

Réseaux publics de distribution d'électricité

Fonctionnement et protection

Michel Oddi



Dans la même collection

La maintenance des centrales nucléaires

J.-P. Hutin, 2016

Efficacité énergétique – Des principes aux réalités

P. Baudry, 2015

Les nanomatériaux et leurs applications pour l'énergie électrique

D. Noël, 2014

Guide international du comptage intelligent

F. Toledo, 2012

Numériser le travail – Théories, méthodes, expérimentations

S. Lahlou, V. Nosulenko, E. Samoylenko, 2012

L'énergie hydraulique, 2^e édition

R. Ginocchio, P.-L. Viollet, 2012

*Le système nerveux du réseau français de transport d'électricité (1946-2006) :
60 années de contrôle électrique*

J. Lecouturier, 2012

La physique des réacteurs nucléaires

S. Marguet, 2011

Marketing critique : le consommateur collaborateur en question

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, A. Bonnemaizon, 2010

Graphes et algorithmes

M. Gondran, M. Minoux, 2009

*Gestion de la complexité dans les études quantitatives de sûreté de fonctionnement
des systèmes*

M. Bouissou, 2008

Calcul de champ électromagnétique : exemples d'application

J.-C. Vérité, J.-P. Ducreux, G. Tanneau, P. Baraton, B. Paya, 2007

Les télécommunications au cœur du système électrique français (1946-2000)

A. Giandou, C. Leclère, J. Lecouturier, J.-M. Spetebroodt, H. Thibert, A. Vilatte, 2007

Innover en marketing, 15 tendances en mouvement

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, 2006

Éléments finis pour l'ingénieur : grands principes et petites recettes

P. Thomas, 2006

Évaluation et maîtrise du vieillissement industriel

A. Lannoy, H. Procaccia, 2005

Dans la collection Socio-économie de l'énergie

Énergie et transformations sociales – Enquête sur les interfaces énergétiques

J. Cihuelo, A. Jobert, C. Grandclément, 2015

Réseaux publics de distribution d'électricité

Fonctionnement et protection

Michel Oddi

Ingénieur senior, EDF R&D

Direction éditoriale : Emmanuel Leclerc
Édition : Mélanie Kucharczyk
Mise en pages : Thierry Decke (14)
Fabrication : Estelle Perez
Couverture : Isabelle Godenèche

Préface

L'ouvrage de Michel Oddi apporte un éclairage indispensable sur un objet, les réseaux publics de distribution d'électricité, au cœur des transitions énergétiques engagées dans de nombreux pays du monde et en particulier en Europe, afin de contribuer à la décarbonation des économies et à la lutte contre le changement climatique.

Ainsi, le développement à des rythmes soutenus, notamment grâce à des subventions parfois conséquentes, de productions d'électricité décentralisées à partir d'énergies renouvelables, (photovoltaïque et éolien, caractérisés par leur intermittence, biomasse...), impacte sensiblement les principes de développement et les modalités d'exploitation des réseaux publics de distribution d'électricité.

En effet, jusqu'à récemment, ces réseaux irriguaient les territoires, distribuant aux clients, de l'amont vers l'aval, une énergie électrique produite dans des centrales de grande taille et transportée par les grands réseaux à très haute tension. Aujourd'hui, les productions décentralisées raccordées au sein même des réseaux publics de distribution viennent modifier les flux d'énergie sur ces réseaux, allant parfois jusqu'à créer des flux remontant vers les réseaux à très haute tension.

À ces ressources d'énergie décentralisées s'ajoutent également de nouveaux usages de l'électricité tels que les véhicules électriques, qui constituent une solution de décarbonation du secteur du transport, secteur particulièrement polluant, ou bien encore les pompes à chaleur, dont l'efficacité énergétique n'est plus à démontrer. Toutes ces nouvelles installations sont et seront raccordées aux réseaux publics de distribution.

Les réseaux publics de distribution, on l'aura compris, sont donc confrontés à des évolutions qui affectent tant leur exploitation que le développement de leur architecture.

Les « réseaux intelligents », souvent désignés par l'anglicisme « smart grids », sont, nous dit-on, l'avenir des réseaux publics de distribution. Si ce concept de « réseaux intelligents » a émergé depuis quelques années et a été largement repris par de nombreux médias, il ne faut pas en déduire que l'intelligence ne serait parvenue aux réseaux que dans cette dernière décennie.

