الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Département D'Électrotechnique Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

Master en Electromécanique

Option : Electromécanique

Alignement des arbres des machines tournantes par le principe du transfert d'énergie magnétique sans contact

> Par : **Titi Sabri**

Travail proposé et dirigé par : Mr : Aomar Lyes

Promotion 2021

Remerciements

Je remercie Allah de ma avoir donné la volonté, la patience et le courage pour terminer ce travail. Je tien à formuler ma gratitude à mon promoteur monsieur **«Mr : Aomar Lyes »** Qui a honorés en dirigeant ce travail. Nous la remercions vivement pour sa disponibilité et ses conseils judicieux. Je remercie ma famille ma mère et mon épouse pour leur soutien moral durant notre projet de fin d'étude. Je remercie également le président de jury et les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail. J'exprime mon profonde gratitude au chef de département ainsi à tous les enseignants du département Electrotechnique

sabri

SOMMAIRE

Introduction générale 1	L –				
CHAPITRE I: Accouplement et alignement des Arbres des Machines Tournantes4	4-				
I.1 Introduction 5	5 -				
I.2 Définition d'accouplement des arbres 5	i -				
I.3. Différents types d'accouplements des arbres 6	<u>5</u> -				
I.3.1. Accouplements rigides 6	<u>5</u> -				
b. Manchons à goupilles. 6	<u></u> 5 -				
c. Manchons à douille biconique 7	/ _				
I.3.2. Accouplements élastiques ou flexibles 8	3 -				
a. Accouplement élastomérique 8	3 -				
b. Manchon à gaine flexible 8	3 -				
c. Manchon Radiaflx 9) _				
d. Accouplement à Panamech (Multi-Beam)) _				
I.4.1. Définition d'un défaut d'alignement 10) -				
I.4.2. Les avantages d'un alignement des arbres 10) -				
I.4.3. Types d'alignements 11	L –				
I.4.4. Repères d'alignement 12	2 -				
I.4.5. Différents types des défauts d'alignements 12	2 -				
I.4.6. Méthodes de contrôle de l'alignement 13	3 -				
a. Méthode avec calibre à lame conique graduée ou avec coin gradué 14 -					
c. Méthode avec comparateur à cadran 15 -					
d. Méthode avec rayon laser 16	<u>5</u> -				
I.5 Conclusion 17	/_				
CHAPITRE II : Procédé mathématique de la modélisation PEEC 18	3 -				
II.1 Introduction) _				
II.2 Equations fondamentales –Equations de Maxwell) _				
II.2.1. Equations de Maxwell 19) _				
II.2.2. Lois constitutives des milieux 20) -				
a. Relations du milieu : 20) -				
b. Loi d'Ohm locale : 21	. –				
II.2.3. Conditions aux limites 21	L –				
II.2.4. Conditions d'interfaces 22	2 -				
II.2.5. Potentiels électriques et magnétiques 23	3 -				

II.3. Equation intégrale du champ électrique	24 -
II.4. Discrétisation de l'équation intégrale en potentiels mixtes	25 -
II. 5. Evaluation analytique des paramètres de couplage R.L	27 -
II. 5. 1. Calcul des résistances partielles	27 -
II. 5. 2 Calculs des interactions mutuelles inductives	27 -
a. interaction mutuelle entre filaments – rubans – barres parallèles	27 -
b. Interaction mutuelle entre deux parallélépipèdes	29 -
II.6 Conclusion	32 -
Chapitre III: Calcul des interactions magnétiques entre deux bobines rectangu	aires33-
III.1 Introduction	34 -
III.2 Principe d'alignement par magnétisme des arbres	34 -
III.3 Calcul du champ magnétique engendré par une bobine	35 -
III.3.1. Modèle géométrique	35 -
III.3.2. Simulation du champ magnétique engendré par une bobine	36 -
III.4 Calcul des interactions magnétiques entre deux bobines	38 -
III.5 Conclusion	39 -
Conclusion générale	40 -
Conclusion Générale	41 -
Bibliographie	42-

Introduction générale

Introduction générale

L'alignement de machines se pratique depuis plus de 200 ans et les raisons n'ont pas toujours été évidentes, mais dans notre monde moderne, le besoin d'alignement est désormais connu de tous. Avec les machines optimisées d'aujourd'hui, le lignage d'arbres est devenu une mission importante de la maintenance au quotidien. Les machines doivent tourner 24 h sur 24 avec un minimum d'arrêts imprévus.

Un bris d'équipement engendre des pertes de production considérables. Près de 50 % de toutes les pannes machines sont engendrées par un défaut d'alignement.

Le lignage d'arbres peut s'effectuer à l'aide d'outils différents. La manière la plus simple consiste à utiliser une règle ou un réglet que l'on pose sur les deux moitiés d'accouplement afin d'effectuer une estimation visuelle du lignage. Le résultat n'est pas très précis et il est très dépendant de l'opérateur. Parmi les méthodes traditionnelles, celle qui consiste à utiliser un comparateur à cadran est plus exacte. Elle nécessite néanmoins les compétences d'experts et demande beaucoup de temps et de précision. Une manière bien plus facile et très précise est d'utiliser des systèmes d'alignement laser. Ils ne nécessitent pas de compétences spéciales et permettent d'obtenir des résultats précis et fiables. Mais elle nécessite un arrêt de la machine qui cause une perturbation de production aussi le cout des ces équipements

Pour garantir une longue durée de vie du dispositif d'entraînement et de l'équipement, les machines doivent être correctement alignées l'une par rapport à l'autre. Pour cela, la déviation radiale et angulaire entre les deux arbres des machines doit être minimale. L'alignement doit être effectué avec soin, car les erreurs d'alignement peuvent endommager les paliers et l'arbre.

L'objectif de ce projet de fin d'étude est de proposé un nouveau procédé pour faire l'alignement des arbres des machines tournantes en utilisant le magnétisme, en particulier le principe de transfert d'énergie sans contactes.

Le premier chapitre considéré comme un socle théorique pour se familiariser avec les termes de maintenance et de processus d'alignement des arbres. Une étude bibliographique approfondie est contristée par une présentation des différentes méthodes existantes dans l'industrie pour assurer un bon alignement d'arbres.

Au deuxième chapitre, malgré sa lourdeur mais on le juge bénéfique pour comprendre le fondement du calcul du champ par la méthode intégrale PEEC. Une présentation mathématique, illustré par des schémas, vont être présenté en détail.

- 2 -

Le dernier chapitre est consacré à une exposition de la beauté de la méthode intégrale PEEC utilisée pour le calcul tridimensionnel du champ magnétique et pour le calcul des interactions magnétiques entre deux bobines rectangulaire de n'importe quelle position de l'espace.

A la fin, on avoue qu'on n'a pas vraiment entamé le sujet selon les objectifs souhaités, à mettre une méthode complète pour faire l'alignement des arbres tournants. C'est la raison pour laquelle on laisse ce sujet encore ouvert pour faire plus d'avancement dans l'exploitation de cette aidée pertinente.

CHAPITRE I

Accouplement et alignement des Arbres des Machines Tournantes

I.1 Introduction

Dans les installations industrielles à grande échelle, les machines électriques ou à combustible sont, pour la plupart, activées par des actionneurs du mouvement de rotation : moteurs électriques, thermiques, pneumatiques ou hydrauliques.

