

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Réseaux Electriques

Par: SAHALI Feriel
ATIALIA Djoumana

Thème

Diagnostic des défauts électriques de la machine synchrone à aimants permanents

Soutenu publiquement, le 23/06 /2025 , devant le jury composé de:

M : BOULOUH Messaoud	Professeur	Univ. Guelma	Président Encadreur
M : FERAGA Chems-Eddine	Professeur	Univ. Guelma	Examineur
Mme : FETISSI Selwa	MCB	Univ. Guelma	Examineur/principale

Année Universitaire: 2024/2025

Remerciements :

REMERCIEMENTS :

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au sein de l'Université 08 MAI 1945 GUELMA au niveau du département d'Electrotechnique et Automatique du GUELMA

Nous tenons à remercier très vivement Monsieur BOULOUEH, notre encadreur de mémoire, pour son soutien, sa patience et d'avoir toujours assuré l'avancement et la continuité de ce mémoire. Ses conseils et son aide ont été les plus utiles pour l'aboutissement de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à Madame FETISSI Selwa et Monsieur FERAGA Chems-Eddine, professeurs à l'Université 8 MAI 1945 Guelma, d'avoir accepté d'examiner ce mémoire, et faire part du Jury.

Sans oublier tous ceux qui ont contribué à notre formation et ceux qui nous ont aidés et encouragés de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie cette modeste mémoire à :

Aucune dédicace ne saurait exprimer la profondeur de ma reconnaissance par ce que je te dois ce que je suis, tu m'as donnée la vie tu

M'as élevé, tu m'as comblé de ton amour et de ta tendresse, je t'aime maman et j'espère que tu trouveras le fruit de ton amour ta patience ta tendresse

Mon support, il me faudra plus que les mots puissent exprimer mon amour, tu m'as rendu

Heureuse lorsque tu m'as remonté le moral, tu m'as conseillé du courage pour battre surtout Pour ne pas l'affaiblir devant les banalités de la vie, tu seras là et toujours à mes cotes mon Cher papa

Ma belle-sœur Chaïma

Ma princesse shahed

Mon amie et ma sœur Djoumana

Sans oublier mon encadreur Mr Boulouh

SAHALI.F

Dédicace

Je dédie ce travail

A ma très chère maman ;

A mon oncle Abdelmoumen qui m'a soutenu et ma tante Fella

;

A mes petits frères Bahaa et Youcef ;

A toutes mes sœurs Feriel, Soundes ;

Kaouter, Nada et Amel ;

A mon professeur préféré Haddadi Soraya

A tous qui m'ont appris une lettre surtout mon encadreur

Mr Boulouh

ATAILIA.D

Titre: Diagnostic des défauts électriques de la machine synchrone à aimants permanents

Ce mémoire a mis en lumière l'importance cruciale du diagnostic des défauts électriques dans les machines synchrones à aimants permanents (MSAP). Il commence par une description succincte des différents types de la MSAP et des principaux défauts électriques et mécaniques.

Par la suite on examine brièvement les approches de surveillance et de diagnostic, ainsi que les techniques de détection et de localisation des défauts.

Nous clôturons notre travail par une simulation sous MATLAB/Simulink d'une MSAP pour étudier son comportement en état sain et en présence d'un défaut dans l'enroulement statorique en comparant les valeurs obtenues dans les deux cas et constater les conséquences qui en découlent sur les autres paramètres de la MSAP à savoir la tension d'alimentation, le courant statorique, la vitesse de rotation et le couple développé.

العنوان: تشخيص الأعطال الكهربائية في الآلات المتزامنة ذات المغناطيس الدائم

سلّطت هذه المذكرة الضوء على الأهمية البالغة لتشخيص الأعطال الكهربائية في الآلات المتزامنة ذات المغناطيس الدائم. أولاً تم تقديم وصف موجز لأنواع مختلفة من هذه الآلات، بالإضافة إلى الأعطال الكهربائية والميكانيكية الرئيسية. ثم تم استعراض منهجيات المراقبة والتشخيص باختصار، وكذلك تقنيات الكشف عن الأعطال وتحديد مواقعها.

اختتم العمل بمحاكاة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink لآلة متزامنة ذات مغناطيس دائم، وذلك لدراسة

سلوكها في حالة وجود عطل في ملفات الجزء الثابت، من خلال مقارنة القيم في الحالتين السليمة والمتضررة وملاحظة التأثيرات الناتجة على باقي خصائص الآلة مثل جهد التغذية، التيار في الجزء الثابت، سرعة الدوران، والعزم الناتج.

Title: Diagnosis of electrical faults of permanent magnet synchronous machine

This work highlighted the critical importance of diagnosing electrical faults in permanent magnet synchronous machines. It begins by providing a brief description of different types of these machines, alongside a classification of the principal electrical and mechanical failures.

Next, it gives a review of monitoring and diagnostic methodologies as well as techniques for detecting malfunctions and determining their locations.

The work concluded with a simulation using the MATLAB/Simulink program for a permanent magnet synchronous machine, in order to study its behavior in the presence of a stator windings malfunction, by comparing the values in the healthy and damaged states and observing the resulting effects on the rest of the machine's settings namely, the supply voltage, the current in the stator, Rotation speed, and output torque.

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur les machines à aimant permanent

I.1. Introduction	01
I.2. Les aimants permanents	01
I.2.1. Histoire des aimants	01
I.2.2. Définition d'un aimant permanent	02
I.2.3. Caractéristique magnétique et physique des aimants	03
I.2.3.1. Magnétisation (ou induction magnétique)	03
I.2.3.2. La coercivité	03
I.2.3.3. Brunet (ou force de rémanence)	03
I.2.3.4. Saturation magnétique	04
I.2.3.5. Température de Curie	04
I.2.3.6. Densité de matière	04
I.2.3.7. La résistivité	04
I.2.4. Différent type d'aimants permanent utilisés dans la MSAP	04
I.2.4.1. Les ferrites	04
I.2.4.2. Terre rares	05
I.2.4.3. Alnico	06
I.3. Constitution de la MSAP	07
I.3.1. Le stator	07
I.3.1.1. Bobinage distribué	08
I.3.1.2. Bobinage concentré	08
I.3.2. Le rotor	09
I.3.2.1. Rotor en forme de disque	10
I.3.2.2. Rotor en forme de cylindre	10
I.4. Principe et modes de fonctionnement	11
I.5. Classification des machines à aimants permanents	11
I.6. Différentes Structures des MSAP	12
I.6.1. Machines à Flux Radial	12
I.6.1.1. Aimants en surface	14
I.6.1.3. Aimants enterrés	14

I.6.1.4. Aimants à concentration de flux.....	14
I.6.2. Machines à Flux Axial	15
I.6.2.1. Configuration à disque simple	16
I.6.2.2. Configuration à double rotor	16
I.6.2.3. Configuration à double stator	16
I.6.2.4. Configuration à stators et rotors multiples	17
I.6.3. MSAP à flux transverse	18
I.7. Avantages et domaines d'utilisation de la MSAP	19
I.8. Inconvénients d'utilisation de la MSAP	20
I.9. Conclusion	21

Chapitre II :Etat de l'art des défauts des MSAP et de leurs outils de diagnostic

II.1. Introduction	23
II.2. Défauts des machines électriques	23
II.2.1. Etude statistiques sur les défauts de la machine électrique	23
II.2.2. Défauts au rotor	24
II.2.2.1. Défauts de roulements mécaniques	24
II.2.2.2. Excentricité du rotor	26
II.2.2.3. Défaut de démagnétisation pour les machines synchrones à aimants permanent	28
II.2.2.5. Les défaillances de rotor	30
II.2.3. Défauts au stator	30
II.2.3.1 . Les courts-circuits	30
II.2.3.2. Les défauts d'alimentations	33
II.2.4. Défauts environnementaux	33
II.3. Différentes approches de diagnostic	33
II.3.1. Approche avec modèle	34
2.3.1.1. Approche par estimation paramétrique	34
II.3.1.2. Approche à base d'observateur	35
II.3.1.3. Approche par espace de parité	35
II.3.2. Approche sans modèle	35
II.4. Surveillance des défauts des machines électriques	36

II.4.1. Grandeurs mesurables et signaux de défauts	37
II.4.1.1. Grandeurs électriques	37
II.4.1.2. Grandeurs mécaniques	37
II.4.1.3. Grandeurs thermiques et chimiques	37
II.4.1.4. Grandeurs magnétiques	37
II.4.1.5. Grandeurs acoustiques et ultrasonores	37
II.4.2. Détection et localisation des défauts par analyse des signaux	38
II.4.2.1. Techniques de Détection des Défauts	39
II.4.2.2. Localisation des Défauts	40
II.6. Conclusion	40
 Chapitre III : Simulation des défauts électriques de la MSAP sous MATLAB/Simulink	
III.1. Introduction	41
III.2. Description de la machine et des paramètres de simulation	41
III.3. Description du schéma bloc de la MSAP	41
III.3.1. Description des différents éléments du schéma bloc de la MSAP	42
III.3.2. Scénarios de simulation	43
III.4. Analyse et discussion des résultats	44
III.4.1.1. Analyse de la tension	44
III.4.1.2. Analyse du courant statorique	45
III.4.1.3. Analyse du couple	45
III.4.1.4. Analyse de la vitesse	46
III.4.2. Interprétation globale des résultats	47
III.5. Conclusion	48

Conclusion générale

Figure 1.1: Famille de cycles d'hystérésis mineurs pour un acier électrique à grains orientés.....	04
Figure 1.2: Types de bobinage.....	09
Figure 1.3: Structure de rotor et stator.....	10
Figure 1.4 : Les différentes structures des machines à flux radial.....	13
Figure 1.5: La circulation de flux magnétique radial et axial.....	15
Figure 1.6 : Configuration des MSAP à flux axial.....	17
Figure 1.7: Principe de la MSAP à flux transversal.	18
Figure 2.1: Etude statistique sur les défauts des machines électrique.....	24
Figure 2.2: Composants d'un roulement à billes.....	24
Figure 2.3: Positions du rotor et du stator dans une machine parfaite.....	26
Figure 2.4:Les types d'excentricités.....	27
Figure 2.5: Défauts d'excentricité.....	28
Figure 2. 6: Représentation des courts-circuits.....	31
Figure 2.7. Classification des approches de diagnostic sans modèle.....	36
Figure 3.1 : Schéma bloc de la MSAP.....	42
Figure 3.2 : Tension en fonction du temps.....	44
Figure.3.3 Courant en fonction de temps.....	45
Figure.3.4 : le couple en fonction du temps.....	46
Figure.3.5 :la vitesse en fonction du temps.....	46

Liste des tableaux

Tab1.1. Propriétés de certains aimants permanents utilisés dans la MSAP.....	.07
Tableau 3.1 : Différentes valeurs obtenues..	47

Ces dernières années, la MSAP sont de plus en plus utilisées dans diverses applications industrielles telles que l'automobile, l'aéronautique, la robotique, ou encore le transport ferroviaire. A l'image de tout système complexe, y compris les systèmes biologiques, ces machines ne sont pas à l'abri des défauts. En effet, plusieurs types de pannes sont inévitables dans les machines électriques, en raison du vieillissement des matériaux magnétiques, de défauts de fabrication, ou encore des conditions d'exploitation intermittentes.

Ces défaillances peuvent affecter les organes de mesure (comme les capteurs), les systèmes de commande (actionneurs, convertisseurs), ou les composants internes tels que le stator ou le rotor.

Ces contraintes d'exploitation peuvent provoquer des arrêts imprévus, et lorsqu'une panne survient, elle peut entraîner au mieux une interruption temporaire de la chaîne de production, et au pire, des conséquences catastrophiques pour le processus industriel, voire pour la sécurité humaine.

C'est pourquoi les constructeurs et utilisateurs de machines électriques s'orientent de plus en plus vers des solutions avancées de diagnostic des défauts afin de faire face à ces nouveaux enjeux. Une des étapes consiste à assurer la détection des défauts dans la démarche. Ces approches visent à :

- Améliorer la disponibilité et la fiabilité des processus industriels,
- Optimiser les coûts de maintenance, et garantir la sécurité des biens et des personnes.

Pour ce faire, on exploite des grandeurs mesurées directement sur la machine afin de construire des indicateurs de santé. Il est donc essentiel de bien caractériser les défauts à surveiller, car ceux-ci peuvent être de natures variées (électriques, mécaniques, magnétiques...) et évoluer à des vitesses très différentes. Par exemple :

- Les défauts électriques évoluent rapidement (comme les courts-circuits),
- Tandis que les défauts mécaniques (comme l'usure des roulements) se développent plus lentement.

En conséquence, les techniques de détection et les outils de surveillance doivent être adaptés à chaque type de défaut.

Dans ce mémoire on ne s'intéresse qu'aux défauts électriques. De ce fait il est réparti en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente une étude sur la machine synchrone à aimants permanents. Cette étude touche les différents éléments constitutifs, les différents types et modes de fonctionnement et structure des MSAP, ainsi que leurs avantages et inconvénients.
- Le deuxième chapitre est consacré à une présentation des principaux défauts statoriques et rotoriques qui peuvent affecter les MSAP au cours de leur fonctionnement ; ainsi qu'une description succincte des différentes approches de diagnostic, de surveillance et de détection de ces défauts.
- Le dernier chapitre sera dédié aux résultats de simulation, sous logiciel Matlab, de modèle de la machine synchrone en présence de défauts électriques avec une comparaison des résultats avec l'état sain.

Enfin, on terminera notre travail avec une conclusion générale.

Chapitre I :
Généralités sur les Machines à Aimants Permanents

I.1. Introduction :

Les MSAP représentent un domaine essentiel dans le développement des technologies de motorisation moderne, grâce aux avantages offerts par l'utilisation des aimants permanents, qui permettent d'atteindre des performances exceptionnelles en termes de compacité, de rendement énergétique et de réduction de la taille et du poids des machines. Contrairement aux moteurs traditionnels à excitation inductive, les machines à aimants permanents ne nécessitent pas de circuit d'excitation externe. Cette caractéristique permet une réduction des pertes électriques, élimine les problèmes liés à l'excitation externe et offre une meilleure fiabilité ainsi qu'une augmentation du couple.

Ainsi, elles sont utilisées dans une large gamme d'applications nécessitant une régulation précise de la vitesse et un rendement élevé, telles que les véhicules électriques, les générateurs d'énergie renouvelable, ainsi que dans diverses applications industrielles.

Ce chapitre présente l'état de l'art de la MSAP, en expliquant leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et les différentes variantes existantes. Il traite également les matériaux employés dans la fabrication des aimants permanents, les progrès technologiques des aimants à base de terres rares, et l'impact de ces innovations sur les performances des machines électriques.

I.2. Les aimants permanents :

I.2.1. Histoire des aimants :

L'histoire des aimants remonte à l'Antiquité et a évolué progressivement à travers diverses découvertes, explorations et applications. Les premières observations concernant le magnétisme remontent à la Grèce antique et à la Chine. Vers 600 avant J.-C., les Grecs découvrirent la magnétite, un minéral naturellement magnétique. Ce phénomène fascinant a été étudié par des philosophes tels que Thales de Milet et Platon. Les Chinois, quant à eux, utilisaient des aimants naturels pour fabriquer des boussoles dès le IV^e siècle avant J.C., facilitant ainsi la navigation. Au cours de la Renaissance, en 1600, William Gilbert médecin de la reine Elizabeth I, a publié son

ouvrage "De Magnet", dans lequel il définit le magnétisme comme une force distincte de l'électricité. Il est considéré comme le père du magnétisme moderne. Gilbert a également démontré que la terre agit comme un gigantesque aimant, introduisant l'idée que le champ magnétique terrestre pouvait être étudié de manière scientifique. Au XIX^e siècle, avec des découvertes clés comme celle de Hans Christian Oersted, qui a prouvé que le courant électrique génère un champ magnétique, ainsi que l'induction électromagnétique de Michael Faraday, le magnétisme a été compris comme étant étroitement lié à l'électricité, ce qui a conduit à l'invention des premiers moteurs électriques. En XX^e siècle a vu le développement des aimants permanents modernes, rendus possibles grâce aux alliages métalliques. Les premières recherches sur les matériaux à base de terres rares, comme le néodyme, ont permis de fabriquer des aimants permanents plus puissants et plus compacts. Les aimants en néodyme (NdFeB), développés dans les années 1980, ont révolutionné de nombreux secteurs industriels, notamment l'électronique et les moteurs électriques.