Bien au contraire, et l'ouvrage de Michel Oddi en rend bien compte, les réseaux de transport et de distribution disposent depuis longtemps d'équipements et de systèmes « intelligents » pour assurer une exploitation fiable et sécurisée. Néanmoins, les développements technologiques récents dans les domaines du numérique, de la communication, de la robotique, des matériaux... ouvrent de nouvelles possibilités pour relever, en particulier, les défis de l'intégration des nouvelles ressources énergétiques, décentralisées et le plus souvent intermittentes, de l'intégration de solutions de stockage, notamment, pour pallier cette intermittence et des nouveaux usages de l'électricité (véhicule électrique, micro-cogénération, pompes à chaleur...). Ainsi, les ingénieurs du monde des réseaux inventent de nouveaux systèmes et de nouvelles solutions, les testent puis les mettent en œuvre, améliorant et optimisant encore le développement et l'exploitation des réseaux électriques.

Le livre de Michel Oddi arrive à point nommé, d'abord pour nous rappeler l'histoire et les fondamentaux physiques et mathématiques des réseaux publics de distribution, puis pour identifier les enjeux d'un développement et d'une exploitation fiable et sécurisée de ces réseaux et ouvrir sur les diverses solutions mises en œuvre ou en développement.

Ce retour aux sources s'impose, car si les nouvelles technologies, en particulier « le numérique », constituent indéniablement un facteur d'innovations et de transformations du monde des réseaux, ceux-ci ont une réalité physique qui a ses lois que l'ingénieur, concepteur ou exploitant, doit connaître.

Michel Oddi, ingénieur chercheur à EDF, est l'un de ces rares hommes qui ont œuvré, toute leur carrière, à la fois dans le monde concret de la distribution d'électricité et dans le monde, conceptuel et expérimental, donc réel, de la recherche et du développement¹. Ce mariage d'expériences est au cœur de ce recueil exceptionnellement complet des principes théoriques et des applications concrètes formulées dans ce livre.

L'étudiant et le praticien des réseaux y trouveront matière à s'enrichir et à articuler théorie et solutions concrètes.

Mais il est un point qu'il me faut également souligner et qui constitue l'un des thèmes majeurs de cet ouvrage dans lequel Michel Oddi nous fait partager des connaissances clés et trop rarement formulées. Il s'agit du problème de la protection des réseaux. Ce sujet éminemment important concerne tout à la fois la conception et la mise en œuvre des dispositifs qui, d'une part, protègent le fonctionnement de ces infrastructures essentielles à la vie de nos concitoyens et au développement économique, d'autre part, contribuent à assurer la sécurité à la fois des personnels d'exploitation et de maintenance, des usagers eux-mêmes, mais également des tiers. Ce sujet trop souvent « oublié » dans les articles qui

1. Michel Oddi est également l'architecte, le « père fondateur », d'une plate-forme de recherche et de développement industriel appelée Concept Grid, située à EDF Lab Les Renardières près de Fontainebleau, qui permet d'expérimenter de multiples solutions « smart grids » avant leur installation sur des réseaux réels de distribution.

s'intéressent aux réseaux publics de distribution, Michel Oddi le développe avec toute sa pédagogie.

Enfin, le livre de Michel Oddi nous délivre de nombreux exemples d'applications et de solutions mises en œuvre dans divers pays du monde. Le lecteur profitera ainsi de la vision transnationale de Michel Oddi, acquise au sein d'organisations et d'associations techniques internationales où ses compétences ont été maintes fois reconnues et récompensées.

Merci à Michel Oddi d'avoir rassemblé cette somme de connaissances et de compétences et de nous l'offrir dans cet ouvrage qui croise intelligemment fondamentaux et applications industrielles.

Jean-François Faugeras

Responsable du département Veille à la Direction de la Stratégie d'EDF

Remerciements

Je voudrais adresser tous mes remerciements à Stéphane Andrieu, Jean-François Faugeras et Claire Lajoie-Mazenc qui m'ont convaincu d'écrire cet ouvrage, à Jean Bergeal et au regretté Dominique Klaja à qui ce livre est dédié pour leur travail de relecture et leurs pertinentes observations, à Aude Pelletier, Benoît Puluhen, Thierry Pelinski, Xavier Charpentier et Thierry Soullaine pour l'aide qu'ils m'ont apportée.

Avertissement

Dans ce livre, il est parfois fait référence à des normes internationales, européennes et françaises. Ces textes évoluent régulièrement, aussi les informations issues de ces normes peuvent avoir été modifiées depuis la date d'écriture du texte, c'est-à-dire juin 2016 : il est conseillé de vérifier qu'elles sont toujours d'actualité ou, dans le cas contraire, de tenir compte des évolutions intervenues depuis.

