



UNIVERSITE DE BATNA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Présentée pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR EN ELECTROTECHNIQUE

(Décret exécutif n^o98-254 du 17 Août 1998)

Par

Ali REZIG

(Magistère en Electrotechnique option : Modélisation des réseaux électriques)

ANALYSE TRIDIMENSIONNELLE DES PHENOMENES VIBRATOIRES DANS LES MACHINES ELECTRIQUES

Soutenue publiquement à Batna le : 05 Mai 2011

Devant le jury:

Mr. B. AZOUI	Professeur	U. Batna	Président
Mr. M. R. MEKIDECHE	Professeur	U. Jijel	Rapporteur
Mr. A. GUETTAFI	Professeur	U. Batna	Examineur
Mr. M. CHAABANE	Professeur	U. Batna	Examineur
Mr. A. DJERDIR	Maître de Conférences HDR UTBM (France)		Examineur
Mr. A. TIBOUCHE	Maître de Conférences	U. Jijel	Examineur

<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	2
------------------------------------	---

Chapitre 1 : Bruit et Vibrations des Machines Electriques

<i>INTRODUCTION</i>	6
<i>1- Définition et Etude des Grandeurs Vibro-acoustiques</i>	6
<i>1-1 Vibration, son et bruit</i>	6
<i>1-2 Etude des vibrations</i>	7
<i>1-3 Etude du bruit</i>	7
<i>2- Processus de la Génération des Vibrations et du Bruit dans les Machines Electriques</i>	7
<i>3- Sources de Vibrations dans une Machine Electrique</i>	9
<i>3-1 Vibrations d'origine aérodynamique</i>	10
<i>3-2 Vibrations d'origine mécanique</i>	11
<i>3-3 Vibration d'origine électromagnétique</i>	14
<i>3-3-1 Forces de Maxwell</i>	15
<i>3-3-2 Forces de Laplace</i>	19
<i>3-3-3 Forces magnétostrictives</i>	19
<i>4- Vibrations et Bruit dus aux Ondes de Force Magnétique Radiale</i>	21
<i>4-1 Génération des ondes de forces radiales</i>	21
<i>4-2 Résonance mécanique des tôles et émission du bruit</i>	22
<i>4-3 Modes de forces et de vibrations naturelles du stator</i>	22
<i>4-4 Amplification des vibrations par la résonance</i>	24
<i>4-5 Rayonnement du bruit</i>	26
<i>4-6 Concept de la psycho acoustique</i>	27
<i>5-Défauts et Comportement Vibroacoustique des Machines Electriques</i>	29
<i>6-Réduction de Vibrations et Bruit Acoustique</i>	31
<i>6-1 Réduction du bruit d'origine électromagnétique</i>	31
<i>6-2 Réduction du bruit d'origine mécanique</i>	31
<i>6-3 Réduction du bruit d'origine aérodynamique</i>	31
<i>7- Mesure de Vibration et Bruit Acoustique</i>	32
<i>8- Vibrations et Bruit dus à la Force Magnétique Tangentielle (Ondulations du Couple)</i>	33
<i>8-1 Couple de détente</i>	33

8-2 Paramètres influençant le couple de détente	34
CONCLUSION.....	34

Chapitre 2 : Modèles Electromagnétiques des Machines Electriques en Vue d'une Etude Vibro- Acoustique

INTRODUCTION.....	37
1- Modèle Electromagnétique de la Machine Asynchrone	38
1- 1 Expression analytique de la perméance	39
1-2 Force magnétomotrice du stator.....	42
1-3 Force magnétomotrice du rotor.....	44
1-4 Effet d'un défaut d'excentricité sur la distribution de l'induction magnétique de l'entrefer.....	50
2- Modèle Electromagnétique de la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP)....	54
2-1 Induction magnétique produite par le rotor à aimants dans l'entrefer de la MSAP.....	55
2-2 Induction magnétique produite par les enroulements statoriques.....	59
2-3 Expression de la perméance de l'entrefer	60
2-4 Impact des défauts sur la distribution de l'induction magnétique dans l'entrefer d'une MSAP.....	62
2-4-1 Défaut de désaimantation.....	63
CONCLUSION.....	64

