
Protection des réseaux électriques

Christophe Prévé

HERMES

Table des matières

Préface	21
Symboles graphiques des schémas	23
1. Les régimes du neutre	27
1.1. Les schémas de liaison à la terre en basse tension	29
1.1.1. Définition du schéma IT	29
1.1.2. Définition du schéma TT	30
1.1.3. Définition du schéma TN	31
1.1.4. Comparaison des schémas de liaison à la terre	32
1.1.4.1. Caractéristiques du schéma IT	32
1.1.4.2. Caractéristiques du schéma TT	34
1.1.4.3. Caractéristiques des schémas TNC et TNS	34
1.1.5. Particularités d'installation en régime de neutre isolé basse tension	35
1.1.5.1. Installation d'un contrôleur permanent d'isolement	36
1.1.5.2. Installation d'un limiteur de surtension	36
1.1.5.3. Recherche des défauts à la terre par un générateur basse fréquence	36
1.2. Les régimes du neutre en haute tension	38
1.2.1. Neutre mis directement à la terre	38
1.2.2. Neutre isolé	39
1.2.3. Neutre mis à la terre par résistance de limitation	40
1.2.4. Neutre mis à la terre par réactance de limitation	41
1.2.5. Neutre mis à la terre par réactance de limitation accordée	41
1.2.6. Réalisation de la mise à la terre par résistance de limitation en haute tension	43
1.2.6.1. Mise à la terre lorsque le neutre est accessible	43
1.2.6.2. Mise à la terre par la création d'un neutre artificiel	44

1.2.6.3. Mise à la terre par résistance lorsque plusieurs transformateurs fonctionnent en parallèle sur un jeu de barres	45
1.2.6.3.1. Chaque transformateur possède une résistance de mise à la terre non déconnectable.	45
1.2.6.3.2. Chaque transformateur possède une résistance de mise à la terre déconnectable	46
1.2.6.3.3. Aucun transformateur ne possède une résistance de mise à la terre	46
1.2.6.4. Mise à la terre par résistance lorsque plusieurs transformateurs fonctionnent en parallèle sur deux jeux de barres . .	46
1.2.7. Particularités d'installation en régime de neutre isolé HTA	48
1.2.7.1. Surveillance de l'isolement	48
1.2.7.1.1. Surveillance de l'isolement par une protection à maximum de tension résiduelle	48
1.2.7.1.2. Surveillance de l'isolement par un contrôleur d'isolement	48
1.2.7.2. Recherche du premier défaut d'isolement	50
2. Etude des courts-circuits	51
2.1. Etablissement des courants de court-circuit et forme de l'onde	52
2.1.1. Etablissement du court-circuit aux bornes de l'alimentation du distributeur	52
2.1.1.1. Evolution des valeurs crêtes négatives	56
2.1.1.2. Conséquences du courant transitoire	57
2.1.2. Etablissement du court-circuit aux bornes d'un alternateur	58
2.1.2.1. Evolution des valeurs crêtes	61
2.1.2.2. Système de maintien du courant de court-circuit à environ $3 I_n$	62
2.2. Le court-circuit triphasé	62
2.3. Les courts-circuits déséquilibrés	64
2.3.1. Méthode des composantes symétriques	65
2.3.2. Expressions des courants de court-circuit déséquilibré	68
2.3.2.1. Valeur du courant de court-circuit monophasé-terre	68
2.3.2.2. Valeur du courant de court-circuit biphasé-isolé	68
2.3.2.3. Valeur du courant de court-circuit biphasé-terre	68
2.4. Méthode de calcul des courants de court-circuit	69
2.4.1. Impédance équivalente d'un élément à travers un transformateur	69
2.4.2. Impédance des liaisons en parallèle	70
2.4.3. Valeurs des impédances des éléments du réseau	71
2.4.3.1. Remarque générale concernant les impédances directes . . .	71
2.4.3.2. Remarque générale concernant les impédances inverses . . .	71
2.4.3.3. Impédances du réseau de distribution publique	71
2.4.3.3.1. Impédance directe	71

