الجمهورية الجزائرية الديموقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique ET Populaire
وزارة التعليم العـــــــالـــــــي والبـــحـــــــث
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Ingénierie de la Maintenance en Instrumentation

Thème

Analyse spectrale des défauts de démagnétisation et d'excentricité d'un moteur synchrone en vue de leur séparation

Présenté par :

HAMMELNA Nedjma Amani & BOUZIANI Razika

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Belkhodja Leila	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	**Présidente**
Nekrouf Djilali	MAA	Univ. Oran-2, IMSI	**Encadrant**
Belkacem Belkacem	MCA	Univ. Oran-2, IMSI	**Examinateur**

Juin 2024

Remerciements

Avant toute chose, je remercie Dieu le tout puissant, qui a rendu cet ouvrage possible

Je remercie sincèrement mon encadrant, Mr DJILALI Nekrouf pour sa guidance, ses conseils avisés et son soutien tout au long de ce travail.

Je remercie également les membres du jury pour avoir accepté d'évaluernotre travail

Je tiens à exprimer mes reconnaissances à l'ensemble de nos enseignants, en particulier Mme LEILA Belkhodja pour sa disponibilité constante

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui nous ont aidées de près ou de loin

Hammelna Amani

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma chère mère, pour son amour inconditionnel, son soutien et ses sacrifices. Tu as été ma plus grande source de courage, je ne te remercierai jamais assez ma vie

Mon cher père, merci pour tout

Mes chers frères, Mokhtar, Kader et rabie que Dieu vous préserve insha'Allah

Mes chères nièces, ADO et MELI vous êtes une source de joie, En espérant vous voir atteindre de grands succès dans vos propres vies

Mon cher neveu, Kenzi que Dieu te protège

Mes cousines, Amel, Noor, Marwa, Zouha et Yasmin, à Mimi ma princesse un merci tout particulier pour ta présence constante

Ma chère binôme, my fav butterfly

Mes meilleures amies, Samia, Khansa, Amoun, Sabrina, pour leur amitié sincère, les moments de partage qui ont rendu cette aventure inoubliable, sans oublier Samah

Mon encadrant, Mr Djilali NEKROUF

Hammelna Amani

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ma mère, pour son amour et son soutien inconditionnels, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie. Je ne pourrais jamais exprimer toute ma grande affection et ma profonde reconnaissance envers toi. Je t'aime ma vie

Mon père, le meilleur des papas, merci pour tous tes sacrifices, ton soutien moral et financier et surtout ta confiance qu'il m'a accordée.

Mes sœurs Fatima et **Drifa** merci pour votre amour, soutien et vos conseils précieux. Votre présence rassurante et vos encouragements ont grandement contribué à ma réussite.

Heddi pour être bien plus qu'un frère, merci pour tout Jones.

Mes frères Aissa, **Mohamed** merci pour votre confiance en moi et vos rires et bonne humeur même quand c'était à mes dépens.

Mes nièces et **neveux** (Mohamed, Wail, Kouki, Lyly, Tinhou, Anes, Rayan et Camelia), pour leur joie de vivre qui m'a souvent apporté un réconfort précieux.

Mes meilleurs amies Feriel, Elkhansa, Marie, Djihene, Amina, Doua et Samah merci d'être toujours là pour les fous rires et les moments inoubliables, vous êtes the best

Mon encadrant Mr.Djilali pour son précieux soutien, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce projet.

Maria, pour ses tweets hilarants et ses tutos makeup.

Toute la TL

Last but not least Amoune, meilleure binome.

Tous, merci du fond du cœur.

BOUZIANI Razika

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu Tout-Puissant pour m'avoir donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce projet de fin d'études.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, Mr.NEKROUF Djilali. Ses encouragements constants, sa bienveillance et ses précieux conseils ont été une source inestimable de motivation et de guidance tout au long de ce projet. Son expertise et son dévouement m'ont permis de surmonter de nombreux obstacles et d'atteindre les objectifs fixés.

Je remercie chaleureusement les membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour leurs remarques constructives qui m'ont permis d'améliorer mon projet.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'accomplissement de ce projet. Leur soutien moral, leurs encouragements et leurs conseils m'ont été d'une aide précieuse.

BOUZIANI Razika

Résumé

Ce projet de fin d'études se concentre sur la détection et le diagnostic des défauts dans les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) en utilisant la méthode d'analyse spectrale ROOT-MUSIC. L'objectif principal est de valider les résultats obtenus expérimentalement pour les défauts d'excentricité et de désaimantation. Un banc d'essai a été réalisé pour mener des expériences sur un MSAP. Les défauts d'excentricité ont été créés en modifiant les bagues des roulements, tandis que les défauts de désaimantation ont été simulés en remplaçant des aimants par un matériau ferromagnétique. Les signaux ont été acquis à l'aide de capteurs de courant et de tension, puis traités avec la méthode ROOT-MUSIC. L'analyse spectrale a révélé la présence de pics caractéristiques liés aux défauts, dont l'amplitude augmente avec la sévérité du défaut et la durée de l'essai. Les défauts de désaimantation présentent des puissances plus élevées et constantes que l'excentricité. Ces résultats permettent de développer des indicateurs pour une surveillance efficace et une détection précoce des défauts dans les MSAP.

Abstract

This final year project focuses on the detection and diagnosis of faults in permanent magnet synchronous machines (PMSMs) using the ROOT-MUSIC spectral analysis method. The main objective is to validate the results obtained experimentally for eccentricity and demagnetization faults. A test bench was set up to conduct experiments on a PMSM. Eccentricity faults were created by modifying the bearing rings, while demagnetization faults were simulated by replacing magnets with a ferromagnetic material. Signals were acquired using current and voltage sensors, then processed with the ROOT-MUSIC method. Spectral analysis revealed the presence of characteristic peaks related to the faults, with amplitudes increasing with fault severity and test duration. Demagnetization faults exhibit higher and more constant power than eccentricity. These results allow for the development of indicators for effective monitoring and early fault detection in PMSMs.

Liste des Abréviations

Abréviation	Signification
MSAP	: Moteur synchrone à aimants permanents
MCC	: Machine à courant continu
MAPSB	: Machine à aimants permanents sans balais
Sm-Co	: Samarium-Cobalt
FFT	: FastFourier Transform
DMF	: Défaut de DésaimantationFast
HR	: Haute Résolution
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
PMSM	: Permanent magnet synchronous motors
EMF	: La force électromotrice

SOMMAIRE

Introduction générale……...……..1

Chapitre I : Étude du MS à aimant permanent

I.1.Introduction…….……..……..4

I.2.Généralités sur la MSAP……..……...4

I.3.Domaines d'application……..……..…6

I.4.Differents types de machine à aimants permanents…….....…..…6

I.4.1.Les machines à courant continu à aimants permanents (MCC)…….……..7

I.4.2.Les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB)……..…7

I.5.Constitution de la MSAP…….……7

I.5.1.Stator (induit)…….....8

I.5.2.Rotor (inducteur)……...8

I.5.2.1.Types de rotors……...9

I.5.2.1.1.Le rotor à pôles saillants……..…….....9

I.5.2.1.2. Le rotor à pôles lisses…….....9

I.6.Avantages des machines à aimants permanents…….10

I.7.Inconvénients des machines à aimants permanents……...10

I.8.Les organes mécaniques…….……...….11

I.9.Origine de défaut de la MSAP…….....11

I.10.Etude statique sur les défauts dans les machines électriques…….……..……..…12

I.11.Défaillance au rotor……..……...…….13

I.11.1.Excentricité statique et dynamique…….....13

I.11.2.Défauts de roulements……...14

I.11.3.La désaimantation des aimants permanents……..15

I.12.Défauts statoriques……..….15

I.12.1.Défauts d'isolant dans un enroulement……..……...16
I.12.2.Les court-circuités statoriques…….……..16
I.12.2.1.Court-circuit entre spires……16
I.12.2.2.Court-circuit entre phases……...17
I.12.3.Conséquences des défauts statoriques…….……..17

Chapitre II :Méthode d'analyse spectrale ROOT-MUSIC

II.1.Introduction……..…….20
II.2.Les méthodes de Haute Résolution (HR)……..…21
II.2.1.Méthode de Prony……..……21
II.2.2. La méthode de Pisarenko……..……21
II.2.3. Classification des méthodes à haute résolution……...……..22
II.2.3.1. Méthodes à recherche spectrale……...…….22
II.2.3.2. Méthodes sans recherche spectrale……22
II.2.4. L'algorithme Music (Multiple Signal Classification)…….....22
II.2.5. La méthode ROOT-MUSIC…….....22
II.2.6. Les étapes…….....23
II.2.6.1. Lecture des données……...……23
II.2.6.2. Calcul de la fonction d'autocorrélation……..…...23
II.2.6.3. Calcul des vecteurs propres……23
II.2.6.4. Détermination des fréquences……24
II.2.6.5. Détermination des énergies…….....24
II.3. L'organigramme de l'algorithme ROOT-MUSIC…….....27

Chapitre III :Résultats d'étude & Discussion

III.1. Introduction…….……29
III. 2. Description du Banc de Mesures…….……..30
III.3. L'application de la méthode ROOT-MUSIC…….…….....34

III.4. Détails et étapes des programmes MATLAB…….……...36
III.5. Création des défauts…….……...37
III. 5. 1. Création du défaut d'excentricité……..…..…37
III. 5. 2. Création du défaut de désaimantation……...….38
III.6. Signatures fréquentielles des défauts……..…....39
III.7. Fonctionnement du moteur sain……...……...39
III. 8. Fonctionnement du moteur en présence du défaut d'excentricité……...……..42
III. 9. Fonctionnement du moteur en présence du défaut de démagnétisation…….…..47
III.10. Rapport entre la démagnétisation et l'excentricité…….……...50
III.10.1. Observations et remarques…….……....50
III.10.2. Différences entre les deux défauts…….……....51
III.11. Conclusion……51
Conclusion générale …….……...56

Liste des figures

Chapitre I : Étude du MS à aimant permanent

Figure. I.1.*Constitution du moteur* synchrone……...…5
Figure.I.2. Stator (induit)……...8
Figure.I.3.Le rotor à pôles saillants……...9
Figure.I.4. Le rotor à pôles lisses……...9
Figure .I.5. Répartition des défauts dans une machine électrique suivant leur localisation…..12
Figure.I.6. Répartition des défauts dans la machine électrique du domaine industriel…….12
Figure.I.7. Schématisation de l'excentricité statique et dynamique……..14
Figure.I.8.Représentation de court-circuit entre spires, entre phases, phase et terre…….....17
Figure.I.9.Différentes défauts statoriques……..18

Chapitre III : Résultats d'étude & Discussion

Figure .III. 1. Schéma synoptique du banc de mesure réalisé……..30
Figure .III. 2. Photo du banc de mesures réalisé……..31
Figure .III. 3. Photo du MSAP utilisé……..…….31
Figure .III. 4. Photo de la génératrice utilisée…….....32
Figure .III. 5. Photo de l'onduleur utilisée……32
Figure .III. 6. Photo de la dSPACE RTI - 1104 utilisée……33
Figure .III. 7. Photo de la carte d'acquisition utilisée…….33
Figure .III. 8. Photo du capteur de courant utilisé…….....34
Figure .III. 9. Photo du capteur de tension utilisé…….....34
Figure .III. 10. Mécanisme de création du défaut d'excentricité…….....37
Figure .III. 11. Procédure de création du défaut de désaimantation…….....38
Figure .III.12. Moteur saint 10s essai 1……40
Figure .III. 13. Moteur saint 10s essai 2……40
Figure .III. 14. Moteur saint 20s essai 1……41
Figure .III. 15. Moteur saint 20s essai 2……41
Figure .III.16. DE 30% 20s essai 1 ……43
Figure .III.17. DE 10% 10s essai 2 …….....44

Figure .III.18. DE 10% 10s essai 1……44
Figure .III .19. DE 20% 10s essai 1……...45
Figure .III.20. DE 10% 20s essai 1……....45
Figure .III.21. DE 20% 20s essai 1……...…46
Figure .III.22. DE 30% 10s essai 1……..…..46
Figure .III.23. DMF 2 POLE 20s essai 1……..48
Figure .III.24. DMF 2 POLE 20s essai 2……...48
Figure .III.25. DMF 2 POLE 10s essai 2……..49
Figure .III.26. DMF 2 POLE 10s essai 1……...49

Liste des tableaux

Chapitre III : Résultats d'étude & Discussion

Tableau III.1.Signatures fréquentielles des défauts étudiés……39

Tableau III.2. Rapport entre les défauts……..50

Introduction générale

Les moteurs synchrones jouent un rôle crucial dans de nombreuses applications industrielles en raison de leur efficacité énergétique et de leur capacité à maintenir une vitesse constante sous diverses charges. Cependant, comme tout système électromécanique, ces moteurs ne sont pas exempts de défauts, parmi lesquels la démagnétisation des aimants et l'excentricité figurent parmi les plus courants et les plus critiques.La détection précoce et la distinction précise de ces défauts sont essentielles pour garantir la fiabilité et la performance des moteurs synchrones.

La démagnétisation se produit lorsque l'aimant permanent d'un moteur synchrone perd partiellement ou totalement sa capacité magnétique. Ce phénomène peut être causé par des surcharges électriques, des températures élevées ou des défauts de fabrication. Une démagnétisation partielle peut entraîner une diminution de la force électromotrice (EMF) et une augmentation des pertes énergétiques. L'excentricité, quant à elle, peut être statique ou dynamique. L'excentricité statique survient lorsque le rotor est décentré par rapport au stator, tandis que l'excentricité dynamique résulte d'un désalignement entre l'axe du rotor et celui du stator durant la rotation. Ces défauts engendrent des forces radiales inégales, augmentant les vibrations et réduisant l'efficacité du moteur.

Ces défauts peuvent être causés par des conditions de fonctionnement défavorables, des erreurs de fabrication, un entretien inadéquat ou des contraintes mécaniques excessives. Pour diagnostiquer et séparer ces défauts, une analyse spectrale précise des signaux issus du moteur est indispensable.

ROOT-MUSIC (Multiple Signal Classification) est une méthode d'estimation de fréquences qui se distingue par sa précision et sa capacité à séparer des signaux proches. Contrairement à la Transformée de Fourier Rapide (FFT), ROOT-MUSIC n'est pas affectée par le problème de fuite de fréquence et offre une résolution plus fine des composantes spectrales, ce qui en fait un outil idéal pour l'analyse des signaux complexes des moteurs synchrones. Chaque défaut dans un moteur synchrone génère des harmoniques spécifiques dans le spectre de fréquence. La démagnétisation et l'excentricité se manifestent par des signatures de fréquences distinctes.

L'analyse de ces signatures permet de détecter et d'isoler les défauts, facilitant ainsi une maintenance proactive et ciblée.

L'analyse spectrale consiste à examiner le contenu fréquentiel des signaux électriques ou vibratoires du moteur pour identifier des anomalies. Cette méthode est particulièrement efficace pour les moteurs synchrones, car elle permet de détecter des défauts avant qu'ils ne deviennent critiques. ROOT-MUSIC est particulièrement adapté pour cette tâche, car il offre une meilleure résolution spectrale comparée à la FFT, qui est souvent limitée par sa lenteur et sa susceptibilité à la fuite spectrale.

La FFT, bien qu'utile pour une analyse rapide des signaux, présente des limitations significatives dans le contexte de détection de défaillances de moteurs synchrones. Elle est sujette à la fuite spectrale et ne peut pas toujours distinguer des signaux proches avec précision. De plus, la FFT peut être lente et moins efficace pour des analyses nécessitant une haute résolution, ce qui rend ROOT-MUSIC un choix plus approprié.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux. Le premier chapitre se concentre sur les moteurs synchrones et les deux défauts spécifiques : démagnétisation et excentricité. Nous y explorerons le fonctionnement des moteurs synchrones, la constitution et l'impact de ces défauts sur leur performance. Le deuxième chapitre présente les méthodes haute résolutions en concentrant surROOT-MUSIC et son application dans l'analyse spectrale. Enfin, le troisième chapitre expose les résultats de l'analyse, incluant des études de cas et des comparaisons des résultats obtenus avec ROOT-MUSIC.

La problématique de ce mémoire se pose ainsi : comment peut-on efficacement séparer et identifier les défauts de démagnétisation et d'excentricité dans un moteur synchrone en utilisant la méthode ROOT-MUSIC?