Tables des matières

Préface	V
Remerciements	VIII
Avertissement	IX

Chapitre 1

Un peu d'histoire	1
1. De l'Antiquité aux premiers balbutiements	1
2. L'arrivée de l'électromagnétisme et de nouvelles découvertes	4
3. Le règne du courant continu et les premières applications de l'électricité.	9
3.1. Génération et force motrice	9
3.2. Éclairage	10
3.3. Premières centrales	11
3.4. Transport d'électricité et traction électrique	12
4. La controverse Edison Westinghouse	12
4.1. Transformateur	12
4.2. Génératrices et moteurs à courant alternatifs	14
4.3. Le courant alternatif s'impose	15
5. Le choix du courant alternatif triphasé	17
6. L'interconnexion et la nécessité de standardiser	17
7. Le poids de l'histoire sur les réseaux.	18
Annexe – Comparaison des systèmes mono- et triphasés	21
1. Puissance fluctuante monophasée et puissance constante triphasée	21
2. Transport monophasé et triphasé	22
3. Champ tournant	22
4. Mise à disposition de deux niveaux de tensions	24

Chapitre 2

Rappel des principales règles électrotechniques

et conventions.	25
1. Différentes représentations des grandeurs électriques sinusoïdales.	25
1.1. Représentation de Fresnel	25
1.2. Opérateurs j et a	26
1.3. Représentation dans le plan complexe	27
1.4. Conventions	27
2. Résistances, inductances et capacités	27
2.1. Équations fondamentales.	28
2.2. Équations en régime sinusoïdal	28
3. Transformation série parallèle.	29
3.1. Transformation parallèle série	30
3.2. Transformation série parallèle	30
3.3. Transformation triangle étoile et étoile triangle	31
4. Puissance instantanée et moyenne.	33
4.1. Puissance en mode monophasé et triphasé	33
4.2. Valeurs efficaces	34
4.3. Puissance active, réactive et apparente.	35
5. Principaux théorèmes.	36
5.1. Lois de Kirchhoff	36
5.2. Théorème de Boucherot.	37
5.3. Théorème de superposition	37
5.4. Théorème de Thévenin	38
5.5. Théorème de Norton	39
5.6. Théorème de Fortescue	39
6. Application du théorème de Fortescue	41
6.1. Schéma équivalent	41
6.2. Équations du défaut monophasé (entre phase et terre)	43
6.3. Défaut biphasé isolé	46
6.4. Défaut biphasé et à la terre	48
6.5. Défaut triphasé et à la terre.	51
6.6. Ouverture (coupure) d'une phase	52
7. Grandeurs caractéristiques des différentes situations de réseau déséquilibré	56
 Annexe	 57
1. Transformation d'un circuit RLC parallèle en impédance série	57
2. Équations des régimes déséquilibrés	57

Chapitre 3

Réseaux de transport et de distribution	63
1. Les différents types de réseaux : avantages et inconvénients	63
1.1. Réseaux maillés	63
1.2. Réseaux bouclés	65
1.3. Réseaux arborescents	67
1.4. Tableau comparatif	68
2. Réseaux de transport et de distribution	69
2.1. Réseaux de transport	69
2.2. Réseaux de distribution	70
2.3. Réseaux français	70
3. Structure des réseaux de distribution	70
3.1. Postes primaires	70
3.2. Réseaux moyenne tension	72
3.3. Distribution monophasée et triphasée	74

Chapitre 4

Stabilité des réseaux de transport et contribution des réseaux de distribution	75
1. Équilibre production consommation	76
1.1. Stabilité des alternateurs	76
1.2. Stabilité statique d'un alternateur	77
1.3. Stabilité dynamique d'un alternateur	78
1.4. Statisme et équilibre production consommation	79
2. Tension, puissance active transmissible et puissance réactive	81
2.1. Chute de tension et déphasage aux extrémités d'une ligne de transport	81
2.2. Puissance maximale transmissible	82
2.3. Tension et puissance réactive	84
3. Compensation de la puissance réactive	85
3.1. Réseaux de distribution	85
3.2. Réseaux de transport	86
4. Réglage de tension	86
4.1. Réseaux de transport	86
4.2. Réseaux de répartition et de distribution	87
5. Mécanisme des incidents de grande ampleur	89
5.1. Surcharges en cascade	89
5.2. Écroulement de tension	90
5.3. Écroulement de fréquence	91
5.4. Rupture de synchronisme	91
6. Défense du système	92
7. Contribution des réseaux de distribution	93

