

Michel Lambert

LES PLANS DE PROTECTION DES RÉSEAUX À HAUTE TENSION

Le traitement des défauts
d'isolement

DUNOD

Illustration de couverture : bjdlsx/istockphoto.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2018

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-078453-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Remerciements	VI
Avant-propos	VII
Convention d'écriture appliquée dans l'ouvrage	XI
Liste des acronymes utilisés	XIII
Introduction	1
Chapitre 1 : Généralités	3
1.1 Les défauts d'isolement	3
1.2 Les aspects réglementaires	11
1.3 Présentation d'un plan de protection	12
1.4 La fiabilité du dispositif de protection	20
1.5 Organisation du plan de protection	25
Chapitre 2 : Les bases de l'électrotechnique de réseau	27
2.1 Présentation des composantes symétriques	27
2.2 Notion de puissance de court-circuit	36
2.3 Les régimes du neutre	42
2.4 La topologie des lignes	44
2.5 Les courants de charges	44
2.6 Étude d'un plan de protection	48
Chapitre 3 : Le plan de protection contre les défauts polyphasés	57
3.1 Étude d'un court-circuit biphasé	57
3.2 Étude d'un court-circuit triphasé	67
3.3 Le critère intensité	71

3.4 Le critère tension	92
3.5 Le critère impédance	94
3.6 Synthèse	99
3.7 Les systèmes de protection	101
3.8 Les transformateurs de mesure	120
Chapitre 4 : Le plan de protection contre les défauts à la terre	133
4.1 Rappels concernant les régimes de neutre	133
4.2 Le schéma équivalent d'un défaut monophasé	139
4.3 Simulation d'un défaut monophasé	141
4.4 Cas d'un neutre impédant	142
4.5 Cas d'un neutre direct à la terre	150
4.6 Cas du neutre isolé	157
4.7 L'utilisation d'une protection de distance 21	162
4.8 La détection des défauts plus résistants	167
4.9 Le plan de protection pour neutre compensé	183
4.10 Pour conclure ce chapitre	195
Chapitre 5 : Le plan de protection d'un jeu de barres	197
5.1 Présentation des jeux de barres	197
5.2 La protection contre les défauts d'isolement	204
5.3 Les protections dans un poste d'interconnexion	207
5.4 Les protections d'un tableau HTA	219
Chapitre 6 : Le plan de protection des transformateurs	237
6.1 Le plan de protection élémentaire	237
6.2 Les protections internes	239
6.3 Les protections complémentaires	243
6.4 Le traitement des défauts externes	263

Chapitre 7 : Le raccordement des réseaux industriels aux réseaux publics de distribution HTA	275
7.1 Généralités	275
7.2 Le cahier des charges des raccordements en HTA	279
7.3 Les postes de livraison	281
Chapitre 8 : Le raccordement des réseaux industriels aux réseaux de transport	297
8.1 Les réseaux de transport et de répartition français	297
8.2 Le raccordement d'un parc éolien au réseau THT	301
8.3 Les équipements	303
Chapitre 9 : Pour conclure	313
9.1 Le plan de protection contre les défauts d'isolement	313
9.2 La réalisation et la mise en œuvre	316
Bibliographie	318
Index	319

Remerciements

Je remercie les constructeurs, les exploitants et les concepteurs qui, durant de nombreuses années, m'ont apporté aide et assistance dans l'accomplissement de mes missions, avec qui j'ai eu le plaisir de dialoguer ou de travailler et qui m'ont fait partager leurs expériences.

Avant-propos

À partir du moment où l'électricité a cessé d'être une science pour devenir une technique, il a été nécessaire de maintenir en temps réel les équilibres entre les besoins et les ressources en énergie électrique. Le stockage de celle-ci ne pouvant être obtenu à des coûts acceptables que sur de faibles quantités, il a fallu interconnecter les moyens de production et maîtriser les échanges d'énergie sur des distances de plus en plus importantes, augmentant de ce fait les zones d'exploitation. La mission des exploitants des réseaux publics d'énergie électrique a été naturellement orientée vers la sûreté d'acheminement de l'énergie et vers la sécurité des personnes et des biens. Dans le même temps, les besoins en énergie électrique dédiée à la production industrielle augmentant, les raccordements des réseaux industriels aux réseaux publics à haute tension ont été multipliés, intégrant au fil des années des moyens autonomes de production qui sont devenus par la suite des composants importants pour le mix énergétique.