2.4.3.3.2. Impédance inverse	72
2.4.3.3.3. Impédance homopolaire	72
2.4.3.4. Impédance des alternateurs	73
2.4.3.4.1. Impédance directe	74
2.4.3.4.2. Impédance inverse	75
2.4.3.4.3. Impédance homopolaire	75
2.4.3.4.4. Caractéristiques électriques typiques des alternateurs	76
2.4.3.5. Impédance des moteurs asynchrones	78
2.4.3.5.1. Impédance directe	78
2.4.3.5.2. Impédance inverse	78
2.4.3.5.3. Impédance homopolaire	78
2.4.3.6. Impédance des transformateurs	78
2.4.3.6.1. Impédance directe	79
2.4.3.6.2. Impédance homopolaire	80
2.4.3.6.3. Caractéristiques électriques typiques des transformateurs	82
2.4.3.7. Impédance des liaisons	83
2.4.3.7.1. Résistance des lignes aériennes, des câbles et des jeux de barres	83
2.4.3.7.2. Réactance directe des lignes aériennes	84
2.4.3.7.3. Réactance directe des câbles	84
2.4.3.7.4. Réactance directe des jeux de barres	84
2.4.3.7.5. Réactance homopolaire des câbles	84
2.4.3.7.6. Réactance homopolaire des lignes aériennes	85
2.4.3.7.7. Capacité homopolaire des câbles	85
2.4.3.7.8. Capacité homopolaire des lignes aériennes	87
2.4.4. Contribution des moteurs à la valeur du courant de court-circuit	88
2.4.4.1. Les moteurs synchrones	88
2.4.4.2. Les moteurs asynchrones	88
2.4.5. Exemple de calcul de court-circuit triphasé symétrique	89
2.4.5.1. Calcul du courant de court-circuit triphasé symétrique fourni par la source d'alimentation	92
2.4.5.1.1. Défaut en A sur le jeu de barres HTA	92
2.4.5.1.2. Défaut en B sur le TGBT	92
2.4.5.1.3. Défaut en C sur le tableau BT secondaire	93
2.4.5.1.4. Défaut en D aux bornes d'un moteur	93
2.4.5.2. Calcul du courant fourni par les moteurs	94
2.4.5.2.1. Défaut en D aux bornes d'un moteur	94
2.4.5.2.2. Défaut en C sur le tableau BT secondaire	95
2.4.5.2.3. Défaut en B sur le TGBT	96
2.4.5.2.4. Défaut en A sur le jeu de barres HTA	96
2.5. Circulation des courants de défauts à la terre	97
2.5.1. Neutre isolé	100

2.5.1.1. Exemple en basse tension 400 V	100
2.5.1.2. Exemple en moyenne tension 20 kV	100
2.5.2. Neutre mis à la terre par une impédance	101
2.5.3. Neutre mis à la terre par une réactance accordée	101
2.5.4. Neutre mis directement à la terre	102
2.6. Répartition du courant capacitif dans un réseau avec plusieurs départs	104
2.6.1. Valeur du courant dans le défaut	105
2.6.2. Valeur du courant vu par le dispositif de mesure du courant résiduel situé sur le départ en défaut	107
2.6.3. Valeur du courant vu par les dispositifs de mesure du courant résiduel situés sur les départs sains	107
2.7. Calcul et importance du courant de court-circuit minimal	108
2.7.1. Calcul du courant de court-circuit minimal en basse tension	109
2.7.1.1. Calcul du courant de court-circuit minimal en schéma TN	110
2.7.1.1.1. Méthode des impédances	111
2.7.1.1.2. Méthode conventionnelle	111
2.7.1.1.3. Exemple	112
2.7.1.2. Calcul du courant de court-circuit minimal en schéma IT sans neutre distribué	114
2.7.1.2.1. Méthode des impédances	116
2.7.1.2.2. Méthode conventionnelle	116
2.7.1.2.3. Exemple	117
2.7.1.3. Calcul du courant de court-circuit minimal en schéma IT avec neutre distribué	119
2.7.1.3.1. Méthode des impédances	120
2.7.1.3.2. Méthode conventionnelle	121
2.7.1.4. Influence du courant de court-circuit minimal sur le choix des disjoncteurs ou des fusibles de protection	121
2.7.1.4.1. Protection par disjoncteur	121
2.7.1.4.2. Protection par fusible	123
2.7.2. Calcul du courant de court-circuit minimal en haute tension	126
2.7.2.1. Utilisation du calcul du courant de court-circuit minimal pour le réglage des protections	127
2.7.3. Courant de court-circuit permanent minimal en aval d'un alternateur	127
2.7.4. Importance du calcul du courant de court-circuit minimal pour la sélectivité des protections	128
2.8. Conséquence des courts-circuits	128
2.8.1. Effet thermique	128
2.8.2. Effet électrodynamique	130
2.8.2.1. Effet sur les appareils de coupure	132
2.8.3. Chutes de tension	132
2.8.4. Perte de stabilité des alternateurs	133