Chapitre 5

Grandeurs caractéristiques, perturbations et dispositions

constructives des réseaux	95
1. Vocabulaire	95
1.1. Tension assignée et de service	96
1.2. Courant permanent admissible et de courte durée	96
1.3. Domaines de tension français et internationaux	96
1.4. Puissance de court-circuit	98
1.5. Pouvoir de coupure (resp. fermeture)	98
2. Courant de court-circuit	98
2.1. Calcul du courant de court-circuit	98
2.2. Court-circuit symétrique	101
2.3. Court-circuit asymétrique	101
2.4. Courant de crête et courant stabilisé	102
3. Mécanismes des surtensions	102
3.1. Surtensions à fréquence industrielle	102
3.2. Surtensions de manœuvres	105
3.3. Surtensions d'origine atmosphérique	114
4. Coordination de l'isolement	117
4.1. Distance d'isolement	118
4.2. Tenue à la fréquence industrielle	119
4.3. Tenue aux surtensions de manœuvres	119
4.4. Tenue aux surtensions atmosphériques	119
4.5. Conception de l'appareillage	119
4.6. Notion de séparation	120
4.7. Niveaux normés d'isolement	121
5. Éclateurs et parafoudres	126
5.1. Éclateurs	126
5.2. Parafoudres	127
5.3. Protection et installation d'un parafoudre	129
6. Compatibilité électromagnétique	137
6.1. Perturbations conduites et rayonnées	138
6.2. Types de couplage	138
6.3. Modes de propagation	140
6.4. Principales exigences d'immunités	142
6.5. Compléments	147
7. Principales caractéristiques électriques des ouvrages	149
7.1. Circuits de puissance	149
7.2. Matériels de contrôle commande	149
7.3. Essais d'acceptation de type et de routine	150
Annexe	151
1. Résolution des équations différentielles du second ordre	151

1.1.	Association de l'équation différentielle à son équation caractéristique	151
1.2.	Solutions générales de l'équation différentielle homogène	151
1.3.	Solution particulière et solution générale	152
2.	Modélisation des lignes et câbles – équation des télégraphistes	153
2.1.	Quadripôle de Kirchhoff	153
2.2.	Équations des télégraphistes	156
2.3.	Propagation d'une onde sur une ligne sans perte	157
3.	Caractéristiques habituelles des câbles et lignes sous 20 kV	158

Chapitre 6

Montées en potentiel, prises et réseaux de terre, risques de choc électrique	161	
1.	Mise à la terre et comportement en basse fréquence	162
1.1.	Électrode de terre hémisphérique	163
1.2.	Prise de terre et réseau de terre réels	166
1.3.	Retour du courant par une deuxième terre	172
2.	Méthodes de mesure	174
2.1.	Mesure de la résistivité du sol	174
2.2.	Mesure de la résistance de terre	177
2.3.	Choix de la méthode de mesure de terre	181
3.	Comportement des prises et des circuits de terre en régime transitoire	183
3.1.	Influence de l'inductance	183
3.2.	Influence de la valeur du courant	186
3.3.	Comportements	186
4.	Tension de pas et de toucher : risques de chocs électriques	187
4.1.	Impédance du corps humain	187
4.2.	Réaction au passage d'un courant dans le corps	188
4.3.	Réaction à une tension de contact	189
5.	Réalisation des prises et réseaux de terre	190
5.1.	Respect des tensions de toucher et de pas	190
5.2.	Transfert de potentiel	191
5.3.	Norme NF EN 50522	191
5.4.	Réglementations et guides pratiques	193
5.5.	Réseaux souterrains	195
Annexe – Formule des résistances de terre	196	

Chapitre 7

Du magnétisme à la théorie du transformateur	201	
1.	Rappels théoriques	201
1.1.	Champ d'induction magnétique	202
1.2.	Loi de Lenz	203

1.3.	Théorème d'Ampère	203
2.	Matériaux magnétiques.	204
2.1.	Intensité de champ magnétique	204
2.2.	Classement des matériaux magnétiques.	206
3.	Matériaux ferromagnétiques	206
3.1.	Courbe de première aimantation	206
3.2.	Cycle d'hystérésis.	207
3.3.	Matériaux doux et durs	208
4.	Circuit magnétique et bobine monophasée	209
4.1.	Force magnétomotrice et relation d'Hopkinson.	210
4.2.	Inductance et énergie magnétique	211
4.3.	Énergie magnétique	213
4.4.	Pertes magnétiques.	214
4.5.	Fuites dans l'air	216
4.6.	Schéma équivalent et courant magnétisant	217
4.7.	Effet d'un entrefer	218
5.	Transformateur idéal	219
5.1.	Rapport entre tensions	220
5.2.	Relations entre les courants	221
5.3.	Adaptation d'impédance	221
5.4.	Limitation du nombre de spires	221
5.5.	Modélisation d'un transformateur idéal	222
6.	Transformateur réel	222
6.1.	Équations de base	222
6.2.	Transformateur à vide.	223
6.3.	Transformateur en charge	225
6.4.	Modélisation d'un transformateur réel.	226
6.5.	Influence du cycle d'hystérésis et de la saturation sur le courant de magnétisation	226
6.6.	Courant d'appel à la mise sous tension à vide	228
6.7.	Chute de tension et triangle de Kapp	231
6.8.	Mise en parallèle de deux ou plusieurs transformateurs.	232
6.9.	Grandeurs réduites	234
7.	Transformateurs à colonnes et cuirassés	234
7.1.	Transformateurs à colonnes	235
7.2.	Transformateur cuirassé	235
7.3.	Flux libre et flux forcé.	236
8.	Autotransformateur.	237
9.	Couplage et impédance homopolaire des transformateurs triphases	238
9.1.	Représentation de Fresnel des tensions en fonction du mode de couplage	238
9.2.	Couplage d'un transformateur	239
9.3.	Impédance homopolaire.	240

