
I.10.1.2 analyse de la température (La Thermographie) -----	28
I.10.1.3 Analyse de flux magnétique de dispersion de fuite radial -----	28
I.10.1.4 Analyse des vibrations mécaniques -----	29

I.10.2 Techniques d'intelligence artificielle (IA)	31
I.10.3 Les méthodes de redondances analytiques	31
I.11 Conclusion	31

Chapitre II

Modélisation et simulation de la Machine à Double Alimentation en régime sain

II.1. Introduction	32
II.2. Modélisation de la machine à double alimentation	32
II.2.1. Méthodes utilisées pour la modélisation des machines électriques:	32
II.2.1.1. Méthodes numériques:	33
II.2.1.2. Méthodes semi-numériques	35
II.2.1.3. Méthodes analytiques	35
II.3. Hypothèses simplificatrices	35
II.4 Représentation de la MADA	36
II.5. Modèle de la MADA dans le repère naturel	37
II.5.1. Equations électriques	37
II.5.2. Equations magnétiques	40
II.5.3. Equation de mouvement	41
II.5.4. Etablissement du modèle d'état	42
II.6. Simulation	44
II.6.2. Résultat simulation	44
II.6.2.1. Fonctionnement à vide	45
II.6.2.2. Fonctionnement en charge	47
II.6.3. Interprétation du résultat	49
Conclusion	50

Chapitre III

Modélisation et simulation de la MADA en présence défaut de court-circuit entre spires statorique

III.1. Introduction	51
III.2. Modèle de la MADA avec défaut de court- circuit	51
III.3. Modélisation de la MADA avec défaut de court- circuit	52
III.3.1. Représentation d'état de modèle de défaut	54
III.4. Simulation	56
III.4.1. Résultats de simulation	56
III.4.2. Interprétation du résultat	64
III.5. Analyse spectrale du courant statorique en l'utilisant la FFT (Fast Fourier Transformer) pour la détection de défauts	65
III.5.1. Définition	65
III.5.2 La transformée de Fourier	66
III.5.3. Simulation	66
III.5.3.1. Résultats de simulation de courant statorique Isa En utilisant FFT	66
III.5.3.2. Interprétation du résultat	68
III.6. Conclusion	68
Conclusion générale	69

Liste des figures

Chapitre I

Figure.I.1. Schema representation composants de la machine asynchrone double alimentation.	3
Figure. I.3. Schema de principe de la regulation de la machine asynchrone a double alimentation sans collecteur.	6
Figure.I.4. Schema de principe de la regulation de la machine asynchrone a double alimentation en cascade connectes mecaniquement.	6
Figure.I.5. Schema de principe de la regulation de la machine asynchrone a double alimentation en cascade connectes mecaniquement electriquement.	7
Figure.I.6. (a) étude du fonctionnement de la machine asynchrone a double alimentation. (b) cheminement de la puissance en regime moteur hypo-synchrone [12-13].	8
Figure.I.7. (a) étude du fonctionnement de la machine asynchrone a double alimentation. (b) cheminement de la puissance en regime moteur hyper-synchrone [12-13].	9
Figure.I.8. (a)étude du fonctionnement de la machine asynchrone a double alimentation.(b) cheminement de la puissance en regime generateur hypo-synchrone [12-13].	10
Figure.I.9. (a)étude du fonctionnement de la machine asynchrone a double alimentation.(b) cheminement de la puissance en regime generateur hyper-synchrone [12-13].	11
Figure.I.10. Causes internes de defauts de la machine asynchrone [15]	15
Figure.I.11. Causes externes de defauts de la machine asynchrone [15-16-17]	15
Figure. I.12. Repartition les statistiques des causes des defauts pour une machine asynchrone ieee [18]	16
Figure.I.13. Repartition les statistiques des defauts [18]	17
Figure.I.14. Defauts statoriques [21]	17
Figure. I.16. Court-circuit entre phases.....	20
Figure. I.17. Defaut de contact balai – bague.....	21
Figure.I.18. Ruptures de barres [17].	21
Figure.I.19. Ruptures d’anneaux	22
Figure.I.20. Defauts des mecaniques (roulements)[17].	23
Figure.I.21. Defaillances de l’arbre.	24
Figure.I.22. (a). Excentricite statique. (b) excentricite dynamique. (c) excentricite mixte. [30].....	25
Figure.I.23. Methodes de diagnostic de defauts [30].	26
Figure.I.24. Spectre du courant statorique avec defaut sur une phase au stator [31].	27
Figure.I.25. Spectre du courant statorique avec defauts sur une phase au rotor [31].	27
Figure. I.26thermograms d’un moteur [33].....	28

Figure.I.27. Principe de mesure du flux magnetique de dispersion radial.	29
Figure.I.28. Collecteur analyseur (movipack 01db-s'tell).....	30

Chapitre II

Figure. II.1. Approches possibles de modelisation de machines electriques sous forme du front de pareto [39]	33
Figure.II.2. Le model elements finis 2d pour la machine ma : (a) geometrie ; (b) maillage [41].	35
Figure.II.3. Modelisation de la mada un repere simple (a,b,c)[30].	37
Figure.II.4. Vitesse de rotation.	45
Figure.II.5. Couple electromagnetique.	45
Figure II.6 presente les formes d'onde des courants statoriques lors du fonctionnement a vide de la machine.	45
Figure.II.6. Courant statoriques.	46
Figure. II.7. 1 zoom courant statoriques.....	46
Figure.II.8. Courants rotoriques.....	47
Figure.II.10. Couple electromagnetique avec l'ajout du couple resistant.	48
Figure.II.11. Courant statoriques avec l'ajout du couple resistant.	48
Figure.II.12. Courants rotoriques avec l'ajout du couple resistant.....	49

Chapitre III

Figure. III.1. Schema represente court-circuit de la phase sa du stator [30].	52
Figure III.2. Vitesse de rotation pour un defaut de 5 % de cc.	56
Figure III. 3. Couple electromagnetique pour defaut de5% de cc.	57
Figure III. 4. Courants statoriques pour un defaut de 5% de cc dans la phase s.	57
Figure.III.5. Courants rotoriques pour un defaut 5%de cc.	58
Figure. III. 6. Courant de court-circuit pour un defaut de5% de cc.	58
Figure III .7. Vitesse de rotation pour un defaut de10% de cc.	59
Figure III. 8. Couple electromagnetique pour defaut de10% de cc.	59
Figure III. 9. Courants statoriques pour un defaut de10% de cc dans la phase s1.	60
Figure III.10. Courants rotoriques pour un defaut de10% de cc.....	60
Figure III. 11. Courant de court-circuit pour un defaut de 10% de cc.	61
Figure III.12. Vitesse de rotation pour un defaut de 15% de cc.	61
Figure III. 13. Couple electromagnetique pour defaut de 15% de cc.....	62
Figure. III.14. Courants statoriques pour un defaut de 15% de cc dans la phase s1.	62
Figure III.15. Courants rotoriques pour un defaut de15% de cc.....	63
Figure. III.16. Courant de court-circuit pour un defaut de15% de cc.	63
Figure. III.17. La difference entre les vitesses lorsqu'un defaut (de 5%, 10 %,15%) de cc.....	64
Figure. III.19. Principe de la transformee de fourrier [48].	66

Figure. III.20. Analyse spectrale de isa pour un défaut de 5% de cc.	67
Figure. III.21. Analyse spectrale de isa pour un défaut de 10% de cc.	67
Figure. III.22. Analyse spectrale de isa pour défaut de 15% de cc.	68

Liste des tableaux

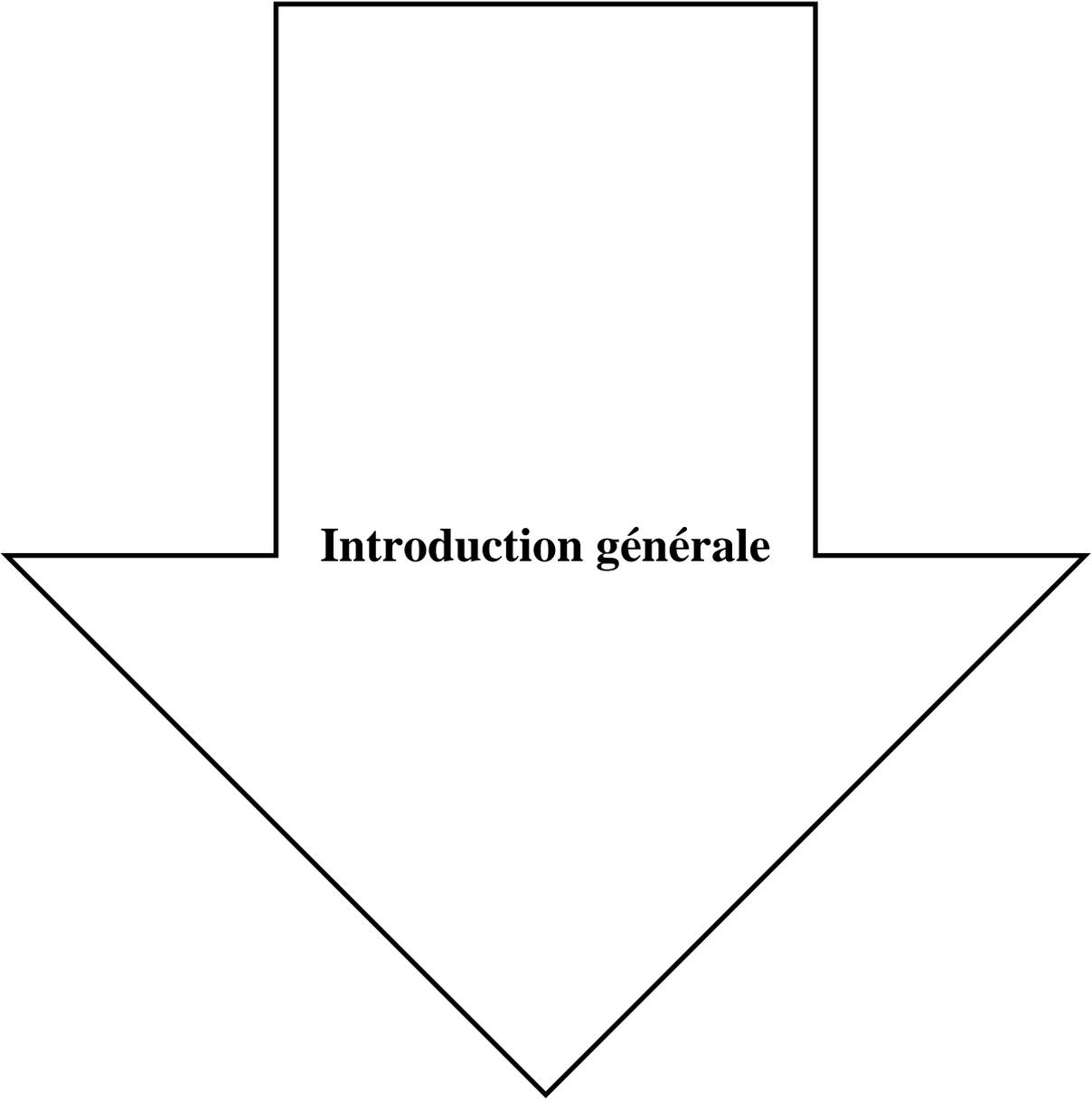
tableau. I.1 criteres de severite de temperature [33].	28
Tableau. I.2. Typologie des vibrations dans les machines tournantes et diagnostic des defauts associes [36].....	30

Liste des abréviations et symboles

AC	Courant alternatif
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_r	Couple résistant de charge.
C_f	Couple de frottement fluide
<i>DSF</i>	Développement en Série de Fourier
DSP	La densité spectrale de puissance
E_R	Puissance électrique transitant entre le réseau et le rotor (W)
E_S	Puissance électrique transitant entre le réseau et le stator (W)
FFT	Fast Fourier Transform
IEEE	institute of electrical and electronics engineers
<i>IA</i>	Techniques d'intelligence artificielle
Ira, Irb, Irc	Les courants rotoriques.
Isa, Isb, Isc	Les courants statoriques
$[L_{SS}]$	Matrice d'inductance de fuite au statorique.
$[L_{rr}]$	Matrice des résistances de fuite au rotoriques.
Ls, Lr	Inductances cycliques statoriques et rotoriques (H)
MADA	Machine asynchrone double alimentation
<i>MADAS</i>	La machine asynchrone double alimentation simple <i>MCSA</i> L'analyse des signatures des courants du moteur
$[M_{rs}]$	Matrice d'inductance mutuelle.
$[M_{rc}(\theta_r)]$	Les inductances mutuelles du rotor de l'enroulement en court-circuit
$[M_{scs}]$	Les inductances mutuelles du stator de l'enroulement en court-circuit.
Ms	Inductance mutuelle entre phases statoriques(H)
Mr	Inductance mutuelle entre phases rotoriques(H)
Msr	Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques(H)
Mrs	Inductance mutuelle entre phases rotoriques et statoriques (H)
$[R_s]$	Matrice des résistances statoriques.
$[R_r]$	Matrice des résistances rotoriques.

R_s, R_r	Résistance statorique et rotorique (Ω)
TF	Transformée de Fourier
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	Les tensions rotoriques
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Les tensions statoriques
$[V_{sabc}]$	Vecteurs des tensions statoriques.
$[V_{rabc}]$	Vecteurs des tensions rotoriques. bccBobinage de court-circuit
f_s	La fréquence du réseau (Hz)
f_r	Coefficient de frottement visqueux ($N \cdot m \cdot sec/rad$)
f_s, f_r	Fréquence statorique et rotorique (Hz)
f	Fréquence de la tension de référence (Hz)
f.é.m.	La force électromotrice
g	Glissement de la vitesse de rotation
$[i_{sabc}]$	Vecteurs des courants statoriques.
$[i_{rabc}]$	Vecteurs des courants rotoriques.
J	Moment d'inertie des masses tournantes.
p	Le nombre de paires de pôles
P_m	Puissance mécanique fournie ou reçue par la MADA(W)
P_r	Puissance électrique fournie ou reçue par le rotor de la MADA (W)
P_s	Puissance électrique fournie ou reçue par le stator de la MADA (W)
sa, sb, sc	Les phase statoriques
ra, rb, rc	Les phase rotoriques
t°	Température
ω_g	Vitesse de glissement
ω_s	La vitesse de synchronisme
ω_r	La vitesse du rotor
ω_s	Pulsation de l'alimentation.
ω_r	Pulsation de rotorique
w_{mag}	Energie magnétique.

$[\Phi_{sabc}]$	Vecteur de flux d'enroulement entre le stator et le rotor
$[\Phi_{rabc}]$	Vecteur de flux d'enroulement rotoriques
ΔT°	Différence de température
η_{cc}	Rapport de court-circuit
η	Rapport du nombre des present court-circuit
η_s	Nombre total de spires dans une phase statorique sans défaut
θ_s	Position de stator (rad)
θ	Position entre l'axe statorique a_s et l'axe rotorique a_r (rad)
θ_r	Position électrique de rotor (rad)
θ_{cc} statorique	L'angle électrique enter le bobinage en court-circuit et l'axe déréréfrence de la phase
ξ	Est une variable indépendante de x



Introduction générale

Introduction Générale

Depuis le début de la révolution industrielle, scientifiques et ingénieurs ont travaillé au développement de solutions efficaces pour contrôler la vitesse des machines électriques, notamment face à la demande croissante de systèmes d'entraînement performants, fiables et à des coûts compétitifs.

Au départ, les moteurs à courant continu étaient la solution privilégiée, offrant un excellent contrôle de la vitesse, de zéro à la vitesse maximale, par simple ajustement de la tension d'excitation tout en maintenant le flux magnétique. Cependant, ces moteurs présentaient des inconvénients : leurs systèmes balais et à accumulateurs les rendaient moins adaptés aux environnements industriels difficiles ou aux applications de forte puissance, sans compter leur besoin de maintenance périodique continue[1].

Par conséquent, l'intérêt s'est porté sur les machines à courant alternatif, notamment asynchrones, en raison de leurs caractéristiques importantes, telles que :

Facilité de fabrication et faible coût, Conception simple et robuste, bonne tolérance aux surcharges Vitesse de rotation plus élevée et Il y a très peu d'entretien[2].

Cependant, le contrôle de ces machines était complexe en raison de la complexité de leur modélisation et de leur comportement dynamique non linéaire et multi-variable, ce qui posait un défi majeur pour la conception de systèmes de contrôle efficaces.

Cependant, grâce aux avancées significatives en électronique de puissance et en contrôle numérique, ces défis sont désormais surmontables. Des signaux électriques contrôlables en fréquence, tension et courant peuvent être générés grâce à des algorithmes de contrôle intelligents fonctionnant en temps réel[2].

Parmi ces avancées, la machine asynchrone modulaire à double alimentation (MADA) s'est imposée comme une solution innovante alliant efficacité et flexibilité. Cette machine est un système triphasé à rotor bobiné pouvant être alimenté de deux manières :

D'une part, le stator est directement connecté au réseau électrique ;

D'autre part, le rotor est alimenté par un variateur de fréquence au même réseau électrique.

Cette technologie se distingue par sa capacité à fonctionner à différentes vitesses (inférieures, égales ou supérieures à la vitesse synchrone), avec la possibilité de contrôler séparément la puissance active et réactive. Ces caractéristiques ont fait de la MADA un choix privilégié pour de nombreuses applications avancées, notamment dans l'énergie éolienne [2].

Bien que cet appareil se distingue par son efficacité et ses performances positives, il demeure vulnérable à divers types de dysfonctionnements susceptibles d'affecter sa durabilité. Ces défaillances peuvent être de nature mécanique, telles que l'excentricité du rotor ou les défauts de roulements, ou de nature électrique, comme un court-circuit au niveau de l'enroulement statorique ou une rupture de barre rotorique.

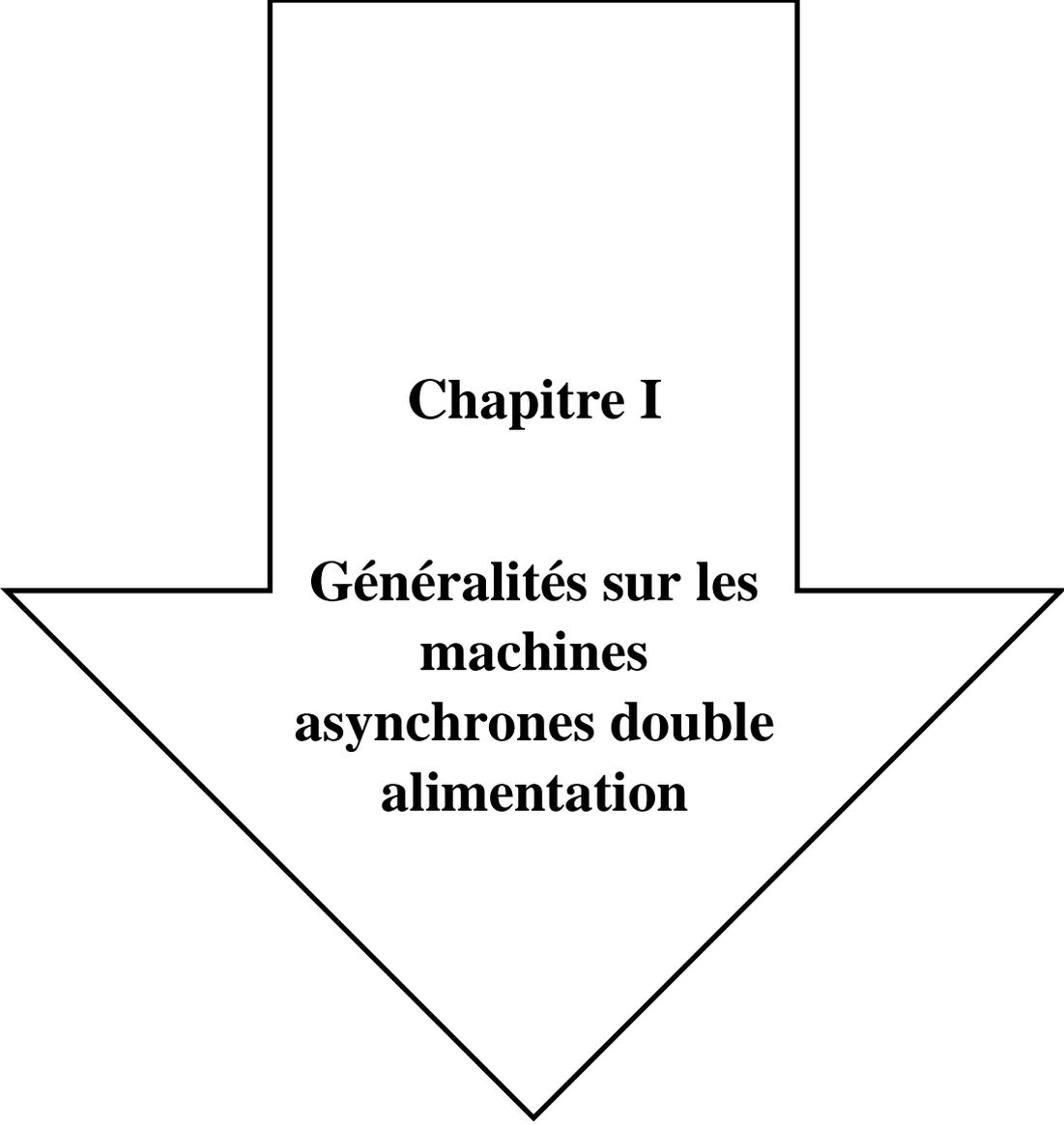
Face à ces problématiques, de nombreuses recherches et études ont été menées pour mieux comprendre ces défauts. Il devient donc essentiel d'analyser en leur nature, ainsi que leur impact potentiel sur le fonctionnement de la machine.

Ce travail s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une présentation générale des machines asynchrones à double alimentation. Il aborde les principes de fonctionnement, les principales configurations et les avantages de cette technologie.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la modélisation et à la simulation de la MADA en régime sain. À travers l'utilisation de modèles mathématiques adaptés, ce chapitre vise à représenter le comportement dynamique de la machine, et à simuler son fonctionnement dans différentes conditions de charge.

Le troisième chapitre porte sur la modélisation et la simulation de la MADA en présence d'un défaut de court-circuit entre spires statoriques. L'objectif est d'analyser l'impact de ce type de défaut sur les signaux électriques de la machine, de détecter les signatures caractéristiques de la panne.



Chapitre I

**Généralités sur les
machines
asynchrones double
alimentation**

I.1 Introduction

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), également désignée sous le terme de machine à rotor bobiné, constitue une catégorie de machines électriques largement employée dans les systèmes nécessitant un contrôle précis de la vitesse et une efficacité énergétique optimale.

Ce chapitre offre une étude exhaustive de la machine asynchrone à double alimentation, en examinant ses champs d'utilisation, ses mécanismes d'opération, ses avantages majeurs ainsi que les développements récents qui la touchent.

I.2 Structure de la machine asynchrone double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) se distingue par une structure statorique similaire à celle d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. Toutefois, sa spécificité réside dans la conception du rotor, qui est équipé non pas d'aimants permanents ni d'une cage d'écureuil, mais d'enroulements triphasés analogues à ceux du stator [3].

Ces enroulements, disposés en étoile avec un déphasage de 120° , sont connectés à des bagues collectrices sur lesquelles reposent des balais assurant la transmission du courant pendant le fonctionnement de la machine. L'alimentation du rotor se fait par l'intermédiaire d'un convertisseur statique, permettant un contrôle précis de la fréquence rotorique (voir Figure I.1) [4].

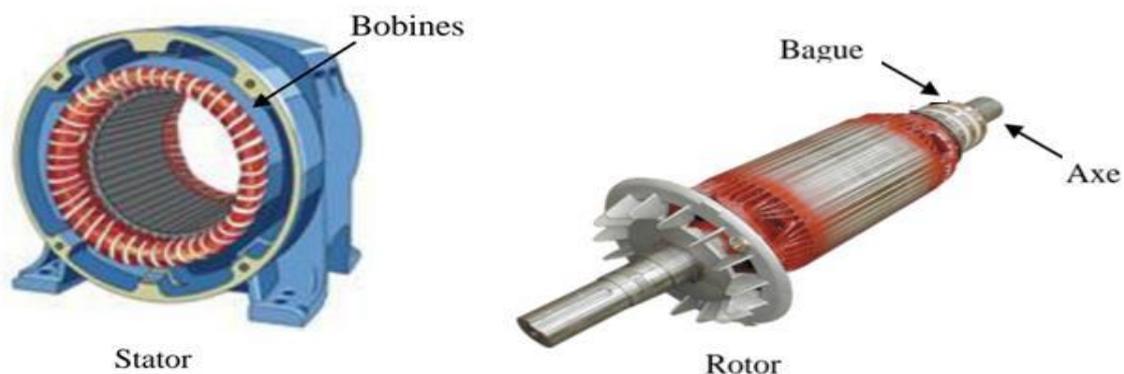


Figure.I.1. Schéma représentation composants de la machine asynchrone double alimentation.

I.3 Principe de fonctionnement

Dès que le stator de l'appareil est relié au réseau électrique, un courant alternatif triphasé s'établit à travers ses enroulements. Ce dernier crée un champ magnétique en rotation dans l'interstice de la machine.

L'ampleur du flux magnétique statorique se fonde sur divers éléments : La réluctance du circuit magnétique (équivalent magnétique de la résistance), Le nombre de couples de pôles

dans le bobinage statorique, Et la force du courant statorique, et crée des forces électromagnétiques (f.é.m.) dans les enroulements rotoriques.[5]

Contrairement à la machine asynchrone conventionnelle, dont le mode de fonctionnement dépend directement de la vitesse de rotation (une machine à cage fonctionne en mode moteur lorsque sa vitesse est inférieure à celle de synchronisme, et en mode générateur lorsqu'elle la dépasse), la machine asynchrone à double alimentation (MADA) permet un fonctionnement flexible. En effet, le contrôle de la tension appliquée au rotor permet de maîtriser le champ magnétique au sein de la machine, rendant possible le fonctionnement aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur, que ce soit en régime d'hypersynchronisme ou d'hypo synchronisme.

La vitesse du rotor ω_r est liée à la vitesse de synchronisme ω_s et à la vitesse de glissement ω_g par la relation suivante [6] :

$$\omega_s = \omega_r + \omega_g \quad (I.1)$$

La vitesse angulaire du champ magnétique tournant produit par le stator peut être exprimée par :

$$\omega_s = \frac{2\pi f_s}{p} \quad (I.2)$$

- f_s ; Est la fréquence du réseau,
- P ; Est le nombre de paires de pôles.
- ω_g ; Vitesse de glissement
- ω_s ; La vitesse de synchronisme
- ω_r ; La vitesse du rotor

Le glissement représente la vitesse relative entre le champ magnétique tournant généré par le stator et celui associé au rotor. Il peut être défini comme suit [6] :

$$\omega_g = \frac{p}{2} \cdot \omega_a \quad (I.3)$$

- p est le nombre de pôles et ω_a est la vitesse angulaire des tensions appliquées au rotor par le convertisseur.