L'accouplement est un organe qui permet la jonction du moteur au récepteur, les deux machines ayant des arbres quasiment alignés.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les accouplements des arbres ainsi que différents types des défauts d'alignements. Ensuite, nous allons présenter les différents types d'accouplements des arbres qui existent et les méthodes de contrôle de l'alignement.

I.2 Définition d'accouplement des arbres

Les accouplements mécaniques servent principalement à établir la liaison entre deux arbres en rotation, placés dans le prolongement l'un de l'autre afin d'assurer la transmission du couple.



Figure 01. Principe d'accouplement des arbres de transmission

I.3. Différents types d'accouplements des arbres I.3.1. Accouplements rigides

Ils sont utilisés lorsque les arbres sont correctement alignés (ou parfaitement coaxiaux). Leur emploi exige des précautions et une étude rigoureuse de l'ensemble monté, car un mauvais alignement des arbres amène un écrasement des portées, des ruptures par fatigue et des destructions prématurées du système de fixation.

Il existe de nombreux types d'accouplements rigides et ceux :

a. Accouplements à plateaux

Très utilisés, précis, résistants, assez légers, encombrants radialement, ils sont souvent frettés ou montés à la presse.

La transmission du couple est en général obtenue par une série de boulons ajustés. En cas de surcharge, le cisaillement des boulons offre une certaine sécurité



Figure 02. Accouplement rigide à plateaux

b. Manchons à goupilles.

Dans le cas des petits accouplements, c'est le plus simple. Les deux goupilles travaillent au cisaillement et offrent une certaine sécurité en cas de surcharge. Le principe de calcul est le même que précédemment.

Variantes : goupilles remplacées par des clavettes ou des cannelures. L'arrêt en translation du manchon peut être réalisé par une vis de pression agissant sur la clavette, par une goupille passant entre les deux extrémités des deux arbres, par un circlip.



Figure 03. Manchon à goupilles



Figure 04. Manchon à clavettes

c. Manchons à douille biconique

Ce sont les plus récents. Ils présentent une grande facilité de montage et de démontage et permettent l'utilisation d'arbres lisses sans rainure de clavette. La transmission du couple est obtenue par adhérence après serrage des vis.

Nombreuses variantes ; des arbres de diamètres différents sont possibles.



Figure 05. Manchon à douille biconique

I.3.2. Accouplements élastiques ou flexibles

Ces accouplements absorbent les surcharges accidentelles, amortissent les vibrations et permettent un déplacement relatif entre les arbres.

a. Accouplement élastomérique

Les coupleurs en élastomère sont utilisés pour amortir les vibrations. L'amortissement se fait par interposition d'un matériau très déformable entre deux axes : une bague en élastomère, qui se décline en différentes duretés.



Figure 06. Accouplement élastomérique

b. Manchon à gaine flexible

Ils sont employés pour transmettre un couple entre deux arbres sujets à de légers défauts d'alignement ou de parallélisme, au cours du mouvement, et peuvent accommoder jusqu'à 1°30' d'écart ; mais ils peuvent aussi être utilisés pour amortir les vibrations ou réduire le niveau de bruit.



Figure 07. Manchon à gaine flexible

Chapitre I

c. Manchon Radiaflx

Le radiaflex est un accouplement comportant des plots en caoutchouc, fixés entre deux flasques solidaires des manchons qui reçoivent les arbres. D'un encombrement et d'un poids raisonnables, ce dispositif convient à la transmission d'un couple élevé à faible vitesse. Mise en place aisée, il est utilisé quand on désire une bonne élasticité radiale et torsionnelle. Il accepte des poussées axiales.



Figure 08. Manchon Radiaflx

d. Accouplement à Panamech (Multi-Beam)

Elément élastique Métallique en forme de profilés hélicoïdaux, générés par usinage d'une gorge en hélice débouchant dans un tube cylindrique



Figure 09. Accouplement à Panamech

I.4. Alignement

I.4.1. Définition d'un défaut d'alignement

Le défaut d'alignement est l'écart de position relative de l'arbre par rapport à l'axe colinéaire de rotation lorsque la machine tourne dans des conditions normales de fonctionnement. Comment peut-on détecter un défaut d'alignement ?

Plusieurs symptômes permettent de déceler un désalignement. Vous pouvez les détecter à l'œil nu, sans besoin d'équipement spécial.

- Défaillance prématurée des paliers, joints, arbres et accouplements
- Niveaux de vibrations axiale et radiale élevés
- Températures élevées dans les corps de palier et/ou à proximité, comme des températures d'huile élevées
- Fuite excessive provenant des joints de palier et/ou des bagues
- L'accouplement est chaud en cours de fonctionnement et immédiatement après l'arrêt de l'unité. Vérifier s'il y a des traces de poudre de caoutchouc à l'intérieur de l'accouplement
- Boulons d'ancrage desserrés
- Boulons d'accouplement desserrés ou endommagés
- Quantité excessive de graisse à l'intérieur du carter de protection
- Des composants identiques semblent présenter des phénomènes vibratoires variés ou une durée de vie utile plus ou moins longue.
- Les arbres se cassent (ou se fissurent) au niveau ou à proximité des paliers ou des moyeux d'accouplement

I.4.2. Les avantages d'un alignement des arbres

Les avantages résultant de l'adoption d'une bonne pratique d'alignement des arbres commencent par l'amélioration de la durée de vie de la machine garantissant ainsi la disponibilité de l'installation quand la production la sollicite. Des machines alignées correctement vont donner les résultats suivants.

- Améliorer la durée de vie et la fiabilité de l'installation
- Réduire les coûts des pièces de rechange telles que les joints et les paliers
- Réduire les frais de main d'œuvre liés à la maintenance
- Améliorer la disponibilité de l'installation
- Réduire la perte de production due à la défaillance de l'installation
- Réduire le besoin d'une installation de secours

- Améliorer la sécurité d'exploitation de l'installation
- Réduire les coûts de consommation énergétique au niveau de l'installation « Repousser » les limites de l'usine par rapport aux besoins de production
- Obtenir de meilleurs taux d'assurance grâce à de meilleurs résultats et pratiques d'exploitation

I.4.3. Types d'alignements

On considère toujours qu'une des machines est fixe, et l'autre mobile. Le défaut d'alignement correspond au défaut de coaxialité de deux axes. (Degré 4) On décompose ce défaut dans deux plans : Plan Vertical et Horizontal., et dans chaque plan en défaut (déport) radial et défaut (déport) angulaire.

Les types d'alignements sont les déviation verticales et horizontales possibles sur un équipement. Ces déviations peuvent être angulaires parallèles. Pour être capable d'interpréter et de mesurer précisément ces déviations, il faut se donner de repère.

- Déport angulaire vertical
- Déport parallèle vertical
- Déport angulaire horizontal
- Déport parallèle horizontal



Figure 10. Types d'alignements

I.4.4. Repères d'alignement

Le repérage consiste à faire quatre marques équidistantes sur la circonférence des deux parties de l'accouplement avec un crayon feutre ou des papiers adhésifs et de les numéroter. Pour identifier ces repères, nous allons utiliser le système d'horloge, tel que montré à la figure 11



Figure 10. Repères d'alignement

En se plaçant face à l'accouplement de la machine fixe : -à 12 heures, la lecture des mesures se fera vers le haut. -à 6 heures, la lecture se fera vers le bas. -à 3 heures, la lecture se fera à droite. -à 9 heures, la lecture se fera à gauche.