Aujourd'hui, les aimants permanents sont essentiels dans des technologies modernes, comme les moteurs électriques, les générateurs, les haut-parleurs, les disques durs, et d'autres applications, grâce à leur efficacité et leur compacité. Les recherches continuent sur l'amélioration des matériaux magnétiques, avec un intérêt croissant pour des alternatives plus écologiques et durables.

L'évolution des aimants, du phénomène naturel à une composante clé des technologies modernes, démontre comment la science a transformé des découvertes anciennes en innovations pratiques.

I.2.2. Définition d'un aimant permanent :

Un aimant permanent est un objet fabriqué à partir d'un matériau magnétique dur, c'est-à-dire un matériau ayant une grande aimantation rémanente et un champ coercitif élevé. Cela lui permet de conserver un champ magnétique de manière stable sans nécessiter d'énergie externe pour maintenir cette magnétisation.

Contrairement à un électroaimant, qui génère un champ magnétique uniquement lorsqu'un courant électrique passe à travers un fil, un aimant permanent produit son propre champ magnétique en raison des propriétés intrinsèques de ses atomes et de la manière dont leurs moments

magnétiques sont orientés. Les aimants permanents fonctionnent grâce à l'alignement des moments magnétiques de leurs atomes, un phénomène qui résulte de l'orientation de leurs électrons et de leur spin. Cela crée un champ magnétique cohérent à l'échelle macroscopique, ce qui permet à l'aimant de générer un champ stable et durable [1].

I.2.3. Caractéristique magnétique et physique des aimants :

Les caractéristiques magnétiques et physiques des aimants jouent un rôle crucial dans leurs performances et leur application dans diverses technologies. Ces caractéristiques comprennent plusieurs paramètres qui décrivent le comportement magnétique et les propriétés physiques des aimants. On peut citer [2] :

I.2.3.1. Magnétisation (ou induction magnétique) : L'intensité du champ magnétique généré par un aimant est mesurée par la densité de flux magnétique (notée B), qui est généralement exprimée en teslas (T). Cette caractéristique détermine la force du champ magnétique à une distance donnée du matériau magnétique.

I.2.3.2. La coercivité : La coercivité est la capacité d'un aimant à conserver sa magnétisation après l'application d'un champ magnétique externe. Un aimant ayant une coercivité élevée est capable de résister à une démagnétisation par des champs opposés. Cela est particulièrement important dans les applications où les aimants sont exposés à des champs extérieurs variables. Le champ coercitif est usuellement noté H_c ou B_c .

I.2.3.3. Brunet (ou force de rémanence) : La force de rémanence (ou rémanence magnétique, notée B_r) est la capacité d'un matériau à conserver son magnétisme après que le champ magnétique externe a été retiré.

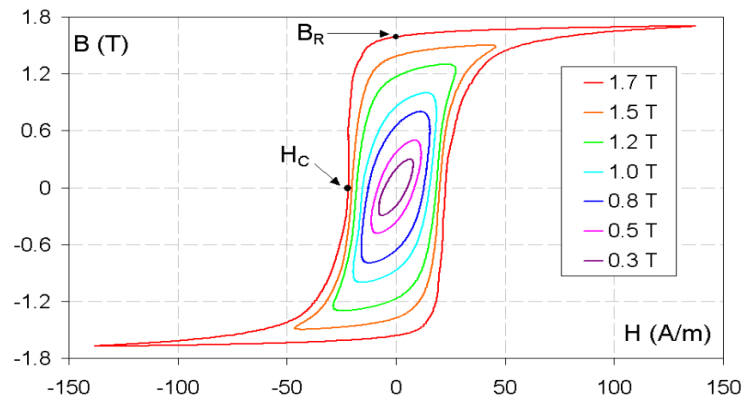


Figure 2.1 : Famille de cycles d'hystérésis mineurs pour un acier électrique à grains orientés.

I.2.3.4. Saturation magnétique : La saturation magnétique est atteinte lorsque tous les moments magnétiques des atomes d'un matériau sont orientés dans la même direction. A ce point, aucune augmentation du champ magnétique externe ne peut accroître davantage la densité du flux magnétique dans le matériau. Ce phénomène est essentiel pour comprendre les limites de performance des aimants.

I.2.3.5. Température de Curie : La température de Curie est la température à laquelle un matériau ferromagnétique perd sa capacité à être magnétisé.

I.2.3.6. Densité de matière : La densité de matière des aimants influence leur efficacité dans des applications où la compacité est importante, permettant ainsi une taille plus petite pour un même rendement.

I.2.3.7. La résistivité : La capacité du matériau à résister au passage du courant électrique lorsqu'il est exposé à un champ magnétique variable. Elle est exprimée en micro-ohms par centimètre ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$) et dépend de la composition chimique et de la structure du matériau de l'aimant. Une résistivité élevée minimise les courants de Foucault, qui sont des courants électriques induits dans le matériau par des champs magnétiques variables. Cela limite la génération de chaleur, ce qui est crucial pour les applications à haute fréquence.

I.2.4. Différent type d'aimants permanent utilisés dans la MSAP :

I.2.4.1. Les ferrites : Les ferrites sont des matériaux céramiques magnétiques dur de couleur grise à noire obtenue par moulage à forte pression et à haute température ($>1\ 000^\circ\text{C}$) d'un

mélange d'oxydes de fer à d'autres oxydes métalliques, tels que le nickel, le zinc ou le manganèse. Pour obtenir des propriétés magnétiques et électriques souhaitée on peut ajuster la proportion des oxydes en modifiant la composition chimique [3].

Par exemple, les ferrites de manganèse-zinc (MnZn) sont utilisées pour les applications basse fréquence, tandis que les ferrites de nickel-zinc (NiZn) sont idéaux pour les hautes fréquences. Ces matériaux possèdent des propriétés magnétiques exceptionnelles tout en étant de mauvais conducteurs d'électricité (haute résistivité). Cette caractéristique les rend utiles pour réduire les pertes par courant de Foucault dans des applications à haute fréquence.

I.2.4.2. Terre rares :

Les terres rares sont les meilleurs matériaux pour aimant performants, ils sont fabriqués à partir d'éléments des terres rares, comme le néodyme (Nd) et le samarium (Sm), combinés à d'autres métaux. Ce sont les aimants les plus puissants disponibles aujourd'hui, utilisés dans des technologies modernes et des industries de pointe.

a) Le samarium cobalt (SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$):

Le samarium-cobalt (SmCo) est un type d'aimant permanent appartenant à la catégorie des aimants en terres rares. Ces aimants sont fabriqués à partir d'un alliage de samarium (Sm) et de cobalt (Co). Les composés définis de ce mélange binaire sont : Sm_2Co_7 (~78 % de cobalt), SmCo_5 (~83 % de cobalt) et $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (~90 % de cobalt). En 2009, l'industrie se concentrait principalement sur la production de SmCo_5 et $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ [3].

SmCo_5 : Première génération d'aimants au samarium-cobalt, ces aimants possèdent des champs coercitifs élevés, ainsi qu'une excellente induction et une magnétisation équilibrée, offrant une combinaison idéale de performances magnétiques et de résistance thermique.

$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$: Deuxième génération, ces aimants présentent une induction rémanente et une énergie volumique supérieures à celles du SmCo_5 , les rendant encore plus performants pour des applications exigeantes [4].

Les aimants au samarium-cobalt se distinguent par leurs performances magnétiques exceptionnelles, bien que légèrement inférieures à celles des aimants néodyme-fer-bore (NdFeB). Cependant, ils surpassent les NdFeB par leur capacité à fonctionner sur une large plage de températures (généralement entre -250 °C et 710 °C) et dans des environnements corrosifs et ne nécessitent pas de revêtement protecteur supplémentaire. Ces propriétés les rendent idéaux pour des applications où des conditions extrêmes (températures élevées ou basses, environnements agressifs) sont présentes.

b) Les Néodyme-Fer-Bor :

Les aimants en néodyme-fer-bore (NdFeB) sont effectivement les aimants permanents les plus puissants disponibles aujourd'hui. Ils sont principalement composés de néodyme (Nd), de fer (Fe) et de bore (B). Comparés aux aimants au samarium-cobalt (SmCo), les NdFeB présentent plusieurs différences notables. Bien qu'ils offrent une énergie volumique maximale élevée et une durabilité supérieure, ils sont également plus sensibles à la corrosion et à la chaleur. Pour remédier à ces faiblesses, ils sont généralement revêtus de couches protectrices comme le nickel, le zinc ou l'époxy, et peuvent inclure des ajouts de dysprosium pour améliorer leur stabilité thermique. En raison de leur coût relativement bas, grâce à la disponibilité plus importante du néodyme, ils sont idéaux pour des applications nécessitant des aimants compacts et légers.

I.2.4.3. Alnico :

Avant l'avènement des aimants en terres rares dans les années 1970, les Alnico représentaient les aimants permanents les plus puissants disponibles. Ces alliages métalliques magnétisables sont principalement composés de fer, avec des proportions significatives d'aluminium (8 à 12 %), de nickel (15 à 26 %), de cobalt (5 à 24 %), de cuivre (jusqu'à 6 %), et parfois de titane (jusqu'à 1 %) [3].

Grâce à la liaison intermétallique entre l'aluminium et les autres constituants, les aimants Alnico possèdent une température de Curie exceptionnellement élevée, jusqu'à 750 – 850°C sans perte significative, c'est la plus haute parmi tous les matériaux magnétiques. Ils sont les seuls aimants capables de maintenir un magnétisme utile même lorsqu'ils sont chauffés à des températures proches du rouge [3].

Bien qu'ils aient une coercivité inférieure à celle des ferrites ou des aimants en terres rares, les Alnico offrent une induction magnétique élevée et une excellente stabilité thermique. Ces caractéristiques les rendent particulièrement adaptés à des applications nécessitant des performances constantes dans des environnements à haute température, tels que les capteurs, les équipements de mesure et les moteurs industriels.

Tab1.1. Propriétés de certains aimants permanents utilisés dans la MSAP.

Propriétés	Ferrites (Céramique)	Alnico	Terre rares	
			Samarium-Cobalt (SmCo5, Sm2Co17)	Néodyme-Fer-Bor (NdFeB)
Magnétisation (B)	0.2 à 0.4 T	0.8 à 1.2 T	1.1 à 1.3 T	1.0 à 1.4 T
Coercivité (Hc)	500 à 1000 kA/m	500 à 1600 kA/m	1200 à 3500 kA/m	800 à 2500 kA/m
Force de rémanence (Br)	0.2 à 0.3 T	0.7 à 1.1 T	0.8 à 1.1 T	1.1 à 1.3 T
Saturation magnétique (Bs)	0.3 à 0.4 T	1.0 à 1.2 T	1.1 à 1.3 T	1.4 à 1.6 T
Température de Curie (Tc)	450 à 500°C	750 à 850°C	710°C	310 à 370°C
Densité de matière (g/cm³)	4.8 à 5.1 g/cm³	7.0 à 8.3 g/cm³	8.3 à 9.0 g/cm³	7.5 à 8.5 g/cm³
Résistivité ($\Omega \cdot m$)	10^{-3} à $10^{-6} \Omega \cdot m$	10^{-6} à $10^{-7} \Omega \cdot m$	10^{-8} à $10^{-12} \Omega \cdot m$	10^{-8} à $10^{-12} \Omega \cdot m$

I.3. Constitution de la MSAP :

Elle comprend principalement deux parties: l'inducteur est la partie mobile qui crée un champ magnétique et l'induit qu'est la partie fixe dans lequel ce champ induit une force électromotrice, ces deux parties sont séparées par un entrefer.

I.3.1. Le stator :

Le stator d'une MSAP est une composante essentielle qui joue un rôle clé dans la génération du champ magnétique tournant nécessaire au fonctionnement de la machine. Il est constitué d'un noyau magnétique fabriqué à partir de tôles d'acier laminées pour réduire les pertes par courants de Foucault et hystérésis, aussi feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique. Ce noyau est

perforé de nombreuses encoches dans lesquelles sont logés les enroulements statoriques triphasé représenté par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre, d'un angle de 120° électrique, généralement réalisés en cuivre ou en aluminium, et isolés pour éviter tout court-circuit. Le stator est monté dans une structure rigide en fonte ou en aluminium, qui assure la protection des composants internes et facilite la dissipation thermique par un système de refroidissement intégré aussi de garantir une stabilité mécanique [5].

Les bobinages des MSAP peuvent adopter différentes topologies en fonction de l'application, des performances souhaitées et de la configuration du moteur. Ces topologies déterminent la manière dont les enroulements sont disposés dans le stator et influencent directement les caractéristiques de la machine, telles que son efficacité, sa densité de couple, et sa répartition du champ magnétique [6].

I.3.1.1. Bobinage distribué :

Encore appelé réparti, est la technique la plus utilisée dans l'industrie sont ceux dans lesquels les bobines de chaque phase sont réparties sur plusieurs encoches par pôle et par phase, Le bobinage distribué est bien adapté dans les applications à grande vitesse, où un nombre de paires de pôles réduit est bien nécessaire, ces avantages sont :

- Elle permet une répartition quasi-sinusoïdale du champ magnétique dans l'entrefer.
- Elle augmente la capacité du bobinage à récupérer le flux rotorique et donc de réduire les pertes magnétiques.

L'inconvénient principal de cette structure de bobinage est le volume de cuivre important perdu, notamment dans les têtes de bobines, lors de sa mise en place.

I.3.1.2. Bobinage concentré :

Dans le cas d'un bobinage concentré, le pas d'enroulement est égal à une encoche et le pas au collecteur peut être supérieur ou égal à 1. Toutes les sections sont connectées en série. Le faisceau d'entrée d'une bobine est voisin du faisceau de sortie de la bobine précédente. Dans le cas d'un bobinage concentré, le nombre d'encoches est du même ordre de grandeur que le nombre de pôles du moteur Le principal avantage de ce type de bobinage est son faible coût de réalisation et la réduction du volume de cuivre ainsi leurs pertes ce qu'améliore le rendement. Généralement la

puissance de ces moteurs à bobinage concentré est limitée en raison des inductances du bobinage et des paramètres de commutation.