Chapitre 3 : Modèles Mécaniques et Acoustiques des Machines Electriques

INTRODUCTION.....	67
1- Modèle Mécanique.....	67
1-1 Vibrations forcées du stator.....	67
1-2 Fréquences Propres de la Structure Mécanique.....	69
1-2-1 Calcul simplifié des fréquences propres.....	69
1-2-3 Validation par calcul numérique 2D des fréquences propres.....	71

1-2-4 Effet de la carcasse	73
1-2-5 Calcul amélioré des fréquences propres	74
1-2-5-1 Fréquences propres du noyau	75
1-2-5-2 Fréquences propres de la carcasse	75
1-2-5-3 Fréquences propres du système noyau-carcasse	77
1-2-5-4 Effet du bobinage et des dents du stator.....	77
2- Modèle Acoustique.....	80
2-1 Puissance acoustique rayonnée par une machine électrique	80
2-2 Amélioration du modèle cylindrique fini	81
2-2-1 Distribution de la pression acoustique autour de la machine.....	81
2-2-2 Calcul de la puissance acoustique rayonnée	82
2-3 Effet des vibrations axiales sur les vibrations radiales.....	85
2-4 Modèle sphérique amélioré	87
2-5 Spectre du bruit et bruit total rayonné par la machine.....	88
CONCLUSION.....	89

Chapitre 4 : Applications à l'Etude et l'Analyse Vibro-Acoustique des Machines Electriques en Présence des Défauts

INTRODUCTION.....	91
1- Résumé du Modèle Analytique	92
2- Application pour la Machine Asynchrone	92
2-1 Caractéristiques dimensionnelles de la machine utilisée et calcul des grandeurs électromagnétiques.....	92
2-2 Ondes de forces magnétiques radiales en présence de l'excentricité.....	96
2-3 Bruit rayonné par la surface externe de la machine avec et sans excentricité.....	101
3- Application pour la Machine Synchrone à Aimants Permanents.....	104
3-1 Bruit rayonné par la MSAP en cas de défaut d'excentricité	107
3-2 Bruit rayonné par la MSAP en cas de défaut de désaimantation	110
CONCLUSION	112

Chapitre 5 : Investigations et Validations Expérimentales

<i>INTRODUCTION</i>	113
<i>1-Présentation du Banc de Mesure Développé</i>	113
<i>1-1 Composants électromagnétiques</i>	113
<i>1-1-1 Machine en test</i>	113
<i>1-1-2 Capteur de Position</i>	113
<i>1-2 Composants électroniques</i>	114
<i>1-2-1 Onduleur</i>	115
<i>1-2-2 Système de contrôle en temps réel DSPACE</i>	115
<i>2- Principe de Fonctionnement de Résolveur</i>	117
<i>2-1 Convertisseur analogique/numérique (CAN)</i>	118
<i>2-1-1 CAN par circuit intégré</i>	118
<i>2-1-2 CAN logiciel</i>	119
<i>3- Contrôle et Mise en Marche de la MSAP</i>	120
<i>4-Mesure des Vibrations et Validation du Modèle Analytique</i>	124
<i>5- Test de l'excentricité</i>	125
<i>CONCLUSION</i>	129
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	131
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	135
<i>ANNEXES</i>	141
<i>ANNEXE A : Matrice M_w représentant l'enroulement du stator pour le calcul de la fonction de bobinage</i>	141
<i>ANNEXE B : Détermination des coefficients d'intégrations issues de la résolution des équations de Maxwell dans les différentes parties de la MSAP</i>	142
<i>ANNEXE C : Paramètres géométriques et physiques des machines utilisées dans le calcul des fréquences propres (chapitre 3)</i>	144
<i>ANNEXE D : Fonctions intervenant dans la résolution de l'équation de la pression acoustique autour de la machine</i>	145

ANNEXE E : Ondes de Forces dans la machine synchrone à aimants permanents147

*ANNEXE F : Paramètres géométriques et physiques de la MSAP utilisée dans les tests et de son
résolveur148*

ANNEXE G : Caractéristiques de la carte NI 9234 pour l'acquisition des vibrations149

Résumé :