Le paramètre p désigne le nombre de pôles de la machine, tandis que ω_a représente la vitesse angulaire des tensions injectées au rotor par le biais du convertisseur.

Est le glissement est défini par la relation suivante [6] :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (I.4)$$

I.4 Classification des machines asynchrone à double alimentation

Il existe trois types de machine à double alimentation, à savoir : le type simple (rotor bobiné), le type sans balais (sans collecteur) et le type cascade.

I.4.1 La machine à double alimentation simple (rotor bobiné)

La machine asynchrone à double alimentation de type simple, aussi appelée Single Doubly Fed Induction Machine, est une machine à double alimentation sans balais-bague (transférer la puissance vers le rotor) (Figure. I.2)[7].

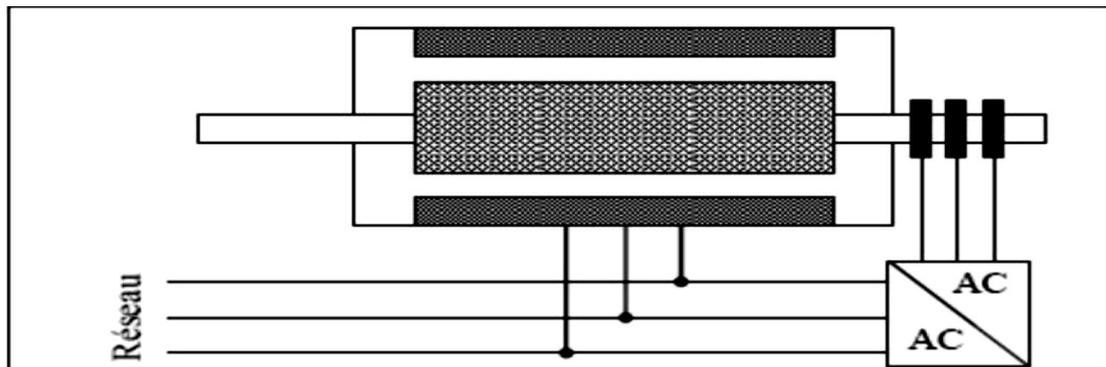


Figure. I.2. Schéma de principe de la régulation de la machine asynchrone à double alimentation simple

Le stator de la machine est directement connecté au réseau électrique, à l'instar d'une machine asynchrone conventionnelle. Quant au rotor, il est bobiné (muni de bagues collectrices) et alimenté par un convertisseur de type AC/AC, ce qui permet un contrôle précis du glissement de la machine, comme illustré à la figure 1.2.

Deux types de conversion peuvent être utilisés pour l'alimentation du rotor [7]:

- une conversion indirecte, généralement constituée d'un redresseur suivi d'un onduleur,
- ou une conversion directe, telle que celle réalisée à l'aide d'un cyclo-convertisseur

I.4.2 Machine à double alimentation sans balais (sans collecteur)

C'est une machine similaire à la machine à double alimentation simple. Mais elle ne contient pas de balais et de bague. Le rotor est remplacé par un rotor spécial avec deux enroulements magnétiquement découplés, et deux enroulements prolongés dans un seul stator. L'enroulement statorique principal est connecté directement au réseau et l'enroulement statorique auxiliaire est alimenté par un convertisseur à puissance réduite.

Elle se caractérise par un nombre total de paires de pôles équivalent à la somme des paires de pôles des deux enroulements statoriques, comme illustré à la figure I.3 [8].

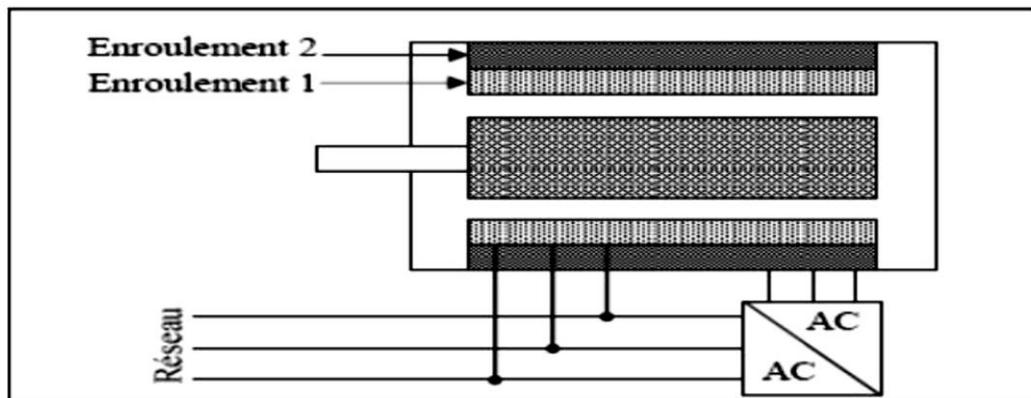


Figure. I.3. Schéma de principe de la régulation de la machine asynchrone à double alimentation sans collecteur.

I.4.3 Machine à double alimentation en cascade

Le principe de cette machine repose sur l'association de deux machines asynchrones à double alimentation. Deux configurations de couplage sont possibles : un couplage mécanique, ou un couplage à la fois mécanique et électrique [9].

I.4.3.1 Connectes mécaniquement (single doubly fed induction machine)

Elle est constituée de deux machines asynchrones à cage, couplées mécaniquement, formant ce que l'on appelle une Single Frame Cascade Doubly Fed Induction Machine. Dans cette configuration, le stator de la première machine est directement connecté au réseau électrique, tandis que le stator de la seconde est alimenté via un convertisseur alternatif-alternatif (AC/AC), comme illustré à la figure I.4 [9].

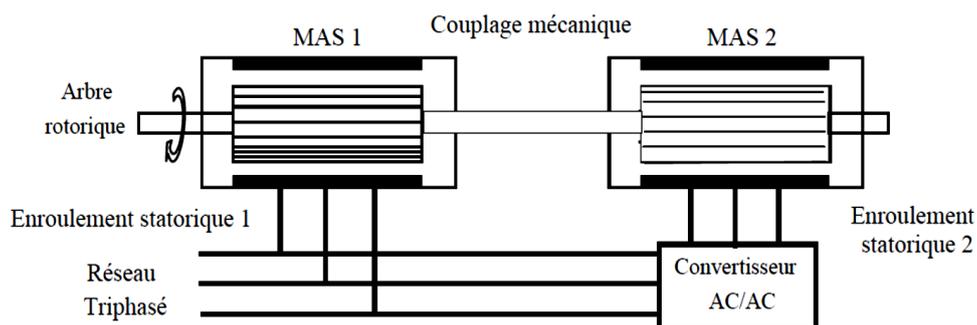


Figure. I.4. Schéma de principe de la régulation de la machine asynchrone à double alimentation en cascade connectées mécaniquement.

I.4.3.2 Connectes mécaniquement électriquement (cascade doubly fed induction machine)

Cette structure repose sur l'association de deux machines asynchrones à double alimentation (MADA) dotées de rotors bobinés, interconnectées à la fois sur les plans

électrique et mécanique. Le couplage électrique des rotors permet un échange d'énergie liée au glissement, tandis que l'accouplement mécanique des arbres impose une synchronisation de leur vitesse de rotation [9] (voir Figure I.5)[9].

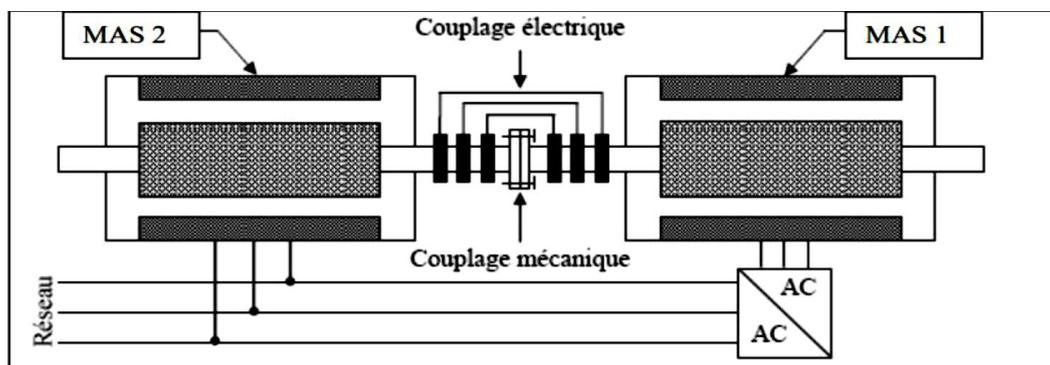


Figure.I.5. Schéma de principe de la régulation de la machine asynchrone à double alimentation en cascade connectées mécaniquement et électriquement.

I.5 Modes de fonctionnement

Bien que la machine asynchrone modulaire autopilotée (MADA) puisse fonctionner à la fois comme un moteur et un générateur tout comme une machine asynchrone traditionnelle, elle se distingue fondamentalement par le fait que son mode de fonctionnement n'est plus déterminé par sa vitesse de rotation [4].

Similaire en cela à la machine asynchrone classique qui permet elle aussi d'opérer en moteur ou en générateur, la MADA se différencie cependant par le mécanisme régissant le changement de rôle. Alors que dans le cas d'une machine asynchrone standard c'est la vitesse de rotation qui détermine si elle agit en moteur en s'accélération ou en générateur en freinant, pour la MADA c'est un système autonome qui gère de manière autopilotée le basculement d'un mode à l'autre indépendamment du régime moteur. [10]

I.5.1 Mode moteur

Le rotor peut tourner en sous-synchronisme ($0 < g \leq 1$), la vitesse de rotation de champ statorique être plus grand que la vitesse de rotation de rotor [11]. Il y a à distinguer deux modes opérationnels :

I.5.1.1 Modes moteurs hypo-synchrones

Dans ce mode de fonctionnement, le réseau électrique alimente directement le stator, tandis que la puissance associée au glissement transite par le rotor avant d'être réinjectée dans le réseau. Le moteur opère alors à une vitesse inférieure à celle de synchronisme. Bien que ce principe puisse également s'appliquer à une machine asynchrone traditionnelle à cage, dans ce

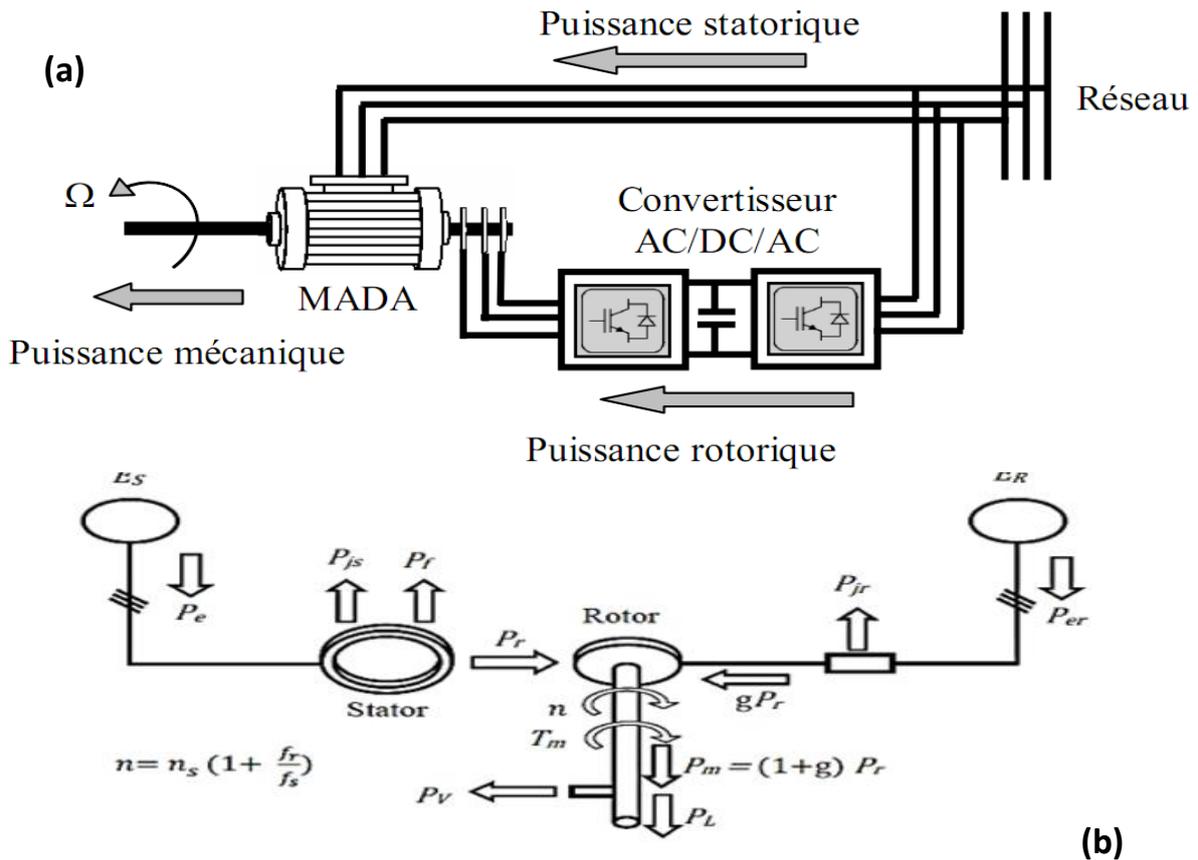


Figure.I.7. (a) Étude du fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation. (b) cheminement de la puissance en régime moteur hyper-synchrone [12-13].

I.5.2 Mode générateur

Le rotor peut tourner en sur-synchronisme ($-1 \leq g < 0$), la vitesse de rotation de champ statorique être plus petite que la vitesse de rotation de rotor [11]. il y a à distinguer deux modes opérationnels.

I.5.2.1 Modes générateurs hypo-synchrones

Dans ce régime, le stator restitue de l'énergie au réseau, tandis que le rotor absorbe la puissance liée au glissement. Il s'agit ainsi d'un fonctionnement en mode générateur, caractérisé par une vitesse de rotation inférieure à celle de synchronisme. Ce mode de fonctionnement n'est toutefois pas réalisable avec une machine asynchrone standard à cage (voir Figure I.8) [12-13].

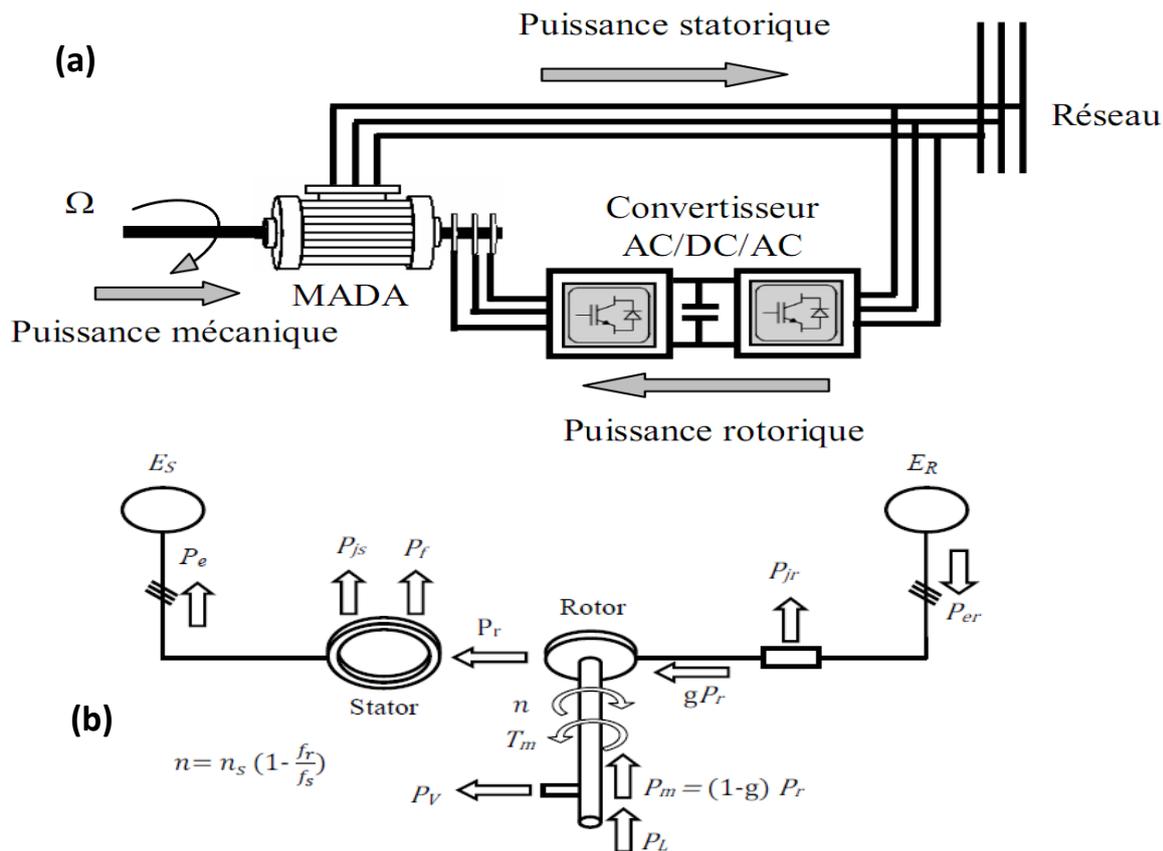


Figure.1.8. (a) Étude du fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation. (b) cheminement de la puissance en régime générateur hypo-synchrone [12-13].

I.5.2.2 Mode générateur hyper-synchrone

Dans cette configuration, le stator injecte de l'énergie dans le réseau, tandis que la puissance de glissement, prélevée au niveau du rotor, est également réintroduite dans le réseau. La machine fonctionne alors à une vitesse supérieure à celle de synchronisme. Bien qu'un fonctionnement similaire soit envisageable avec une machine asynchrone à cage conventionnelle, la puissance de glissement y est inévitablement dissipée sous forme de pertes Joule dans le rotor (voir Figure I.9) [12-13].

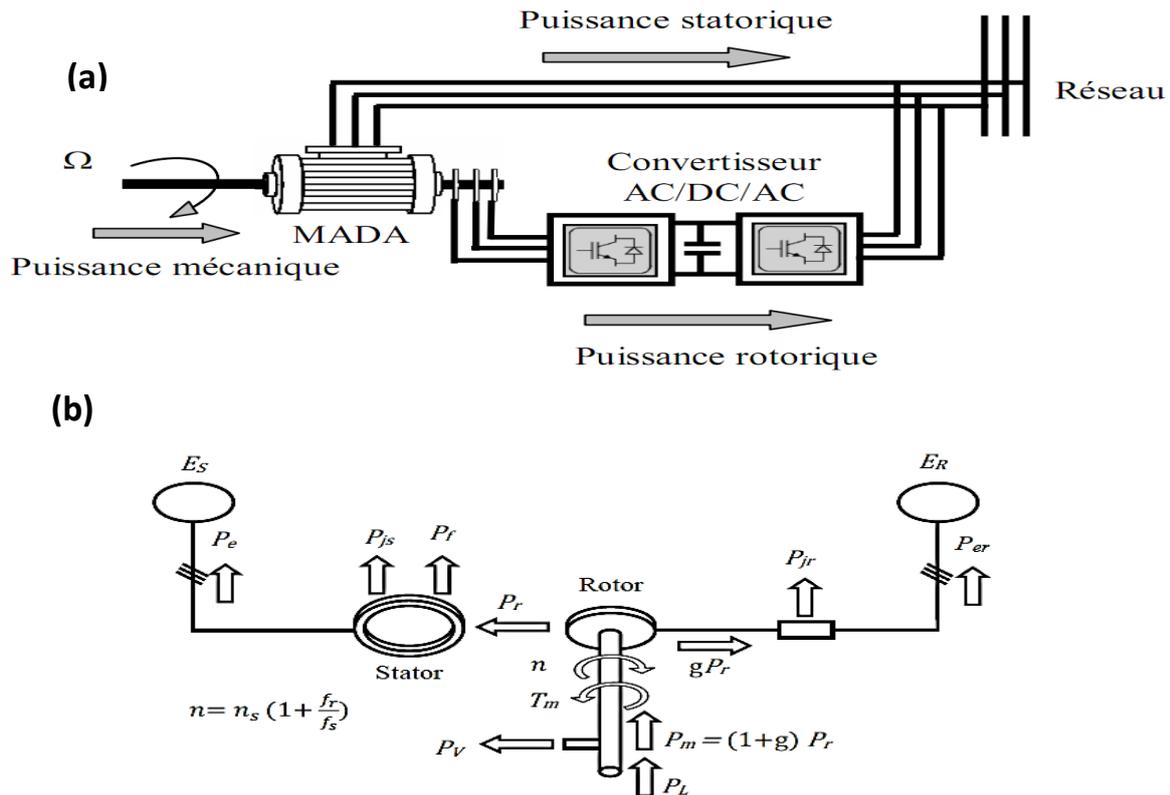


Figure.I.9. (a)Étude du fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.(b) cheminement de la puissance en régime générateur hyper-synchrone[12-13].

I.6 Domaines d'application de la Mada

Les machines asynchrones à double alimentation (MADA) sont largement utilisées dans divers secteurs industriels et énergétiques, grâce à leur capacité à fonctionner à vitesses variables tout en maintenant un haut rendement. Parmi les principales applications, on peut citer [14] :

- Les énergies renouvelables, notamment dans les systèmes éoliens et les centrales hydrauliques, où leur fonctionnement flexible permet d'adapter la production à la variabilité des sources d'énergie.
- Les systèmes de pompage, dans lesquels les MADA permettent un ajustement précis de la vitesse des pompes en fonction des besoins, améliorant ainsi l'efficacité énergétique globale.
- La propulsion électrique, comme dans les trains et les tramways, où un contrôle rigoureux de la vitesse est essentiel pour garantir performance et sécurité.
- Les équipements industriels à vitesse contrôlée, tels que les convoyeurs et les broyeurs, où la régulation fine de la vitesse de rotation est nécessaire pour répondre aux exigences des procédés de production.

- Les générateurs embarqués, utilisés à bord des navires ou des avions pour assurer l'alimentation électrique des systèmes critiques.
- Les dispositifs de levage, tels que les ascenseurs, les monte-charges et les grues, où les MADA assurent un démarrage progressif, un arrêt sécurisé, ainsi qu'une consommation énergétique optimisée.

I.7 Avantages et inconvénients de la Mada

Bien que la machine asynchrone à double alimentation ait atteint un haut niveau de maturité technologique et offre de nombreux avantages en termes de performance et de flexibilité, elle n'est pas exempte de limitations, notamment en raison de la complexité de sa structure. À partir de cette section, nous présenterons de manière détaillée les principaux avantages et inconvénients associés à cette technologie [14].

I.7.1 Avantages de la MADA

Les principaux avantages de MADA comprennent [12-13-14]:

- **Réduction de l'encombrement des convertisseurs et efficacité économique :** L'utilisation d'une MADA permet de réduire de manière significative la taille des convertisseurs – jusqu'à 70 % – grâce à la modulation de la vitesse et à l'ajustement de la fréquence d'alimentation du rotor. Cette caractéristique en fait une solution économiquement avantageuse. Contrairement à la machine asynchrone à cage, la MADA ne se contente pas de ne pas consommer de puissance réactive, elle peut également en fournir au réseau.
- **Accès bidirectionnel au stator et au rotor souple de contrôle :** La double alimentation confère à la MADA une grande flexibilité, en offrant plusieurs degrés de liberté pour le contrôle. L'alimentation du rotor via un convertisseur permet une régulation indépendante de la puissance active et réactive. Ainsi, le facteur de puissance ($\cos \varphi$) peut être ajusté indépendamment de la charge, ce qui améliore considérablement la qualité de l'énergie injectée dans le réseau. En fonctionnement sous-synchrone, l'énergie est injectée dans le rotor par le convertisseur. En sur-synchronisme, l'énergie excédentaire est extraite du rotor et renvoyée vers le réseau, assurant ainsi un échange bidirectionnel de puissance.
- **Fonction de compensation réactive :** Grâce à sa capacité à fournir de la puissance réactive, la MADA peut remplir le rôle d'un compensateur statique (STATCOM),

contribuant ainsi à la stabilisation de la tension du réseau et à la réduction des pertes liées au transport d'énergie.

- **Contrôle précis de la vitesse et démarrage progressif** : La MADA permet un réglage fin de la vitesse de rotation en agissant sur les paramètres du circuit rotorique. Elle offre également la possibilité d'un démarrage progressif, sans nécessiter un appel de courant élevé depuis le réseau, ce qui améliore la fiabilité et réduit les contraintes sur l'infrastructure électrique.
- **Efficacité du convertisseur de fréquence** : Le convertisseur associé à la MADA joue un rôle central dans le pilotage du rotor. Il permet de réduire considérablement les pertes électroniques et les coûts associés à la compensation réactive. Par ailleurs, il contribue à la stabilité de la fréquence du réseau, renforçant ainsi la robustesse globale du système électrique.
- **Large plage de fonctionnement en vitesse variable** : L'un des atouts majeurs de la MADA réside dans sa capacité à maintenir un bon rendement sur une large plage de vitesses. Typiquement, elle peut fonctionner autour de $\pm 30\%$ de la vitesse synchrone, ce qui dépasse largement les capacités d'une machine asynchrone classique.

1.7.2 Inconvénients de la MADA

Les principaux inconvénients de MADA comprennent [12-13-14]:

- **Complexité du système de commande** : Le fonctionnement en double alimentation requiert un système de contrôle avancé et sophistiqué pour assurer la gestion simultanée du stator et du rotor. Cette complexité rend la commande de la machine plus difficile à implémenter et à stabiliser, notamment dans les environnements dynamiques.
- **Coûts de fabrication accrus** : La MADA nécessite plusieurs convertisseurs de puissance (tels que deux redresseurs et deux onduleurs, ou un redresseur associé à deux onduleurs), ce qui augmente le coût de fabrication par rapport aux machines asynchrones à cage, qui n'exigent généralement qu'un seul redresseur et un seul onduleur. Cette architecture plus élaborée engendre des coûts supplémentaires et alourdit l'installation.