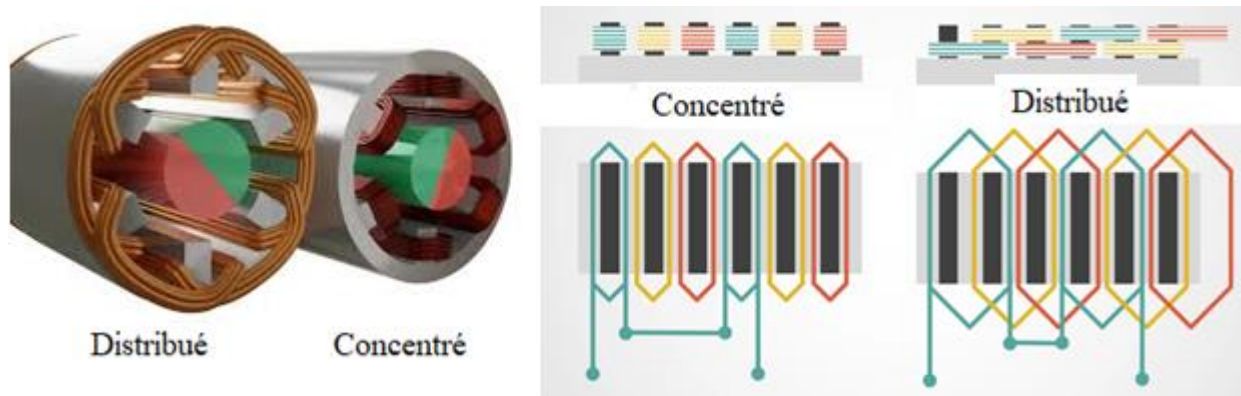


Figure 1.2: Types de bobinage.

I.3.2. Le rotor :

Le rotor d'une MSAP est la partie mobile de la machine, essentielle pour la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique. La conception du rotor dans les MSAP est particulièrement importante, car elle doit permettre une interaction optimale avec le champ magnétique du stator tout en minimisant les pertes, les forces centrifuges et les risques de démagnétisation.

Le rotor d'une MSAP se compose généralement de deux éléments principaux : les aimants permanents et la structure du rotor elle-même. Les aimants permanents, souvent en néodyme-fer-bore (NdFeB) ou en samarium-cobalt (SmCo), sont disposés aux manières pour créer un champ magnétique constant.

La structure du rotor doit également être conçue pour résister aux contraintes mécaniques et aux forces de rotation à grande vitesse. Elle est souvent fabriquée à partir de matériaux légers et robustes, tels que des alliages d'aluminium ou des composites, pour réduire le poids et la résistance à la rotation tout en garantissant une bonne rigidité et une dissipation thermique efficace.

Le rotor peut avoir une forme de disque ou de cylindre selon la configuration de la machine.

Le rotor d'une MSAP peut effectivement adopter différentes formes, les plus courantes étant le disque et le cylindre. Le choix de la forme dépend de plusieurs facteurs, notamment de la

configuration du moteur (flux radial, axial ou transverse), les besoins spécifiques en termes de densité de couple, de compacité, de vitesse de fonctionnement et d'efficacité thermique, ainsi que des exigences de conception du moteur souhaitée.

I.3.2.1. Rotor en forme de disque :

Dans cette configuration, le rotor prend une forme circulaire plate, souvent utilisée dans les machines à flux axial. L'aimant permanent est généralement placé autour du bord du disque ou sur la surface. Ce type de rotor est particulièrement adapté aux moteurs où la compacité et l'efficacité énergétique sont essentielles, car il permet de maximiser l'espace disponible pour les aimants permanents tout en offrant une bonne densité de flux magnétique.

I.3.2.2. Rotor en forme de cylindre :

Le rotor cylindrique est utilisé dans les configurations à flux radial ou flux transverse. Dans ce cas, le rotor a une forme circulaire tridimensionnelle. Ce type de rotor est souvent plus robuste et peut supporter des vitesses de rotation plus élevées, tout en permettant une répartition plus uniforme du champ magnétique. Le rotor cylindrique est plus couramment utilisé dans des machines plus grandes ou des applications industrielles nécessitant un couple élevé à des vitesses modérées à élevées.

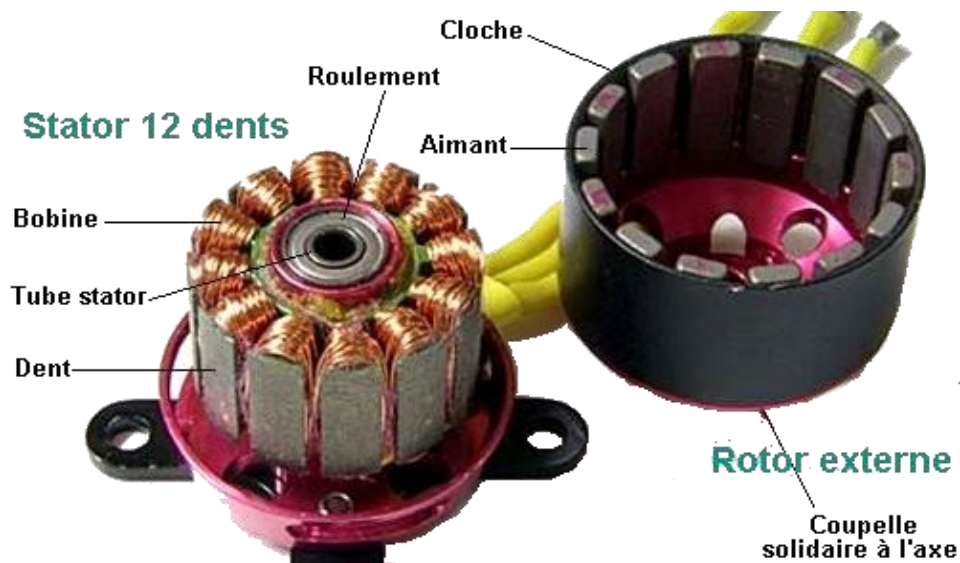


Figure 1.3: Structure de rotor et stator.

I.4. Principe et modes de fonctionnement :

Les MSAP peuvent fonctionner sous trois modes principaux : comme moteur, comme génératrice ou comme un système hybride récupératif.

Le fonctionnement des MSAP en régime moteur, pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, repose sur l'interaction entre le champ magnétique constant, produit par les aimants permanents du rotor sans nécessiter d'excitation externe, et le champ magnétique tournant généré par les enroulements du stator lorsqu'ils sont alimentés par un courant alternatif.

Le rotor tourne à la même vitesse que le champ magnétique statorique, c'est-à-dire en synchronisme, sans glissement.

Par contre le principe de fonctionnement d'un alternateur synchrone à aimants permanents, pour produire de l'électricité, repose sur la loi de Faraday et l'interaction entre le champ magnétique du rotor et les bobines du stator.

Les aimants permanents du rotor produisent un champ magnétique constant. Le rotor est entraîné par une source d'énergie mécanique externe, la rotation du rotor crée un champ magnétique tournant qui induit une force électromotrice (FEM) dans les bobines du stator selon la loi de Faraday. La FEM induite dans les bobines du stator produit une tension alternative (généralement triphasée).

Dans l'industrie, un système hybride récupératif à moteur synchrone est utilisé pour maximiser l'efficacité énergétique des équipements en exploitant les phases de décélération ou d'arrêt.

Pendant les phases de ralentissement ou de freinage, le moteur agit comme un générateur ou il transforme l'énergie cinétique de la charge en énergie électrique. Cette énergie est ensuite récupérée et soit réinjectée dans le réseau électrique interne, soit stockée dans des systèmes de batteries ou de supercondensateurs pour une réutilisation ultérieure [7].

1.5. Classification des machines à aimants permanents :

Les machines à aimants permanents utilisent des aimants fixés sur le rotor pour produire un champ magnétique constant, contrairement aux moteurs à courant continu traditionnel où le champ est généré par des électroaimants.

En conséquence, les pertes joules liées aux bobinages de l'excitation sont éliminées, mais le champ de l'excitation n'est plus contrôlable. Vu de l'extérieur, leur fonctionnement ressemble à celui d'un moteur à courant continu.

Toutefois, elles sont souvent considérées comme une évolution de la machine à courant continu, rendue possible par deux avancées : le développement d'aimants permanents puissants et celui de systèmes électroniques de commande, il s'agit en réalité de machines synchrones autopilotées, aussi appelées moteurs sans balais (Brushless) [3].

Ces machines n'utilisent ni balais ni collecteur, grâce aux progrès des technologies de semi-conducteurs, il est désormais possible de construire un système de commutation électronique, avec un contrôleur fonctionnant de manière équivalente à la commutation mécanique réalisée auparavant par les balais et le collecteur [8].

Dans une machine à courant continu classique, les balais et le collecteur tournant assurent à la fois la transmission du courant aux électroaimants du rotor et la commutation de ce courant selon la position relative du rotor et du stator.

Dans les machines à aimants permanents, les électroaimants du rotor sont remplacés par des aimants permanents, supprimant ainsi la nécessité d'alimenter le rotor en courant. Par ailleurs, des capteurs détectent la position du rotor et commandent la circulation du courant dans les enroulements statoriques assurant ainsi l'autopilotage de la machine en maintenant l'orthogonalité entre le flux magnétique du rotor et celui du stator. Le dispositif de commande peut être soit intégré au moteur pour les petites puissances, soit externe sous la forme d'un convertisseur de puissance de type onduleur [3].

Ils existent deux différents types de moteur [9] :

- Brushless DC (BLDC).
- Brushless AC (PMSM).

I.6. Différentes Structures des MSAP :

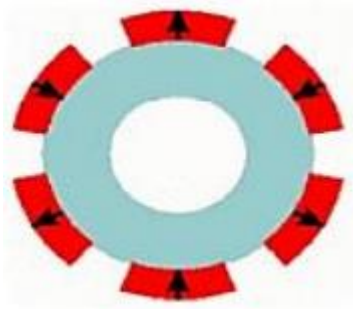
I.6.1. Machines à Flux Radial :

Dans une machine à flux radial, le flux magnétique suit un chemin radial, c'est-à-dire qu'il se déplace perpendiculairement à l'axe de rotation. Ce flux commence généralement au centre du rotor, où se trouvent les aimants permanents, puis traverse l'entrefer pour atteindre la première dent du stator. Ensuite, il passe par le fer arrière du stator et rejoint une autre dent, avant de revenir vers un autre pôle du rotor, complétant ainsi le circuit magnétique.

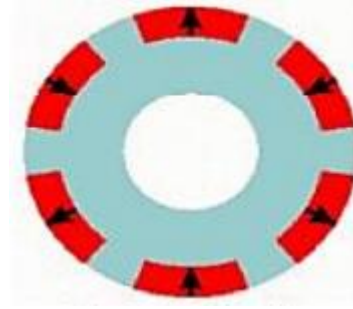
Ce parcours allongé du flux, allant d'un pôle à l'autre à travers les composants ferromagnétiques de la machine, permet une transmission efficace de l'énergie magnétique. Ce type de rotor est typiquement utilisé dans la majorité des moteurs à aimants permanents classiques et dans des configurations de moteurs synchrones.

Bien que leur conception simple et éprouvée leur donne une excellente performance dans une large gamme de vitesses, ils sont moins efficaces pour les applications nécessitant des moteurs particulièrement légers ou de faible taille parce que dans les machines radiales, le flux suit un chemin bidimensionnel, rendant l'utilisation d'acier à grains orientés impraticable. Ce type d'acier offre une perméabilité plus élevée, entraînant des pertes de fer réduites dans les machines à flux axial et une augmentation potentielle du rendement allant jusqu'à 2 % [10].

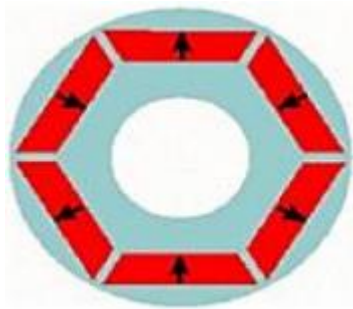
Les aimants permanents peuvent être placés de différentes manières sur le rotor, selon l'application et les besoins en performance.



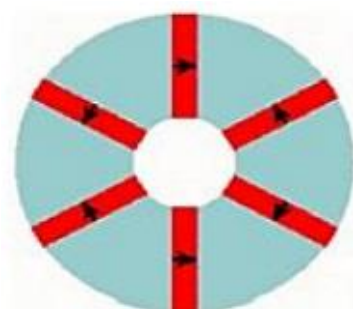
a) Aimants en surface



b) Aimants insérés



c) Aimants enterrés



d) Aimants à concentration de flux

Figure 1.4 : Les différentes structures des machines à flux radial.

I.6.1.1. Aimants en surface :

Dans cette configuration, les aimants permanents sont fixés directement sur la surface extérieure du rotor, souvent en arrangement radiaux. Cette position leur permet d'être en contact direct avec le flux magnétique généré par les enroulements du stator ce qu'améliore la densité du flux magnétique dans l'entrefer, augmentant ainsi le couple et l'efficacité globale. Bien que cette configuration soit largement utilisée en raison de : son rendement élevé, l'utilisation de l'espace, sa simplicité et son coût de fabrication réduit, mais, l'exposition des aimants permanents aux champs démagnétisant peut réduire temporairement la fiabilité des aimants [5].

I.6.1.2. Aimants insérés :

Comme pour les machines à aimants en surface, les aimants de type insérés sont aussi montés sur la surface mais à l'intérieur du rotor offrant ainsi une meilleure protection aux aimants tout en réduisant les risques de dégradation des propriétés magnétiques des matériaux. Toutefois, les espaces entre les aimants permanents sont partiellement remplies avec le fer pour réduire la reluctance magnétique (résistance au flux magnétique), orienter et concentrer la densité du flux magnétique ce qui permet d'améliorer le couple de reluctance afin d'optimiser le rendement de la machine et son efficacité [11].

I.6.1.3. Aimants enterrés :

Les aimants permanents dans cette configuration sont incorporés à l'intérieur du rotor, généralement logés dans des encoches ou des cavités, Les aimants sont mieux protégés car ils sont entièrement encapsulés par le matériau du rotor.

Cela limite les contraintes mécaniques des forces centrifuges en régime de haute vitesse et réduit leur exposition directe aux champs démagnétisant augmentant ainsi le couple et améliorant leur fiabilité à faible vitesse, ce qui est idéal pour les applications nécessitant des démarrages puissants ou un contrôle précis du couple, comme dans les véhicules électriques [12].

I.6.1.4. Aimants à concentration de flux :

Les aimants à concentration de flux sont des dispositifs conçus pour diriger ou concentrer un champ magnétique vers une zone spécifique, augmentant ainsi la densité du flux magnétique dans cette région. Leur conception est centrée sur l'utilisation de matériaux ferromagnétiques à haute perméabilité ou bien de reformer la structure de l'aimant ou du noyau magnétique qui jouent

un rôle crucial dans la concentration du flux. Ce qui conduit à une concentration du champ magnétique à certains points ou dans certaines régions afin de maximiser l'efficacité tout en minimisant les pertes et la taille des dispositifs [8].

I.6.2. Machines à Flux Axial :

Le moteur à flux axial a une conception particulière où le flux magnétique traverse l'entrefer dans une direction parallèle à l'axe de rotation et les enroulements sont disposés de manière plane et le flux a un chemin plus direct.

Cette direction du flux magnétique minimise les pertes thermiques, ce qui améliore l'efficacité [13].

Ce type de moteur peut avoir des rotors plus compacts et des moteurs à plus grande densité de puissance que les moteurs traditionnels à flux radial.

On le trouve dans des applications spécifiques nécessitant une conception compacte et des performances élevées.

