

Michel Lambert



# LES TRANSFORMATEURS ÉLECTRIQUES

Fonctionnement, mise en œuvre  
et exploitation

DUNOD

# Table des matières

<b>Avant propos</b>	<b>IX</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Les transformateurs dans les réseaux</b>	<b>3</b>
1.1 Les transformateurs 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	8
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	15
1.8 Les transformateurs et les régimes de neutre	16
1.8.1 L'impédance homopolaire d'un transformateur	16
1.8.2 Les transformateurs de mise à la terre	18
1.8.3 Les transformateurs de point neutre	21
1.8.4 Les générateurs homopolaires	25

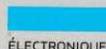
<b>2 Les composants et les caractéristiques</b>	<b>31</b>
2.1 Présentation générale des matériels	31
2.1.1 Les transformateurs isolés dans un diélectrique liquide	32
2.1.2 Les transformateurs de type sec	34
2.2 Les caractéristiques essentielles	36
2.2.1 Les tensions	37
2.2.2 Le rapport de transformation triphasé	37
2.2.3 La tenue diélectrique des enroulements	37
2.2.4 La puissance assignée	39
2.2.5 L'intensité assignée	39
2.2.6 Le couplage des enroulements	39
2.2.7 Les indices horaires	39
2.2.8 La tension de court-circuit	40
2.2.9 La puissance de court-circuit	40
2.2.10 Les impédances	41
2.3 La partie active d'un transformateur	45
2.3.1 Le circuit magnétique	46
2.3.2 Le circuit magnétique et les déséquilibres homopolaires	48
2.4 Le couplage des enroulements	51
2.4.1 Présentation générale	51
2.4.2 Les raisons d'un choix	52
2.4.3 Les couplages et les régimes de neutre	54
2.4.4 Les indices horaires	58
2.5 Le système de réfrigération d'un transformateur	62
2.5.1 Les origines de l'échauffement d'un transformateur	62
2.5.2 Les conséquences	62
2.5.3 Les systèmes de refroidissement	63
2.5.4 Les défauts de refroidissement	67
2.5.5 Les conditions de démarrage	67
2.6 Les régleurs en charge des transformateurs	70
2.6.1 Principe général d'un régleur en charge	70
2.6.2 Cas d'un réglage sur le neutre	72
2.6.3 Cas d'un réglage côté ligne	74

2.6.4 Les sélecteurs de prises	75
2.6.5 Le rupteur	77
2.6.6 La commande du régleur	78
2.6.7 Le réglage de la tension sur les transformateurs HTA/BT	79
2.7 Pour conclure ce chapitre	79
<b>3 L'insertion du transformateur</b>	<b>81</b>
3.1 Le raccordement des transformateurs	81
3.1.1 Les connexions en câbles nus ou gainés	82
3.1.2 Les tubes en alliage d'aluminium	85
3.1.3 Les câbles CEI 60502-2 / NFC 33-220	87
3.1.4 Les postes sous enveloppe métallique (PSEM)	99
3.2 L'insertion des transformateurs dans le poste	100
3.2.1 La sécurisation de l'ouvrage	101
3.2.2 La protection contre les risques d'incendie	101
3.2.3 Les schémas d'exploitation	105
3.2.4 Le schéma de base	107
3.2.5 Le schéma à deux transformateurs	108
3.2.6 Les schémas à trois transformateurs	110
3.2.7 La commande des transformateurs	113
<b>4 Les protections des transformateurs</b>	<b>117</b>
4.1 Présentation du dispositif	117
4.2 Les protections contre les surtensions	118
4.2.1 La coordination de l'isolement	118
4.2.2 Les surtensions temporaires	118
4.2.3 Les surtensions à front raide	119
4.2.4 Les spécifications des matériels	120
4.2.5 Les protections	121
4.2.6 La protection des neutres en THT	129
4.3 Généralités concernant les plans de protection	130
4.3.1 Principes généraux	130
4.3.2 Organisation	131
4.4 Les protections d'exploitation	132
4.4.1 Le contrôle des tensions secondaires	133

4.4.2 La protection de surexcitation	134
4.4.3 Les protections contre les surcharges	136
4.4.4 La protection de point neutre	143
4.5 La détection des défauts internes d'isolement	144
4.5.1 Les protections installées au primaire	145
4.5.2 Les protections internes	151
4.5.3 Le relais Buchholz	152
4.5.4 La protection DMCR	154
4.5.5 La protection du compartiment régleur	155
4.5.6 La protection de masse cuve	156
4.5.7 La protection différentielle longitudinale	158
4.5.8 La protection de terre restreinte (64REF)	161
4.6 La détection des défauts d'origine externe	163
4.6.1 Les protections installées au secondaire	164
4.6.2 Les protections installées au primaire	166
4.6.3 Les protections des matériels associés	169
4.7 Les automatismes	169
4.7.1 Cas où D1 et D2 sont des disjoncteurs	170
4.7.2 Cas où D1 et D2 sont des sectionneurs à rupture brusque	171
<b>5 L'exploitation des transformateurs</b>	<b>173</b>
5.1 Les consignes d'exploitations	173
5.1.1 Les régimes de charge	173
5.1.2 L'adaptation aux charges	176
5.1.3 La mise en parallèle des unités	178
5.1.4 La maîtrise des courants d'enclenchement	179
5.1.5 Le traitement des incidents	180
5.2 Le contrôle des accès	184
<b>6 La maintenance des transformateurs</b>	<b>189</b>
6.1 Généralités concernant la maintenance	189
6.1.1 La maintenance d'un ouvrage à haute tension	190
6.1.2 L'organisation de la maintenance	191
6.1.3 Les conditions de mise en œuvre d'une maintenance	192