2.8.5. Fonctionnement anormal des équipements d'électroniques de puissance	133
2.8.6. Surtensions temporaires	133
2.8.7. Tensions de contact	134
2.8.8. Surtensions de manœuvre	134
2.8.9. Tension induite sur les circuits de télécommande	134
3. Les réducteurs de mesure	137
3.1. Les transformateurs de courant	137
3.1.1. Rappel théorique	137
3.1.2. Saturation du circuit magnétique	140
3.1.2.1. Régime normal, B non saturé	141
3.1.2.2. Régime saturé	141
3.1.2.3. Charge maximale aux bornes du TC	143
3.1.3. L'utilisation des TC dans les réseaux électriques	144
3.1.3.1. Principe général d'utilisation	144
3.1.3.2. Constitution d'un transformateur de courant	145
3.1.3.2.1. TC avec une seule spire au primaire	145
3.1.3.2.2. TC avec plusieurs spires au primaire	146
3.1.3.3. Caractéristiques générales et définitions des paramètres du transformateur de courant suivant la norme CEI 185	146
3.1.3.4. Les transformateurs de courant utilisés pour la mesure suivant la norme CEI 185	148
3.1.3.4.1. La protection des appareils de mesure en cas de court-circuit sur le réseau	149
3.1.3.5. Les transformateurs de courant utilisés pour la protection suivant la norme CEI 185	151
3.1.3.5.1. Le facteur limite de précision	151
3.1.3.5.2. La précision	152
3.1.3.6. Les transformateurs de courant utilisés pour la protection suivant la norme BS 3938	152
3.1.3.7. Correspondance entre les caractéristiques définies par les normes CEI 185 et BS 3938	154
3.1.3.7.1. Caractéristiques de la norme CEI 185	154
3.1.3.7.2. Caractéristiques de la norme BS 3938	155
3.1.3.7.3. Correspondance entre les tensions V_k , V_{s1} et V_{s2}	155
3.1.3.8. Utilisation des TC en dehors de leurs valeurs nominales	157
3.1.3.8.1. Exemple	157
3.1.3.9. Exemple de plaque signalétique d'un transformateur de courant	161
3.1.4. Les capteurs de courant amagnétiques	162
3.2. Les transformateurs de tension	162
3.2.1. Principe général d'utilisation	163

3.2.2. Caractéristiques générales et définitions des paramètres du transformateur de tension suivant la norme CEI 186	163
3.2.3. Les transformateurs de tension utilisés pour la mesure suivant la norme CEI 186	166
3.2.4. Les transformateurs de tension utilisés pour la protection suivant la norme CEI 186	168
3.2.5. Exemple de plaque signalétique d'un transformateur de tension pour la mesure	169
4. Les fonctions de protection et leurs applications	171
4.1. Protection à maximum de courant phase	172
4.1.1. Protection à temps indépendant	173
4.1.2. Protection à temps dépendant	173
4.2. Protection à maximum de courant terre	174
4.2.1. Mesure du courant résiduel	174
4.2.1.1. Seuil minimal de réglage de la protection	176
4.2.1.2. Insensibilisation de la protection aux harmoniques 3 et multiples de 3	177
4.3. Protection à maximum de courant phase directionnel	179
4.3.1. Fonctionnement	182
4.3.1.1. L'angle caractéristique θ	184
4.3.1.1.1. Déphasage lors d'un court-circuit triphasé symétrique	184
4.3.1.1.2. Déphasage lors d'un court-circuit biphasé	185
4.3.1.1.3. Choix de l'angle caractéristique θ	188
4.4. Protection à maximum de courant terre directionnel	189
4.4.1. Fonctionnement	189
4.4.2. Mesure du courant et de la tension résiduels	190
4.4.2.1. Valeur de la tension résiduelle lors d'un défaut monophasé terre franc	192
4.4.3. Polarisation par la mesure du courant dans la mise à la terre du point neutre	193
4.4.4. Utilisation de la protection à maximum de courant terre directionnel	194
4.4.4.1. Détection du sens du courant pour un réseau mis à la terre par résistance de limitation	194
4.4.4.1.1. Détermination de l'angle caractéristique θ_{rsd} des protections et P1 et P2	195
4.4.4.2. Distinguer un courant de défaut d'un courant capacitif pour un réseau avec neutre mis à la terre par résistance de limitation	198
4.4.4.2.1. Détermination de l'angle caractéristique θ_{rsd} des protections de chaque départ	198
4.4.4.3. Détection du sens du courant pour un réseau à neutre isolé	200
4.4.4.4. Distinguer le départ en défaut pour un réseau à neutre isolé	200

