

A. BENOUDJIT

introduction
aux machines électriques
machines à courant continu

1



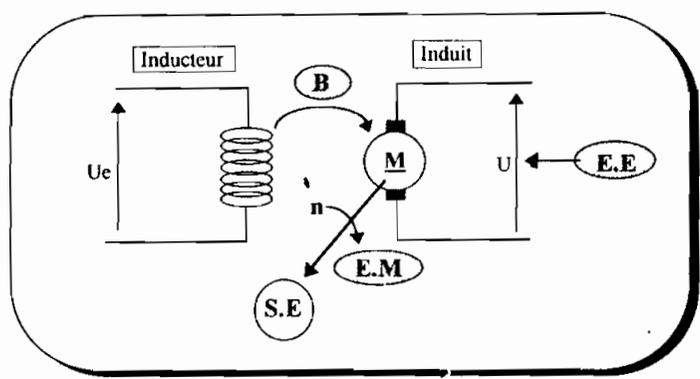
Presses de l'Université de Batna

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

ELECTROTECHNIQUE
MACHINES ELECTRIQUES

157 2470



**INTRODUCTION AUX MACHINES ELECTRIQUES
MACHINES A COURANT CONTINU**

(Tome - 1)

A. BENOUDJIT

*Ingénieur de l'Ecole Nationale Polytechnique ALGER
M.Phil University of BIRMINGHAM - England (U.K)
Chargé de cours à l'Institut de Génie Electrique
UNIVERSITE DE BATNA.*

OCT. 1995

1079

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
والحمد لله رب العالمين
والصلاة والسلام على سيد المرسلين

وبعد: احمد الله ان وفقني وشرفني فوجهت جل اهتمامي وجهدي لكتابة وتصميم هذا الكتاب الاساسي في مجال الهندسة الكهربائية وبالأخص الماكينات الكهربائية.

الجزء الأول من هذا الكتاب يحتوي على قسمين:

(1) مدخل لدراسة الماكينات الكهربائية.

(2) الماكينات ذات التيار المستمر.

وإنني ادمو الله أن يتقبل مني هذا العمل المتواضع خالصا لوجهه وان يؤجرني عليه بقدر ما يحققه للطلبة من فائدة والله من وراء القصد.

اكتوبر 1995

عز الدين ابن وجيت

A la mémoire de mes parents.

A toute ma famille.

Pour une Algérie prospère.

REMERCIEMENTS

Après ces années d'études et d'enseignement, je pense tout particulièrement aux nombreux enseignants que j'ai eu l'honneur de rencontrer pendant et après ma formation, qui ont su me communiquer leurs connaissances et me faire partager leurs motivations.

Je pense aussi à tous les étudiants que j'ai eu le plaisir d'encadrer pour leur formation et qui durant cette période m'ont permis grâce à leurs nombreuses questions d'améliorer la compréhension de cet ouvrage.

Enfin, à tous mes amis et collègues qui n'ont cessé de m'encourager pour la finalisation de ce travail.

Je tiens à remercier très vivement M. R. MERAZGUIA pour son appui moral, M. K. NAIT SAID et M. M. KADJOU DJ pour leurs précieuses lectures, ainsi que mon frère H'MIDA pour ses dernières retouches.

Que Dieu guide nos pas dans la voie du savoir, de la vérité et de la justice.

A. BENOUDJIT

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

AVANT-PROPOS

Ce livre sur les "machines électriques" est destiné aux étudiants D.E.U.A. et ingénieurs des universités pour la spécialité d'électrotechnique et à tous ceux qui ont à pratiquer cette discipline.

Ce cours qui comprend l'enseignement des machines électriques, est expliqué d'une manière simple afin d'éviter l'effet répulsif de nos étudiants devant la complexité du sujet, mais sans abaisser le niveau. En effet, cet enseignement se limite aux questions essentielles en les traitant d'une manière approfondie et simple afin d'expliquer les phénomènes les plus difficiles.

Des figures et des exemples sont largement utilisés à travers le développement de l'ouvrage, car l'expérience à travers les années, a démontré que pédagogiquement de telles illustrations permettent une meilleure compréhension du sujet.

Les exercices et problèmes de synthèse à la fin de chaque chapitre sont d'une aide précieuse pour les étudiants .

Les questions de révision à la fin de chaque chapitre permettent de souligner et de faire ressortir les points essentiels de chaque partie.

Ce premier tome est scindé en deux grandes parties:

La première introduit les rappels et les fondements de base nécessaires en électrotechnique pour aborder le cours sur les machines électriques. Cette partie sera divisée en trois chapitres et qui sont présentés comme suit:

1 - Introduction aux machines électriques: *ce chapitre définira en premier lieu l'électrotechnique comme environnement des machines électriques. La deuxième partie traitera de la classification et de la constitution générale des machines électriques.*

2 - Aspect magnétique dans les machines électriques: ce chapitre présentera l'étude des phénomènes magnétique et électromagnétique ainsi que leur impact sur le fonctionnement des machines électriques.