- **Production d'harmoniques** : L'utilisation de l'électronique de puissance pour l'alimentation du rotor génère des harmoniques dans le réseau, ce qui peut détériorer la qualité du courant. Il est donc souvent nécessaire d'ajouter des filtres spécifiques afin de respecter les normes de qualité d'énergie.
- **Vulnérabilité aux courts-circuits** : En cas de défaut, notamment de type court-circuit, les courants de défaut peuvent atteindre des valeurs très élevées, mettant en danger les composants électroniques de puissance qui pilotent le rotor.
- **Sensibilité aux fluctuations de tension** : Étant donné que le rotor est alimenté via des convertisseurs électroniques, la MADA se montre particulièrement sensible aux variations de tension du réseau, ce qui peut compromettre la stabilité du système et la qualité du contrôle.
- **Pertes mécaniques liées aux bagues collectrices** : La présence des bagues collectrices dans la structure de la MADA engendre des pertes mécaniques par frottement. Bien que ces pertes soient généralement faibles, elles représentent un inconvénient à considérer, surtout dans les applications nécessitant une haute fiabilité.
- **Coût initial élevé et besoins accrus en maintenance** : Comparée à d'autres types de machines, la MADA présente un coût d'acquisition plus élevé, ainsi que des exigences de maintenance plus importantes, ce qui peut freiner son adoption dans certaines industries.

I.8 Les causes des défauts de Machine asynchrone à double alimentation

Les dysfonctionnements affectant les machines électriques peuvent être classés en deux catégories principales : internes et externes.

Les défauts internes proviennent des composants mêmes de la machine, tels que les roulements du stator et du rotor, les circuits électriques, les cages du rotor, ainsi que divers éléments mécaniques (voire la figure I.10). En revanche, les défauts externes sont généralement liés aux conditions d'alimentation électrique, à la charge mécanique appliquée ou à l'environnement de fonctionnement de la machine (voire la figure I.11) [15].

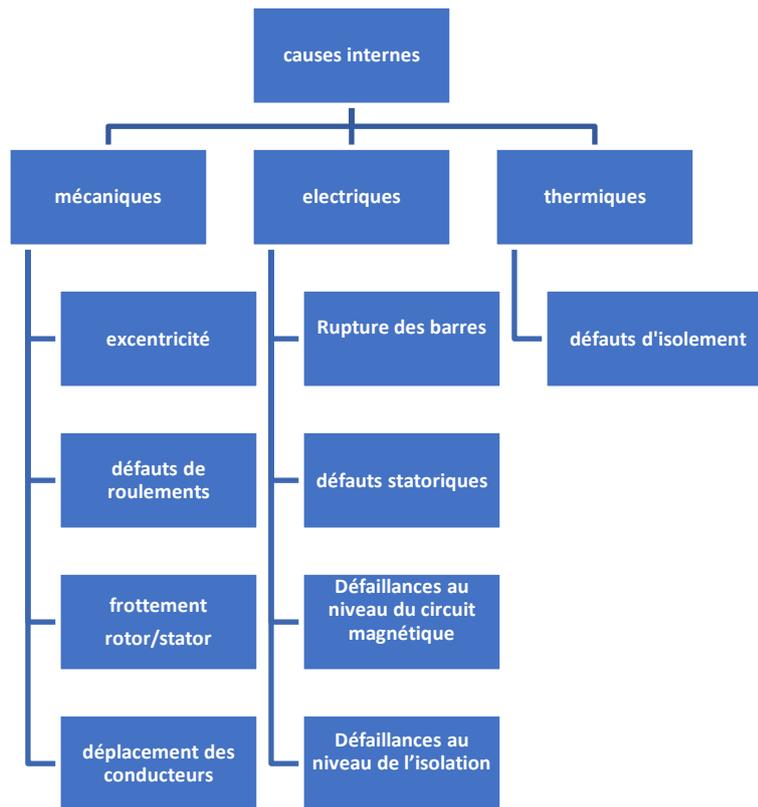


Figure.I.10. Causes internes de défauts de la machine asynchrone[15]

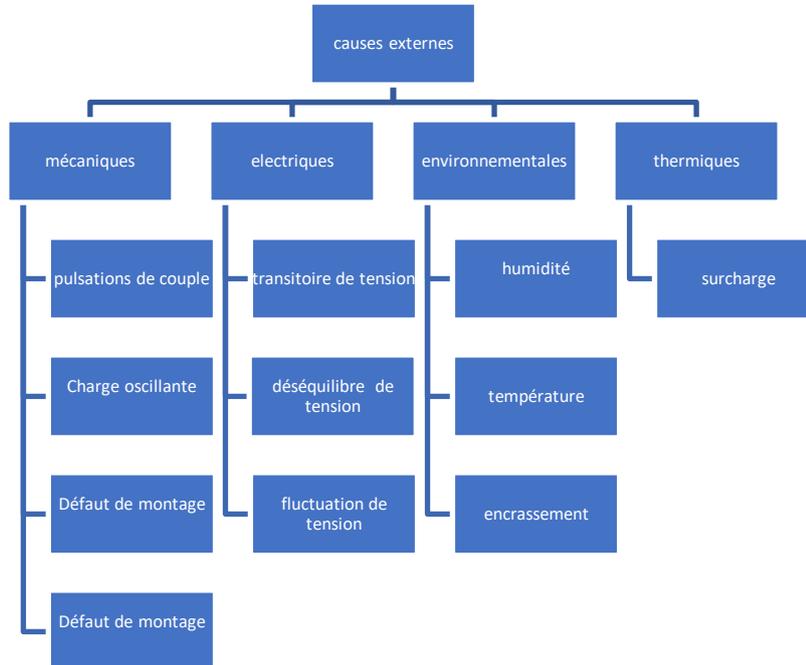


Figure.I.11. Causes externes de défauts de la machine asynchrone[15-16-17]

La figure I.12 illustre les principaux phénomènes à l'origine des défauts dans les machines électriques.

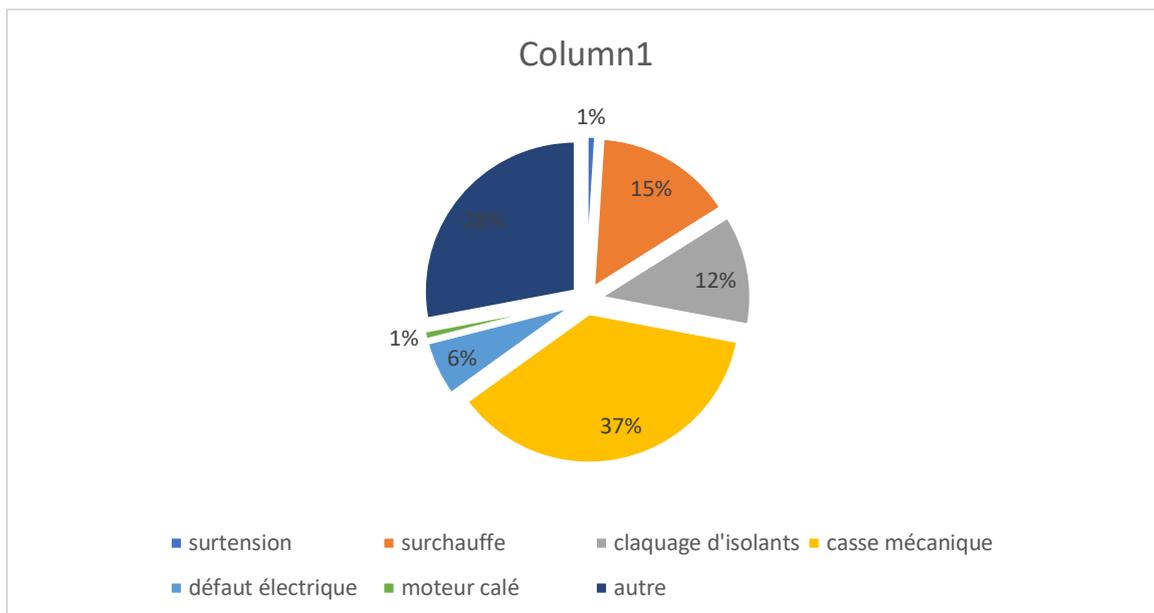


Figure. I.12. Répartition les statistiques des causes des défauts pour une machine asynchrone IEEE[18]

D'après la figure I.12, la cause dominante des dysfonctionnements est d'origine mécanique, notamment en raison de l'usure ou de défauts dans les éléments en mouvement.

La deuxième cause recensée est liée à la surchauffe du moteur, qui accélère le processus de vieillissement des composants internes. Enfin, la troisième source majeure de défauts réside dans le claquage des isolants, susceptible d'engendrer des courts-circuits au sein des enroulements.

I.9 Types des défauts de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) peut être sujette à divers types de défauts, classés en plusieurs catégories principales [19] :

- Défauts du stator
- Défauts du rotor

Une étude menée pour l'IEEE a permis d'établir une répartition statistique des différents types de défauts pouvant affecter une machine électrique, comme le montre la Figure (I.13)[18].

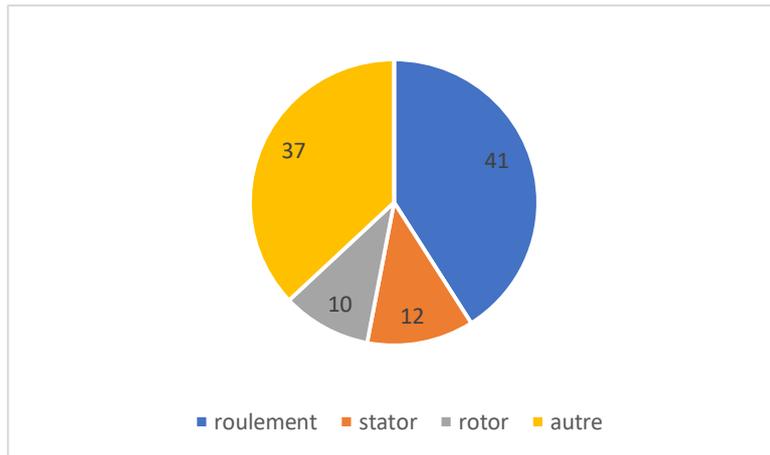


Figure.I.13. Répartitionles statistiques des défauts[18]

I.9.1 Défauts de stator

Les défauts les plus fréquemment rencontrés dans la partie statorique d'une machine, en particulier au niveau des enroulements statiques (voir Figure I.14), sont généralement liés à plusieurs types d'anomalies [20] :

- Défaillance de l'isolation à la masse ;
- Rupture du circuit magnétique due à la cassure ou au délaminage des tôles magnétiques
- Défauts de couplage entre phases ;
- Courts-circuits entre phases ou entre différentes bobines ;
- Courts-circuits entre spires d'une même phase.

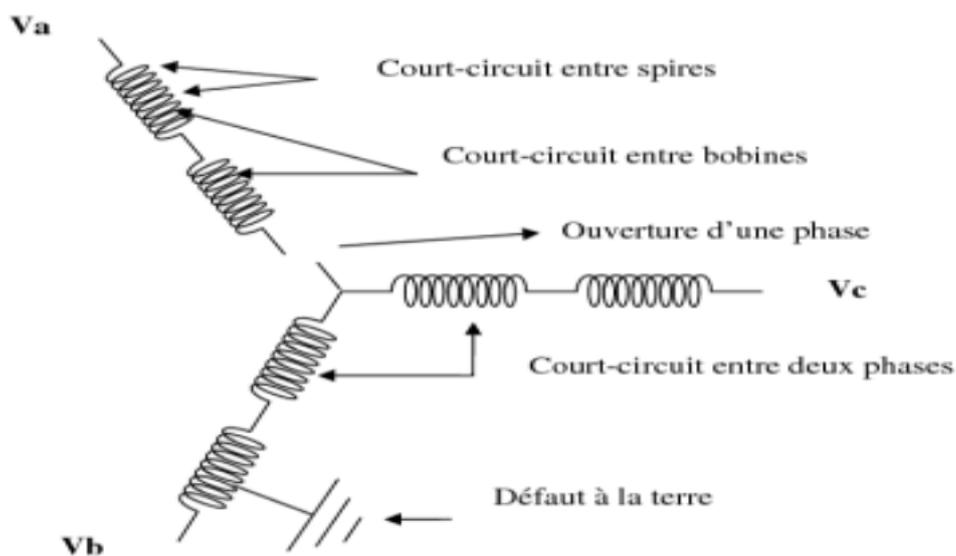


Figure.I.14. Défauts statoriques[21]

I.9.1.1 Problèmes d'isolement de masse

La dégradation des matériaux isolants dans les enroulements peut être à l'origine de défauts graves, notamment des courts-circuits. En effet, les différentes pertes énergétiques (effet Joule, pertes fer, pertes mécaniques, etc.), induites par les phénomènes thermiques, entraînent une élévation de la température des composants internes du moteur.

Lorsque la température de fonctionnement dépasse les limites de tolérance du matériau isolant, celui-ci subit un vieillissement accéléré, pouvant conduire à une défaillance totale de l'isolation. Les principales causes identifiées de ce type de défaillance sont les suivantes [22] :

- Défaut de fabrication lié à une isolation initialement dégradée ;
- Surcharge ou surs tension provoquant une élévation excessive du courant dans les enroulements, ou dysfonctionnement du convertisseur ;
- Vibrations mécaniques prolongées affectant l'intégrité des isolants ;
- Dépassement des contraintes de tension admissibles par l'isolant ;
- Fonctionnement en milieu agressif ou dans des conditions environnementales défavorables ;
- Vieillessement naturel des matériaux isolants avec le temps.

I.9.1.2 Court-circuit entre spire

Le court-circuit entre spires d'une même phase constitue un défaut relativement fréquent dans les machines électriques. Il est généralement provoqué par une ou plusieurs défaillances de l'isolation au sein de l'enroulement concerné. Ce type de panne entraîne une augmentation du courant statorique dans la phase affectée, tandis que les deux autres phases peuvent présenter de légères variations d'amplitude [15].

Ces déséquilibres modifient le facteur de puissance de la machine et entraînent une amplification du courant dans le circuit rotorique, ce qui provoque une élévation de la température au niveau du bobinage [15].

En conséquence, cette surchauffe accélère la dégradation de l'isolant, pouvant aboutir à une défaillance en cascade, comme l'apparition d'un second court-circuit dans une autre portion de l'enroulement (voir Figure I.15) [15].

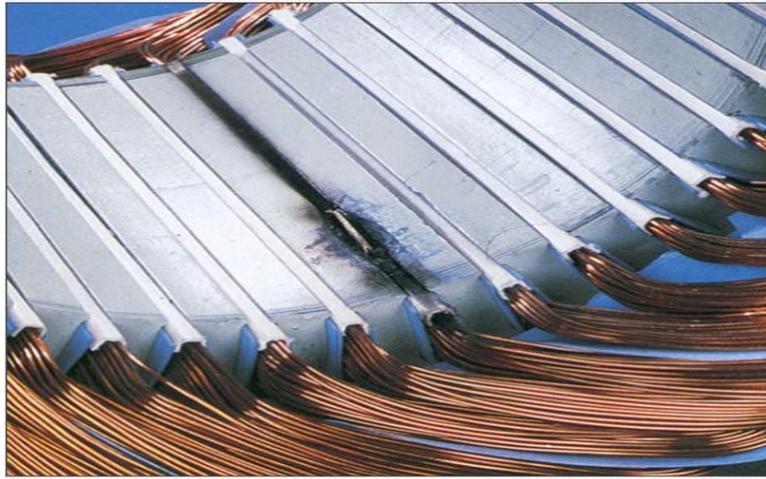


Figure. I.15. Court-circuit entre spire

I.9.1.3 Court-circuit entre phases

Ce type de défaillance peut survenir à n'importe quel point du bobinage, mais ses effets dépendent fortement de sa localisation dans le système. Cette variabilité rend l'analyse de son impact sur le comportement global de la machine particulièrement délicate.

Lorsqu'un court-circuit entre phases se produit à proximité de la source d'alimentation, il engendre des courants de très forte intensité, susceptibles de provoquer la fusion des conducteurs ou le déclenchement immédiat des dispositifs de protection. En revanche, si le court-circuit se manifeste près du point neutre, il génère un déséquilibre important sans nécessairement causer la fusion des conducteurs.

Dans ce cas, les courants statoriques deviennent fortement asymétriques, et ce déséquilibre est directement proportionnel à la sévérité du défaut. De plus, les courants induits dans les barres et les anneaux rotoriques augmentent sensiblement. L'identification de ce type de défaut repose notamment sur l'analyse du déséquilibre des courants de phase, comme illustré à la Figure (I.16) [15].

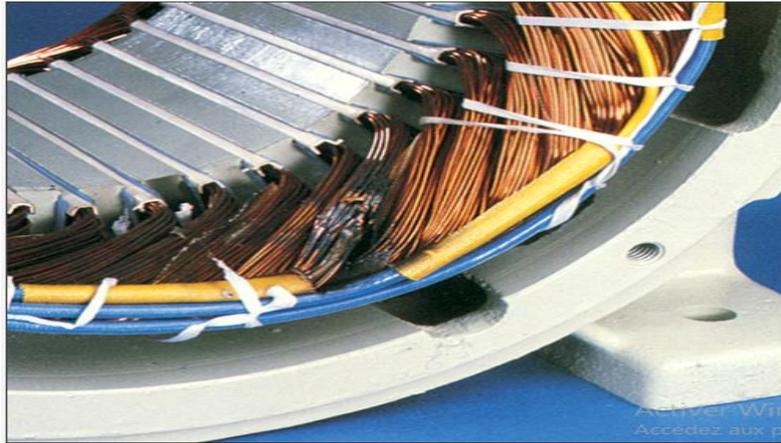


Figure. I.16. Court-circuit entre phases.

I.9.2 Défauts de Rotor

Ces défauts génèrent généralement un déséquilibre au niveau du rotor, affectant le fonctionnement global de la machine [22].

Ce déséquilibre peut aggraver plusieurs types de problèmes, notamment [22] :

- Mécaniques, tels que les défaillances des roulements ;
- Dynamiques, comme les irrégularités de l'arbre de transmission ;
- Résiduels, dus à des déformations structurelles ;
- Thermiques, liées aux surcharges ;
- Et électromagnétiques, telles que les excentricités du champ magnétique.

I.9.2.1 Défaut de contact balai – bague

Un déséquilibre de résistance entre les trois phases tournantes peut survenir en cas de rupture de contact entre les balais et les bagues collectrices. Ce phénomène a un impact négatif sur les performances de la machine, car le système de commande est particulièrement sensible à la continuité temporelle du signal de rotation. Une telle interruption peut entraîner une augmentation notable des pertes énergétiques, affectant ainsi l'efficacité globale du dispositif Figure (I.17) [23].



Figure. I.17. Défaut de contact balai – bague

I.9.2.2 Ruptures de barres

L'une des défaillances les plus fréquentes du rotor concerne la rupture d'une ou plusieurs barres. Cette rupture peut se produire soit au niveau de l'encoche, soit à l'extrémité reliant l'anneau rotorique. Une telle dégradation des barres a pour effet de réduire la valeur moyenne du couple électromagnétique et d'accroître l'amplitude des oscillations de ce couple [24].

Ces oscillations entraînent des variations de la vitesse de rotation, ce qui se manifeste par des vibrations mécaniques et un fonctionnement instable de la machine. Lorsque l'amplitude de ces oscillations devient importante, elle accélère la détérioration de l'ensemble du système. Ainsi, plus le nombre de barres cassées augmente, plus la diminution du couple est marquée, générant un effet cumulatif sur la dégradation des performances [25] Figure (I.18).

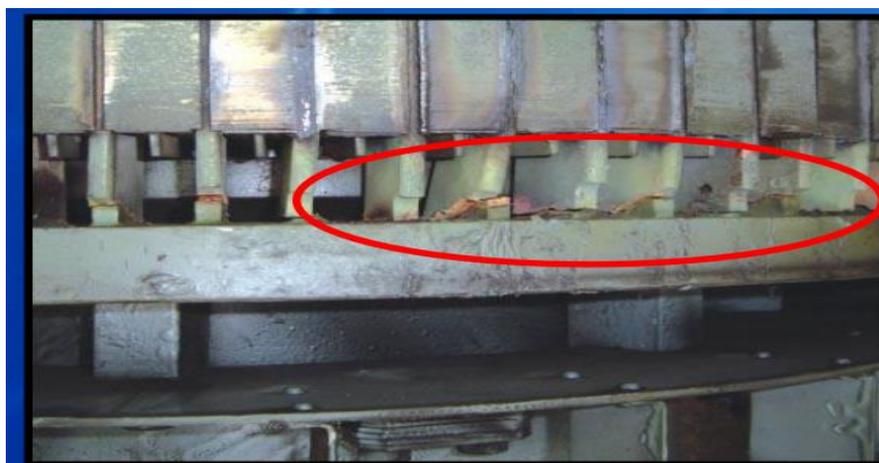


Figure.I.18. Ruptures de barres[17].

I.9.2.3 Ruptures d'anneaux

La rupture d'une portion d'anneau de court-circuit constitue un défaut aussi fréquent que la rupture des barres rotoriques. Ce type de défaillance est généralement attribué à la présence de bulles issues du processus de coulée ou à des dilatations différentielles entre les barres et les anneaux. En raison de la difficulté de détection de ce défaut, il est souvent regroupé ou confondu avec celui des barres dans les analyses statistiques.

Les anneaux de court-circuit sont sollicités par des courants plus intenses que ceux traversant les barres du rotor. Ainsi, une conception inadéquate des anneaux, des conditions environnementales défavorables (comme une température ou une humidité élevée), ou encore une surcharge de couple entraînant une surintensité, peuvent favoriser leur rupture.

La rupture d'une portion d'anneau engendre alors un déséquilibre dans la distribution des courants à travers les barres rotoriques, ce qui provoque une modulation d'amplitude des courants statoriques semblable à celle observée lors de la rupture d'une barre [26] (Figure I.19).

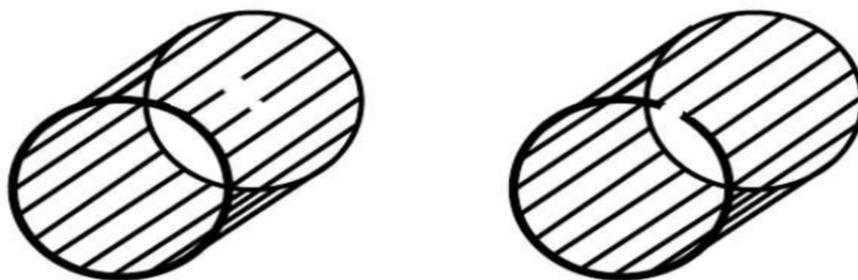


Figure.I.19. Ruptures d'anneaux

I.9.2.4 Défautes des mécaniques (roulements)

- **D' défaillances de roulements**

Les roulements à billes remplissent une fonction essentielle en tant qu'interface électromécanique entre le stator et le rotor. Ils permettent de maintenir l'alignement de l'arbre de la machine, garantissant ainsi une rotation régulière et fluide du rotor. Les défauts les plus fréquemment observés au niveau des roulements dans les moteurs à induction, ainsi que leurs mécanismes de dégradation, ont été largement étudiés [24].

Ce type de dysfonctionnement est particulièrement répandu dans les machines de grande puissance, où il est souvent lié à l'usure mécanique des éléments roulants, en particulier à la dégradation des billes ou des surfaces de contact. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de cette usure, parmi lesquels (Figure I.20) [27] :

- Le vieillissement naturel des roulements ;

- Une température de fonctionnement élevée ;
- La perte ou l'insuffisance de lubrification ;
- La contamination de l'huile par des particules métalliques, résultant de la détérioration des éléments roulants.



Figure.I.20. Défaits des mécaniques (roulements)[17].

Les effets immédiats liés à une défaillance des roulements se traduisent par plusieurs manifestations mécaniques caractéristiques, parmi lesquelles [27]

- L'apparition de cavités sur les pistes intérieure et extérieure des roulements
- Des irrégularités de surface sur les chemins de roulement
- Des dommages structurels aux billes
- Une corrosion induite par l'humidité ambiante
- Une insuffisance de lubrification, souvent aggravée par une température excessive
- Le décollement ou l'écaillage des surfaces, généralement dû à une surcharge mécanique

Ces défauts ont pour conséquence directe l'apparition d'oscillations du couple de charge, l'augmentation des pertes énergétiques, ainsi que la formation d'un jeu mécanique entre les bagues interne et externe du roulement. Ce dernier engendre des vibrations longitudinales du rotor, nuisibles au bon fonctionnement de la machine. Dans les cas les plus graves, un roulement endommagé peut provoquer un arrêt complet du moteur [27-28].

- **D' défaillances de l'arbre :**

Ces défaillances trouvent généralement leur origine dans l'apparition de fissures au niveau de l'arbre, souvent dues à un choix inapproprié du matériau ou à une conception déficiente de la machine. Sous l'effet combiné de diverses sollicitations — mécaniques, dynamiques, résiduelles, thermiques, électromagnétiques et environnementales — ces fissures peuvent évoluer jusqu'à provoquer une rupture brutale de l'arbre, entraînant l'arrêt immédiat de l'équipement. De plus, une exposition prolongée à des environnements corrosifs favorise l'émergence de microfissures, susceptibles d'endommager gravement la machine. Par ailleurs, certaines formes de défauts d'excentricité peuvent accélérer la fatigue de l'arbre en induisant des charges supplémentaires. La rupture de l'arbre se manifeste souvent par une augmentation des vibrations et par l'apparition d'harmoniques de courant, comme l'illustre la figure (I.21) [28-29].



Figure.I.21. Défaillances de l'arbre.

I.9.2.5 Défauts d'excentricité :

Les défauts d'excentricité dans une machine électrique engendrent une variation de l'entrefer, ce qui induit une distribution non uniforme des courants au sein du rotor, ainsi qu'un déséquilibre des courants statoriques. Cette répartition asymétrique des forces agissant sur les barres du rotor génère un couple électromagnétique instable au fil du temps. Lorsque le niveau de déflexion augmente, des forces radiales apparaissent, résultant de l'interaction entre le champ magnétique statorique et la surface de glissement du rotor, ce qui peut causer des dommages mécaniques tant au stator qu'au rotor. L'asymétrie géométrique du rotor, à l'origine de la variation de l'entrefer, se manifeste sous trois formes principales [30]

- Excentricité statique : elle se produit lorsque l'axe de rotation de la machine est aligné avec celui du stator, mais décalé par rapport à celui du rotor (voir figure I.22.a).
- Excentricité dynamique : dans ce cas, l'axe de rotation du rotor est désaligné par rapport à l'axe de symétrie du stator (voir figure I.22.b).
- Excentricité mixte : elle survient lorsque l'axe de rotation du rotor ne correspond ni à l'axe du stator ni à celui du rotor lui-même (voir figure I.22.c).