4.4.4.4.1. Détermination de l'angle caractéristique θ_{rsd} des protections de chaque départ	201
4.5. Protection à maximum de courant terre directionnel pour réseau à neutre compensé	203
4.5.1. Fonctionnement	203
4.5.2. Distinguer un courant de défaut d'un courant capacitif pour un réseau avec neutre mis à la terre par bobine de compensation	205
4.6. Protection différentielle à haute impédance	208
4.6.1. Principe de fonctionnement des protections différentielles à haute impédance	208
4.6.2. Fonctionnement et dimensionnement des éléments	210
4.6.2.1. Introduction d'une résistance de stabilisation dans la branche différentielle	211
4.6.2.2. Dimensionnement des transformateurs de courant	214
4.6.2.3. Limitation des pics de tension par une résistance non linéaire	216
4.6.2.4. Dimensionnement thermique de la résistance de stabilisation	216
4.6.2.5. Courant de défaut minimum détectable	217
4.6.3. Application de la protection différentielle à haute impédance	219
4.6.3.1. Différentielle moteur	219
4.6.3.2. Différentielle alternateur	221
4.6.3.3. Différentielle jeu de barres	222
4.6.3.4. Protection différentielle de terre restreinte	225
4.6.3.4.1. Transformateur avec neutre connecté à la terre, directement ou par une impédance de limitation	225
4.6.3.4.2. Transformateur avec neutre isolé	226
4.6.4. Remarque sur l'application de la protection différentielle haute impédance	228
4.7. Protection différentielle à fil pilote de câbles	228
4.7.1. Principe de fonctionnement de la protection différentielle à fil pilote	228
4.7.2. Utilité du principe de pourcentage	231
4.7.3. Problème lié à l'impédance de la ligne pilote	232
4.7.4. Problème dû aux surtensions par rapport à la terre	234
4.7.5. Problème lié à la tension induite sur le fil pilote	235
4.7.6. Problème lié à la surveillance de la ligne pilote	235
4.7.7. Autres solutions pour la transmission des informations	235
4.7.8. Méthode pour réaliser une protection triphasée économique	236
4.8. Protection différentielle transformateur	239
4.8.1. Principe de fonctionnement de la protection différentielle transformateur	239
4.8.2. Problème lié au rapport de transformation et au mode de couplage	241
4.8.3. Problème lié au courant d'enclenchement du transformateur	242

4.8.4. Problème lié au courant de magnétisation lors d'une surtension d'origine externe	242
4.9. Protection à image thermique	243
4.9.1. Principe	243
4.9.2. Echauffement d'une machine à partir d'un état froid	245
4.9.3. Surcharge d'une machine à partir d'un état chaud	248
4.9.4. Particularités de certains relais de protection à image thermique ..	251
4.9.5. Démarrage des moteurs et protection à image thermique	252
4.10. Protection à maximum de composante inverse	253
4.10.1. Principe	253
4.10.2. Indication de réglage pour les moteurs	255
4.10.3. Indication de réglage pour les alternateurs	256
4.11. Protection contre les démarrages trop longs et le blocage du rotor ...	256
4.11.1. Démarrage trop long	256
4.11.2. Blocage du rotor	258
4.12. Protection contre les fréquences de démarrage trop élevées	259
4.12.1. Principe	259
4.13. Protection à minimum de courant phase	261
4.13.1. Principe	261
4.14. Protection à minimum de tension	262
4.15. Protection à minimum de tension rémanente	263
4.16. Protection à minimum de tension directe et contrôle du sens de rotation des phases	263
4.17. Protection à maximum de tension	265
4.18. Protection à maximum de tension résiduelle	266
4.18.1. Principe	266
4.19. Protection à minimum ou à maximum de fréquence	267
4.20. Protection contre les retours de puissance réactive	268
4.21. Protection contre les retours de puissance active (code ANSI 32 P) ..	269
4.21.1. Protection contre la fourniture de puissance active au distributeur par les groupes de production	269
4.21.2. Protection des moteurs synchrones contre un fonctionnement en alternateur	270
4.21.3. Protection des alternateurs contre un fonctionnement en moteur	270
4.22. Protection contre les défauts masse cuve	271
4.22.1. Principe	271
4.23. Protection contre les surcharges de l'impédance de mise à la terre du point neutre	272
4.23.1. Principe	272
4.24. Protection de terre générale du réseau par contrôle du courant traversant la mise à la terre du neutre	273
4.24.1. Principe	273
4.25. Protection par surveillance de la température	274