3 - Introduction à l'étude généralisée des machines électriques: ce chapitre introduira l'étude généralisée des machines électriques par des bobines couplées magnétiquement. Cela conduira à l'élaboration des schémas équivalents des différentes machines électriques.

La deuxième partie traite en particulier des machines à courant continu. Cette partie sera divisée en trois chapitres comme suit:

4 - Machines à courant continu (partie -- 01): ce chapitre débutera par la présentation des équations générales de ces machines. Ensuite par l'étude des principaux types d'enroulements rencontrés sur ces machines.

5 - Machines à courant continu (partie -- 02): ce chapitre abordera deux phénomènes très importants dans le fonctionnement de ces machines à savoir: la « réaction magnétique d'induit » et la « commutation ».

6 - Machines à courant continu (partie -- 03): ce chapitre présentera l'étude des différentes caractéristiques de fonctionnement de ces machines soit en « mode générateur » ou en « mode moteur ».

OCT. 1995
A. BENOUDJIT.

PREFACE

Le présent ouvrage sur les machines électrique de M. A. BENOUDJIT, représente une riche expérience des enseignements de l'électrotechnique à l'Institut de Génie Electrique de l'Université de BATNA.

Sans doute, la machine électrique constitue l'appareil où l'on a appréhendé des phénomènes physiques sous trois aspects différents mais fortement couplés. Ces aspects sont de nature électrique, magnétique et généralement mécanique.

Cela fait peut être la raison majeure pour laquelle nos étudiants arrivent avec beaucoup de difficultés à la compréhension du cours des machines électriques, si toutefois le coté illustratif est dérisoire. De ce fait, la réalisation des travaux pratiques conformes aux cours dispensés devient un support nécessaire pour cristalliser davantage les connaissances théoriques acquises.

Partant de ce constat, l'auteur développe une approche didactique tout a fait remarquable, reposant sur la méthodologie d'aborder les nouveaux concepts en allant du simple (connu), au complexe par l'usage d'un travail illustratif appréciable.

Des questions de cours et des exercices d'applications donnés à la fin de chaque chapitre en guise d'un self contrôle permettent de synthétiser globalement les connaissances acquises pour pouvoir aborder les prochains cours en toute quiétude.

En dernier lieu et à mon sens, cet ouvrage constitue un instrument d'une grande utilité aussi bien pour les initiés que pour les étudiants ingénieurs et D.E.U.A en électrotechnique.

Md. Saïd NAIT SAID

*Chargé de cours à l'Institut de Génie Electrique
Université de BATNA*

Le présent document de M. A. BENOUDJIT est le fruit de plusieurs années d'enseignement des machines électriques au sein de l'Institut de Génie électrique à l'Université de BATNA.

L'expérience didactique est présente tout le long de cet ouvrage par des explications graphiques originales et des exemples pratiques qui font la valeur de celui-ci.

Par sa présentation et son contenu le document peut servir de référence pour les étudiants préparant une spécialisation en électrotechnique.

De plus il peut être d'une grande utilité pour les étudiants de spécialité parallèle, Mécanique, Hydraulique, etc...

Rachid ABDESSEMED

*Maître de Conférence à L'Institut de Génie Electrique
Université de BATNA*

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

SOMMAIRE

CHAPITRE UN **INTRODUCTION AUX MACHINES ELECTRIQUES**

1.1	Généralités	
1.1.1	Systèmes électriques simples	18
1.1.2	Systèmes électriques complexes	19
1.1.3	L'énergie électrique	20
1.1.4	L'énergie électrique en Algérie	22
1.2	Caractérisation et classification des machines électriques	
1.2.1	Caractérisation d'une machine électrique	28
1.2.2	Classification des machines électriques	29
1.3	Constitution générale des machines électriques	
1.3.1	Organes mécaniques	32
1.3.2	Circuit magnétique	33
1.3.3	Organes électriques	35
1.4	Les matériaux utilisés dans les machines électriques	
1.4.1	Les matériaux de construction	43
1.4.2	Les matériaux actifs	43
1.4.3	Les matériaux isolants	43
1.5	Questions de révision	44

CHAPITRE DEUX **ASPECT MAGNETIQUE DANS LES MACHINES ELECTRIQUES**

2.1	Rappels.	
2.1.1	Champ magnétique	50
2.1.2	Aimantation	50
2.1.3	Flux magnétique	50
2.1.4	Intensité du champ	51
2.1.5	Susceptibilité	51
2.2	Classification magnétique des matériaux.	
2.2.1	Généralités	52
2.2.2	Diamagnétiques	52
2.2.3	Paramagnétiques	53
2.2.4	Ferromagnétiques	53
2.2.5	Antiferromagnétiques	54