Les mesures prises sur les repères sont toujours lues à partir de la machine de référence c'est-a- dire la machine fixe

I.4.5. Différents types des défauts d'alignements

Le choix d'un type d'accouplement dépend d'abord des défauts d'alignement pouvant exister entre les deux arbres :

- Désalignement radial
- Désalignement axial
- Désalignement angulaire
- Écart angulaire en torsion



Figure 12. Principaux défauts d'alignements

I.4.6. Méthodes de contrôle de l'alignement

Il existe un certain nombre de méthodes différentes permettant d'obtenir un alignement acceptable des machines tournantes. Elles vont de la règle peu coûteuse (réglet) aux systèmes laser plus sophistiqués et inévitablement plus onéreux. Nous pouvons résumer ces méthodes en trois catégories de base :

- À vue règle et jauges d'épaisseurs
- Comparateurs jauges de déplacement mécaniques
- Systèmes d'alignement optiques laser

Au sein de chaque catégorie, il existe un certain nombre de variations et d'options. Ce n'est pas notre intention ici d'évaluer chacune de ces options, mais nous allons nous concentrer sur les méthodes les plus largement utilisées.

a. Méthode avec calibre à lame conique graduée ou avec coin gradué

Cette méthode est très peu employée de nos jours. Elle consiste à mesurer, en différents points du périmètre, l'écartement entre les plateaux d'un accouplement (figure 13). La précision de l'alignement demeure très faible ; cette méthode peut être utilisée pour un alignement grossier

C'est rapide, c'est simple mais pas assez précis pour les machines actuelles On peut mesurer et corriger ainsi un défaut angulaire mais non radial



Figure 13 – Méthode avec coin gradué

b. Méthode avec règle et calibre d'épaisseur

La règle est l'instrument le plus connu et le plus répandu des outils d'alignement. Cette méthode peut être combinée avec le calibre d'épaisseur ou le compas extérieur qui permettent de vérifier l'accouplement en différents points sur le périmètre.

Par leur simplicité, la règle et le calibre d'épaisseur sont les outils idéaux pour réaliser un pré alignement. On pourrait aussi combiner la règle avec un compas extérieur (figure 14).



Figure 14– Méthode avec règle et calibre d'épaisseur

c. Méthode avec comparateur à cadran

Les comparateurs offrent une grande précision de mesure. Pour arriver à ces précisions il faut tenir compte de la flexion des supports ; le montage doit être rigide.

Les comparateurs peuvent être fixés dans différentes positions pour prendre des lectures. Il existe différentes méthodes pour relever les dimensions d'un alignement.

Une des méthodes consiste à installer deux comparateurs en position de lecture sur l'accouplement. Le comparateur doit être monté en contact avec le contour de l'accouplement pour mesurer les défauts du parallélisme ; l'autre comparateur doit être **monté en position de** lecture sur la face de l'accouplement pour relever les défauts d'angularités. Les mesures sont prises en rotations à 180° en position 12 h et 6h et dans les positions 3 h et 9 h (figure 15).



Figure 15- Première méthode de contrôle au comparateur

La figure 16 montre l'autre méthode avec comparateur qui consiste à installer deux comparateurs placés en sens contraire, opposés l'un à l'autre sur le contour extérieur de l'accouplement. Cette méthode permet de relever le défaut de



Figure 16 – Deuxième méthode de contrôle au comparateur

d. Méthode avec rayon laser

Elle consiste à mesurer le déplacement d'un rayon laser à l'aide d'un microordinateur. Il s'agit de fixer un transmetteur de rayon laser sur le côté d'un accouplement d'une machine et un détecteur de rayon sur le côté opposé de l'autre machine pour relever les défauts de parallélisme. Les relevés sont prisés quand les arbres sont en rotation entre les positions 9 h, 3 h et 12 h : trois points de lecture sont suffisants pour enregistrer les mesures (figure 17).

Le micro-ordinateur calcule et affiche les valeurs de correction à apporter à la machine.



Figure 17



Figure 18

I.5 Conclusion

L'accouplement entres les différents organes d'une chaine de production ou d'un procédé de fonctionnement industriel, en particulier et à titre d'exemple entre une machine électrique et une pompe (modèle type de la majorité des ouvrages pour définir l'accouplement) est considérée comme l'anneau de liaison et peut provoquer le disfonctionnement et l'arrêt (panne) de processus.

Lors de ce chapitre on a expliqué en détail l'accouplement entre deux arbres tournants en montrant ainsi les différents types existants dans l'industrie et les caractéristiques.

Lors de ce chapitre on a expliqué l'alignement des arbres tournantes, les méthodes de correction désalignements

CHAPITRE II

Procédé mathématique de la modélisation PEEC

II.1 Introduction

C'est une méthode numérique pour la modélisation des comportements électromagnétique des structures tridimensionnelles de formes arbitraires. A partir des équations de Maxwell dans les milieux, une équation intégrale de champ en potentiels mixtes est développée. Après discrétisation de la structure, introduction des fonctions d'évaluation des inconnues, et par l'application de l'approche de Galerkin : les résidus pondérés, la forme générale du modèle en PEEC sera dérivée dans le domaine fréquentiel. L'introduction des éléments partiels permet une interprétation directe du modèle PEEC sous forme de circuits électriques équivalents.

II.2 Equations fondamentales –Equations de Maxwell

Le modèle PEEC est dérivé à partir des équations de Maxwell, les structures à modéliser sont composées de régions conductrices et de diélectriques. Ces derniers sont caractérisés par les constantes des champs électriques et magnétiques, ϵ_0 , μ_0 respectivement.

Les matériaux constituant la structure à modéliser sont supposés linéaires, homogènes, isotropes et non magnétiques. Les paramètres constitutifs caractérisant les propriétés des champs électriques et magnétiques sont respectivement : la conductivité σ , la permittivité ϵ et la perméabilité μ

II.2.1. Equations de Maxwell

Le comportement des phénomènes électromagnétiques traités dans le domaine de la physique est résumé par l'emploi des équations de Maxwell, appelées aussi équations générales de l'électromagnétisme. Ces équations s'écrivent sous leurs formes différentielles ou intégrales comme suit : [4]

Forme différentielle Forme intégrale

• Equation de Maxwell-Gauss :

$$div \, \vec{D} = \rho \qquad \qquad \oint_{s} \vec{D} \, \vec{ds} = \rho \qquad (II.1)$$

• Equation de Maxwell-Faraday :

$$\overrightarrow{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \qquad \oint_{L} \vec{E} \vec{dl} = -\int_{S} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \vec{ds} \qquad (II.2)$$

• Equation de conservation du flux magnétique :

$$div \ \vec{B} = 0 \qquad \qquad \oint_{s} \vec{B} \ \vec{ds} = 0 \tag{II.3}$$

• Equation de Maxwell-Ampère :

$$\overrightarrow{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad \qquad \oint_{L} \vec{H} \, \vec{dl} = -\int_{S} \vec{J} \, \vec{ds} \qquad (II.4)$$

- ρ : Densité de charge volumique [C/m³]
- \vec{E} : Champ électrique [V/m].
- \vec{D} : Induction électrique [A. S / m²].
- \vec{H} : Champ magnétique [A/m].
- \vec{B} : Induction magnétique [T]
- \vec{J} : Densité de courant [A/m²]; Elle est donnée par:

$$\vec{J} = \vec{J}_{ind} + \vec{J}_s$$

(I.5)

- \vec{J}_s : Densité du courant de source (courants d'excitations)
- \vec{J}_{ind} : Densité de courant induit

La fréquence utilisée permet de négliger tout aspect préparatif du champ électromagnétique, c'est ce qu'on appelle l'approximation des états quasi-statiques ou des régimes lentement variables, cette condition s'exprime en termes des dimensions de la structure, qui doivent être beaucoup plus petites que la longueur d'onde.