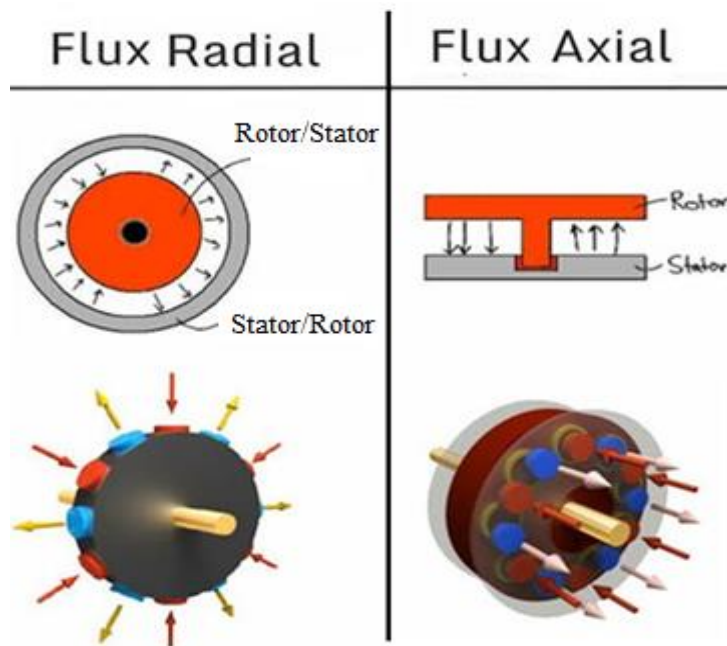


Figure 1.5: La circulation de flux magnétique radial et axial.

Plusieurs configurations de machine synchrone à flux axial peuvent être trouvées concernant les positions de rotor et les arrangements d'enroulement donnant des degrés de libertés

en vue de choisir la structure de la machine la plus appropriée dans l'application considérée. Les configurations possibles sont [5] :

I.6.2.1. Configuration à disque simple :

La structure avec un seul rotor et un seul stator est une configuration polyvalente, idéale pour de nombreuses applications où la simplicité et le coût jouent un rôle essentiel. C'est le design par défaut pour la plupart des MSAP classiques. Elle comprend un disque rotor avec des aimants permanents montés en surface ou enfouis, ainsi qu'un seul disque stator contenant les enroulements.

Cependant, cette structure présente une contrainte majeure qu'est une force axiale non équilibrée entre le rotor et le stator. Cela nécessite des arrangements de roulement plus complexes et un disque rotor plus épais, ce qui la rend moins avantageuse par rapport à d'autres structures où les forces axiales sont équilibrées.

I.6.2.2. Configuration à double rotor :

C'est une structure où le stator est positionné au centre, entouré de chaque côté par deux disques rotors équipés d'aimants permanents. Les deux rotors exercent des forces opposées sur le stator, ce qui équilibre les efforts mécaniques et réduit les contraintes sur les roulements cela diminue également les vibrations et améliore la stabilité mécanique.

D'un côté la structure avec stator central et double rotor est un choix stratégique pour des applications nécessitant un équilibre entre densité de puissance, compacité et stabilité mécanique. Elle est couramment utilisée dans des systèmes avancés où ces facteurs sont critiques ; mais d'un autre cette conception nécessite une précision élevée pour garantir un alignement parfait entre les composants avec une difficulté d'entretien.

I.6.2.3. Configuration à double stator :

Ce type de machines contient un rotor central situé entre deux disques statoriques identiques contenant les enroulements qui sont placés de part et d'autre d'un disque rotor avec des aimants permanents. La structure est particulièrement adaptée aux applications nécessitant une forte densité de puissance, une bonne gestion thermique et un couple élevé. Bien que plus coûteuse et complexe à fabriquer, elle offre des performances supérieures pour des systèmes de haute précision.

I.6.2.4. Configuration à stators et rotors multiples :

Cette configuration, appelée machine multi-étages ou multisegments, est une conception avancée utilisée pour augmenter la puissance, la densité de couple et l'efficacité. Elle se compose de plusieurs rotors et stators disposés alternativement le long de l'arbre central de la machine. Typiquement, un stator est suivi d'un rotor, puis d'un autre stator, formant ainsi des étages, chacun fonctionnant comme une machine individuelle et travaillant en coordination avec les autres. Chaque étage possède son propre entrefer, dont la taille est optimisée pour minimiser les pertes tout en maximisant l'efficacité.

Le nombre élevé de composants séparés permet de répartir les forces de manière symétrique, ce qui améliore la fiabilité de la machine et facilite sa maintenance. Cette structure permet également d'accroître la puissance sans élargir la machine, un avantage significatif pour les applications où l'espace radial est limité.

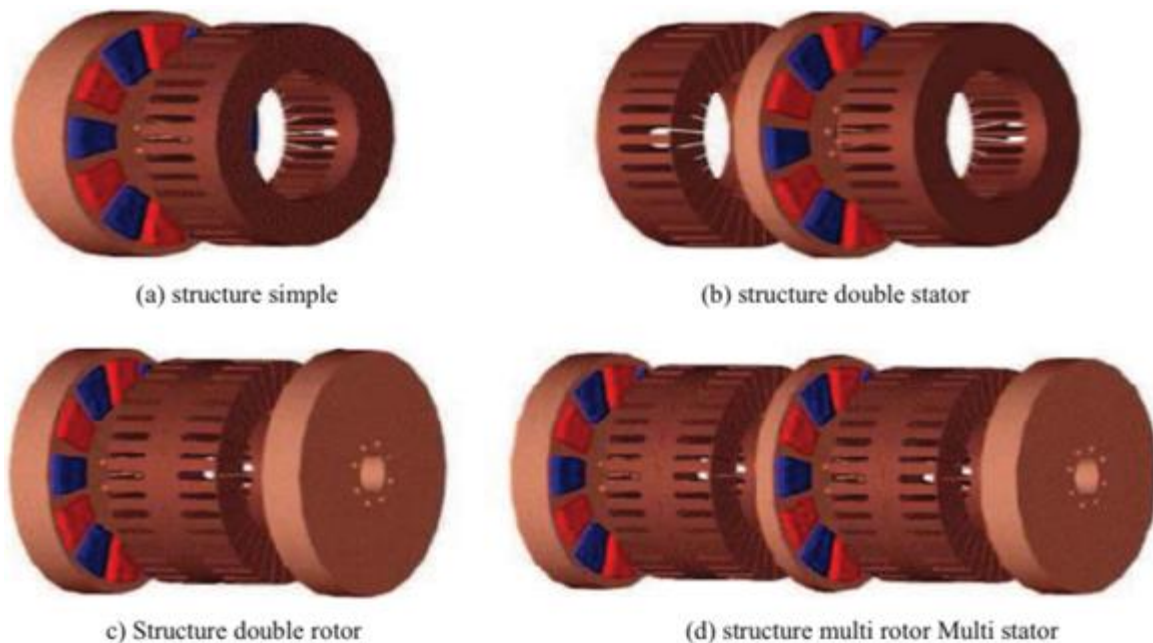


Figure 1.6 : Configuration des MSAP à flux axial.

Cependant, cette configuration nécessite des systèmes de refroidissement pour gérer la chaleur générée par le nombre accru de composants actifs, ainsi qu'un contrôle précis des flux magnétiques entre les étages pour éviter toute interférence nuisible. Bien que complexe et coûteuse,

cette architecture constitue une solution idéale pour les applications nécessitant des performances élevées dans des espaces restreints.

I.6.3. MSAP à flux transverse :

Les MSAP à flux transverse se distinguent par une configuration unique qui diffère fondamentalement des machines à flux radial ou axial. Dans ces machines, le flux magnétique traverse des circuits magnétiques en forme de fer à cheval, entourant les enroulements statoriques pour chaque phase. Cette conception est semblable à l'assemblage de plusieurs moteurs monophasés montés sur le même arbre.

Les enroulements statoriques sont organisés de manière à générer un champ magnétique tridimensionnel, tandis que les phases sont disposées avec un décalage angulaire précis pour garantir un mouvement fluide du rotor [14].

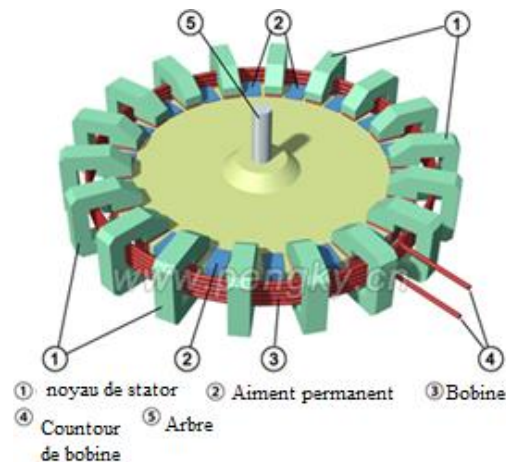


Figure 1.7: Principe de la MSAP à flux transversal.

Cette conception permet de découpler la gestion du flux magnétique et celle des enroulements, simplifiant ainsi la conception et l'entretien. Elle offre également la possibilité de produire un couple volumique extrêmement élevé, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications nécessitant un rendement mécanique maximal, telles que les moteurs de véhicules électriques lourds et les générateurs à basse vitesse [15].

Cependant, ces machines génèrent un couple pulsatoires élevé, ce qui peut entraîner des vibrations indésirables. De plus, leur coût est relativement élevé, en raison de l'utilisation de matériaux avancés nécessaires pour minimiser les pertes par courants de Foucault.

Enfin, ces matériaux, bien que performants, présentent souvent une induction de saturation relativement faible, ce qui peut limiter certaines performances dans des conditions spécifiques [8].

I.7. Avantages et domaines d'utilisation de la MSAP

Ces machines offrent de nombreux avantages, on peut les résumer dans les points ci-dessous :

- 1. Haute efficacité énergétique** : Aucun système d'excitation externe n'est nécessaire, réduisant ainsi les pertes énergétiques.
- 2. Compacité et légèreté** : Idéales pour des applications nécessitant un espace et un poids minimaux, comme dans les véhicules électriques.
- 3. Haute densité de couple** : Permet des performances optimales à faible vitesse, générant un couple élevé dans un volume réduit.
- 4. Maintenance réduite** : L'absence de balais ou de collecteurs entraîne moins d'usure et moins de besoins en maintenance.
- 5. Longévité accrue** : En raison de l'absence de composants soumis à l'usure, les MSAP ont une durée de vie plus longue.
- 6. Moins de production de chaleur** : Elles génèrent moins de chaleur, ce qui réduit les pertes énergétiques et améliore leur fiabilité.
- 7. Performance à haute vitesse** : Bien adaptées aux applications à grande vitesse grâce à leur conception simple.
- 8. Consommation d'énergie réduite** : Plus efficaces que d'autres types de moteurs, ce qui réduit les coûts opérationnels.

Ces nombreux avantages les rendent idéales pour des applications où la compacité, l'efficacité énergétique et la faible maintenance sont essentielles.

Dans le secteur des véhicules électriques, elles sont couramment utilisées pour les moteurs de voitures électriques et de motos, ainsi que dans les trains à grande vitesse. Elles trouvent également leur place dans les appareils électroménagers, tels que les ventilateurs et les pompes.

Dans le domaine de l'automatisation industrielle, les MSAP sont présentes dans les robots industriels, les machines à commande numérique par ordinateur et autres systèmes de production nécessitant une grande précision.

Enfin, ces machines sont employées dans les générateurs et alternateurs pour la production d'énergie, ainsi que dans les systèmes de propulsion maritime, notamment pour les navires électriques et hybrides.

I.8. Inconvénients d'utilisation de la MSAP :

Bien que les MSAP présentent de nombreux avantages, elles comportent également certains inconvénients.

Tout d'abord, leur coût initial est relativement élevé en raison des aimants permanents de haute qualité et des matériaux spécifiques nécessaires à leur fabrication, aussi la complexité de la conception et de la fabrication, notamment en ce qui concerne l'assemblage des aimants et des circuits magnétiques, peut augmenter le temps et le coût de production.

De plus, les aimants permanents peuvent être sensibles à des températures élevées, ce qui peut entraîner une démagnétisation partielle et une perte de performance, limitant ainsi leur utilisation dans des environnements à haute température.

Les MSAP peuvent également générer des vibrations et un couple pulsatoire, ce qui peut entraîner des nuisances sonores et affecter la stabilité du système.

Enfin, bien que la maintenance des machines soit généralement réduite, la défaillance des aimants permanents ou des composants magnétiques peut nécessiter des réparations coûteuses.

Ainsi, Les MSAP présentent des défis liés à la gestion du flux magnétique. La difficulté de dé fluxage, c'est-à-dire de contrôler ou de réduire le flux magnétique, est un problème majeur, car les aimants permanents fournissent un champ magnétique fixe et difficile à ajuster.

De plus, la complexité de l'électronique de commande augmente, car il est nécessaire d'utiliser un capteur de position pour assurer la synchronisation du rotor avec le stator.

Par ailleurs, l'impossibilité de régler l'excitation, contrairement aux machines à excitation externe, limite la flexibilité de la machine dans certaines applications, notamment lorsqu'une adaptation du champ magnétique est requise.

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exploré des généralités sur la MSAP, en détaillant sa constitution, son principe et modes de fonctionnement, ses structures et les différents types de machines qui en résultent, ainsi que ses avantages. Nous avons abordé également les matériaux utilisés pour les aimants permanents, l'évolution technologique des aimants à base de terres rares, et la manière dont ces innovations ont influencé les performances globales des machines électriques.

Cependant, comme nous l'avons vu, malgré tous ces avantages et points forts, ce type de machine présente également des points faibles, ce qui les rend vulnérables aux défauts.

Le second chapitre sera consacré à l'état de l'art des défauts des MSAP et leurs outils de diagnostic.

Chapitre II :

***Etat de l'art des défauts des MSAP et de leurs outils de
diagnostic***

II.1. Introduction :

L'étude des défauts dans les dispositifs électriques est un domaine qui a pris une place importante depuis que les exigences de fiabilité, de sûreté et de disponibilité sont devenues assez sévères dans les systèmes industriels.

Ce deuxième chapitre présente les défauts les plus courants dans les machines électriques sont ensuite cités avec une brève description de leurs apparitions et leur classification. Par la suite, nous réaliserons un état de l'art des approches utilisées pour diagnostiquer les défauts, en évoquant les deux grandes familles de méthodes : les techniques à base de modèles comportementaux et sans modèles.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous exposons l'état de l'art de surveillance des défauts des machines électriques tels que : les grandeurs mesurables, les signaux de défauts et la problématique de détection et de diagnostic de défauts des machines à aimants permanents par analyse de signaux.

II.2. Défauts des machines électriques :

II.2.1. Etude statistiques sur les défauts de la machine électrique :

Plusieurs études statistiques ont été effectuées, à partir des années 80 jusqu'à présent, sur les défauts dans la machine électrique de moyenne et grande puissance. Cependant, il est toujours difficile de donner une répartition exacte des défaillances dans les différentes parties de la machine, parce qu'elle dépend de plusieurs facteurs tels que le type de la machine, le type d'alimentation, l'environnement d'application et autres [16].

Une étude statistique a été effectuée en 1988 par la compagnie d'assurance allemande Allianz sur les pannes de la machine électrique de moyenne puissance (de 50kW à 200kW) [16].

La distribution des défauts dans les différentes parties du moteur montré que 60% des pannes se situent au stator, 22% au rotor et 18% dans les autres régions telles que les roulements, sont représenté dans la figure 2.1 :

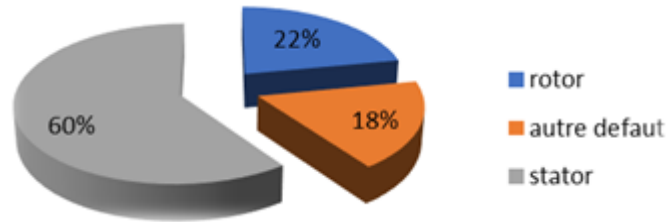


Figure 2.7: Etude statistique sur les défauts des machines électrique.