2.2.6	Ferrimagnétiques.....	54
2.3	Courbes de première aimantation.	
2.3.1	Les courbes $B = f(H)$ ou $J = f(H)$	56
2.3.2	Tracé de la courbe.....	56
2.3.3	Interprétation de la courbe de première aimantation.....	57
2.4	Phénomène et cycle d'hystérésis.	
2.4.1	Phénomène d'hystérésis.....	59
2.4.2	Cycle d'hystérésis.....	59
2.4.3	Conséquences de l'hystérésis dans les machines électriques.....	60
2.5	Les pertes dans le fer.	
2.5.1	Pertes par hystérésis.....	61
2.5.2	Pertes par courant de Foucault.....	62
2.6	Circuits magnétiques.	
2.6.1	Généralités.....	64
2.6.2	Caractéristiques d'un circuit magnétique et analogie d'Hopkinson.....	65
2.6.3	Calcul de la force magnétomotrice d'une M.C.C.	67
2.7	Questions de révision	72
2.8	Problèmes d'application.	73

**CHAPITRE TROIS *INTRODUCTION A L'ETUDE GENERALISEE
DES MACHINES ELECTRIQUES***

3.1	Rappels sur l'électromagnétisme	
3.1.1	Formule d'Ampère.....	85
3.1.2	Loi de Biot et Savart - Laplace	85
3.1.3	Relations de l'induction électromagnétique « B ».....	86
3.1.4	Induction électromagnétique.....	88
3.1.5	Auto-induction	89
3.2	Cas des bobines couplées magnétiquement	
3.2.1	Développement des équations du circuit.....	90
3.2.2	Coefficient de couplage	92
3.2.3	Coefficient de dispersion	93
3.3	Représentation des machines électriques tournantes par des bobines couplées.	
3.3.1	Equation de la f.e.m en termes d'inductances.....	94
3.3.2	Equation du couple en termes d'inductances	95
3.4	Circuits équivalents des principaux types de machines	
3.4.1	Cas d'une bobine excitée seule	97

3.4.2	Cas où les deux bobines sont excitées ...	98
3.4.3	Schéma équivalent du transformateur.....	100
3.4.4	Schéma équivalent de la machine à induction	102
3.4.5	Schéma équivalent de machine synchrone.....	103
3.4.6	Schéma équivalent de la machine à courant continu	105
3.5	Questions de révision	107

CHAPITRE QUATRE *LES MACHINES A COURANT CONTINU*
(Partie -- 01)
EQUATIONS GENERALES -- ENROULEMENTS

4.1	Rappels sur les lois fondamentales	
4.1.1	Loi de LAPLACE	113
4.1.2	Loi de LENZ	113
4.2	Calcul de la f.e.m d'une machine à courant continu	
4.2.1	Principe de fonctionnement	115
4.2.2	Production d'une f.e.m de polarité fixe	115
4.2.3	Dynamo de Gramme	117
4.2.4	Machines à induit en tambour	119
4.2.5	Généralisation de l'expression de la f.e.m	120
4.3	Equations générales dans les machines à courant continu	
4.3.1	Equations des tensions	123
4.3.2	Bilan des puissances - Pertes	124
4.3.3	Rendement	126
4.3.4	Diagramme des puissances	127
4.3.5	Couple	128
4.4	Enroulements dans les machines à courant continu	
4.4.1	Définitions.....	129
4.4.2	Exemple d'un enroulement imbriqué simple.....	132
4.4.3	Exemple d'un enroulement ondulé simple.....	136
4.4.4	Exercices d'application	137
4.5	Questions de révision	138

CHAPITRE CINQ *LES MACHINES A COURANT CONTINU*
(Partie -- 02)
REACTION D'INDUIT -- COMMUTATION

5.1	Réaction d'induit magnétique dans les machines à courant continu	
5.1.1	Mise en évidence de la R.M.I	143
5.1.2	Effets de la R.M.I	144

5.1.3	Réaction magnétique transversale(R.M.T) et longitudinale(R.M.L)	145
5.1.4	Compensation et atténuation de la R.M.I	147
5.1.5	Exercices d'application	150
5.2	Phénomène de commutation dans les machines à courant continu.	
5.2.1	Mise en évidence du phénomène de commutation	153
5.2.2	F.e.m induites dans la section en court-circuit	155
5.2.3	Analyse d'une commutation simple	157
5.2.4	Procédés d'amélioration de la commutation	159
5.2.5	Exercices d'application	160
5.3	Questions de révision	163

CHAPITRE SIX**LES MACHINES A COURANT CONTINU****(Partie -- 03)****CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT**

6.1	Les machines à courant continu en fonctionnement générateur.	
6.1.1	Fonctionnement à vide	169
6.1.2	Fonctionnement en excitation indépendante	172
6.1.3	Fonctionnement en excitation shunt	174
6.1.4	Fonctionnement en excitation série	177
6.1.5	Fonctionnement en excitation composée	178
6.1.6	Exercice d'application	180
6.2	Les machines à courant continu en fonctionnement moteur.	
6.2.1	Moteur à excitation séparée ou shunt	185
6.2.2	Moteur à excitation série	195
6.2.3	Comparaison des moteurs pour différentes excitations	198
6.2.4	Exercice d'application	200
6.3	Problème d'application	203...
6.4	Questions de révision	209