

Michel Lambert

LES RÉGIMES DE NEUTRE ET LES SCHÉMAS DES LIAISONS À LA TERRE

2^e édition

DUNOD

Image de couverture : imagedepotpro/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).
--	--



DANGER
LE PHOTOCOPIAGE
TUE LE LIVRE

© Dunod, Malakoff, 2011, 2018

11, rue Paul Bert
92210 Malakoff

ISBN 978-2-10-077590-3

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

Avant-propos	1
Introduction	5

A

Les déséquilibres homopolaires et les régimes de neutre

1 • Les composantes symétriques	9
1.1 Décomposition d'un système électrique	10
1.2 L'équation générale d'un court-circuit	14
1.3 La mesure des composantes symétriques	18
1.4 L'utilisation des composantes symétriques	21
1.5 Application	21
2 • Les déséquilibres	29
2.1 Les déséquilibres inverses	29
2.2 Les déséquilibres homopolaires	32
2.3 Synthèse	37
3 • Les paramètres du réseau	39
3.1 Le schéma équivalent d'un défaut monophasé	39
3.2 Les impédances	40
3.3 La résistance du défaut	47
3.4 Le facteur de mise à la terre	52
3.5 Synthèse	63

4 • Les régimes de neutre	65
4.1 Les schémas des liaisons à la terre (SLT)	65
4.2 Les SLT et les régimes de neutre	72
4.3 Le régime de neutre direct à la terre	77
4.4 Le régime de neutre isolé	82
4.5 Le régime de neutre impédant	86
4.6 Le régime de neutre compensé	93
4.7 Synthèse	97
5 • Choix d'un régime de neutre	99
5.1 Description	99
5.2 Schéma de l'infrastructure principale du réseau	100
5.3 Caractéristiques des ouvrages	100
5.4 L'étude	101
5.5 Que faut-il retenir de ces résultats ?	108

B

Les dispositions associées

6 • Les matériels de mise à la terre	111
6.1 Présentation générale des matériels	111
6.2 Les transformateurs	113
6.3 Les transformateurs de mise à la terre	120
6.4 Les bobines d'inductance d'extinction d'arc	131
6.5 Les impédances de point neutre	138
6.6 Exemple de définition d'un dispositif de mise à la terre du neutre HTA	146
6.7 Synthèse	147
7 • Les plans de protection contre les défauts à la terre	149
7.1 Présentation d'un plan de protection	149
7.2 Les protections homopolaires	152
7.3 Les protections à maximum de tension homopolaire	154
7.4 Les protections à maximum d'intensité homopolaire	164
7.5 Les protections à maximum de puissance homopolaire	179
7.6 Les relais directionnels de courant homopolaire	192
7.7 Le plan de protection et le neutre compensé	194
7.8 Les automatismes réenclencheurs	198
7.9 Les disjoncteurs shunts	200

8 • L'exploitation des ouvrages	207
8.1 Les essais	207
8.2 L'exploitation en régime non perturbé	220
8.3 L'exploitation d'un réseau en régime perturbé	222
8.4 Étude de perturbations particulières	224
8.5 Synthèse	234
Pour conclure	235
Bibliographie	241
Index	243

L'essentiel des anomalies rencontrées sur un réseau d'énergie électrique a pour origine un déséquilibre homopolaire. Le comportement du système électrique est alors déterminé par le mode de fixation du neutre à la terre.

Un régime de neutre a forcément une histoire. Son choix peut dépendre du niveau de développement du pays, de sa géographie, de la répartition de sa population sans oublier les influences économiques ou politiques. En l'absence d'éléments objectifs de décision, les erreurs peuvent s'avérer coûteuses.

Dans la vie d'un réseau électrique, le régime de neutre n'est pas immuable. Parce qu'un réseau vieillit et que son architecture se transforme nécessairement, l'exploitation des réseaux doit s'ajuster en permanence en induisant parfois l'évolution du régime de neutre.

Un changement de régime de neutre nécessite des interventions coûteuses au poste source, en réseau et chez les clients. Il nécessite des changements dans les pratiques d'exploitation du réseau. Le travail est énorme.