II.2.2. Défauts au rotor :

Presque toutes les machines électriques ont une similarité de construction du stator et, par conséquent, les défauts sont également les mêmes. Toutefois, il existe une gamme de configurations du rotor selon le type de la machine. Les défauts au rotor dépendent du type de la machine considérée, parmi lesquels on peut citer les plus importants :

II.2.2.1. Défauts de roulements mécaniques :

Les roulements mécaniques sont des composants essentiels dans de nombreuses machines et équipements. Effectivement, ils représentent l'élément de maintien de l'axe de la machine assurant une bonne rotation du rotor. Cependant, ils peuvent présenter divers défauts qui affectent leur performance et leur durée de vie. Voici quelques défauts courants que l'on peut observer dans les roulements mécaniques.

Les roulements à billes, comme le montre la figure 2.2, sont couramment utilisés dans une grande variété de machines électriques grâce à leur rapport qualité-prix supérieur.



Figure 2.8: Composants d'un roulement à billes.

Les défauts de roulements représentent de 40% à 90% du total de défauts en fonction du type et de la taille de la machine [18]. Nous pouvons distinguer quatre types de défauts de roulement, en fonction de leur localisation [16].

a) Défauts de bague externe :

Les défauts de la bague externe d'un roulement mécanique peuvent entraîner un dysfonctionnement et réduire la durée de vie du roulement.

Les causes de défauts externes :

- 1. Erosion :** Une usure ou une détérioration de la surface de la bague, souvent causée par des particules abrasives présentes dans le lubrifiant ou l'environnement.
- 2. Pitting :** Apparition de petits cratères ou cavités sur la surface de la bague, généralement en raison d'une fatigue de contact. Cela peut être causé par des charges cycliques élevées sur le roulement.
- 3. Fissures :** Des fissures peuvent se former en raison d'un sur stress ou de variations de température. Ces fissures peuvent entraîner des défaillances locales ou la rupture complète de la bague.
- 4. Déformation plastiques :** Si le roulement est soumis à des charges excessives, il peut se déformer de manière permanente, compromettant ainsi son fonctionnement.
- 5. Corrosion :** L'exposition à des environnements agressifs (humidité, produits chimiques) peut provoquer la corrosion de la bague externe.
- 6. Défaillance d'alignement :** Un mauvais alignement des axes peut entraîner une charge inégale sur la bague externe, ce qui peut générer une usure prématurée.
- 7. Déséquilibre :** Un déséquilibre dans l'assemblage peut causer des vibrations excessives, conduisant à des dommages à la bague externe.

b) Défauts de bague interne :

Les défauts de la bague interne d'un roulement mécanique peuvent également affecter le fonctionnement.

c) Défaut de billes :

Les billes d'un roulement mécanique jouent un rôle crucial dans le fonctionnement global du système. Tout défaut dans ces éléments peut compromettre le rendement, la stabilité et la durée de vie du roulement.

d) Défaut de cage :

La cage (ou « carter ») d'un roulement mécanique a pour rôle de maintenir les billes ou les rouleaux en position et de les séparer afin de garantir un fonctionnement fluide. Les défauts de la cage peuvent également affecter la performance générale du roulement.

Une surveillance régulière, des inspections visuelles et l'analyse des vibrations sont essentielles pour détecter ces défauts avant qu'ils ne provoquent des défaillances mécaniques significatives et ainsi éviter des pannes mécaniques.

Une bonne lubrification et un nettoyage approprié peuvent aussi assurer le bon fonctionnement et la longévité des composants mécaniques.

II.2.2.2. Excentricité du rotor :

Dans une machine idéale, le centre du rotor est aligné sur celui du stator et l'axe de rotation du rotor est le même que l'axe du stator, comme illustré dans la figure 2.3. Toutefois, les conséquences des défauts mécaniques peuvent se manifester au niveau de l'entrefer par un décentrement du rotor, se traduisant par des oscillations de couple [16].

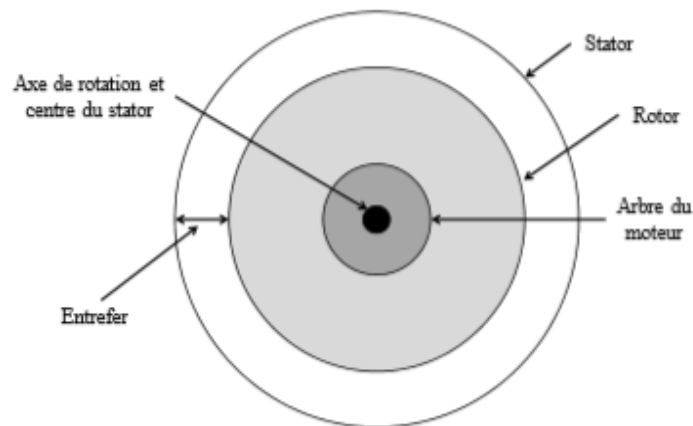


Figure 2.9: Positions du rotor et du stator dans une machine parfaite.

Ce phénomène est appelé excentricité définie comme une asymétrie dans l'entrefer entre le stator et le rotor [8]. Ce défaut existe en général dans la machine, mais avec un faible niveau, dès sa fabrication et évolue avec le temps.

a) Types d'excentricité :

L'excentricité statique (Figure. 2.4 (a)) – généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.

L'excentricité dynamique (Figure 2.4. (b)) – correspond, elle a un centre de rotation du rotor différent du centre géométrique du stator, mais, de plus, le centre du rotor tourne autour du centre géométrique de ce stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes.

L'excentricité mixte (Figure 2.4. (c)) – la somme des deux cas présentés ci-avant :

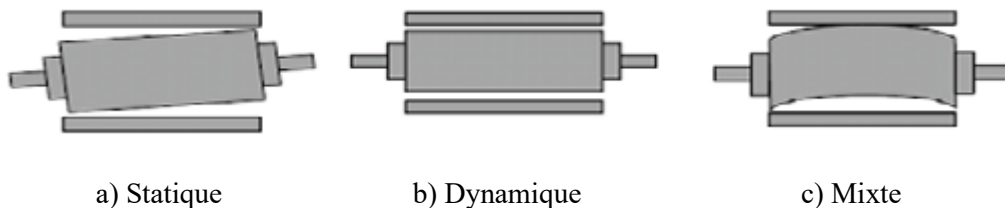


Figure 2.10: Les types d'excentricités.

b) L'impacts de l'excentricité :

1. Vibrations : Une excentricité entraîne des forces d'excitation qui peuvent provoquer des vibrations excessives. Cela peut réduire la durée de vie des composants mécaniques et électriques du moteur.

2. Perte d'efficacité : L'extraction d'énergie mécanique peut être compromise par des frottements supplémentaires et des pertes dues à des courants de fuite.

3. Chauffage excessif : Les vibrations et frottements peuvent causer une surchauffe, ce qui, à long terme, pourrait endommager les aimants permanents ou en réduire l'efficacité.

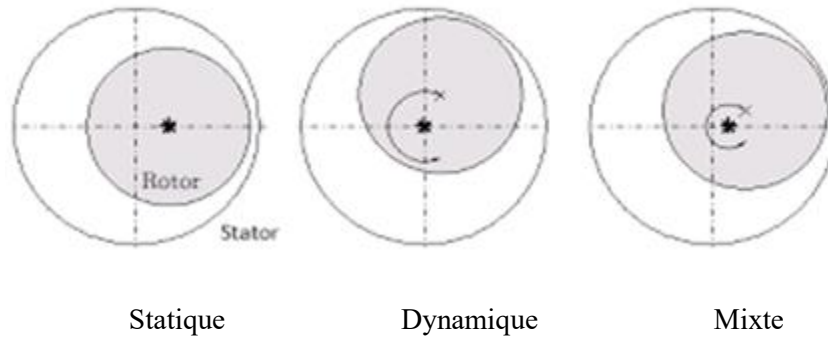


Figure 2.11: Défauts d'excentricité.

II.2.2.3. Défaut de démagnétisation pour les machines synchrones à aimants permanent :

Le défaut de démagnétisation dans MSAP se réfère à une réduction involontaire et parfois irréversible de la force du champ magnétique produit par les aimants permanents du rotor. Contrairement aux machines synchrones classiques à rotor bobiné, où le champ magnétique est généré par un courant d'excitation dans des enroulements, les MSAP dépendent de la qualité magnétique intrinsèque de leurs aimants permanents.

a) Causes de la démagnétisation :

Plusieurs facteurs peuvent conduire à la démagnétisation des aimants permanents dans les MSAP :

- 1. Température excessive :** C'est l'une des causes les plus courantes. Chaque matériau d'aimant permanent a une température de Curie au-delà de laquelle il perd son aimantation. Même en dessous de cette température, une exposition prolongée à des températures élevées peut entraîner une démagnétisation progressive.
- 2. Champs magnétiques externes importants :** Des champs magnétiques opposés suffisamment intenses, générés par des courants de défaut statorique, un flux d'affaiblissement excessif ou des sources externes, peuvent démagnétiser les aimants.

3. Courants de défaut statorique : Des courts-circuits dans les enroulements statoriques peuvent générer des courants très élevés qui créent de forts champs démagnétisant au niveau du rotor.

4. Vieillesse des aimants : Au fil du temps, les propriétés magnétiques des aimants permanents peuvent naturellement se dégrader légèrement.

5. Dommages mécaniques : Des chocs ou des vibrations importants peuvent endommager la structure des aimants au niveau microstructural, entraînant une perte d'aimantation.

6. Corrosion et oxydation : Certains matériaux d'aimants permanents, comme le NdFeB (néodyme-fer-bore), sont sensibles à la corrosion si leur revêtement protecteur est endommagé, ce qui peut altérer leurs propriétés magnétiques.

7. Conception inadéquate : Une conception de moteur mal optimisée qui soumet les aimants à des contraintes magnétiques excessives pendant le fonctionnement normal peut accélérer la démagnétisation.

b) Conséquences de la démagnétisation :

La démagnétisation, qu'elle soit uniforme (affectant tous les aimants de manière égale) ou locale (affectant seulement certaines parties d'un aimant ou certains aimants), peut avoir plusieurs conséquences néfastes sur le fonctionnement de la MSAP :

1. Réduction du couple et de la puissance de sortie : La force du champ magnétique rotorique étant affaiblie, le couple électromagnétique maximal que le moteur peut produire diminue.

2. Diminution de la tension induite (CEM) : La tension générée par le moteur (en mode générateur) ou la force contre-électromotrice (en mode moteur) est proportionnelle au flux magnétique. Une démagnétisation réduit cette tension.

3. Augmentation du courant statorique : Pour maintenir le même couple de charge avec un champ magnétique rotorique plus faible, le moteur doit tirer un courant statorique plus élevé, ce qui entraîne des pertes cuivre accrues et un échauffement supplémentaire.

4. Baisse de l'efficacité : Les pertes accrues et la réduction du rendement global entraînent une diminution de l'efficacité de la machine.

5. Augmentation des vibrations et du bruit : Une démagnétisation non uniforme peut entraîner un déséquilibre du flux magnétique dans l'entrefer, provoquant des vibrations et un bruit accru.

6. Harmoniques supplémentaires dans le courant et la tension : Une démagnétisation locale peut introduire des harmoniques indésirables dans les signaux électriques du moteur.

7. Instabilité du contrôle : Dans les systèmes de contrôle de moteur, une démagnétisation non détectée peut rendre le contrôle du couple et de la vitesse plus difficile et potentiellement instable.

II.2.2.5. Les défaillances de rotor :

Les défaillances du rotor dans les MSAP sont principalement liées à l'intégrité des aimants permanents eux-mêmes et à leur fixation mécanique. Contrairement aux machines synchrones à rotor bobiné, les MSAP n'ont pas d'enroulements rotoriques actifs. Les principales défaillances du rotor dans les MSAP sont particulièrement celles liées aux causes de démagnétisation des aimants permanents ; citées ci-dessus.

Il est crucial de surveiller l'état du rotor des MSAP pour garantir des performances fiables et prévenir des défaillances coûteuses. La détection précoce de ces problèmes peut impliquer la surveillance de la température, l'analyse des vibrations, et la surveillance des performances du moteur (couple, courant, tension) pour détecter des anomalies.

II.2.3. Défauts au stator :

II.2.3.1. Les courts-circuits :

Les courts-circuits dans les machines synchrones autopilotées (MSAP) constituent une Catégorie de défauts graves pouvant affecter aussi bien le stator que le système d'alimentation. Ils se manifestent généralement par :

– **Court-circuit entre spire** : L'isolation défectueuse entre les fils adjacents d'une même phase affectent une partie de spire court-circuit ce qui modifie le champ magnétique et peut entraîner un échauffement localisé.

– **Un court-circuit entre phases** : Se produit lorsqu'il y a un contact accidentel entre deux phases différentes, par exemple à cause d'un défaut d'isolation entre elles. Ce phénomène entraîne la circulation d'un courant très élevé entre les phases, ce qui provoque souvent le déclenchement des dispositifs de protection. La conséquence principale est une surchauffe brutale pouvant causer des dommages irréversibles aux équipements.

– **Un court-circuit phase-terre** : Survient lorsqu'il y a une perte d'isolation entre une phase et la carcasse métallique reliée à la terre. Cela engendre un courant de fuite vers la terre, susceptible d'activer les disjoncteurs différentiels. Ce type de court-circuit présente un danger électrique pour les utilisateurs et peut également détériorer le bobinage des appareils concernés.

– **Un court-circuit entre bobines** : Dans le stator d'une machine électrique se produit lorsque deux bobines distinctes entrent en contact électrique anormal. Ce défaut entraîne un déséquilibre des courants, un échauffement localisé dû à l'effet Joule et une perturbation du champ magnétique, pouvant causer des vibrations, une perte de couple ou un déclenchement des protections.

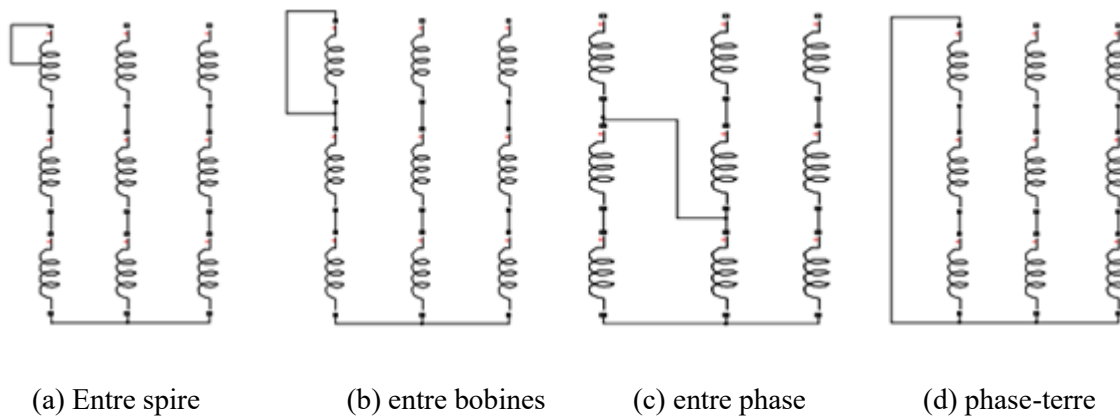


Figure 2. 12: Représentation des courts-circuits

Les défauts au stator, notamment le court-circuit statorique, concernent principalement la dégradation de l'isolation sous l'effet d'une surcharge thermique ou mécanique, qui peut être causée par l'usure du vernis appliqué sur les enroulements du stator ou par la fissuration des isolants[18].

L'augmentation de la température est essentiellement due à l'élévation des courants absorbés, qui sont liés aux pertes énergétiques. Ces pertes peuvent résulter d'une variation soudaine de l'amplitude de la tension d'alimentation, d'un déséquilibre électrique, d'une charge mécanique excessive, d'un nombre trop élevé de démarrages successifs de la machine [19].