ChapitreI :Étude du moteur synchrone à aimant permanent

I.1. Introduction

Au cours des dernières décennies, l'utilisation des Machines Synchrones à Aimants Permanents (MSAP) a connu une croissance constante dans divers secteurs industriels. Cette tendance s'explique par l'introduction, dans les années 1980, de nouveaux matériaux magnétiques plus performants tels que le Samarium-Cobalt ou le Néodyme-Fer-Bore, utilisés dans la fabrication des aimants permanents. Grâce à ces avancées, les MSAP sont devenues très compétitives par rapport à d'autres types de machines comme les machines à courant continu, les machines synchrones à rotor bobiné ou les machines asynchrones.

Parallèlement, les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance ont élargi les performances des MSAP en termes de dynamique et de puissance contrôlable. Ainsi, les MSAP occupent désormais une place importante dans les applications nécessitant une vitesse variable. [1]

I.2.Généralités sur la machine synchrone

La machine synchrone se compose d'une partie tournante, le rotor, et d'une partie fixe, le stator (figures I.1 & I.2). Le rotor peut se composer d'aimants permanents ou être constitué d'un bobinage alimenté en courant continu et d'un circuit magnétique (électro-aimant).

Pour produire du courant, on utilise une force extérieure pour faire tourner le rotor : son champ magnétique, en tournant, induit un courant électrique alternatif dans les bobines du stator.

La vitesse de ce champ tournant est appelée « vitesse de synchronisme ».

Il n'est pas possible de faire démarrer correctement, sans aide extérieure, une machine synchrone en connectant ses enroulements statoriques directement sur un réseau alternatif. Si l'on n'entraîne pas le rotor par une force extérieure, il est possible de la faire tourner en alimentant ses enroulements statoriques par un courant alternatif dont la fréquence augmente progressivement de zéro à la fréquence de synchronisme et en faisant en sorte que la tension aux bornes des enroulements soit proportionnelle à la fréquence. Sa vitesse de synchronisme sera directement liée à la fréquence de l'alimentation électrique.

Un autre moyen de réaliser l'autopilotage de la machine, c'est-à-dire de maintenir l'orthogonalité du flux magnétique rotorique par rapport au flux statorique, par exemple, en disposant sur son axe un capteur qui délivre une information de la position du rotor. Cette information est traitée par un convertisseur électronique qui fournit le courant statorique à la machine, en phase avec sa force contre-électromotrice. [2]

Une machine synchrone est une machine électrique qui permet deux modes d'utilisation. Le premier est une utilisation en mode générateur et le second en mode moteur.

Pour le mode générateur, la fréquence de l'électricité produite dépendra étroitement de la vitesse de rotation du rotor. En ce qui concerne le mode moteur, il rend une rotation en fonction de la fréquence du courant électrique qu'il absorbe. [3]

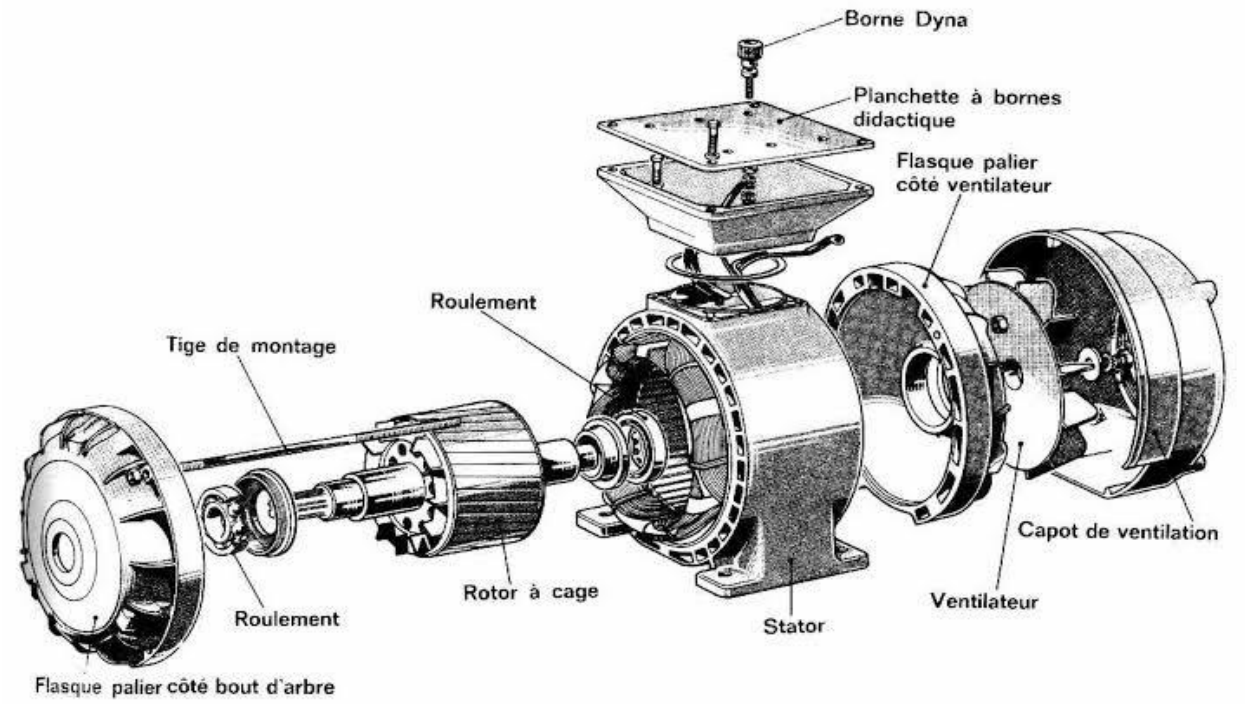


Fig. I.1.*Constitution du moteur* synchrone

I.3.Domaines d'applications

Production d'énergie électrique :

Principalement utilisée comme alternateur dans les centrales thermiques, hydrauliques, nucléaires, etc., où sa vitesse est fixe. Dans le cas des éoliennes, elle agit en tant que génératrice synchrone, adaptée aux variations de vitesse.

Industrie pétrochimique: Les machines synchrones sont conçues pour des opérations à haute puissance et à grande vitesse.

Énergies renouvelables, particulièrement l'éolienne: Les machines synchrone à aimants permanents sont utilisées pour des opérations à haute puissance et à basse vitesse.

Industrie automobile: Elles sont intégrées dans les véhicules hybrides ou électriques et des sous-marins, fonctionnant à basse puissance.

Industrie aéronautique : Pour le développement d'avions plus électriques, avec des puissances pouvant atteindre 175 kW.

Industrie ferroviaire: Les machines synchrone à aimants permanents sont utilisées pour des opérations de traction à puissance moyenne. Par exemple, un générateur à aimants permanents a été dimensionné pour une puissance nominale de 250 kW.

Électroménager: comme les machines à laver le linge.

Technologies de l'information: telles que les lecteurs de DVD.

Équipements médicaux et de santé: comme les fraises dentaires.

I.4.Différents types de machines à aimants permanents

Il existe différents types de machines à aimants permanents, classés en fonction de leur principe de fonctionnement :

- Les machines à courant continu à aimants permanents (MCC).
- Les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB)

I.4.1.Les machines à courant continu et aimants permanents (MCC)

Sont des variantes des machines à courant continu où le champ magnétique produit par les électroaimants est substitué par celui des aimants permanents. Cette substitution élimine les pertes joules associées aux bobinages d'excitation, mais l'ajustement du champ d'excitation n'est plus possible. Par conséquent, leur utilisation est restreinte aux applications de faible puissance et de haute dynamique qui n'impliquent pas de fonction de défluxage. ***[4]***

I.4.2.Les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB)

Les avancées dans la technologie des semi-conducteurs ont donné lieu au développement d'autres types de machines à courant continu, où la commutation avec le système de balais collecteurs est remplacée par la partie rotative, et le stator est constitué de trois enroulements alimentés par des formes d'onde carrées fournies par un convertisseur. Le contrôle de la commutation du convertisseur garantit que, à chaque instant, seules deux phases sont actives. Ces système de commutation électronique est fonctionnellement équivalent à la commutation mécanique des balais des machines à courant continu. Ainsi, ce type de machine à aimants permanents est appelé machine à aimants permanents sans balais (MASPSB) (brushless) ou machine à aimants permanents avec forme d'onde carrée (squarewave PMDC). La machine synchrone à aimants permanentssans balais est privilégiée dans de nombreuses applications car elle nécessite peu d'entretien, présente un rendement élevé et sa commande est relativement simple.[5]

I.5.Constitution de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique constitué d'un stator et d'un rotor. Le stator, partie fixe, contient les enroulements connectés à la source d'alimentation. Quant au rotor, partie mobile, il est monté sur l'axe de rotation. [5]

I.5.1. Structure du stator (induit)

La structure du stator de la machine synchrone à aimants permanents est semblable à celle des machines classiques telles que les machines synchrones et asynchrones. Elle se compose d'un enroulement bobiné disposé dans les encoches du circuit magnétique statorique, qui est formé par un empilement de tôles en acier au silicium. Cet enroulement triphasé est réparti en trois axes (a, b et c) déphasés de 120° électriques les uns par rapport aux autres.
Le stator agit en tant qu'induit de la machine car il est soumis au champ inducteur produit par le rotor. Le courant induit peut être soit fourni (dans le cas d'un fonctionnement en mode générateur), soit absorbé (dans le cas d'un fonctionnement en mode moteur).

Fig.I.2. Stator (induit)

I.5.2. Rotor (inducteur)

Le rotor est constitué d'un noyau en fer sur lequel sont positionnés des aimants permanents, responsables de créer une excitation constante. Les aimants permanents sont des matériaux magnétiques dits "durs", ce qui signifie qu'une fois qu'ils sont magnétisés, ils conservent leur aimantation à la température d'utilisation. Leurs propriétés magnétiques dépendent principalement des caractéristiques intrinsèques des composés qui les composent, ainsi que de la microstructure du matériau, laquelle est étroitement liée au processus de fabrication.

I.5.2.1. Le rotor à pôles saillants

Il est caractérisé par la présence de plusieurs paires de pôles (p >> 1), avec des saillances principalement situées sur le rotor lui-même. Ce type de rotor est adapté aux alternateurs lents, tels que ceux des centrales hydrauliques ou des centrales de pompage, en raison de sa capacité à supporter un grand nombre de pôles. Sa forme est souvent aplatie pour faciliter la construction.

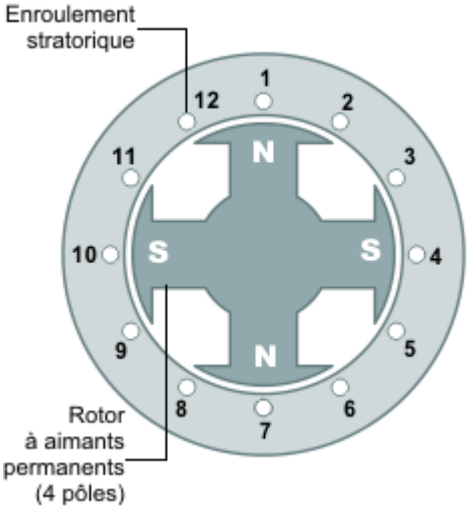


Fig.I.3. Le rotor à pôles saillants

I.5.2.2. Le rotor à pôles lisses

Il est conçu de manière à obtenir une répartition des encoches qui génère un champ magnétique sinusoïdal. Il est couramment utilisé dans les alternateurs des centrales thermiques, qu'elles soient alimentées au nucléaire, au gaz, au mazout ou au charbon.

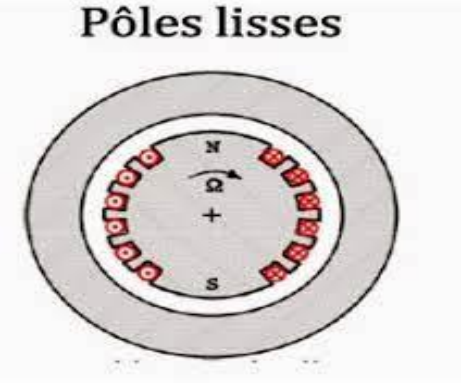


Fig.I.4. Le rotor à pôles lisses

I.6.Avantages des machines à aimants permanents

La machine à aimants permanents présente plusieurs avantages significatifs, comme énoncés ci-dessous:

-Son couple volumique et sa puissance massique élevés permettent l'utilisation de machines au design plus compact, ce qui est particulièrement recherché pour les applications embarquées.

-Son rendement accru est attribuable à l'usage d'aimants permanents en remplacement des enroulements rotoriques. Ainsi, le rotor ne nécessite pas d'alimentation électrique, réduisant ainsi les pertes (absence de pertes joules).

- La fiabilité de la machine est renforcée par l'absence de bagues et de balais.

- Sa conception et son entretien sont simplifiés du fait également de l'absence de bagues et de balais.

- Elle offre une performance dynamique élevée grâce à une densité de flux importante dans l'entrefer.

-Son contrôle en fonctionnement générateur est simplifié, notamment par l'absence de régulation de vitesse et de tension.

I.7.Inconvénients des machines à aimants permanents

Les inconvénients liés à l'utilisation de la machine synchrone à aimants permanents sont les suivants:

- Les aimants sont coûteux, ce qui entraîne un coût élevé.

- Les problèmes de tenue en température des aimants permanents, notamment la limitation à 250°C pour le samarium-cobalt.

- Le risque de démagnétisation irréversible des aimants suite à la réaction d'induit.

- La difficulté de défluxage et la complexité de son électronique de commande, qui nécessite un capteur de position.

- L'impossibilité de régler l'excitation.

- La nécessité d'augmenter le courant statorique pour atteindre des vitesses élevées, ce qui peut entraîner la démagnétisation de la machine

I.8.Les organes mécaniques

Les organes mécaniques d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) comprennent plusieurs composants importants :

L'arbre : Il assure la transmission de mouvement. Il se compose d'une partie centrale qui supporte le corps du rotor et est connecté à la charge via un accouplement. L'arbre est soutenu par deux paliers.

Les paliers : Ces éléments supportent et permettent la rotation de l'arbre rotorique. Ils se composent de flasques et de roulements à billes montés à chaud sur l'arbre. Les flasques, en fonte, sont fixés sur le carter statorique à l'aide de boulons ou de tiges de serrage.

La carcasse : Habituellement constituée d'aluminium injecté pour les petites MSAP et de fonte grise pour les plus grandes, la carcasse enveloppe le circuit magnétique et assure sa protection contre l'environnement extérieur. La boîte à bornier est généralement montée sur le dessus ou sur le côté de la carcasse.

Le ventilateur : Installé à l'extrémité de l'arbre du rotor, le ventilateur assure le refroidissement de la MSAP. Dans certains cas, il peut être remplacé par une ventilation forcée pour le refroidissement à des vitesses plus lentes.

Les roulements : Ils permettent la liaison mobile entre deux éléments en rotation l'un par rapport à l'autre. Leur fonction est de garantir la rotation relative de ces éléments avec précision et un frottement minimal. [6]

I.9.Origine des défauts dans la machine à aimants permanents

Il est possible d'observer de nombreuses défaillances dans la machine synchrone. Il peut s'agir de machines mécaniques ou électriques. Également magnétiques. Leurs motifs sont extrêmement divers.

- Les contraintes mécaniques incluent les vibrations de la machine.
- Il y a une forte contrainte électrique avec l'utilisation de convertisseurs statiques.
- Conditions environnementales telles que la température, l'humidité et la poussière...
- Anormalité de fonctionnement : surcharge, survitesse...
- Le dysfonctionnement d'un élément externe : le refroidissement, le convertisseur...

- La machine présente des problèmes de dimensionnement, d'installation ou de maintenance. Ces limites peuvent provoquer plusieurs dysfonctionnements au sein d'une machine électrique.

I.10.Etude statistique sur les défauts dans les machines électriques

Selon des recherches statistiques, il a été démontré que les pannes causées par les défauts des bobinages statoriques sont parmi les défauts les plus fréquents après les défauts de roulement, comme illustré dans la figure (I.1). Peu importe la puissance des machines considérées, selon les différentes sources mentionnées, les pannes causées par les défaillances du bobinage statorique représentent 37 % des pannes totales. [7] D'après les résultats de la figure (I.1), il semble que les problèmes de roulement et les problèmes au niveau du stator soient plus courants.
La figure (I.1) illustre une étude menée pour établir une statistique des divers défauts qui peuvent survenir dans une machine électrique.