Lorsqu'il s'agit de communiquer sur les régimes de neutre, il convient d'en préciser les contours. Le sujet est complexe, il suffit pour s'en convaincre d'assister aux rencontres d'experts. Pour certains, l'appellation « régime de neutre » doit être proscrite. Les termes qui doivent être employés sont « schéma des liaisons à la terre ». Pour d'autres, « régime de neutre » et « schéma des liaisons à la terre » désignent la même chose. Les exploitants des réseaux publics évoquent volontiers « le neutre direct à la terre », « le neutre isolé », « le neutre impédant » et « le neutre compensé ». La littérature spécialisée pratique parfois le mélange des genres.

Ce livre est le résultat de mes expériences dans les métiers de l'exploitation des réseaux. Il n'oppose pas les régimes de neutre aux schémas des liaisons à la terre. Je considère en effet qu'ils sont le manche et la cognée d'un même outil. Il est dédié aux exploitants et aux concepteurs des réseaux d'énergie électrique ainsi qu'aux professeurs et à leurs étudiants. Il traite essentiellement des ouvrages exploités en haute tension. Les réseaux basse tension ne sont qu'évoqués car le sujet est largement développé dans les ouvrages spécialisés. Il existe cependant des liens très forts entre les principes qui prévalent dans les domaines de la basse et de la haute tension.

L'étude des régimes de neutre conduit nécessairement à s'interroger sur l'existence d'un bon régime de neutre.

Cet ouvrage est d'abord un travail d'analyse et de réflexion dont le but est d'éclaircir le fonctionnement d'un réseau soumis à un déséquilibre homopolaire. C'est

ensuite l'inventaire des dispositions qui doivent être prises en cohérence avec le choix du régime de neutre.

La première partie définit :

- Les déséquilibres homopolaires.
- Les régimes de neutre et les schémas des liaisons à la terre.
- Les critères de choix d'un régime de neutre.

La deuxième partie présente les dispositions associées :

- Les dispositifs de mise à la terre d'un neutre.
- Les plans de protections.
- L'exploitation des réseaux.

Cet ouvrage rassemble les thèmes qui sont développés dans les sessions de formation que j'ai eu l'occasion d'animer. Il a donc une connotation pédagogique. Les calculs et les modèles utilisés font appel aux composantes symétriques.

Ce livre est l'expression de mes expériences, il n'a surtout pas l'ambition d'être un document de référence. Les normes et les spécifications d'entreprises existent pour cela. Les valeurs par défaut des grandeurs électriques des simulations ont souvent été choisies pour des raisons pédagogiques ou de simplification. Elles ne devront pas être utilisées dans un autre contexte.

Convention d'écriture appliquée dans l'ouvrage

- β : coefficient de sélectivité longitudinale
- λ : coefficient de sélectivité transversale
- δ : facteur de défaut de mise à la terre
- F : facteur de mise à la terre
- a : vecteur opérateur $1 \angle 2\pi/3$
- j : vecteur opérateur $1 \angle \pi/2$
- $3I_{co}$: capacitif
- $\Sigma 3I_{co}$: capacitif du réseau
- $3I_o$: intensité résiduelle en un point
- I_1 : intensité phase 1
- I_2 : intensité phase 2
- I_3 : intensité phase 3
- I_{o1} : 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_{k2E} : courant dans les phases pour un défaut biphasé + terre
- I_{k3} : courant de court-circuit triphasé
- I_{kE2E} : courant $J_{\text{défaut}}$ pour un défaut biphasé + terre
- IN : intensité dans le dispositif de mise à la terre du neutre
- $J_{\text{défaut}}$: courant dans le défaut
- U_{cc} : tension de court-circuit d'un transformateur