Ce travail de thèse est une contribution à l'étude et l'analyse des phénomènes vibro-acoustiques dans les machines électriques. Le modèle analytique développé permet la prédiction du bruit d'origine magnétique rayonné par la machine électrique dans le cas sain et en présence des défauts. Il est constitué de trois parties : un modèle électromagnétique de la force excitatrice, un modèle vibratoire pour calculer les déplacements de la surface externe de la machine, et enfin un modèle acoustique pour déterminer la puissance acoustique. La force magnétique excitatrice dépend du carré de l'induction magnétique dans l'entrefer et les modes de vibrations qui excitent la structure mécanique dépendent du contenu harmonique de cette dernière grandeur, donc toute perturbation géométrique ou magnétique conduit à la modification de ce contenu harmonique et par conséquent à l'apparition de d'autres modes de vibrations qui peuvent être dangereux de point de vue vibro-acoustique. Parmi les phénomènes qui conduisent à ces perturbations, nous avons traité le cas de l'excentricité du rotor et celui de la désaimantation des aimants dans les machines à aimants permanents. Pour valider ce modèle concernant l'effet de l'excentricité du rotor, une maquette expérimentale a été mise en place.

Mot-clés : vibrations, bruit, induction magnétique, force magnétique, rayonnement acoustique, excentricité, désaimantation, spectre du bruit. Fréquences naturelles.

Abstract :

Three-dimensional Analysis of Noise and Vibration Phenomena in Electrical Machines

This thesis is a contribution to the study and analysis of vibro-acoustic phenomena in electric machines. The developed analytical model allows the prediction of magnetic noise radiated by the electrical machine if healthy and faulty case. It consists of three parts: an electromagnetic model of the excitation force, a model for calculating vibration displacement of the outer surface of the machine, and finally an acoustic model to determine the acoustic power radiated by the machine. The magnetic excitation force depends on the square of magnetic induction in the air gap and the vibration modes that excite the mechanical structure depend on the harmonic content of that magnitude, so any geometric or magnetic disturbance led to the modification of the harmonic content and consequently the emergence of other modes of vibration which can be dangerous from vibroacoustic point of view. Among the phenomena that lead to these disturbances, we have treated the case of the eccentricity of the rotor and the demagnetization of magnets in permanent magnet machines. To validate this model on the effect of the eccentricity of the rotor, an experimental model was established.

Key-words: vibrations, noise, magnetic flux density, acoustic radiation, eccentricity, demagnetization, noise spectrum, natural frequency.

ملخص:

تحليل ثلاثي الأبعاد لظواهر الضجيج والإهتزازات في الماكينات الكهربائية

العمل المقدم في هذه الأطروحة هو مساهمة في دراسة وتحليل الظواهر الإهتزازية الصوتية في الماكينات الكهربائية. النموذج التحليلي المطور يسمح بالحساب المبكر للضجيج المنبعث من الماكينات الكهربائية في الحالة الطبيعية وفي حالة إحتوائها على أخطاء. يتكون النموذج التحليلي المطور من ثلاثة أجزاء: جزء كهرومغناطيسي لحساب القوة المغذية، جزء ميكانيكي لحساب إهتزازات الغلاف الخارجي للماكينة. وجزء أخير لحساب الطاقة الصوتية المنبعثة من الماكينة. القوة المغذية تتعلق بالحث المغناطيسي في الفجوة الهوائية وأنماط الإهتزاز تتعلق بالتركيبية التوافقية لهذا المقدار المغناطيسي. كل تذبذب في هذه التركيبية يقود إلى ظهور أنماط إهتزاز جديدة قد تكون خطيرة من وجهة نظر إهتزازية وصوتية. من بين الظواهر التي تقود إلى هذا الوضع، درسنا حالة لا مركزية الدوار وحالة فقدان المغنطة في الماكينات ذات المغناط الدائمة. للتأكد من صحة النموذج التحليلي المطور فيما يخص لا مركزية الدوار قمنا بتصميم نموذج تجريبي.

المفاتيح : إهتزازات، الضجيج، الحث المغناطيسي، الإنبعاث الصوتي، لامركزية، فقدان المغنطة، طيف الضجيج، الترددات الطبيعية.