

collection dirigée par Jean-Claude Sabonnadière

Les réseaux d'énergie électrique 1

modélisation des éléments du réseau triphasé

Valentin Crastan

 **hermes**

Lavoisier

Table des matières

Partie I Introduction, bases	1
Chapitre 1. Introduction, UCTE	3
1.1 Structure de base des réseaux d'énergie électrique	4
1.2 Organisation de l'économie électrique en Europe (aperçu historique, jusqu'à environ 1995)	6
1.3 Échanges d'énergie électrique en Europe	10
1.3.1 UCPTÉ (1951-1999)	10
1.3.2 UCTE (depuis 1999)	12
Chapitre 2. Bases électrotechniques	15
2.1 Courant triphasé, puissance triphasée	15
2.1.1 Courant alternatif ou courant continu	15
2.1.2 Courant triphasé	15
2.1.3 Courant triphasé ou courant monophasé	17
2.1.4 Puissances apparente, active et réactive en circuit triphasé	17
2.1.5 Puissance momentanée de phase	18
2.1.6 Puissance momentanée triphasée	20
2.2 Grandeurs nominales, systèmes p.u.	21
2.3 Systèmes triphasés symétriques	24
2.3.1 Schéma équivalent	24
2.3.2 Quadripôles (biportes)	26
2.3.3 Calcul de la chute de tension et des pertes	28
2.4 Phaseurs et composantes en triphasé	30
2.4.1 Phaseurs en alternatif monophasé	30
2.4.2 Représentation de phénomènes dynamiques	31
2.4.3 Représentation du système triphasé avec phaseur spatial	32
2.4.4 Phaseur spatial et composantes symétriques	34
2.4.5 Phaseur spatial et composantes $\alpha\beta 0$	35
2.4.6 Phaseur et composantes de Park	36
2.5 Le champ électromagnétique	39
2.5.1 Équations du champ	39
2.5.2 Énergie du champ	41

2.5.3	Potentiels du champ	42
2.5.4	Champ dans un diélectrique	42
2.5.5	Champ de conduction	42
2.5.6	Champ magnétique	43
2.5.7	Champ magnétique de conducteurs filiformes	44
2.5.8	Circuit électromagnétique technique	48
2.5.9	Forces électromagnétiques	50
Chapitre 3. Bases de la technique des hautes tensions		53
3.1	Hautes tensions dans les réseaux d'énergie	53
3.1.1	Tensions normalisées, tensions d'essais et de tenue	53
3.1.2	Décharge de la foudre	57
3.1.3	Surtensions internes	60
3.1.4	Objet de la technique des hautes tensions	60
3.2	Rigidité diélectrique de la matière isolante	61
3.2.1	Claquage, décharges partielles	61
3.2.2	Comportement dans le champ uniforme	62
3.2.3	Comportement dans le champ non-uniforme	63
3.3	Calcul des champs électriques	64
3.3.1	Bases	64
3.3.2	Méthode des éléments finis	66
3.3.3	Méthodes par superposition	69
3.3.4	Configurations simples avec deux électrodes	71
3.3.5	Effets des charges d'espace	79
3.4	Schéma équivalent du diélectrique	81
3.4.1	Modèle élémentaire	81
3.4.2	Phénomènes de polarisation et modèles plus exacts	82
3.5	Isolations hétérogènes	85
3.5.1	Mise en série d'isolants	85
3.5.2	Mise en parallèle d'isolants	87
3.5.3	Couches cylindriques et sphériques	88
3.5.4	Isolants poreux imprégnés	89
3.6	Décharges disruptives dans les gaz	90
3.6.1	Les gaz dans les petits champs électriques (V/cm)	90
3.6.2	Comportement aux grandes intensités de champ (kV/cm)	91
3.6.3	Explication physique de la fonction de ionisation par chocs	93
3.6.4	Mécanisme de l'amorçage	94
3.6.5	Calcul du claquage en champ uniforme	97
3.6.6	Calcul de l'amorçage en champ non-uniforme	102
3.6.7	Comportement après amorçage	107

