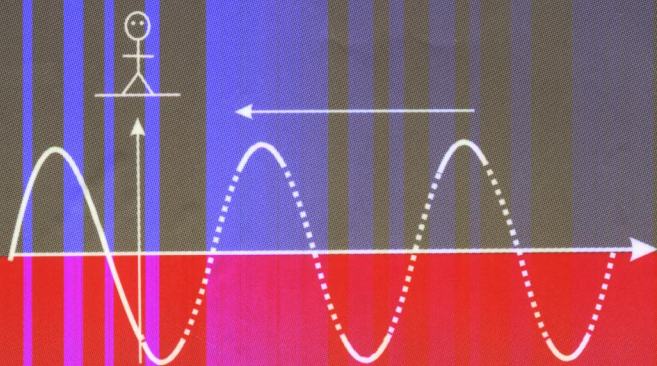




ÉLECTROTECHNIQUE

RÉAL-PAUL BOUCHARD
GUY OLIVIER



ÉDITIONS DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE
DE MONTRÉAL

Table des matières

Avant-propos	III
Liste des symboles	XV
Chapitre 1	
ÉLÉMENTS DE CIRCUIT EN COURANT ALTERNATIF	1
1.1 Introduction	1
1.2 Notions de base et définitions	2
1.3 Convention des lettres	3
1.4 Comportement des éléments passifs en régime sinusoïdal	3
1.4.1 Résistance	4
1.4.2 Inductance	6
1.4.3 Condensateur	7
1.5 Phaseurs	11
1.6 Représentation temporelle	12
1.7 Réactances complexes	13
1.8 Impédance et admittance	15
1.9 Circuits en régime sinusoïdal	16
1.10 Puissance dans une résistance	26
1.11 Puissance dans une inductance	27
1.12 Puissance dans un condensateur	28
1.13 Puissance réactive	29
1.14 Puissance dans une impédance	30
1.15 Puissance dans une source	31
1.16 Puissance apparente	31
1.17 Facteur de puissance	32
1.18 Amélioration du facteur de puissance	34
1.19 Mesure de la puissance	35
1.20 Notions d'algèbre complexe	44
1.20.1 Opérateur j	44
1.20.2 Représentation d'un nombre complexe	44
1.20.3 Formes d'écriture d'un nombre complexe	45
1.20.4 Opérations sur les nombres complexes	45
1.20.5 Conjugué de \bar{A} , noté \overline{A}^*	45
1.20.6 Relation d'Euler	45
Exercices	46

Chapitre 2

CIRCUIT MAGNÉTIQUE	59
2.1 Introduction	59
2.2 Analogie entre circuit électrique et circuit magnétique	59
2.3 Relation de base	61
2.4 Loi d'Ampère	62
2.5 Calculs de circuits magnétiques	62
2.6 Effet de frange	68
2.7 Effet de coin	69
2.8 Circuit avec entrefer et arrangement série-parallèle	70
2.9 Flux de fuite	71
2.10 Pertes par hystérésis	72
2.11 Pertes par courants induits	74
2.12 Relais	76
Exercices	82

Chapitre 3

TRANSFORMATEUR	85
3.1 Introduction	85
3.2 Principales applications	85
3.3 Classification des transformateurs	86
3.3.1 Milieu réfrigérant	86
3.3.2 Types de construction	87
3.4 Transformateur idéal	90
3.5 Pertes dans le cuivre	92
3.6 Réactance de fuite	92
3.7 Courant de magnétisation	93
3.8 Courant d'appel	97
3.9 Transformateur en charge \times	101
3.10 Circuit équivalent	104
3.11 Circuit équivalent simplifié	107
3.12 Fonction de transfert	108
3.13 Impédance d'entrée	109
3.14 Plaque signalétique	109
3.15 Réponse en fréquence	110
3.15.1 Basse fréquence	110
3.15.2 Moyenne fréquence	110
3.15.3 Haute fréquence	111

3.16	Rendement	112
3.17	Chute de tension interne	113
3.18	Essais sur les transformateurs	114
3.18.1	Essais à vide	114
3.18.2	Impédance équivalente	119
3.18.3	Essai en charge	121
3.18.4	Essai en opposition	122
3.19	Valeurs normalisées	126
3.20	Transformateurs à plusieurs enroulements	131
3.21	Transformateurs en parallèle	133
3.22	Autotransformateur	139
3.23	Transformateurs d'instrumentation	144
3.23.1	Transformateur de potentiel	144
3.23.2	Transformateur de courant	145
3.24	Appareils standard de mesure	146
	Exercices	147