La sûreté est la qualité première d'un système électrique. Elle se définit comme la capacité à résister aux pannes sans développement de conséquences graves pour la poursuite de son fonctionnement. Les évolutions normales de la consommation, les aléas d'exploitation, la nécessité de maintenir la fréquence à une valeur satisfaisante exigent de garantir les équilibres à tout moment et en tout point du réseau. Cette fonction est assurée normalement par les réserves tournantes et les systèmes de régulation. Malgré ces dispositions, les conditions d'un déséquilibre entre production et consommation peuvent apparaître : perte d'une source importante ; déclenchement d'un ouvrage essentiel ; îlotage d'une partie du réseau. Si ce déséquilibre ne peut être rapidement corrigé d'une manière délibérée, les exploitants, pour éviter le black-out, doivent mettre en œuvre des moyens automatiques d'ultimes recours intégrés dans le plan de défense du réseau. **La sécurité d'acheminement** de l'énergie entre lieux de production et de consommation nécessite une infrastructure appelée réseau, partie visible du système électrique. Sa structure, dont la vocation est d'assurer les grands transits d'énergie, doit nécessairement être sécurisée. Il existe cependant des ouvrages représentant des goulets d'étranglement dont la perte est de nature à entraîner des ruptures d'approvisionnement dommageables pour l'exploitation et parfois même entraîner des pertes de production. Ces ouvrages qui ont un caractère stratégique sont pour l'essentiel les lignes, les transformateurs et les jeux de

barres. Leur construction, leur insertion et leur exploitation doivent être particulièrement soignées afin de réduire les risques d'avarie.

L'architecture d'un réseau influe sur la sûreté et le fonctionnement du système électrique. Elle est caractérisée par sa topologie (aérien, souterrain, maille, boucle, antenne, etc.) et par son régime du neutre. Sa performance dépend de la fiabilité présentée par les éléments constitutifs du réseau, par la manière de les concevoir (cohérence), de les construire (règles de l'art), de les maintenir (politiques) et de les exploiter (métiers). Un réseau électrique permet de collecter l'énergie provenant de ressources diverses, de la transporter et de la distribuer suivant un format spécifié. Cet ensemble doit être conduit de manière à limiter les pertes techniques, répondre aux aléas, réaliser l'adaptation aux charges et bien entendu participer à la sûreté du système électrique ainsi qu'à la sécurité d'approvisionnement en énergie. En toutes circonstances, le réseau doit être manœuvrable, observable et maintenable. Il est cependant évident que le niveau de sûreté requis dépend de la vocation du réseau et de son importance dans le système.

Le poste électrique, ouvrage essentiel du réseau, regroupe des fonctions de conduite, de manœuvre et de protection. Il héberge les transformateurs, les jeux de barres, les appareils de manœuvre et les équipements du contrôle-commande du réseau. De ce fait, il représente un ouvrage stratégique et complexe pour lequel le degré de fiabilité de chaque composant est généralement élevé indépendamment du palier technique utilisé. Il peut être dédié à une fonction ou en assurer simultanément plusieurs : interconnexion, sortie de centrale électrique, distribution de l'énergie et interfaçage entre plusieurs réseaux.

Les ouvrages d'un réseau d'énergie électrique sont forcément sollicités par des contraintes d'exploitation, par des surtensions d'origines diverses et par des événements extérieurs au réseau tels que l'activité humaine et les phénomènes météorologiques. De ce fait, et compte tenu des risques pour les matériels du réseau ainsi que pour les biens et les personnes, l'exploitant doit nécessairement mettre en œuvre des dispositions permettant à la fois de réduire les risques d'apparition d'événements initiateurs, de limiter les contraintes à des valeurs tolérables et de réaliser la protection ultime des biens et des personnes. L'écrêtage des surtensions à front raide est assuré par des éclateurs et des parafoudres déployés sur le réseau. La limitation des contraintes diélectriques à la fréquence industrielle est obtenue par le choix du régime de neutre et par les systèmes automatiques de régulation. La tenue en tension des ouvrages ainsi que les caractéristiques des dispositifs de protection sont définies dans le cadre d'une coordination des isolements du réseau¹.

¹ Le sujet est en partie traité dans le livre *Les Transformateurs électriques, fonctionnement, mise en œuvre et exploitation*, M. Lambert, Dunod, Paris, 2016.

La surveillance des ouvrages est assurée par des automates répartis sur le réseau. C'est ainsi que la détection et l'élimination des défauts d'isolement sont assurées par des fonctions spécialisées, sensibles aux différentes typologies de court-circuit et organisées en plan de protection. Parallèlement, l'exploitant structure le réseau et spécifie ses composants de manière à réduire les contraintes sur les ouvrages et leur environnement. Pour couvrir toutes les typologies de défauts, la réduction des contraintes est assurée à la fois par la limitation des puissances de court-circuit et par le choix d'un régime de neutre cohérent¹. L'ensemble est consolidé par un plan de protection assurant l'élimination ultime des défauts d'isolement.