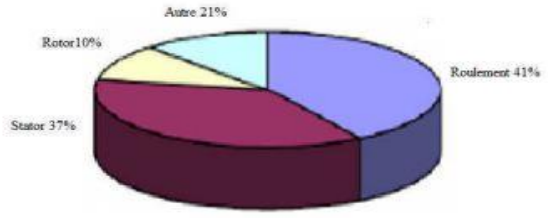
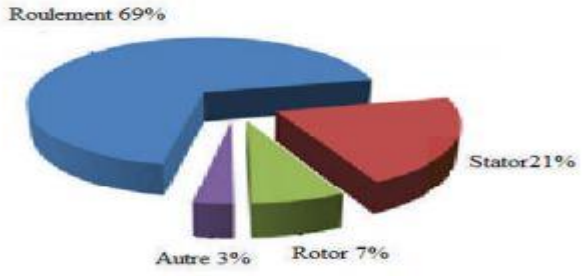


Fig.I.5.Répartition des défauts dans une machine électrique suivant leur localisation.

La figure ci-dessous illustre une autre étude statistique réalisée sur des machines électriques [BONETTE 2008] qui révèle que les défauts au rotor et au stator semblent moins fréquents.



FigI.6.Répartition des défauts dans la machine électrique du domaine industriel.

Dans le système synchrone, les défauts peuvent être causés à la fois par la partie fixe (stator) et la partie mobile (rotor), ce qui explique la classification suivante :

I.11.Défaillance au rotor

Les pannes du rotor sont principalement causées par des problèmes :

-Thermiques (excès de charge) ;

-Résiduel (déformation) ;

-Écologique. (Agression) ;

-La dynamique de l'arbre de transmission

On peut identifier les défauts les plus fréquents, situés au niveau du rotor.

Comme suit :

-Excentricité statique et dynamique et mixte.

-Désaimantation des aimants.

-Défauts de roulements.

I.11.1. Excentricité statique et dynamique

Le décentrement du rotor peut parfois entraîner des oscillations de couple (décalage entre le centre de rotation de l'arbre et le centre du rotor) dans la machine électrique. On désigne ce phénomène sous le nom d'excentricité (statique et dynamique), qui peut être causée par un arrangement incorrect des paliers lors de l'assemblage, un problème de roulement, un problème de charge ou un problème de fabrication (usinage).

Il y a généralement trois types d'excentricités :

a) l'excentricité statique, le rotor est déplacé du centre de l'alésage stator mais tourne toujours autour de son axe.

00b) Dans le cas de l'excentricité dynamique, le rotor se trouve au centre de l'alésage et ne contourne plus son axe.

c) l'excentricité que l'on pourrait appeler « mixte », en combinant les deux cas mentionnés précédemment. Ce problème altère les propriétés magnétiques et mécaniques de la machine. Effectivement, l'excentricité croissante dans l'entrefer entraîne une augmentation.

L'armature statorique est directement touchée par des forces électromagnétiques.
Ainsi, l'enroulement correspondant entraîne une détérioration de son isolement. Plusieurs autres
De plus, cette augmentation peut entraîner des frottements entre le stator et le moteur.
Le rotor est déstabilisé par les forces d'attraction magnétique qui perturbent l'équilibre du système. Cela fournit apparition d'importants niveaux de vibration dans les enroulements.[8]
La figure(I.3) représente les différents types d'excentricités

Fig.I.7. Schématisation de l'excentricité statique et dynamique.

I.11.2.Défauts de roulements

En général, les roulements des machines électriques sont constitués d'une bague interne et d'un roulement. Une bague externe est composée d'un organe de roulement, généralement composé de billes maintenues dans une bague cage à rouleaux ou cage. La part des défauts de roulement varie de 42% à 50% de l'ensemble des défauts des problèmes de moteurs. Ils peuvent être d'origines variées :

-Assemblage incorrect (installation incorrecte du roulement en forçant incorrectement le roulement)

-Le roulement se produit sur l'arbre du rotor ou dans les flasques issues liées à l'environnement.

-Le roulement est traversé par un courant qui provoque des arcs électriques.

-Contrainte mécanique causée par une charge excessive.

-Des imperfections dans l'usinage ;

Le plus souvent, ces imperfections se traduisent par une usure ou une fissure des bagues ou par une détérioration de l'organe de roulement (bille ou rouleaux), ce qui entraîne des vibrations mécaniques. [8], [9], [10]

I.11.3.La désaimantation des aimants permanents

Les aimants permanents génèrent un champ magnétique extrêmement stable. Malgré les bénéfices et les désavantages liés à leur composition, tout aimant a souvent tendance à diminuer sa puissance au fil du temps (vieillissement).Ilpeut survenir en raison d'un échauffement excessif ou d'un champ magnétique induit intense, mettant en danger la stabilité magnétique de la machine. Les défaillances du convertisseur, notamment des onduleurs à trois bras, sont courantes dans les systèmes de variation de vitesse. Les courts-circuits sur un interrupteur ou les circuits ouverts peuvent compromettre le fonctionnement de l'onduleur, affectant la production de couple et la stabilité du système. Les doubles fautes, telles que les courts-circuits simultanés sur deux bras ou sur deux interrupteurs, peuvent entraîner l'arrêt complet de la machine et nécessiter des mesures d'isolation pour éviter des dommages plus graves.

I.12. Défauts statoriques

Les bobinages sont la principale cause des défauts dans une machine électrique. L'intégrité des fils et de leur isolant est affectée par les effets d'usure tels que les frottements ou le vieillissement des matériaux. Lorsqu'il y a une détérioration excessive de cet isolant, ces bobinages peuvent être en court-circuit ou, lorsque le fil lui-même est endommagé, en circuit ouvert.Différents types de défauts peuvent avoir des conséquences variées [9].Les diverses erreurs sont illustrées dans la Figure.

I.12.1.Défauts d'isolant dans un enroulement

Les isolants dégradés dans les enroulements peuvent entraîner des courts circuits.Effectivement, les diverses pertes (joule, fer, mécanique,...) provoquent une hausse de la température des divers composants du moteur. La température et la tension des matériaux d'isolation sont limitées, ce qui peut entraîner un court-circuit dans l'enroulement concerné.

Les diverses origines de ce genre de défaut incluent :

-L'isolant se dégrade lors de sa fabrication.

-Les isolants vieillissent naturellement.

-Vibrations mécaniques.

-Travailler dans un environnement exigeant. [11]

I.12.2.Les courts-circuitsstatoriques

En général, les courts-circuitsstatoriques se manifestent par un court-circuit situé entre plusieurs spires d'un même enroulement (court-circuit inter-spires), après que le matériau isolant qui recouvre les conducteurs ait dégradé (Fig.I.9.a). Il est possible que ce genre de phénomène se transforme en courts-circuits généralisés, tels que des courts-circuits entre les phases (Fig.I.9.b) ou entre la phase et la terre (Fig.I.9.c). En général, il est facile de repérer ces défauts car les conséquences qu'ils ont sur les courants de phase sont significatives. De leur côté, les défauts de courts-circuits inter-spires sont plus difficilement observables à partir de l'observation directe des courants de ligne, ce qui accroît les problèmes de détection. [11]

I.12.2.1.Court-circuit entre spires

Le défaut d'un circuit entre des spires de la même phase est assez courant. Ce problème est causé par un ou plusieurs problèmes d'isolation dans l'enroulement en question. Cela provoque une hausse des courants statoriques dans la phase touchée.

Une légère différence d'intensité sur les autres phases. Cela entraîne une hausse de la température dans le bobinage et, par conséquent, une détérioration accélérée des isolants, ce qui peut entraîner un défaut en chaîne (apparition d'un autre court-circuit).On la voit dans la figure (II.9.a).

I.12.2.2.Court-circuit entre phases

Ce genre de pannes peut survenir à n'importe quel endroit du bobinage, mais les conséquences ne seront pas les mêmes en fonction de leur localisation. La présence de cette caractéristique rend complexe l'analyse de l'impact de ce défaut sur le système. Lorsqu'un court-circuit se forme près de l'alimentation entre phases, cela entraînerait des courants très élevés qui entraîneraient la fusion des conducteurs d'alimentation et la disjonction par les protections.

Par ailleurs, une transition courte proche du neutre entre deux phases a des conséquences moins graves ; elle entraîne un déséquilibre des courants de phase avec un risque réduit de fusion des conducteurs.

La figure (I.9.b) représente les différents types de court-circuit statorique

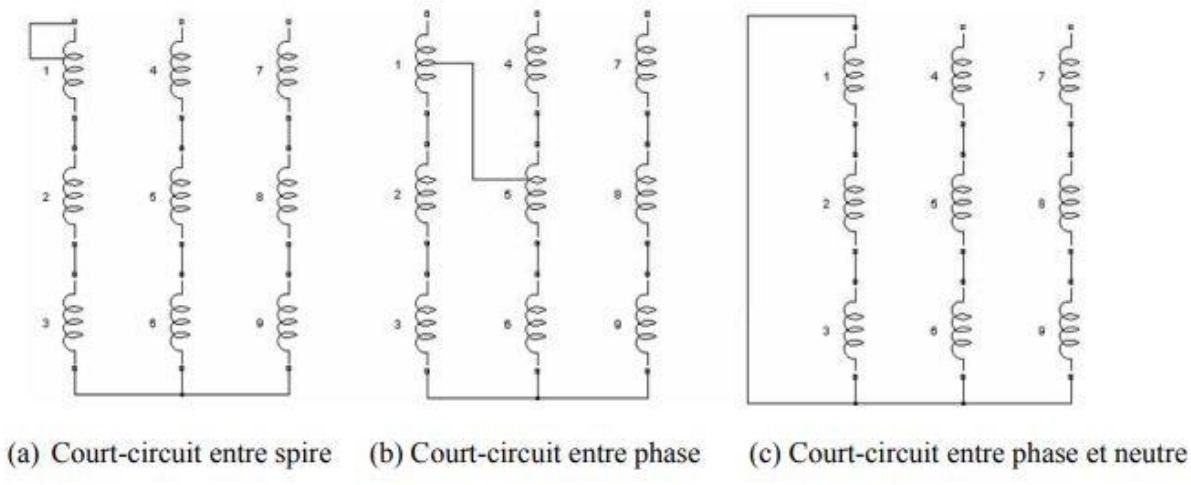


Fig. I.8. Représentation de courts-circuits entre spires, entre phases, phase et terre. [7]

I.12.3. Conséquences des défauts statoriques

Les problèmes liés au bobinage du stator sont principalement causés par une modification topologique du circuit statorique de la machine en question, ce qui entraîne l'apparition de boucles de court-circuit. Elles peuvent se manifester à divers endroits en fonction de la configuration du bobinage statorique. En règle générale, un court-circuit a pour effet d'altérer la répartition spatiale du champ tournant. D'un côté, cela entraîne des fluctuations du couple électromagnétique, ce qui entraîne des variations de vitesse. Les vibrations mécaniques qui en résultent peuvent être destructrices pour les organes mécaniques entourant la machine si elles sont puissantes. Par ailleurs, la tension dans la boucle engendrée par le court-circuit peut atteindre des niveaux élevés.La destruction par effet thermique du matériau isolant qui recouvre les conducteurs de cette boucle se produit rapidement. Les dangers de fuite de fumées ou même d'incendie sont donc considérables. (Voir I.9). [7]

La figure (I.9) représente les déférents défauts statoriques.

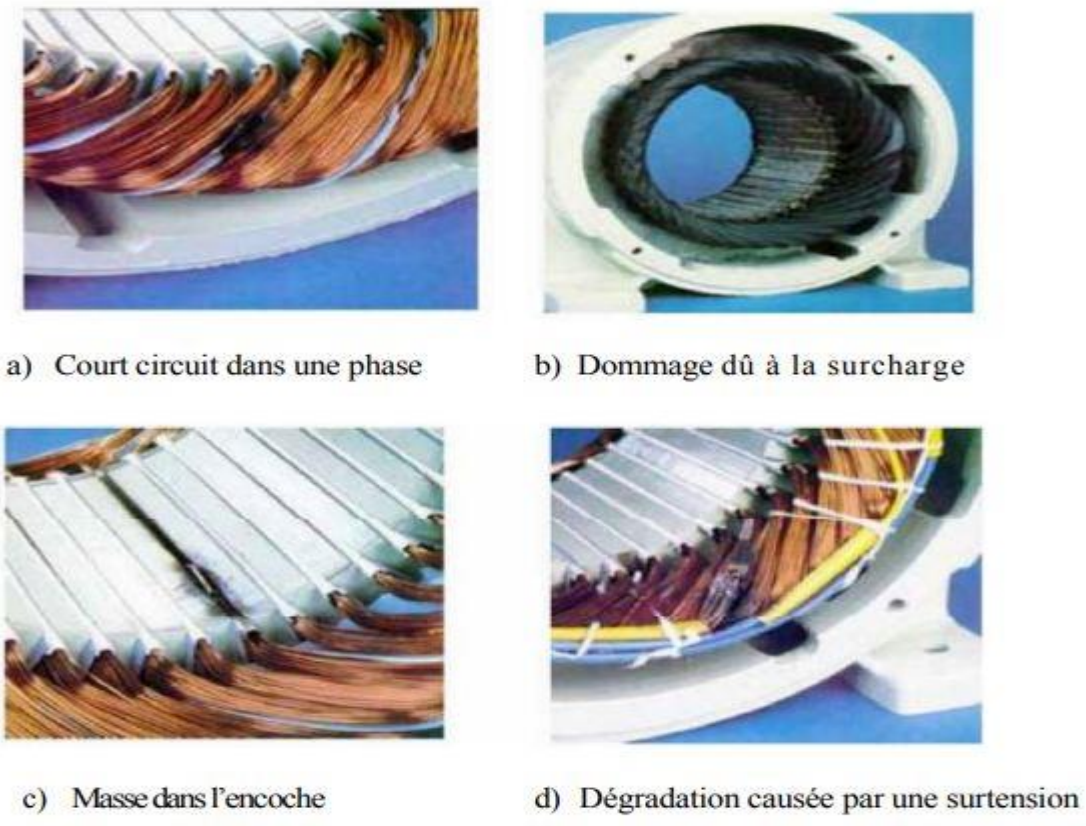


Fig.I.9. Différentes défauts statoriques[7].

Chapitre II: Méthode d'analyse spectrale ROOT-MUSIC

II.1.Introduction

L'analyse spectrale, au cœur de nombreux domaines scientifiques et techniques, offre un outil précieux pour la compréhension et la caractérisation de phénomènes complexes.
Fondamentalement, l'analyse spectrale consiste à décomposer un signal en ses composantes fréquentielles constitutives, révélant ainsi des informations cruciales sur sa structure et son comportement. Cette approche trouve des applications diverses, de la physique à l'ingénierie, en passant par la biologie et la finance. En exploitant les propriétés spectrales des signaux, les chercheurs peuvent extraire des données cachées, diagnostiquer des anomalies et améliorer les performances des systèmes.
Dans le contexte spécifique des moteurs synchrones, l'analyse spectrale se révèle être un outil indispensable pour détecter, caractériser et diagnostiquer les défauts éventuels. En effet, ces défauts, qu'ils soient liés à la démagnétisation ou à l'excentricité du moteur, se traduisent souvent par des variations discernables dans le spectre des signaux électriques ou mécaniques émis par le moteur. En identifiant les fréquences caractéristiques associées à ces défauts, les ingénieurs peuvent non seulement localiser leur origine, mais aussi évaluer leur gravité et proposer des stratégies de maintenance préventive ou corrective. Ainsi, l'analyse spectrale devient un pilier essentiel de la surveillance et de la gestion de la santé des moteurs synchrones, contribuant à garantir leur fiabilité et leur efficacité opérationnelle.
Ce chapitre ne vise pas à fournir une présentation complète des méthodes HR, mais plutôt à initier les lecteurs aux principes sur lesquels elles reposent. Pour cette raison, seules certaines méthodes sont abordées, notamment celles de prony,de pisarenko,ESPRIT et ROOT-MUSIC.

II.2.Les méthodes de Haute Résolution (HR)

Les méthodes de Haute Résolution (HR) ont évolué depuis les travaux de Proney en 1795, qui cherchaient à estimer des sommes d'exponentielles à l'aide de techniques de prédiction linéaire. Plus récemment, Pisarenko a approfondi cette approche pour estimer des sinusoïdes. En comparaison, les méthodes HR modernes exploitent les propriétés spécifiques de la matrice de covariance du signal. Elles utilisent la décomposition de cette matrice pour séparer l'espace des données en deux sous-espaces : l'espace signal, composé des sinusoïdes, et l'espace bruit, orthogonal à celui-ci. Les méthodes HR basées sur cette décomposition sont réputées pour leur robustesse par rapport aux techniques de prédiction linéaire. Parmi ces méthodes, on trouve MUSIC et ROOT-MUSIC (qui se concentrent sur l'espace bruit), ainsi que l'algorithme ESPRIT (qui se focalise sur l'espace signal). [12] [13] [14] [15]

Nous commençons par présenter ici les méthodes à haute résolution les plus anciennes, qui utilisent des techniques de prédiction linéaire, avant d'explorer les méthodes plus récentes de type sous-espace.

