
collection dirigée par Jean-Claude Sabonnadière

Les réseaux d'énergie électrique 2

*régime stationnaire,
court-circuit, coupure des circuits et protections*

Valentin Crastan

Hermès

Lavoisier

Table des matières

Partie I Comportement en régime permanent des réseaux équilibrés, déséquilibrés et dissymétriques et leur calcul 1

Chapitre 1. Réseaux symétriques et équilibrés	3
1.1 Formes de réseaux	3
1.1.1 Réseau radial ou en antenne	4
1.1.2 Réseau bouclé	4
1.1.3 Réseau maillé	5
1.1.4 Critères pour le choix du type de réseau	6
1.2 Court-circuit tripolaire	6
1.2.1 Valeur efficace du courant de court-circuit	7
1.2.2 La puissance de court-circuit	9
1.2.3 Calcul du courant initial subtransitoire de court-circuit	12
1.2.3.1 Méthode directe	12
1.2.3.2 Méthode de la source équivalente (ou de superposition)	13
1.2.4 Limitation de la puissance de court-circuit	20
1.3 Procédé général pour les calculs de réseaux	22
1.3.1 Bases théoriques	22
1.3.2 Application au problème de court-circuit	25
1.3.2.1 Méthode directe	25
1.3.2.2 Méthode par superposition	27
1.3.3 Réduction de la matrice des admittances nodales	30
1.4 Calcul des réseaux non maillés	31
1.4.1 Ligne alimentée d'un seul côté sans ramification	31
1.4.2 Ligne alimentée d'un seul côté avec ramifications	33
1.4.3 Ligne alimentée des deux côtés	34
1.5 Comportement de la ligne électrique en régime permanent	35
1.5.1 Comportement de la tension	35
1.5.1.1 Ligne sans perte	35
1.5.1.2 Ligne avec pertes	40
1.5.1.3 Ligne électriquement courte	40
1.5.2 Comportement de la puissance	44
1.5.2.1 Puissance naturelle	44
1.5.2.2 Pertes de la ligne et bilan de la puissance réactive	44

1.5.3	Compensation	47
1.5.3.1	Ligne électriquement longue	48
1.5.3.2	Calcul exact de la ligne compensée	49
1.5.3.3	Ligne électriquement courte	50
1.5.4	Capacité de transport des lignes	54
1.5.4.1	Importance de la puissance naturelle	54
1.5.4.2	Charge thermique admissible et puissance naturelle	55
1.5.4.3	Puissance limite et longueur limite des lignes aériennes	57
1.5.4.4	Longueurs limites des câbles souterrains	59
1.6	Flux des puissances dans le réseau maillé	61
1.6.1	Équations du réseau	61
1.6.2	Solution du problème du flux des puissances	63
1.6.3	Limitations des variables	68
1.6.4	Calcul découplé du flux des puissances	69
1.6.5	Contrôle et optimisation du flux des puissances	70
Chapitre 2. Réseaux déséquilibrés et dissymétriques		73
2.1	Méthode des composantes symétriques	73
2.1.1	Symétrie	73
2.1.2	Bisymétrie	73
2.1.3	Tension et courant homopolaires	74
2.1.4	Composantes symétriques	76
2.2	Schéma équivalent d'un élément symétrique	81
2.2.1	Impédance longitudinale	81
2.2.2	Admittance transversale	85
2.2.3	Schéma équivalent résultant en composantes symétriques	86
2.3	Mesure des impédances longitudinales et transversales	87
2.4	Modèles des lignes	89
2.4.1	Lignes à structure symétrique	89
2.4.2	Résistances du neutre et des prises de terre	90
2.4.3	Lignes à structure dissymétrique	93
2.4.4	Inductance homopolaire	94
2.4.5	Schéma équivalent dans le domaine originel triphasé	95
2.4.6	Influence des fils de garde	96
2.4.7	Modèles avec paramètres dépendants de la fréquence	98
2.5	Modèles du transformateur	100
2.5.1	Inductance principale L_{h0}	100
2.5.2	Inductance de fuite $L_{\sigma 0}$	101
2.5.3	Schémas homopolaires des couplages principaux	101
2.5.4	Déphasage des systèmes inverse et homopolaire	102
2.6	Modèle de la machine synchrone	104