Lorsqu'on a une mauvaise disposition des conducteurs ou une excentration du rotor ça veut dire des vibrations continues et des flexions répétées engendrés. Sous l'effet des vibrations et des forces électromagnétiques, les câbles mal fixés peuvent bouger, frotter contre d'autres composants et ainsi augmenter la résistance de contact, générant des points chauds qui accélèrent l'usure de l'isolation. De plus, ils entraînent une variation irrégulière de l'entrefer, provoquant une distribution inégale du champ magnétique. Cela peut induire des courants de Foucault excessifs et des surchauffes localisées dans le fer du stator [8].

Une mauvaise qualité de fabrication des bobinages dans une machine électrique ne se limite pas à une mauvaise fixation ou disposition des conducteurs, mais inclut également une imprégnation insuffisante du vernis isolant. Cette insuffisance réduit la résistance mécanique et thermique de l'isolation, accélérant son vieillissement. Par ailleurs, lors du vernissage ou du moulage des enroulements, des bulles d'air peuvent être piégées. Lorsqu'elles sont soumises à un niveau et à une forme de tension critique, ces bulles peuvent entraîner des décharges partielles, provoquant une érosion progressive du matériau isolant.

Environnementalement parlant, la contamination par des corps étrangers (comme la poussière, l'huile, l'humidité ou d'autres particules) réduit les capacités de dissipation thermique d'une machine électrique en formant une couche isolante sur ses surfaces de refroidissement [19].

Cette couche entrave l'évacuation de la chaleur générée par les pertes électriques et mécaniques, entraînant une élévation de la température interne de la machine. D'un côté électrique ces corps étrangers forment un pont résistif entre les conducteurs et le circuit magnétique. Cela entraîne de petites décharges électriques dues à la différence de potentiel [19].

Enfin, une mauvaise ventilation, une obstruction du système de refroidissement ou un environnement ambiant à haute température affectent également la durée de vie de l'isolation du stator [19].

II.2.3.2. Les défauts d'alimentations :

Les défauts d'alimentation dans les machines synchrones autopilotées (MSAP) concernent principalement les anomalies au niveau de l'onduleur ou du système de commande, responsables de la fourniture des tensions et courants au stator. Ces défauts incluent notamment les déséquilibres de tension, les coupures de phase, les erreurs de commutation ainsi que les défaillances de composants de puissance tels que les transistors IGBT ou MOSFET. Ils peuvent engendrer des perturbations significatives dans le fonctionnement de la machine, les que des déséquilibres de courant, des couples pulsatoires, des échauffements anormaux ou des oscillations mécaniques. Ces perturbations peuvent également conduire à l'apparition de défauts secondaires, notamment au niveau des enroulements ou du circuit magnétique [20].

II.2.4. Défauts environnementaux :

Les défauts environnementaux qui peuvent affecter une machine synchrone à aimants permanents (PMSM - Permanent Magnet Synchrones Machine) sont liés aux conditions extérieures d'exploitation. Ces défauts ne viennent pas d'un problème de conception ou de fabrication, mais bien de l'environnement dans lequel la machine fonctionne.

Voici les principaux :

- Température excessive.
- Humidité ou immersion.
- Atmosphères corrosives (sel, produits chimiques, etc.)
- Poussière ou particules en suspension.
- Vibrations mécaniques excessives.
- Rayonnements électromagnétiques ou parasites.

II.3. Différentes approches de diagnostic :

Tout défaut affectant une machine électrique peut se manifester par des modifications des propriétés des signaux mesurés ou bien par des modifications de sa topologie interne. Cela permet de distinguer entre deux grandes catégories de méthodes de diagnostic : les méthodes à base de

modèles qui nécessitent une connaissance approfondie du système et les méthodes sans modèles qui se reposent sur les données Recueillies du processus [21].

II.3.1. Approche avec modèle :

Différentes techniques de modélisation peuvent être employées, allant de modèles physiques basés sur les lois fondamentales du système à des modèles statistiques ou issus de l'apprentissage machine, capables d'apprendre le comportement normal à partir de données. L'efficacité de cette approche dépend crucialement de la précision du modèle à représenter le système sain et de sa sensibilité aux changements induits par les défauts.

L'avantage principal d'une approche avec modèle réside dans sa capacité à détecter et potentiellement diagnostiquer des défauts même subtils, en se basant sur une compréhension approfondie du fonctionnement du système.

De plus, elle peut permettre une détection précoce des anomalies, avant qu'elles n'entraînent des défaillances majeures. Cependant, la complexité de développement et de maintenance du modèle, ainsi que sa robustesse face aux incertitudes et aux variations normales de fonctionnement, représentent des défis importants.

Les approches de diagnostic à base de modèles les plus citées dans la littérature sont celles basées soit sur une estimation d'état du système par observateurs ou par espace de parité, soit sur une estimation des paramètres [16].

2.3.1.1. Approche par estimation paramétrique :

La détection des défauts fait partie du principe qu'un défaut dans un système se manifeste par un changement dans ses paramètres caractéristiques. Cette approche consiste à établir un modèle du système sain puis estimer les paramètres en temps réel. Une fois les paramètres estimés, on les compare en temps réel avec leurs valeurs de référence, celles qui correspondent à un fonctionnement sans défaut, afin de détecter d'éventuelles anomalies, qui seront localisées et identifier une fois détectées.

L'approche par estimation paramétrique est particulièrement intéressante car elle permet de relier directement les symptômes observés (variations des signaux mesurés) à des changements dans les caractéristiques physiques du système, offrant ainsi une interprétation physique des défauts

détectés. Cependant, elle nécessite une bonne connaissance du système à modéliser et la capacité à estimer les paramètres avec précision en temps réel.

II.3.1.2. Approche à base d'observateur :

C'est une méthode qui est couramment utilisée dans le contrôle des systèmes dynamiques. Un modèle mathématique du système sain est développé, généralement sous forme d'équations d'état qui décrivent l'évolution des variables internes du système (les états) en fonction des entrées et des sorties. Un observateur d'état est conçu sur la base du modèle du système. L'observateur est un système dynamique qui utilise les entrées et les sorties mesurées du système réel pour estimer en temps réel les états internes du système. Ces états estimés par l'observateur sont utilisés pour reconstruire les sorties du système. Ces sorties estimées sont ensuite comparées aux sorties réelles mesurées du système. La différence entre les sorties réelles et les sorties estimées constitue les résidus, qui sont proches de zéro en absence de défauts. En cas d'apparition d'un défaut les résidus sont significativement différents de zéro. L'analyse de ces résidus (leur amplitude, leur forme, leur évolution temporelle, leur fréquence) permet de détecter la présence d'un défaut et, dans certains cas, de l'isoler et de l'identifier.

II.3.1.3. Approche par espace de parité :

Est une méthode de détection de défauts qui repose sur l'exploitation des redondances analytiques inhérentes au modèle mathématique d'un système. Contrairement aux approches basées sur l'estimation d'état (comme l'approche par observateur), l'approche par espace de parité se concentre sur la vérification de la consistance entre les entrées et les sorties mesurées du système et les contraintes imposées par son modèle.

II.3.2. Approche sans modèle :

Les approches de diagnostic sans modèles ne nécessitent aucun modèle mathématique précis du système à surveiller. Les informations acquises sur le procédé considéré permettent de caractériser son fonctionnement. Ces informations, appelées indicateurs de défauts, sont analysées par des techniques de traitement du signal, des méthodes statistiques ou par des méthodes non statistiques à base de connaissance, comme représenté dans la figure 2.7.

Les méthodes sans modèle ont l'avantage de s'appuyer sur des connaissances du système reposant juste sur un retour d'expérience, ce qui est le mieux adapté à certaines applications industrielles complexes où la conception d'un modèle précis est difficile [16].

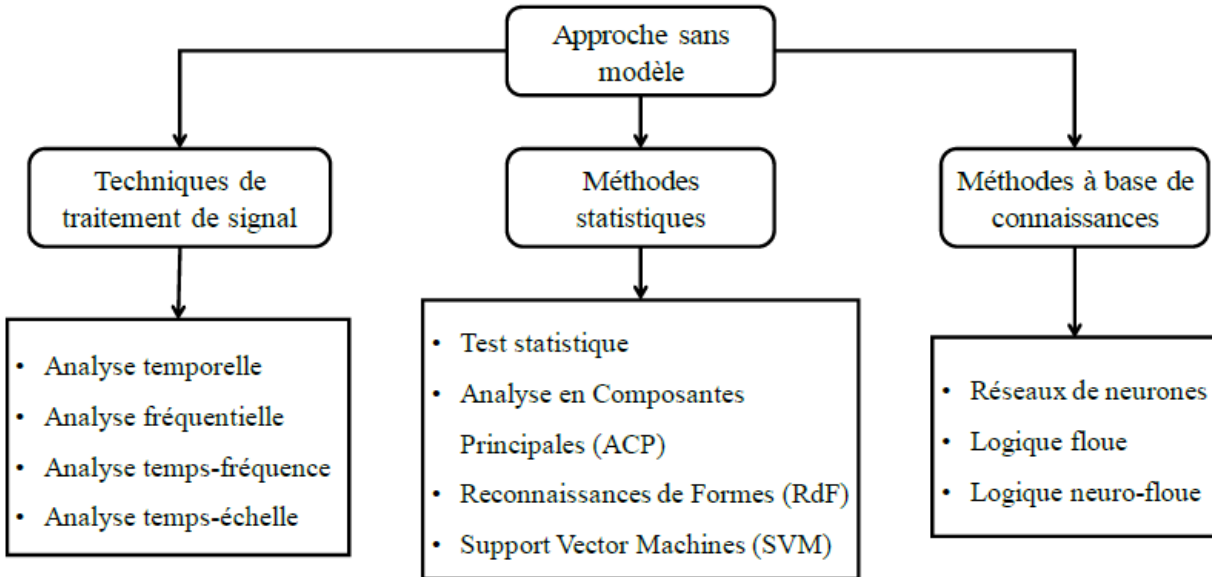


Figure 2.7. Classification des approches de diagnostic sans modèle

II.4. Surveillance des défauts des machines électriques :

La surveillance des défauts des machines électriques constitue un domaine de recherche essentiel dans les systèmes industriels modernes. Elle vise à réduire les coûts de maintenance tout en garantissant la fiabilité, la sécurité et l'efficacité énergétique des équipements. Cette approche permet de passer d'une maintenance corrective à une stratégie de maintenance prédictive.

Traditionnellement, le diagnostic reposait sur des inspections périodiques ou des mesures globales, souvent insuffisantes pour détecter les défaillances à un stade précoce. Toutefois, les progrès récents en matière de capteurs, d'électronique de puissance et d'outils de traitement du signal ont permis le développement de systèmes de surveillance en temps réel. Ces systèmes s'appuient sur l'analyse de grandeurs physiques variées, capables d'identifier les défauts dès leur apparition, avant qu'ils ne provoquent des pannes critiques.

II.4.1. Grandeurs mesurables et signaux de défauts :

Dans les systèmes industriels, et en particulier dans les machines électriques telles que les MSAP, la surveillance du fonctionnement repose sur la mesure de certaines grandeurs physiques et électriques. Ces grandeurs mesurables permettent d'évaluer l'état de la machine en temps réel.

Lorsqu'un défaut survient, il se manifeste souvent par une variation anormale de l'une ou plusieurs de ces grandeurs. Le but de la mesure est alors de transformer ces variations en informations exploitables par le système d'acquisition, afin de détecter, localiser, voire anticiper les défaillances, à l'aide de techniques de diagnostic appropriées.

Les grandeurs mesurables les plus fréquemment employées dans la littérature sont les suivantes :

II.4.1.1. Grandeurs électriques :

- Courant statorique.
- Tension d'alimentation.
- La tension du point neutre.

II.4.1.2. Grandeurs mécaniques :

- Vibrations : déplacement, vitesse et accélération
- Vitesse de rotation

II.4.1.3. Grandeurs thermiques et chimiques :

- Température de : enroulements, rotor, système de refroidissement,
- Humidité, gaz.

II.4.1.4. Grandeurs magnétiques :

- Flux magnétique statorique et rotorique
- Harmoniques du champ magnétique.
- Le flux de dispersion

II.4.1.5. Grandeurs acoustiques et ultrasonores :

- Niveau sonore de bruit et fréquence des vibrations

- Décharges électriques partielles

Une représentation de quelques mesures sur la machine, parmi celles citées ci-dessus, est indiquée sur la figure 2.8.

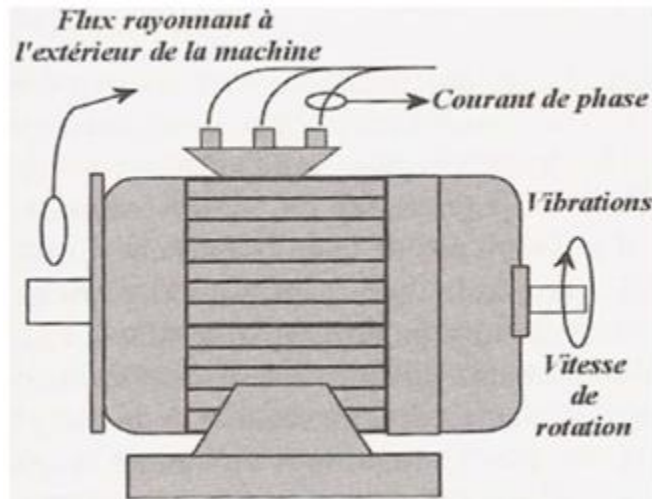


Figure 2.13: Représentation de quelques grandeurs mesurables sur une machine électrique.

II.4.2. Détection et localisation des défauts par analyse des signaux :

La détection précoce des défauts est cruciale pour maintenir l'intégrité et la sécurité des systèmes mécaniques, électriques et électroniques. L'analyse de signaux permet de transformer des données brutes en informations exploitables, facilitant ainsi la prise de décision et la mise en œuvre de mesures correctives. Ce document présente les principes fondamentaux de l'analyse de signaux, les techniques couramment utilisées, ainsi que des études de cas illustrant leur efficacité.

Principes généraux :

1. Détection : consiste à déterminer la présence d'un défaut en analysant les écarts entre le comportement réel du système et son comportement attendu, souvent modélisé. Ces écarts sont appelés résidus, qui doivent être proches de zéro en fonctionnement normal et s'écarter en cas de défaut [31].

2. Localisation : une fois un défaut détecté, il faut identifier le composant ou la zone défectueuse. Cela se fait généralement par une logique de décision appliquée aux résidus générés par le modèle du système [31].

Principes de l'Analyse de Signaux :

L'analyse de signaux repose sur plusieurs concepts clés, notamment :

- 1. Acquisition de données :** Collecte de signaux à partir de capteurs ou d'instruments de mesure.
- 2. Prétraitement :** Nettoyage et filtrage des données pour éliminer le bruit et les interférences.
- 3. Extraction de caractéristiques :** Identification des paramètres significatifs qui peuvent indiquer la présence d'un défaut.
- 4. Classification et détection :** Utilisation d'algorithmes pour déterminer si un signal est normal ou anormal.

II.4.2.1. Techniques de Détection des Défauts :**1. Analyse Fréquentielle :**

L'analyse fréquentielle, notamment à travers la Transformée de Fourier, permet d'examiner les composantes fréquentielles d'un signal. Les défauts peuvent souvent se manifester par des pics ou des anomalies dans le spectre de fréquence.