Dans ce cas, nous pouvons négliger :

- La densité volumique de la charge dans les conducteurs ρ dans l'équation II.1
- Les courants de déplacement $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ dans l'équation II.4.

On ajoute aux équations précédentes les lois de comportement des milieux ainsi que la loi d'Ohm.

II.2.2. Lois constitutives des milieux

Les cinq champs vectoriels précédents ne sont pas aussi indépendants les uns des autres, leurs liaisons sont fonction du milieu où ils règnent.

a. Relations du milieu :

• Loi de comportement magnétique

$$\vec{B} = \mu_0 \left(\vec{H} + \vec{M} \right) \tag{II.5}$$

• Loi de comportement électrique

$$\vec{D} = \varepsilon \ \vec{E} \tag{II.6}$$

- b. Loi d'Ohm locale :
- Au repos

$$\vec{J}_{ind} = \sigma \, \vec{E} \tag{II.7}$$

• En mouvement

$$\vec{J}_{ind} = \sigma \left(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B} \right)$$

(II.8)

- \vec{M} : Vecteur d'aimantation [A/m].
- \vec{v} : Vitesse de déplacement.

 σ, μ et ε : Sont les caractéristiques du milieu considéré et représentent respectivement: les tenseurs de conductivité électrique, de la perméabilité magnétique et de la permittivité électrique.

Dans le cas où les milieux considérés sont linéaires, homogènes et isotropes σ , μ et ε se ramènent à des scalaires.

$$\mu = \mu_0 \ \mu_r$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \mathcal{E}_r$$

 μ_{0} : Perméabilité du vide égale à 4 . π . 10 $^{-7}$ [H / m] .

- μ_r : Perméabilité relative.
- ε_{0} : Permittivité du vide, elle vaut à 10 $^{-9}$ / (36 . π) [F / m].
- ε_r : Permittivité relative.

En plus des lois caractérisant les milieux on doit ajouter des conditions, à l'ensemble des équations précédentes, pour obtenir une solution unique au problème.

II.2.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites d'une grandeur inconnue \vec{U} s'annoncent de façon générale dans un domaine d'étude Ω de frontière Γ comme suit : [5]

Condition de Dirichlet homogène : $\vec{U} \cdot \vec{n} = 0$

Condition de Neumann homogène : $\frac{\partial U}{\partial n} = 0$

II.2.4. Conditions d'interfaces

Pour assurer la continuité des champs électromagnétique entre deux milieux voisins et différents électriquement et /ou magnétiquement, comme indique la figure II.1. On impose les conditions de passage (ou condition d'interface ou conditions de transmission des champs). [6]



Figure I I.1: Conditions de passage à l'interface entre deux milieux différents

On intègre les équations de Maxwell entre deux points très voisins de part et d'autre d'une surface séparant ces deux milieux, le résultat nous a permis de déduire les constatations suivantes :

- Pour les grandeurs magnétiques
- > Conservation de la composante normale de l'induction magnétique \vec{B} .

$$\left(\vec{B}_2 - \vec{B}_1\right). \, \vec{n} = 0 \tag{II.9}$$

> Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique \vec{H} due aux courants surfaciques \vec{J}_s .

⊳

$$\left(\vec{H}_2 - \vec{H}_1\right) \wedge \vec{n} = \vec{J}_s$$

(II.10)

• Pour les grandeurs électriques

> Conservation de la composante tangentielle du champ électrique \vec{E}

$$\left(\vec{E}_2 - \vec{E}_1\right) \wedge \vec{n} = 0 \tag{II.11}$$

> Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique \vec{D} due aux charges surfaciques Q_s

$$\left(\vec{D}_2 - \vec{D}_1\right) \cdot \vec{n} = Q_s \tag{I.12}$$

Ces équations sont souvent transformées avant d'être appliquées au problème physique à résoudre, cette transformation consiste en l'emploi de différents potentiels : Vecteur ou Scalaire, Magnétique ou Electrique

II.2.5. Potentiels électriques et magnétiques

Différentes formulations ont été proposées dans la littérature scientifique. Nous pouvons les décomposer suivant les variables d'état qu'ils s'utilisent. Ci-après les différents potentiels magnétiques et électriques utilisés : [4]

$$\vec{B} = \vec{rot} \vec{A} \tag{II.13}$$

$$\vec{E} = -\frac{d\vec{A}}{dt} - \overline{grad}V \tag{II.14}$$

$$\frac{\partial \vec{A}^*}{\partial t} = \frac{\partial \vec{A}^*}{\partial t} + \overline{grad}(V) \tag{II.15}$$

$$\vec{J} = \overrightarrow{rot}\vec{T} \tag{I.16}$$

$$\vec{H} = -\overrightarrow{grad} \varphi$$

(II.17)

$$\vec{H} = -\overrightarrow{\text{grad}}\,\varphi_r + \overrightarrow{H_s} \tag{I.18}$$

Où

$$\vec{H} = -\overline{\operatorname{grad}}\,\varphi_r + \overline{T_s} \tag{II.19}$$

 \vec{A} : Potentiel vecteur magnétique [Wb/m].

V : Potentiel scalaire électrique [V].

 \vec{A}^* : Potentiel vecteur magnétique modifié [Wb/m].

- \vec{T} : Potentiel vecteur électrique [A/m].
- φ : Potentiel scalaire magnétique total [A].
- φ_r : Potentiel scalaire magnétique réduit [A].

 $\overrightarrow{H_s}$: Est le champ magnétique crée par les sources supposées dans l'air, calculé par la méthode de Biot et Savart et il n'est pas nul dans tout le domaine d'étude.

 $\vec{T_s}$: Potentiel vecteur électrique des sources, tel que: $\vec{J}_s = \overrightarrow{rot} \vec{T_s}$

II.3. Equation intégrale du champ électrique

En appliquant les équations générales de calcul des courants induits pour le calcul du champ électrique, en un point P, du conducteur la figure II.2. [4], [15]



Figure II.2: Schéma de calcul du champ en un point P à partir du volume élémentaire

Le conducteur parcouru par un courant J subit à l'instant t un champ extérieur E_0 tel que : [8], [11]

$$\vec{E}_{0}\left(\vec{r},t\right) = \frac{\vec{J}\left(\vec{r},t\right)}{\sigma} + \frac{\partial \vec{A}\left(\vec{r},t\right)}{\partial t} + \nabla V\left(\vec{r},t\right)$$
(II.20)

Avec

J : Densité du courant dans le conducteur.

 σ : Conductivité électrique.

 \vec{A} : Potentiel vecteur magnétique.