Chapitre 4

	CIRCUITS TRIPHASÉS ÉQUILIBRÉS	151
4.1	Introduction	151
4.2	Définitions	154
4.3	Généralités	154
4.4	Connexion en étoile	155
4.5	Tensions de ligne et de phase	157
4.6	Connexion en triangle	158
4.7	Nomenclature usuelle	161
4.7.1	Connexion en étoile	161
4.7.2	Connexion en triangle	162
4.8	Charges équilibrées	163
4.9	Relations entre un circuit en étoile et un circuit en triangle	164
4.10	Mesure de la puissance dans un circuit triphasé	168
4.11	Méthode des deux wattmètres	171
4.12	Vérification du facteur de puissance dans un circuit équilibré	179
4.13	Puissance instantanée dans un circuit triphasé équilibré	180
4.14	Wattmètre à double élément	181
4.15	Wattmètre à trois éléments	182
4.16	Wattmètre à 2 1/2 éléments	182

4.17	Énoncé d'une charge	184
4.18	Simplification en circuits équilibrés	185
4.19	Charges triphasées équilibrées en parallèle	189
4.20	Correction du facteur de puissance	193
4.21	Facturation industrielle	194
	Exercices	195

Chapitre 5

	CIRCUITS TRIPHASÉS DÉSÉQUILIBRÉS	199
5.1	Introduction	199
5.2	Circuits déséquilibrés avec fil neutre	199
5.3	Circuits déséquilibrés sans fil neutre	202
5.4	Séquencemètre	207
	Exercices	213

Chapitre 6

	COMPOSANTES SYMÉTRIQUES	215
6.1	Introduction	215
6.2	Génération d'un système déséquilibré à l'aide de systèmes équilibrés	215
6.3	Théorème de Fortescue	216
6.4	Composantes symétriques appliquées aux circuits triphasés	217
6.5	Système original déséquilibré	217
6.6	Système de séquence directe	217
6.7	Système de séquence inverse	218
6.8	Système de séquence homopolaire	218
6.9	Opérateur «a»	219
6.10	Réduction d'un système déséquilibré en ses composantes symétriques	220
	6.10.1 Méthode algébrique	221
	6.10.2 Méthode géométrique ou méthode graphique	224
6.11	Relations ligne-phase	226
6.12	Composantes symétriques appliquées aux courants	229
6.13	Composantes symétriques appliquées aux impédances	230
6.14	Résumé des principaux cas particuliers	231
6.15	Relations entre les tensions, les courants et les impédances des diverses séquences	231

6.16	Mesure des courants de séquence	237
6.16.1	Courants de séquence homopolaire	237
6.16.2	Courants de séquence inverse	237
6.16.3	Courants de séquence directe	238
6.17	Puissance en régime déséquilibré	239
6.18	Pertes dans une ligne équilibrée	246
6.19	Facteur de puissance généralisé	248
6.20	Correction du facteur de puissance	253
6.20.1	Correction du facteur de déplacement	253
6.20.2	Source de courant homopolaire	253
6.20.3	Compensateur de séquence inverse	255
Exercices		263

Chapitre 7

TRANSFORMATEURS EN TRIPHASÉ		265
7.1	Introduction	265
7.2	Types de construction	265
7.3	Types de connexions et conventions	267
7.4	Connexion triangle-triangle (Dd0)	268
7.4.1	Régime équilibré	270
7.4.2	Régime déséquilibré	271
7.5	Connexion en V	272
7.6	Connexion triangle-étoile (Dy1 et Dy11)	273
7.7	Connexion étoile-triangle (Yd1 et Yd11)	276
7.8	Connexion étoile-étoile (Yy0)	278
7.9	Connexion étoile-étoile-triangle (Ydy0)	280
7.10	Connexion zigzag (Dz0 et Dz10)	282
7.11	Connexion Scott	289
7.12	Connexion en T (Tt11, Tt1 et Tt0)	292
7.13	Transformateurs de mise à la terre	300
7.14	Courants de magnétisation en triphasé	303
7.15	Sommaire des connexions triphasées de transformateurs	305
7.16	Compensateurs de séquence homopolaire	310
Exercices		316

Chapitre 8

HARMONIQUES	321
8.1 Introduction	321
8.2 Courants harmoniques	321
8.3 Analyse de Fourier	328
8.4 Puissance en régime déformé	334
8.5 Coefficient de distorsion, facteur de crête et facteur K	338
8.6 Composantes symétriques en régime déformé	343
8.7 Transformateurs triphasés en régime déformé	345
8.8 Courant de neutre	351
8.9 Transformateurs de type K	353
8.10 Transformateurs déphaseurs	354
8.11 Facteur de puissance généralisé en régime déformé	358
8.12 Solutions	360

