

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

GÉNIE ÉLECTRIQUE

Électrotechnique

Machines et réseaux

Jean-Pierre FANTON

ellipses

TABLE

AVANT-PROPOS		7
1	OBJET DU CHAPITRE.....	7
2	ÉLÉMENTS ÉCONOMIQUES.....	8
2.1	<i>Industries de construction</i>	8
2.2	<i>Les industries de production/transport d'électricité</i>	11
3	LA PLACE DE L'ÉLECTROTECHNIQUE.....	13
3.1	<i>au quotidien</i>	13
3.2	<i>dans le monde</i>	14
3.3	<i>L'innovation en Électrotechnique et ses retombées</i>	14
4	LES BESOINS DE L'INDUSTRIE ET LEUR ÉVOLUTION.....	15
4.1	<i>Les interactions nécessaires entre l'Electrotechnique et les autres disciplines de l'ingénieur</i>	15
CHAPITRE INTRODUCTIF		17
1	OBJET DU CHAPITRE.....	17
2	CONTEXTE.....	17
2.1	<i>Grandeurs physiques, notations, et symboles utilisés</i>	18
2.2	<i>Dualité</i>	19
3	ÉLÉMENTS D'ANALYSE VECTORIELLE.....	20
3.1	<i>Pseudo-vecteur, pseudo-scalaire</i>	20
3.2	<i>Produit vectoriel ; orientation des repères</i>	20
3.3	<i>Opérateurs vectoriels</i>	21
3.4	<i>Transformations intégrales</i>	24
3.5	<i>Théorème de Gauss</i>	25
3.6	<i>Propriétés des champs de vecteurs</i>	25
4	ELECTROSTATIQUE.....	27
4.1	<i>Types d'interactions entre particules</i>	27
4.2	<i>Interaction électrostatique ; loi de Coulomb</i>	27
4.3	<i>Equation de Poisson</i>	28
5	ELECTROMAGNÉTISME.....	28
5.1	<i>Interaction entre circuit électrique et champ magnétique</i>	28
5.2	<i>Propriétés des différents milieux</i>	30
5.3	<i>Enoncé global des lois</i>	31
5.4	<i>Théorème d'Ampère ; force magnéto-motrice (f.m.m.)</i>	31
5.5	<i>Loi de Faraday</i>	32
5.6	<i>Interactions mécaniques</i>	33
6	COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS DES CHAMPS STATIQUES E ET B.....	34
7	MODÈLE GÉNÉRAL DE MAXWELL.....	35
7.1	<i>Cas général</i>	35
7.2	<i>Cas particuliers</i>	36
7.3	<i>Modèle général de Maxwell : approximation dite de l'Electrotechnique</i>	37
7.4	<i>Equivalence entre équations de Maxwell et forme usuelle des équations de l'électromagnétisme</i>	38
8	UNITÉS PHYSIQUES ET DIMENSIONS.....	39
CHAPITRE I - MAGNÉTISME ET ÉLECTROMAGNÉTISME		41
1	OBJET DU CHAPITRE.....	41
2	PROPRIÉTÉS DES COMPOSANTS MAGNÉTIQUES.....	41
2.1	<i>grandeurs magnétiques</i>	41
2.2	<i>circuit magnétique</i>	42
2.3	<i>Pourquoi deux grandeurs de champ ?</i>	43
2.4	<i>Loi d'Ohm du circuit magnétique</i>	43
2.5	<i>Parallèle entre grandeurs électriques et magnétiques</i>	45
3	APPLICATIONS DE LA LOI D'OHM MAGNÉTIQUE.....	46

3.1	circuit à éléments en série	46
3.2	circuit à branches parallèles	46
3.3	Branches avec enroulements	46
3.4	Synthèse : les lois des circuits linéaires	46
3.5	Entrefer	47
4	AUTOINDUCTANCE ET INDUCTANCE MUTUELLE	48
4.1	cas de 1 spire : calcul du flux coupé	48
4.2	cas d'un enroulement : flux total coupé (flux d'enroulement)	48
4.3	Inductance propre : définition	48
4.4	Energie électromagnétique d'une bobine	49
4.5	Inductance mutuelle : définition	49
4.6	Propriétés des inductances mutuelles	49
5	PROPRIÉTÉS RÉELLES	50
5.1	Comportement du champ magnétique à l'interface entre deux milieux	50
5.2	Fuites magnétiques	50
5.3	ferromagnétisme	53
6	INDUCTANCE RÉELLE	54
6.1	les différents types physiques de pertes	57
6.2	cas des courants alternatifs	57
7	AIMANTS PERMANENTS	57
7.1	types et caractéristiques	61
7.2	Comportement du matériau	61
7.3	Fonctionnement d'un aimant dans un circuit magnétique	62
7.4	dimensionnement des aimants	62
8	APPLICATIONS ÉLECTRO-MÉCANIQUES	63
8.1	Efficacité de la conversion électro-mécanique	64
8.2	Energie électromagnétique	64
8.3	effort magnétique ; pression magnétique	64
8.4	Limitations rencontrées en conversion d'énergie	65
8.5	Electroaimant	66
8.6	circuit magnétique déformable par rotation	66
8.7	Système électromagnétique déformable	69