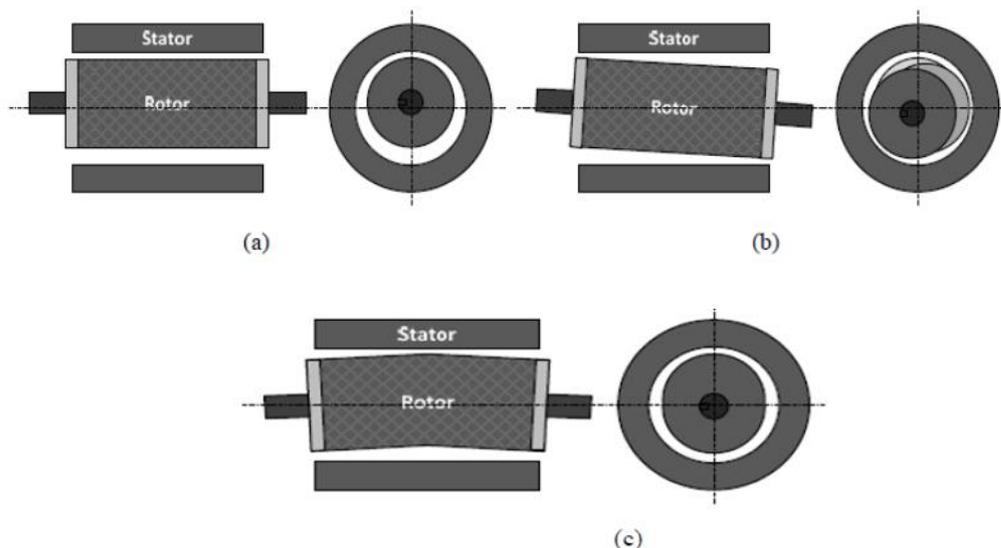


Figure.I.22. (a). Excentricité statique. (b) excentricité dynamique. (c) excentricité mixte. [30]

I.10 Les méthodes de diagnostic :

La détection des défauts dans les machines asynchrones à double alimentation (DFIG – *Doubly-Fed Induction Generators*) s'appuie sur des approches de diagnostic avancées, capables de repérer les anomalies d'origine mécanique, électrique ou magnétique bien avant qu'elles n'atteignent un stade critique. Une large gamme de techniques est disponible, chacune étant adaptée à des types spécifiques de dysfonctionnements, comme illustré dans la (figure I.23)[30].

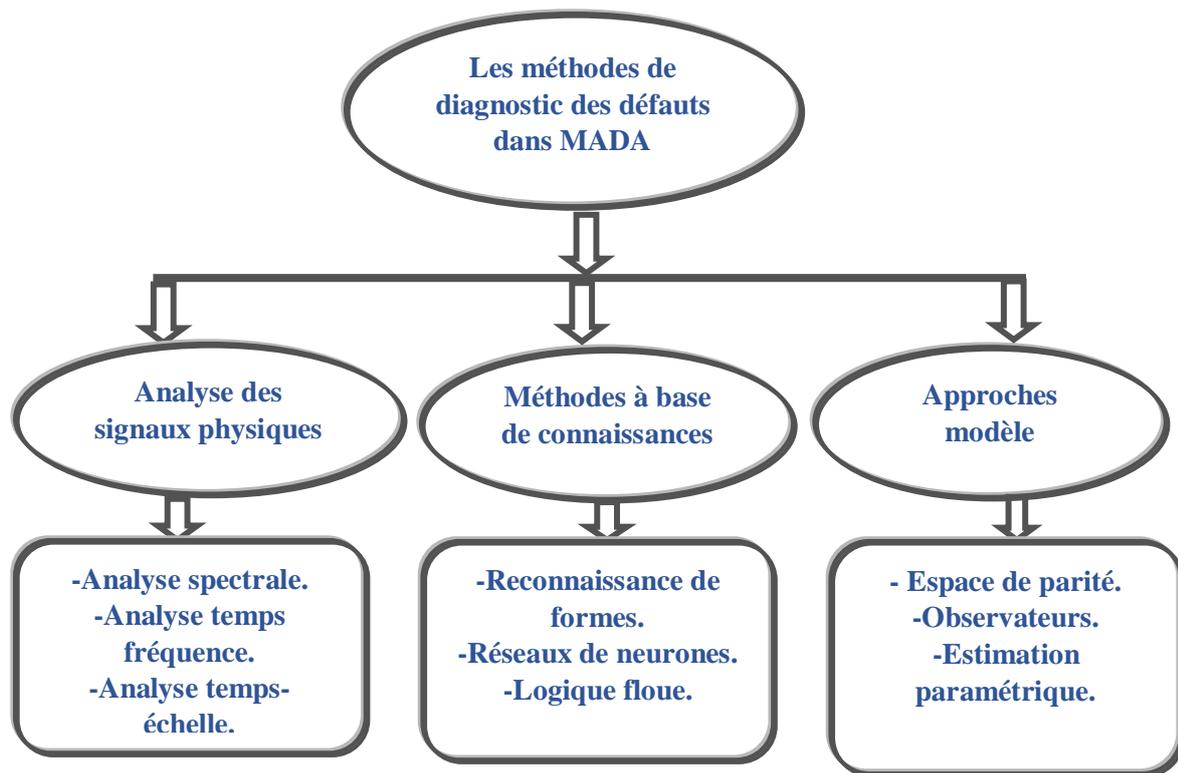


Figure.I.23. Méthodes de diagnostic de défauts[30].

On distingue généralement trois grandes catégories de méthodes de diagnostic :

- Les approches fondées sur l'analyse des signaux physiques, qui consistent à détecter les signes caractéristiques de défaillances à travers l'évolution de certaines composantes fréquentielles, à l'aide d'outils tels que l'analyse spectrale ou l'analyse temps-fréquence.
- Les méthodes basées sur la connaissance, qui exploitent des bases de données historiques pour identifier les types de pannes, en s'appuyant sur des techniques statistiques ou des algorithmes d'intelligence artificielle.
- Les approches orientées modèle, qui reposent sur une modélisation mathématique du système et visent à détecter les écarts entre le comportement observé et celui prédit par le modèle, notamment par l'estimation de paramètres ou l'analyse des résidus.

I.10.1 Analyse des différents signaux

Depuis plusieurs décennies, de nombreuses techniques d'analyse du signal sont appliquées à l'étude de la composition spectrale des grandeurs issues des machines électriques, telles que le courant, la puissance, le couple électromagnétique, la vitesse de rotation, le flux magnétique ou encore les vibrations [31].

I.10.1.1 Analyse spectrale du courant statorique

Il s'agit de l'une des techniques les plus couramment utilisées pour le diagnostic non intrusif des défauts dans les machines asynchrones à double alimentation (MADA). Elle permet d'identifier des anomalies d'origine électrique, mécanique ou électromécanique en analysant à la fois la forme d'onde et le spectre fréquentiel du courant statorique, lequel renferme une richesse d'informations révélatrices des dysfonctionnements potentiels affectant ce type de machine [31].

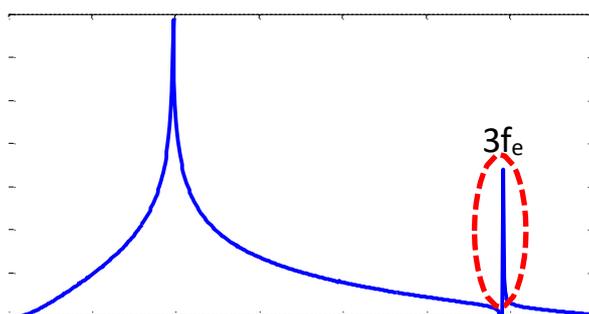


Figure.I.24. Spectre du courant statorique avec défaut sur une phase au stator[31].

La figure I.24 illustre une machine asynchrone affectée par un court-circuit monophasé. On y observe le spectre du courant statorique I_s , dans lequel apparaît une composante fréquentielle caractéristique du défaut, située à $3f_e$ (soit 300 Hz).

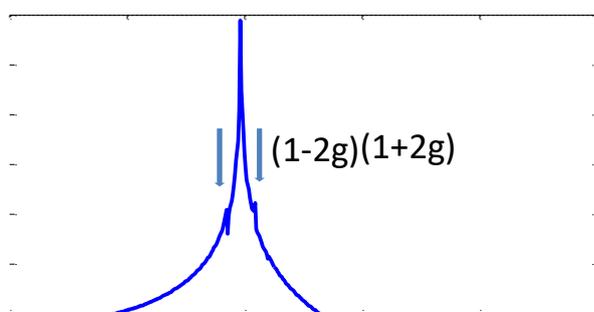


Figure.I.25. Spectre du courant statorique avec défauts sur une phase au rotor[31].

La figure I.24 met en évidence les signatures typiques d'un défaut, notamment par l'apparition de deux composantes fréquentielles situées de part et d'autre de la fréquence électrique, conformément à la relation $f=(1\pm 2g)*f_e$, où g représente le glissement. Ce type d'anomalie demeure difficile à identifier dans le spectre du courant, en raison de la forte dominance de la fréquence fondamentale par rapport aux composantes associées au défaut. Dans le cas étudié, la défaillance résulte d'une réduction d'environ 30 % de l'enroulement sur l'une des phases, que ce soit au niveau du stator ou du rotor.

f_e : c'est la fréquence du réseau électrique, aussi appelée fréquence d'alimentation.

f : c'est une fréquence caractéristique d'un défaut, détectée dans le spectre du courant statorique

I.10.1.2 analyse de la température (La Thermographie)

La thermographie infrarouge est une technique d'imagerie reposant sur la détection des rayonnements infrarouges émis par un objet, permettant de visualiser la distribution thermique de sa surface. À l'aide d'une caméra thermique, le rayonnement invisible est converti en une image visible appelée thermogramme. Cette méthode permet d'identifier les zones de surchauffe ou les variations anormales de température susceptibles de révéler des défauts ou des dysfonctionnements. Comparée aux techniques classiques, la thermographie offre une capacité de détection précoce supérieure, souvent avant que les défaillances ne deviennent critiques (figure I.26) [32]

Température	Critère de sévérité
10–25°C	Probable.
25–40°C	Important.
40–70°C	Obligatoire.
>70°C	Immédiat.



Figure.I.26 Thermograms d'un moteur [33]

Lorsque la différence de température ΔT mesurée sur un composant dépasse 40 °C, un seuil critique est considéré comme atteint, nécessitant une surveillance particulière. En dessous de cette valeur, on considère qu'un niveau de sévérité est déjà présent, indiquant un début de dégradation (voir Tableau I).

Tableau I.1 Critères de sévérité de température [33].

I.10.1.3 Analyse de flux magnétique de dispersion de fuite radial

En régime de fonctionnement normal, les tensions et les courants statoriques d'une machine électrique restent équilibrés. Toutefois, l'apparition d'un défaut perturbe cet équilibre, générant dans un premier temps un déséquilibre électrique, suivi d'une perturbation magnétique dans les circuits statorique et rotorique.

Ce déséquilibre se manifeste par l'émergence de composantes fréquentielles spécifiques à chaque type de défaillance, perceptibles dans le spectre du flux magnétique de fuite axial.

L'analyse de ce flux est généralement effectuée à l'aide d'une bobine de détection placée à l'extrémité de la machine ou autour de son arbre. Le flux axial traversant cette bobine induit une force électromotrice (f.é.m.), dont l'étude spectrale constitue un outil efficace pour évaluer l'état de fonctionnement de la machine (voir figure I.27) [30].

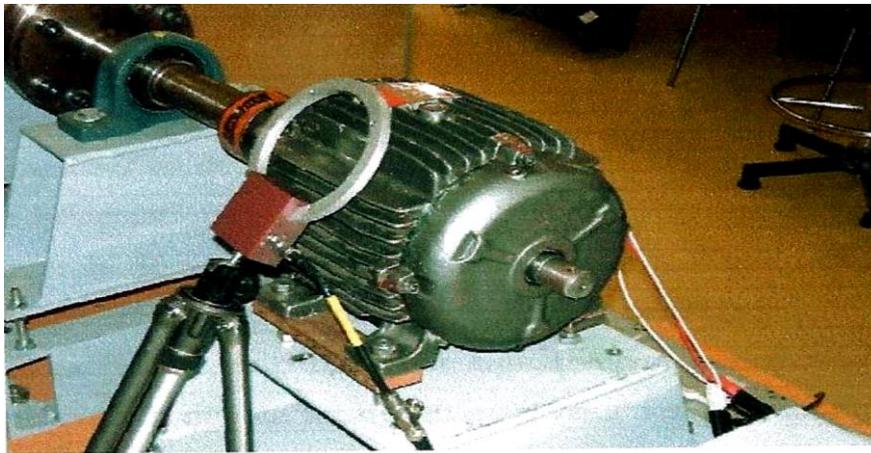


Figure.I.27. Principe de mesure du flux magnétique de dispersion radial.

I.10.1.4 Analyse des vibrations mécaniques

L'analyse des vibrations mécaniques constitue une méthode de diagnostic couramment employée, notamment pour détecter les forces radiales générées par le champ magnétique de l'entrefer, responsables de vibrations dans les machines asynchrones. Ces forces sont proportionnelles au carré de l'induction magnétique.

Pour mesurer ces vibrations, on utilise des accéléromètres placés sur les paliers de la machine, selon les directions axiales, verticale et radiale. Les spectres des signaux vibratoires enregistrés en présence d'un défaut sont ensuite comparés à ceux obtenus en régime de fonctionnement normal (voir figure I.28). Cette méthode s'intègre aux systèmes portables de surveillance vibratoire largement utilisés dans le milieu industriel [10]. Elle permet de détecter aussi bien les défauts électriques que mécaniques, dans la mesure où la force

magnétomotrice est influencée par les irrégularités du stator ou du rotor, tandis que la perméance varie en fonction des fluctuations de l'entrefer entre les pôles [35].

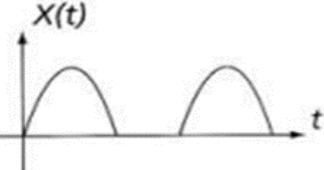


Figure.I.28. Collecteur analyseur (movipack 01db-s'tell)

Différents types de vibrations peuvent être enregistrés à l'aide d'un analyseur d'ondes vibratoires, chacun présentant une signature temporelle spécifique. L'analyse de ces représentations dans le domaine temporel permet de remonter aux causes potentielles des anomalies observées (voir Tableau II) [35].

Tableau. I.2. Typologie des vibrations dans les machines tournantes et diagnostic des défauts associés[36].

Nature de vibration	Forme temporelle	Causes possible
Sinusoïdale		Balourd
Sinusoïdale complexe		Effort dynamique D'engrènement
Transitoire		explosions, marteaux-pilons, laminoirs

<p>Transitoire périodique</p>		<p>Presse automatique, cames</p>
<p>Aléatoire</p>		<p>Oscillations de pression exercées sur une structure baignant dans un fluide en écoulement</p>

I.10.2 Techniques d'intelligence artificielle (IA)

Un analyseur d'ondes vibratoires permet de détecter divers types de vibrations, chacun étant caractérisé par une signature temporelle propre. L'interprétation de ces signaux dans le domaine temporel constitue un outil efficace pour identifier les origines possibles des défauts détectés (voir Tableau II) [35].

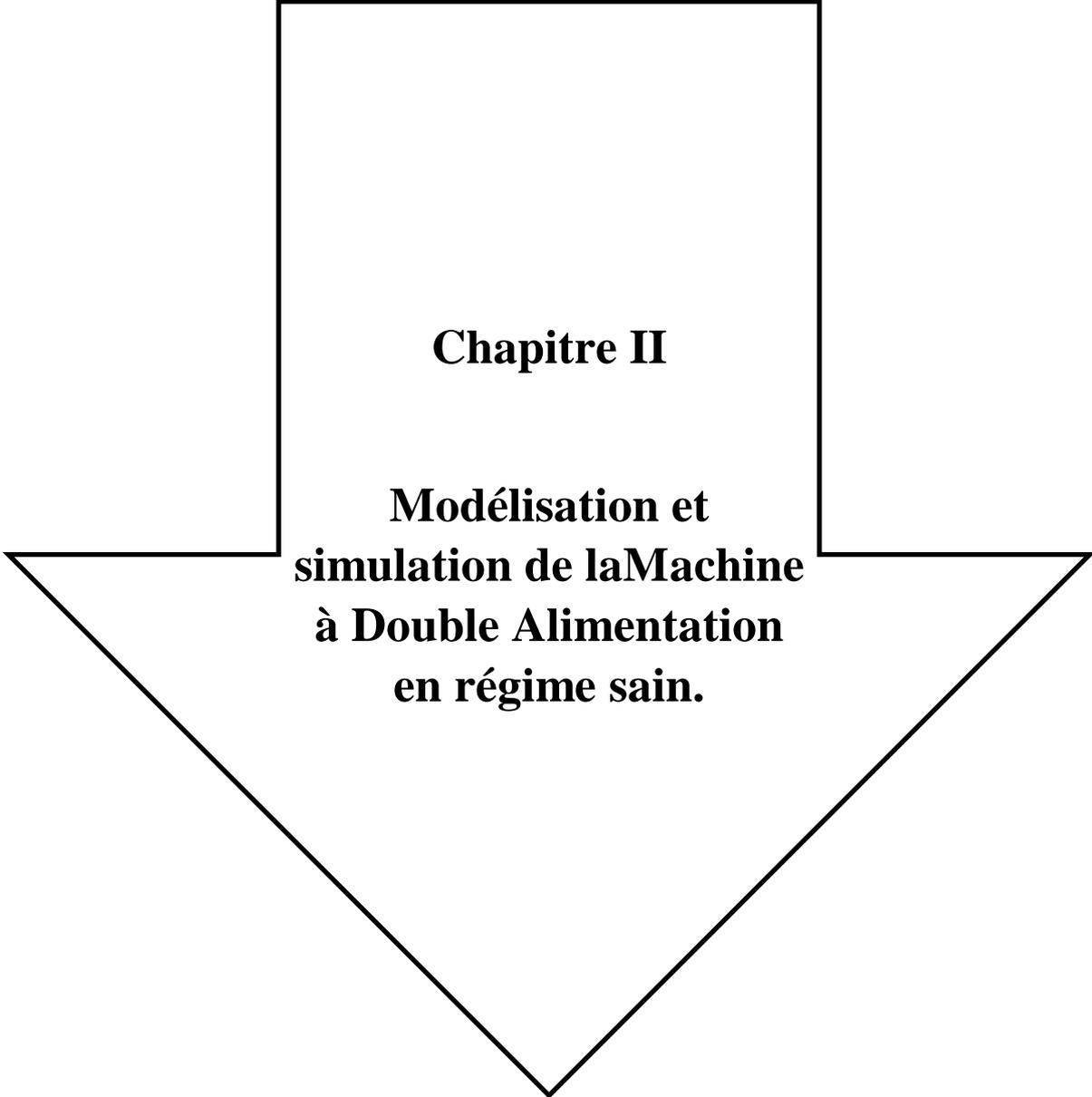
I.10.3 Les méthodes de redondances analytiques

Ces approches s'appuient sur une modélisation mathématique précise du système, exploitant les relations fonctionnelles entre ses différentes variables afin de détecter les défauts et de surveiller les paramètres physiques essentiels. On distingue généralement trois catégories principales de méthodes[34] :

- Celles fondées sur des modèles physiques du système,
- Celles basées sur l'identification des paramètres,
- Et enfin, celles reposant sur l'estimation du vecteur d'état

I.11 Conclusion

Ce chapitre a permis de définir la machine asynchrone à double alimentation, en présentant ses composants essentiels ainsi que ses domaines d'application. Les différents types de défauts susceptibles de l'affecter, leurs origines, ainsi que les principales méthodes de diagnostic ont également été abordés. Parmi ces techniques, l'analyse spectrale du courant statorique occupe une place centrale. Celle-ci fera l'objet d'une attention particulière dans les chapitres suivants, notamment dans l'étude des défauts de court-circuit entre enroulements



Chapitre II

**Modélisation et
simulation de laMachine
à Double Alimentation
en régime sain.**

II.1. Introduction

Les avancées récentes en informatique et en ingénierie logicielle ont considérablement enrichi les possibilités de modélisation des machines électriques. Si les modèles classiques comme celui de la machine asynchrone fonctionnant en régime sinusoïdal à fréquence constante s'avèrent adaptés à des conditions standards, ils demeurent insuffisants face à des situations plus complexes, telles que les variations de fréquence ou les signaux non sinusoïdaux générés par les convertisseurs statiques [37].

Dans de tels cas, il devient nécessaire de recourir à des modèles plus élaborés, capables de prendre en compte ces fluctuations, afin d'améliorer la précision de l'analyse et de mieux anticiper les comportements dynamiques réels des machines [37].

Dans ce chapitre, nous développerons un modèle mathématique et logiciel de la machine asynchrone à double alimentation, en nous appuyant principalement sur ses équations électriques fondamentales. Ce modèle sera implémenté à l'aide du logiciel MATLAB, largement utilisé dans les domaines des sciences, de l'ingénierie et des mathématiques appliquées.

II.2. Modélisation de la machine à double alimentation

Une machine électrique, de manière générale, peut être décrite à travers un ensemble d'équations électriques et mécaniques. Lorsqu'on adopte le repère naturel, également appelé repère abc, chaque phase (a, b et c) est considérée individuellement. Les grandeurs électriques telles que les tensions, les courants et les flux sont alors exprimées dans leur forme d'origine, sans recourir à une transformation vers un système de coordonnées alternatif, tel que le repère de Clarke ou celui de Park.

II.2.1. Méthodes utilisées pour la modélisation des machines électriques

Dans le cadre de ce travail, les méthodes de modélisation recensées ont été organisées selon une classification adoptée dans l'état de l'art, à savoir :

- les méthodes numériques,
- les méthodes analytiques,
- et les méthodes semi-numériques.

Bien que cette catégorisation ne fasse pas l'objet d'un consensus absolu au sein de la communauté scientifique, elle demeure largement utilisée par les concepteurs de machines électriques. Elle présente en effet l'intérêt de mettre en évidence, de manière structurée, les principales approches méthodologiques appliquées dans ce domaine [38]

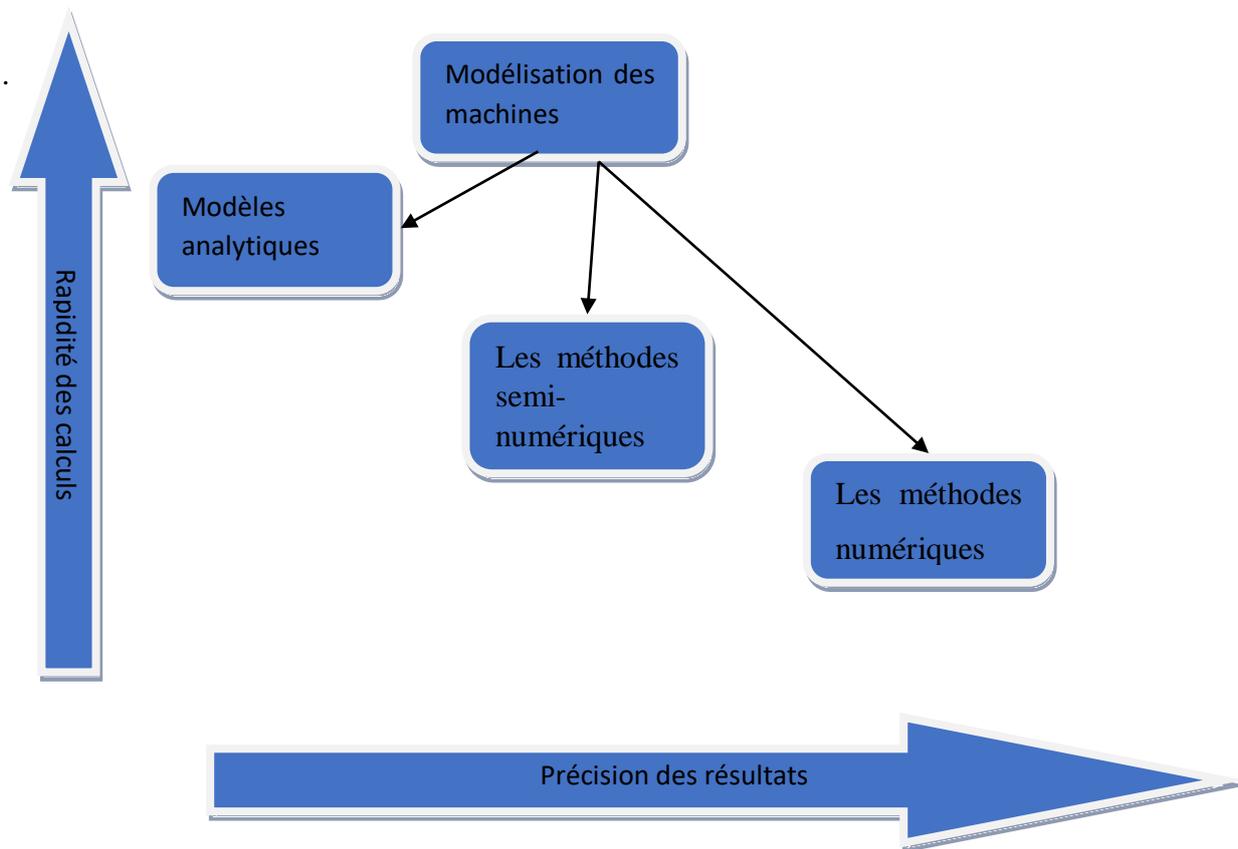


Figure. II.1. Approches possibles de modélisation de machines électriques sous forme du front de Pareto [39]

II.2.1.1. Méthodes numériques

Parmi les principales approches numériques utilisées pour la simulation des dispositifs électromagnétiques, on distingue :

- La méthode des différences finies,
- La méthode des éléments finis (FEM),
- Et la méthode des équations intégrales de frontière.

Parmi ces techniques, la méthode des éléments finis est la plus largement répandue, aussi bien dans les laboratoires de recherche que dans les bureaux d'études industriels. Son succès repose sur sa précision élevée et sa flexibilité à modéliser des géométries simples ou complexes, en 2D comme en 3D.

Ces approches permettent également de tenir compte de phénomènes physiques non linéaires, tels que la saturation magnétique des matériaux ferromagnétiques ou leur anisotropie. De plus, elles s'avèrent particulièrement efficaces dans les contextes de modélisation multiphysique, où différents phénomènes (électriques, thermiques, mécaniques, etc.) doivent être couplés de manière faible ou forte. Dans ce cadre, le recours à des outils

numériques avancés comme la FEM est souvent indispensable pour obtenir une évaluation précise des variations locales de perméabilité.

Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (FEM) constitue, en théorie, une technique d'approximation utilisée pour résoudre des équations différentielles partielles, lesquelles traduisent les lois physiques régissant un système tout en respectant un ensemble de conditions aux limites imposées. Ces dernières correspondent aux contraintes appliquées au système et se déclinent généralement en deux catégories principales :

- La condition de Dirichlet, qui impose une valeur précise à la variable inconnue sur la frontière du domaine,
- La condition de Neumann, qui fixe la valeur de la dérivée de cette variable à la frontière.

Le principe fondamental de la FEM repose sur la discrétisation du domaine d'étude en un grand nombre de sous-domaines élémentaires (éléments finis). À l'intérieur de chacun d'eux, les équations différentielles sont résolues localement, puis les solutions sont assemblées pour obtenir une solution globale du problème.