3.7	Décharges disruptives dans les gaz en champ fortement non-uniforme	108
3.7.1	Décharges partielles	108
3.7.2	Mécanisme de claquage	109
3.7.3	Influence de la distance entre les électrodes sur la tension de claquage	113
3.7.4	Influence de la pression	115
3.7.5	Influence du temps de décharge	117
3.8	Isolants liquides et solides	118
3.8.1	Isolants liquides	118
3.8.1.1	Types et applications	118
3.8.1.2	Décharges disruptives dans l'huile minérale	118
3.8.2	Isolants solides	119
3.8.2.1	Types et emploi	119
3.8.2.2	Caractéristiques mécaniques et thermiques	119
3.8.2.3	Propriétés électriques	121
3.8.2.4	Comportement au claquage	121
3.9	Claquage par contournement et glissement	124
Partie II Éléments du réseau triphasé et leur modélisation		129
Chapitre 4. Transformateurs		131
4.1	Construction	131
4.2	Modes de couplage des transformateurs triphasés	134
4.3	Modèles du transformateur	136
4.3.1	Physique du transformateur	136
4.3.2	Schémas équivalents	137
4.4	Détermination des paramètres du transformateur	141
4.4.1	Essai à vide	141
4.4.2	Essai en court-circuit	142
4.4.3	Paramètres du transformateur	143
4.5	Matrices stationnaires et modèles dynamiques	145
4.5.1	Matrices stationnaires	145
4.5.2	Modèles dynamiques	146
4.6	Comportement à l'enclenchement et en régime permanent	148
4.6.1	Enclenchement	148
4.6.2	Chute de tension	150
4.6.3	Rendement	152
4.6.4	Marche en parallèle	154

4.7	Autotransformateurs	155
4.7.1	Principe	155
4.7.2	Schéma équivalent	156
4.8	Transformateurs à rapport variable	157
4.8.1	Transformateurs ajustables	157
4.8.2	Transformateurs réglables	158
4.9	Transformateurs des réseaux d'énergie	159
4.9.1	Transformateurs de centrale et de sous-station	159
4.9.2	Transformateurs de couplage de réseaux	160
4.9.3	Transformateurs de distribution	160
4.9.4	Transformateurs spéciaux	162
4.9.4.1	Transformateurs à trois enroulements	162
4.9.4.2	Transformateurs déphaseurs	163
4.9.4.3	Transformateurs de mesure (réducteurs)	165
Chapitre 5. Lignes électriques		167
5.1	Types et structure	167
5.1.1	Lignes aériennes	168
5.1.2	Câbles	170
5.2	Théorie des lignes	173
5.2.1	Bases physiques	173
5.2.2	Équations de la ligne	173
5.2.3	Interprétation de la solution, propagation d'ondes	177
5.3	Schémas équivalents	180
5.3.1	Ligne longue du point de vue électrique	180
5.3.2	Ligne courte du point de vue électrique	181
5.4	Caractéristiques des lignes	184
5.4.1	Résistance linéique par phase	184
5.4.2	Inductance des systèmes à plusieurs conducteurs	185
5.4.3	Inductance linéique (cyclique) de la ligne triphasée simple	188
5.4.4	Inductance linéique de la ligne aérienne à deux ternes	189
5.4.5	Inductance linéique du câble triphasé	191
5.4.6	Capacités des systèmes à plusieurs conducteurs	191
5.4.7	Coefficients de potentiel des lignes aériennes	194
5.4.8	Capacités linéiques des lignes aériennes à un terna	196
5.4.9	Capacités linéiques des lignes aériennes à deux ternes	198
5.4.10	Influence des fils de garde	199
5.4.11	Capacité linéique des câbles	200
5.4.12	Conductance linéique	200
5.4.13	Exposant de propagation et impédance caractéristique	200
5.5	Matrices du biporte en p.u.	209