4.26. Protection à maximum de courant phase à retenue de tension	275
4.26.1. Principe	276
4.27. Protection par détection gaz, pression, température	278
4.28. Protection contre les déséquilibres entre points neutres	279
5. Les dispositifs de coupure des surintensités	281
5.1. Les disjoncteurs basse tension	281
5.1.1. Tension assignée d'emploi U_e	281
5.1.2. Courant assigné I_n	281
5.1.3. Taille d'un disjoncteur	282
5.1.4. Courant de réglage I_{th} ou I_l des déclencheurs de surcharge	282
5.1.5. Courant de fonctionnement des déclencheurs de court-circuit	283
5.1.6. Pouvoir de coupure	285
5.1.7. Tension d'isolement	286
5.1.8. Tension de tenue aux chocs	286
5.1.9. Catégorie (A ou B) et courant de courte durée admissible	287
5.1.10. Pouvoir de fermeture	288
5.1.11. Performance de coupure de service	288
5.1.12. Pouvoir de limitation	289
5.1.12.1. Avantages de la limitation	290
5.2. Les disjoncteurs HTA	291
5.2.1. Le pouvoir de coupure assigné en court-circuit	291
5.2.2. Pouvoir de fermeture assigné en court-circuit	295
5.2.3. Courant de courte durée admissible assigné	296
5.2.4. Durée de court-circuit assignée	296
5.3. Les fusibles basse tension	297
5.3.1. Zones de fusion et courants conventionnels	297
5.3.1.1. Fusibles classe gI	297
5.3.1.2. Fusibles classe aM	299
5.3.2. Pouvoir de coupure	300
5.4. Les fusibles HTA	301
5.4.1. Définitions	301
5.4.2. Phénomène de coupure (voir figure 5-14)	303
5.4.3. Caractéristiques temps / courant des fusibles HTA	304
5.4.4. Caractéristiques du courant coupé limité	305
6. La sélectivité des protections	307
6.1. Sélectivité ampèremétrique	307
6.2. Sélectivité chronométrique	309
6.2.1. Sélectivité chronométrique avec des protections à maximum de courant à temps indépendant	312
6.2.2. Sélectivité chronométrique avec des protections à maximum de courant à temps dépendant	313

Protection des réseaux électriques est destiné aux ingénieurs, aux techniciens de bureau d'études et aux exploitants travaillant dans le domaine de l'électricité. Il contient les informations théoriques et pratiques permettant de concevoir et de régler le système de protection d'un réseau électrique. Il comporte sept parties :

- les régimes du neutre,
- l'étude des courts-circuits (maximaux, minimaux, à la terre, régimes transitoires),
- les transformateurs de courant et de tension,
- les fonctions de protection et leurs applications (maximum de courant phase, terre, directionnel, différentiel, image thermique, retour de puissance active et réactive),
- les disjoncteurs et les fusibles,
- la sélectivité (ampèremétrique, chronométrique, logique, entre fusible et disjoncteur),
- la protection des transformateurs, des moteurs, des alternateurs, des jeux de barres, des condensateurs, des réseaux en boucles et des réseaux à deux arrivées.

Les explications pratiques sur le fonctionnement des protections et les tableaux récapitulatifs de réglage rendent cet ouvrage accessible à tout lecteur quel que soit son niveau de connaissance, et en font un outil de travail quotidien.

L'auteur

Christophe Prévé est ingénieur de l'Ecole Supérieure d'Electricité. Il est expert dans la division protection et contrôle commande des réseaux électriques de Schneider.

