

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur

Département d'Electrotechnique

N° d'ordre :

Série :



Thèse de Doctorat

Présentée par :

Ahmed CHERIET

Pour obtenir le diplôme de **Docteur en Electrotechnique**

Etude de l'Effet de la Jauge de Coulomb dans les Problèmes Magnétostatiques 3D par la Méthode des Volumes Finis

Soutenue le :

Devant le Jury composé de :

ZOUZOU Salah Eddine	Professeur	Université de Biskra	Président
MIMOUNE Soury Mohamed	Professeur	Université de Biskra	Rapporteur
FELIACHI Mouloud	Professeur	Université de Nantes	Rapporteur
MEKIDECHE Mohamed Rachid	Professeur	Université de Jijel	Examineur
MOHELLEBI Hassane	Maître de Conférence	Université de Tizi-Ouzou	Examineur
TAIBI BRAHIMI Abdelhalim	Maître de Conférence	Université d'Oran	Examineur

Table des Matières

Listes des Figures et Tableaux	1
Introduction générale	4
Chapitre I. Modélisation des Problèmes Electromagnétiques : Généralités	
I.1. Introduction	7
I.2. Les modèles considérés	8
I.2.1. Equations de Maxwell	8
I.2.2. Hypothèses simplificatrices	9
I.2.3. Modèle magnétostatique linéaire	9
I.2.3.1. Formulations existantes de la magnétostatique	10
I.2.3.2. Formulation en potentiel vecteur magnétique	11
I.2.4. Modèle magnétodynamique	12
I.2.4.1. Formulations existantes de la magnétodynamique	13
I.2.4.2. Formulation en potentiels vecteur magnétique \mathbf{A} et scalaire électrique V	14
I.2.5. Tenir compte de la non linéarité magnétique	15
I.2.5.1. Méthodes existantes	15
I.2.5.2. Formulation magnétostatique non linéaire en potentiel \mathbf{A}	17
I.3. Méthodes numériques de discrétisation	18
I.3.1. Principales Méthodes existantes	18
I.3.2. La méthode des volumes finis MVF	18
I.4. Conclusion	19
Chapitre II. Mise en Œuvre de la Méthode des Volumes Finis	
II.1. Introduction	20
II.2. Discrétisation géométrique	20
II.3. Discrétisation des formulations électromagnétiques	21
II.3.1. Discrétisation de la formulation magnétostatique	21
II.3.1.1. Intégration de $\nabla \times (\mathbf{v} \nabla \times \mathbf{A})$	22
II.3.1.2. Intégration de $\nabla (\mathbf{v} \nabla \cdot \mathbf{A})$	25
II.3.1.3. Intégration du terme source	25
II.3.1.4. Construction du système matriciel	25
II.3.2. Discrétisation de la formulation magnétodynamique	26
II.3.2.1. Intégration de $\sigma(\mathbf{A} + \nabla \mathbf{v})$	27
II.3.2.2. Intégration de l'équation divergence	28
II.3.2.3. Construction du système matriciel	28
II.3.3. A l'interface entre milieux de propriétés physiques différentes	29

II.3.4. Implémentation de la technique M–B	31
II.4. Maillage d'un problème type	32
II.5. Résolution de systèmes d'équations linéaires	33
II.6. Algorithme du code de calcul	34
II.7. Conclusion	36

Chapitre III. Génération de Maillage Non-Conforme et Prise en Compte du Mouvement

III.1. Introduction	37
III.2. Génération de maillage non-conforme dans la MVF	38
III.2.1. Décomposition du domaine	38
III.2.2. Méthode de connexion	39
III.2.3. Algorithme	43
III.3. Prise en compte du mouvement	46
III.3.1. Remaillage partiel	46
III.3.2. Bande du mouvement	47
III.3.3. Surface de glissement	48
III.3.4. Multiplicateurs de Lagrange	49
III.3.5. Méthodes d'interpolations	49
III.4. Simulation du mouvement avec le maillage non-conforme	50
III.5. Conclusion	52

