



Table des matières

Préface	11
Chapitre 1 • Outils mathématiques pour l'analyse des réseaux électriques	17
1.1 Introduction	17
1.2 Un peu de physique	18
1.3 Caractéristiques générales des systèmes électriques	21
1.3.1 Alternatif ou continu	21
1.3.2 Réseau à 50 Hz et réseau à 60 Hz	25
1.3.3 Système triphasé équilibré	26
1.3.4 Niveaux de tension	34
1.4 Phaseur	38
1.4.1 Éléments d'un réseau électrique et phaseurs associés	39
1.4.2 Calculs dans le domaine des phaseurs	42
1.5 Équivalence entre couplage triangle et couplage étoile	47
1.6 Puissances dans le cas du monophasé	49
1.6.1 Puissance active et puissance réactive	49
1.6.2 Puissances complexes	53
1.6.3 Facteur de puissance	56
1.7 Puissances en triphasé	58
1.8 Normalisation unitaire	59
1.9 Structure du réseau de transport de l'électricité	63
Exercices	65
Références bibliographiques	67

Chapitre 2 • Physique des centrales électriques	69
2.1 Introduction	69
2.2 Centrales thermiques	71
2.2.1 Principe physique (thermodynamique)	72
2.3 Centrales nucléaires	77
2.3.1 Fission nucléaire	78
2.3.2 Fusion nucléaire	82
2.4 Énergies renouvelables	83
2.4.1 Énergie du vent et technologie des aérogénérateurs	83
2.4.2 Hydroélectricité (production et stockage d'énergie)	87
2.4.3 Énergie solaire	90
2.4.4 Géothermie	93
2.5 Alternateurs (machine synchrone en fonctionnement générateur)	95
Exercices	104
Références bibliographiques	106
Chapitre 3 • Transport et distribution de l'énergie électrique	107
3.1 Introduction	107
3.2 Réseaux de transport et de distribution	109
3.3 Structures des réseaux	112
3.4 Sous-stations	115
3.5 Structure d'une sous-station	118
3.5.1 Système à jeu de barres unique	118
3.5.2 Système à double jeu de barres	118
3.5.3 Système à jeux de barres en polygone	119
3.5.4 Concept de un « disjoncteur et demi »	120
3.6 Protection des réseaux de transport et de distribution	121
3.6.1 Principes de fonctionnement des dispositifs de déclenchement	122
3.6.2 Fusibles	127
3.6.3 Disjoncteurs	129
3.6.4 Coupure de l'arc	130
3.6.5 Disjoncteur dans l'huile	132
3.6.6 Disjoncteurs à air comprimé	133
3.6.7 Disjoncteurs au SF ₆	133
3.6.8 Disjoncteurs dans le vide	135
3.7 Limiteurs de surtension	136
3.8 Transformateurs	138
3.8.1 Couplage des enroulements	143
3.8.2 Courant magnétisant	146
3.8.3 Courant d'appel du transformateur à la mise sous tension	149
3.8.4 Essais « à vide » et en « court-circuit »	151

3.9	Ouvrages pour le transport de l'énergie électrique	152
3.9.1	Lignes « aériennes »	154
3.9.2	Câbles « souterrains »	168
3.9.3	Lignes de transport à isolation gazeuse	174
3.10	Transport en courant continu à haute tension	175
	Exercices	184
	Références bibliographiques	185
Chapitre 4	• Utilisation de l'énergie électrique	187
4.1	Introduction	187
4.2	Types de charges	188
4.2.1	Conversion électromécanique	189
4.2.2	Systèmes d'éclairage	195
4.2.3	Systèmes de chauffage	197
4.2.4	Systèmes d'alimentation en continu	197
4.2.5	Énergie électrochimique	200
4.3	Classification des utilisateurs du réseau	201
4.3.1	Charges résidentielles	201
4.3.2	Charges commerciales et industrielles	204
4.3.3	Traction électrique ferroviaire	205
	Exercices	207
	Références bibliographiques	208
Chapitre 5	• Contrôle du réseau électrique	209
5.1	Introduction	209
5.2	Principes de base du contrôle du réseau électrique	212
5.3	Contrôle de la puissance active et de la fréquence	214
5.3.1	Réglage primaire (équilibre en puissance)	214
5.3.2	Réglage secondaire (LFC en anglais pour <i>Load Frequency Control</i>)	220
5.4	Contrôle de tension et puissance réactive	223
5.4.1	Régulation automatique de la tension du générateur (alternateur synchrone)	223
5.4.2	Transformateur « régulateur en charge » à changement de prises	226
5.4.3	Injection de puissance réactive	228
5.5	Contrôle du transfert de puissance	233
5.5.1	Contrôle des flux de puissance active	233
5.5.2	Contrôle des flux de puissance réactive	236
5.5.3	Contrôleur du flux de puissance unifié (UPFC pour <i>Unified Power Flow Controller</i>)	239
5.6	FACTS pour <i>Flexible AC Transmission Systems</i>	240