II.2.1.Méthode de Prony

Les travaux du baron de Prony ont été à l'origine du développement des méthodes à haute résolution. Il a proposé une méthode d'estimation inspirée de résultats antérieurs sur les équations de récurrence linéaires. Initialement conçue pour estimer des exponentielles réelles non bruitées, cette méthode est ici appliquée à l'estimation d'exponentielles complexes bruitées. La méthode de Prony implique premièrement la détermination d'un polynôme P[z] à l'aide de techniques de prédiction linéaire, puis l'extraction des racines de ce polynôme. [11].

II.2.2. La méthode de Pisarenko

Une variante de la méthode de Prony, implique la minimisation de la puissance de l'erreur. La méthode de Pisarenko implique le calcul et la diagonalisation de la matrice d'auto-correlation, puis la détermination du vecteur propre p associé à la plus petite valeur propre, suivi de

l'extraction des racines du polynôme P[z]. Les méthodes de Prony et de Pisarenko sont parmi les plus anciennes méthodes HR, mais elles sont généralement considérées comme peu robustes en pratique. C'est pourquoi les méthodes de type sous-espace, plus récemment proposées, sont généralement préférées.

II.2.3. Classification des méthodes à haute résolution

Méthodes basées sur la notion de sous-espace:

II.2.3.1. Méthodes à recherche spectrale:

Elles utilisent l'analyse du spectre via la projection orthogonale des vecteurs d'observation sur le sous-espace bruit.

Exemples : MUSIC, prédiction linéaire.

Limitées par la précision des extrémums recherchés et sensibles au bruit et au couplage mutuel.

II.2.3.1. Méthodes sans recherche spectrale:

Elles exploitent l'invariance rotationnelle du sous-espace signal et l'invariance translationnelle de la structure du réseau de capteurs des signaux.

II.2.4. L'algorithme MUSIC(MUltiple Signal Classification)

L'algorithme « MUSIC » : Dans le domaine du traitement d'antennes, la méthode MUSIC a d'abord été proposée de manière autonome par Schmidt bienvenu et Kopp dans les années 1980, est une technique largement utilisée dans le domaine du traitement du signal pour estimer les paramètres des signaux sinusoïdaux à partir des données bruitées

La décomposition en vecteurs propres de la matrice d'autocorrélation est utilisée par l'algorithme MUSIC en relation avec le vecteur des observations. L'espace des observations est divisé en deux espaces vectoriels orthogonaux grâce à cette décomposition : le sousespace de signal et soncomplément orthogonal, ou le sous-espace bruit.

II.2.5. La méthode ROOT-MUSIC

La technique ROOT-MUSIC offre une puissance considérable pour détecter la fréquence du

signal immergé dans un bruit, mais son principal désavantage réside dans le temps de calcul élevé de la fréquence lorsque l'ordre des dimensions du signal est élevé ou lorsque de nombreux échantillons sont nécessaires. C'est pourquoi cette méthode ne peut être employée que dans le diagnostic en ligne. On sait que lorsque le signal à traiter peut être représenté par une somme d'exponentielles complexes pondérées, les méthodes les plus efficaces pour extraire l'information utile sont les méthodes appelées méthodes de l'extraction de l'information utile. La méthode MHR, qui fait partie de la famille ROOT-MUSIC, vise à diviser l'espace initial en deux sous-espaces vectoriels orthogonaux : le sous-espace signal et son complément orthogonal, l'espace sous-bruit

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la méthode de ROOT-MUSIC, examinons de plus près les étapes cruciales qui la composent, permettant ainsi une analyse robuste des fréquences dans un signal

II.2.6. Les étapes :

II.2.6.1. Lecture des données:

Tout d'abord, nous devons collecter les données nécessaires pour notre analyse. Il s'agit probablement de données provenant de capteurs installés sur le moteur synchrone pour mesurer les signaux électriques ou mécaniques émis.

II.2.6.2. Calcul de la fonction d'autocorrélation:

Cette étape implique le calcul de la fonction d'autocorrélation des données que nous avons collectées. La fonction d'autocorrélation mesure la similarité entre un signal et une versiondécalée de lui-même en fonction du décalage.

II.2.6.3. Calcul des vecteurs propres :

Ensuite, nous utilisons la méthode ROOT-MUSIC pour calculer les vecteurs propres de la matrice d'autocorrélation. Ces vecteurs propres sont des vecteurs dans l'espace des données qui capturent les directions des signaux présents dans les données.

II.2.6.4. Détermination des fréquences :

Une fois que nous avons calculé les vecteurs propres, nous pouvons utiliser la méthode ROOT-MUSIC pour estimer les fréquences des signaux présents dans les données. Ces fréquences correspondent aux fréquences des défauts du moteur synchrone que nous essayons de détecter.

II.2.6.5. Détermination des énergies :

Enfin, nous pouvons déterminer les énergies associées aux fréquences estimées. Ces énergies nous donnent une idée de l'importance relative de chaque fréquence dans les données. Les fréquences avec des énergies plus élevées sont généralement associées à des signaux plus forts ou à des défauts plus graves dans le moteur synchrone

Maintenant que nous avons une compréhension claire des étapes nécessaires, voyons

Comment ces idées se traduisent dans la réalité à travers des calculs détaillés.

Selon notre hypothèse, le courant du stator $I_S(n)$est le suivant :

$$\sum_{i=\,I_i}^{L} e^{j(2\pi.\frac{f_i}{f_{sh}}.n+\varphi i)} + w(n)$$

• **n**=0, 1,2..... (N-1).

• **W(n) :** Le bruit.

• **fsh :** La fréquence d'échantillonnage

. • **N:** Nombre d'échantillonnage.

• **L:** Nombre de sinusoïdes ou des sources.

La matrice d'autocorrélation du signal de bruit est la somme des matrices d'auto- corrélation du signal **i**, et le bruit **W** définit comme suit :

$$R_i = R_s + R_w = E[i_s(n).i_S^H(n)] + E[w(n).w^H(n)] = S.A.S^H + \sigma_W^2.I$$

•$\boldsymbol{i_s}$**(n)=** $\boldsymbol{[i_1 \,,\ldots i_L\,]}$ Vecteur d'observation.

°(•) Est l'opérateur de transposition -conjugaison c'est-à-dire le vecteur complexe transposé et conjugué (hermitien transposent en anglais).

•**E [•]** L'espace mathématique. •1 : Etant la matrice identité de la taille **(N ×N).**

•**S= [$s_1 ... s_i ; ..... s_L ; S_i$] :** Vecteurd'observation.

$$S_i = \left[1 \quad e^{j.2\pi.\frac{fi}{fsh}} e^{j.4\pi.\frac{fi}{fsh}} \dots \dots e^{j.2\pi}(N-1).\frac{fi}{fsh}\right]$$

•**A :**Est la matrice de puissance des harmoniques

A = diag [$I_1^2 I_2^2 \dots \dots I_L^2$]

•σ_W^2**:** La variation du bruit blanc

•I_i:ta matrice d'identité.

La décomposition en valeurs propres de la matrice d'autocorrélation$R_i$est donnée par **:**

$$R_i = \sum_{K=1}^{N} \lambda_K . \mu_K . \mu_K^H = U_S . D_S . \underbrace{U_S^H + U_W . D_W}_{R_S} . \underbrace{U_W^H}_{R_W} \quad (III.5)$$

Ou :

λ_K, μ_K **:** Vecteurs et valeurs propres deR_i

$$\begin{cases} U_S = [U1 \dots u_1]; D_S = diag[\lambda_1 \lambda_1] \\ U_W = [u_{1+1} \dots u_N]; D_W = \sigma_W^2 . I_{N-1} \end{cases}$$

Les matrices $\mathbf{U_S}$et $\mathbf{U_W}$sont composées par les valeurs propres de vecteurs propres disposées dans l'ordre décroissant. L'équation (III.5) montre cela, nous pouvons diviser ces vecteurs propres en deux groupes ou sous-espaces :

Lvecteurs propres correspondant à **L** les plus grandes valeurs propres (sous-espaces de signal E_S), et N-1 vecteurs propres de bruit qui idéalement ont des valeurs propres égales àσ_W^2(sous-espace de bruit $\mathbf{E_b}$).

Les matrices diagonales $\mathbf{D_S}$et $\mathbf{D_W}$contiennent les valeurs propres $\boldsymbol{\lambda_K}$correspondant aux vecteurs propres; car les valeurs propres du bruit sont égales à la variation du bruit, la matrice $\mathbf{D_W}$peut être écrite comme montré dans l'équation (6, en comparant les équations (2), (3) et (6) nous pouvant écrire :

$R_i.U_W = U_W.D_W = \boldsymbol{\sigma_W^2}.\boldsymbol{D_W}$ = S. A. $S^H.U_W + \boldsymbol{\sigma_W^2}.U_W$

Ce qui implique que :

$$S^H.U_W = 0 \quad avec S_i \in E_S; i = 1, \dots, L$$

$\forall\ U \in E_b$

La méthode de **ROOT-MUSIC** emploie le principe de cette orthogonalité entre le sous- espace de signal et le sous-espace de bruit. Les fréquences d'estimation requis

Sont les racines d'équations et la quelle peut etres exprimée comme suit :$\boldsymbol{Z_i = e^{j.2\pi.\frac{fi}{fsh}}}$

$$\boldsymbol{L-1}$$

$$U(z) = \sum \boldsymbol{I_K}.\boldsymbol{Z_i^{-k}}$$

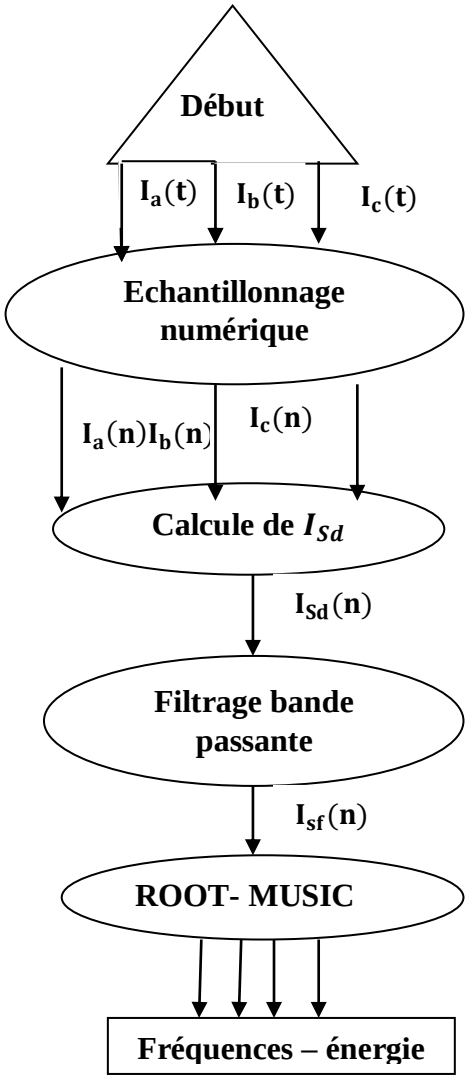
k=0

$$S_i^H.U_i^H.U_W.S_i = 0 \quad \text{avec } i = 1,2,L$$

Les matrices de (III.4) vont en paires (c-à d si $Z_i$est une racine, $1/_{Zi}$est aussi). Ces L racines les plus proches du cercle unité correspondent aux harmoniques possibles selon :

$$f_i = \frac{fsh}{2\pi}.\arg(Z_i)\ avec i = 1,2,\dots,L$$

II.3.L'organigramme de l'algorithme ROOT-MUSIC :



Chapitre III: Résultats d'étude & Discussion

III.1. Introduction

L'acquisition des courants statoriques des trois phases (Ia(t), Ib(t), Ic(t)) est la première étape cruciale de notre processus. Ces courants sont mesurés en temps réel et convertis en signaux numériques à travers un échantillonnage adéquat. L'échantillonnage numérique permet de transformer les signaux analogiques en une séquence de valeurs discrètes (Ia(n), Ib(n), et Ic(n)). Cette conversion est essentielle pour pouvoir appliquer des techniques de traitement numérique du signal sur les données obtenues. L'acquisition précise et fiable de ces courants permet d'assurer une analyse spectrale robuste et exacte des phénomènes dynamiques du moteur synchrone.

Avant d'appliquer la méthode ROOT-MUSIC, il est essentiel de synchroniser les courants de démagnétisation et d'excentricité par rapport aux courants d'un moteur sain. Cette étape permet de s'assurer que les signaux comparés sont alignés temporellement et que les différences observées sont attribuables aux défauts spécifiques plutôt qu'à des variations temporelles aléatoires. Une synchronisation précise permet d'améliorer la précision de l'analyse et de faciliter l'identification des défauts spécifiques.

À partir de ces séquences discrètes, la matrice d'autocorrélation $I_{sd}(n)$ est calculée. Cette matrice joue un rôle crucial dans la méthode ROOT-MUSIC elle permet de capturer les corrélations entre différentes observations de nos signaux, fournissant ainsi une base pour l'estimation des fréquences. La méthode ROOT-MUSIC utilise cette matrice pour calculer les fréquences et les énergies associées aux composantes du signal. Elle se distingue par sa capacité à fournir des estimations de fréquences avec une haute résolution même en présence de bruit.

Avant de procéder à l'estimation des fréquences, un filtrage bande passante est appliqué pour supprimer les composantes indésirables en dehors de la bande de fréquences d'intérêt. Ce filtrage produit le signal Isf(n), qui sera ensuite traité par l'algorithme ROOT-MUSIC.

Une des étapes clés de notre analyse est la détection des couples de fréquences spécifiques, en particulier 75 Hz et 125 Hz, qui sont indicatifs de défauts spécifiques dans le moteur synchrone. La méthode ROOT-MUSIC nous permet de détecter ces fréquences avec une grande précision et d'estimer leur énergie respective. La présence de ces fréquences dans le spectre du courant statorique peut indiquer des défauts de démagnétisation ou d'excentricité. Le calcul précis de

l'énergie associée à ces fréquences nous aide à quantifier l'importance de ces défauts et à suivre leur évolution dans le temps.

Enfin, une analyse comparative des énergies associées aux défauts de démagnétisation et d'excentricité est effectuée. La démagnétisation et l'excentricité sont deux types de défauts qui affectent le fonctionnement des moteurs synchrones de manière différente. En comparant les énergies des fréquences détectées (notamment à 75 Hz et 125 Hz), nous pouvons établir un diagnostic différentiel permettant de distinguer ces défauts. Cette comparaison est cruciale pour le développement de stratégies de maintenance préventive et pour l'amélioration de la fiabilité des moteurs synchrones

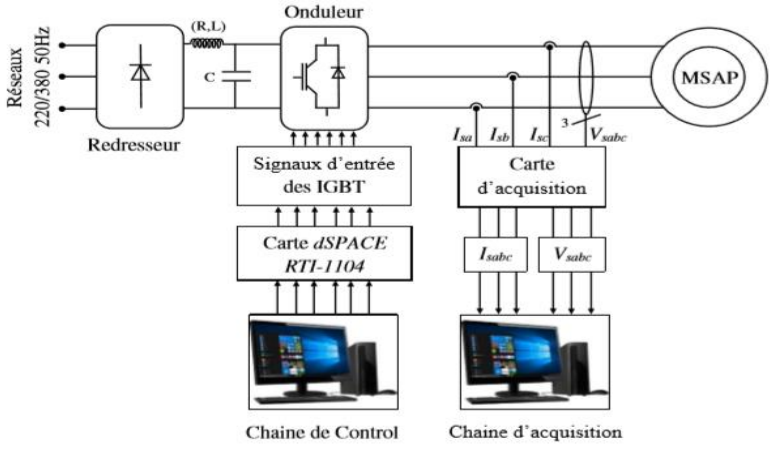
III. 2. Description du Banc de Mesures

L'objectif principal de ce chapitre est de valider les résultats obtenus par simulation. Malheureusement, nous ne disposons pas de banc d'essais pour le défaut de court-circuit entre spires statoriques, c'est la raison pour laquelle on va se limite aux défauts suivants :

- Le défaut d'excentricité.
- Le défaut de désaimantation.