CHAPITRE II - LES MACHINES STATIQUES

1	OBJET DU CHAPITRE	71
2	CIRCUITS ÉLÉMENTAIRES EN COURANT ALTERNATIF	71
2.1	impédance pure R, L, C	72
2.2	impédance quelconque	72
3	LA BOBINE À NOYAU DE FER EN COURANT ALTERNATIF	74
3.1	Conventions de signe	76
3.2	les équations de base en courant alternatif	76
3.3	Synthèse : inductance réelle	77
4	LE TRANSFORMATEUR ÉLECTRIQUE	81
4.1	principe du transformateur	82
4.2	transformateur parfait	83
4.3	Analyse du fonctionnement	83
5	TRANSFORMATEUR RÉEL : PROPRIÉTÉS	84
5.1	recherche d'un schéma équivalent	86
6	APPLICATIONS PARTICULIÈRES	87
6.1	Transformateur de puissance	93
6.2	Autotransformateur	93
6.3	Transformateur adaptateur d'impédance	95
6.4	transformateur torique	96
6.5	spire de Frager	96
6.6	fonctionnement en parallèle de transformateurs	97
7	REMARQUES FINALES	97
7.1	Limitations d'emploi des transformateurs	98
7.2	Le choix de la fréquence	98

46
46
46
47
48
48
48
49
49
0
0
7
7
CHAPITRE III - LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES101

1	OBJET DU CHAPITRE.....	101
2	GÉNÉRALITÉS.....	101
2.1	Théorème de Boucherot.....	101
2.2	Production de tensions polyphasées.....	104
2.3	2.3 Pourquoi des tensions polyphasées ?.....	106
2.4	Champs tournants.....	108
3	SYSTÈMES TRIPHASÉS.....	112
3.1	Montage en étoile.....	112
3.2	Relations entre les grandeurs.....	113
3.3	Montage en triangle.....	114
3.4	Propriétés résumées.....	115
3.5	Equivalence étoile-triangle.....	115
3.6	Point neutre ; terre.....	116
3.7	Transformateurs triphasés.....	117
4	IMPÉDANCE CYCLIQUE ; SCHÉMA MONOPHASÉ ÉQUIVALENT.....	118
5	BOBINAGE D'UNE MACHINE TOURNANTE.....	119
5.1	Champ produit.....	120
5.2	Bobinage triphasé complet.....	121
5.3	Inversion du sens de rotation.....	124
5.4	Prise en compte des harmoniques spatiaux.....	124

CHAPITRE IV - ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE131

1	INTRODUCTION.....	131
2	TYPES DE CONVERTISSEUR.....	132
3	COMPOSANTS UTILISÉS.....	133
4	MONTAGES DE BASE.....	135
4.1	Redressement monophasé simple alternance.....	135
4.2	F.é.m. et diode débitant sur circuit RC parallèle.....	136
4.3	F.é.m et diode débitant sur circuit RL série.....	137
4.4	Diode de roue libre ; conduction continue.....	138
4.5	Redressement monophasé avec thyristor.....	139
4.6	Bras de pont.....	139
5	DE L'ALTERNATIF AU CONTINU : LES REDRESSEURS.....	141
5.1	Pont de diodes monophasé.....	141
5.2	Pont de Graëtz à diodes.....	141
6	DU CONTINU AU CONTINU : LES HACHEURS.....	143
6.1	Hacheur dévolteur ou abaisseur.....	143
6.2	Hacheur survolteur ou élévateur.....	144
6.3	Hacheur réversible en courant.....	144
6.4	Hacheur "en H".....	145
7	DU CONTINU A L'ALTERNATIF : LES ONDULEURS.....	146
7.1	Onduleur autonome monophasé.....	146
7.2	Onduleur triphasé.....	146
7.3	Redresseur-onduleur monophasé.....	148
7.4	Pont de thyristors monophasé.....	149
7.5	Pont de Graëtz à thyristors.....	150
7.6	Modulation de Largeur d'Impulsions.....	152
7.7	Onduleur à résonance.....	153
8	TECHNIQUES PARTICULIÈRES.....	154
8.1	Gradateur.....	155
8.2	Cyclo-convertisseur.....	155
8.3	Comparaisons de formes d'onde de tension et de courant.....	156
8.4	Récapitulation.....	158