2.7	Calcul de réseaux avec dissymétries ponctuelles	105
2.7.1	Charges non équilibrées	105
2.7.1.1	Charge symétrique	107
2.7.1.2	Charge monophasée	107
2.7.1.3	Charge biphasée avec contact à la terre	109
2.7.1.4	Charge biphasée sans contact à la terre	110
2.7.1.5	Décomposition d'une charge générale	111
2.7.2	Courts-circuits asymétriques	111
2.7.2.1	Court-circuit monophasé (phase-terre)	112
2.7.2.2	Court-circuit biphasé sans contact à la terre	113
2.7.2.3	Court-circuit biphasé avec contact à la terre	113
2.7.3	Dissymétrie transversale générale	114
2.7.4	Dissymétries multiples	116
2.7.5	Dissymétrie longitudinale générale	118
2.7.5.1	Dissymétrie longitudinale monophasée	119
2.7.5.2	Dissymétrie longitudinale biphasée	120
2.8	Composantes symétriques et harmoniques	126
Partie II	Calcul des éléments du réseau	
	Contraintes de court-circuit	
	Coupure et protection des circuits	129
Chapitre 3.	Calcul des éléments du réseau	131
3.1	Transformateurs et bobines	131
3.2	Machines synchrones	136
3.3	Lignes	138
3.3.1	L'optimum économique	139
3.3.2	Échauffement	143
3.3.3	Calcul mécanique des lignes aériennes	151
3.4	Condensateurs	155
3.4.1	Relations fondamentales	155
3.4.2	Caractéristiques et construction	157
3.4.3	Applications	158
Chapitre 4.	Effets du courant de court-circuit	159
4.1	Paramètres du courant de court-circuit momentané	159
4.1.1	Graphe du courant de court-circuit momentané	159
4.1.2	Calcul du courant momentané maximum de court-circuit	162
4.1.3	Calcul du courant de coupure	164
4.1.4	Calcul du courant efficace thermique	166

4.2	Résistance thermique au court-circuit	169
4.3	Résistance mécanique au court-circuit	172
4.3.1	Calcul des forces électromagnétiques	173
4.3.2	Forces de court-circuit	179
4.3.3	Analyse mécanique	183
Chapitre 5. Disjoncteurs, coupure des circuits		187
5.1	Théorie de l'arc électrique	187
5.1.1	Formation de l'arc	187
5.1.2	Propriétés de l'arc	188
5.1.3	Caractéristique stationnaire de l'arc	190
5.1.4	Dynamique de l'arc électrique	191
5.2	Coupure du courant continu	194
5.3	Coupure du courant alternatif	198
5.3.1	Caractéristique dynamique de l'arc	198
5.3.2	Phénomène et conditions d'extinction	201
5.4	Appareils de coupure	204
5.4.1	Disjoncteurs à gaz	205
5.4.2	Disjoncteurs à chambre à vide	211
5.5	Surtensions internes	212
5.5.1	Tension de rétablissement en circuit monophasé	212
5.5.2	Tension de rétablissement en circuit triphasé	213
5.5.3	Court-circuit à une certaine distance du disjoncteur	215
5.5.4	Enclenchement de courants capacitifs	216
5.5.5	Interruption de petits courants réactifs	218
Chapitre 6. Technique des protections		223
6.1	Traitement du point neutre	225
6.1.1	Réseaux à neutre isolé	226
6.1.2	Réseaux à bobine d'extinction	228
6.1.3	Réseaux à prise de terre à basse résistance	229
6.1.4	Réseaux à prise de terre limitant le courant	230
6.1.5	Facteur de repère du contact à la terre	230
6.2	Protection des lignes	232
6.2.1	Fusibles	232
6.2.2	Protection par disjoncteur	234
6.2.3	Protection à temporisation échelonnée	235
6.2.4	Protection différentielle	238
6.2.5	Réenclenchement rapide	240

6.3	Protection des générateurs	240
6.3.1	Protection du stator et du bloc stator-transformateur	241
6.3.2	Protection du rotor	242
6.3.3	Autres mesures de protection	243
6.4	Protection des transformateurs	244
6.4.1	Protections classiques	244
6.4.2	Conséquences de la libéralisation du marché	244
6.4.3	Protection de l'environnement	245
6.4.4	Protection différentielle	245
6.5	Protection des jeux de barres	246
6.6	Protection contre les surtensions	248
6.6.1	Surtensions dans le réseau	248
6.6.2	Coordination de l'isolement	251
6.6.3	Parafoudres	252
6.6.4	Distance protégée	256
6.6.5	Impacts lointains et impacts proches	258
6.7	Protection des êtres vivants (R. Haldi)	261
6.7.1	Effets du courant électrique sur les êtres humains	261
6.7.2	Effets du courant électrique sur les animaux domestiques	263
6.7.3	Les normes	264
6.7.4	Mesures de protection	265
6.7.4.1	Introduction	265
6.7.4.2	Schéma TT (mise à la terre directe)	267
6.7.4.3	Schéma TN (mise au neutre)	267
6.7.4.4	Mesures préventives ultérieures	270
6.7.4.5	Protection contre les courants de défaut	272
Annexes		275
Annexe I	Valeurs techniques pour les conducteurs des lignes électriques	277
Annexe II	Solutions des exercices	283
Bibliographie		295
Glossaire		299
Index		303
Sommaire du volume 1		309