10. Alimentation d'une charge monophasée par un transformateur triphasé.	244
10.1. Schéma équivalent	244
10.2. Couplage Yy	245
10.3. Couplage Yyn	245
10.4. Couplage $YNyn$	247
10.5. Couplage Dyn	247
10.6. Couplage Yzn	248
11. Transformateurs spéciaux	248
11.1. Transformateurs de Scott	248
11.2. Transformateur de Leblanc.	249
11.3. Transformateur déphaseur.	250
12. Génération d'harmoniques	250
12.1. Transformateur de type $YNyn$	251
12.2. Transformateur de type Yy	252
12.3. Transformateur de type Dyn	252
12.4. Utilisation d'un enroulement tertiaire	253
13. Choix du couplage	253
14. Rendement et grandeurs de court-circuit	253
14.1. Pertes d'un transformateur	253
14.2. Classement en fonction des pertes	254
14.3. Grandeurs à vide et en court-circuit	256
15. Technologie.	259
15.1. Transformateur dans l'huile	260
15.2. Changeur de prises (régleur en charge)	268
15.3. Bruit	273
16. Transformateurs de distribution	273
16.1. Transformateurs secs.	274
16.2. Transformateur à protection coupure.	274
17. Transformateur isolé au SF_6	274
Annexe	276
1. Tableau des impédances homopolaires des transformateurs les plus courants.	276
2. Impédance de court-circuit d'un transformateur	278
3. Conséquence de la perte d'une phase primaire d'un transformateur triangle étoile à flux forcé.	280
4. Circulation d'un courant de neutre à la mise sous tension d'un transformateur voisin.	281

Chapitre 8

Régimes de neutre	285
1. Surtensions sur les réseaux basse tension consécutifs aux défauts à la terre à moyenne tension.	286

1.1.	Passage de la moyenne tension sur la basse tension	286
1.2.	Couplage des terres	287
1.3.	Influence du régime de neutre et limites réglementaires	289
2.	Modélisation du réseau de distribution	290
3.	Défaut franc à la terre : circuit équivalent <i>RLC</i> et représentation de Fresnel	292
4.	Neutre mis à la terre par une impédance de faible valeur (faiblement impédant)	294
5.	Neutre isolé	296
6.	Neutre compensé (bobine de Petersen)	297
6.1.	Principes	297
6.2.	Maîtrise des surtensions dans le cas des réseaux aéro-souterrains	299
6.3.	Limites de la compensation	300
7.	Neutre direct à la terre	302
7.1.	Neutre distribué	302
7.2.	Neutre non distribué	304
8.	Accord des réseaux à neutre compensé	304
8.1.	Principe d'accord	304
8.2.	Méthode du maximum de tension homopolaire	310
8.3.	Méthode du cercle des lieux	312
8.4.	Méthode par injection	314
9.	Bobine de Petersen	318
9.1.	Bobines à réglage continu	318
9.2.	Bobines réglables par pas	319
9.3.	Raccordements des bobines	321
9.4.	Compensation en réseau	323
10.	Exploitation à défaut maintenu	324
Annexe		325
1.	Déplacement du point neutre en cas de défaut à la terre	325
1.1.	Neutre isolé	326
1.2.	Neutre mis à la terre par une résistance	326
1.3.	Neutre mis à la terre par une inductance et une résistance	327
2.	Quelques pratiques de compensation du neutre moyenne tension	328
3.	Courants d'écran de câbles en cas de défaut à la terre	328
3.1.	Types de câbles	328
3.2.	Courants dans les écrans de câbles unipolaires des portions saines de réseau	330
3.3.	Courant de défaut	338
3.4.	Courant dans les prises d'écran d'un câble en tête de poste	338
3.5.	Application numérique	340
3.6.	Tronçon en défaut	341
3.7.	Conclusion	342

Chapitre 9

Schéma des liaisons à la terre en basse tension	343
1. Neutre basse tension et schéma des liaisons à la terre	343
2. Schéma TT	345
3. Schéma TN	346
3.1. Schéma TN-C	346
3.2. Schéma TN-S	347
3.3. Schéma TN-C-S	348
4. Schéma IT	348
4.1. Coexistence de plusieurs schémas de liaison à la terre	350
5. Comparaison et pratiques des différents schémas de liaisons à la terre	350
5.1. Surtensions et sécurité	350
5.2. Continuité de fourniture	351
5.3. Maintenance et robustesse	351
5.4. Rupture du neutre	351
5.5. Pratiques	351
Annexe – Surtensions en cas de rupture du neutre basse tension ..	353