- U_s : tension de service
- V_n : tension simple nominale ou spécifiée
- U_n : tension composée nominale ou spécifiée
- V_{o1} : composante homopolaire de tension phase 1
- V_{d1} : composante directe de tension phase 1
- V_{i1} : composante inverse de tension phase 1
- V_1 : tension simple phase 1
- V_2 : tension simple phase 2
- V_3 : tension simple phase 3
- V_m : monté en potentiel de la prise de terre des masses
- V_{ne} : montée en potentiel de la prise de terre des neutres
- R_m : résistance de la prise de terre des masses
- R_n : résistance de la prise de terre des neutres
- P_o : puissance active homopolaire
- P_r : Puissance active résiduelle
- P : puissance active
- Q : puissance réactive
- S : puissance apparente
- S_{cc} : valeur de la puissance de court-circuit
- S_{cc1} : puissance de court-circuit au primaire d'un transformateur
- S_{cc2} : puissance de court-circuit au secondaire d'un transformateur
- S_{ccG} : puissance de court-circuit des groupes de production
- S_{ccT} : puissance de court-circuit d'un transformateur
- S_n : puissance nominale
- $X''d$: réactance directe subtransitoire d'un groupe
- $X'd$: réactance directe transitoire d'un groupe
- X_s : réactance synchrone d'un groupe
- X_i : réactance inverse
- Z_N : impédance résiduelle du dispositif de mise à la terre du neutre
- Z_{oN} : impédance homopolaire du dispositif de mise à la terre du neutre
- Z_{os} : impédance homopolaire à la source
- $\mathfrak{R}$: réglage de la protection
- $\mathfrak{R}_{I_0}$: réglage de la protection 51N
- $\mathfrak{R}_{U_0}$: réglage de la protection 59N

Liste des acronymes utilisés dans l'ouvrage

- BPN : bobine de point neutre
- CCIC contrôle commande de l'impédance de compensation
- DTR : détecteur de défaut à la terre
- EPATR : ensemble de protection ampéremétrique de terre résistante
- F 51 N : protection ampéremétrique résiduelle (code ANSI)
- F 59 N : protection voltmétrique résiduelle (code ANSI)
- F 67 N : protection directionnelle de terre (code ANSI)
- IC : impédance de compensation

- PARCS : protection ampèremétrique résiduelle complémentaire et sélective
- PCC : puissance de court-circuit en un point
- PWH : protection wattmétrique homopolaire
- RPN : résistance de point neutre
- SAA : système automatique d'accord
- TPN : transformateur de point neutre

INTRODUCTION

Durant la première moitié du xx^e siècle, les réseaux d'énergie électrique ont été conçus pour répondre aux exigences de sûreté dans la desserte de l'énergie. La préoccupation des exploitants allait alors vers la recherche d'un compromis entre les investissements et la maîtrise des contraintes techniques. Depuis, sous la pression des usagers et des pouvoirs publics, les réseaux ont évolué en même temps que leur exploitation. Les choix qui ont prévalu durant le xx^e siècle sont aujourd'hui réévalués. La qualité de l'onde électrique et la sécurité des biens et des personnes ont pris une place prépondérante pour la conception et l'exploitation des réseaux d'énergie électrique et cela quelle que soit leur finalité.

La conception, la réalisation et l'exploitation d'un réseau d'énergie électrique sont aujourd'hui le résultat d'un compromis entre des impératifs dont les critères d'appréciation relèvent de la qualité de service, de la sécurité des biens et des personnes ainsi que de la maîtrise des coûts. Dans ce contexte le choix du régime du réseau neutre est stratégique.

Le respect de ces exigences est obtenu par la recherche de la performance du réseau. Elle dépend en effet de la fiabilité présentée par ses constituants, de la manière de les concevoir, de les maintenir et de les exploiter. L'architecture du réseau influe directement sur le comportement du système électrique. Présentant une topologie de faible réactance, elle offre la puissance de court-circuit nécessaire au confort des usagers ainsi qu'au bon fonctionnement des processus industriels. La maîtrise des contraintes provoquées par les déséquilibres homopolaires est obtenue par des dispositions techniques cohérentes dont la pièce maîtresse est le régime de neutre. L'ensemble est consolidé par un plan de protection assurant l'élimination rapide des défauts.

En conséquence, lorsqu'il s'agit de construire un réseau, il est judicieux de respecter une procédure d'étude. Tout d'abord, la topologie du réseau doit être définie pour répondre aux obligations de desserte dans le respect des normes relatives à la qualité et à la sécurité. Cette étude permet de définir les caractéristiques des ouvrages ainsi que la tension de service. Ensuite, il est nécessaire de choisir un régime de neutre qui respecte les obligations contractuelles et réglementaires. Pour finir, l'ensemble est complété par un plan de protection contre les défauts d'isolement et les aléas d'exploitation.

