

Michel Lambert

LES TRANSFORMATEURS ÉLECTRIQUES DE PUISSANCE

**Fonctionnement, mise en œuvre
et exploitations**

DUNOD

Toutes les marques citées dans cet ouvrage sont des marques déposées
par leurs propriétaires respectifs.

© Dunod, 2016, 2023
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-085696-1

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	IX
Introduction	1
1 Les transformateurs dans les réseaux	3
1.1 Les transformateurs THT/THT-HTB	3
1.1.1 Présentation générale	3
1.1.2 Le tertiaire de stabilisation	4
1.2 Les autotransformateurs d'interconnexion	5
1.3 Les transformateurs HTB/HTA ou THT/HTA	7
1.3.1 Présentation générale	7
1.3.2 La mise à la terre du neutre du réseau HTA	7
1.4 Les transformateurs des centrales de production	8
1.5 Les transformateurs de distribution HTA/BT	11
1.5.1 Présentation générale	11
1.5.2 Les transformateurs sur poteaux	11
1.5.3 Les transformateurs TPC sur poteau	12
1.5.4 Les postes en cabine	13
1.6 Les transformateurs des services auxiliaires HTA/BT	13
1.7 Les transformateurs HTA/BT des postes de livraison	14
1.8 Les transformateurs et les régimes de neutre	15
1.8.1 L'impédance homopolaire d'un transformateur	15
1.8.2 Les transformateurs de mise à la terre	17
1.8.3 Les transformateurs de point neutre	20
1.8.4 Les générateurs homopolaires	24
2 Les composants et les caractéristiques	29
2.1 Présentation générale des matériels	29
2.1.1 Les transformateurs isolés dans un diélectrique liquide	30
2.1.2 Les transformateurs de type sec	32
2.2 Les caractéristiques essentielles	33
2.2.1 Les tensions	34
2.2.2 Le rapport de transformation triphasé	35

2.2.3 La tenue diélectrique des enroulements	35
2.2.4 La puissance assignée	36
2.2.5 L'intensité assignée	37
2.2.6 Le couplage des enroulements	37
2.2.7 Les indices horaires	37
2.2.8 La tension de court-circuit	37
2.2.9 La puissance de court-circuit	38
2.2.10 Les impédances	39
2.2.11 Les caractéristiques à vide dans le système direct	41
2.3 La partie active d'un transformateur	42
2.3.1 Le circuit magnétique	42
2.3.2 Les enroulements	48
2.3.3 Les couplages et les impédances homopolaires	51
2.3.4 Les couplages et les indices horaires	55
2.4 Le refroidissement d'un transformateur	59
2.4.1 L'échauffement d'un transformateur	59
2.4.2 Les systèmes de refroidissement	59
2.5 Les régulateurs en charge	66
2.5.1 Principe et constitution d'un régulateur	66
2.5.2 Le sélecteur de prises	71
2.5.3 Le rupteur	73
2.5.4 La commande du régulateur	74
2.5.5 Le réglage de la tension sur les transformateurs HTA/BT	75
2.6 Pour résumer ce chapitre	76
3 L'insertion du transformateur	77
3.1 Le raccordement des transformateurs	77
3.1.1 Les raccordements aériens	77
3.1.2 Les tubes en alliage d'aluminium	80
3.1.3 Les câbles CEI 60502-2/NF C 33-220	83
3.1.4 Les postes sous enveloppe métallique (PSEM)	93
3.2 La protection contre les risques d'incendie	94
3.2.1 Les dispositions constructives	94
3.2.2 Le système de protection	95
3.3 Les schémas d'exploitation	98
3.3.1 Le schéma de base	99
3.3.2 Le schéma à deux transformateurs	100
3.3.3 Les schémas à trois transformateurs	102

3.4 La manœuvre des transformateurs	104
3.4.1 Les perturbations de manœuvre	104
3.4.2 Le sectionneur à rupture brusque	105
3.5 La mise en parallèle des transformateurs	107
3.5.1 La parallèle directe par disjoncteurs	107
3.5.2 La manœuvre par sectionneurs et disjoncteurs	108
3.5.3 La manœuvre par disjoncteurs	108
4 Les protections des transformateurs	109
4.1 Présentation du dispositif	109
4.2 Les protections contre les surtensions	110
4.2.1 La coordination de l'isolement	110
4.2.2 Les surtensions temporaires	110
4.2.3 Les surtensions à front raide	111
4.2.4 Les spécifications des matériels	112
4.2.5 Les protections contre les surtensions à front raide	113
4.2.6 La protection des neutres en THT	119
4.3 Généralités concernant les plans de protection	120
4.3.1 Principes généraux	120
4.3.2 Organisation	121
4.4 Les protections d'exploitation	122
4.4.1 Le contrôle des tensions secondaires	122
4.4.2 La protection de surexcitation	123
4.4.3 Les protections contre les surcharges	125
4.4.4 La protection de point neutre	131
4.5 La détection des défauts internes d'isolement	132
4.5.1 Les protections installées au primaire	132
4.5.2 Les protections internes	139
4.5.3 Le relais Buchholz	140
4.5.4 La protection DMCR	142
4.5.5 La protection du compartiment régleur	142
4.5.6 La protection de masse cuve	143
4.5.7 La protection différentielle longitudinale	146
4.5.8 La protection de terre restreinte (64REF)	148
4.6 La détection des défauts d'origine externe	150
4.6.1 Les protections installées au secondaire	151
4.6.2 Les protections installées au primaire	154
4.6.3 Les protections des matériels associés	158