Chapitre 10

Résonance et ferrorésonance	357
1. Résonance	358
1.1. Résonance série	358
1.2. Résonance parallèle	358
1.3. Cas de résonance	359
2. Mécanisme de la ferrorésonance	360
2.1. Construction graphique	360
2.2. Formes d'onde et fréquence	363
2.3. Classification	366
3. Exemples de ferrorésonance	366
3.1. Transformateurs de tension en cas de réseau à neutre isolé	366
3.2. Transformateurs de tension connectés entre phases	367
3.3. Réseau à neutre compensé	368
4. Présomption de ferrorésonance et solutions	368
Annexe – Résonance d'un réseau mis à la terre par bobine de Petersen	369

Chapitre 11

Capteurs de mesures : type, comportement et spécification	373
1. Transformateur de courant à effet inductif	373
1.1. Comportement	373

1.2.	Caractéristiques	375
1.3.	Réponse d'un transformateur saturé	377
1.4.	Choix d'un transformateur de courant de protection	379
1.5.	Réalisation pratique	380
2.	Capteur de courant à bobine de Rogowski	382
2.1.	Théorie	382
2.2.	Réalisation pratique	384
2.3.	Détermination d'un capteur à bobine de Rogowski	386
3.	Autres techniques de mesure du courant	386
3.1.	Capteur à effet Hall	386
3.2.	Capteur optique	387
4.	Transformateurs de tension à effet inductif	388
4.1.	Caractéristiques	389
4.2.	Risque de ferrorésonance	391
4.3.	Choix d'un transformateur de tension	391
5.	Capteur de tension à effet capacitif	392
6.	Mesure de la tension par diviseur	393
6.1.	Diviseurs capacitifs	393
6.2.	Diviseurs résistifs	395
6.3.	Diviseurs mixtes	395
7.	Capteur de tension à effet optique	395
8.	Capteurs non conventionnels et hybrides	396
9.	Mise en œuvre des transformateurs de courant et de tension	396
9.1.	Transformateurs de courant	396
9.2.	Transformateurs de tension	398
10.	Conclusion	401

Annexe 402

1.	Erreurs admissibles des transformateurs de courant selon la norme CEI EN 61869-2	402
2.	Erreurs admissibles des transformateurs de tension selon la norme CEI EN 61869-3	403
2.1.	Transformateurs de mesure	403
2.2.	Transformateur de protection	403

Chapitre 12

Introduction au plan de protection des réseaux à moyenne tension 405

1.	Réseaux publics de distribution moyenne tension	406
1.1.	Structure des postes primaires	406
1.2.	Réseau public de distribution à moyenne tension	407
1.3.	Structure des réseaux moyenne tension	408
1.4.	Réseaux amont et aval	411

2.	Typologie et terminologie des défauts.	412
2.1.	Nombre de phases affectées	412
2.2.	Résistance du défaut.	412
2.3.	Emplacement des défauts.	413
2.4.	Nature du défaut.	414
2.5.	Durée de coupure	416
3.	Courant de défauts polyphasés.	416
3.1.	Courants de défaut bi- et triphasé.	416
3.2.	Phases des courants de défaut bi- et triphasé	418
4.	Courants de défaut à la terre en régime stabilisé	420
4.1.	Circulation des courants et schéma homopolaire équivalent	420
4.2.	Rapport entre courants résiduels dans les arrivées et les départs	422
4.3.	Calcul des courants, tensions et résistance de défaut	425
4.4.	Phases des tensions et courants	432
5.	Défaut très résistant : évolution du courant résiduel et interprétation	432
5.1.	Variation du courant résiduel.	432
5.2.	Détection d'un défaut résistant	434
6.	Présence et amplification d'harmoniques	435
7.	Régimes transitoires d'établissement d'un défaut à la terre	436
7.1.	Superposition de trois régimes transitoires d'établissement du défaut	436
7.2.	Décharge de la phase en défaut	437
7.3.	Oscillations à moyenne fréquence.	439
7.4.	Conclusion	452
8.	Régime transitoire d'extinction.	453
8.1.	Mise en équation.	453
8.2.	Application numérique.	457
8.3.	Cas particulier des régimes de neutre isolé.	460
9.	Analyse des défauts à la terre affectant les réseaux à neutre compensé	462
9.1.	Mécanisme des défauts auto-extincteurs et intermittents sur les réseaux à neutre compensé	462
9.2.	Types de défauts	463
9.3.	Cas particulier des réseaux à neutre isolé	463
10.	Conclusion.	464
10.1.	Défauts polyphasés.	464
10.2.	Défauts à la terre.	464
Annexe		467
1.	Cas particulier de bobine zigzag sur un jeu de barres	467
2.	Exemples de calcul de résistance de défaut.	468
2.1.	Cas d'un neutre mis à la terre par une résistance.	468
2.2.	Cas d'un réseau à neutre compensé	470
2.3.	Conclusion	472