En électrotechnique, cette méthode est largement plébiscitée pour sa fiabilité et sa précision, notamment dans la modélisation de structures complexes et l'analyse fine des phénomènes magnétiques. L'un de ses atouts majeurs réside dans la possibilité d'intégrer, au sein d'un même modèle, les phénomènes électriques, mécaniques et magnétiques, rendant ainsi possible une analyse multiphysique cohérente. De plus, la FEM permet des analyses tridimensionnelles détaillées, ce qui contribue à une meilleure compréhension du comportement global des dispositifs étudiés [40].

Discrétisation spatiale dans la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis repose sur la subdivision de la zone d'analyse en petites entités appelées éléments finis, constituant ainsi un maillage. La nature et l'agencement de ces éléments dépendent étroitement de la dimension du problème traité, qu'il soit en deux ou trois dimensions. Pour les configurations bidimensionnelles, les formes les plus fréquemment utilisées sont les triangles et les quadrilatères. La phase de discrétisation revêt une importance capitale dans cette méthode, car la qualité des résultats obtenus dépend à la fois du schéma de discrétisation adopté et de la granularité du maillage appliqué à la région étudiée [40] (voir figure II.2).

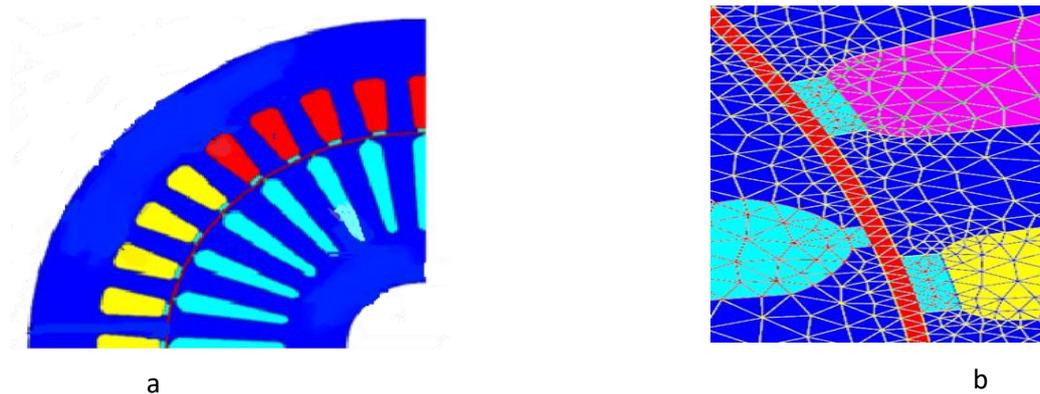


Figure.II.2. Le model éléments finis 2d pour la machine ma : (a) géométrie ; (b) maillage [41].

II.2.1.2. Méthodes semi-numériques

La méthode du réseau d'impédance s'apparente aux techniques de modélisation numérique, bien qu'elle soit généralement classée parmi les approches semi-numériques. Cette classification découle de son mode opératoire, qui repose sur le découpage du domaine étudié en plusieurs segments (souvent appelés tubes de flux), suivie du calcul de l'impédance associée à chaque segment à partir de formules analytiques [42].

Quant à la méthode des réseaux de ré reluctances, elle modélise la structure d'une machine électrique sous forme d'un ensemble de tubes de flux ou d'induction, représentant les trajets préférentiels du flux magnétique. Le niveau de précision du modèle dépend directement du nombre de ré reluctances intégrées : une densité plus élevée de ces éléments permet une représentation plus fidèle du comportement physique réel, au prix toutefois d'un temps de calcul accru [38].

Cette méthode est applicable aux géométries en deux ou trois dimensions, et permet l'intégration des non-linéarités magnétiques via des algorithmes de résolution itérative. Néanmoins, lors des phases de prédimensionnement, une simplification du modèle s'impose souvent en limitant le nombre de ré reluctances, afin de maintenir un compromis acceptable entre précision et temps de calcul [38].

II.2.1.3. Méthodes analytiques

Ces modèles reposent sur une résolution analytique des équations de Maxwell, appliquée à des zones caractérisées par une faible perméabilité magnétique, telles que les entrefers ou les aimants permanents. Cette approche permet de réduire significativement le temps de calcul comparativement aux méthodes numériques, telles que la méthode des éléments finis. Toutefois, leur application demeure limitée aux configurations présentant une géométrie relativement simple [38].

II.3. Hypothèssimplificatrices

L'élaboration d'un modèle simplifié et fonctionnel de la machine asynchrone à double alimentation nécessite l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices. Ces dernières visent à faciliter la formulation des équations tout en conservant une représentation cohérente du comportement de la machine [43] :

- La machine est supposée parfaitement symétrique, tant du point de vue magnétique qu'électrique.
- Les forces magnétomotrices générées par les phases du stator et du rotor sont considérées comme ayant une répartition sinusoïdale.
- Les variations de température n'ont qu'une influence négligeable sur les résistances des enroulements statoriques et rotoriques.
- Le circuit magnétique est supposé non saturé, ce qui implique une perméabilité constante.
- Les pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les matériaux ferromagnétiques sont négligées.
- L'effet de peau est ignoré.
- L'entrefer est supposé constant au cours du fonctionnement.

II.4 Représentation de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation est constituée de trois enroulements statoriques (phases a_s , b_s , c_s), alimentés par le réseau à fréquence fixe et décalés de 120° électriques, ainsi que de trois enroulements rotoriques (phases a_r , b_r , c_r), généralement alimentés par un convertisseur à fréquence variable.

L'angle θ représente la position angulaire entre l'axe d'une phase rotorique et l'axe fixe correspondant de la phase statorique. Les axes du rotor tournent à une vitesse angulaire ω_r , correspondant à la vitesse mécanique du rotor par rapport au repère statorique fixe, comme illustré dans la figure II.3.

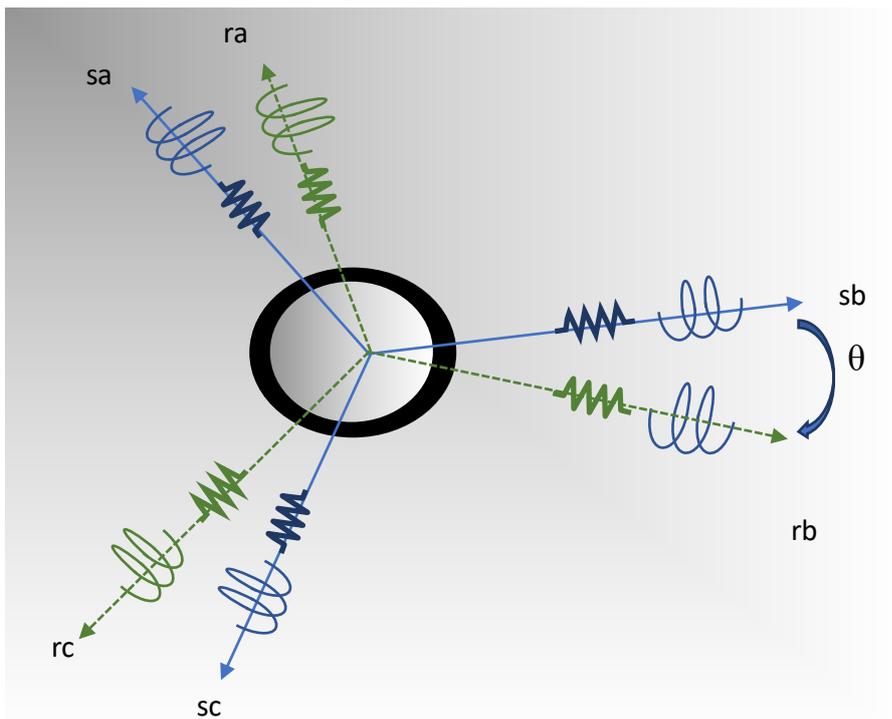


Figure.II.3. Modélisation de la Mada un repère simple (a,b,c)[30].

II.5. Modèle de la MADA dans le repère naturel

Les équations décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation traduisent son comportement dynamique dans le domaine de l'électrotechnique. Leur formulation vise à simplifier l'analyse de la machine et à en faciliter le contrôle [30].

II.5.1. Equations électriques

En se basant sur la configuration illustrée à la figure II.3, ainsi que sur les hypothèses simplificatrices précédemment établies, les équations régissant le comportement de la machine peuvent être formulées comme suit :

Les lois de Faraday et d'Ohm permettent d'établir une relation entre les tensions appliquées aux enroulements, les flux magnétiques associés et les courants circulant dans ces bobinages [30].

➤ Équations du stator :

D'après la loi de Faraday et la loi d'Ohm, l'équation générale qui relie la tension statorique aux courants et flux dans les enroulements peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

En considérant les trois phases du stator (a, b, c), l'équation (II.1) peut être généralisée sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Donc, l'équation générale du stator s'écrit :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \quad (\text{II.3})$$

Avec :[30]

➤ Le vecteur des tensions statoriques est défini par :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Où V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} sont les tensions instantanées appliquées aux enroulements des phases a, b et c du stator.

➤ Le vecteur des courants statoriques est défini par :

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Où i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} Représentent les courants instantanés circulant dans les phases a, b et c du stator.

➤ Le vecteur des flux dans les enroulements statoriques est donné par :

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Où Φ_{sa} , Φ_{sb} , Φ_{sc} désignent les flux magnétiques liés aux enroulements des phases statoriques a, b et c respectivement.

➤ La matrice des résistances statoriques est généralement diagonale (pas de couplage entre les phases), et prend la forme suivante :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Dans le cas d'une machine symétrique :

$$R_s = R_{sa} = R_{sb} = R_{sc}$$

➤ Équations du rotor :

L'équation électrique du rotor, dérivée de la loi de Faraday et de la loi d'Ohm, s'écrit dans sa forme de base :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

En considérant les trois phases du rotor (a, b, c), l'équation (II.4) peut être généralisée sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Donc l'équation générale du rotor est :

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rabc}] \quad (\text{II.10})$$

Avec :

➤ Le vecteur des tensions appliquées aux enroulements du rotor est défini par :

$$[V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Où V_{ra} , V_{rb} , V_{rc} sont les tensions instantanées aux bornes des phases a, b et c du rotor.

➤ Le vecteur des courants dans les enroulements du rotor est défini par :

$$[i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Où i_{ra} , i_{rb} , i_{rc} sont les courants instantanés dans les enroulements rotoriques des phases a, b et c.

➤ Le vecteur des flux magnétiques dans les enroulements du rotor est donné par :

$$[\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Où Φ_{ra} , Φ_{rb} , Φ_{rc} représentent les flux magnétiques liés aux enroulements du rotor.

➤ La matrice des résistances du rotor est généralement aussi diagonale (machine symétrique), et s'écrit :

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Dans le cas d'une machine équilibrée :

$$R_s = R_{ra} = R_{rb} = R_{rc}$$

II.5.2. Equations magnétiques.

Les équations magnétiques permettent de relier les flux magnétiques aux courants circulant dans les enroulements statoriques et rotoriques, en tenant compte des inductances propres et mutuelles de la machine. Ces relations s'expriment comme suit [30]:

$$\begin{cases} [\Phi_{sabc}] = [L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \\ [\Phi_{rabc}] = [L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}] \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

La matrice des inductances propres des enroulements statoriques et rotoriques respectivement :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

La matrice d'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques et rotoriques d'une machine triphasée à double alimentation s'écrit comme suit [30] :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$[M_{rs}]$;Matrice d'inductance mutuelle $[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$

$[L_{rr}]$;Matrices d'inductances rotorique

$[L_{ss}]$;Matrices d'inductances statorique

M_{sr} ;Maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et rotorique.
D'après les expressions précédentes, on aura :

$M_s M_r$;Inductances mutuelles entre deux phases statorique et rotorique respectivement ;

$L_s L_r$; Inductances propres d'une phase statorique et rotorique respectivement

A la fin

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} \left[[L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \right] \\ [V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} \left[[L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{sr}]^T [i_{sabc}] \right] \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

II.5.3.Equation de mouvement

Le comportement mécanique de la machine est régi par plusieurs grandeurs fondamentales, notamment l'inertie J , le couple électromagnétique C_{em} , le couple résistant mécanique C_r , ainsi que le couple de frottement fluide C_f [30].

➤ L'équation mécanique est définie par

$$C_{em}(t) - C_r = J \frac{dw_r(t)}{dt} + f_r w_r(t) \quad (\text{II.20})$$

Avec

$$w_r(t) = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.21})$$

➤ Énergie magnétique

L'énergie magnétique stockée dans les enroulements d'une machine électrique triphasée est directement liée aux flux magnétiques et aux courants associés. Cette énergie peut être exprimée à tout instant par la formule suivante :

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

➤ L'expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique peut aussi être interprété comme dérivé de l'énergie magnétique par rapport à la position angulaire :

$$C_{em} = \frac{d[W_{mag}]}{d\theta} = \frac{p}{2} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix}^T \cdot \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}(\theta)] \\ [M_{rs}(\theta)] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

II.5.4.Établissement du modèle d'état

Le modèle d'état de la machine est donné comme suit ;

$$[U] = [A] \left[\dot{X} \right] + [B][X] \quad (\text{II.24})$$

$$[U] = \begin{pmatrix} V_{abcs} \\ V_{abcr} \\ -C_r \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$$[A] = \begin{pmatrix} [R_s] & w_r \frac{d[M_{sr}]}{dt} & [A_{31}] & [A_{31}] \\ w_r \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} & [R_r] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ C_{ss} & C_{rr} & f_v & 0 \\ [A_{13}] & [A_{13}] & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.26})$$

$$[B] = \begin{pmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ [M_{sr}]^T & [L_{rr}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ [A_{13}] & [A_{13}] & J & 0 \\ [A_{13}] & [A_{13}] & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{II.27})$$

$$[X] = (I_{abcs} \quad I_{abcr} \quad w_r \quad \theta_r)^T \quad (\text{II.28})$$

Afin d'analyser, simuler et commander la machine asynchrone à double alimentation (MADA), il est nécessaire de reformuler le système d'équations obtenu précédemment sous forme d'un modèle d'état [30].

$$\begin{pmatrix} V_{abcs} \\ V_{abcr} \\ -Cr \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [R_s] & w_r \frac{d[M_{sr}]}{dt} & [A_{31}] & [A_{31}] \\ w_r \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} & [R_r] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ C_{ss} & C_{rr} & f_v & 0 \\ [A_{13}] & [A_{13}] & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{abcs} \\ I_{abcr} \\ w_r \\ \theta_r \end{pmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$+ \begin{pmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ [M_{sr}]^T & [L_{rr}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ [A_{13}] & [A_{13}] & J & 0 \\ [A_{13}] & [A_{13}] & 0 & 1 \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{abcs} \\ I_{abcr} \\ w_r \\ \theta_r \end{pmatrix}$$

La matrice $[M_{sr}]$ modélise les inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques d'une machine à trois phases.

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} f_1 & f_2 & f_3 \\ f_3 & f_1 & f_2 \\ f_2 & f_3 & f_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

On a :

f_1, f_2, f_3 : fonctions périodiques dépendantes de la position angulaire relative θ entre le rotor et le stator, Ces fonctions sont souvent définies comme :

$$f_1 = \cos(\theta) \quad ; \quad f_2 = \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad ; \quad f_3 = \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.31})$$

Ces fonctions étant dépendantes de $\theta(t)$, leur dérivée temporelle s'écrit selon la règle de la chaîne :

$$g_1 = -\sin(\theta) \quad ; \quad g_2 = -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad ; \quad g_3 = -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.32})$$

La matrice des dérivées des inductances mutuelles s'exprime donc comme suit

$$\frac{d[M_{rs}]}{d\theta} = M \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 \\ g_3 & g_1 & g_2 \\ g_2 & g_3 & g_1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

À partir des équations électriques, magnétiques et mécaniques précédentes, on peut établir le modèle d'état de la machine en définissant certains réglages essentiels permettant le bon fonctionnement des matrices en simulation.

$$[C_{ss}] = \frac{p}{2} \cdot \frac{d[M_{sr}]}{d\theta} \cdot [I_r] \quad (\text{II.34})$$

$$[C_{ss}] = \frac{p}{2} \cdot \frac{d[M_{rs}]}{d\theta} \cdot [I_s] \quad (\text{II.35})$$

$$[A_{13}] = (0 \quad 0 \quad 0) \quad (\text{II.36})$$

$$[A_{31}] = (0 \quad 0 \quad 0)^T \quad (\text{II.37})$$

II.6. Simulation

Une fois le modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) établi, un programme a été développé sous l'environnement MATLAB afin de simuler son comportement dans des conditions de fonctionnement réalistes.

La résolution du système d'équations différentielles issu du modèle, en particulier l'équation dynamique, a été effectuée à l'aide de la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4, largement reconnue pour son efficacité dans le traitement des systèmes non linéaires complexes.

II.6.2. Résultat simulation

Les résultats présentés dans le cadre de cette étude portent sur l'analyse du comportement de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en régime à vide ainsi qu'en régime chargé.

II.6.2.1. Fonctionnement à vide.

La figure II.4 illustre l'évolution de la vitesse de rotation de la machine en régime à vide, sans application de couple résistant.

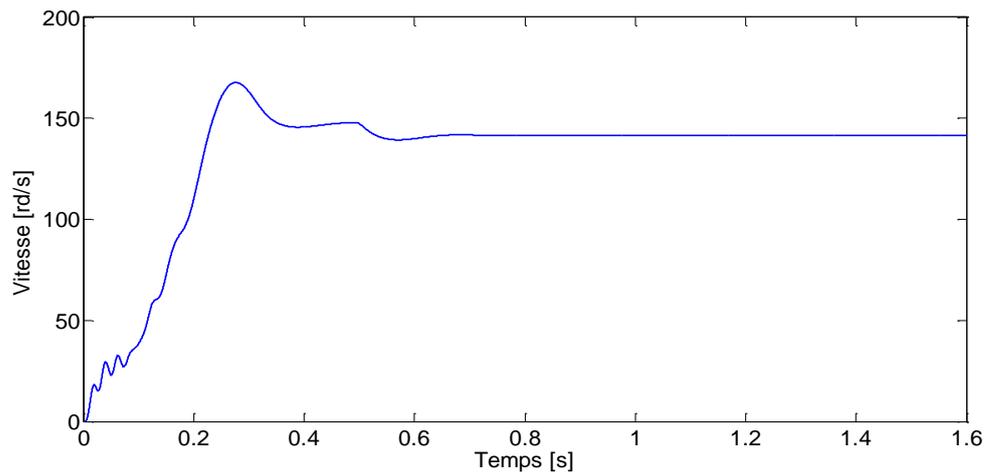


Figure.II.4. Vitesse de rotation.

La figure II.5 représente la variation du couple électromagnétique généré par la machine en régime à vide.

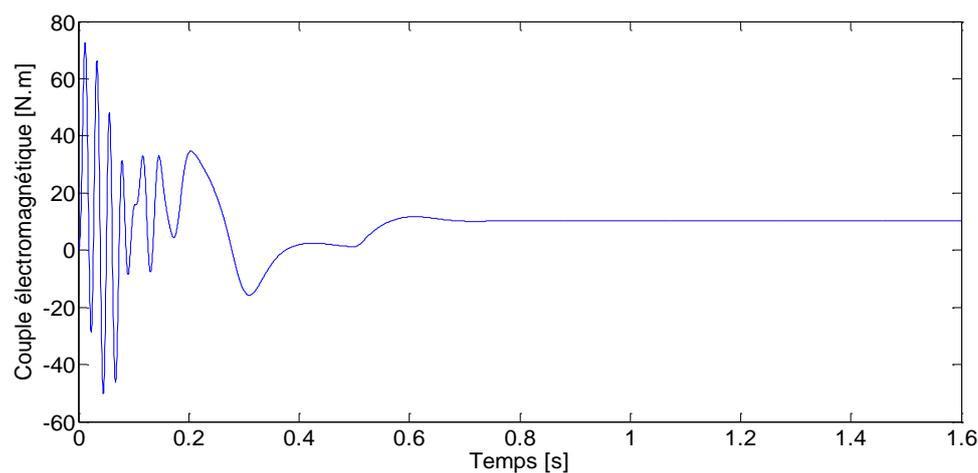


Figure.II.5. Couple électromagnétique.

La figure II.6 présente les formes d'onde des courants statoriques lors du fonctionnement à vide de la machine.

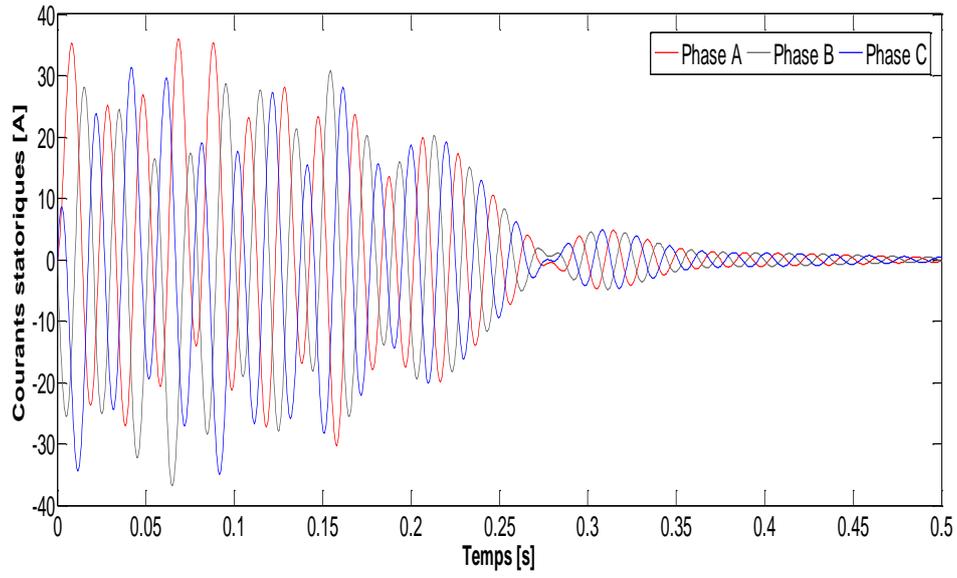


Figure.II.6. Courant statoriques.

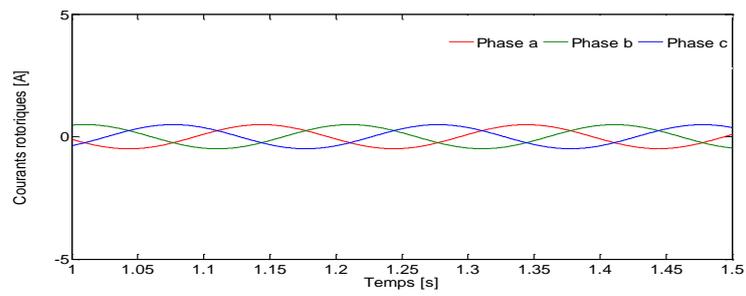


Figure. .II.7. 1 zoom Courant statoriques.

La figure II.8 illustre les courants rotoriques en régime à vide.

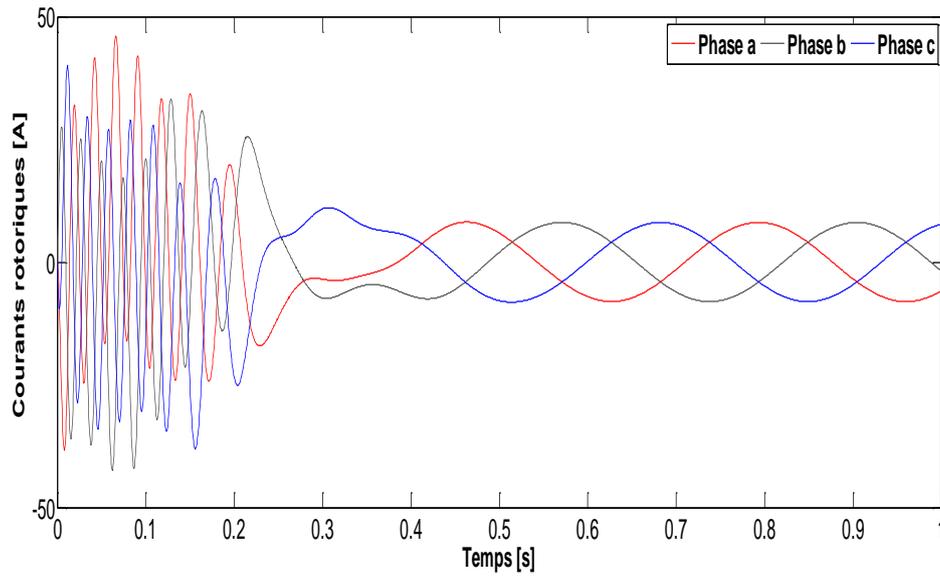


Figure.II.8. Courants rotoriques.

II.6.2.2. Fonctionnement en charge

La figure II.9 montre l'impact de l'application d'un couple résistant sur la vitesse de rotation de la machine.

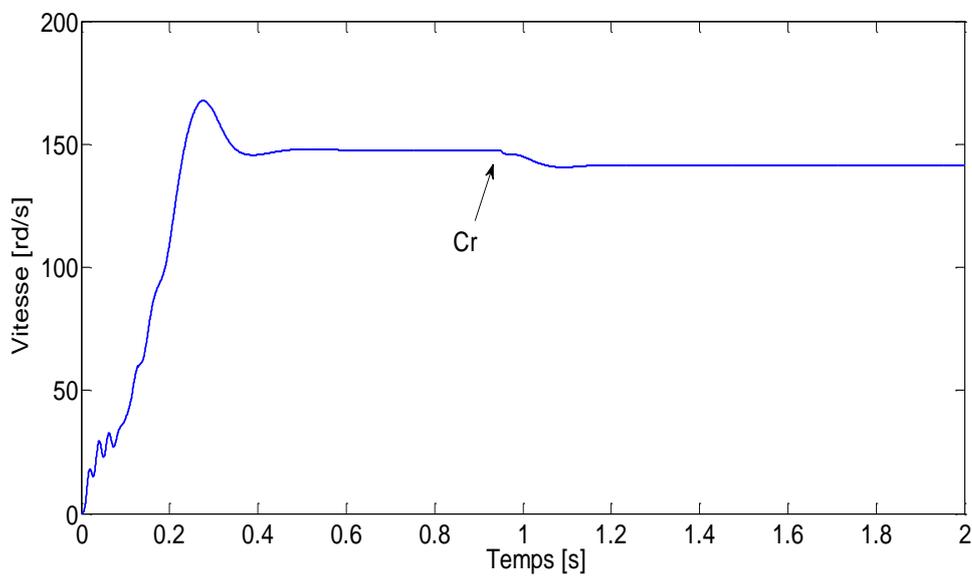


Figure.II.9. Vitesse de rotation Avec l'ajout du couple résistant.