Exercices	241
Références bibliographiques	243
Chapitre 6 • Gestion du transit des puissances dans les réseaux électriques	245
6.1 Introduction	245
6.2 Transit de puissance	246
6.2.1 Mise en équation de transit de puissance	247
6.2.2 Résolution du système d'équations du transit de puissance par la méthode de Newton-Raphson	257
6.2.3 Méthode de calcul du transit de puissance par découplage	261
6.2.4 Transit de puissance DC	266
6.3 Transit de puissance optimal	269
6.4 Estimateur d'état	270
6.4.1 Schéma général de l'estimateur d'état	273
6.4.2 Analyse des données erronées	275
6.4.3 Analyse statistique de l'estimateur d'état	281
Exercices	285
Références bibliographiques	287
Chapitre 7 • Marché de l'électricité	289
7.1 Introduction	289
7.2 Structure du marché de l'électricité	290
7.2.1 Transport et distribution	291
7.2.2 Architecture du marché	291
7.3 Marché de compensation	293
7.4 « Bien-être social »	296
7.5 Couplage des marchés	298
7.6 Mécanisme d'allocation et définition des types de marchés	304
Références bibliographiques	306
Chapitre 8 • Évolutions futures des réseaux électriques	307
8.1 Introduction	307
8.2 Énergie renouvelable	308
8.3 Production d'énergie électrique locale	309
8.4 Convertisseurs d'électronique de puissance comme interfaces	313
8.5 Stockage d'énergie	314
8.6 « Black-out » et phénomènes chaotiques	315
8.6.1 Phénomènes non linéaires et chaotiques	315
8.6.2 Black-out	319
Références bibliographiques	326

Annexe A • Équations de Maxwell	329
A.1 Introduction	329
A.2 Développement limité	331
A.3 Champ électromagnétique quasi statique dans un condensateur plan	333
A.3.1 Solution en régime quasi statique	334
A.3.2 Validation de l'approximation quasi statique	336
A.4 Modèle quasi statique pour une inductance à une spire	338
A.4.1 Solution en régime quasi statique	338
A.4.2 Validation de l'approximation quasi statique	340
A.5 Modèle quasi statique pour une résistance	342
A.5.1 Solution en régime quasi statique	343
A.6 Application à la modélisation	346
Références bibliographiques	346
Annexe B • Modélisation du transformateur de puissance	347
B.1 Introduction	347
B.2 Transformateur parfait	348
B.3 Bobines couplées magnétiquement	351
B.3.1 Équivalence avec le transformateur parfait	354
B.4 Modélisation du transformateur avec prise en compte des fuites magnétiques	355
B.5 Modèles du transformateur triphasé	358
Annexe C • Modélisation de la machine synchrone à rotor bobiné	361
C.1 Introduction	361
C.2 Principes physiques	362
C.3 Machine synchrone monophasée	367
C.4 Machine synchrone triphasée	373
C.5 Machine synchrone couplée au réseau	377
Annexe D • Modélisation de la machine asynchrone	381
D.1 Introduction	381
D.2 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone	382
D.2.1 Rotor à un seul enroulement	384
D.2.2 Rotor à deux enroulements	387
D.2.3 Rotor en rotation	388
D.3 Étude du champ magnétique dans l'entrefer	389
D.3.1 Contribution des courants rotoriques à l'induction dans l'entrefer	389
D.3.2 Flux créé par les enroulements du stator	393

D.4	Modèle équivalent monophasé	393
D.4.1	Équations des tensions au stator	394
D.4.2	Modèle équivalent avec deux bobines couplées	395
D.4.3	Évolution du modèle équivalent vers le modèle « usuel »	396
D.5	Machine asynchrone connectée au réseau électrique	397
Annexe E	• Modélisation des lignes et des câbles	399
E.1	Introduction	399
E.2	Modélisation d'une ligne de grande longueur	399
E.3	Modélisation d'une ligne de longueur moyenne	404
E.4	Modélisation d'une ligne courte	405
E.5	Comparaison des modèles en fonction de la longueur de la ligne	406
E.6	Modélisation d'un câble	408
	Solutions	409
	Index	425