3. Types de défauts à la terre en régime de neutre compensé	473
4. Établissement des défauts à la terre en régime de neutre compensé . . .	475

Chapitre 13

Protections et automatismes	479
1. Protections à temps constant et protections à temps dépendant	479
2. Protections ampèremétriques	481
3. Protections voltmétriques	481
4. Protections directionnelles	482
4.1. Protection directionnelle de terre	482
4.2. Protection directionnelle de phase	493
5. Protection à variation d'admittance homopolaire	495
6. Protection différentielle	496
6.1. Protection différentielle de ligne	497
6.2. Protection différentielle de barres ou de transformateur	501
6.3. Protection de masse	509
7. Protection de distance	510
7.1. Principes généraux	510
7.2. Zones de détection	512
7.3. Stades et protection de zones	516
7.4. Mise en œuvre	518
8. Relais Buchholz	518
9. Automatismes	519
9.1. Réenclencheurs	519
9.2. Disjoncteurs shunt	524
9.3. Détecteur de terre résistante	529
10. Sensibilité des protections ampèremétriques contre les défauts à la terre	530
10.1. Protection ampèremétrique homopolaire des départs	532
10.2. Protection ampèremétrique homopolaire des arrivées	532
10.3. Protection wattmétrique homopolaire	533
10.4. Protection centralisée de terre résistante	534
11. Protection par fusibles	536
11.1. Technologie et mécanisme de la coupure et de la limitation du courant	537
11.2. Courbes de fusion et de limitation du courant	539
11.3. Compléments sur les fusibles moyenne tension	540

Annexe – Codification ANSI des protections	543
---	------------

Chapitre 14

Exemples de plan de protection des réseaux publics et réglages .	545
1. Protection, automatismes et contrôle commande	545

1.1.	Protections et automatismes	545
1.2.	Localisation et coordination des protections	546
1.3.	Contrôle commande	546
2.	Plan de protection d'un réseau électrique	547
2.1.	Qualité et nécessité d'un compromis	547
2.2.	Principes	548
2.3.	Organisation	549
2.4.	Niveaux de protections	549
3.	Sélectivité	551
3.1.	Sélectivité chronométrique	551
3.2.	Sélectivité logique	556
4.	Grands principes des réglages d'un plan de protection	557
4.1.	Secours et sélectivité	557
4.2.	Respect des niveaux de surtension sur le lieu d'un défaut à la terre	557
4.3.	Risques de déclenchement par sympathie	558
5.	Protection contre les défauts polyphasés	558
5.1.	Protections ampèremétriques de phase à temps constants	559
5.2.	Protection des transformateurs de puissance	562
5.3.	Automatismes	563
5.4.	Sélectivité logique	564
5.5.	Cas particulier des mises sous tension	564
5.6.	Récapitulatif des principaux réglages	566
6.	Protection contre les défauts à la terre en régime de neutre faiblement impédant	566
6.1.	Seuils ampèremétriques des protections ampèremétriques homopolaires	567
6.2.	Seuils chronométriques des protections ampèremétriques homopolaires	572
6.3.	Protection des transformateurs de puissance	573
6.4.	Protections de masse	574
6.5.	Automatismes	578
6.6.	Cas particuliers des mises sous tension	579
6.7.	Récapitulatif des principaux réglages	579
6.8.	Mise en œuvre de protections directionnelles de terre	580
6.9.	Détection des défauts à la terre résistants et très résistants : limites	582
7.	Protection contre les défauts à la terre en régime de neutre compensé	588
7.1.	Chaînes de détection	589
7.2.	Allongement des temporisations	589
7.3.	Protections homopolaires directionnelles de départ (niveau 3)	590
7.4.	Protections voltmétriques homopolaires des arrivées moyenne tension (niveau 2)	591
7.5.	Protection de la liaison entre transformateur de puissance et arrivée(s) moyenne tension (niveau 1)	595