4.7 Les automatismes	158
4.7.1 Cas où D1 et D2 sont des disjoncteurs	159
4.7.2 Cas où D1 et D2 sont des sectionneurs à rupture brusque	160
5 L'exploitation des transformateurs	161
5.1 Les consignes d'exploitations	161
5.1.1 Les régimes de charge	161
5.1.2 L'adaptation aux charges	163
5.1.3 La mise en parallèle des unités	165
5.1.4 La maîtrise des courants d'enclenchement	166
5.1.5 Le traitement des incidents	167
5.2 Le contrôle des accès	170
5.2.1 La norme NF C 18-510	170
5.2.2 Les travaux sur un transformateur	172
6 La maintenance des transformateurs	175
6.1 Généralités concernant la maintenance	175
6.1.1 Les politiques de maintenance en haute tension	176
6.1.2 L'organisation de la maintenance	177
6.1.3 Les conditions de mise en œuvre d'une maintenance	178
6.2 La maintenance des transformateurs	179
6.2.1 La surveillance des transformateurs	179
6.2.2 Les niveaux de maintenance	180
6.2.3 Les anomalies typiques	182
6.2.4 La surveillance des huiles	186
6.2.5 L'évaluation de la teneur en PCB/PCT	187
6.2.6 Pour conclure ce chapitre	189
7 Les modèles équivalents et les courants de court-circuit	191
7.1 Les transformateurs à deux enroulements	191
7.1.1 Transformateur 62,5 kV/21kV de 20 MVA YN.yn.0	192
7.1.2 Transformateur 62,5 kV/21kV de 36 MVA YN.d.11	200
7.1.3 La configuration des modèles	204
7.1.4 La modélisation par défaut des transformateurs	205
7.2 Les transformateurs à trois enroulements	206
7.2.1 Modélisation dans le système direct	206
7.2.2 La modélisation dans le système inverse	212
7.2.3 Modélisation dans le système homopolaire	213

7.3 L'étude des courants de court-circuit	217
7.3.1 Les paramètres	217
7.3.2 Les puissances de court-circuit	218
7.3.3 Les calculs des courants de court-circuit	220
7.3.4 Impact des schémas des liaisons à la terre	225
8 Études complémentaires	231
8.1 Le calcul des courants des courants de court-circuit	231
8.1.1 Les rapports de transformation	231
8.1.2 La méthode	234
8.2 Étude d'un défaut à la terre maintenu	245
8.2.1 L'évènement	245
8.2.2 La simulation de l'avarie	246
8.2.3 Analyse des résultats	247
8.2.4 Analyse de l'évènement du 15/01/2015	247
8.3 Le transformateur et les harmoniques	248
8.3.1 Généralités	248
8.3.2 Les harmoniques et les composantes symétriques	249
8.3.3 Les harmoniques et les transformateurs	250
8.3.4 Les effets des harmoniques multiples de trois	251
8.3.5 L'harmonique 3 et le couplage des transformateurs	252
8.4 La mise en parallèle des transformateurs	252
8.4.1 Étude de la répartition des charges	252
8.4.2 Étude des courants de court-circuit	257
8.5 La détection des défauts d'isolement	263
En conclusion	265
Index	267

Avant-propos

Un peu d'histoire

À la fin du XIX^e siècle l'électricité a cessé dans les pays industrialisés d'être une science pour devenir une technique. L'énergie électrique a d'abord été produite et distribuée en courant continu sous une tension commune à basse tension ; de ce fait, l'exploitant a été obligé de la produire là où elle était consommée. Les puissances augmentant, il est arrivé un moment où ce mode de production et de distribution n'a plus été suffisant pour satisfaire les besoins des usagers et des exploitants. Il a fallu alors chercher des ressources là où elles étaient abondantes et peu chères. La production d'électricité par la houille blanche (l'hydroélectricité) s'est alors développée entraînant à sa suite localement le développement des industries métallurgiques et électrochimiques.