V : Potentiel scalaire électrique.

Remplaçant les potentiels \vec{A} et V par leurs expressions, donnés comme suit :

$$\vec{A} = \int_{v} \mu_0 G(\vec{r}, \vec{r}) \frac{\partial}{\partial t} \vec{J}(\vec{r}, t_d) dv$$
(II.21)

$$V = \nabla \int_{v} \frac{1}{\varepsilon_0} G(\vec{r}, \vec{r}) \rho(\vec{r}, t_d) dv$$
 (II.23)

L'équation intégrale en potentiels mixtes est obtenue par

$$\vec{E}_{0}\left(\vec{r},t\right) = \frac{\vec{J}\left(\vec{r},t\right)}{\sigma} + \int_{v} \mu_{0} G\left(\vec{r},\vec{r}\right) \frac{\partial}{\partial t} \vec{J}\left(\vec{r},t_{d}\right) dv + \nabla \int_{v} \frac{1}{\varepsilon_{0}} G\left(\vec{r},\vec{r}\right) \rho\left(\vec{r},t_{d}\right) dv$$
(II.24)

Le temps de retard t $_d$ entre la source et le point d'observation est donné par :

$$t_d = t - \frac{\left|\vec{r} - \vec{r}\right|}{c}$$

Où

c : Célérité du vide.

r : Distance entre le point d'intégration et le point d'observation.

r': Distance entre le point d'intégration et le conducteur.

 ρ : Densité volumique de charge électrique.

G : Fonction de Green.

En régime quasi statique, La fonction de Green est définie comme suit :

$$G(\vec{r},\vec{r}) = \frac{1}{4\pi R}$$
(II.25)

Sachant que :

$$R = \left| \vec{r} - \vec{r'} \right|$$

II.4. Discrétisation de l'équation intégrale en potentiels mixtes

Le conducteur est peut-être discrétisé en K conducteurs élémentaires de formes quelconques dans lesquels la densité de courant électrique et la densité de charge sont constantes. Selon le théorème de superposition l'équation (II.24) peut s'écrit : [11-13]

$$\vec{E}_{0}\left(\vec{r},t\right) = \frac{\vec{J}\left(\vec{r},t\right)}{\sigma} + \sum_{k=1}^{K} \mu_{0} \int_{v_{k}} G\left(\vec{r},\vec{r}'\right) \frac{\partial}{\partial t} \vec{J}\left(\vec{r}',t_{d}\right) dv' + \sum_{k=1}^{K} \frac{1}{\varepsilon_{0}} \nabla \int_{v_{k}} G\left(\vec{r},\vec{r}'\right) \rho\left(\vec{r}',t_{d}\right) dv'$$
(II.26)

Pour le vecteur de densité électrique \vec{J} définit par ces trois composantes. En notant l'indice $\xi = x, y, z$ pour spécifier chaque direction et en replaçant la fonction de Green donnée en régime quasi statique par l'équation (II.25), l'équation (II.26) devienne :

$$\frac{E_{0\xi}\left(\vec{r},t\right)}{\sigma} + \sum_{k=1}^{K} \frac{\mu_{0}}{4\pi} \frac{\partial J_{\xi}\left(\vec{r}',t_{d}\right)}{\partial t} \int_{vk} \frac{1}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|} dv' + \sum_{k=1}^{K} \frac{1}{4\pi\varepsilon_{0}} \frac{\partial}{\partial\xi} \int_{sk} \frac{1}{\left|\vec{r}-\vec{r}'\right|} \rho\left(\vec{r}',t_{d}\right) ds' \quad (\text{II.27})$$

On intègre l'équation (II.27) sur un volume élémentaire v_l appartenant au conducteur k pour trouver

$$\int_{vl} E_{0\xi}(\vec{r},t) dv_l = \frac{J_{\xi} v_l}{\sigma} + \sum_{k=1}^{K} \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\partial J_{\xi}}{\partial t} \int_{vl vk} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r'}|} dv dv_l \right) + \sum_{k=1}^{K} \left(\frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \int_{vl} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\int_{sk} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r'}|} \rho(\vec{r'}, t_d) ds' \right] dv_l \right)$$
(II.28)

Le terme à gauche de l'équation (II.28) représente la tension appliquée.

Le premier terme à droite représente la chute de tension due à l'effet résistif du conducteur élémentaire v_i .

Le deuxième terme à droite est l'image de la contribution inductive, en particulier le terme entre parenthèse correspond au couplage inductif entre le conducteur k et l.

Le troisième terme à droite traduit le couplage capacitif, en particulier le terme entre parenthèse correspond au couplage capacitif entre le conducteur k et l.

De cette dernière équation et après interprétation de chaque terme on peut introduire le schéma électrique constitué d'une source de tension appliquée au conducteur, des résistances, des inductances (propre et mutuelles) et des capacités, comme indique la figure II.3. [7],[14-15]



a) Segment de conducteur



b) Circuit électrique équivalent

Figure II.3: Modèle PEEC générale d'un conducteur élémentaire

II. 5. Evaluation analytique des paramètres de couplage R.L

Le calcul des résistances partielles est simple et direct, quant aux calculs des interactions mutuelles inductives nous allons retracer, avec moins de détails, les travaux de Hoer & Love pour évaluer ces interactions. Le concept fondamental pour obtenir les paramètres de couplage entre deux formes orthogonales quelconques est bien le concept des filaments de courant. Un filament de courant est comme un axe parcouru par un courant, donc il a une longueur mais n'a pas de section (ou bien à une section unitaire), c'est un concept très utile dans la modélisation [10], [14].

II. 5. 1. Calcul des résistances partielles

La résistance partielle R_{pi} du segment i est calculée par l'expression suivante (puisque sa densité de courant est supposée uniforme): [15]

$$R_{pi} = \rho_i \frac{l_i}{s_i} \tag{II.29}$$

 ρ_i : Résistivité du matériau du segment i parcouru par le courant i_i



Figure II.4. Conducteur élémentaire parallélépipédique

II. 5. 2 Calculs des interactions mutuelles inductives

a. interaction mutuelle entre filaments – rubans – barres parallèles

Les formes géométriques orthogonales et génériques sont représentées par ordre de complexité sur les figures. [7], [10].