Editions HERMES
8, quai du Marché-Neuf
75004 Paris



6.3. Sélectivité logique	314
6.3.1. Fonctionnement lorsqu'un défaut apparaît en A	316
6.3.2. Fonctionnement lorsqu'un défaut apparaît en B	316
6.3.3. Application à la sélectivité mixte	317
6.4. Sélectivité directionnelle	319
6.5. Sélectivité par protection différentielle	321
6.6. Sélectivité entre fusibles et disjoncteurs	322
6.6.1. Fusible en aval d'un disjoncteur	322
6.6.2. Fusible en amont d'un disjoncteur	323
7. Protection des différents éléments du réseau	327
7.1. Protection des réseaux	327
7.1.1. Contraintes des défauts à la terre pour les réseaux avec neutre mis à la terre par résistance de limitation	328
7.1.1.1. Les surtensions transitoires lors de l'élimination d'un défaut phase-terre par un disjoncteur	328
7.1.1.2. Limiter les courants de défaut à la terre des machines tournantes	329
7.1.1.3. Détecter les défauts internes phase - masse des machines triphasées	329
7.1.1.3.1. Courant de défaut d'une machine couplée en étoile ..	329
7.1.1.3.2. Courant de défaut d'une machine couplée en triangle	330
7.1.1.3.3. Réglage de la protection à maximum de courant terre de la machine	332
7.1.1.4. La sélectivité entre les départs	332
7.1.1.5. Sélectivité avec l'aval	333
7.1.1.6. Sélectivité avec l'alimentation du distributeur	333
7.1.1.7. Le seuil de courant maximal des protections	333
7.1.1.8. Seuil minimal de réglage des protections	333
7.1.1.9. Dimensionnement de la résistance de mise à la terre	334
7.1.1.10. Protection de la résistance de mise à la terre	334
7.1.1.11. Tenue thermique des écrans de câbles	335
7.1.1.12. Récapitulatif des contraintes des défauts à la terre pour les réseaux avec neutre mis à la terre par résistance de limitation ..	335
7.1.2. Contrainte des défauts à la terre pour les réseaux à neutre isolé ..	336
7.1.2.1. Les surtensions transitoires lors de l'élimination d'un défaut phase-terre par un disjoncteur	336
7.1.2.2. Les courants de défaut à la terre des machines tournantes ..	336
7.1.2.3. La sélectivité avec l'aval	336
7.1.2.4. La sélectivité entre les départs	337
7.1.2.5. Eviter les risques de ferrorésonance	337
7.1.2.6. Seuil minimal de réglage des protections	339

7.1.2.7. Récapitulatif des contraintes des défauts à la terre pour les réseaux à neutre isolé	339
7.1.3. Contraintes pour les défauts entre phases	340
7.1.3.1. Courant de court-circuit minimal	340
7.1.3.2. Court-circuit maximal	340
7.1.3.3. Sélectivité	340
7.1.4. Réseau à une arrivée	341
7.1.4.1. Protection contre les défauts entre phases	341
7.1.4.2. Protection contre les défauts à la terre	343
7.1.4.2.1. Neutre mis à la terre par résistance au niveau du transformateur	343
7.1.4.2.2. Neutre mis à la terre par résistance au niveau du jeu de barres	345
7.1.4.2.3. Neutre isolé	347
7.1.5. Réseau à deux arrivées en parallèle	349
7.1.5.1. Protection contre les défauts entre phases	349
7.1.5.2. Protection contre les défauts à la terre	352
7.1.5.2.1. Neutre mis à la terre par résistance au niveau des transformateurs	352
7.1.5.2.2. Neutre mis à la terre par résistance au niveau du jeu de barres	354
7.1.5.2.3. Neutre isolé	356
7.1.6. Réseau à deux arrivées en boucle	358
7.1.6.1. Protection contre les défauts entre phases	359
7.1.6.2. Protection contre les défauts à la terre	361
7.1.6.2.1. Neutre mis à la terre par résistance au niveau du transformateur	361
7.1.6.2.2. Neutre mis à la terre par résistance au niveau du jeu de barres	364
7.1.6.2.3. Neutre isolé	365
7.1.7. Réseau en boucle	367
7.1.7.1. Protection aux extrémités de la boucle	368
7.1.7.2. Protection par tronçon	369
7.1.7.2.1. Solution par des protections à maximum de courant et maximum de courant directionnel	369
7.1.7.2.2. Solution économisant une protection sur deux	372
7.1.7.2.3. Solution par sélectivité logique	374
7.1.7.2.4. Cas de plusieurs sources d'alimentation situées en des points différents	376
7.1.7.2.5. solution par protection différentielle	378
7.1.7.2.6. Comparaison entre les solutions par protection différentielle et par sélectivité logique	379
7.1.7.2.7. Solution par protection de distance	380