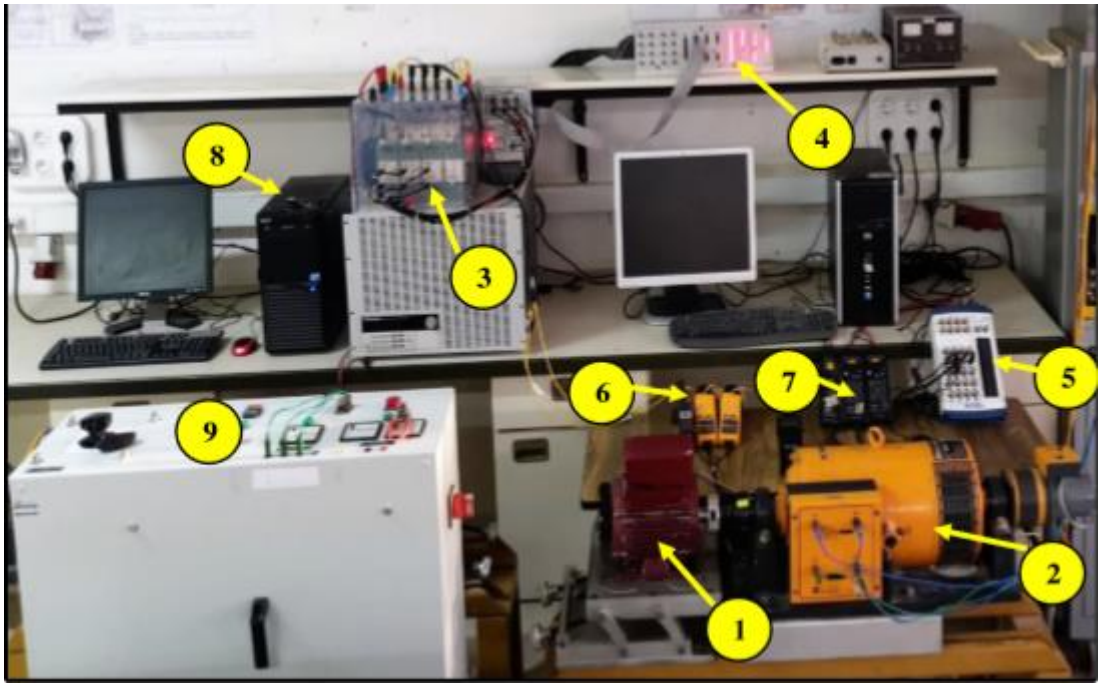
Pour ce faire, nous avons utilisé un banc d'essais, réalisé par le groupe diagnostic au sein du Laboratoire de Développement des Entrainements Electriques (LDEE) de l'université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf (USTO-MB).

Le schéma synoptique du banc d'essais réalisé est illustré par la Figure.



III. 1. Schéma synoptique du banc de mesure réalisé. [6]

L'ensemble des équipements utilisés pour la réalisation des différents essais de notre travail sont illustré par la photo de la Figure.III. 2



III. 2. Photo du banc de mesures réalisé. [17]

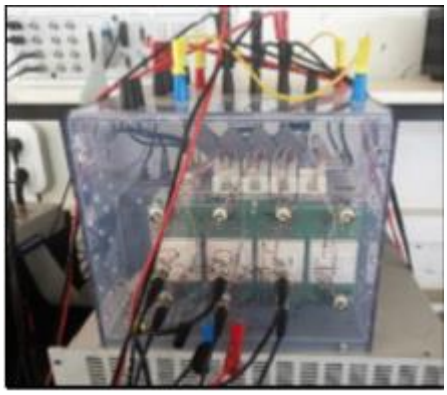
1- **Moteur Synchrone à aimants permanents :** Le moteur utilisé dans nos essais expérimentaux est de type LEROY SOMER LSRPM90SL et de 360 V, 100 Hz, 5.9 A, 8 pôles, 1500 tr/min et 3 kW. La photo de ce moteur est illustrée par la Figure III. 3

III. 3. Photo du MSAP utilisé.[6]

2- **Génératrice à courant continu** : Le moteur utilisé est couplé mécaniquement à une génératrice à courant continu. Cette génératrice alimente un ensemble de résistances jouant le rôle d'une charge mécanique. La photo de cette génératrice est illustrée par la

Figure. III.4.Photo de la génératrice utilisée.[6]

3- **Onduleur triphasée :** le moteur utilisé est alimenté par un onduleur triphasé du type SEMIKRON AN-8005 à base des IGBT, contrôlé par une carte DSPACE RTI-1104. Les IGBT de cet onduleur sont commandés par la stratégie MLI-SVM avec une fréquence de commutation de 6 kHz. La photo de cet onduleur est illustrée par la Figure. IV.5.



III. 5. Photo de l'onduleur utilisée. [6]

4- **Carte dSPACE :** la dSPACE 1104, est une carte numérique très flexible et puissante comportant des caractéristiques informatiques élevées et des périphériques d'entrées-

sorties. Elle joue le rôle d'interface entre l'ordinateur et les IGBT de l'onduleur. La programmation de cette carte est effectuée à l'aide de l'outil « Simulink » sous l'environnement MATLAB. La photo de la dSPACE utilisée est donnée par la figure suivante.

III. 6. Photo de la dSPACE RTI - 1104 utilisée. [6]

5- **Carte d'acquisition :** la carte d'acquisition utilisée est de type NATIONAL INSTRUMENT USB-622. Elle présente 8 entrées analogiques. Cette carte est l'élément principal de la chaine d'acquisition car elle permet de numériser les signaux analogiques.

III. 7. Photo de la carte d'acquisition utilisée. [6]

6- **Capteur de courant :** Les capteurs de courant utilisés sont des capteurs à effet hall du type FLUCK i30s (AC/DC CURRENT CLAMP). Ces capteurs ont pour rôle de mesurer et de donner une image des courants statoriques. Le courant maximal pouvant être mesuré est de ± 20 A. La photo de ce capteur est donnée par la figure suivante.

III. 8. Photo du capteur de courant utilisé. [6]

7- **Capteur de tension :** Les capteurs de tension utilisés sont des capteurs du type TEKTRONIX P5200. Ces capteurs ont pour rôle de mesurer et de donner une image sur les tensions entre phases du MSAP. La tension maximale pouvant être mesuré est de ± 1000 V. La photo de ce capteur est donnée par la figure suivante.

III. 9. Photo du capteur de tension utilisé. [6]

8- **Micro-ordinateur :** Le micro-ordinateur utilisé pour la chaine d'acquisition présente les caractéristiques suivantes : Une RAM de 2 GB et un processeur de type AMD de 3 GHz. Cet ordinateur a pour rôle de commander la carte d'acquisition. De plus, il permet aussi de visualiser, analyser, traiter et stocker les différents signaux captés. [6]

III.3. L'application de la méthode ROOT-MUSIC

Dans l'application de la méthode ROOT-MUSIC pour la détection des défauts de démagnétisation et d'excentricité dans le moteur synchrone à aimants permanents (MSAP), plusieurs paramètres spécifiques sont utilisés.

Tout d'abord, la méthode ROOT-MUSIC nécessite un certain nombre d'échantillons de données pour effectuer une analyse précise. Ce nombre est déterminé par la durée de chaque essai et la fréquence d'échantillonnage. Ainsi, le nombre d'échantillons utilisés est

calculé en multipliant la fréquence d'échantillonnage (fsh) par la durée de chaque essai en secondes. Par exemple, avec une fréquence d'échantillonnage de 3 kHz et une durée d'essai de 40 secondes, le nombre d'échantillons serait de 120 000. Nombre d'échantillons = Fréquence d'échantillonnage/sec ×Durée

Ensuite, la fréquence d'échantillonnage (fsh) est un paramètre essentiel pour garantir une représentation précise du signal. Elle est généralement fixée à 3 kHz dans cet exemple, ce qui permet une résolution fréquentielle de 0.025 Hz. Le nombre de sinusoïdes ou de sources (L) est également un paramètre important pour l'analyse ROOT-MUSIC. Dans ce cas, L est défini comme étant égal à deux fois le paramètre P choisi par l'utilisateur. P est un paramètre déterminé par l'utilisateur en fonction des exigences spécifiques de l'application ou des caractéristiques du système étudié.

Les données utilisées dans les essais comprennent les courants statoriques triphasés (ia, ib, ic) du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces courants sont enregistrés dans des fichiers de données distincts, tels que

"DMF_1_pole_20S_3kHz_Essai_01.mat",
"Dynamic_Eccentricity_10_percent_4_0_10S_3kHz_Essai_01.mat",

"Ancien_MSAP_Sain_10_sec_01.mat". Ces fichiers suggèrent que les signaux ont été acquis avec une fréquence d'échantillonnage de 3 kHz et pour des durées variant de 10 à 20 secondes.

Les trois différents phénomènes étudiés dans ces essais incluent le défaut de démagnétisation (DMF), le défaut d'excentricité (EF), ainsi que l'état sain du moteur (MS). Les essais sont réalisés pour différents pourcentages de défauts d'excentricité (par exemple, 10%, 20%, 30%) et de démagnétisation (par exemple, 2 pôles affectés), avec des durées d'acquisition de 10 secondes et 20 secondes. Ces variations permettent d'évaluer la performance de la méthode ROOT-MUSIC dans la détection et la caractérisation des défauts dans des conditions diverses et réalistes.

III.4. Détails et étapes des programmes MATLAB

1. Programme analyse.m: Ce programme charge les données de chaque état (sain, démagnétisé, excentré), synchronise les séries temporelles et applique la méthode ROOT-MUSIC pour analyser les fréquences et puissances des signaux.

2. Programme displayPowerAtFrequencies.m: Affiche les puissances à des fréquences spécifiques pour un état donné du moteur.

Fonction principale :

• Affichage des puissances: Affiche les puissances correspondantes à fréquences ciblées spécifiées.

3. Programme RM_data.m : Calcule les fréquences et puissances des composantes du signal en utilisant la méthode ROOT-MUSIC.

Fonctions principales:

• Calcul de la matrice d'autocorrélation: Utilise corrmtx pour calculer cette matrice à partir des données fournies.

• Estimation des fréquences et puissances: Utilise ROOT-MUSIC pour estimer les fréquences et puissances correspondantes.

Fonctions principales:

Synchronisation des données :

Synchronisation des courants de démagnétisation et d'excentricité par rapport aux courants d'un moteur sain pour une comparaison précise.

Affichage des résultats :

Affichage des spectres de puissance pour les trois états du moteur à différentes fréquences ciblés (75 Hz, 100 Hz, 125 Hz)

III.5. Création des défauts

III. 5. 1. Création du défaut d'excentricité

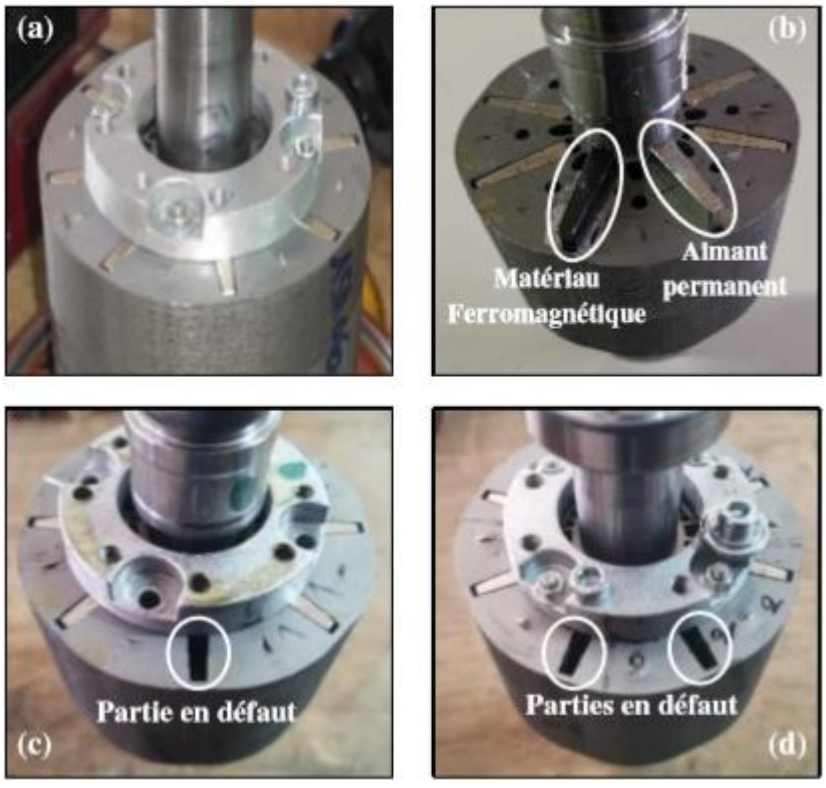
La création du défaut d'excentricité nécessite une grande précision à cause de l'épaisseur de l'entrefer. Les manières de création de ce type de défaut sont nombreuses. Parmi elles, nous savons que tout problème au niveau de la bague interne du roulement provoque une excentricité dynamique et tout défaut lié à la bague externe crée une excentricité statique. Pour cette raison, notre mécanisme est basé sur la modification des bagues (interne et externe) du roulement pour créer avec précision le défaut d'excentricité dans le MSAP. L'objectif de ce mécanisme est d'ajouter des bagues supplémentaires qui ont une forme ovale avec des dimensions suffisamment précises pour éviter le frottement entre le stator et le rotor.

Pour créer le défaut d'excentricité statique, nous disposons d'une bague d'une forme ovale entre la bague externe du roulement et le flasque en maintenant les mêmes dimensions de la bague interne. De plus, la création du défaut d'excentricité dynamique se fait de la même manière que le cas précédent, sauf qu'on garde les dimensions de la bague externe et on place une bague d'une forme ovale entre l'arbre de rotation et la bague interne du roulement. La Figure. III.10, représente une photo des roulements avec les bagues supplémentaires du mécanisme du défaut d'excentricité. [6]

III. 10. Mécanisme de création du défaut d'excentricité. [6]

III. 5. 2. Création du défaut de désaimantation

La création du défaut de désaimantation dans les MSAP est réalisée par différentes manières, selon la structure du rotor (aimants en surface, aimants insérés,). Dans notre étude, la structure du rotor est de type inséré avec une concentration de flux comme le montre la Figure. III.11. (a).



III. 11. Procédure de création du défaut de désaimantation [6]

La création du défaut de désaimantation dans ce cas est réalisée avec différentes sévérités en remplaçant un ou plusieurs aimants situés aux rotors par un matériau ferromagnétique comme la montre la Figure. III.11. (b). Le remplacement de ces aimants par le matériau ferromagnétique est réalisé afin de garder une certaine aimantation à l'aide du matériau utilisé et de maintenir le même entrefer dans la machine même en présence du défaut de désaimantation.

Toutes les acquisitions sont réalisées en régime permanent avec une vitesse de rotation de 1500 tr/min. Les paramètres d'acquisition choisis sont respectivement : un temps d'acquisition de 40 s et une fréquence d'échantillonnage de 3 kHz. Dans ces conditions, nous obtenons une résolution fréquentielle égale à 0.025 Hz. Pour avoir une analyse plus fiable et vue le caractère aléatoire des signaux mesurés, plusieurs acquisitions ont été effectuées pour chaque mode de fonctionnement. Les différents modes de

fonctionnement traités sont :

- Fonctionnement du moteur sain ;
- Fonctionnement du moteur en présence du défaut d'excentricité ;
- Fonctionnement du moteur en présence du défaut de désaimantation. [6]

III.6. Signatures fréquentielles des défauts étudiés

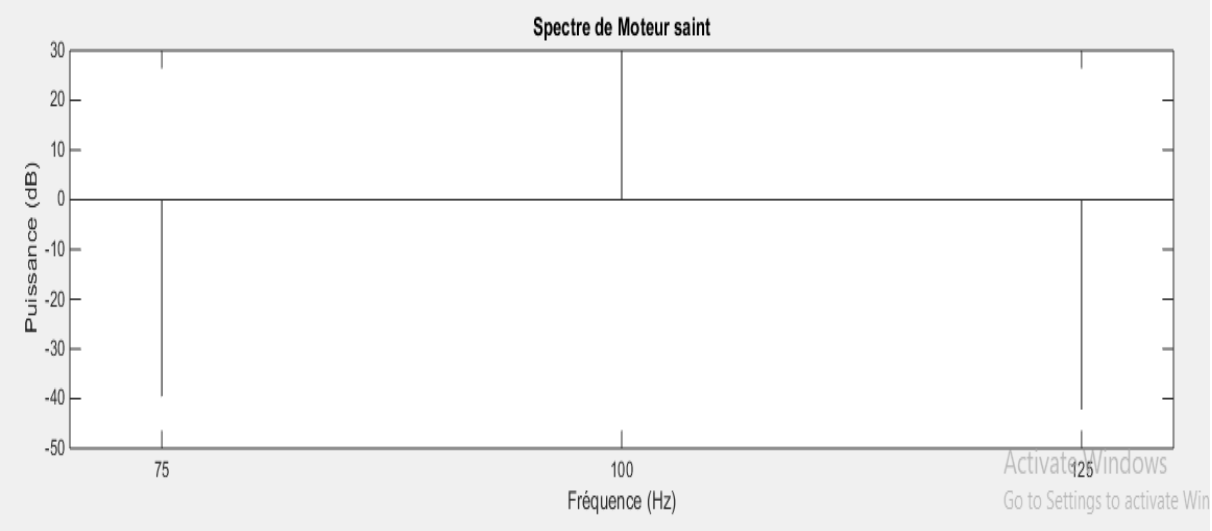
Pour une compréhension approfondie des défauts potentiels dans notre moteur synchrone, nous avons analysé les signatures fréquentielles spécifiques associées aux défauts d'excentricité et de désaimantation. En considérant les équations pertinentes et les paramètres de notre machine fixes, nous avons identifié les fréquences caractéristiques de ces défauts. Dans le tableau ci-dessous, nous présentons les valeurs des différentes fréquences étudiées.