Figure II.5 Configurations de base pour le calcul des interactions mutuelles

Interaction mutuelle entre de deux filaments (a)

$$L_{ff} = \mu \iint_{l_1 l_2} G_0(r, r') \, dl_1 dl_2 = \frac{\mu}{4\pi} \iint_{l_1 l_2} \frac{1}{R} dz_1 dz_2 = \frac{\mu}{4\pi} \iint_{l_1 l_2} \frac{1}{\sqrt{(z_2 - z_1)^2 + \rho^2}} dz_1 dz_2 \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$$z_1 = l_3 + z_2; \qquad \rho = \sqrt{E^2 + p^2};$$

L'intégration donne :

$$L_{ff} = \frac{\mu}{4\pi} \left[z \cdot log \left(z + \sqrt{z^2 + \rho^2} \right) - \sqrt{z^2 + \rho^2} \right]_{l_2 + l_3 - l_1; \ l_3}^{l_3 - l_1; \ l_3 + l_2} = \left[f(z) \right]_{s_2, s_4}^{s_1, s_3}$$
(II.31)

$$L_{ff} \equiv \frac{\mu}{4\pi} \sum_{k=1}^{k=4} (-1)^{k+1} f(s_k)$$
(II.32)

Interaction mutuelle entre ruban et filament (b)

Il suffit d'intégrer l'expression de l'interaction filament – filament suivant une autre dimension, la dimension x dans la figure (b).

$$L_{pf} = \frac{1}{a} \int_0^a L_{ff} \cdot dx \tag{II.33}$$

Avec : seule la variable ρ dans l'expression de L_{ff} qui devient:

$$\rho = \sqrt{(E-x)^2 + p^2}$$

L'intégration se complique un petit peu et donne :

$$L_{pf} = \frac{\mu}{a \cdot 4\pi} \left[\begin{bmatrix} \frac{z^2 - p^2}{2} \cdot \log\left(x + \sqrt{x^2 + p^2 + z^2}\right) + \log\left(z + \sqrt{x^2 + p^2 + z^2}\right) - \\ p \cdot z \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{x \cdot z}{p \cdot \sqrt{x^2 + p^2 + z^2}}\right) - \frac{x}{2} \cdot \sqrt{x^2 + p^2 + z^2} \end{bmatrix}_{E-a}^{E} (x) \right]_{S_2, S_4}^{S_1, S_3} (z)$$
(II.34)

$$L_{pf} = \frac{\mu}{a \cdot 4\pi} \cdot \left[[f(x,z)]_{q_2}^{q_1}(x) \right]_{S_2,S_4}^{S_1,S_3}(z) \equiv \frac{\mu}{a \cdot 4\pi} \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^4 (-1)^{i+k} \cdot f(q_i, s_k)$$
(II.35)

Interaction mutuelle entre deux rubans parallèles (c)

Soit intégrer l'expression de L_{pf} une autre fois sur la dimension x, soit intégrer deux fois sur la même dimension x l'expression de L_{ff} . L'intégration se complique encore.

$$L_{pp} = \frac{1}{d} \int_{E}^{E+d} L_{pf} dx = \frac{1}{a \cdot d} \int_{E}^{E+d} \int_{0}^{a} L_{ff} dx_{1} dx_{2}$$
(II.36)

Avec ici, dans l'expression de L_{ff} la variable ρ devient :

$$\rho = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + p^2}$$

L'intégration donne finalement :

$$L_{pp} = \frac{\mu}{ad \cdot 4\pi} \left[\left[\frac{x^2 - p^2}{2} z \cdot log(z + \sqrt{x^2 + p^2 + z^2}) + \frac{z^2 - p^2}{2} x \cdot log(x + \sqrt{x^2 + p^2 + z^2}) - \frac{1}{6} (x^2 - 2p^2 + z^2) \sqrt{x^2 + p^2 + z^2} - xpz \cdot arctg\left(\frac{x \cdot z}{p \cdot \sqrt{x^2 + p^2 + z^2}}\right) \right]_{E-a+d;E}^{E-a; E+d} (x) \right]_{S_2, S_4}^{S_1, S_3} (z)$$
(II.37)

$$L_{pp} = \frac{\mu}{ad \cdot 4\pi} \left[\left[f(x,z) \right]_{q_2;q_4}^{q_1;q_3}(x) \right]_{s_2,s_4}^{s_1,s_3}(z) \equiv \frac{\mu}{ad \cdot 4\pi} \sum_{i=1}^{4} \sum_{k=1}^{4} (-1)^{i+k} \cdot f(q_i,s_k)$$
(II.38)

b. Interaction mutuelle entre deux parallélépipèdes <u>Interaction mutuelle entre deux rubans perpendiculaires (d)</u> [7], [10].



Figure II.6 Configurations de base pour le calcul des interactions mutuelles

- 29 -

$$L_{\perp} = \frac{1}{ac} \int_{p}^{p+c} \int_{0}^{a} L_{ff} \cdot dx \cdot dy$$
(II.39)

 L_{\perp}

$$= \frac{\mu}{ac4\pi} \left[\left[\left[\frac{3z^2 - y^2}{6} y \log\left(x + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right) + \frac{3z^2 - x^2}{6} x \log\left(y + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right) + xyz \log\left(z + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right) - \frac{xy}{3} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - \frac{z^3}{6} artg\left(\frac{xy}{z \cdot \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) - \frac{zx^2}{2} artg\left(\frac{zy}{x \cdot \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) - \frac{zy^2}{2} artg\left(\frac{zx}{y \cdot \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) \right]_{E-a}^{E} (x) \Big]_{p}^{p+c} (y) \Big]_{s_2,s_4}^{s_1,s_3} (z)$$

(II.40)

$$L_{\perp} = \frac{\mu}{ac4\pi} \left[\left[\left[f(x,y,z) \right]_{q_2}^{q_1}(x) \right]_{r_2}^{r_1}(y) \right]_{s_2,s_4}^{s_1,s_3}(z) = \frac{\mu}{ac4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^4 (-1)^{i+j+k+1} f(q_i,r_j,s_k) \right]$$
(II.41)

Interaction mutuelle entre une barre et un filament (e)

Calculée soit à partir de L_{ff} soit à partir de l'expression d'un ruban et un filament L_{pf} , avec remplacement dans cette dernière de la constante p par la variable composée Y = (p - y).

$$L_{\alpha f} = \frac{1}{ab} \int_{0}^{b} \int_{0}^{b} L_{ff} \, dx \, dy = \frac{1}{b} \int_{p-b}^{p} L_{pf} \, dY$$
(II.42)

$$L_{\alpha f} = \frac{\mu}{ab \cdot 4\pi} \cdot \left[\left[\left[f(x,y,z) \right]_{q_2}^{q_1}(x) \right]_{r_2}^{r_1} \right]_{s_2,s_4}^{s_1,s_3}(z) \equiv \frac{\mu}{ab \cdot 4\pi} \cdot \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^4 (-1)^{i+j+k+1} \cdot f(q_i,r_j,s_k) \right]$$
(II.43)

Avec : f(x, y, z) celle du cas précédent $(f(x, y, z)_{\alpha f} = f(x, y, z)_{\perp})$ et :

 $\begin{cases} q_1 = E; & q_2 = E - a; & r_1 = p; & r_2 = p - b \\ s_1 = l_3 - l_1; & s_2 = l_2 + l_3 - l_1; & s_3 = l_3 + l_2; & s_4 = l_3 \end{cases}$

Interaction mutuelle entre deux barres (f)

Calculée à partir de l'interaction plaque à plaque L_{pp} , par intégration sur tous les rubans suivant y_1 de la plaque α et suivant y_2 de la plaque β .

$$L_{\alpha\beta} = \frac{1}{bc} \int_{p}^{p+c} \int_{0}^{b} L_{pp} dy_1 dy_2$$
(II.44)