155	5.6 Modèles dynamiques	210
155	5.6.1 Modèles à paramètres constants pour valeurs momentanées	210
156	5.6.2 Fonction de transfert et fréquences propres de la ligne	214
157	5.6.3 Approximation rationnelle de la ligne sans distorsion	216
157	5.6.4 Modèles dynamiques de la ligne électriquement courte	218
158	5.6.5 Modèle avec phaseurs de la ligne sans distorsion	220
159	Chapitre 6. Générateurs synchrones	223
159	6.1 Structure et principe de la machine synchrone (MS)	223
160	6.2 Marche à vide	229
160	6.2.1 Enroulement d'excitation et circuit magnétique	229
162	6.2.2 Champ dans l'entrefer	229
162	6.2.3 Flux polaire et résistance magnétique principale	231
163	6.2.4 Tension induite à vide (tension polaire)	231
165	6.2.5 Caractéristiques et schéma équivalent stationnaire à vide	232
167	6.2.6 Dynamique de l'enroulement d'excitation	233
167	6.3 Charge stationnaire	235
168	6.3.1 Champ tournant statorique	235
170	6.3.2 Champ résultant	236
173	6.3.3 Flux principal de la machine à rotor lisse idéale	237
173	6.3.4 Tension induite principale de la machine à rotor lisse idéale	238
173	6.3.5 Diagramme vectoriel stationnaire de la machine	
177	à rotor lisse idéale	239
180	6.3.6 Théorie des deux axes de la MS réelle	240
180	6.3.7 Diagramme vectoriel de la MS réelle	242
181	6.3.8 Couple moteur et puissance active	245
184	6.3.9 Effet de la saturation, caractéristique en charge, $\cos\phi = 0$	246
184	6.4 Dynamique de la MS	247
185	6.4.1 Machine théorique sans effets amortisseurs	248
188	6.4.1.1 Schémas équivalents	248
189	6.4.1.2 Schémas fonctionnels	251
191	6.4.1.3 État transitoire	253
191	6.4.1.4 Comportement de la tension sous charge	254
194	6.4.1.5 Représentation p.u.	254
196	6.4.2 MS avec rotor feuilleté et enroulement amortisseur	255
198	6.4.2.1 Schémas équivalents	255
199	6.4.2.2 Schémas fonctionnels	260
200	6.4.2.3 États subtransitoire et transitoire	261
200	6.4.2.4 Comportement de la tension à la suite d'un choc	
200	de charge réactive	263
200	6.4.3 MS avec pôles massifs	263
209	6.4.4 Comportement en court-circuit	264

6.4.4.1	Court-circuit partant de vide, sans réglage de tension	264
6.4.4.2	Courant de court-circuit avec charge préliminaire	267
6.4.4.3	Effet du réglage de tension	268
6.5	Fonctionnement en îlot et réglage de la centrale	269
6.5.1	Marche en îlot de la MS	270
6.5.1.1	Comportement stationnaire	270
6.5.1.2	Comportement dynamique	273
6.5.1.3	Instabilité de la tension	278
6.5.2	Marche en parallèle de groupes et de centrales	280
6.5.2.1	Répartition de la puissance active	280
6.5.2.2	Centrales de réglage	282
6.5.2.3	Répartition de la puissance réactive	282
6.6	Marche en parallèle avec le réseau	283
6.6.1	Synchronisation	283
6.6.2	Puissance fournie par la MS à rotor cylindrique idéal	284
6.6.2.1	Puissance active	284
6.6.2.2	Analogie du ressort	286
6.6.2.3	Puissance réactive	287
6.6.2.4	Injection conjointe de puissances active et réactive	288
6.6.2.5	Stabilité statique	289
6.6.3	Diagramme de puissance de la MS à rotor cylindrique idéal	289
6.6.4	Puissance active et puissance réactive fournies par la machine synchrone réelle	291
6.6.5	Diagramme des puissances de la MS réelle	292
6.6.5.1	Limite de stabilité statique	293
6.6.5.2	Lieu à courant d'excitation constant	294
6.6.6	Effet d'une tension du réseau non rigide	294
6.6.7	Dynamique de la MS reliée au réseau rigide	296
6.6.7.1	Mouvement de la roue polaire	296
6.6.7.2	Dynamique des petites perturbations de la marche synchrone	297
6.6.7.3	Stabilité transitoire	301
6.7	Modèles p.u. dans l'espace d'état	303
6.7.1	Systèmes d'équations	303
6.7.1.1	Équations du stator	304
6.7.1.2	Équations du rotor	305
6.7.1.3	Équations du flux principal	306
6.7.1.4	Équation du couple	307
6.7.1.5	Équation mécanique	307
6.7.1.6	Systèmes d'équations p.u.	308
6.7.2	Modèle linéaire complet dans l'espace d'état	310
6.7.3	Détermination des paramètres	312
6.7.4	Modèle dans l'espace d'état avec t.t. externes	314