Type de défaut	Signatures fréquentielles	
	1ère signature	2ème signature
Défaut d'excentricité	75 Hz	125 Hz
Défaut de démagnétisation	75 Hz	125 Hz

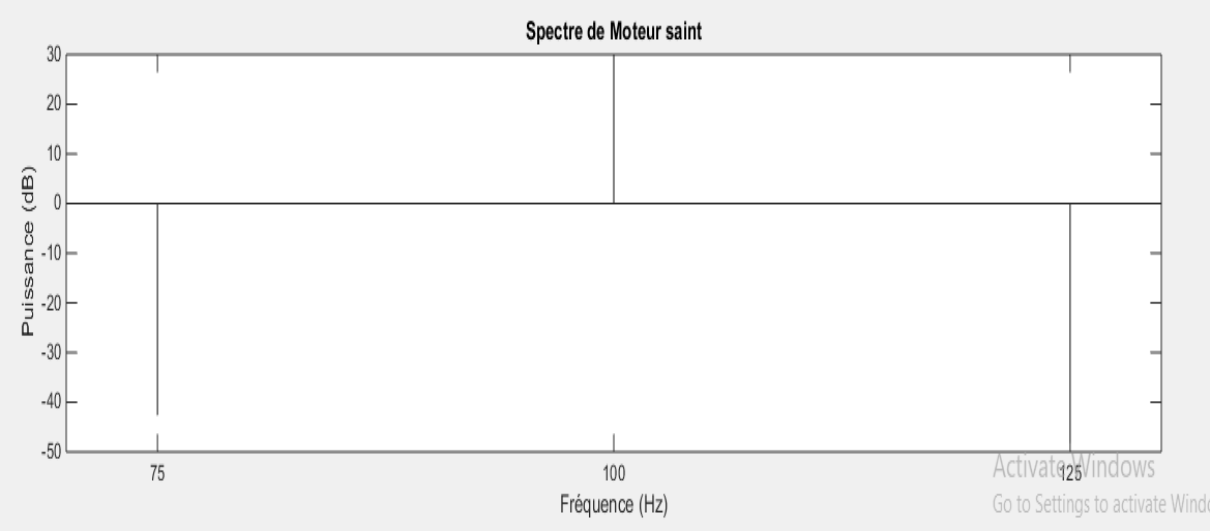
Tableau III.1. Signatures fréquentielles des défauts étudiés

III.7. Fonctionnement du moteur sain

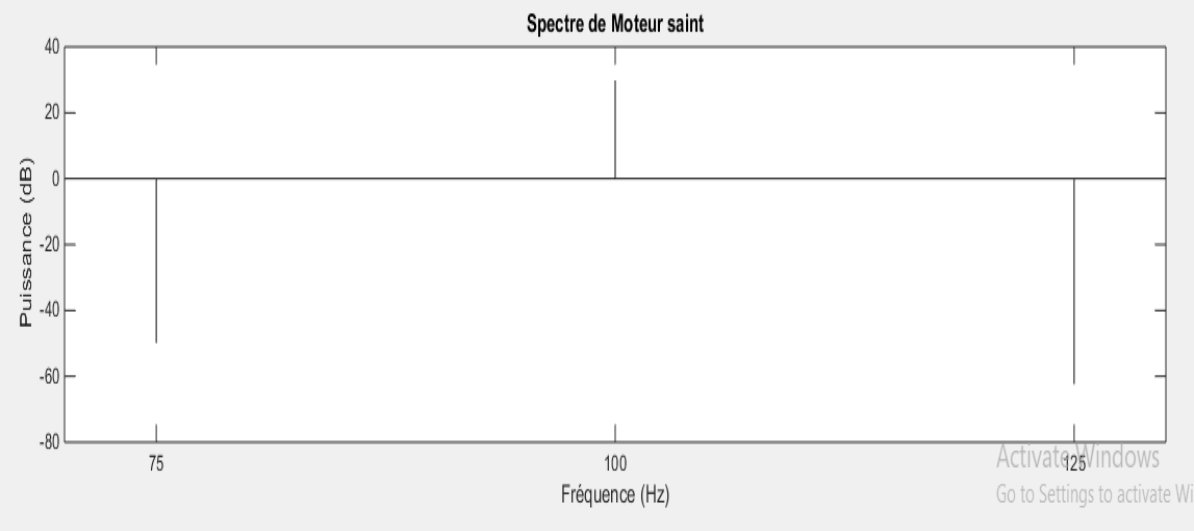
Pour détecter la présence de défauts dans un moteur synchrone, tels que la démagnétisation et l'excentricité, il est essentiel de comprendre d'abord le fonctionnement normal du moteur sain. Un moteur synchrone en bon état présente une réponse spectrale spécifique, caractérisée par une distribution régulière des harmoniques de fréquence en fonction de la vitesse de rotation et de la fréquence d'alimentation. Lorsqu'un défaut est présent, cette réponse spectrale est altérée, ce qui permet de diagnostiquer le problème.



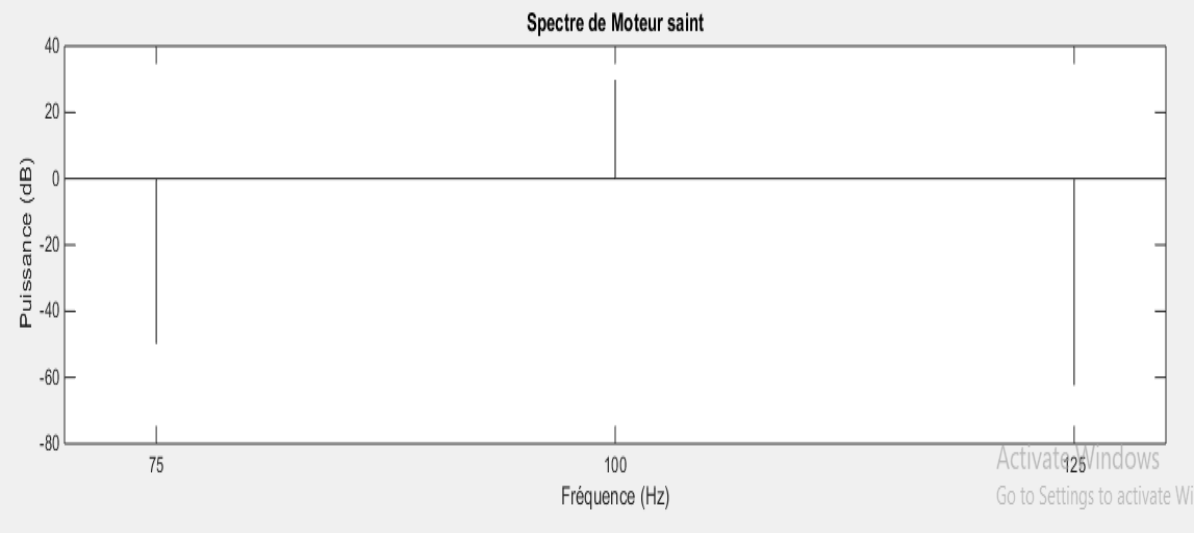
III.12. Moteur saint 10S essai 1



III.13. Moteur saint 10s essai 2



III.14. Moteur saint 20s essai 1



III.15. Moteur saint 20s essai 2

Les graphes ci-dessus montrent les résultats de l'analyse spectrale d'un moteur synchrone sain, obtenus par la méthode ROOT-MUSIC, pour différentes durées d'essai (10s et 20s). Malgré l'absence de défauts, on observe la présence de pics à des fréquences spécifiques sur tous les graphes. Ces pics correspondent probablement aux fréquences caractéristiques du moteur sain, liées à sa conception et à son fonctionnement nominal.

La localisation et l'amplitude des pics sont très similaires entre les différents essais de même durée, ce qui témoigne de la répétabilité et de la fiabilité de la méthode ROOT-MUSIC pour l'analyse des moteurs sains. Cette cohérence est particulièrement visible en comparant les graphes des essais 1 et 2 pour chaque durée (10s et 20s).

En comparant les graphes des essais de 10s et 20s, on constate que l'augmentation de la durée d'analyse n'a pas d'impact significatif sur la localisation des pics.

Cependant, l'amplitude des pics est légèrement plus élevée pour les essais de 20s, ce qui suggère qu'une durée d'analyse plus longue peut améliorer le rapport signal/bruit et donc la détection des fréquences caractéristiques du moteur sain.

La présence de pics à des fréquences spécifiques dans le spectre d'un moteur sain peut s'expliquer par plusieurs facteurs liés à la conception et au fonctionnement du moteur, tels que :

- Les fréquences de rotation du rotor et les harmoniques associées
- Les fréquences liées aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor
- Les fréquences propres de la structure mécanique du moteur

Les résultats de cette analyse spectrale d'un moteur sain par la méthode ROOT-MUSIC peuvent servir de référence pour la détection et le diagnostic de défauts. En comparant les spectres de moteurs potentiellement défectueux à cette référence, il serait possible d'identifier les déviations par rapport au comportement nominal et ainsi de détecter la présence de défauts.

En conclusion, bien que ces graphes représentent les résultats de l'analyse spectrale d'un moteur synchrone sain, ils fournissent des informations précieuses sur les fréquences caractéristiques de ce type de moteur. Ces informations peuvent servir de base de comparaison pour la détection et le diagnostic de défauts.

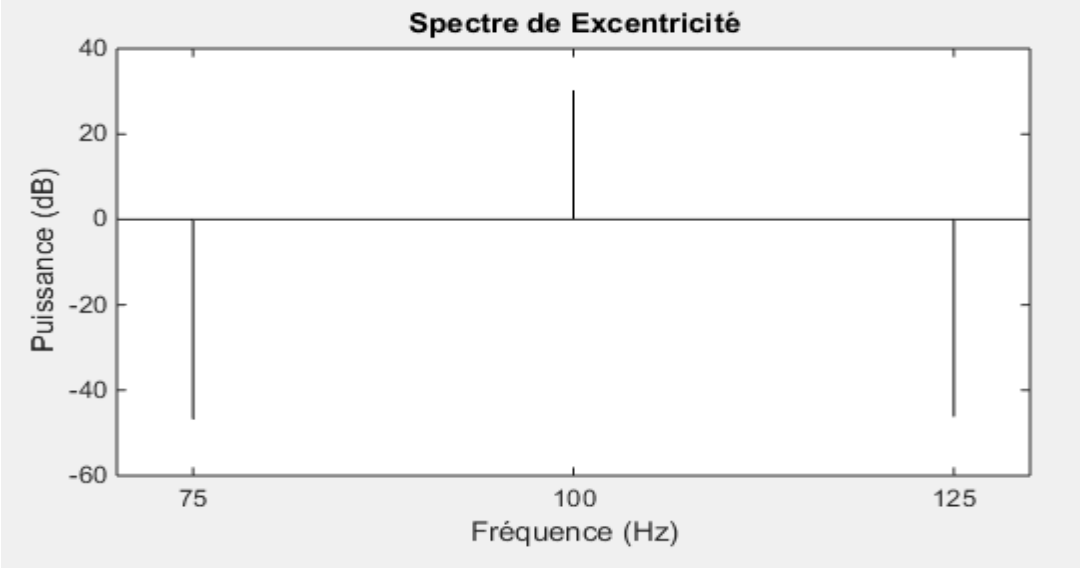
III. 8. Fonctionnement du moteur en présence du défaut d'excentricité :

Les graphes présentent les résultats de l'analyse spectrale du défaut d'excentricité d'un moteur synchrone, obtenus par la méthode ROOT-MUSIC. Chaque graphe correspond à un pourcentage différent du défaut et une durée d'essai spécifique.

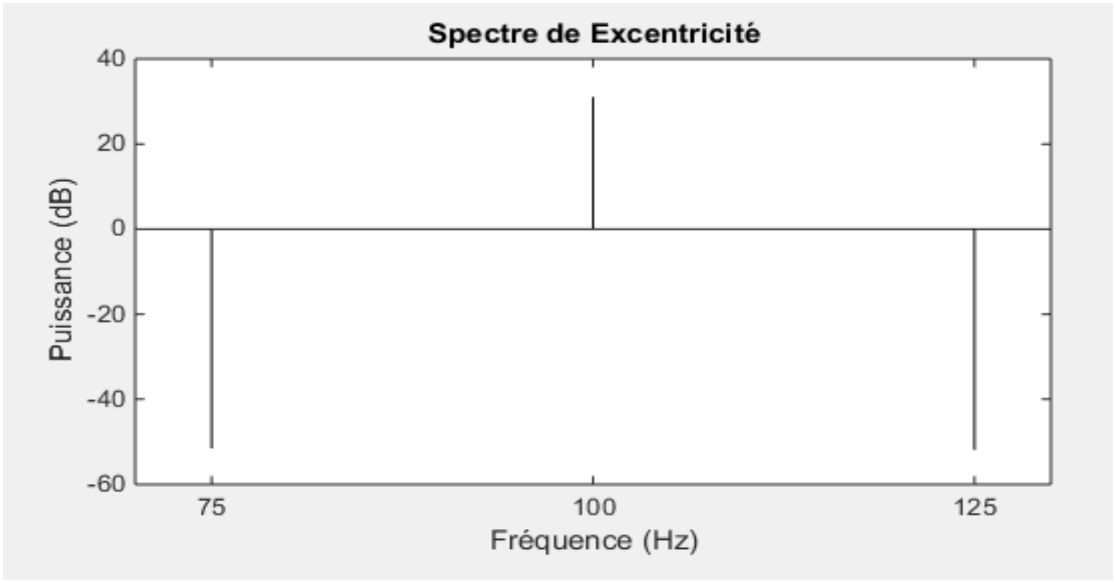
L'amplitude des pics varie en fonction du pourcentage du défaut d'excentricité simulé. Les

graphes avec des pourcentages plus élevés (DE 30% 20s) présentent des pics plus prononcés que ceux avec des pourcentages plus faibles (DE 10% 10s), suggérant une relation directe entre le niveau d'excentricité et l'amplitude des composantes fréquentielles détectées.Pour un même pourcentage de défaut, l'augmentation de la durée de l'essai (de 10s à 20s) semble amplifier l'amplitude des pics. Cela suggère qu'une durée d'analyse plus longue permet une meilleure détection et caractérisation du défaut d'excentricité.

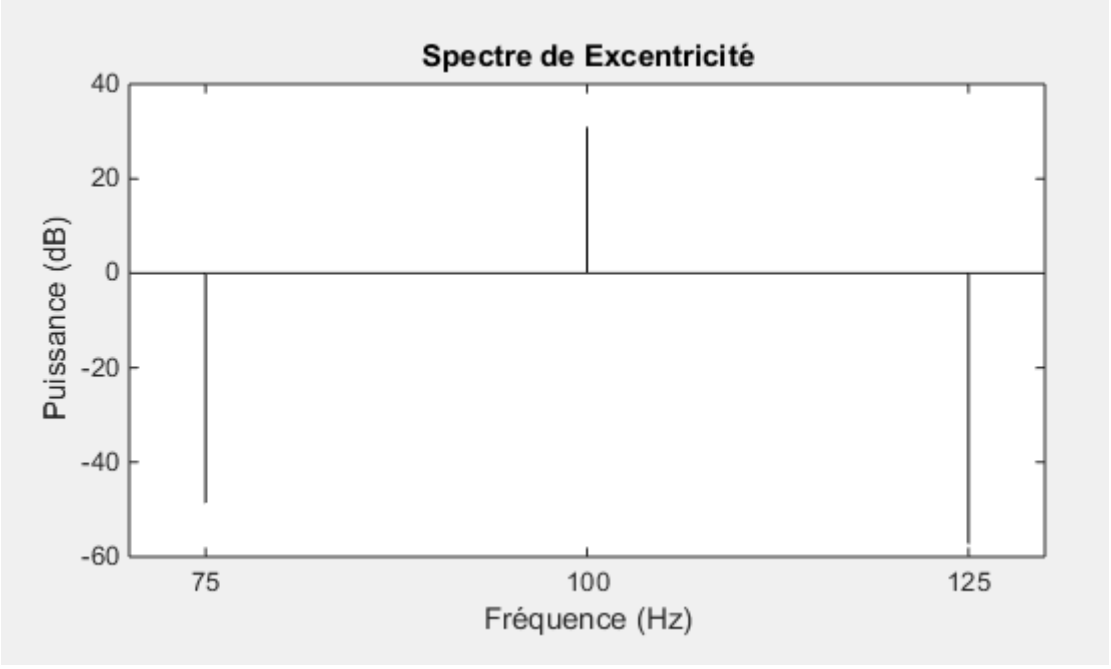
Bien que les fréquences des pics semblent apparaître à des fréquences spécifiques et cohérentes entre les différents essais, on observe de légères variations d'amplitude entre les essais de même pourcentage et durée (DE 20% 10s essai 1 et 2,par exemple).