Après longues intégrations et arrangements, on obtient :

$$L_{\alpha\beta} = \frac{\mu}{abcd \cdot 4\pi} \left[\left[\left[\left(\frac{6y^2 z^2 - y^4 - z^4}{24} \right) x \cdot log \left(\frac{x+R}{\rho_x} \right) + \left(\frac{6x^2 z^2 - x^4 - z^4}{24} \right) y \right] \right] \\ \left. \cdot log \left(\frac{y+R}{\rho_y} \right) + \left(\frac{6y^2 x^2 - y^4 - x^4}{24} \right) zlog \left(\frac{z+R}{\rho_z} \right) \right] \\ \left. + \frac{R}{60} \left(x^4 + y^4 + z^4 - 3y^2 x^2 - 3y^2 z^2 - 3z^2 x^2 \right) - \frac{xyz^3}{6} artg \frac{xy}{zR} \right] \\ \left. - \frac{zyx^3}{6} artg \frac{xz}{yR} - \frac{xzy^3}{6} artg \frac{yz}{xR} \right]_{q_2;q_4}^{q_1;q_3} (x) \Big]_{r_2;r_4}^{r_1;r_3} (y) \Big]_{s_2;s_4}^{s_1;s_3} (z)$$

(II.45)

De la forme

$$L_{\alpha\beta} = \frac{\mu}{abcd \cdot 4\pi} \left[\left[\left[f(x,y,z) \right]_{q_2;q_4}^{q_1;q_3}(x) \right]_{r_2;r_4}^{r_1;r_3}(y) \right]_{s_2;s_4}^{s_1;s_3}(z) = \frac{\mu}{abcd \cdot 4\pi} \sum_{i=1}^{4} \sum_{j=1}^{4} \sum_{k=1}^{4} (-1)^{i+j+k+1} f(q_i,r_j,s_k) \right]$$
(II.46)

Avec les paramètres et les bornes :

$$\begin{cases} R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} ; \quad \rho_x = \sqrt{y^2 + z^2} \\ \rho_y = \sqrt{x^2 + z^2} ; \quad \rho_z = \sqrt{x^2 + y^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_1 = E - a \\ q_2 = q_1 + d \\ q_3 = E + d \\ q_4 = E \end{cases}; \quad \begin{cases} r_1 = p - b \\ r_2 = r_1 + c \\ r_3 = p + c \\ r_4 = p \end{cases}; \quad \begin{cases} s_1 = l_3 - l_1 \\ s_2 = s_1 + l_2 \\ s_3 = l_3 + l_2 \\ s_4 = l_3 \end{cases}$$

Interactions propres

Les interactions propres se calculent suivant le cas par les mêmes expressions mais en prenant les mêmes dimensions pour les éléments et en faisant tendre les décalages de position à zéro.

$$\begin{cases} l_1 = l_2 \\ a = d \\ b = c \end{cases} ; \begin{cases} E \to 0 \\ p \to 0 \\ l_3 \to 0 \end{cases}$$

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté en détail les fondements de la méthode PEEC (Partial Elément Equivalent Circuit). On vu que le principe de base consiste tout simplement à transformé un problème électromagnétique à un circuit électrique équivalant. Ce qui rend par la suite sa simulation plus aisée et plus souple. Cette approche repose bien entendu sur la détermination des différents composants des circuits électriques (élément partiel résistif et inductif).

Des formulations de calcul des inductances partielles sont présentées pour toutes configurations possibles, en commençant du cas le plus simple, entre deux filaments, au cas le plus réel mais, malheureusement nécessite un calcul d'intégrale lourd pour calculer les interactions magnétiques entre deux conducteurs parallélépipèdes.

CHAPITRE III

Calcul des interactions magnétiques entre deux bobines rectangulaires

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va vous présenter les résultats de simulation du calcul tridimensionnel du champ magnétique engendré par une bobine conductrice de forme rectangulaire. Ensuite dans le but de déterminer les paramètres physiques d'un system de transfert d'énergie sans contactes, on va vous proposer les résultats obtenus pour calculer les interactions magnétiques entre deux bobines rectangulaires, en particulier l'inductance magnétique pour différentes positions.

III.2 Principe d'alignement par magnétisme des arbres

Le figure III.1 représente le principe du procédé d'alignement par magnétisme, il est formé de :

Driven: Qui peut être une pompe d'eau, est un dispositif rotatif autour de son arbre.

Driver : Qui peut être un moteur asynchrone, il assure la traction du driven.

Accoupleur : C'est l'endroit de liaison entre les deux arbres des deux machines tournantes (Driven et Driver), déjà expliquer au chapitre I.

Primary coil : La bobine primaire alimentée par une tension à fréquence variable, elle joue le rôle de l'inducteur.

Secondary coil : La bobine secondaire qui joue le rôle de l'induit, elle est le siège d'une force électromotrice induite par la bobine primaire.



La variation du flux magnétique engendré par l'inducteur provoque un fem induite au niveau du secondaire, par conséquent la circulation des courants induits dans la bobine secondaire. On parle donc du transfert d'énergie sans contacte, dont il peut être schématisé, du point de vue circuit électrique, par la figure III.2. La valeur de la force électromotrice induite dépend fortement de la position du deux bobines. Comment déjà mentionné au chapitre I, il existe deux types de désalignements, soit un décalage ou soit une inclinaison. Le constat est que le transfert d'énergie est maximale pour un zéro désalignement, à la fois décalage ou inclinaison.



III.3 Calcul du champ magnétique engendré par une bobine. III.3.1. Modèle géométrique

Nous considérons le modèle géométrique fondamentale, comme montre la figure III.3 ainsi que les paramètres géométriques et physiques du système a étudié. Il s'agit des interactions magnétiques entre deux bobines rectangulaires, dont l'une est alimentée et la seconde subit une force électromotrice induite.

En premier lieu dans l'objectif de vous démontré la robustesse de notre méthode de calcul, basée sur l'approche intégrale en particulier PEEC, on va calculer le champ magnétique provoqué par une seule bobine.



Figure III.3: a) Système de deux bobines

b) Vu du haut d'une bobine

Paramètre	Value	Description
lx (mm)	19.95	Longueur de la bobine primaire
ly (mm)	19.95	Largeur de la bobine primaire
lz (mm)	11.4	Hauteur de la bobine primaire
Lx (mm)	51.35	Longueur de la bobine secondaire
Ly (mm)	51.35	Largeur de la bobine secondaire
LZ (mm)	1.3	Longueur de la bobine secondaire
Lar1 (mm)	5.55	Épaisseur de la bobine primaire
Lar2(mm)	6.15	Épaisseur de la bobine secondaire
<i>α</i> (mm)	2.8	Distance entre la bobine primaire et la bobine secondaire dans la direction x
β (mm)	Variable	Distance entre la bobine primaire et secondaire dans la direction y
λ(mm)	68.55	Distance entre la bobine primaire et secondaire dans la direction z
N1	100	Nombre de tours de la bobine primaire
N2	1	Nombre de tours de la bobine secondaire

Tableau III.1: Model des paramètres

III.3.2. Simulation du champ magnétique engendré par une bobine

Dans l'objectif d'appliquer la méthode PEEC, représentée en chapitre II, il est recommandé de discrétiser la structure étudiée en conducteurs élémentaires. Par conséquent, une bobine rectangulaire peut être modélisée par quatre segments conducteurs de forme rectangulaire. Il existe trois topologies possibles pour modéliser une bobine rectangulaire, en particulier les corniers (ou les quatre coins), voire figure III.4. Les dimensions de chaque conducteurs élémentaires $2l_x \times 2l_y \times 2l_z$.



Figure III.4: Vu du haut de trois configurations possibles modélisant une bobine rectangulaire

Les résultats de simulation obtenus, du calcul du champ magnétique engendré par une bobine rectangulaire juste au-dessous de la bobine, précisément à 0.1 mm, sont représentés par les figures III.5 et III.6.