Des méthodes avancées telles que la Transformée en Ondelette et l'Analyse de Hilbert offrent des outils puissants pour la détection de défauts, en permettant une analyse à la fois dans le domaine temporel et fréquentielle.

2. Analyse Temporelle :

L'analyse temporelle consiste à étudier les variations d'un signal au fil du temps. Des techniques comme l'analyse des enveloppes peuvent aider à détecter des défauts dans des systèmes rotatifs.

3. Méthodes de Traitement du Signal :

Des méthodes avancées telles que la Transformée en Ondelette et l'Analyse de Hilbert offrent des outils puissants pour la détection de défauts, en permettant une analyse à la fois dans le domaine temporel et fréquentiel.

II.4.2.2. Localisation des Défauts :

La localisation des défauts implique la détermination de l'emplacement exact d'un défaut dans un système. Cela peut être réalisé par :

- 1. Méthodes de triangulation** : Utilisation de plusieurs capteurs pour trianguler la position d'un défaut.
- 2. Techniques d'imagerie** : Utilisation de méthodes comme l'imagerie par ultrasons pour visualiser les défauts.

La détection et la localisation des défauts par analyse de signaux représentent un domaine en constante évolution, intégrant des technologies avancées et des méthodes innovantes. L'importance de ces techniques dans la prévention des pannes et l'optimisation des performances des systèmes ne peut être sous-estimée.

Les recherches futures devraient se concentrer sur l'amélioration des algorithmes de traitement des signaux et l'intégration de l'intelligence artificielle pour des diagnostics encore plus précis.

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exposé les défauts les plus fréquents dans ce type de machines à aimants permanents et leurs origines. Par la suite nous avons développé une description succincte des différentes approches de diagnostic, de surveillance et de détection de ces défauts.

Le troisième chapitre sera dédié aux résultats de simulation des défauts électriques de la MSAP sous MATLAB/Simulink.

Chapitre III :
Simulation des défauts électriques de la MSAP sous
MATLAB/Simulink

III.1. Introduction :

Les MSAP occupent une place essentielle dans de nombreuses applications industrielles grâce à leur rendement élevé, leur fiabilité et leur densité de puissance. Cependant, ces machines sont susceptibles de subir des défauts pouvant altérer leur fonctionnement, notamment des défauts électriques au stator électrique au stator. L'objectif de ce travail est de simuler, à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, le comportement d'une MSAP en état sain et en présence d'un défaut électrique au stator, en analysant ses effets sur le courant, la vitesse et le couple électromagnétique.

III.2. Description de la machine et des paramètres de simulation :

La machine étudiée est une machine synchrone à aimant permanent (PMSM) extraite de la boîte à outils **Sim Power Systems** (intégré à Sim scape Electrical) de MATLAB/Simulink destinée à la modélisation et à la simulation des systèmes électriques. Les principaux paramètres utilisés dans la simulation sont les suivants :

- Résistance statorique: 2.875Ω
- Flux magnétique : 0.175 Wb
- Nombre de paires de poles : 4
- Inertie : $0.0008 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
- Coefficient de frottement statique : $0.001 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
- Inductance statorique : 0.0085 H

III.3. Description du schéma bloc de la MSAP :

La Figure 3.1 représente le schéma bloc de la MSAP, extraite de la boîte à outils "Sim Power Systems", alimentée par un onduleur triphasé, sous MATLAB/ Simulink. Ce schéma servira pour simuler un défaut de court-circuit de phase dans le stator de la MSAP.

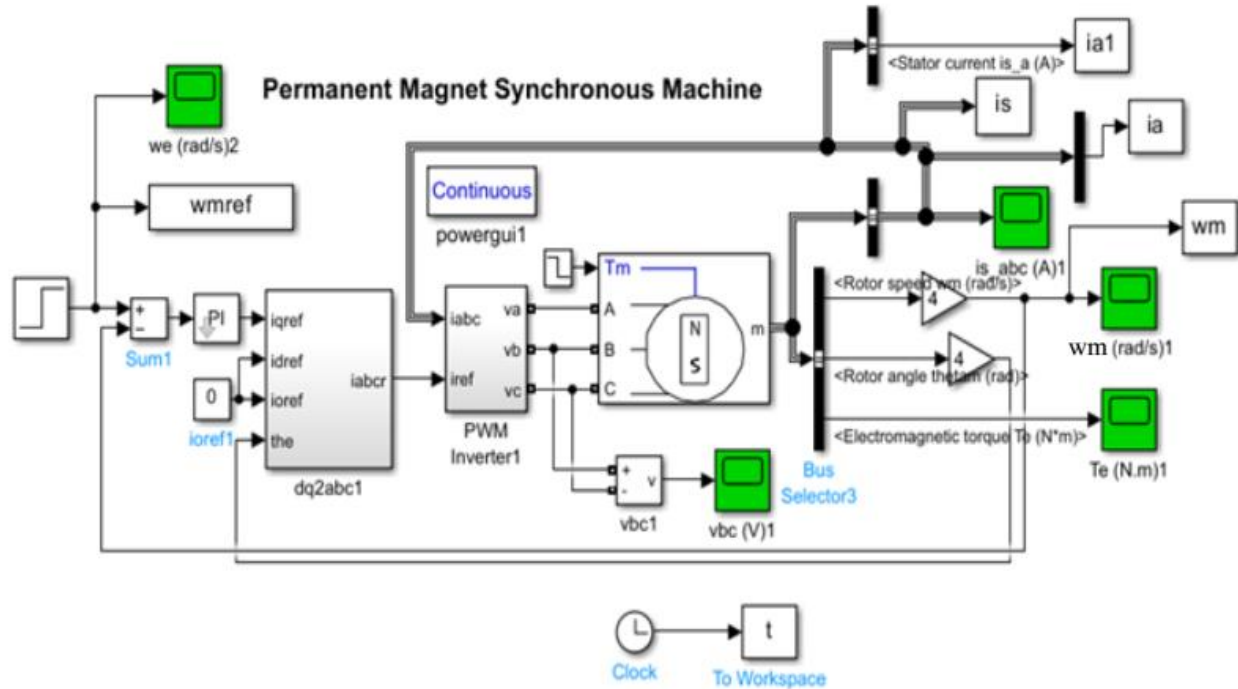


Figure 3.1 : Schéma bloc de la MSAP

III.3.1. Description des différents éléments du schéma bloc de la MSAP :

- Entrée de consigne de vitesse (w_{e_ref}) Bloc vert à gauche : C'est la consigne de vitesse de rotation du rotor (en rad/s). Elle représente la vitesse souhaitée pour la machine.
- Comparateur de vitesse Bloc avec le signe "-": Il compare la vitesse de consigne (w_{e_ref}) à la vitesse réelle (w_m) pour générer une erreur de vitesse.
- Régulateur PI (Proportionnel-Intégral) Bloc "PI" : Ce régulateur traite l'erreur de vitesse pour produire la consigne de courant direct (i_{d_ref}). Il permet d'ajuster la vitesse de la machine en minimisant l'erreur.
- Génération des consignes de courant (dq2abc1) Bloc "dq2abc1" : Ce bloc convertit les consignes de courant (i_{d_ref} , i_{q_ref}) du repère dq (synchronisé avec le rotor) vers le repère abc (stator). Il prépare les signaux pour le module de modulation.
- Onduleur PWM (PWM Inverter1) Bloc "PWM Inverter1" : Il reçoit les signaux abc et génère les tensions nécessaires (v_a , v_b , v_c) pour alimenter la machine. Il utilise la modulation de largeur d'impulsion (PWM) de type à hystérésis permet d'imposer les courants statoriques au niveau de la machine pour contrôler l'onduleur.

- Machine Synchrone à Aimants Permanents (Permanent Magnet Synchronous Machine)

Bloc central avec le schéma du moteur : Représente le modèle de la PMSM. Le modèle de la MSAP utilise est un modèle biphasé obtenu par l'utilisation de la transformation de PARK, Il reçoit les tensions de phase (v_a , v_b , v_c) et simule le comportement électromécanique de la machine (courants, vitesse, couple, etc.).

- Capteurs et sorties Bloc "Bus Sensors1" : Il mesure différentes grandeurs physiques de la machine :

- i_{s_abc} : Courants de phase statorique (A)
- ω_m : Vitesse du rotor (rad/s)
- T_e : Couple électromagnétique (N·m)
- θ : Position angulaire du rotor (rad).
- Sorties d'observation Blocs à droite (i_a , i_s , i_{a1} , ω_m , T_e) : Affichent les valeurs mesurées ou calculées pour l'analyse ou le contrôle :

- i_a : Courant de phase A,
- i_s : Courant statorique,
- ω_m : Vitesse du rotor
- T_e : Couple électromagnétique.

III.3.2. Scénarios de simulation :

La simulation a été réalisée en diminuant la valeur de la résistance statorique de sa valeur nominale 2.875Ω jusqu'à 0Ω pour simuler un défaut dans une phase statorique et constater les conséquences qui en découlent sur les autres paramètres de la MSAP à savoir la tension d'alimentation, le courant statorique, la vitesse de rotation et le couple développé.

Deux principaux scénarios ont été analysés : le fonctionnement en état sain et le fonctionnement en présence d'un court-circuit dans une phase statorique, pour chaque cas, en diminuant la valeur de la résistance statorique de sa valeur nominale 2.875Ω jusqu'à 0Ω afin d'observer les réponses obtenues de la machine selon les différentes valeurs de résistances imposées.

III.4. Analyse et discussion des résultats :

Les courbes obtenues permettent d'observer le comportement de la machine dans différentes conditions de résistance statorique et en présence d'un défaut. Les grandeurs analysées sont : la tension d'alimentation, le courant statorique, le couple électromagnétique, et la vitesse de rotation.

Quand on diminue la valeur de la résistance statorique dans une phase d'une machine synchrone à aimants permanents, plusieurs conséquences peuvent se produire. Dans ce qui suit nous allons analyser ces conséquences sur la tension d'alimentation, le courant statorique, le couple et la vitesse de rotation.

III.4.1.1. Analyse de la tension :

La tension d'alimentation générée par un nodulaire commande par une MLI, dont la tension continue est fixée à 155V, ce qui correspond sur la courbe à une tension alternative de 310V, qui reste relativement stable (Figure.3.2), mais la baisse de la résistance peut entraîner des variations dans la tension aux bornes de la machine, surtout si le moteur est soumis à des charges variables.

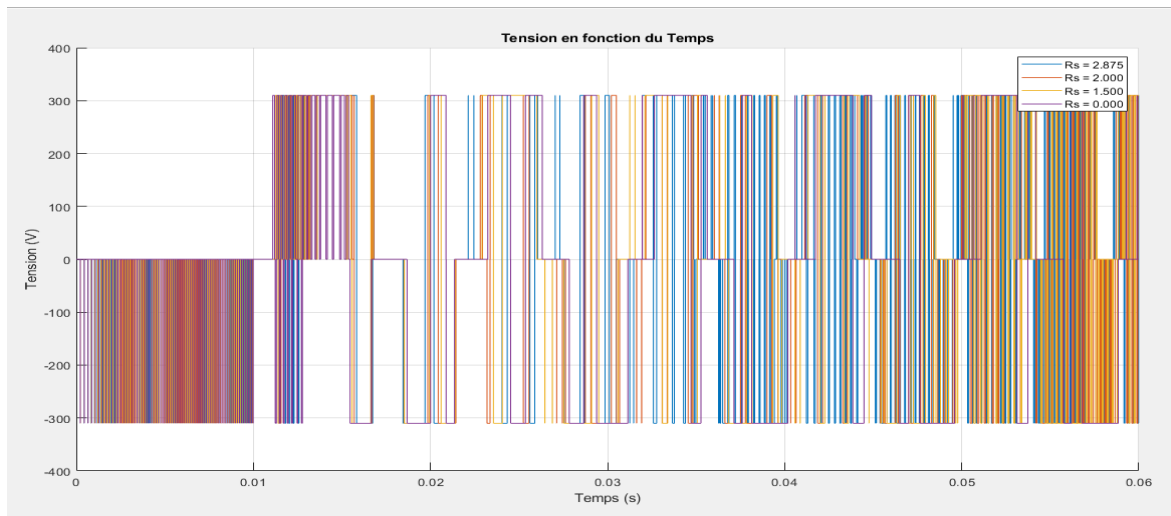


Figure 3.2: Tension en fonction du temps

III.4.1.2 Analyse du courant statorique :

Le courant augmente fortement à mesure que R_s diminue (Figure.3.3), sachant que R_s représente la résistance des trois phases, ce qui permet de réduire l'opposition au passage de courant, Cette augmentation peut entraîner une surchauffe dangereuse des enroulements et potentiellement endommager la machine si le défaut n'est pas détecté rapidement.

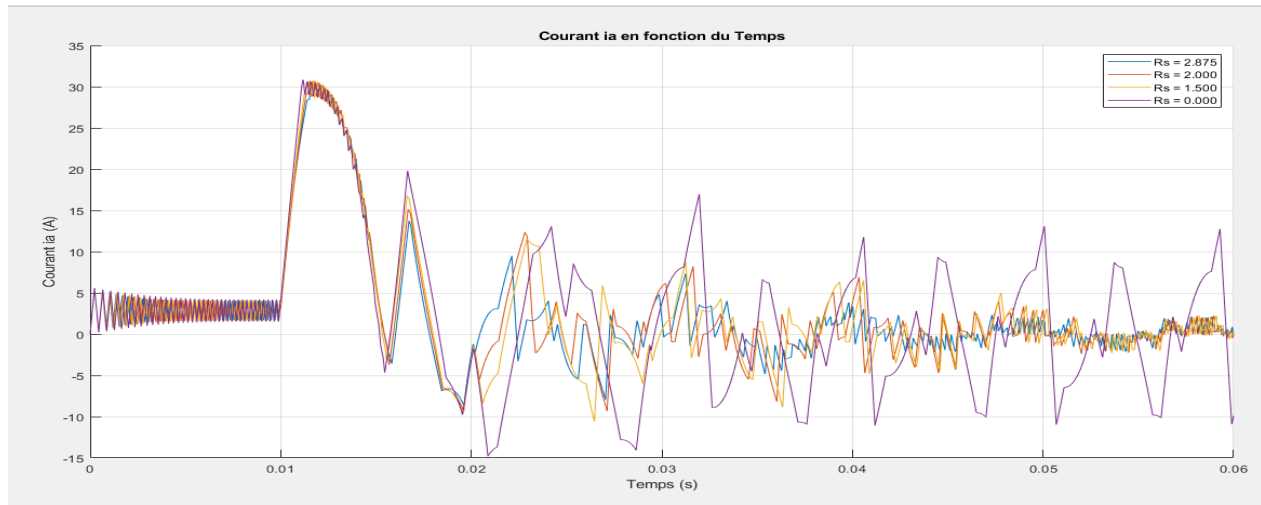


Figure.3.3: Courant en fonction de temps

III.4.1.3. Analyse du couple :

La courbe du couple (Figure.3.4) présente une augmentation, conséquence directe de la montée du courant à travers l'enroulement. Etant donné que le couple est proportionnel au courant dans une machine synchrone, si le courant augmente, le couple généré par la machine augmente également. Ce couple additionnel peut augmenter la capacité de la machine, ce qui, à son tour, peut faire synchroniser la machine sur une vitesse supérieure en dépit d'une situation de court-circuit. Toutefois, cette surcroissance du couple pendant un court-circuit pose la question de la durabilité de la machine, car des valeurs trop élevées peuvent entraîner des dommages mécaniques ou électriques.