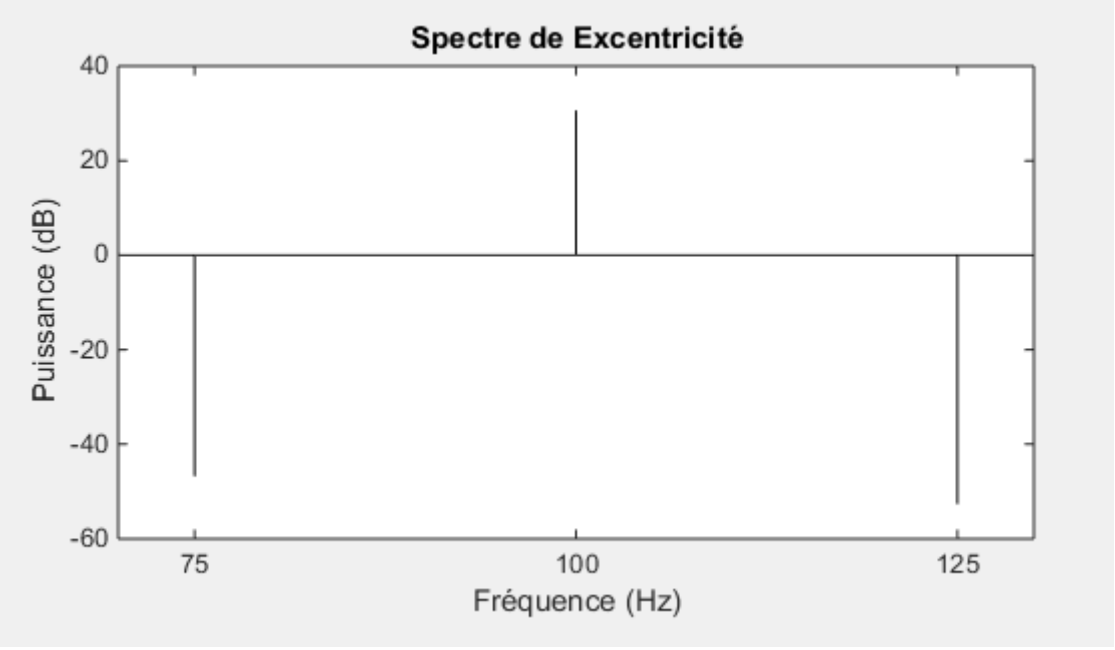
III.16. DE 30% 20s essai 1



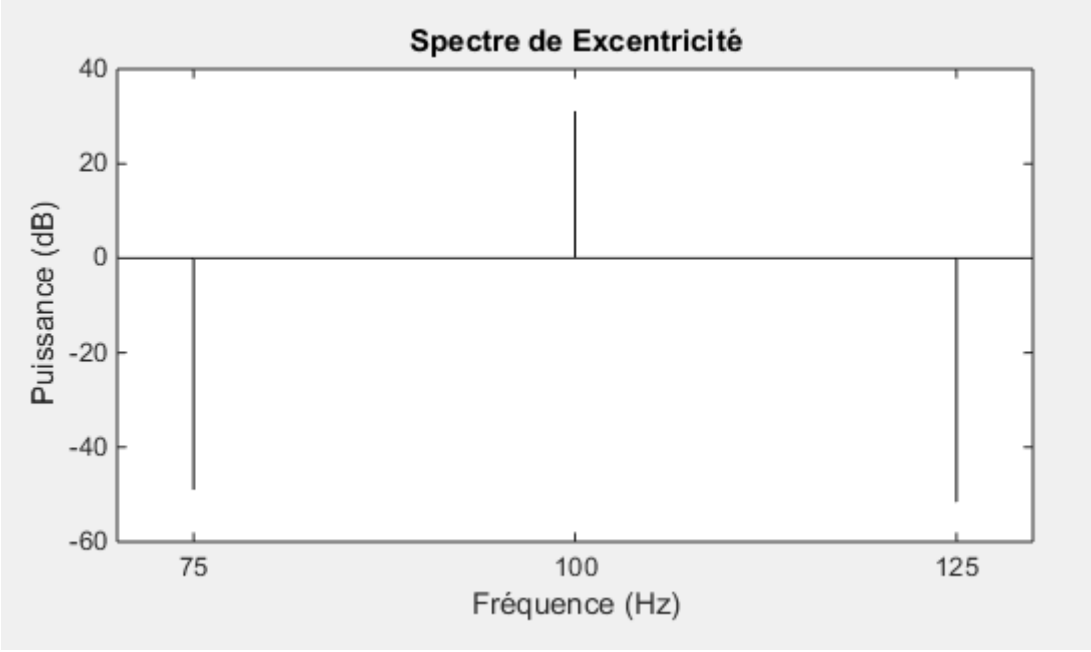
III.17. DE 10% 10s essai 2



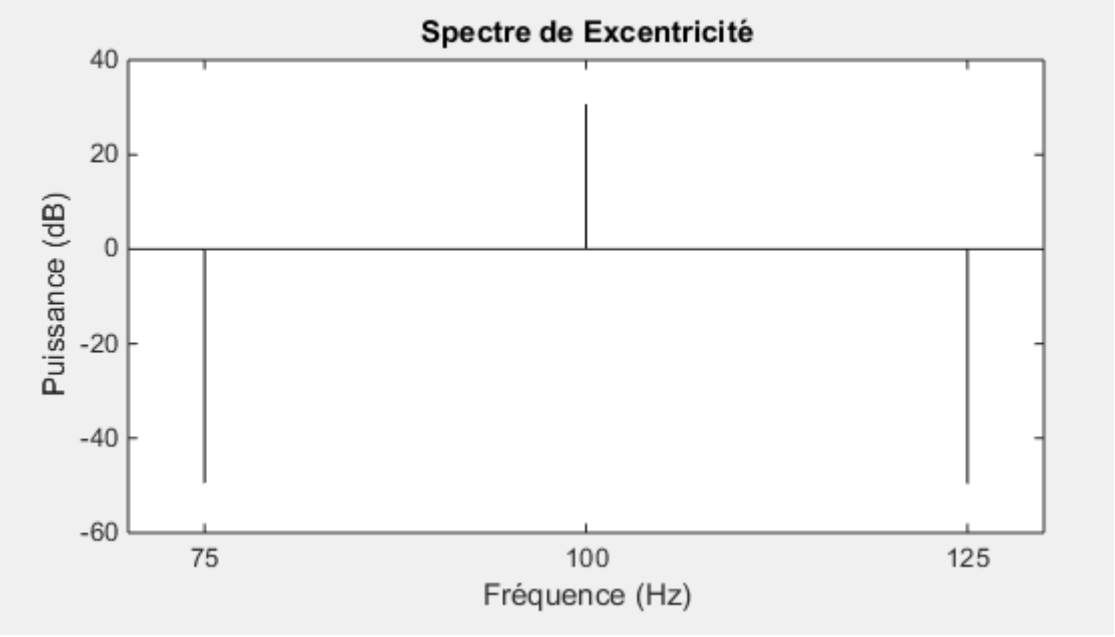
III.18. DE 10% 10s essai 1



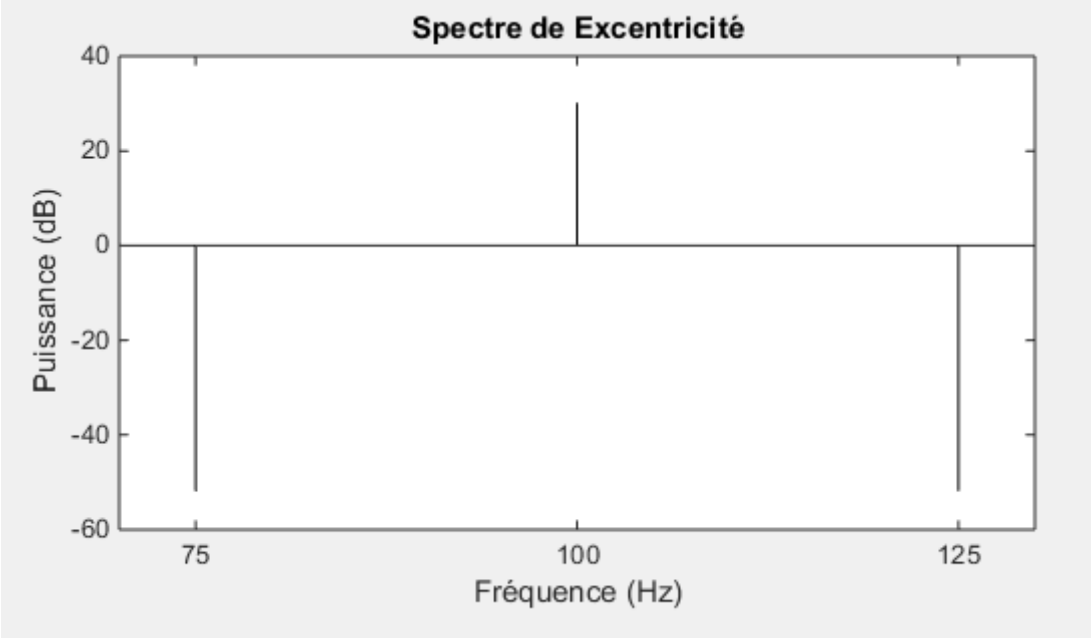
III.19. DE 20% 10s essai 1



III.20. DE 10% 20s essai 1



III.21. DE 20% 20s essai 1



III.22. DE 30% 10s essai 1

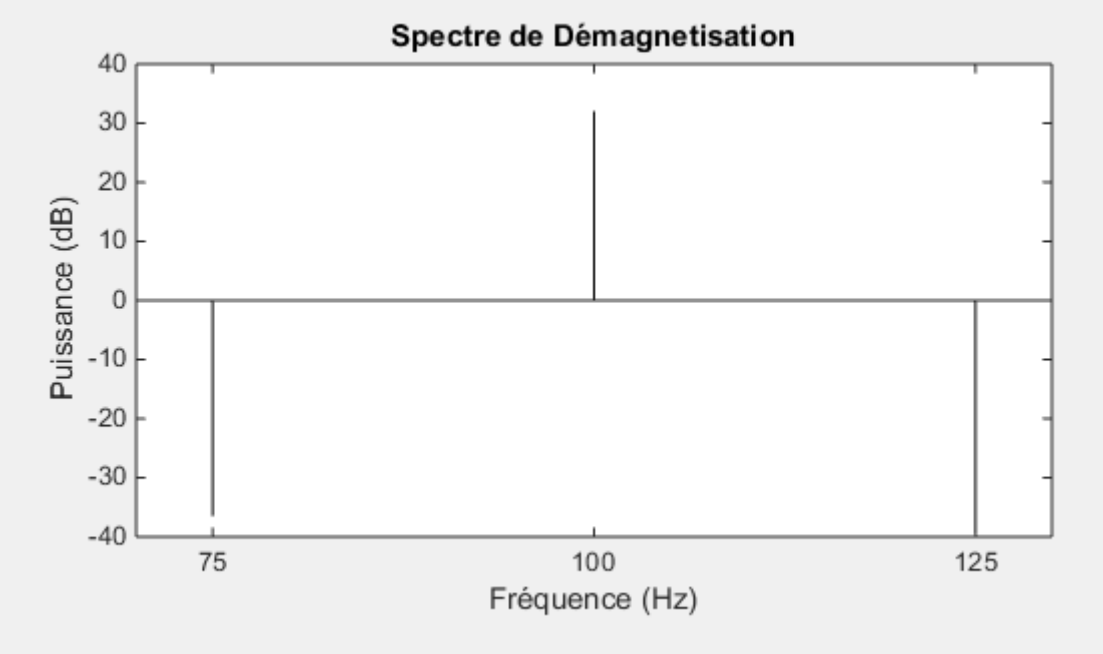
III. 9. Fonctionnement du moteur en présence du défaut de démagnétisation

Les graphes présentent les résultats de l'analyse spectrale du défaut de démagnétisation d'un moteur synchrone, obtenus par la méthode ROOT-MUSIC. Chaque graphe correspond à un pourcentage différent du défaut et une durée d'essai spécifique. On observe plusieurs pics distincts à différentes fréquences sur chaque graphe, indiquant la présence de multiples composantes fréquentielles liées au défaut de démagnétisation. Contrairement à l'analyse du moteur sain.

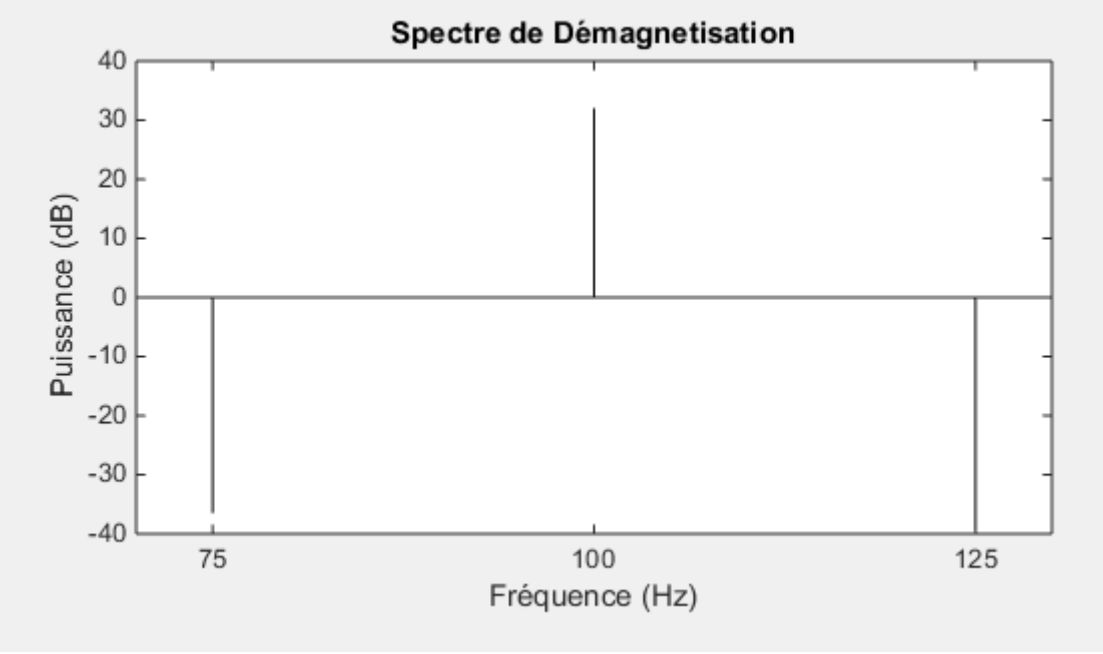
L'amplitude et la position en fréquence des pics varient selon le pourcentage de démagnétisation et la durée d'essai.Pour un même pourcentage de défautet pôles affectés, l'amplitude des pics caractéristiques est plus élevée pour les essais de 20s que pour ceux de 10s.Cela suggère qu'une durée d'analyse plus longue améliore la détection du défaut de démagnétisation, probablement en réduisant l'impact du bruit de mesure et en permettant une meilleure estimation des composantes fréquentielles.

Les fréquences auxquelles apparaissent les pics caractéristiques semblent différentes de celles observées pour le moteur sain. Cela indique que le défaut de démagnétisation modifie les fréquences de résonance du système.