Lorsque l'on étudie le plan de protection d'un réseau ou d'un ouvrage à haute tension, il convient d'en préciser les contours. Il faut en effet distinguer :

1. Concernant les réseaux à haute tension
 - les réseaux publics de transport ;
 - les réseaux publics de distribution ;
 - les réseaux industriels.
2. Concernant leurs plans de protection
 - les protections d'exploitation ;
 - le plan de défense du système électrique ;
 - les plans de protection contre les défauts d'isolement.

Leur association permet de pallier les défaillances du réseau ou du système électrique. Un plan de protection est dédié. Il ne doit pas interférer avec d'autres. À titre d'exemple :

- ▶ une protection d'exploitation n'intervient pas sur un court-circuit ;
- ▶ le plan de protection du réseau public ne devrait pas intervenir pour un défaut affectant un réseau industriel ;
- ▶ la protection générale du réseau industriel n'a pas à être sollicitée dans un premier temps par un court-circuit affectant le réseau public.

Il existe cependant des situations où ce concept est difficilement réalisable notamment lorsque les réseaux présentent de très faibles puissances de court-circuit ou lorsqu'ils supportent des moyens de production décentralisée.

Ce livre décrit le concept de plan de protection utilisé pour détecter et éliminer **les défauts d'isolement** affectant les réseaux à haute tension. Par des exemples pratiques, il montre comment, à partir de critères directement mesurables, un plan de protection peut participer à la sécurité des personnes et des biens.

¹ Se reporter au livre *Les Régimes de neutre et les schémas des liaisons à la terre*, 2^e éd., M. Lambert, Dunod, Paris, 2011.

Il comporte neuf chapitres :

- ▶ Chapitre 1 : les généralités concernant les plans de protection.
- ▶ Chapitre 2 : les bases de l'électrotechnique de réseau.
- ▶ Chapitre 3 : le plan de protection contre les défauts polyphasés.
- ▶ Chapitre 4 : le plan de protection contre les défauts à la terre.
- ▶ Chapitre 5 : le plan de protection d'un jeu de barres.
- ▶ Chapitre 6 : le plan de protection des transformateurs.
- ▶ Chapitre 7 : le raccordement des réseaux industriels aux réseaux publics de distribution HTA.
- ▶ Chapitre 8 : le raccordement des réseaux industriels aux réseaux de transport ou de répartition.
- ▶ Chapitre 9 : pour conclure.

Cet ouvrage n'est pas consacré aux technologies utilisées par les constructeurs des équipements de contrôle-commande. Il n'est pas non plus un guide technique, les normes et les référentiels sont publiés pour cela. Il a été conçu à l'intention des professionnels, concepteurs ou exploitants des réseaux d'énergie électrique à haute tension. Rédigé à partir de mes expériences, il sera particulièrement utile pour comprendre les thèmes développés par les experts. Il apportera aux professionnels des éclaircissements et des compléments d'informations sur des sujets qui ne leur sont pas forcément très accessibles. Il les aidera également à avoir une vision globale et cohérente des plans de protection des réseaux publics et industriels. Enfin, il pourra être utilisé comme support pour les enseignants et leurs étudiants dans le cadre des formations en génie électrique.

Cet ouvrage fait référence à mes précédents livres *Les Régimes de neutre et les schémas des liaisons à la terre*, paru chez Dunod en 2011, et *Les Transformateurs électriques, fonctionnement, mise en œuvre et exploitation*, paru chez le même éditeur en 2016.