CHAPITRE V - LES MACHINES À COURANT CONTINU	163
1 INTRODUCTION	163
2 GÉNÉRALITÉS.....	163
2.1 Lois fondamentales	163
2.2 Réversibilité de la transformation électromécanique	165
2.3 Circuit tournant dans un champ d'induction	166
2.4 Anneau de Gramme	167
2.5 f.é.m. et couple d'une machine industrielle.....	168
3 ÉLÉMENTS TECHNIQUES.....	169
3.1 Enroulements	169
3.2 Commutation	170
3.3 Modes d'excitation	171
3.4 Machines multipolaires.....	173
3.5 Réaction d'induit.....	173
3.6 Effet d'un décalage angulaire des balais.....	175
4 FONCTIONNEMENT EN MOTEUR.....	176
4.1 Equations générales.....	176
4.2 Régulation de vitesse	177
4.3 montages utilisés.....	178
4.4 caractéristiques.....	178
4.5 Moteur avec excitation séparée.....	179
4.6 Moteur avec excitation série.....	180
4.7 Démarrage.....	181
4.8 Freinage et récupération	181
4.9 Rendement	182
5 FONCTIONNEMENT EN GÉNÉRATRICE	183
5.1 Effet de la saturation	183
5.2 effet de l'hystérésis	183
6 MOTEUR MONOPHASÉ À COLLECTEUR	184
7 MODÉLISATION EN RÉGIME NON PERMANENT	184
7.1 principe.....	185
7.2 Application à la machine à courant continu.....	185
8 SYNTHÈSE : POURQUOI UTILISE-T-ON ENCORE DES MOTEURS À COURANT CONTINU?	191
 CHAPITRE VI - LA MACHINE SYNCHRONE	 195
1 INTRODUCTION	195
2 GÉNÉRALITÉS.....	195
2.1 Principe de la machine synchrone.....	195
2.2 Disposition pratique	197
2.3 Machines à pôles lisses et à pôles saillants	198
2.4 amélioration de la forme d'onde.....	200
2.5 Influence du nombre de paires de pôles	200
2.6 forme d'onde du champ induit	201
3 MODÉLISATION	202
3.1 Couplages entre les enroulements d'une machine synchrone	202
3.2 Machine non saturée : modèle simplifié	205
3.3 Machine saturée.....	206
3.4 Angle interne.....	207
3.5 Stabilité.....	208
3.6 Modes de fonctionnement	210
4 FONCTIONNEMENT EN ALTERNATEUR	211
4.1 sur réseau à tension imposée.....	211
4.2 sur charge isolée.....	212
4.3 Couplage au réseau	212
4.4 Domaine d'exploitation.....	213
5 FONCTIONNEMENT EN MOTEUR.....	214
6 FONCTIONNEMENT EN COMPENSATEUR	215
7 PHÉNOMÈNE DE RÉACTION D'INDUIT	215

63
63
53
53
16
7
8
9
2
7

7.1	débit sur résistance pure.....	215
7.2	débit sur inductance pure.....	216
7.3	débit sur capacité pure.....	216
8	TECHNIQUES PARTICULIÈRES.....	216
8.1	Machine synchrone autopilotée.....	216
8.2	Machine à réluctance variable.....	218
8.3	Moteur pas-à-pas.....	219
9	APPLICATION DE LA MODÉLISATION DE PARK À LA MACHINE SYNCHRONE.....	219
10	SYNTHÈSE.....	222