La figure II.10 présente la réponse du couple électromagnétique lorsque la machine est soumise à un couple résistant.

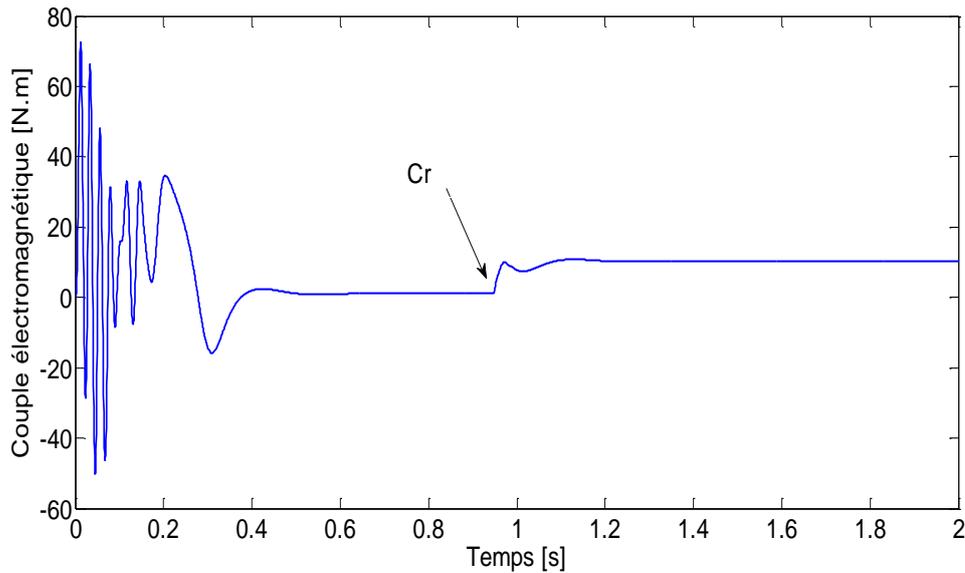


Figure.II.10. Couple électromagnétique Avec l'ajout du couple résistant.

La figure II.11 met en évidence l'évolution des courants statoriques en présence d'un couple résistant.

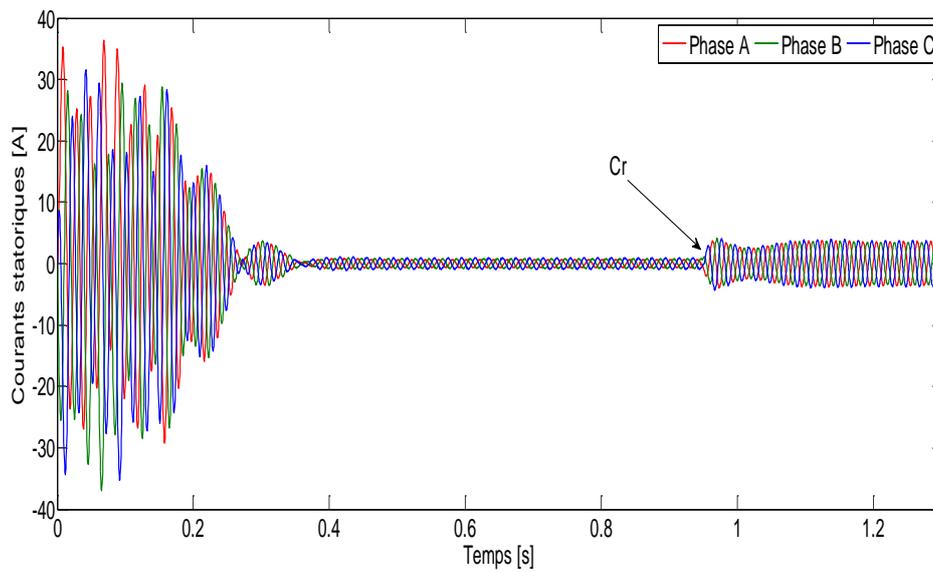


Figure.II.11. Courant statoriques Avec l'ajout du couple résistant.

La figure II.12 illustre les courants rotoriques lorsque la machine fonctionne sous charge.

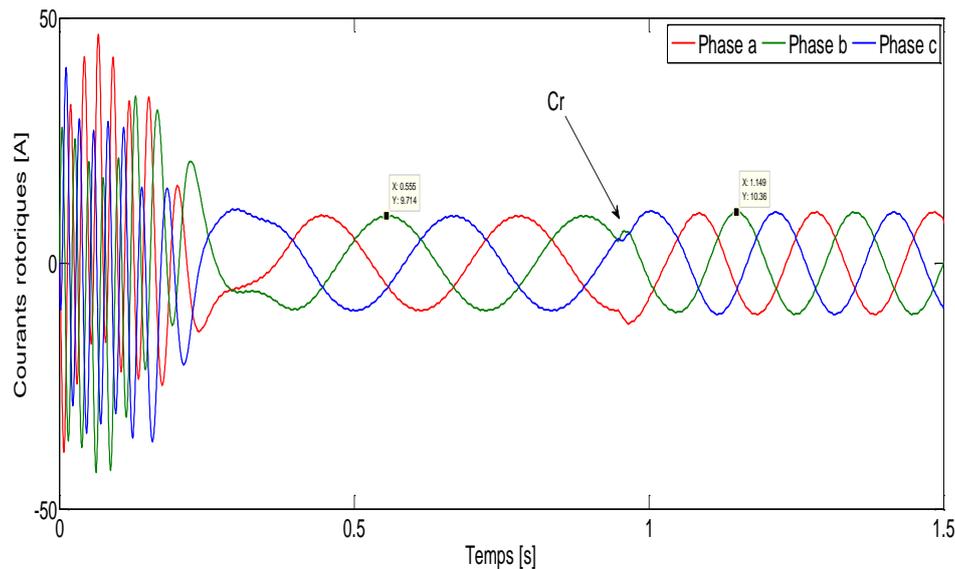


Figure.II.12. Courants rotoriques Avec l'ajout du couple résistant.

II.6.3. Interprétation du résultat

Figure. II.4représente La vitesse de rotation de la machine, au démarrage, une augmentation linéaire avec un peu oscillent au début avant de se stabiliser à une valeur légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme (148 rd/s). En régime de fonctionnement en charge a l'instant 1 seconde, cette vitesse diminue, car elle est inversement proportionnelle au couple résistif appliqué. Elle se stabilise finalement autour de 142 rd/s, comme illustré dans figure.II.9.

Le couple électromagnétique atteint une valeur maximale au démarrage du moteur, puis il commence à osciller avant de décroître progressivement pour se stabiliser à une valeur quasi nulle en régime établi (figure.II.5). Lors de l'application d'un couple résistif 10N.m, le couple moteur augmente à nouveau jusqu'à atteindre une valeur proche de celle du couple résistif appliqué 10 N.m, assurant ainsi l'équilibre mécanique du system(figure.II.10). Au démarrage, les courants rotoriques présentent un comportement oscillatoire transitoire avant de passer à un régime permanent à une valeur d'environ 9.7A, comme le montrent les figures.II.8. À l'instant d'application le couple résistif ($C_r=10$ N.m) l'amplitude de courants augmente jusque 10.7A (figure.II.12).

Figure.II.6représente les courants statoriques Au démarrage, les courants statoriques présentent un comportement oscillatoire transitoire avant de passer à un régime permanent à une valeur d'environ 0.7 A, à l'instant d'application le couple résistif ($C_r=10$ N.m)

l'amplitude de courants augmente jusque Puis il revient un régime permanent à une nouvelle valeur d'environ 3.5A (FIGURE.II.11).

Conclusion

Ce chapitre a permis d'approfondir la compréhension du comportement dynamique de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), en s'appuyant sur sa modélisation mathématique et sa simulation numérique. À partir des équations exprimées dans le repère naturel (a, b, c), la double alimentation du stator et du rotor chacun étant alimenté de manière indépendante a été clairement mise en évidence.

La simulation a offert la possibilité d'analyser l'influence de différentes conditions de fonctionnement, telles que le démarrage, les variations de charge, ainsi que certains défauts qui seront traités dans les chapitres suivants.

Les résultats obtenus confirment la validité du modèle proposé et illustrent la capacité de la MADA à fonctionner de manière stable et efficace sur une large plage de vitesses. Cette étude constitue ainsi une base fiable pour le développement de futures stratégies de commande avancées.

CHAPITRE III

**Modélisation et
simulation de la MADA
en présence défaut de
court-circuit entre spires
statorique.**

III.1. Introduction

Bien que la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) soit reconnue pour son rendement élevé et sa grande souplesse d'exploitation, elle reste néanmoins sujette à divers types de défauts susceptibles d'affecter aussi bien le stator que le rotor. Sa structure particulière, reposant sur une double alimentation – à la fois statorique et rotorique – la rend particulièrement sensible à certaines anomalies, telles que les courts-circuits entre spires [44]. Parmi les défauts les plus fréquemment observés dans les machines électriques figurent les courts-circuits entre bobines d'une même phase. Ces derniers peuvent survenir à différents endroits : au niveau des têtes de bobines, à l'intérieur des enroulements, entre deux bobines ou encore entre une bobine et le point neutre [45].

La détection de ces défauts repose sur l'analyse de signatures électriques et mécaniques caractéristiques, permettant d'identifier de manière précoce et précise la nature et la localisation de l'anomalie [30]. De telles investigations nécessitent la mise en œuvre de modèles adaptés, capables de reproduire fidèlement les conditions de fonctionnement dégradé. Ainsi, le présent travail vise à développer un modèle de simulation de la MADA intégrant un scénario de court-circuit entre spires dans un enroulement statorique, et à le confronter à la situation de référence en régime sain.

III.2. Modèle de la MADA avec défaut de court-circuit

Le stator et le rotor d'une machine asynchrone sont généralement composés de trois enroulements traversés par des courants triphasés. Pour représenter la survenue d'un court-circuit entre spires au sein du stator, il est courant d'introduire un enroulement supplémentaire, appelé bobinage de court-circuit (bcc). Ce dernier simule les spires défectueuses et est parcouru par un courant de court-circuit, induisant un flux magnétique φ_{cc} au niveau du stator. Ce flux est représentatif de l'état de court-circuit entre spires et permet une modélisation plus fidèle du comportement de la machine en présence de cette défaillance.

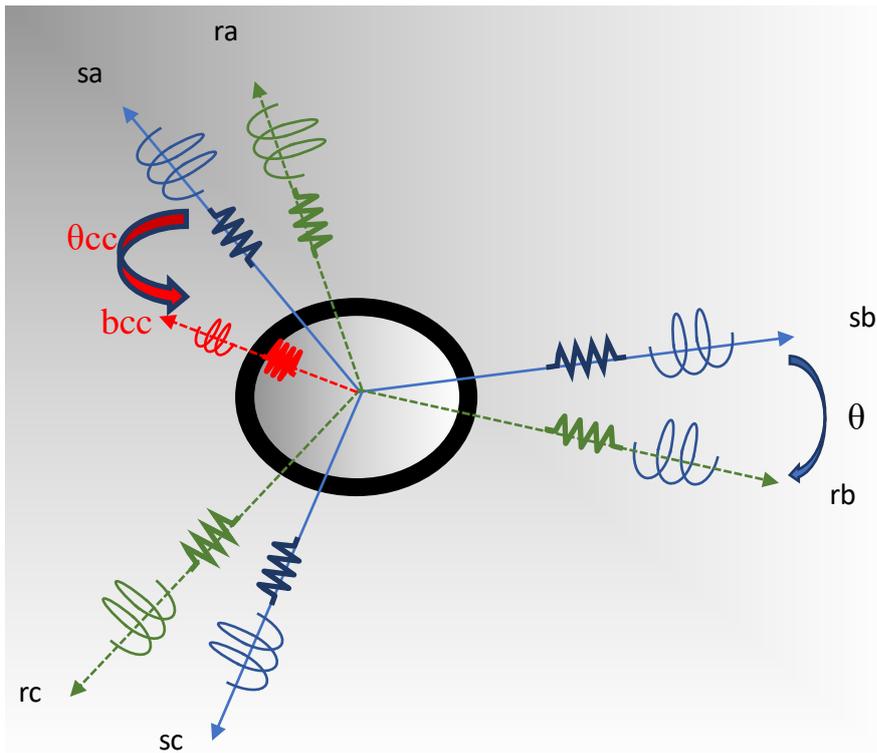


Figure. III.1. Schéma représente Court-circuit de la phase sa du stator[30].

Alors que :

θ_{cc} :L'angle électrique enter le bobinage en court-circuit et l'axe deréférence de la phase statorique (Dans cet exemple).

Il existe 3 paramètres de θ pour localiser le bobinage en défaut :

$$\begin{cases} \theta_{cc} = 0 & \text{le défaut sur phase } S_a \\ \theta_{cc} = +\frac{2\pi}{3} & \text{le défaut sur phase } S_b \\ \theta_{cc} = -\frac{2\pi}{3} & \text{le défaut sur phase } S_c \end{cases}$$

(III.1)

Il y a aussi un paramètre noté η rapportdecourt-circuitégalaurl'rapportdunombredespireencourt-circuit η_{cc} sur lenombretotal de spires dans une phase statorique sans défaut η_s :

$$\eta = \frac{\eta_{cc}}{\eta_s} \quad (\text{III.2})$$

III.3. Modélisation de la MADA avec défaut de court- circuit

Les équations électriques des trois phases du stator et du rotor constituent la base de l'élaboration du modèle dynamique de la machine asynchrone, en considérant l'hypothèse de linéarité du système. Cette hypothèse correspond à un fonctionnement nominal caractérisé par la génération d'un champ tournant, mais permet également de représenter un fonctionnement perturbé, dans lequel un champ magnétique supplémentaire apparaît, orienté selon l'axe de la bobine présentant le défaut, comme illustré à la figure (III.1).

Dans ce contexte, les équations de tension et de flux de la machine asynchrone doivent être adaptées afin de tenir compte de la présence du court-circuit entre spires.

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad (\text{III.3})$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \quad (\text{III.4})$$

$$0 = R_{cc} \cdot i_{cc} + \frac{d\Phi_{cc}}{dt} \quad (\text{III.5})$$

$$[\Phi_s] = [L_s] \cdot [I_s] + [M_{sr}(\theta_r)] \cdot [I_r] + [M_{scc}] \cdot I_{cc} \quad (\text{III.6})$$

$$[\Phi_r] = [L_r] \cdot [I_r] + [M_{sr}(\theta_r)]^T \cdot [I_s] + [M_{rcc}] \cdot I_{cc} \quad (\text{III.7})$$

La résistance R_s est proportionnelle au nombre de spires en jeu. Ainsi, la résistance R_{cc} du bobinage B_{cc} de court-circuit peut être exprimée en fonction de la résistance R_s des trois phases statoriques en l'absence de défaut, comme indiqué dans l'équation (III.8).

$$R_{cc} = \eta_{cc} \cdot R_s \quad (\text{III.8})$$

Par ailleurs, le circuit magnétique emprunté par les lignes de champ traversant la bobine B_{cc} en court-circuit est supposé identique à celui traversé par les lignes de champ liées à la phase statorique affectée par la défaillance.

Dans ce cadre, les inductances associées à la bobine B_{cc} en court-circuit, qu'elles soient mutuelles ou propres, vis-à-vis des enroulements statoriques et rotoriques de la machine, sont déterminées à partir des relations suivantes.

$$[M_{scc}] = \eta_{cc} L_s \left[\begin{array}{ccc} \cos(\theta_{cc}) & \cos\left(\theta_{cc} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_{cc} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{array} \right] \quad (\text{III.9})$$

$$[M_{rcc}(\theta_r)] = \eta_{cc} \cdot L_s \left[\cos(\theta_{cc} - \theta) \quad \cos\left(\theta_{cc} - \theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \cos\left(\theta_{cc} - \theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (\text{III.10})$$

► Dérivation des inductances mutuelles entre le stator et le bobinage de court-circuit

Le couplage magnétique entre le stator et la bobine en court-circuit dépend de leur position angulaire relative. En considérant un couplage sinusoïdal, les inductances mutuelles s'expriment en fonction de θ_{cc} , à l'aide de fonctions cosinus représentant l'alignement des axes magnétiques :

$$\begin{aligned} \frac{d[M_{rcc}(\theta_r)]}{dt} &= [MM_{rcc}(\theta_r)] \\ &= \eta_{cc} \cdot L_s \cdot w_r \cdot p \left[\sin(\theta_{cc} - \theta_r) \quad \sin\left(\theta_{cc} - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \sin\left(\theta_{cc} - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

$$[M_{scc}] = [M_{ccs}]^T \quad (\text{III.12})$$

$$[M_{rcc}(\theta_r)] = [M_{ccr}(\theta_r)]^T \quad (\text{III.13})$$

$$[MM_{rcc}(\theta_r)] = [MM_{ccr}(\theta_r)]^T \quad (\text{III.14})$$

$[M_{scc}]$: Les inductances mutuelles du stator de l'enroulement en court-circuit.

$[M_{rcc}(\theta_r)]$: Les inductances mutuelles du rotor de l'enroulement en court-circuit.

III.3.1. Représentation d'état de modèle de défaut

En présence d'un défaut de court-circuit entre spires, le système représenté par l'équations (III.12) doit être réécrit afin de prendre en compte les effets induits par cette anomalie. Il peut alors être reformulé sous la forme suivante ;

$$\begin{pmatrix} Vabcs \\ Vabcr \\ u_{cc} \\ -Cr \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] & [M_{ccs}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ [M_{sr}]^T & [L_{rr}] & [M_{ccr}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ [M_{scc}] & [M_{rcc}] & [L_{cc}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ [A_{13}] & [A_{13}] & 0 & J & 0 \\ [A_{13}] & [A_{13}] & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{abcs} \\ I_{abcr} \\ I_{cc} \\ w_r \\ \theta_r \end{pmatrix}$$

$$+ \begin{pmatrix} [R_s] & w_r \frac{d[M_{sr}]}{dt} & [A_{31}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ w_r \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} & [R_r] & \frac{d[M_{rcc}(\theta_r)]}{dt} & [A_{31}] & [A_{31}] \\ 0 & \frac{d[M_{ccr}(\theta_r)]^T}{dt} & [R_{cc}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ C_{ss} & C_{rr} & 0 & f_v & 0 \\ [A_{13}] & [A_{13}] & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{abcs} \\ I_{abcr} \\ I_{cc} \\ w_r \\ \theta_r \end{pmatrix} \quad (III.15)$$

le modèle d'état de la machine est donné comme suit :

$$[U] = [A][X] + [B] \begin{bmatrix} \dot{X} \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

$$[A] = \begin{pmatrix} [R_s] & w_r \frac{d[M_{sr}]}{dt} & [A_{31}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ w_r \frac{d[M_{sr}]^T}{dt} & [R_r] & \frac{d[M_{rcc}(\theta_r)]}{dt} & [A_{31}] & [A_{31}] \\ 0 & \frac{d[M_{ccr}(\theta_r)]^T}{dt} & [R_{cc}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ C_{ss} & C_{rr} & 0 & f_v & 0 \\ [A_{13}] & [A_{13}] & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (III.2)$$

$$[B] = \begin{pmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] & [M_{ccs}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ [M_{sr}]^T & [L_{rr}] & [M_{ccr}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ [M_{scc}] & [M_{rcc}] & [L_{cc}] & [A_{31}] & [A_{31}] \\ [A_{13}] & [A_{13}] & 0 & J & 0 \\ [A_{13}] & [A_{13}] & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (III.18)$$

$$[U] = (Vabcs \quad Vabcr \quad u_{cc} \quad -Cr \quad 0)^T \quad (III.19)$$

$$[X] = (I_{abcs} \quad I_{abcr} \quad I_{cc} \quad w_r \quad \theta_r)^T \quad (\text{III.20})$$

III.4. Simulation

Le programme a été développé dans l'environnement MATLAB en s'appuyant sur un modèle global de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MASDE), dans lequel ont été introduits des scénarios de court-circuit entre spires statoriques, affectant respectivement 5 %, 10 % et 15 % des spires d'une même bobine.

III.4.1. Résultats de simulation

- **Défauts de 5% de spires en court-circuit**

La figure III.2 illustre l'évolution de la vitesse de rotation en présence d'un court-circuit partiel de 5 % entre spires statoriques.

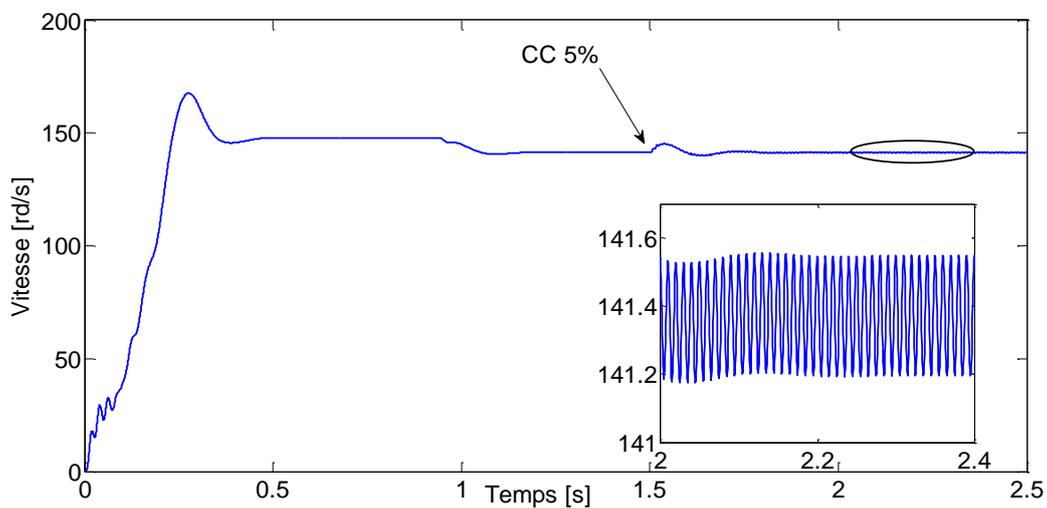


Figure III.2. Vitesse de rotation pour un défaut de 5 % de cc.

La figure III.3 montre la variation du couple électromagnétique sous l'effet d'un défaut de 5 % de court-circuit.

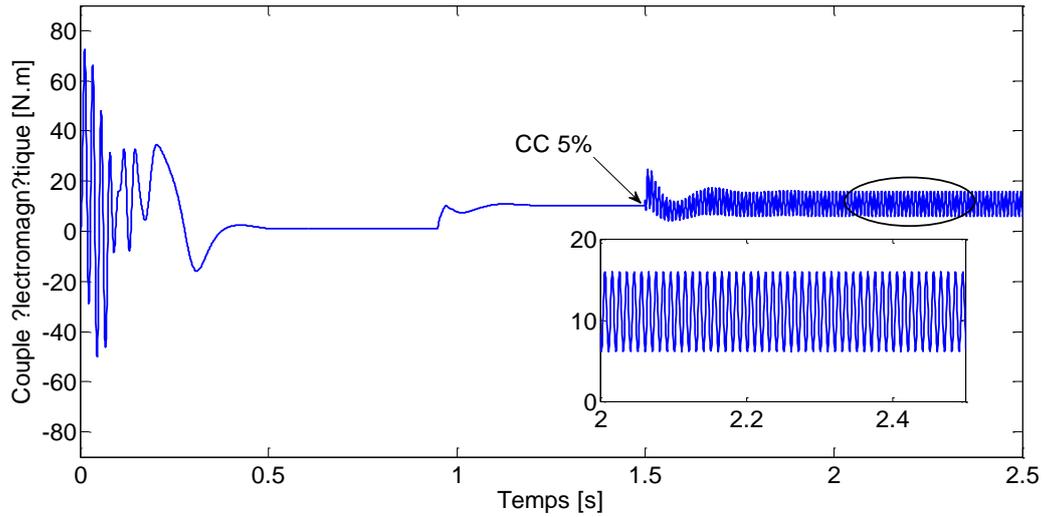


Figure III. 3. Couple électromagnétique pour défaut de 5% decc.

La figure III.4 présente les courants statoriques en présence d'un défaut de 5 % dans la phase s.

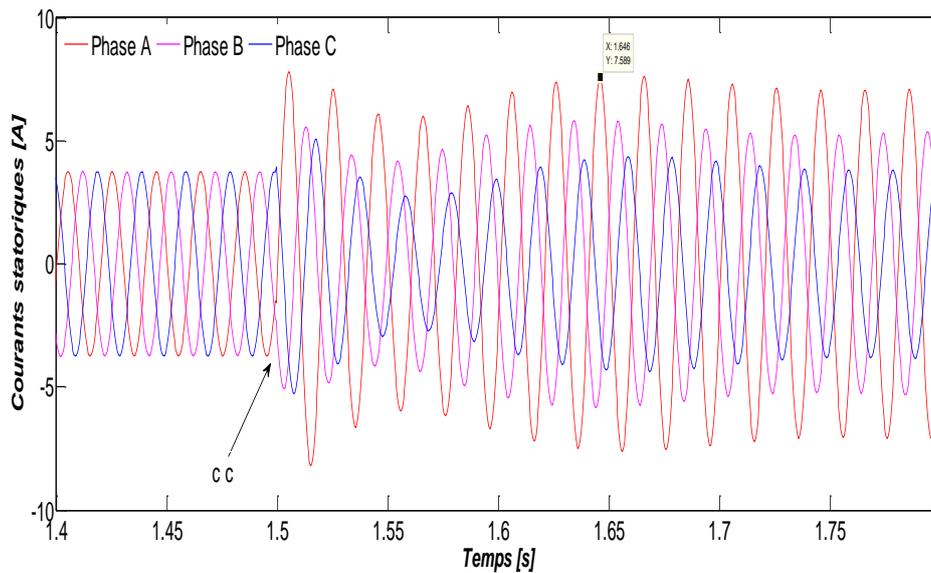


Figure III. 4. Courants statoriques pour un défaut de 5% de cc dans la phase s.

La figure III.5 montre l'évolution des courants rotoriques affectés par un court-circuit de 5 % .