Comme les réseaux à courant continu de l'époque ne permettaient pas de transporter de grandes puissances sur des distances importantes, l'acheminement de cette énergie bon marché vers les zones où l'activité économique était en expansion a nécessité l'utilisation de techniques à courant alternatif, d'abord en monophasé puis en polyphasé.

Cette histoire aurait pu être toute autre sans les transformateurs électriques qui sont apparus et développés dans la deuxième moitié du XIX^e siècle (le premier transformateur triphasé a été construit en 1889). Aujourd'hui, il est difficile d'imaginer un réseau électrique ou un appareil de conversion de l'électricité sans transformateur.

Force est de constater que ces appareils ont permis de transporter ou d'acheminer l'énergie électrique partout où le besoin s'en faisait sentir tout en maîtrisant les pertes par effet Joule. Celles-ci ne peuvent en effet être maîtrisées qu'à la condition que la puissance optimale transitée sur une distance soit cohérente du point de vue économique avec une tension de service à haute tension. Seul le transformateur est capable d'assurer cette fonction dans des conditions économiquement acceptables. Le déploiement des transformateurs a entraîné des conséquences importantes pour l'industrie et pour la qualité de vie des populations. C'est en effet aux transformateurs électriques que l'on doit le déploiement des réseaux à haute tension de distribution qui ont été à l'origine de l'électrification rurale.

Afin de répondre aux besoins de consommation croissante, les réseaux de distribution se sont à la fois étoffés et étendus avec pour corollaire l'augmentation continue des tensions de service. C'est ainsi que les tensions sur les réseaux publics de distribution à haute tension français ont été décuplées pour atteindre 30 kV à la fin des années 1960. Dans le même temps la tension des réseaux publics à basse tension a été multipliée par deux. Face aux demandes sans cesse croissantes des usagers et des pouvoirs publics, les transformateurs des réseaux de distribution ont donc été (et sont encore) la variable d'ajustement des réseaux de distribution.

Parallèlement le besoin de rapprocher les zones de production des zones de consommation a été à l'origine de la création d'un réseau de transport qui s'est peu à peu élargi pour couvrir le territoire continental français et s'interconnecter aux autres réseaux européens. Là encore la tension de service du réseau de transport français a été décuplée en cinquante ans passant de 45 kV à 420 kV début des années 1970 avec le déploiement des centrales nucléaires et le plan 400 TWH d'électricité de France. Avec l'avènement du grand réseau de transport à 400 kV, les anciens ouvrages à 45, 63, 90, 150 et 225 kV ont été, soit retirés de l'exploitation, soit déclassés pour devenir des réseaux de répartition à caractère régional¹. Le besoin de sûreté dans l'approvisionnement en énergie et dans le fonctionnement du système électrique a fait le reste.

Par ailleurs, la puissance appelée par les sites industriels étant de plus en plus grande, les postes de livraison ont dû être dotés de moyens de transformation pouvant servir d'interface entre les réseaux publics et les chaînes de production industrielle et cela, avec un niveau de qualité conforme aux exigences des utilisateurs. Aujourd'hui avec le développement de la production décentralisée et notamment des fermes éoliennes, l'interface du poste de livraison avec les réseaux publics est réalisée par un ou plusieurs transformateurs dont les puissances unitaires ne cessent de croître pour atteindre et parfois dépasser, en 225 kV, une centaine de MVA.

Selon la commission électrotechnique internationale, un transformateur de puissance est un appareil statique à plusieurs enroulements qui, par induction électromagnétique, relie deux systèmes électriques différents mais de même fréquence. Cette présentation qui a le mérite d'être compréhensible ne résiste pas à l'examen des pratiques du moment. En effet, si l'utilisation d'un transformateur est liée à la recherche de l'efficacité énergétique et à la sûreté d'approvisionnement, il existe aujourd'hui bien d'autres raisons motivant l'insertion d'un transformateur dans un réseau

À qui s'adresse ce livre ?

Ce livre 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 a pour but de présenter le transformateur dans son environnement. S'appuyant sur des concepts présentés dans d'autres ouvrages, il sera particulièrement utile pour comprendre les thèmes développés dans les normes, les spécifications d'entreprises et les recommandations des constructeurs. 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 du rôle des transformateurs dans les réseaux publics et industriels. Enfin, il pourra être utilisé comme support par les enseignants et leurs étudiants ou stagiaires dans le cadre des formations en génie électrique.

Ce livre décrit les fonctions des transformateurs de puissance dans les réseaux à haute tension. Par des exemples pratiques, il montre comment les propriétés du transformateur sont utilisées pour le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique. Les transformateurs utilisés pour la traction électrique et pour la conversion des systèmes électriques ne sont pas étudiés.