6.2 La maintenance des transformateurs	193
6.2.1 La surveillance des transformateurs	193
6.2.2 Les niveaux de maintenance	195
6.2.3 Les anomalies typiques	196
6.2.4 La surveillance des huiles	200
6.2.5 L'évaluation de la teneur en PCP/PCT	201
6.3 Pour conclure ce chapitre	202
<b>7 Les modèles équivalents et les courants de court-circuit</b>	<b>205</b>
7.1 Les transformateurs à deux enroulements	205
7.1.1 Transformateur 62,5 kV/21 kV de 20 MVA YN.yn.0	206
7.1.2 Transformateur 62,5 kV/21 kV de 36 MVA YN.d.11	215
7.1.3 La configuration des modèles	220
7.1.4 La modélisation par défaut des transformateurs	220
7.2 Les transformateurs à trois enroulements	222
7.2.1 Modélisation dans le système direct	222
7.2.2 Modélisation dans le système inverse	228
7.2.3 Modélisation dans le système homopolaire	229
7.3 L'étude des courants de court-circuit	233
7.3.1 Les paramètres	234
7.3.2 Les puissances de court-circuit	235
7.3.3 Les calculs des courants de court-circuit	237
7.3.4 Les schémas des liaisons à la terre	242
<b>8 Études complémentaires</b>	<b>249</b>
8.1 Le calcul des courants des courants de court-circuit	249
8.1.1 Les rapports de transformation	249
8.1.2 Calculs des courants de court-circuit	252
8.2 Étude d'un défaut à la terre maintenu	262
8.2.1 L'évènement	262
8.2.2 La simulation de l'avarie	263
8.2.3 Analyse des résultats	264
8.2.4 Analyse de l'évènement du 15/01/2015	264

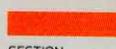
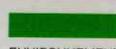
8.3 Le transformateur et les harmoniques	265
8.3.1 Généralités	265
8.3.2 Les harmoniques et les composantes symétriques	266
8.3.3 Les harmoniques et les transformateurs	268
8.3.4 Les effets des harmoniques multiples de trois	268
8.3.5 L'harmonique 3 et le couplage des transformateurs	269
8.4 La mise en parallèle des transformateurs	270
8.4.1 Étude de la répartition des charges	270
8.4.2 Étude des courants de court-circuit	275
<b>En conclusion</b>	<b>283</b>
<b>Index</b>	<b>285</b>



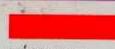
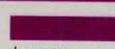
ÉLECTRONIQUE



ÉNERGIES

FROID ET GÉNIE  
CLIMATIQUEGESTION  
INDUSTRIELLE

ENVIRONNEMENT

MÉCANIQUE  
ET MATÉRIAUXÉLECTRO-  
TECHNIQUEAUTOMATIQUE  
ET RÉSEAUX

# LES TRANSFORMATEURS ÉLECTRIQUES

Les transformateurs sont des éléments essentiels des réseaux d'énergie électrique à haute tension. Ils participent à la recherche de l'efficacité énergétique et à la sûreté d'approvisionnement.

Le but de cet ouvrage est de mettre en perspective les rôles des transformateurs dans les réseaux publics et industriels. Il précise leurs conditions de mise en œuvre et d'exploitation ainsi que leur impact sur les systèmes électriques déséquilibrés et sur le fonctionnement des plans de protection.

Il est dédié aux ingénieurs et techniciens impliqués dans la conception et l'exploitation des réseaux d'énergie électrique à haute tension. Il sera également utile aux enseignants et aux étudiants en génie électrique.

## Michel Lambert

a occupé durant plusieurs décennies des fonctions relatives à la conception et à l'exploitation des réseaux à haute tension. Il a également exercé des activités de conseil et de formation au sein des entreprises gestionnaires de réseaux de transport et de distribution. Il est l'auteur d'un ouvrage de référence sur les régimes de neutre et les schémas de liaison à la terre.

### POINTS FORTS

- ✓ Un contenu issu de l'expérience de l'auteur sur le terrain.
- ✓ Des exemples pratiques.
- ✓ Une lecture facilitée par 199 figures et 60 tableaux.
- ✓ Des recommandations pour la mise en œuvre des transformateurs.
- ✓ Des compléments d'information concernant les spécifications.

### CONTENU DE L'OUVRAGE

- La place des transformateurs dans les réseaux
- Les éléments constitutifs des transformateurs
- L'insertion des transformateurs
- Les protections
- L'exploitation
- La maintenance
- Les modèles équivalents
- Des études de cas



9 782100 722242

7900106  
ISBN 978-2-10-072224-2

Les actus



du savoir

DUNOD  
dunod.com