Chapitre IV. Tests et Validations : Problèmes de Workshop

IV.1. Introduction	54
IV.2. Magnétostatique linéaire	55
IV.2.1. Le problème IEEJ standard	55
IV.2.1.1. Description du problème	56
IV.2.1.2. Modélisation avec maillage standard	56
IV.2.1.2.1. Maillage	56
IV.2.1.2.2. Résultats	58
IV.2.1.3. Modélisation avec maillage non-conforme	61
IV.2.1.3.1. Maillage	62
IV.2.1.3.2. Résultats	63
IV.2.2. Le problème IEEJ avec armature	65
IV.2.2.1. Description du problème	65
IV.2.2.2. Modélisation avec maillage standard	65
IV.2.2.2.1. Maillage	66
IV.2.2.2.2. Résultats	67
IV.2.2.3. Modélisation avec maillage non-conforme	69
IV.2.2.3.1. Maillage	69
IV.2.2.3.2. Résultats	70
IV.3. Magnétostatique non linéaire : problème TEAM # 13	73

IV.3.1. Description du problème	73
IV.3.2. Maillage	74
IV.3.3. Résultats	76
IV.3.4. Effet du terme de relaxation λ	79
IV.4. Magnétodynamique : problème JSAEM # 6	81
IV.4.1. Description du problème	81
IV.4.2. Modélisation avec maillage standard	82
IV.4.2.1. Maillage	82
IV.4.2.2. Résultats	82
IV.4.3. Modélisation avec maillage non-conforme : simulation du mouvement	87
IV.4.3.1. Maillage	87
IV.4.3.2. Résultats	88
IV.5. Conclusion	92
Conclusion générale	94
Annexes	
A. Choix du solveur	96
B. Effet de la zone non-conforme	98
Bibliographie	100

Résumé

Les travaux de cette thèse portent sur l'adaptation de la méthode des volumes finis à la modélisation tridimensionnelle des problèmes d'électrotechnique. Dans ce contexte, nous avons développé le code de calcul MVF3-D sous environnement Matlab. Les formulations, en potentiel vecteur magnétique pour la magnétostatique et celle en potentiels vecteur magnétique et scalaire électrique pour la magnétodynamique sont implémentées. L'effet de la Jauge de Coulomb sur l'unicité de la solution a été discuté. La non linéarité magnétique due à la saturation d'un milieu est traitée par la technique M-B. Le maillage associé au code, génère trois types de maillage hexaédrique 3-D : régulier, irrégulier avec progression logarithmique et non-conforme. Ce dernier type se fait selon deux étapes, la décomposition de domaine et l'interpolation bilinéaire. La prise en compte du mouvement est basée sur le maillage non-conforme. En fonction de la taille du système algébrique, deux types de solveurs : Gauss Seidel et gradient conjugué, peuvent être employés. Dans le but de valider le code MVF3-D, nous avons considéré quelques problèmes tests internationaux destinés à valider les codes de calcul des champs électromagnétiques, deux en magnétostatique linéaire, un en magnétostatique non linéaire et le quatrième concerne un problème de contrôle non destructif par courant de Foucault.

Mots clés

Méthode des volumes finis 3-D, Magnétostatique, Magnétodynamique, Non linéarité magnétique, Jauge de Coulomb, CND par courants de Foucault, Maillage non-conforme, Mouvement.

Study of the Effect of the Coulomb Gauge in 3-D Magnetostatic Problems by using the Finite Volume Method

Abstract

This thesis concerns the adaptation of the finite volume method to the three dimensional modelling of the electrotechnical problems. In this context, we have developed the computer code MVF3-D under Matlab environment. The magnetic vector potential formulation for Magnetostatic and the magnetic vector and scalar electric potentials formulation for magnetodynamic are implemented. The effect of Coulomb Gauge on the unicity of the solution is discussed. Magnetic nonlinearity due to magnetic saturation is treated by means of the M-B technique. The meshing process of the code generates three kind of 3-D hexahedral grid : regular, irregular with logarithmic progression and nonconformal. Indeed, this last one is based on two steps, the domain decomposition and the bilinear interpolation. The taking into account of the movement was based on the nonconformal mesh. According to the size of the algebraic system, two solvers : Gauss Seidel and conjugate gradient, can be employed. In order to validate the code MVF3-D, we have considered some international test problems intended to validate computer codes of the electromagnetic fields, two in linear magnetostatic, one in nonlinear magnetostatic, and the fourth relates to a problem of eddy current non destructive testing.

Key words

3-D Finite volume method, Magnetostatic, Magnetodynamic, Nonlinear magnetic field, Coulomb Gauge, Eddy current NDT, Nonconformal mesh, Movement.