1. Il ne doit plus aujourd'hui exister de réseaux 45 et 150 kV.

Il comporte huit chapitres :

- ▷ Chapitre 1 : *Les transformateurs dans les réseaux*
- ▷ Chapitre 2 : *Les composants et les caractéristiques*
- ▷ Chapitre 3 : *L'insertion du transformateur*
- ▷ Chapitre 4 : *Les protections des transformateurs*
- ▷ Chapitre 5 : *L'exploitation des transformateurs*
- ▷ Chapitre 6 : *La maintenance des transformateurs*
- ▷ Chapitre 7 : *Les modèles équivalents et les courants de court-circuit*
- ▷ Chapitre 8 : *Études complémentaires*

Avertissement

Cet ouvrage complète et fait référence à mon précédent livre *Les régimes de neutre et les schémas des liaisons à la terre*, publié aux éditions Dunod en 2018. Il est le résultat de mes expériences. À ce titre, il ne peut pas se substituer aux normes et aux spécifications des sociétés d'électricité.

Remerciements

Je remercie les constructeurs français qui durant de nombreuses années m'ont apporté aide et assistance ainsi que les exploitants et les concepteurs des réseaux d'énergie électrique avec qui j'ai eu le plaisir de dialoguer ou de travailler et qui m'ont fait partager leurs expériences.

Convention d'écriture appliquée dans l'ouvrage

- ▶ F : facteur de mise à la terre Z_o/Z_d
- ▶ δ : coefficient de surtension temporaire
- ▶ j : vecteur opérateur $1 \angle \pi/2$
- ▶ HTA : tension de service inférieure à 50 kV
- ▶ HTB : tension de service supérieure ou égale à 50 kV
- ▶ $3I_{co}$: capacitif
- ▶ $3I_o$: 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_{k_2} : courant de court-circuit biphasé
- ▶ $I_{k_{E2E}}$: courant $J_{\text{défaut}}$ à la terre pour un défaut biphasé + terre
- ▶ $I_{k_{2E}}$: courant dans les phases pour un défaut biphasé + terre
- ▶ I_{k_3} : courant de court-circuit triphasé
- ▶ I_N : intensité dans la 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_{o_1} : composante homopolaire de tension phase 1
- ▶ V_{d_1} : composante directe de tension phase 1
- ▶ V_{i_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
- ▶ 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_{cc_1} : puissance de court-circuit au primaire d'un transformateur
- ▶ S_{cc_2} : puissance de court-circuit au secondaire d'un transformateur
- ▶ S_{cc_T} : puissance de court-circuit d'un transformateur
- ▶ S_n : puissance nominale
- ▶ THT : tension de service supérieure ou égale à 150 kV
- ▶ X_i : réactance inverse
- ▶ Z_o : impédance homopolaire
- ▶ Z_d : impédance directe
- ▶ Z_i : impédance 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_o : Impédance homopolaire à la source
- ▶ $\mathfrak{R}$: réglage de la protection
- ▶ $\mathfrak{R}_{51}$: réglage d'une protection à maximum d'intensité

- ▶ $\mathfrak{R}_{10}$: réglage d'une protection 51N ou 51G
- ▶ $\mathfrak{R}_{U0}$: réglage d'une protection 59N
- ▶ U_s : Tension de service

Liste des acronymes utilisés dans l'ouvrage

- ▶ BPN : bobine de point neutre
- ▶ DGPT : dispositif général de protection de transformateur (équivalent à DMCR)
- ▶ DMCR : dispositif de mesure et de contrôle de régime (équivalent à DGPT)
- ▶ EDF : électricité de France
- ▶ RTE : réseau de transport d'électricité (Filiale d'EDF)
- ▶ F23 : protection thermostatique
- ▶ F24 : protection de surexcitation
- ▶ F27 : protection à minimum de tension
- ▶ F49T : protection par image thermique
- ▶ F51 : protection ampèremétrique
- ▶ F51G : protection ampèremétrique alimentée par un tore homopolaire
- ▶ F51N : protection ampèremétrique résiduelle alimenté par un montage sommateur des TC
- ▶ F67T : protection différentielle de transformateur
- ▶ F59N : protection voltmétrique résiduelle
- ▶ F64 REF : protection différentielle de terre restreinte
- ▶ F67N : protection directionnelle de terre
- ▶ GH : générateur homopolaire
- ▶ IPN : inductance 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
- ▶ PCC : puissance de court-circuit en un point
- ▶ QB : *quick breaker* (SRB)
- ▶ RPN : résistance de point neutre
- ▶ SRB : interrupteur sectionneur (QB)
- ▶ TC : transformateur de courant
- ▶ TGBT : tableau général basse tension
- ▶ THT : très haute tension (> 150 kV)
- ▶ TPN : transformateur de point neutre
- ▶ TSA : transformateur des services auxiliaires
- ▶ TT : transformateur de tension