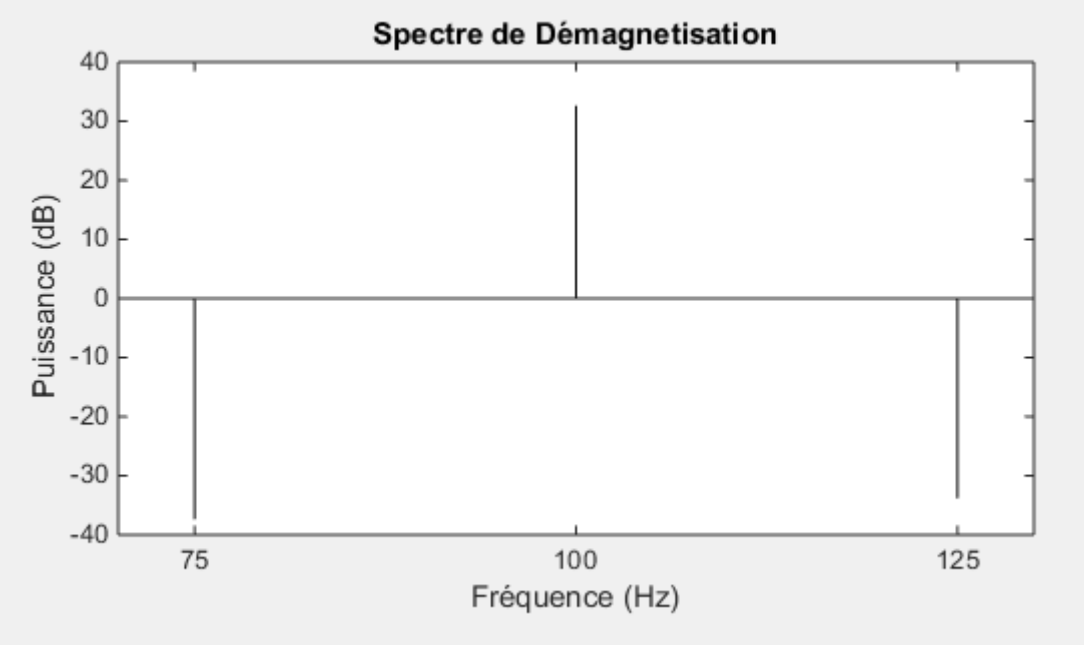
L'identification précise de ces nouvelles fréquences caractéristiques pourrait permettre de développer des indicateurs spécifiques pour le suivi de l'état de santé du moteur et la détection précoce des défauts de démagnétisation.



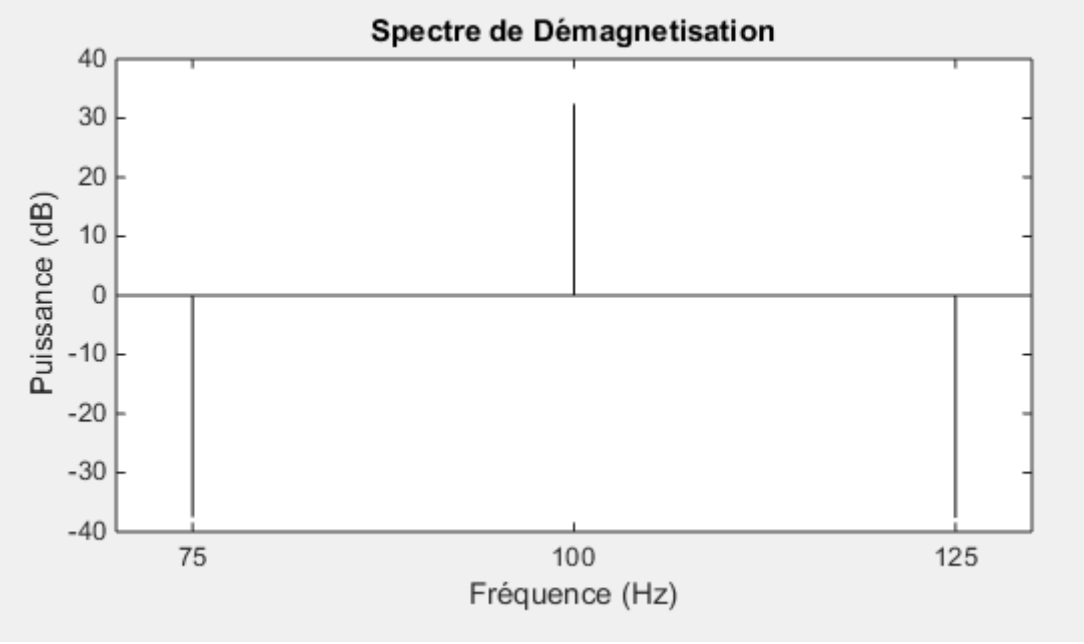
III.23. DMF 2 POLE 20s essai 1



III.24. DMF 2 POLE 20s essai 2



III.27. DMF 2 POLE 10s essai 2



III.28. DMF 2 POLE 10s essai 1

III.10. Rapport entre la démagnétisation et l'excentricité

Essais	Pôles	Pourcentage	Durée (sec)	Fréquence (Hz)	Puissance DMF	Puissance DE	Puissance en %
1	2		10s	75	-37.51	-48.63	77,1%
1		10%	10s	125	-37.62	-57.26	65,7%
2	2		10s	75	-37.39	-51.51	72,5%
2		10%	10s	125	-33.83	-51.90	65,1%
1	2		10s	75	-37.51	-46.74	80,2%
1		20%	10s	125	-37.62	-52.64	71,4%
1	2		20s	75	-36.50	-49.98	73%
1		20%	20s	125	-39.44	-49.58	79,5%
1	2		20s	75	-36.50	-48.98	74,5%
1		10%	20s	125	-39.44	-51.58	76,4%
2	2		20s	75	-37.81	-48.98	77,1%
2		10%	20s	125	-37.59	-51.58	72,8%
1	2		20s	75	-36.50	-46.83	77,9%
1		30%	20s	125	-39.44	-46.15	85,4%
1	2		10s	75	-37.51	-51.90	72,2%
1		30%	10s	125	-37.62	-51.85	72,5%

Tableau III.2. Rapport entre les défauts.

Les défauts de démagnétisation et d'excentricité peuvent être distingués par leurs signatures spectrales à des fréquences spécifiques. La démagnétisation présente des puissances plus élevées et constantes, tandis que l'excentricité montre des variations plus grandes, surtout à des fréquences plus élevées et des pourcentages plus importants. Les rapports calculés montrent clairement que la puissance de l'excentricité est inférieure à celle de la démagnétisation

III.10.1.Observations et remarques

1. Les valeurs de puissance en dB sont systématiquement plus élevées à 125 Hz qu'à 75 Hz pour les mêmes conditions d'essai, suggérant que les défauts sont plus prononcés à des fréquences plus élevées.
2. La puissance en dB est toujours négative, ce qui est typique lors de l'analyse de défauts, car les

composantes de défaut ont généralement des amplitudes sont inférieures 1.

III.10.2. Différences entre les deux défauts

1. Pour le même pourcentage et la même fréquence, les valeurs de puissance DMF sont généralement plus élevées que les valeurs de puissance DE, indiquant que le défaut de démagnétisation est plus prononcé que l'excentricité.
2. L'écart entre les valeurs de puissance DMF et DE est plus important à 125 Hz qu'à 75 Hz, suggérant que la différence de sévérité entre les deux défauts est plus évidente à des fréquences plus élevées.

III.11.Conclusion

L'analyse spectrale par la méthode ROOT-MUSIC révèle que les défauts de démagnétisation et d'excentricité dans les moteurs synchrones produisent des pics de fréquence caractéristiques dont l'amplitude augmente avec le pourcentage de défaut et la durée de l'essai. Les défauts de démagnétisation présentent des puissances plus élevées et constantes, tandis que l'excentricité montre des variations plus grandes. Des essais plus longs améliorent la détection en augmentant l'amplitude des pics et en réduisant le bruit. Ces résultats aident à développer des indicateurs pour une surveillance efficace et la détection précoce des défauts.

Programmes

analyse.m

```
functionanalyse(saint,DMF,EF)
load(char(saint))
i1=ia;
Ts1=temps;
data1=timeseries(i1,Ts1);
load(char(DMF))
i2=ia;
Ts2=temps;
data2=timeseries(i2,Ts2);
[~,new_data2] = synchronize(data1,data2,'intersection','InterpMethod','zoh');
load(char(EF))
i3=ia;
Ts3=temps;
data3=timeseries(i3,Ts3);
[~,new_data3] = synchronize(data1,data3,'intersection','InterpMethod','zoh');

subplot(212)
[Fs Ps]=RM_data(data1.data,60,'Moteur saint',Fe);
bar(Fs,Ps,10^-4)
xlabel('FrÃ©quence  (Hz)')
ylabel('Puissance (dB)')
titre=strcat('Spectre de Moteur Saint');
title(char(titre))
displayPowerAtFrequencies(Fs,Ps,[75 100 125],'Moteur Saint');

subplot(221)
[FdPd]=RM_data(new_data2.data,60,'DÃ©magnetization',Fe);
bar(Fd,Pd,10^-4)
xlabel('FrÃ©quence  (Hz)')
ylabel('Puissance (dB)')
titre=strcat('Spectre de DÃ©magnetisation');
title(char(titre))
displayPowerAtFrequencies(Fd,Pd,[75 100 125],'DÃ©magnetisation');
subplot(222)
[Fe Pe]=RM_data(new_data3.data,90,'ExcentricitÃ©',Fe);
bar(Fe,Pe,10^-4)
xlabel('FrÃ©quence  (Hz)')
ylabel('Puissance (dB)')
titre=strcat('Spectre de ExcentricitÃ©');
title(char(titre))
displayPowerAtFrequencies(Fe,Pe,[75 100 125],'ExcentricitÃ©');
end
```

displayPowerAtFrequencies

```
function displayPowerAtFrequencies(frequencies,powers,targetFrequencies,defaut)
fprintf('%s: \n',defaut);
fortargetFreq=targetFrequencies
   [~,idx]=min(abs(frequencies-targetFreq));
fprintf('FrÃ©quence: %.2f Hz Puissance: %.2f dB\n ',frequencies(idx),powers(idx));
end

end
```

Rm_data.m

```
function [f p]=RM_data(data,P,type_defaut,Fe)
L=2*P;

X=corrmtx(data,4*L,'autocorrelation');       % Calcul de la matrice d'autocorrelation
%[P,F]=peig(X,L,N,1/Te);
[F,P]= rootmusic(X,L,Fe);
%Estimation des frÃ©quences et puissances
%correspondantes
Fef=F(F>=0);
Pdb=db(P);
p=Pdb;
f=Fef;
bar(f,p,10^-4)
xlabel('FrÃ©quence  (Hz)')
ylabel('Puissance (dB)')
titre=strcat('Spectre de',char(type_defaut));
title(char(titre))
end
```

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce projet, nous avons développé une approche basée sur la méthode Root MUSIC (Root Multiple Signal Classification) pour l'analyse spectrale des signaux d'un moteur synchrone. Nous avons appliqué ROOT-MUSIC pour identifier et séparer ces défauts, démontrant ainsi l'efficacité de cette méthode dans la détection précoce des anomalies.
On a détaillé le fonctionnement des moteurs synchrones et les impacts spécifiques des défauts de démagnétisation et d'excentricité sur leur performance.

L'avantage majeur de la méthode Root MUSIC est sa capacité à résoudre des composantes fréquentielles très proches les unes des autres, ce qui est crucial pour la séparation des défauts de démagnétisation et d'excentricité. De plus, cette méthode offre une précision élevée dans l'estimation des fréquences caractéristiques des défauts.

L'une des principales difficultés était liée à la complexité computationnelle de la méthode ROOT MUSIC, qui nécessite des ressources de calcul plus importantes que les méthodes traditionnelles. Cependant, la mise en œuvre de ROOT MUSIC peut s'avérer plus complexe que les méthodes classiques, nécessitant une expertise approfondie en traitement du signal et une compréhension détaillée de la méthode. La sensibilité de la méthode Root MUSIC aux erreurs de modélisation et aux bruits dans les signaux réels.

Pour poursuivre ce travail, plusieurs pistes peuvent être envisagées. Tout d'abord, l'intégration de techniques d'intelligence artificielle, comme les Séparateurs à Vastes Marges (SVM), pourrait permettre une classification automatisée des défauts à partir des signatures spectrales identifiées par ROOT MUSIC.
Ensuite, l'extension de notre approche à d'autres types de défauts, tels que les défauts de roulements ou de barres rotoriques, offrirait une solution de diagnostic plus complète pour les moteurs synchrones.
Enfin, le développement d'un système embarqué en temps réel pour l'analyse spectrale par ROOT MUSIC faciliterait l'adoption de cette approche dans l'industrie et permettrait une surveillance continue des moteurs, assurant ainsi une détection précoce des défauts et une

optimisation de la maintenance.

En conclusion, ce mémoire a démontré le potentiel de la méthode ROOT MUSIC pour l'analyse spectrale des défauts de démagnétisation et d'excentricité dans les moteurs synchrones, à travers une étude expérimentale approfondie. L’intégration de cette approche dans un système de surveillance en ligne et de maintenance prédictive permettrait une détection précoce des défauts et une optimisation de la planification des interventions de maintenance, réduisant ainsi les coûts d'exploitation et les temps d'arrêt imprévus

Réferences

[1]B. Aubert a detection des courts-circuits inter-spires dans les Generateurs Synchrones a Aimants Permanents : Methodesbasees modeles et filtre de Kalman etendu Application a un canal de generation electrique en aeronautique», these de doctorat, universite de Toulouse, 2014.

[2]http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/11702/1/Ms.ELN.Dali

[3]https://www.superprof.fr/ressources/physique-chimie/physique-chimie-tous-niveaux/outil-electriquephysique.html#:~:text=Une%20machine%20synchrone%20est%20une,vitesse%20de%20rotation%20du%20rotor

[4]J.A.Farooq, « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents », Thèse de doctorat, UTBM,2008.

[5]T.Wildil et G.Sybille, « Electrotechnique »,4eme édition de Boeck, 2005.

[6]Thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat présentée par Mr. GHERABI Zakaria, « Technique du séparation appliquées au diagnostic des défauts dans le moteur synchrone à aimant permanent » 2019/2020

[7]Mr.Khov, «Surveillance diagnostic des machine synchrone à aimant permanents : détection des courts circuits par suivi paramétrique », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009.

[8] A. Ciban, «Méthode globale diagnostic des machines électrique », Thèse de Doctorat, Université Lille Nord, France, 2012. [

[9]B.Vaseghi, «contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs: applications aux machines à aimants permanents (BDCM-PMSM)», Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.

[10]J.Farooq, « étude du problème inverse en électromagnétique en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents », Thèse de Doctorat, Université de Belfort, 2008.|

[11]F.Leprince-Ringuet, « aimant permanent, matériaux et applications », Technique de l'ingènieur, traitè de génie électrique Doc D2100.

[12] G. M. Riche de Prony, "Essai expérimental et analytique: sur les lois de la dilatabilité de fluides élastiques et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de

l'alcool à différentes températures," Journal de l'école polytechnique, vol. 1, no. 22, pp. 24-76, 1795.

[13] V. F. Pisarenko, "The retrieval of harmonics from a covariance function," Geophysical J. Royal Astron. Soc., vol. 33, pp. 347-366, 1973.

[14] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.

[15] A. J. Barabell, "Improving the resolution performance of eigenstructure-based direction-finding algorithms," in Proc. of ICASSP'83, Boston, MA, USA, 1983, pp. 336-339, IEEE.

.

Annexe

Caractéristiques du moteur synchrone utilisé :

Symbole	Description	Valeur	Unités
P_n	Puissance nominale	3.6	kW
V_n	Tension Nominale	150	V
f_s	Fréquence Nominal	66.67	Hz
I_n	Courant Nominale	15.1	A
C_n	Couple Nominale	17.5	Nm
Ω_n	Vitesse Nominale	2000	Tr/min
R_s	Résistance Statorique	0.295	Ω
L_s	Inductance Statorique	3.5	mH
J	Moment d'inertie	3.10^{-4}	$Kg.m^2$
F	Coefficient de frottement	0.017	Nm/rad/s
P	Nombre de paires de pôles	2	
ε_s	Ouverture d'encoches statorique	0.06	rad
Go	Epaisseur de l'entrefer nominal	12	mm
R	Rayon du stator	64	mm
rr	Rayon du rotor	52	mm
r_{moy}	Rayon moyen de l'entrefer	58	mm
l	Longueur du MSAP	250	mm
N_s	Nombre des spires/bobine	6	
α_r	Ouverture de l'aimant permanent	1.15	rad
h	Epaisseur de l'aimant permanent	10	mm
n_{benc}	Nombre d'encoches statoriques	36	
	Nombre de bobines par phase	12	
B_r	Champ rémanent	0.3	T
M	Aimantation de l'aimant	240	kA/m