7.2. Protection des jeux de barres	380
7.2.1. Protection d'un jeu de barres par sélectivité logique	380
7.2.2. Protection d'un jeu de barres par une différentielle haute impédance	381
7.3. Protection des transformateurs	382
7.3.1. Courant transitoire à l'enclenchement du transformateur	383
7.3.2. Valeur du courant côté HT lors d'un court-circuit BT pour un transformateur triangle-étoile	385
7.3.2.1. Valeurs des courants primaires et secondaires en fonctionnement normal	386
7.3.2.2. Détermination des valeurs des courants primaires pour un court-circuit triphasé au secondaire	387
7.3.2.3. Valeurs des courants primaires pour un court-circuit biphasé au secondaire.	387
7.3.2.4. Valeurs des courants primaires pour un court-circuit monophasé neutre.	388
7.3.2.5. Récapitulatif.	389
7.3.3. Les défauts dans les transformateurs	390
7.3.3.1. La surcharge	391
7.3.3.2. Les courts-circuits phases interne et externe	391
7.3.3.3. Le défaut à la terre	391
7.3.4. Protection des transformateurs à l'intérieur d'un site industriel	391
7.3.4.1. Protection spécifique contre les surcharges	392
7.3.4.2. Protection spécifique contre les courts-circuits phases internes	392
7.3.4.3. Protection spécifique contre les défauts à la terre	392
7.3.4.4. Protection par interrupteur-fusible	393
7.3.4.4.1. La tension assignée du fusible	393
7.3.4.4.2. Le pouvoir de coupure maximal du fusible	394
7.3.4.4.3. Le courant de court-circuit au secondaire du transformateur	394
7.3.4.4.4. Les conditions d'installation	394
7.3.4.4.5. Surcharges de brève durée du transformateur	394
7.3.4.4.6. Fonctionnement avec surcharge permanente	395
7.3.4.4.7. Courant transitoire à l'enclenchement du transformateur	395
7.3.4.4.8. Coordination entre les fusibles et le pouvoir de coupure de l'interrupteur pour les combinés interrupteurs-fusibles	395
7.3.4.4.9. Tension transitoire de rétablissement pour un combiné interrupteur-fusible	397
7.3.4.4.10. Exemple de détermination du calibre des fusibles d'un combiné interrupteur-fusible	397

80	7.3.4.4.11. Exemple de tableau de choix des fusibles	
80	pour les combinés interrupteurs-fusibles SM6 de Schneider . . .	399
	7.3.4.5. Protection par disjoncteur contre les courts-circuits phase . .	400
81	7.3.5. Protection du transformateur d'un poste de livraison	
82	à omptage BT	403
83	7.3.5.1. Protection contre les surcharges	403
	7.3.5.2. Protection contre les courts-circuits entre phases	403
85	7.3.5.3. Protection contre les défauts internes	404
	7.3.6. Exemples de protections de transformateurs	405
86	7.3.6.1. Transformateurs HTA/BT	405
	7.3.6.2. Transformateurs HTA/HTA ou HTB/HTA	406
37	7.3.7. Indications de réglage des protections des transformateurs	407
	7.4. Protection des moteurs	409
37	7.4.1. Protection des moteurs moyenne tension	409
	7.4.1.1. Protection contre les surcharges	409
8	7.4.1.2. Protection contre les courts-circuits internes ou externes	
9	entre phases	410
0	7.4.1.2.1. Protection des moteurs par des fusibles	410
1	7.4.1.3. Protection contre la coupure d'une phase ou l'inversion	
1	de deux phases	412
1	7.4.1.4. Protection contre les défauts masse stator	412
1	7.4.1.4.1. Moteur alimenté par un réseau avec neutre mis	
2	à la terre directement ou par une impédance de limitation	413
	7.4.1.4.2. Moteur alimenté par un réseau avec neutre isolé	413
2	7.4.1.5. Protection contre les démarrages trop longs et le blocage	
2	du rotor	413
3	7.4.1.6. Protection contre une baisse de la tension d'alimentation . .	414
3	7.4.1.7. Protection contre la réalimentation des moteurs pendant	
1	qu'ils maintiennent une tension rémanente	414
	7.4.1.8. Protection contre les fréquences de démarrage trop élevées	414
	7.4.1.9. Protection contre la baisse de courant	414
	7.4.1.10. Protection contre les pertes d'excitation	414
	7.4.1.11. Protection contre la marche en alternateur	
	des moteurs synchrones	414
	7.4.1.12. Protection contre les défauts masse rotor	414
	7.4.1.13. Exemples de protections de moteurs moyenne tension . . .	415
	7.4.1.14. Indications de réglage des protections des moteurs	417
	7.4.2. Protection des moteurs asynchrones basse tension	419
	7.4.2.1. Protection contre les surcharges et les courts-circuits phase	419
	7.4.2.2. Autres protections	420
	7.5. Protection des alternateurs	420
	7.5.1. Protection contre les surcharges	421
	7.5.2. Protection contre les courts-circuits externes entre phases	421