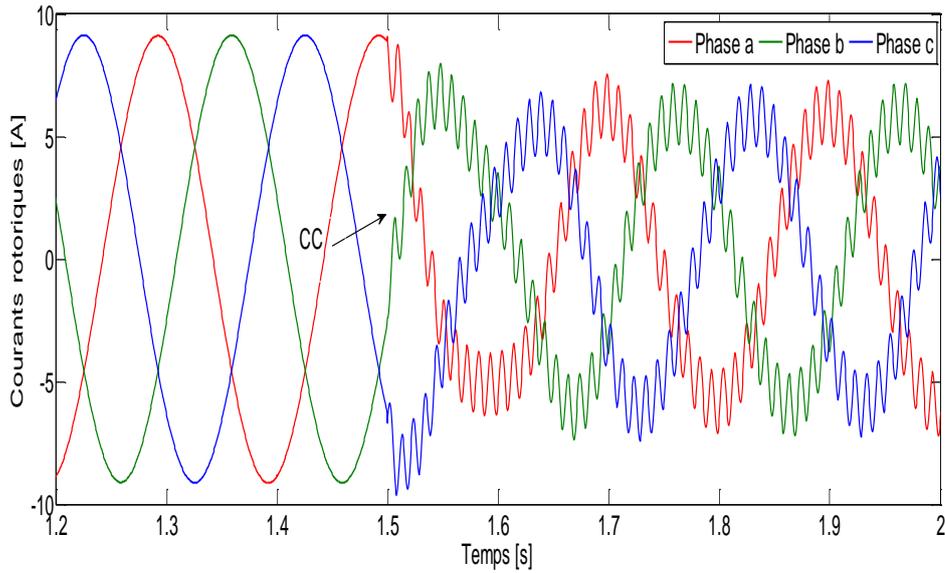


Figure.III.5. Courants rotoriques pour un défaut 5% de cc.

La figure III.6 représente le courant de court-circuit généré suite à un défaut de 5 % entre spires.

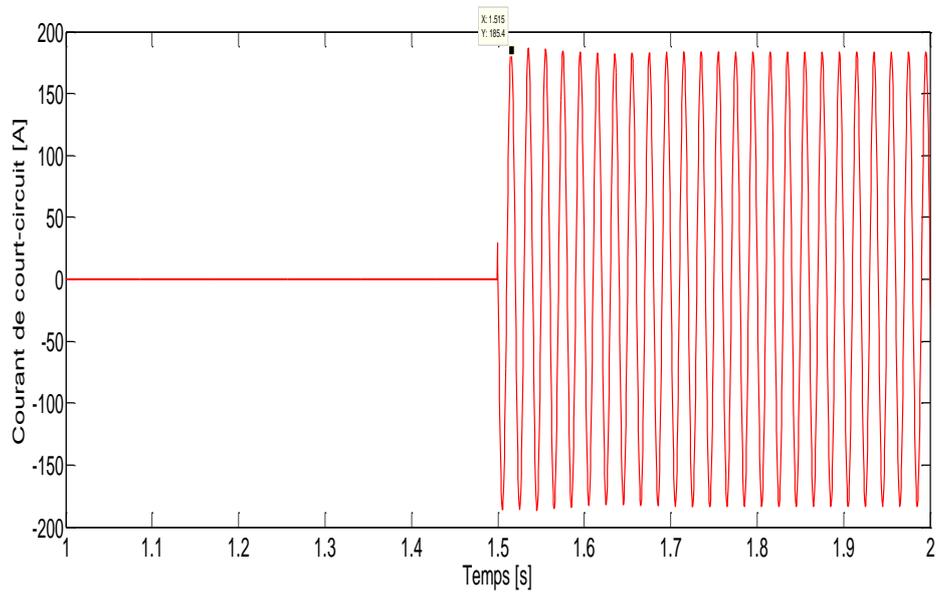


Figure. III. 6. Courant de court-circuit pour un défaut de 5% de cc.

- **Défauts de court-circuit 10 %**

La figure III.7 illustre la variation de la vitesse de rotation en cas de court-circuit de 10 %.

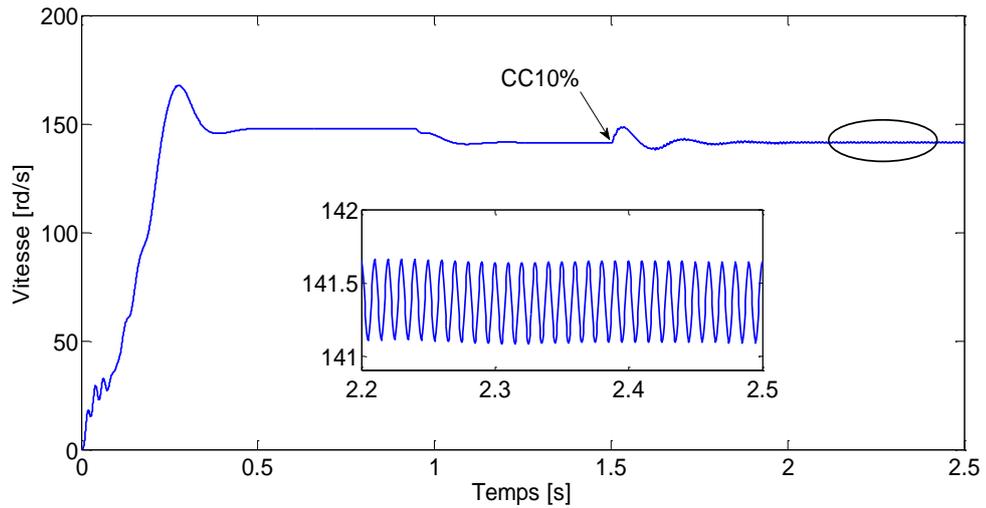


Figure III .7. Vitesse de rotation pour un défaut de 10% de cc.

La figure III.8 montre la réponse du couple électromagnétique face à un défaut de 10 %.

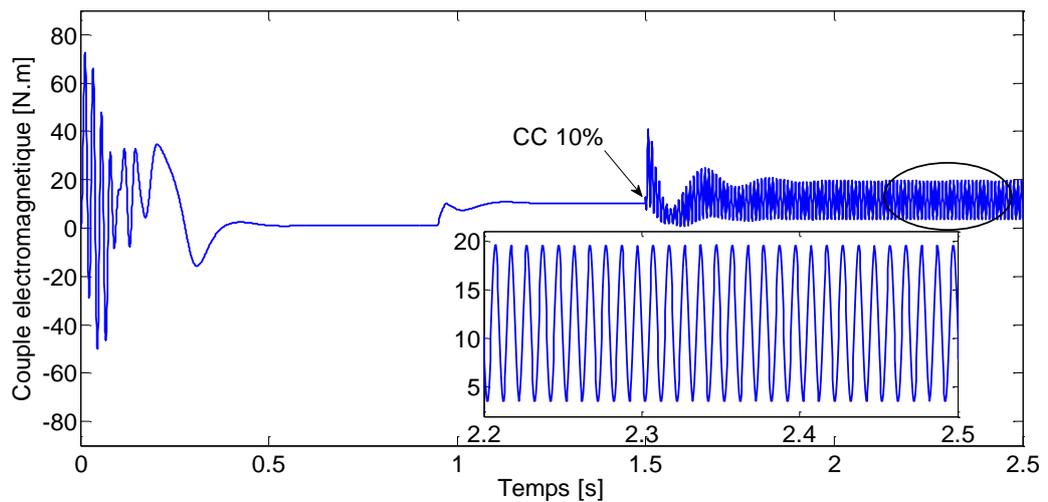


Figure III. 8. Couple électromagnétique pour défaut de 10% de cc.

La figure III.9 met en évidence les courants statoriques affectés par un défaut de 10 % dans la phase s1.

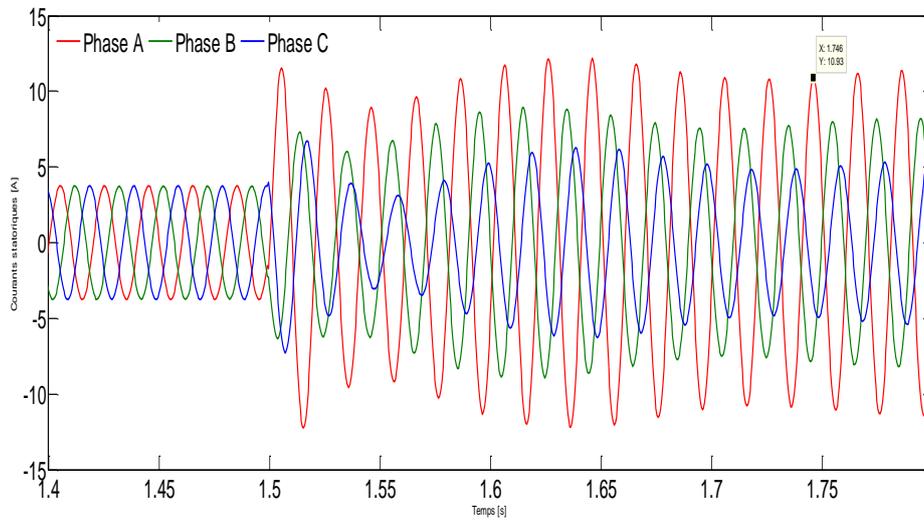


Figure III. 9. Courants statoriques pour un défaut de 10% de cc dans la phase s1.

La figure III.10 présente les courants rotoriques en présence d'un défaut de 10 %.

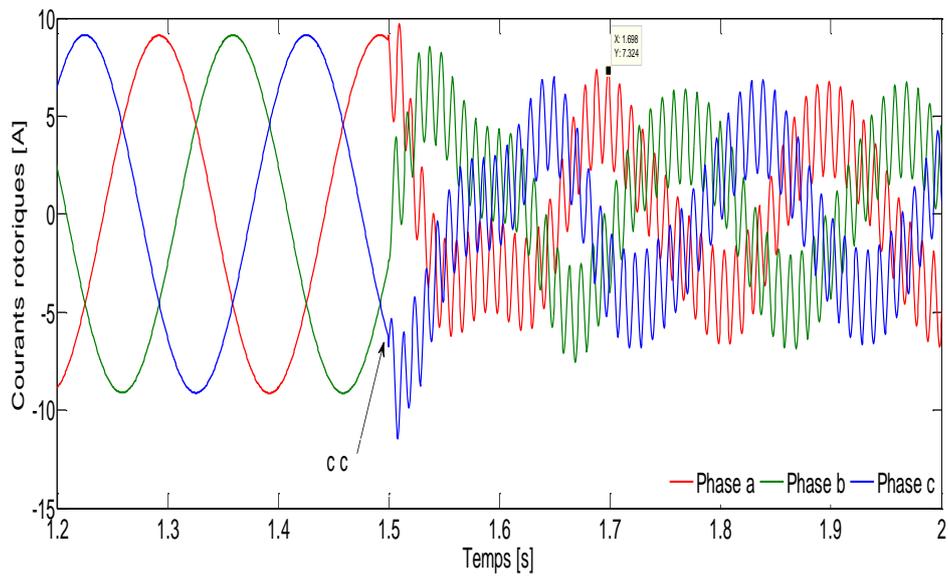


Figure III.10. Courants rotoriques pour un défaut de 10% de cc.

La figure III.11 illustre le courant de court-circuit enregistré pour un défaut de 10 %.

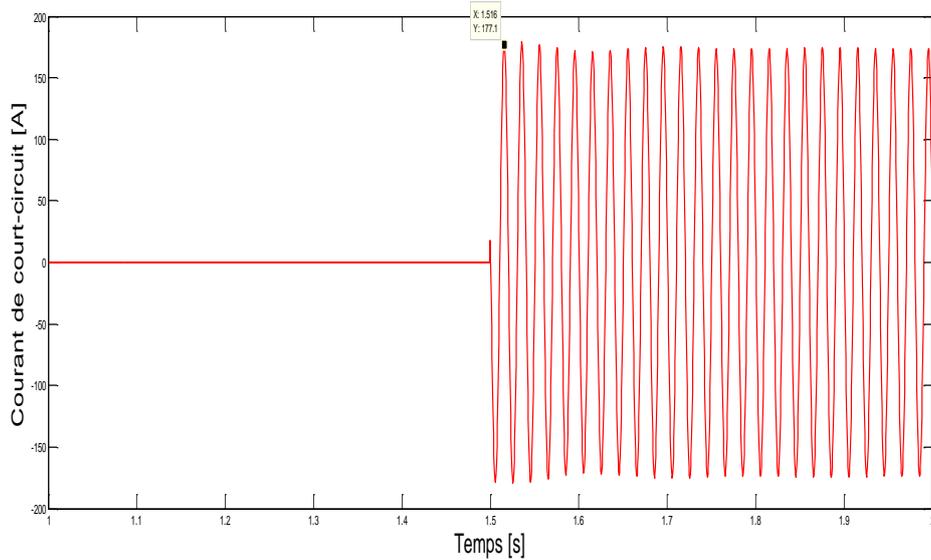


Figure III. 11. Courant de court-circuit pour un défaut de 10% de cc.

- **Défauts de court-circuit 15 %.**

La figure III.12 montre l'évolution de la vitesse de rotation sous l'effet d'un défaut de 15 %.

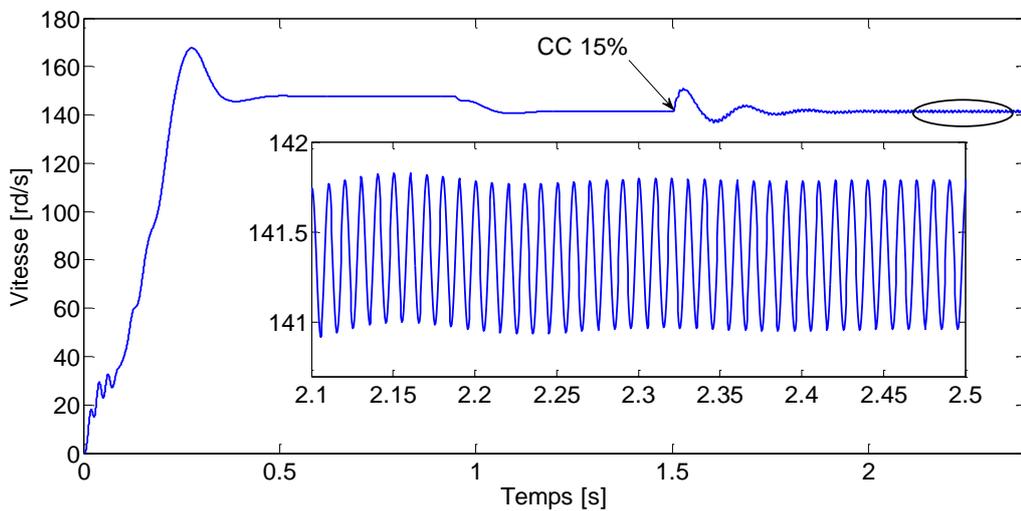


Figure III.12. Vitesse de rotation pour un défaut de 15% de cc.

La figure III.13 représente le couple électromagnétique produit lors d'un défaut de 15 %.

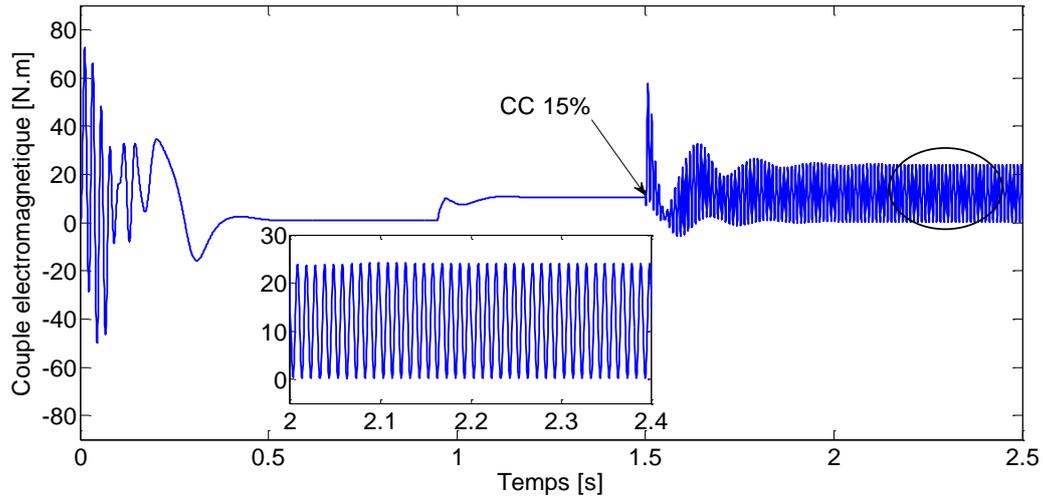


Figure III. 13. Couple électromagnétique pour défaut de 15% de cc.

La figure III.14 présente les courants statoriques dans le cas d'un court-circuit de 15 % affectant la phase s1.

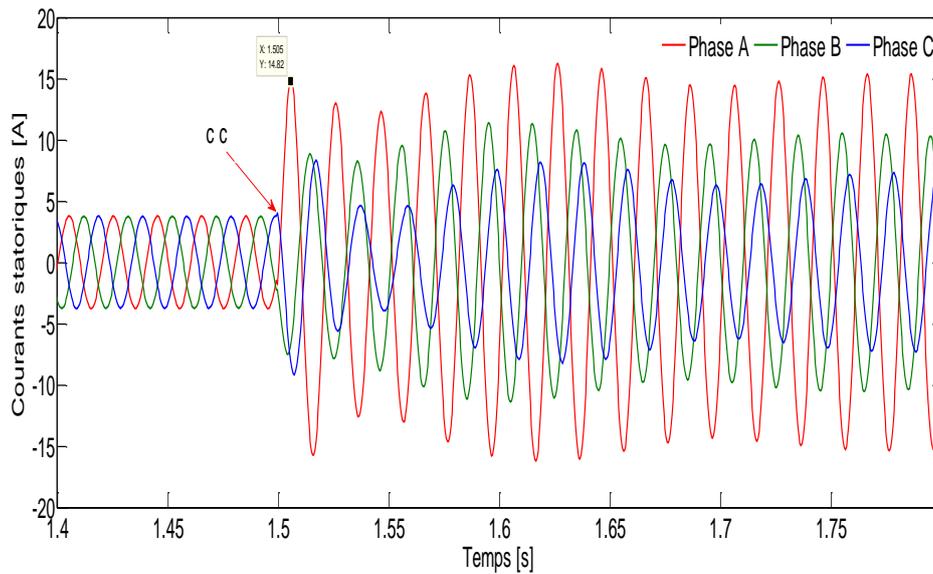


Figure. III.14. Courants statoriques pour un défaut de 15% de cc dans la phase s1.

La figure III.15 illustre la réponse des courants rotoriques à un défaut de 15 %.

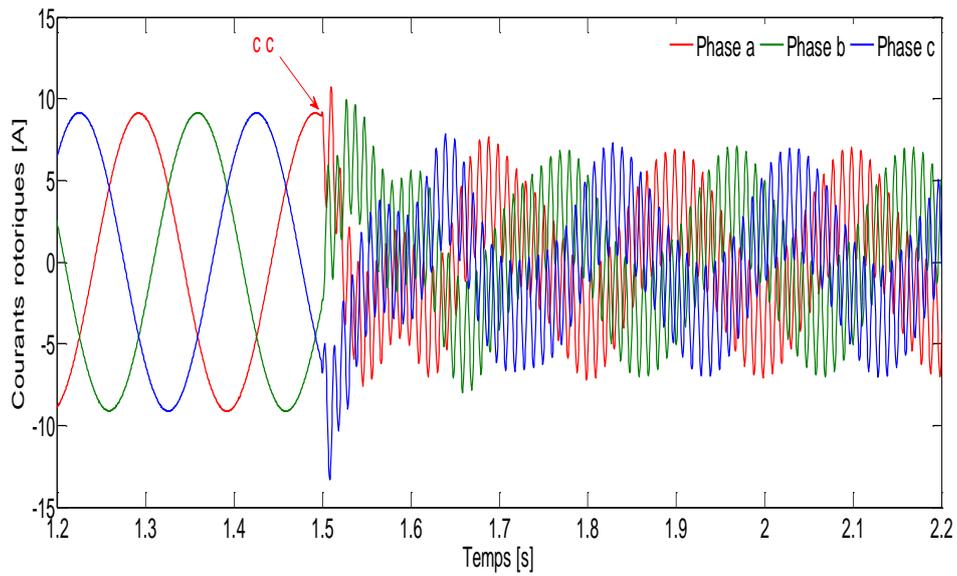


Figure III.15. Courants rotoriques pour un défaut de 15% de cc.

La figure III.16 montre le courant de court-circuit résultant d'un défaut de 15 %.

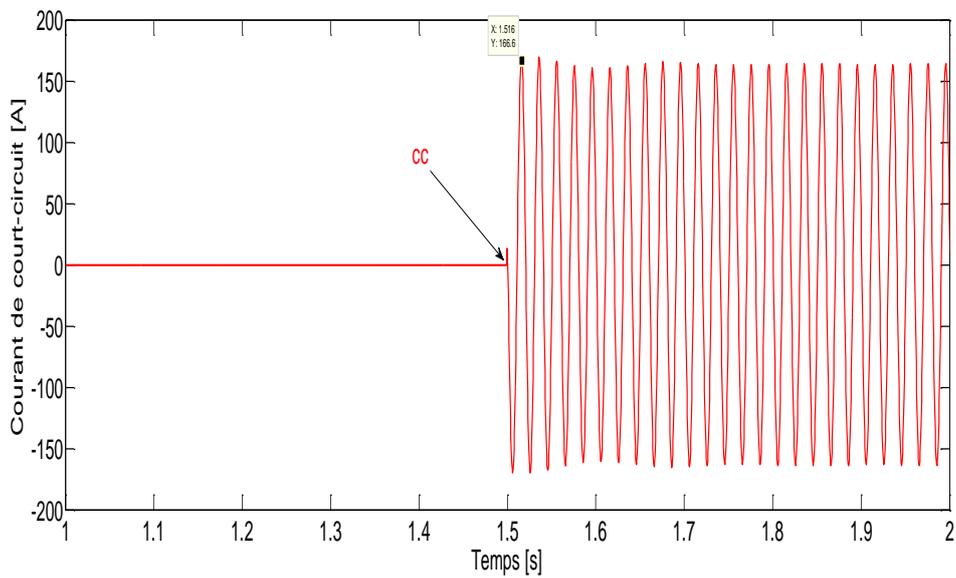


Figure. III.16. Courant de court-circuit pour un défaut de 15% de cc.

La figure III.17 compare l'évolution de la vitesse de rotation pour différents niveaux de défaut (5 %, 10 %, 15 %).

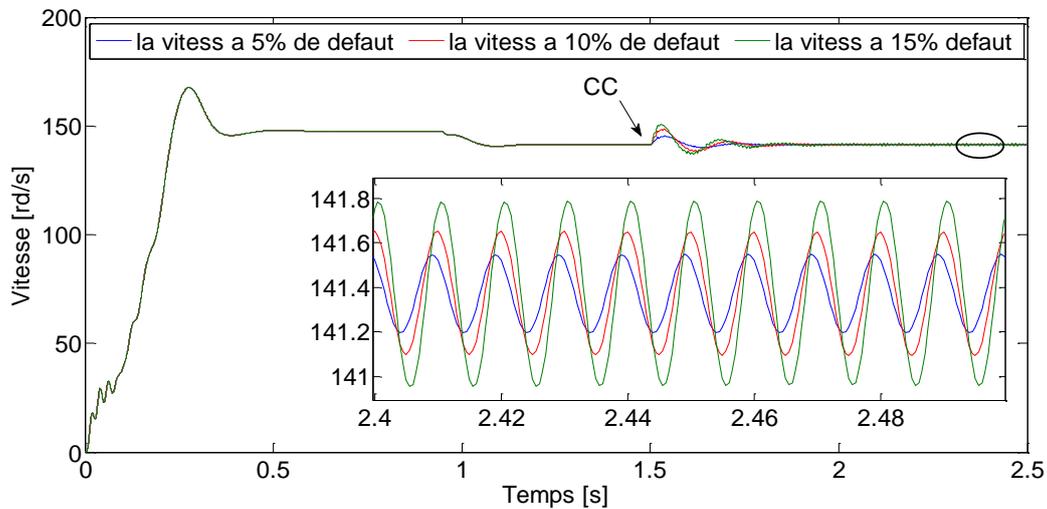


Figure. III.17. La différence entre les vitesses lorsqu'un défaut (de 5%, 10 %,15%) decc.

La figure III.18 illustre la variation du couple électromagnétique en fonction de différents taux de défaut de court-circuit entre spires (5 %, 10 %, et 15 %). Elle permet de comparer l'impact de la sévérité du défaut sur la stabilité et l'amplitude du couple généré par la machine.

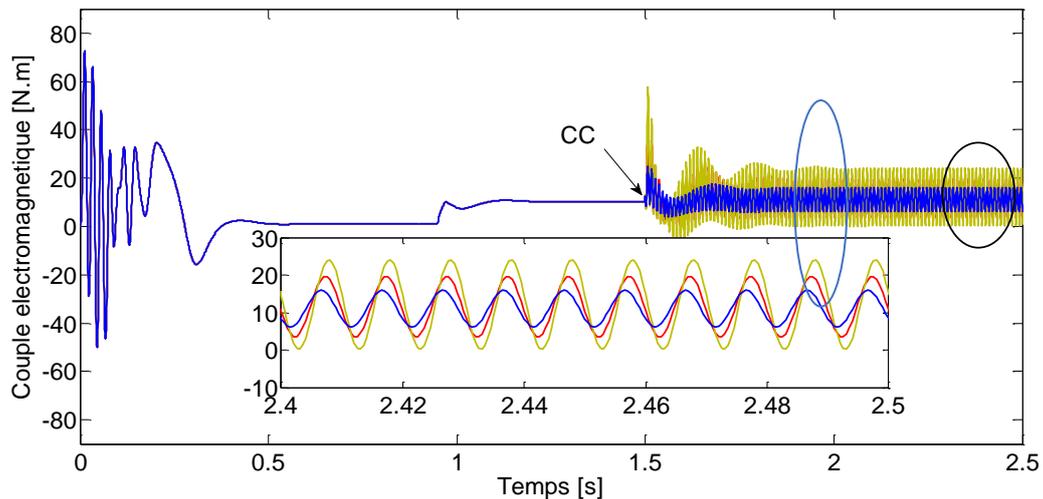


Figure III. 18. La différence entre les couples lorsqu'un défaut (de 5%, 10 %,15%) decc.

III.4.2. Interprétation du résultat

À l'instant $t=1,5s$, un court-circuit inter-spires est introduit sur la phase $sa1$ du stator, affectant successivement 5 %, 10 % et 15 % des spires de la bobine concernée.

La figure III.2 présente l'évolution de la vitesse de rotation en présence d'un défaut de 5 %. Dès l'apparition du court-circuit, une élévation de la vitesse est observée, accompagnée d'oscillations dont l'amplitude atteint environ 2 rad/s. Ces fluctuations deviennent plus prononcées à mesure que la gravité du défaut augmente, comme l'illustrent les figures III.7 et III.12.

Le comportement du couple électromagnétique en présence d'un court-circuit est illustré dans la figure III.3. Pour un défaut de 5 %, on observe une augmentation soudaine du couple, suivie d'oscillations dont l'intensité croît avec l'augmentation du nombre de spires court-circuitées, comme le montrent les figures III.8 et III.13.

