

Électrotechnique des centrales électriques

Christophe Schroeder



Dans la collection EDF R&D

La maintenance des centrales nucléaires

J.-P. Hutin, 2016

Efficacité énergétique – Des principes aux réalités

P. Baudry, 2016

Les nanomatériaux et leurs applications pour l'énergie électrique

D. Noël, 2014

Guide international du comptage intelligent

F. Toledo, 2012

Numériser le travail – Théories, méthodes, expérimentations

S. Lahlou, V. Nosulenko, E. Samoilenko, 2012

L'énergie hydraulique, 2^e édition

R. Ginocchio, P.-L. Viollet, 2012

*Le système nerveux du réseau français de transport d'électricité (1946-2006) :
60 années de contrôle électrique*

J. Lecouturier, 2012

La physique des réacteurs nucléaires

S. Marguet, 2011

Marketing critique : le consommateur collaborateur en question

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, A. Bonnemaizon, 2010

Graphes et algorithmes

M. Gondran, M. Minoux, 2009

*Gestion de la complexité dans les études quantitatives de sûreté de fonctionnement
des systèmes*

M. Bouissou, 2008

Calcul de champ électromagnétique : exemples d'application

J.-C. Vérité, J.-P. Ducreux, G. Tanneau, P. Baraton, B. Paya, 2007

Les télécommunications au cœur du système électrique français (1946-2000)

A. Giandou, C. Leclère, J. Lecouturier, J.-M. Spetebroodt, H. Thibert, A. Vilatte, 2007

Innovier en marketing, 15 tendances en mouvement

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, 2006

Éléments finis pour l'ingénieur : grands principes et petites recettes

P. Thomas, 2006

Évaluation et maîtrise du vieillissement industriel

A. Lannoy, H. Procaccia, 2005

Dans la collection Socio-économie de l'énergie

Énergie et transformations sociales – Enquête sur les interfaces énergétiques

J. Cihuelo, A. Jobert, C. Grandclément, 2015

Électrotechnique des centrales électriques

Christophe SCHROEDER

Préface de Philippe SASSEIGNE

L*avoisier*
TEC & DOC

editions.lavoisier.fr

Direction éditoriale : Jean-Marc BOCABELLE
Mise en pages : Patrick Leleux PAO, Giberville (14)

Photo de couverture :
Centrale nucléaire EDF de Saint-Laurent-des-Eaux (Loir et Cher) :
la plateforme d'évacuation d'énergie et le départ des lignes à Très Haute Tension.
Crédit Photo © EDF-Cyrus Cornut – Décembre 2013

Préface

Pour remplir sa fonction de production d'électricité, une centrale met en œuvre de nombreux systèmes auxiliaires qui, pour la plupart d'entre eux, nécessitent une alimentation électrique. Ainsi, les systèmes électriques de puissance d'une centrale sont, d'une part ceux qui permettent la production et l'évacuation de l'énergie électrique vers le réseau externe, et d'autre part ceux qui assurent la distribution d'énergie électrique interne. Dans le cas des centrales nucléaires, ces derniers jouent un rôle déterminant vis-à-vis de la sûreté. La connaissance de ces systèmes est donc fondamentale, tant dans la phase de conception que lors de l'exploitation des centrales.

Or la culture à dominante mécanicienne des équipes de conception et d'exploitation rend souvent l'approche des systèmes électriques de puissance plus ardue que celle des systèmes et matériels mécaniques. Cette situation paradoxale au regard de la finalité d'une centrale peut aussi s'expliquer par le fait qu'il existe peu d'écrits décrivant comme un tout cohérent le fonctionnement des systèmes électriques et montrant comment sont coordonnés les paramètres – tensions, courants, impédances, puissances – qui les caractérisent.

C'est tout l'intérêt et l'originalité de l'ouvrage de Christophe SCHROEDER que d'exposer une vue d'ensemble de la conception électrique des centrales et de fournir des méthodes de calcul permettant de dimensionner leurs systèmes électriques de puissance. Il trouve également une résonance particulière dans le contexte relativement nouveau des réglementations européennes en matière de conditions d'accès aux réseaux, formalisées notamment dans les « Codes de Réseau ». Un autre mérite de ce livre réside dans l'illustration des procédés de calcul par de nombreux exemples d'applications numériques. Enfin, dans une démarche raisonnée, l'ouvrage fournit un certain nombre de vues critiques qui

aideront le lecteur à interpréter les résultats des calculs au regard des hypothèses posées et des simplifications que nécessitent parfois les approches analytiques.

Ingénieur à la Division Production Nucléaire d'Électricité de France, Christophe SCHROEDER a occupé différentes fonctions techniques dans l'ingénierie, tant de conception que d'exploitation des centrales nucléaires et thermiques classiques, avec une constante forte : les systèmes électriques. Il a contribué à plusieurs projets de construction de centrales thermiques classiques et coordonne le domaine des sources électriques de secours du parc nucléaire d'EDF. Ce parcours l'a donc particulièrement préparé à traiter des différents problèmes de dimensionnement électrique.

Je félicite Christophe pour l'excellent travail qu'il a réalisé en rédigeant cet ouvrage, où il a su rassembler des éléments clés issus de sa remarquable expertise dans le domaine.

Je souhaite aux utilisateurs de ce livre d'y trouver les fondamentaux de la conception électrique des centrales. Parmi ces utilisateurs, figurent en premier lieu les équipes d'ingénierie appelées à concevoir des projets de nouvelles centrales ou de modification des installations électriques de centrales existantes. Les connaissances exposées dans le présent ouvrage en matière de conception seront également fort utiles aux équipes d'ingénierie d'exploitation et aux exploitants de centrales, en particulier pour ce qui concerne le fonctionnement des systèmes de distribution électrique et celui de l'interface entre les groupes de production et le réseau externe, tant en régime permanent qu'en situation perturbée.