7.5.2.1. Alternateur équipé d'un système maintenant le courant de court-circuit à environ $3 I_n$	421
7.5.2.2. Alternateur non équipé d'un système maintenant le courant de court-circuit à environ $3 I_n$	421
7.5.2.3. Petits alternateurs protégés par des disjoncteurs avec déclencheur magnéto-thermique	422
7.5.3. Protection contre les courts-circuits internes entre phases	423
7.5.4. Protection contre la coupure d'une phase ou l'inversion de deux phases	423
7.5.5. Protection contre les défauts internes entre phase et masse	423
7.5.5.1. Cas du neutre mis à la terre au niveau du stator de l'alternateur	423
7.5.5.2. Cas du neutre mis à la terre dans le réseau	424
7.5.5.3. Cas du réseau à neutre isolé	424
7.5.6. Protection contre les défauts masse rotor	424
7.5.7. Protection contre la perte d'excitation	424
7.5.8. Protection contre la marche en moteur	425
7.5.9. Protection contre une fréquence trop faible ou trop élevée	425
7.5.10. Protection contre une tension trop faible	425
7.5.11. Protection contre une tension trop élevée	425
7.5.12. Protection contre la fourniture de puissance active au réseau de distribution publique	425
7.5.13. Exemples de protections d'alternateurs	425
7.5.14. Indications de réglage des protections des alternateurs	428
7.6. Protection des batteries de condensateurs	431
7.6.1. Définition	431
7.6.2. Phénomènes électriques liés à l'enclenchement	432
7.6.2.1. Cas d'une batterie fixe	433
7.6.2.2. Cas d'une batterie en gradins	434
7.6.3. Protection des batteries de condensateurs basse tension de rectiphase	436
7.6.3.1. Dimensionnement thermique des matériels	437
7.6.3.2. Choix et calibrage des protections	437
7.6.3.2.1. Protection par disjoncteur	437
7.6.3.2.2. Protection par fusible	437
7.6.4. Protection des batteries de condensateurs haute tension de rectiphase	439
7.6.4.1. Constitution des condensateurs haute tension	439
7.6.4.1.1. Condensateurs sans fusible de protection interne	439
7.6.4.1.2. Condensateurs avec fusibles de protection internes	440
7.6.4.2. Schéma des batteries de condensateurs	441
7.6.4.2.1. Batterie en triangle	441
7.6.4.2.2. Batterie en double étoile	441

21	7.6.4.3. Dimensionnement thermique des matériels	442
21	7.6.4.4. Limitation du courant d'enclenchement par l'insertion d'une inductance de choc	442
21	7.6.4.4.1. Cas d'un seul condensateur	444
22	7.6.4.4.2. Cas d'une batterie de n + 1 gradins de condensateurs	444
23	7.6.4.5. Choix et réglage des protections contre les surintensités	446
23	7.6.4.5.1. Protection par fusible	446
23	7.6.4.5.2. Protection par disjoncteur équipé d'une protection à temps indépendant à double seuil	447
23	7.6.4.5.3. Protection contre les défauts internes des batteries montées en double étoile	447
23	7.7. Protection des alimentations sans interruption	448
24	7.7.1. Choix des calibres des disjoncteurs	448
24	7.7.2. Choix du pouvoir de coupure des disjoncteurs	450
4	7.7.3. Contraintes pour assurer la sélectivité	450
4	7.7.3.1. Sélectivité uniquement lorsque le réseau 2 est en service	450
5	7.7.3.2. Sélectivité même lorsque le réseau 2 est hors service	451
5		
5	Annexe A. Calcul du courant transitoire d'un court-circuit alimenté par le réseau de distribution publique	453
5		
5	Annexe B. Calcul du courant transitoire lors de l'enclenchement d'une batterie de condensateurs	459
5	B.1. Cas d'une batterie fixe	459
5	B.2. Cas d'une batterie en gradins	462
5		
5	Annexe C. Valeur du pic de tension et valeur efficace du courant au secondaire d'un transformateur de courant saturé	465
5	C.1. Détermination de la valeur du pic de tension	467
5	C.2. Détermination de la valeur efficace du courant en régime saturé	468