Les figures III.4, III.9 et III.14 présentent l'évolution des courants statoriques dans les trois phases pour des taux de défaut de 5 %, 10 % et 15 %, respectivement. Un déséquilibre net des courants est constaté, caractérisé par une augmentation significative du courant dans la phase affectée par le court-circuit, ainsi qu'une élévation plus modérée dans les deux autres phases.

Par ailleurs, les figures III.5, III.10 et III.15 montrent l'évolution des courants rotoriques. Une baisse de leur intensité ainsi que de leurs oscillations est observée immédiatement après l'apparition du défaut. Toutefois, ces grandeurs tendent à croître à mesure que la sévérité du court-circuit augmente.

Enfin, la figure III.6 illustre le comportement du courant de court-circuit pour une défaillance de 5 %, où l'on remarque une élévation brusque de l'intensité, atteignant environ 185 A juste après l'apparition du défaut. En revanche, ce courant décroît avec l'augmentation du taux de spires défectueuses à 10 % et 15 %, comme le montrent les figures III.11 et III.16.

L'ensemble de ces résultats est en accord avec ceux rapportés dans la littérature scientifique, ce qui confirme la validité du modèle utilisé.

III.5. Analyse spectrale du courant statorique en l'utilisant la FFT (Fast Fourier Transformer) pour la détection de défauts

III.5.1. Définition

L'analyse fréquentielle du courant statorique à l'aide de la transformée de Fourier rapide représente une approche fiable et couramment adoptée pour le diagnostic des défauts dans les machines électriques. Cette méthode permet d'identifier la présence d'harmoniques spécifiques dans le spectre du signal, indicatrices de dysfonctionnements tels que les courts-circuits entre spires...etc. Lorsqu'une défaillance sur le système provoque la modification d'harmonique au niveau des spectres des signaux machine.

Grâce à sa capacité à isoler efficacement les composantes spectrales caractéristiques, la FFT devient un outil essentiel pour discerner les signatures associées aux anomalies du comportement des machines[46].

III.5.2 La transformée de Fourier

La transformée de Fourier (TF) constitue une généralisation du développement en série de Fourier (DSF), étendu aux fonctions non périodiques. Cette transformée, également désignée sous le nom d'intégrale de Fourier dans sa forme continue, permet d'associer à une fonction $f(x)$, définie sur \mathbb{R} ou \mathbb{C} , une nouvelle fonction notée $f'(\xi)$. La variable ξ , indépendante de x , est appelée **variable duale**, et représente le domaine fréquentiel de la fonction transformée.

$f'(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-j\xi x} dx$ Lorsque la fonction $F(x)$ représente un signal e.g. une image, une onde sonore, électromagnétique (x désignant la variable de temps ou d'espace), sa transformée de Fourier $f'(\xi)$ est son spectre avec ξ qui représente la fréquence ou la pulsation [47].

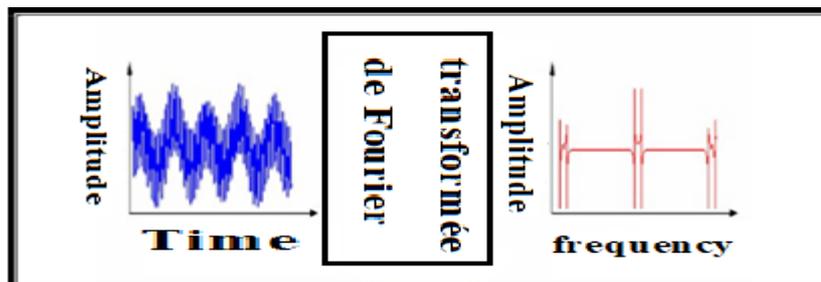


Figure. III.19. Principe de la transformée de fourrier[48].

III.5.3. Simulation

Un modèle a été développé afin de simuler les grandeurs électriques, notamment les courants statoriques. Ce modèle a été exploité dans l'environnement MATLAB à l'aide de l'analyse FFT (Fast Fourier Transform) dans le but de détecter la présence d'harmoniques dans les signaux, permettant ainsi une évaluation précise des effets du défaut.

III.5.3.1. Résultats de simulation de courant statorique Isa En utilisant FFT

La figure III.20 présente le spectre fréquentiel du courant statorique pour un défaut de 5 %, obtenu via la transformée de Fourier.

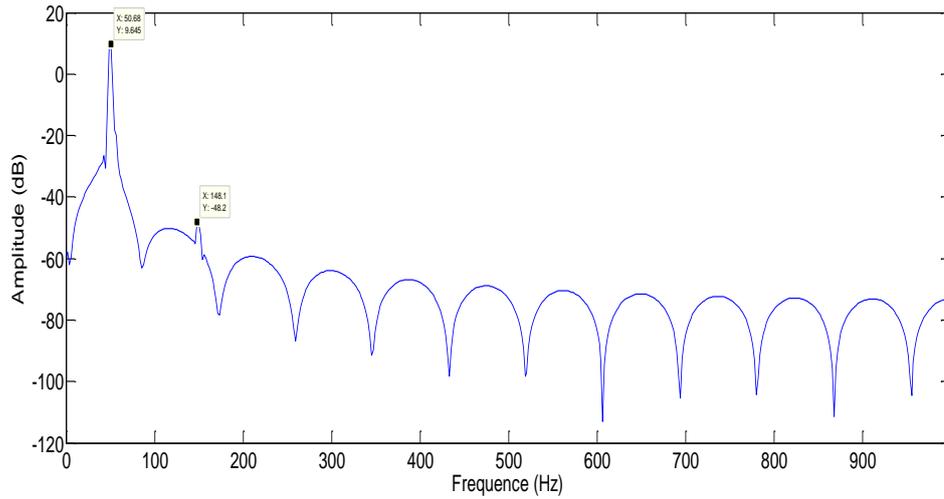


Figure. III.20. Analyse spectrale de $I_{s\alpha}$ pour un défaut de 5% de cc.

La figure III.21 illustre l'analyse spectrale du courant statorique en cas de court-circuit de 10 %.

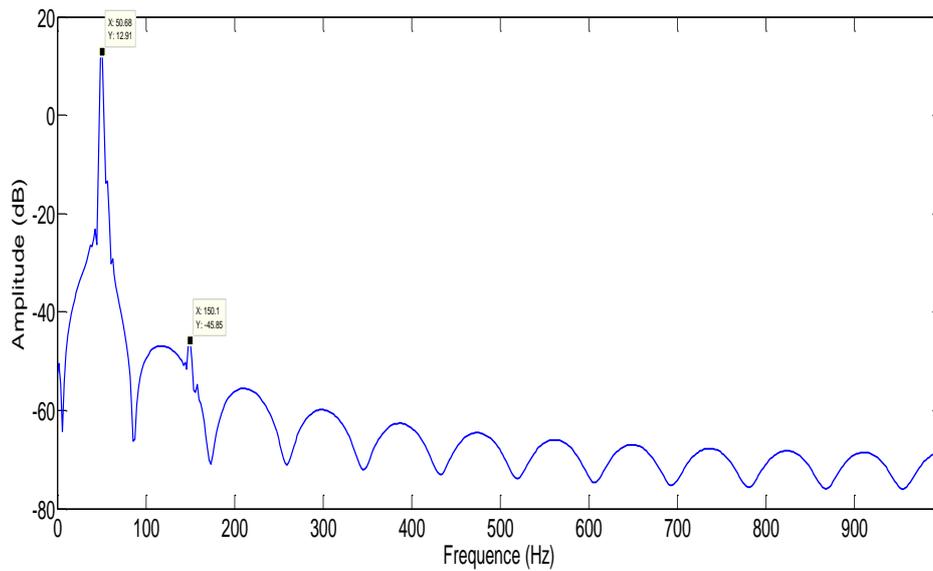


Figure. III.21. Analyse spectrale de $I_{s\alpha}$ pour un défaut de 10% de cc.

La figure III.22 montre le spectre du courant statorique pour un défaut de 15 %, mettant en évidence des composantes harmoniques spécifiques.

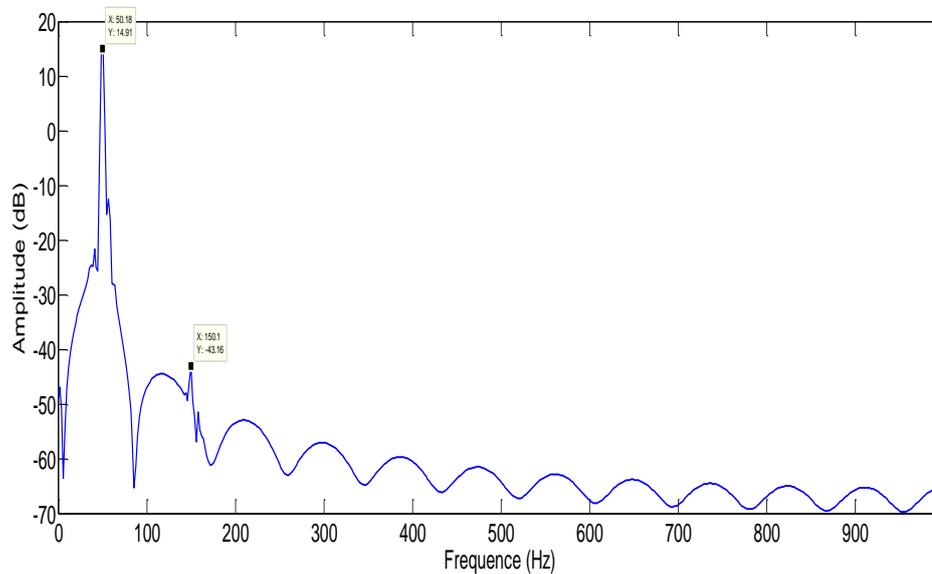


Figure. III.22. Analyse spectrale de I_{sa} pour défaut de 15% de cc.

III.5.3.2. Interprétation du résultat

Les figures III.20, III.21 et III.22 présentent l'analyse spectrale du courant statorique en présence d'un court-circuit entre spires. L'examen de la densité spectrale de puissance (DSP) révèle l'apparition de composantes harmoniques de la forme $3k \cdot f_s$ dans les cas où la machine est affectée par un défaut. L'amplitude de ces composantes tend à croître légèrement avec l'augmentation du pourcentage de spires court-circuitées. Cette présence harmonique est généralement attribuée à l'asymétrie induite dans l'enroulement statorique par la défaillance [30].

- f_s représente la fréquence de glissement, généralement liée à la vitesse relative entre le champ magnétique statorique et le rotor.
- k est un entier naturel (1, 2, 3, ...), de sorte que les termes $3k \cdot f_s$ correspondent à des harmoniques spécifiques apparaissant dans le spectre de fréquence.

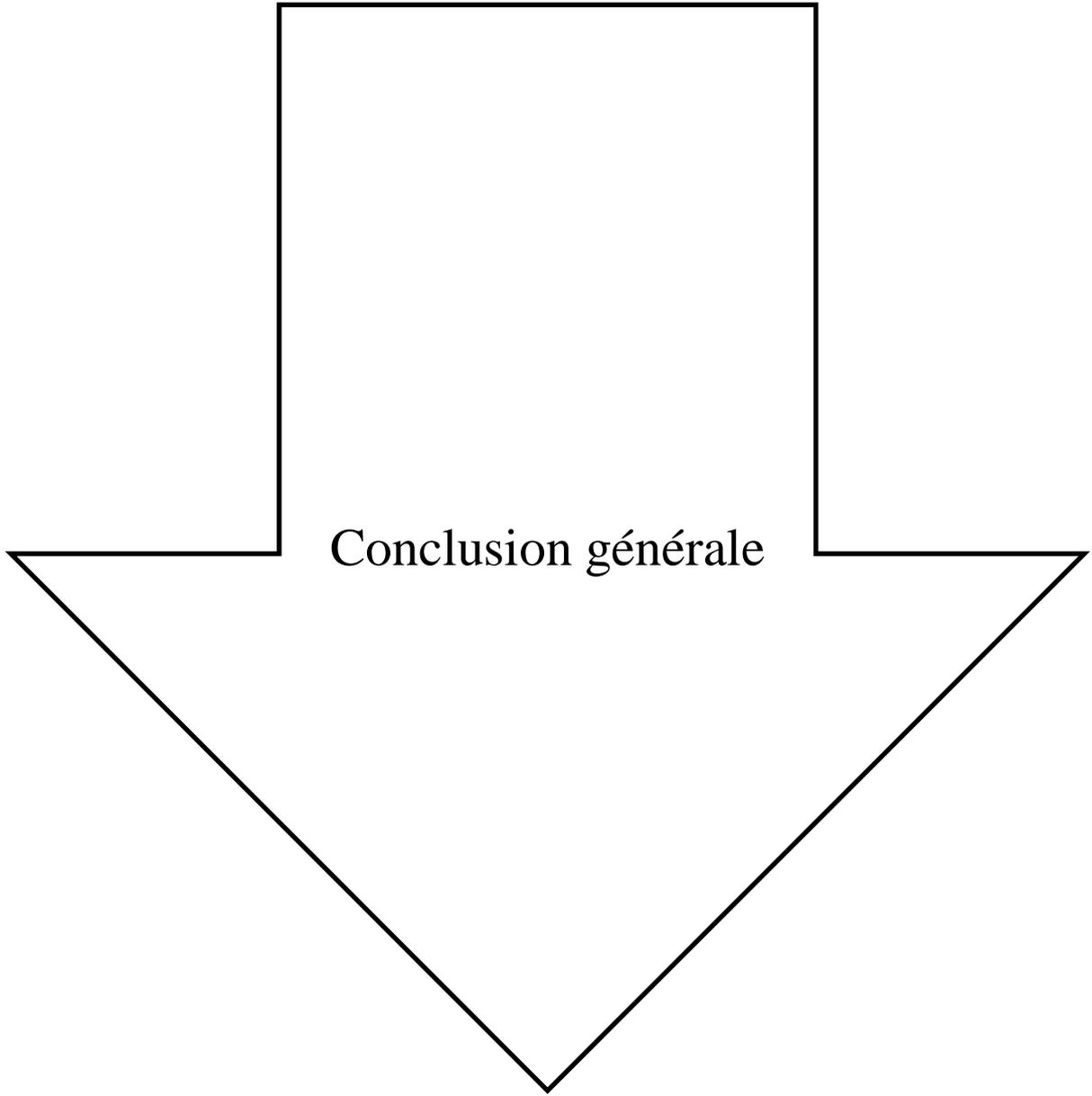
III.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'analyse du comportement de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) en présence d'un court-circuit entre spires dans l'enroulement statorique. L'intégration de ce type de défaut dans le modèle mathématique de la machine a

permis d'adapter les équations dynamiques afin de prendre en compte les perturbations électromagnétiques qu'il engendre.

Les simulations menées sous l'environnement MATLAB ont révélé plusieurs manifestations caractéristiques du défaut : déséquilibre des courants statoriques, apparition d'harmoniques spécifiques dans le spectre fréquentiel, ainsi qu'une dégradation notable du couple électromagnétique. Il en ressort que ce type de défaillance interne a un effet clairement préjudiciable sur les performances de la MADA.

Les résultats obtenus soulignent l'importance de disposer de modèles de défauts fidèles à la réalité, non seulement pour évaluer les impacts potentiels sur le fonctionnement de la machine, mais également pour élaborer des méthodes de détection précoce, telles que l'analyse fréquentielle par Transformée de Fourier (FFT).



Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est le développement d'un modèle de simulation capable de reproduire les défauts de court-circuit dans les machines asynchrones à double alimentation (MADA).

La difficulté d'induire de tels défauts de manière contrôlée dans un environnement expérimental, en raison des risques potentiels et des coûts élevés, rend indispensable la mise en place d'un outil numérique permettant de simuler aussi bien les états de fonctionnement normaux que défectueux de ces machines. La modélisation de ces défauts s'avère essentielle pour le diagnostic précoce, la maintenance prédictive, ainsi que pour l'amélioration de la fiabilité des systèmes de production d'énergie, notamment les installations éoliennes, où les MADA sont couramment utilisées.

Dans ce contexte, notre étude repose sur la méthode d'analyse des signatures de courant moteur (MCSA), une technique largement répandue en raison de sa simplicité, de son faible coût et de son efficacité. Elle consiste à examiner les composantes fréquentielles du courant statorique afin de détecter la présence d'anomalies internes, telles que les courts-circuits entre spires. Cette méthode permet également d'observer l'évolution des composantes spectrales existantes, facilitant ainsi la distinction entre différents types de défauts, comme ceux affectant le stator ou les barres du rotor.

Le mémoire est structuré en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre propose une présentation générale de la machine asynchrone à double alimentation, en détaillant sa structure, ses éléments constitutifs, son principe de fonctionnement, ainsi que ses deux modes opératoires principaux : le mode moteur et le mode générateur. Une attention particulière est portée aux différents types de défauts susceptibles de survenir, ainsi qu'aux méthodes employées pour leur détection.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la MADA sous environnement Matlab. En s'appuyant sur les équations mathématiques représentatives de la machine, un modèle a été élaboré permettant de simuler son comportement aussi bien à vide qu'en charge.

Enfin, dans le troisième chapitre, un défaut de court-circuit entre spires du stator a été introduit dans le modèle précédemment développé. L'analyse du comportement dynamique de la machine en présence de ce défaut a été effectuée à l'aide de la transformée de Fourier rapide (FFT), ce qui a permis de mettre en évidence les harmoniques caractéristiques

associées à la défaillance, validant ainsi l'efficacité du modèle et de la méthode de diagnostic retenue.

Reference

- [1] Y. Elbia, "Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté", Mémoire De Magistère En Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [2] L. Benalia, "Commande en tension des moteurs à induction double alimentation", Thèse De Doctorat En Science En Electrotechnique, Université de Batna, Algérie 2010.
- [3] D. Forchetti, G. Garcia et M. I. Valla, "Vector control strategy for a doubly-fed standalone induction generator vector", IEEE Trans Energy conversion, pp: 991-995, 2002
- [4] A. Boyette, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", Thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I 11, France 2006.
- [5] M. Smaili, "Modélisation Et Commande D'un Aérogénérateur À Machine Asynchrone À Double Alimentation En Vue De Simulation Des Problèmes De Cogénération", Mémoire de Master, Université Du Québec En Abitibi, Témiscamingue, Août 2013.
- [6] F. Djemah, Y. Zetili, "Modélisation et contrôle d'une machine asynchrone double alimentation MADA avec un convertisseur multi-niveaux", Mémoire de Master, Universitaire Boussouf Abdelhafid, Mila 2023.
- [7] N. Amochas, "Commande vectorielle d'une machine asynchrone à double alimentation par régulateur PI", Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes 2016.
- [8] A. Dendouga, "Contrôle Des Puissances Active et Réactive de la Machine à Double Alimentation (DFIM)", Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, février 2010.
- [9] A. Fenni, « Commande Non Linéaire Par Des Régulateurs En Mode Glissant D'une machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) "Mémoire de Master, Université Mohamed Khider, Biskra 2013.
- [10] N. HADJ MEHDI R. SAF, "Détection des défauts sur une machine tournante Par analyse vibratoire", Mémoire master en génie mécanique, Université Saad Dahlab, Blida 2023.
- [11] IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE) e-ISSN: 2278-1676, p-ISSN: 2320-3331, Volume 13, Issue 1 Ver. I (Jan. – Feb. 2018), PP 30-36 www.iosrjournals.org.
- [12] H. Ben Slimane, A. Hamza, "Commande d'un moteur asynchrone à double alimentation", Mémoire de Master, université Badji Mokhtar, Annaba 2021.
- [13] M. Bouameur, "Modélisation et dispositif de commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation", Mémoire de Master, université badji-mokhtar, annaba 2018.
- [14] R. Sadaoui, "Analyse et commande de la machine asynchrone à double alimentation" Mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières université Québec-Avril 2017.

- [15] A. bouguerne, "Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrone", Mémoire de magister en électrotechnique, université Mentouri, Constantine 2009.
- [16] R. Deghmane, W. Meziani, "Modélisation et diagnostic d'une MADA avec déséquilibre d'alimentation", Mémoire de Master, Université Saad Dahlab de Blida 2020.
- [17] Said, M. S. N. Benbouzid, M. E. H., and Benchaib, A. "Detection of broken bars in induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensorless estimation", IEEE Transactions on Energy Conversion 15 (2000), 66–70
- [18] IEEE Motor reliability working group, "Report on large motor reliability survey of industrial and commercial installations", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. IA-21, No. 4, July-August 1985, pp 853-872, 1985.
- [19] A. Melloul "Diagnostic des Machines Electriques" Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Setif 2011.
- [20] A. KHOUANI, Y. HANI "Détection de défaut de la génératrice asynchrone adoublé alimentation" Mémoire de Master, Université Akli Mohamed Oulhadj-Bouira-2023.
- [21] M. Harir, "Etude Des Défauts Dans La Machine Asynchrone A Cage D'écureuil Par L'emploi De La Fonction D'enroulement Modifiée", mémoire de magister électrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf- Oran 2009.
- [22] E. Ait Elhadj I. Ben Haddad, "Diagnostic de la machine asynchrone", Mémoire de Master génie électrique, Université Abderrahmane Mira-Bejaia 2022.
- [23] Y. TAMER, "Détection de Défauts de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (DFIG)", mémoire de magister d'électrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran 2011.
- [24] M. S. Naït-Saïd, M. E. H. Benbouzid et A. Benchaib, "Detection of broken bars in induction motors using an extended Kalman filter for rotor resistance sensor less estimation", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15 no 1 pp. 66-70, Mars 2000.
- [25] Elkasabgy N. M, Eastham, A. R., and Dawson, G. E. The detection of broken bars in the cage rotor of an induction machine, Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (1988), vol. 1 181–187
- [26] H. Yahoui, J. Seetohul, G. Grellet, A. Jammal, "Detection of broken bar or endring fault in asynchronous machines by spectrum analysis of the observed electromagnetic torque through supply cable", Vol. 5, no. 4, 1995.
- [27] A. H. Bonnett, "Cause and analysis of anti-friction bearing failures in AC induction motors", publié dans les actes de la conférence IEEE PAPCON en 1993, DOI : 10.1109/PAPCON.1993.255813
- [28] Y. Kerbous "Modélisation de la machine asynchrone a cage en vue de l'étude de ses défauts rotoriques", Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia-2023.

- [29]T. Achour, "Diagnostic de défauts électriques et mécaniques de la machine asynchrone a simple cage d'écureuil : Etude expérimentale", d'ingénieur d'état en électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique,2008
- [30] Y. Nacera,"Détection des défauts dans les systèmes de conversion d'énergie polyphasés",Thèse de doctorat université mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou-2018
- [31]A. Chahmi, "Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic,"Thèse de doctorat Electrotechnique, université des sciences et technologie d'Oran, 2017.
- [32]N.Menai,"Application et diagnostic thermographie"Mémoiredemaster en génie mécanique, Université Badji Mokhtar–Annaba–2014.
- [33]A. Haroune,"*diagnostic des défaillances de la machine asynchrone*", Mémoire de Master, Maintenanceindustrielle, université Badji Mokhtar ,Annaba2020.
- [34]01dB-stell, Dual-channel Analyses CollectorWeb:www.01db-stell.com
- [35]K. Belaid, "Approche Numérique et Expérimentale d'Aide au Diagnostic Vibratoire des Systèmes Mécaniques par la Transformée en Ondelettes",Thèsedoctorats en génie mécanique, Université Mouloud Mammeri de tizi-ouzou-2023.
- [36]S.Lobna Yasmine, B.Nesrine,"Application de la maintenance préventive (ou prédictive) des machines"MasterEnergétique, Université Ain T'émouchent Belhadj Bouchaib,2024.
- [37] N.Ghouli. Haddadienne,"Réglage des puissance actives et réactive de la génératrice asynchrone a doublé alimentation par des régulateur PI",Mémoire D'ingénieur d'état en Electrotechnique, Msila 2005.
- [38]B. NEDJAR,"Modélisation basée sur la méthode des réseaux de perméances en vue de l'optimisation de machines synchrones à simple et à double excitation", Thèsede doctorat, génie électrique, edsp 2012.
- [39]TuanVutran," Combinatoires et Modèles Multi-Niveaux pour la Conception Optimale des Machines Electrique",Thèse de doctorat, école doctorale de Lille, 2009.
- [40] F. Imene A. Fatima Ezzahraa,"Analyse Statique et Dynamique des Machines Synchrones à Aimants Permanents SPM et IPM,Mémoire de master Électrotechnique, Ecole national polytechnique 2017.
- [41] A. Mohamed &E. Yassine,"Modélisation et Diagnostic des défauts de court-circuit entrespres d'unemachineasynchrone",Mémoiredede MasterElectrotechnique, Université Saad Dahlab Blida, 2018
- [42] Y. Laoubi, "Modélisation des machines électriques par les réseaux de perméances génériques. Cas des machines à flux axial ", Thèse doctorat, Normandie Université 2017.

[43]Paul-Etienne V, "Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à DoubleAlimentation", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique deToulouse, France, 2004

[44]I. Idrissi, "contribution au diagnostic des défauts de machine asynchrone doublement alimentée d'une éolienne à vitessevariable", diplôme doctorat, Normandie Université2019.

[45]M. Ahmed Redah, M. Mohammed Amine, "diagnostic des défauts de la machine asynchrone", d'ingénieur d'état en Automatique, école nationale supérieure polytechnique, 2009.

[46] M. Samiullah, H. Ali, S. Zahoor, A. Ali," Fault Diagnosis on Induction Motor using Machine Learning and Signal Processing," School of Electrical Engineering and Computer Science, National University of Sciences and Technology, Islamabad, Pakistan, 2024.

[47]R. N. Bracewell, "The Fourier Transform and its Applications", 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2000.

[48]K. Samir," ContributionàlaSurveillanceetauDiagnosticdes Défauts De la Machine Asynchrone," Thèse Doctorat, universitéBadji Mokhtar, Annaba, 2016

Annexe

Caractéristiques nominales

Puissance nominale	$P_n = 2.2 \text{ Kw}$
Tension nominale	220V/380V
Vitesse nominale	$N_n = 1480 \text{ tr/min}$
Nombres pairs de pôles	$p = 2$

Paramètres de la machine

Désignation	Symbole	Valeur	Unité
Résistance d'une phase du stator	R_s	1.59	[Ω]
Résistance d'une phase au rotor	R_r	1.91	[Ω]
Inductance propre au stator	L_s	0.1076	[H]
Inductance propre au rotor	L_r	0.057	[H]
Inductance mutuelle au stator	M_s	$-0.5 * L_s$	[H]
Inductance mutuelle au rotor	M_r	$-0.5 * L_r$	[H]
Inductance mutuelle entre le stator et le rotor	M_{sr}	0.078	[H]
Coefficient de frottement visqueux	f_v	0.0066	[N.m.s /rd]
Moment d'inertie	J	0.04	[Kg.m ²]