Convention d'écriture appliquée dans l'ouvrage

- ▶ a : vecteur opérateur $1 \angle 2\pi / 3$
- ▶ E : vecteur tension de référence
- ▶ F : facteur de mise à la terre Z_0/Z_d
- ▶ δ : coefficient de surtension temporaire
- ▶ j : vecteur opérateur $1 \angle \pi / 2$
- ▶ HTA : tension de service supérieure à 1 kV et inférieure à 50 kV
- ▶ HTB : tension de service supérieure ou égale à 50 kV
- ▶ $3I_{co}$: courant de capacité résiduelle (capacitif)
- ▶ $3I_0$: intensité résiduelle en un point
- ▶ I_1 : intensité phase 1
- ▶ I_2 : intensité phase 2
- ▶ I_3 : intensité phase 3
- ▶ I_{01} : composante homopolaire de courant phase 1
- ▶ I_{d1} : composante directe de courant phase 1
- ▶ I_{i1} : composante inverse de courant phase 1
- ▶ I_{k1} : courant de court-circuit monophasé
- ▶ I_{k2} : courant de court-circuit biphasé
- ▶ $I_{k_{E2E}}$: courant $J_{\text{défaut}}$ pour un défaut biphasé + terre
- ▶ $I_{k_{2E}}$: courant dans les phases pour un défaut biphasé + terre
- ▶ I_{k3} : courant de court-circuit triphasé
- ▶ IN : intensité de la mise à la terre du neutre
- ▶ Inc_{Tr} : intensité nominale primaire du transformateur
- ▶ Inc_{TC} : intensité nominale primaire du transformateur de courant
- ▶ Ins_{TC} : intensité nominale secondaire du transformateur de courant
- ▶ $J_{\text{défaut}}$: courant dans le défaut
- ▶ U_{cc} : tension de court-circuit d'un transformateur
- ▶ U_s : tension de service
- ▶ Un_p : tension nominale primaire d'un transformateur

- ▶ Uns : tension nominale secondaire d'un transformateur
- ▶ Vn : tension simple nominale ou spécifiée au point de défaut
- ▶ Un : tension composée nominale ou spécifiée
- ▶ Vo_1 : composante homopolaire de tension phase 1
- ▶ Vd_1 : composante directe de tension phase 1
- ▶ Vi_1 : composante inverse de tension phase 1
- ▶ V_1 : tension simple phase 1
- ▶ V_2 : tension simple phase 2
- ▶ V_3 : tension simple phase 3
- ▶ Rm : résistance de la prise de terre des masses
- ▶ Rn : résistance de la prise de terre des neutres
- ▶ Po : puissance active homopolaire
- ▶ Pr : puissance active résiduelle
- ▶ P : puissance active
- ▶ Q : puissance réactive
- ▶ S : puissance apparente
- ▶ Sc : valeur de la puissance de court-circuit
- ▶ Sc_1 : valeur de la puissance de court-circuit au primaire d'un transformateur
- ▶ Sc_2 : valeur de la puissance de court-circuit au secondaire d'un transformateur
- ▶ Sc_T : valeur de la puissance de court-circuit d'un transformateur
- ▶ Sn : valeur de la puissance nominale
- ▶ Sn_T : Puissance nominale d'un transformateur
- ▶ THT : tension de service supérieure ou égale à 150 kV
- ▶ Xi : réactance inverse
- ▶ Zo : impédance homopolaire
- ▶ Zd : impédance directe
- ▶ Zi : impédance inverse
- ▶ ZN : impédance résiduelle du dispositif de mise à la terre du neutre
- ▶ ZoN : impédance homopolaire du dispositif de mise à la terre du neutre
- ▶ $\Re$: réglage d'une protection
- ▶ $\Re_{51}$: réglage d'une protection à maximum d'intensité
- ▶ $\Re_{I_0}$: réglage d'une protection à maximum de courant homopolaire
- ▶ $\Re_{59N}$: réglage d'une protection 59N
- ▶ Us : tension de service du réseau

Liste des acronymes utilisés

Les matériels

- ▶ ADD : automatisme de défaillance disjoncteur (50BF)
- ▶ BPN : bobine triphasée de mise à la terre du neutre
- ▶ CCTP : cahiers des clauses techniques particulières
- ▶ DGPT : dispositif général de protection de transformateur (DMCR)
- ▶ DMCR : dispositif de mesure et de contrôle de régime (DGPT)
- ▶ EDF : Électricité de France
- ▶ ERDF : réseau de distribution (filiale d'EDF)
- ▶ ENEDIS : nouvelle appellation d'ERDF
- ▶ RTE : Réseau de transport d'électricité (filiale d'EDF)
- ▶ IPN : inductance monophasée de point neutre
- ▶ ONAN : circulation d'huile naturelle et refroidissement naturel
- ▶ ONAF : circulation d'huile naturelle et refroidissement forcé
- ▶ ODAF : circulation d'huile dirigée et refroidissement forcé
- ▶ PARCS : protection ampèremétrique résiduelle complémentaire et sélective
- ▶ PCC : puissance de court-circuit en un point
- ▶ PWH : protection wattmétrique homopolaire
- ▶ QB : *quick breaker* (SRB)
- ▶ RPN : résistance de point neutre
- ▶ SRB : interrupteur sectionneur (sectionneur à rupture brusque)
- ▶ TC : transformateur de courant
- ▶ TGBT : tableau général basse tension
- ▶ TPN : transformateur de point neutre
- ▶ TSA : transformateur des services auxiliaires
- ▶ TT : transformateur de tension