7.6.	Protection centralisée de terre résistante	595
7.7.	Protections de masse.	595
7.8.	Défauts très résistants.	596
7.9.	Seuils chronométriques des protections ampèremétriques et voltmétriques homopolaires	596
7.10.	Protection des transformateurs de puissance.	598
7.11.	Sélectivité logique.	598
7.12.	Cas particulier des mises sous tension.	598
7.13.	Réenclencheur	599
7.14.	Récapitulatif des principaux réglages	599
8.	Cas particulier des travaux sous tension.	599
8.1.	Travaux sur un départ radial (régime spécial d'exploitation A) . . .	600
8.2.	Travaux sur deux départs bouclés (régime spécial d'exploitation B)	601
9.	Protection des postes secondaires et du réseau basse tension.	601
9.1.	Structure des postes secondaires moyenne basse tension.	601
9.2.	Protection d'un transformateur de poste secondaire par fusibles .	603
9.3.	Ordres de grandeur des courants de court-circuit	604
9.4.	Courbes de fusion des fusibles moyenne et basse tensions.	605
9.5.	Courants de défaut sur le réseau basse tension	606
9.6.	Protection contre les défauts monophasés moyenne tension affectant un poste secondaire	607
9.7.	Risque de retour de tension en cas de fonctionnement d'un fusible	607
10.	Détection des défauts en réseau.	608
10.1.	Sensibilité.	609
10.2.	Principes de détection.	609
10.3.	Réalisation pratique	610
10.4.	Mise en œuvre.	611
11.	Conclusion.	613
Annexe		615
1.	Sélectivité des protections de type EPATR	615
1.1.	Mise à la terre du neutre par une résistance de 40Ω	616
1.2.	Mise à la terre par une bobine et une résistance $(40 + j40) \Omega$	617
1.3.	Conclusion	619
2.	Exemple de plan de protection d'un réseau à neutre impédant	620
<i>Chapitre 15</i>		
Les réseaux intelligents		621
1.	Automatismes de reprise des réseaux publics de distribution	622
1.1.	Automatismes décentralisés de reprise	622
1.2.	Reconfiguration d'un départ	626
1.3.	Automatismes centralisés de reprise	630

2. Intégration des énergies renouvelables	631
2.1. Impact sur les réseaux de transport.	631
2.2. Impact sur les réseaux de distribution.	633
3. Impact du raccordement de la production décentralisée sur les réseaux de distribution.	634
3.1. Courant de défaut polyphasé et protection de départs	635
3.2. Augmentation de la tension au point d'injection	639
3.3. Protections de découplage.	644
3.4. Découplage des productions décentralisées raccordées en basse tension	653
3.5. Indicateur de passage de défauts	656
4. Réseaux intelligents	657
4.1. Réseaux de communications	657
4.2. Nouveaux services et usages	659
4.3. Technologie	663
4.4. Consommateur acteur	667
5. Conclusion.	667
Annexe	669
1. Exemple d'intelligence décentralisée : automatisme de boucle fermée moyenne tension	669
2. Exemple d'appareillage intelligent : compensation intelligente de neutre.	671
Index	673

Michel Oddi est ingénieur diplômé de l'École supérieure d'électricité. Au sein du groupe EDF, il a exercé durant quarante ans son activité dans le domaine des réseaux de distribution électrique, pour leur ingénierie, en tant qu'exploitant et en tant que chercheur senior. Il est l'auteur de plusieurs publications sur ces sujets et continue d'enseigner les réseaux électriques.

Réseaux publics de distribution d'électricité - Fonctionnement et protection

Les « smart grids » ou « réseaux intelligents » sont présentés comme les réseaux électriques publics d'avenir, mais ils ne peuvent pas être créés ex-nihilo. Ils devront s'appuyer sur les réseaux existants, fruit de plus d'un siècle d'optimisation et de progrès successifs, avec leur réalité physique et leurs lois que l'ingénieur, concepteur ou exploitant, doit connaître pour les comprendre et les maîtriser.

Cet ouvrage revient ainsi aux sources des réseaux électriques publics de distribution. Il s'attache à expliquer comment ils se sont constitués au fil du temps, comment ils doivent être conçus pour garantir la qualité et la fiabilité de l'énergie distribuée ainsi que la sécurité des personnes et des biens, comment ils doivent être protégés et comment et sous quelles conditions ils pourraient évoluer en « smart grids ».

Fort d'une expérience de quarante ans dans le domaine des réseaux électriques publics de distribution et d'une connaissance étendue des pratiques à l'étranger, l'auteur a rassemblé l'ensemble de son savoir dans ce livre, dont l'organisation permet une progression graduelle tout au long de la lecture. Un rappel systématique des **principes théoriques et des théorèmes** de base facilitent la compréhension des explications et des calculs exposés. Les **normes applicables** aux réseaux publics de distribution sont citées et les **principales données numériques** relatives à ces réseaux sont fournies. Enfin, de nombreux **exemples concrets** permettent d'illustrer les différentes théories et méthodes qui y sont développées.

L'étudiant trouvera dans cet ouvrage, véritable référence en matière de réseaux publics de distribution électrique, une théorie complète de ces réseaux, le concepteur et l'exploitant y trouveront des réponses à leurs questions sur leur fonctionnement et leur protection ainsi que des explications sur les risques de dysfonctionnements ; quant à l'ingénieur chercheur développeur, il pourra s'enquérir de l'environnement dans lequel les produits dont il a la charge évolueront et des contraintes de toutes natures qu'ils seront susceptibles de subir.