Chapitre 9

MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ	363
9.1 Introduction	363
9.2 Stator	365
9.3 Rotor	365
9.3.1 Rotor bobiné (à bagues)	365
9.3.2 Rotor à cage d'écureuil	366
9.4 Champ tournant	367
9.5 Vitesse synchrone	367
9.6 Principe de fonctionnement	368
9.7 Circuit équivalent	370
9.8 Théorème de Thévenin appliqué au stator	376
9.9 Production du couple	380
9.10 Couple de démarrage	382
9.11 Couple maximal développé	382
9.12 Caractéristiques couple-glissement	384
9.13 Influence de la résistance du circuit du rotor	385
9.14 Essais sur un moteur asynchrone triphasé	386
9.14.1 Mesure de la résistance du stator	387
9.14.2 Essai à vide	387
9.14.3 Essai à rotor calé	389
9.14.4 Essai en charge	392

9.15	Classification des rotors à cage d'écureuil	393
9.15.1	Moteur à couple et à courant de démarrage normaux	393
9.15.2	Moteur à couple normal et à courant de démarrage faible	394
9.15.3	Moteur à couple élevé et à courant de démarrage faible	394
9.15.4	Moteur à couple et à glissement élevés	395
9.15.5	Moteur à couple de démarrage faible	396
9.16	Plaque signalétique	397
9.17	Problèmes de démarrage	398
9.17.1	Démarrage à tension réduite	398
9.17.2	Démarrage d'un moteur à rotor bobiné à l'aide de résistances externes	399
9.18	Moteurs à haut rendement	401
9.19	Opération à vitesse variable	402
9.20	Moteur en régime déséquilibré	404
	Exercices	415

Chapitre 10

	MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASÉ	423
10.1	Introduction	423
10.2	Principes de fonctionnement	423
10.3	Enroulement de démarrage	425
10.4	Moteurs à phase auxiliaire	427
10.4.1	Moteur à phase auxiliaire résistive	427
10.4.2	Moteur à phase auxiliaire capacitive	428
10.4.3	Moteur à phase auxiliaire avec condensateur permanent	429
10.5	Moteur à bagues de court-circuit	430
10.6	Circuit équivalent en marche normale	431
	Exercices	436

Chapitre 11**IMPÉDANCES DES MACHINES
AUX COURANTS DE SÉQUENCE 437**

11.1	Introduction	437
11.2	Machines tournantes	439
11.2.1	Défaut triphasé symétrique	444
11.2.2	Défaut entre deux lignes	445
11.2.3	Défaut entre une ligne et la terre	448
11.2.4	Défaut entre deux lignes et la terre	451
11.3	Transformateurs	457
11.3.1	Transformateurs monophasés	457
11.3.2	Transformateurs triphasés	458
11.4	Lignes de transport	458
	Exercice	460

Chapitre 12**BASES DE CALCUL 461**

12.1	Introduction	461
12.2	Méthode de la base de tension	462
12.3	Méthode de la base de puissance	466
12.4	Valeurs en pourcentage	471
	Exercice	474

Chapitre 13**CALCUL DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT 475**

13.1	Introduction	475
13.2	Précision dans les calculs des courants de court-circuit	476

Chapitre 14

APPAREILS DE MESURE	501
14.1 Introduction	501
14.2 Appareils à aimant permanent	501
14.2.1 Description physique	501
14.2.2 Principe de fonctionnement	503
14.2.3 Utilisation comme ampèremètre	504
14.2.4 Utilisation comme voltmètre	506
14.2.5 Utilisation en courant alternatif	506
14.3 Appareils à fer mobile	507
14.3.1 Description physique	507
14.3.2 Principe de fonctionnement	509
14.4 Appareils électrodynamiques	511
14.5 Capteur à effet Hall	514
14.6 Appareils numériques	516
TEXTES DE TRAVAUX PRATIQUES	519
Charges passives	519
Circuit magnétique	521
Circuit magnétique à noyau saturable	531
Frein électromagnétique	537
Contacteurs magnétiques	541
Transformateur monophasé	547
Transformateur de courant	551
Transformateurs en parallèle	555
Transformateurs en circuits triphasés	559
Mesure de puissance en triphasé	565
Moteur asynchrone triphasé	569
RÉPONSES AUX EXERCICES	573
RÉFÉRENCES	619