Les codes des fonctions de protection

- ▶ 21 : protection à minimum d'impédance
- ▶ 27 : protection à minimum de tension
- ▶ 50 : protection ampèremétrique non temporisée
- ▶ 51 : protection ampèremétrique temporisée
- ▶ 51G : protection ampèremétrique résiduelle alimentée par un tore homopolaire
- ▶ 51N : protection ampèremétrique résiduelle alimentée par trois transformateurs de courant

- ▶ 50 BF : contrôle du déclenchement du disjoncteur
- ▶ 59 : maximum de tension
- ▶ 59 N : maximum de tension résiduelle
- ▶ 64 REF : protection différentielle de terre restreinte
- ▶ 67G : protection directionnelle de terre alimentée par un tore homopolaire
- ▶ 67N : protection directionnelle de terre alimentée par trois transformateurs de courant
- ▶ 67VAR : protection à maximum de puissance réactive homopolaire
- ▶ 67W : protection à maximum de puissance active homopolaire (PWH)
- ▶ 87T : protection différentielle de transformateur
- ▶ 87B : protection différentielle de barres
- ▶ 87L : protection différentielle de ligne

Introduction

Durant la première moitié du xx^e siècle, les réseaux d'énergie électrique ont été conçus pour permettre aux personnes qui en faisaient la demande d'accéder à l'énergie électrique. La préoccupation des exploitants allait alors vers la recherche d'un compromis entre les investissements et la sûreté d'approvisionnement. Par la suite, l'évolution des exigences a provoqué une mutation dans la manière de concevoir les ouvrages puis de les exploiter. La continuité de la fourniture, la qualité de l'onde électrique, la sécurité des biens et des personnes ainsi que la préservation de l'environnement ont pris une place importante pour la conception et la réalisation des réseaux d'énergie électrique. Aujourd'hui la nécessité de maîtriser les coûts semble également s'imposer. Par ailleurs il est fait obligation au gestionnaire du réseau de faire en sorte que toute défaillance de l'isolement soit détectée et que l'élément en défaut soit mis hors tension dans les meilleurs délais ; le législateur admet en effet rarement que l'exploitation d'un réseau puisse se faire à défaut maintenu. C'est dans ce cadre que doit se définir un plan de protection contre les défauts d'isolement dédié à un ouvrage, un réseau ou une installation.

Un plan de protection est représenté par des équipements dotés de fonctions spécialisées. Sa finalité contribue à la pérennité des investissements, à la continuité de la fourniture et surtout, à la préservation de la sécurité des biens et des personnes.

Définir ce plan de protection c'est déterminer la criticité de l'isolement du réseau électrique, c'est également évaluer les grandeurs électriques développées par le défaut et choisir en cohérence les dispositifs qui, au meilleur coût, conviennent le mieux pour détecter l'événement, alerter l'exploitant et, en fonction des obligations, assurer la mise hors tension ultime de la partie en défaut.

Dans la plupart des cas les protections sont sensibles aux grandeurs électriques directement mesurables. Sur les ouvrages HTA de faibles puissances¹, l'élimination des défauts d'isolement sont souvent obtenues par des fusibles ou des disjoncteurs équipés de relais directs. Pour les plus fortes puissances, on utilise des équipements de protection raccordés au secondaire des capteurs

¹ La puissance limite préconisée par la norme NFC 13-100 pour l'utilisation de fusibles HTA de protection des transformateurs HTA/BT est de 1 250 kVA.

de tension et de courant. La part prise dans les investissements par les installations de contrôle-commande est relativement modérée.

En HTB et en THT par contre, une avarie sur un ouvrage peut avoir un impact sur le fonctionnement du réseau et être à l'origine d'un black-out. Elle est susceptible de provoquer des pertes financières importantes du fait de l'arrêt de la production industrielle sur des territoires étendus et du volume d'énergie non distribuée. La recherche de la performance en matière de sûreté, de sécurité et de sélectivité étant une donnée essentielle du plan de protection, la part prise dans l'investissement par le contrôle-commande est alors importante. Cependant, les composants présentant une durée de vie ou d'obsolescence relativement faible il est nécessaire de réfléchir aux moyens qui doivent être mis en œuvre pour la création et le renouvellement des installations de contrôle-commande dans des limites économiquement acceptables.