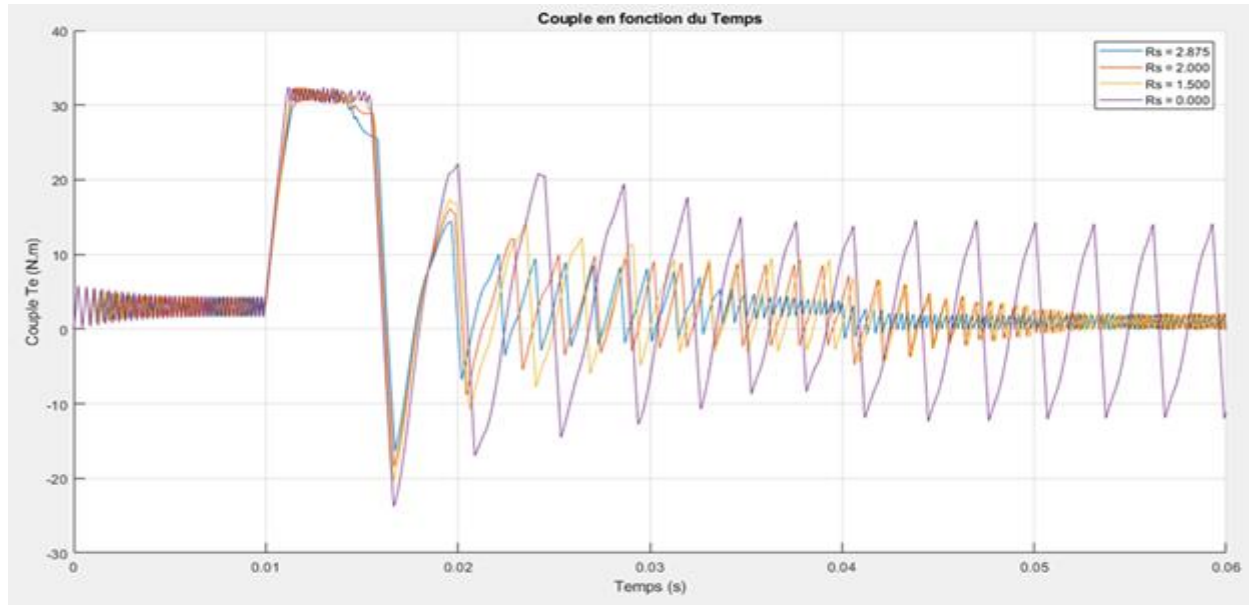


Figure.3.4 : le couple en fonction du temps

III.4.1.4 Analyse de la vitesse :

La vitesse de rotation de la machine synchrone est généralement déterminée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles. Cependant, une augmentation du courant peut affecter le comportement dynamique du moteur (oscillation du couple qui affecte directement la vitesse c'est pour cela on constate des oscillations de la vitesse en cas de défauts malgré la présence de réglage qui essaye de maintenir la vitesse proche de sa référence (Figure.3.5).

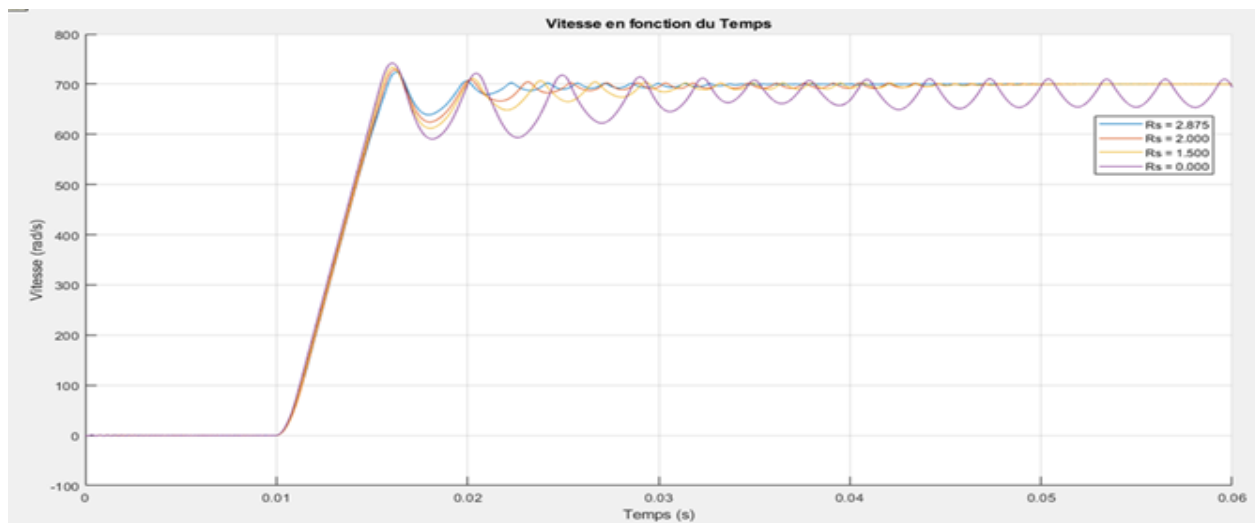


Figure.3.5 :la vitesse en fonction du temps

III.4.2. Interprétation globale des résultats :

Analyse du courant statorique Dans l'état sain, le courant statorique présente une allure régulière et sinusoïdale, ce qui traduit un fonctionnement normal de la machine, sans perturbations majeures. En revanche, lors de l'introduction du défaut statorique, on observe une augmentation significative de l'amplitude du courant, avec apparition de distorsions dans la forme d'onde. Cette élévation du courant est une conséquence directe du court-circuit partiel dans l'enroulement statorique. Cette situation peut engendrer une surcharge thermique si elle n'est pas détectée à temps.

Analyse du couple électromagnétique Le couple électromagnétique est relativement stable dans l'état sain, correspondant à la résistance statorique appliquée. Cependant, en présence de défaut, une hausse anormale du couple est enregistrée. Cette augmentation peut être attribuée au déséquilibre du champ magnétique, causé par le court-circuit, ce qui entraîne un effort électromagnétique supplémentaire. Toutefois, cette hausse est temporaire et peut rapidement se traduire par des oscillations ou instabilités si le défaut persiste.

Analyse de la vitesse de rotation. La vitesse suit normalement la valeur de consigne en régime sain. Lors du défaut, on note une élévation de la vitesse, ce qui peut paraître contre-intuitif. Cette réponse s'explique par une perturbation dans l'équilibre électromécanique entre le couple généré et la résistance statorique, surtout si la résistance diminue en même temps (comme dans le scénario testé). L'absence de couple résistant suffisant permet à la machine de monter en régime, d'où l'augmentation observée de la vitesse.

Le tableau 3.1 résume les valeurs obtenues du courant statorique, de la tension, du couple et de la vitesse pour différentes valeurs de R_s .

Tableau 3.1 : Différentes valeurs obtenues

$R_s(\Omega)$	Le courant I_a (A)	La tension(V)	Le couple (N.m)	La vitesse (tr/min)
2.875	1.4	310	2.3748	680
2	4.55	310	4.9	698.3
1	8.51	310	8.3	733.2
0	12.5	310	14	740

L'ensemble des résultats confirme que le défaut statorique de type court-circuit a un impact direct sur les performances de la machine.

Il engendre : une hausse du courant (risque de surchauffe), une modification du couple (risque d'usure mécanique), et une instabilité de la vitesse. Ces observations soulignent l'importance d'intégrer des systèmes de surveillance et des algorithmes de détection de défauts pour anticiper les pannes.

III.5. Conclusion :

Cette étude a permis de simuler le comportement d'une machine synchrone à aimants permanents sous différentes valeurs de la résistance statorique. Les résultats obtenus, ont montré que la diminution de la résistance de charge entraîne une augmentation significative du courant et du couple tandis que la vitesse oscille autour de sa valeur. Un défaut électrique statorique aggrave ces effets, soulignant l'importance de la détection précoce des défauts pour garantir la fiabilité et la sécurité de la machine.

Conclusion générale :

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) occupe aujourd'hui une place centrale dans de nombreuses applications industrielles et technologiques, en raison de ses performances élevées, de son rendement supérieur et de sa fiabilité accrue. Toutefois, comme tout système électromécanique, elle reste sujette à des défauts internes et externes qui peuvent compromettre son bon fonctionnement, voire entraîner des pannes critiques si ceux-ci ne sont pas détectés et traités à temps.

Dans ce contexte, ce travail a permis d'explorer, d'une manière structurée et progressive, les aspects fondamentaux et avancés liés à la MSAP, en mettant l'accent sur le diagnostic des défauts.

Le premier chapitre a permis d'établir les bases théoriques en introduisant les aimants permanents, leur historique, leurs caractéristiques physiques et magnétiques, ainsi que les différents types utilisés dans les machines. Par la suite, nous avons détaillé la constitution de la MSAP, son principe de fonctionnement, ainsi que ses structures et classifications. Les avantages et inconvénients de cette technologie ont été mis en évidence, en soulignant ses domaines d'application variés tels que les véhicules électriques, l'aéronautique ou encore les énergies renouvelables.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'état de l'art des défauts affectant les MSAP et aux méthodes de diagnostic existantes. Nous avons identifié les défauts les plus courants, notamment les courts-circuits statoriques, les déséquilibres, et les défauts rotorique ou de roulements. Deux grandes familles de techniques de diagnostic ont été analysées : les approches basées sur des modèles (où un modèle mathématique ou physique de la machine est utilisé) et les approches sans modèle, qui s'appuient sur des techniques empiriques ou basées sur l'apprentissage. Par ailleurs, l'analyse des signaux mesurables, tels que le courant, la vitesse, le couple ou les vibrations, a été présentée comme un levier clé pour la surveillance conditionnelle.

Enfin, le troisième chapitre a mis en pratique les concepts théoriques à travers la simulation sous MATLAB/Simulink d'une MSAP en présence d'un défaut au niveau de l'enroulement statorique. Une comparaison a été réalisée entre la machine en état sain et en affectée par un défaut.

au niveau du bobinage statorique. L'analyse des courbes de courant, de couple et de vitesse obtenues pour différentes valeurs de résistance statorique a permis de mettre en évidence l'impact du défaut sur le comportement dynamique de la machine. Cette étude a démontré l'importance d'une surveillance proactive et précise, afin d'assurer la continuité de service et d'éviter des défaillances coûteuses.

En conclusion, ce travail a mis en lumière l'importance cruciale du diagnostic des défauts électriques dans les machines synchrones à aimants permanents, tant du point de vue théorique que pratique. Il ouvre également la voie à des perspectives intéressantes, tel que le diagnostic en cas de défaut de démagnétisation et son impact sur le fonctionnement de la MSAP.

Références bibliographiques

- [1] : <https://www.electricity-magnetism.org/fr/comment-fonctionnent-les-aimants-permanents/>.
- [2]: Cullity, B.D., & Graham, C.D. (2009). Introduction to Magnetic Materials (2nd ed.). Wiley-IEEE Press.
- [3] : <https://fr.wikipedia.org/wiki>.
- [4] : Jean-Marie Le Breton, Luc Le Chevallier, Philippe Tenaud, et Antoine Morel, « Aimants Permanents - Matériaux et Propriétés », Techniques de l'Ingénieur, 10 mai 2009.
- [5] : Aliouat K, Abdou A, Diagnostic des défauts dans la machine synchrone à aimant permanent, Université Akli Mohand Oulhadj-Bouira, 2022.
- [6] : Calcul des machines électrique master1 ELT Dr.Kaika.M.Y univ constant01.
- [7] : Boldea, I. (2016). Electric Generators and Motors: Fundamentals and Applications. CRC Press.
- [8] : Mouzaoui S, Etude d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents en Présence de Défauts de Courts-Circuits et de Désaimantations par la Méthode des Eléments Finis, Mémoire de master, Université de MOULOUZ MAMMERI DE TIZI-OUZOU,2015.
- [9] : M.Korell, « Noeud Ethercat pour un moteur électrique ».
- [10] : <https://www.emworks.com/en/blog/electromechanical/axial-and-radial-flux-permanent-magnet-machines-what-is-the-difference>.
- [11] : Hanselman, D. (2003). Brushless Permanent Magnet Motor Design (McGraw-Hill).
- [12] : Krishna, R. (2009). Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives. CRC Press.
- [13] : <https://www.electronicdesign.com/technologies/power/article/21276212/ecm-pcb-stator-tech-whats-the-difference-between-axial-and-radial-flux-electric-motors>.
- [14] : Gabsi, M. (2004). Contribution à l'étude des machines synchrones à aimants permanents à flux transverse. Thèse de doctorat, ENIT (Tunisie).
- [15] : Guglielmo, P., Cavagnions, A., Chindris, D, D, D, D. (2006). Les machines à flux transverse : état de l'art et perspectives. Techniques de l'Ingénieur, D3180.
- [16] : Kawthar Alameh. Contribution au diagnostic et a l'analyse de défauts d'une machine synchrone à aimants permanents. Automatique. Normandie Université, 2017. Français. FfNNT : 2017NORMR072ff. Fftel-01700940.

- [17] :Faiz, J., & ; Ebrahimi, B. M. (2009). Simulation of stator and rotor inter-turn faults insalient pole synchronous generator. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(4), 728–742. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2008.11.004>.
- [18] :R. Romary et al., “Diagnostic de machines électriques par analyse du champ magnétique de dispersion : Nouvelles tendances en conception de machines électriques,” *Rev.L’électricité l’électronique REE*, vol. 11, pp. 49–64, 2006.
- [19] : Bouchareb ch ; Modélisation, Commande Diagnostic des machines synchrones à aimant permanent, Thèse de doctorat, Université de Batna2 Mostafa Ben Boulaid 2018.
- [20] :Elalamy, A. M., & Abdelkader, S. M. (2018). Fault diagnosis in inverter-fed electrical machines : A review. *Electric Power Systems Research*, 163, 337–352.
- [21] : Isermann, R. (2005). Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications. *Annual Reviews in Control*, 29(1), 71–85.
- [22]: Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., & Kavuri, S. N. (2003). A review of process fault détection and diagnosis : Part I : Quantitative model-based Methods. *Computers & Chemical Engineering*, 27(3), 293–311.
- [23] : Basseville, 1988 ; 1997.
- [24] : Derbel, H. (2009). Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [25] :Choug, A. (2022). Détection et analyse vibratoire pour le diagnostic des systèmes électromécaniques. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar - Annaba.
- [26] :A.B. Baggeroer, W.A. Kuperman, and P.N. Mikhalevsky. An overview of matched field methods in ocean acoustics. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 18(4) :401–424, 1993.
- [27] : Villemeur, A. (1988). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, maintenabilité, disponibilité. Eyrolles.
- [28] : Philippe Rigollot. Lecture 10: Maximum likelihood estimation, 2016, Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- [29] : Ben-Daya, M., & Raouf, A. (1996). A revised failure mode and effects analysis model. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 13(1), 43–47.
- [30]: Duda, R. O., Hart, P. E., & Stork, D. G. (2001). *Pattern Classification* (2nd ed.). Wiley-Interscience. ISBN : 978-0471056690.

[31] : [PDF] Cours Détection et Localisation des Défauts <https://www.univ-chlef.dz/ft/wp-content/uploads/2024/01/Cours-Detection-et-Localisation-des-Defauts-TAHRAOUI-Souaad-2022-2023-M2-AII.pdf>

[32] :E. Boucher. Thèse doctorat, Université de Lyon, 02 ISAL 0088

[33] :Alliantech S.A.S, « Technologies d'accéléromètres pour la mesure de vibration et choc », Alliantech, 12 rue Traversière.

[34] :<https://www.electricity-magnetism.org/fr/capteur-de-courant-de-foucault/>

[35] :<https://www.gian-transmission.com/fr/moteur-bldc-vs-moteur-msip-une-comparaison-complete>.