CHAPITRE VII - LA MACHINE ASYNCHRONE.....225

1	INTRODUCTION.....	225
2	GÉNÉRALITÉS.....	226
2.1	Qu'attend-on d'un moteur ?.....	226
2.2	Rappels sur les machines tournantes.....	226
2.3	Constitution du moteur asynchrone.....	227
2.4	Fréquence des courants rotoriques.....	228
2.5	Grandeurs utilisées.....	229
3	ÉQUATIONS DE LA MACHINE ASYNCHRONE.....	230
3.1	flux.....	230
3.2	tensions.....	231
3.3	Schémas équivalents.....	232
3.4	Courbe du couple.....	234
3.5	Comparaison avec d'autres technologies.....	236
4	FONCTIONNEMENT.....	237
4.1	Bilan des puissances ; rendement.....	237
4.2	Fonctionnements particuliers.....	238
4.3	Diagramme circulaire d'admittance.....	240
4.4	Construction du moteur asynchrone.....	241
4.5	Procédures de démarrage.....	242
4.6	Utilisations particulières.....	243
5	SYNTHÈSE : CARACTÉRISTIQUES ET LIMITATIONS DU MOTEUR SEUL.....	244
5.1	points forts.....	244
5.2	limitations.....	244
6	SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES ASSOCIÉS AU MOTEUR ASYNCHRONE.....	244
6.1	Alimentation par gradateur.....	244
6.2	Alimentation par onduleur de tension.....	245
6.3	Cascade hypo-synchrone.....	246
7	MOTEUR MONOPHASÉ : PRINCIPE.....	247
8	APPLICATION DE LA TRANSFORMATION DE PARK À LA MACHINE ASYNCHRONE.....	248
8.2	Commande d'une machine asynchrone.....	250

CHAPITRE VIII - RÉSEAUX ET MACHINES : ASPECTS DU DIMENSIONNEMENT.....255

1	OBJET DU CHAPITRE.....	255
2	LES RÉGIMES DE FONCTIONNEMENT DES MATÉRIELS.....	255
2.1	Situations rencontrées.....	255
2.2	Grandeurs nominales ; grandeurs extrêmes ; grandeurs réduites.....	256
2.3	Revue de quelques problèmes dimensionnants.....	257
2.4	Les courts circuits.....	257
2.5	Risques pour les personnes et protection.....	259
3	ÉTUDE DES DÉFAUTS DES RÉSEAUX.....	260
3.1	Les types de défaut.....	260
3.2	Méthode des composantes symétriques : principe.....	261
3.3	Décomposition d'un système de tensions quelconque.....	262
3.4	Relations entre les tensions et les courants dans un réseau passif.....	263
3.5	Calcul des impédances cycliques.....	264
3.6	Démarche de calcul.....	265

3.7	<i>Exemple 1 : court-circuit monophasé phase-terre</i>	265
3.8	<i>Exemple 2 : court-circuit isolé entre 2 phases</i>	267
3.9	<i>Résumé de la méthode</i>	267
3.10	<i>Impédances cycliques de machines électriques courantes</i>	268
3.11	<i>Comparaison entre les différents types de machines</i>	269
CONCLUSION : PERSPECTIVES ACTUELLES DE L'ÉLECTROTECHNIQUE		271
1	QUELQUES TENDANCES DES RECHERCHES ACTUELLES EN ÉLECTROTECHNIQUE.....	271
2	UN EXEMPLE DE PROGRÈS ET D'INNOVATION EN ÉLECTRO-TECHNIQUE : LA TRACTION FERROVIAIRE	273
BIBLIOGRAPHIE		277
INDEX		279

La collection TECHNOSUP dirigée par Claude Chèze est une sélection d'ouvrages dans toutes les disciplines, pour les filières technologiques des enseignements supérieurs.

Niveau A **Approche** (éléments, résumés ou travaux dirigés) *Initiation, mise à niveau*

Niveau B **Bases** (cours avec exercices et problèmes résolus) *IUP - IUT - BTS*

Niveau C **Compléments** (approfondissement, spécialisation) *Écoles d'ingénieurs, Maîtrise*

L'ouvrage (niveau C) :

Pour des élèves ingénieurs généralistes, l'ouvrage présente les connaissances essentielles actuelles en électrotechnique.

Il traite les différents thèmes à partir des lois de base de l'électromagnétisme qu'il décline pour construire des systèmes de production, de transport et d'utilisation de l'énergie électrique.

Les différents types de machines électriques qui interviennent dans ces opérations sont successivement décrits : transformateurs, machines à courant continu, machines synchrones et machines asynchrones.

Les réseaux électriques sont traités en développant les concepts de systèmes polyphasés et de champs tournants

Les principes de l'électronique de puissance sont également décrits.

Enfin, l'ouvrage conclut sur les perspectives de développement en évoquant des exemples concrets.

L'auteur :

Jean-Pierre Fanton, Ingénieur E.S.E., est Ingénieur-chercheur à l'E.D.F. où il a dirigé des groupes d'études sur les systèmes informatiques, les réseaux de données, le traitement d'image, les études acoustiques et vibrations. Il est responsable de l'enseignement d'électrotechnique à l'École Centrale Paris.

Illustration de couverture : Dessin de Léonard de Vinci.



ISBN 2-7298-1113-3