Les résultats montrent clairement l'impact des trois topologies proposées pour modéliser une bobine sur la carte du champ magnétique, en particulier au niveau des corniers, figure III.6, là où on a visualisé la liaison entre deux conducteurs élémentaires.



Figure III.5. Champ magnétique dans le plan XY, visualisation 3D des trois configurations possibles



Figure III.6. Champ magnétique dans le plan XY, visualisation 2D des trois configurations possibles





Figure III.7. Erreur du champ magnétique dans le plan XY, visualisation 2D des trois configurations (a) entre configurations a et b. (b) entre configurations b and c. (c) entre configuration a and c

Les trois figures représentées par figure III.7 (a, b et c) représentent respectivement l'erreur entre les différentes configurations (a-b), (b-c) et (a-c). il est évident d'avoir juste une valeur de différence dans les courriers et zéro ailleurs.

III.4 Calcul des interactions magnétiques entre deux bobines.

Il est intéressent de déterminer les différents éléments, résistances de chaque bobine R_1 et R_2 et les inductances propres L_1 et L_2 ainsi que l'inductance mutuelle entre les bobines M_{12} . Le détaillé du calcul a fait l'objet du deuxième chapitre.

L'inductance mutuelle est calculée et simulée pour différents positions en respectant les paramètres géométriques et physiques données par le tableau III. 1.

Les résultats de simulation obtenus au long de trois lignes parallèles au axe y pour $x_1 = 0mm$, $x_2 = \frac{L_x}{2}$ and $x_3 = L_x$, comme montre la figure III.8



Figure III.8. Représentation de l'inductance mutuelle au long de l'axe Y pour (a) $x_1 = 0mm$, (b) $x_2 = \frac{L_x}{2}$, and $x_3 = L_x$

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons implémenté des développements tridimensionnels rapides et précis, basée sur l'approche intégrale, pour le calcul du champ magnétique d'une bobine massive de forme rectangulaire et pour calculer les interactions magnétiques (inductance mutuelle) entre deux bobines. Cette dernière est considérée comme élément de base d'un système de transfert d'énergie sans contacte. En particulier lors de l'étude des circuits électriques équivalents à la structure étudié.

Conclusion générale

Conclusion Générale

D'après la recherche biographique effectue au long de la préparation de ce projet de fin d'étude on a conclu l'intérêt de bon alignement sur la durée de vie des machines tournantes, en particulier au niveau des accouplements, par conséquent la démarche de vérification périodique d'alignement est considérée comme indispensable pour le travail de l'ingénieur de maintenance.

Le deuxième point important est que la modélisation par la méthode PEEC offre beaucoup d'avantage du point de vu temps de calcul, espace mémoire occupé lors de la compilation ainsi que sa précision.

Comme suit à ce projet de fin étude on propose :

Traduire les différents types de décalages excitants en gradeurs électrique mesurable telle que la tension électrique en fonction du secondaire.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] John Piotrowski, "Shaft Alignment Handbook", Third edition Marcel Dekker, CRC Press, New York and Base, November 2006.
- [2] S. Garg, S. Kumar, R. Deshpande, A.K. Sharma, "Vibration analysis of misaligned shaft – Vibration analysis of misaligned shaft –ball bearing system", Indian Journal of Science and Technology, Volume: 02, No. 9, September 2009.
- [3] V. HARIHARAN AND PSS. SRINIVASAN, "A Laser Shaft Alignment by IPS- PSD's for Rotary machine", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 04 Issue: 04, April 2017.
- [4] L. AOMAR, "Calcul tridimensionnel des courants induits dans des dispositifs électromagnétiques par la méthode intégrale PEEC et par une approche Intégro-Différentielle", Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Seddik BENYAHIA Jijel, Algérie, Septembre 2019.
- [5] Bachir HELIFA, "Contribution à la simulation du CND par courants de Foucault en vue de la caractérisation des fissures debouchantes", Thèse de doctorat De l'université de Nantes, France, 1 Juin 2012.
- [6] Elie BORIDY, "Electromagnétisme Théorie et application", Presses de l'université de Québec, Canada, 1992.
- [7] Cletus Hoer and Carl Love, "Exact Inductance Equations for Rectangular Conductors With Applications to More Complicated Geometries", JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards-C. Engineering and Instrumentation Vol. 69C, No.2, April-June 1965.
- [8] E. Clavel, "Vers un outil de conception du câblage : le logiciel InCa", Thèse de docteur de l'INPG, Grenoble, 21 Nov. 1996.
- [9] Clayton R. Paul, "Inductance: loop and partial", Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010.
- [10] E. B. ROSA, "The self and mutual inductances of linear conductors", Bulletin of the Bureau of Standards, 4, No. 2, 1908.
- [11] A. E. Ruehli, "Inductance calculations in a complex integrated circuit environment", IBM J. RES. DEVLOP., September 1972.

- [12] Albert E. Ruehli, and Pierce A. Brennan, "Efficient Capacitance Calculations for Three-Dimensional Multiconductor Systems", IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, FEBRUARY 1973.
- [13] Albert E. Ruehli, "Equivalent Circuit Models for Three-Dimensional Multiconductor Systems", IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques, VOL. WIT-22, NO. 3, MARCH 1974.
- [14] Jan Elizabeth Garrett, "Advancements of the partial element equivalent circuit formulation", Thèse de doctorat de l'université Kentucky, USA, 1997.
- [15] L. Aomar, H. Allag, M. Feliachi and J. P. Yonnet, "3-D Integral Approach for Calculating Mutual Interactions Between Polygon-Shaped Massive Coils," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 53, No. 11, 2017.

Résumé-

Dans le domaine industriel, l'alignement des arbres des machines tournantes est indispensable pour assurer une longue durée de vie des machines et permit d'éviter des pannes indésirables et couteuses. Actuellement, elles existent plusieurs méthodes d'alignement tel que la méthode dite laser.

Dans cette étude, nous vous proposons une idée originale d'une nouvelle méthode basée sur les interactions magnétiques entres deux bobines. Cette méthode est caractérisée par la facilité de mise en œuvre, la précision et son faible coût de fabrication.

Abstract-

In industrially, the shaft alignment in rotating machinery is indispensable to ensure a long service life of the machines and to avoid unwanted breakdowns. Acutely they are some methods to correcting this shaft, as a laser shaft alignment.

In this study, we propose a new idea based in magnetic interaction between tow coils. This method is characterized by ease implementation, accuracy and low manufacturing cost.

منخص۔

في المجال الصناعي، تعتبر عملية تحقيق توازن دقيق بين محاور دوران المكنات عملية مهمة لضمان مدة أطول لعمل المكنات وتفادي الأعطال المزعجة والمكلفة. وحاليا توجد عدة طرق مختلفة لمراجعة خلل التوازن وأبرزها التي تعتمد على أشعة الليزر.

من خلا هده الدراسة نقترح لأول مرة ة فكرة طريقة جديدة تعتمد على التبادل والتداخل المغناطيسي بين لفتين. تتميز هذه الطريقة ببساطة الاستعمال وبدقتها العالية، إضافة إلى تكلفة تصنيعها المنخفضة. المنخفضة.