6.8	Comportement en court-circuit avec t.t.	319
6.9	Modèle du couplage de la MS au réseau	323
Chapitre 7. Consommateurs, électronique de puissance		325
7.1	La machine asynchrone	325
7.1.1	Comportement stationnaire	326
7.1.2	Courant de court-circuit et démarrage	329
7.1.3	Dynamique de la MA	330
7.1.4	Puissances et couple	334
7.1.5	Modèle complet de la MA	337
7.1.6	Modèles sans t.t. statoriques	340
7.2	Modèles sommaires de la charge	345
7.3	Électronique de puissance	347
7.3.1	Pont triphasé à commutation assistée (non autonome)	348
7.3.2	Pont triphasé à commutation autonome	350
7.4	Qualité du réseau	352
Chapitre 8. Postes de couplage		357
8.1	Appareils	357
8.1.1	Coupure des circuits	357
8.1.2	Transformateurs de mesure	360
8.1.3	Limiteurs de courant	364
8.1.4	Autres appareils et installations	365
8.2	Montages et formes de construction	366
8.2.1	Poste (tableau) de distribution basse tension	366
8.2.2	Station de transformation MT/BT	366
8.2.3	Schémas des barres collectrices des postes MT et HT	368
8.2.4	Postes à moyenne tension	371
8.2.5	Postes à haute tension	372
8.3	Technique de commande et de protection	380
Annexes		381
Annexe I Valeurs techniques pour les conducteurs des lignes électriques		383
Annexe II Solutions des exercices		389
Bibliographie		401
Glossaire		405
Index		411

Les réseaux d'énergie électrique présente des systèmes techniques complexes dont le comportement peut être prédit de façon fiable par des processus de simulation. Ces derniers sont aujourd'hui implémentés dans de courts délais grâce aux progrès des méthodes par ordinateur. L'ouvrage présente une modélisation rigoureuse de la dynamique de toutes les parties de l'installation.

La libéralisation du marché de l'énergie électrique et la forte concurrence qui l'accompagne conduisent les entreprises à exploiter les réseaux jusqu'à leurs limites.

Ce premier volume donne un rappel précis des bases de l'électrotechnique et de la technique des hautes tensions qui sont essentielles pour les réseaux d'énergie électrique. Il traite ensuite de la structure des réseaux de transport et de distribution d'énergie, du principe de fonctionnement et de la modélisation détaillée de ses éléments.

L'auteur

Ingénieur de recherche et de développement, Valentin Crastan a été professeur de technique et doyen de la division électrotechnique à la Haute école spécialisée bernoise (Bienne, Suisse). Il est actuellement ingénieur-conseil dans le domaine de l'énergie.

hermes
Science
PUBLICATIONS

www.hermes-science.com

ISBN 2-7462-1373-7