À tous, je souhaite une bonne et enrichissante lecture.

Philippe SASSEIGNE

Directeur de la Division Production Nucléaire d'Électricité de France

Avant-propos

Le présent ouvrage expose les principes de conception des systèmes électriques de puissance qui composent les centrales de production d'électricité. Ces systèmes sont, d'une part ceux qui permettent la production et l'évacuation de l'énergie électrique vers le réseau externe, et d'autre part ceux qui assurent la distribution d'énergie électrique au sein des centrales ; ils sont traditionnellement représentés par le schéma électrique général de la centrale. Leur fonctionnement peut être caractérisé par un ensemble de paramètres – tensions, courants, impédances, puissances – qui doivent être coordonnés de manière à former un tout cohérent. Cette notion de coordination est fondamentale et ses différents aspects seront abordés comme autant d'étapes du dimensionnement électrique d'une centrale : choix des niveaux de tension, calcul des courants de court-circuit, calcul des échanges de puissance entre la centrale et le réseau, coordination des tensions, fonctionnement statique et dynamique de l'interface entre la centrale et le réseau. On verra que ce dimensionnement est en fait un processus itératif ; les méthodes de calcul mises en œuvre pour le dimensionnement seront exposées et illustrées par des exemples d'applications numériques. D'autres aspects de la conception seront également abordés, comme le choix des protections électriques et la détermination de leurs valeurs de réglage.

Les principes exposés s'appliquent essentiellement aux centrales de grande puissance mettant en œuvre une transformation électromécanique de l'énergie avec groupe tournant. En termes de technologies, cela correspond aux centrales thermiques classiques à combustibles fossiles, aux centrales nucléaires et aux centrales hydroélectriques.

Cet ouvrage est destiné avant tout aux ingénieurs de bureaux d'ingénierie appelés à concevoir des projets de nouvelles centrales ou de rénovation des installations électriques de centrales existantes. Les principes exposés peuvent être

mis en œuvre à tous les stades de tels projets : avant-projet sommaire, avant-projet détaillé, études d'exécution. Le niveau de détail des calculs et la finesse des modèles de machines utilisés seront adaptés graduellement lors de chacune de ces étapes ; inversement, les hypothèses simplificatrices se feront plus rares au fur et à mesure de l'avancement du projet.

Les élèves ingénieurs des filières spécialisées en électrotechnique pourront également trouver dans le présent ouvrage un complément à l'enseignement reçu, en préparation à leur future activité professionnelle. En effet, l'enseignement de l'électrotechnique se concentre surtout sur la théorie des machines statiques et tournantes à courant continu et à courant alternatif. Mais les problèmes spécifiques à des installations industrielles, tels que les calculs de courants de court-circuit ou la sélectivité des protections, sont peu abordés et les ingénieurs doivent en acquérir la maîtrise dans le cadre de leur environnement professionnel.

Le lecteur est supposé maîtriser les lois fondamentales de l'électromagnétisme, les méthodes d'étude des circuits électriques, la théorie des machines électriques statiques et tournantes avec leur représentation par des schémas équivalents, ainsi que les procédés mathématiques d'étude des régimes déséquilibrés et des régimes transitoires des machines électriques tournantes. Il est souhaitable que le lecteur soit familier avec la méthode des composantes symétriques et la transformation de Park, ainsi qu'avec les notions fondamentales de la théorie des systèmes asservis et l'utilisation de la transformation de Laplace. À noter que les aspects technologiques des matériels sont supposés connus par ailleurs ; ils ne seront donc pas abordés dans le présent ouvrage, qui se concentre sur les problèmes de dimensionnement électrique d'ensemble.

Par ailleurs, il s'est avéré nécessaire de limiter l'ampleur de l'exposé en ce qui concerne les problèmes liés aux postes à haute tension et aux réseaux externes aux centrales. Après une brève description générale du rôle et de la structure de ces réseaux, l'exposé se concentre sur les questions directement en rapport avec les centrales, à savoir l'interaction entre les groupes de production et le réseau interconnecté ; à ce titre, seront abordés le réglage de la fréquence et le réglage de la tension, la stabilité statique et la stabilité transitoire. En revanche, le dimensionnement des ouvrages à haute tension (postes, lignes aériennes et liaisons souterraines) apparaît comme un sujet spécifique dont le développement n'a pas été jugé indispensable dans un ouvrage consacré aux centrales de production. Dans le même esprit, le chapitre consacré aux protections électriques a été limité aux protections intéressant les groupes de production et le système de distribution électrique interne aux centrales.

En outre, au niveau de l'Union Européenne, le contexte réglementaire est marqué depuis plusieurs années par de fortes évolutions portant sur les conditions d'accès aux réseaux, ainsi que sur l'intégration du marché européen de l'électricité. Ces conditions sont formalisées dans des « Codes de Réseau », textes qui édictent des règles et obligations d'ordre technique et commercial, communes aux pays membres. L'évolution la plus emblématique a certainement été

la promulgation, en 2016, d'un code applicable aux groupes de production et à leurs conditions de raccordement au réseau interconnecté. De plus, les obligations réciproques entre un exploitant de groupes de production électrique et le gestionnaire de réseau de son pays d'appartenance, sont régies par des conditions contractuelles. Certains des problèmes qui se posent au concepteur d'une centrale de production électrique doivent directement s'inscrire dans ce contexte relativement nouveau : vis-à-vis d'un certain nombre des questions traitées dans cet ouvrage, il s'est donc avéré indispensable de montrer comment les exigences découlant des « Codes de Réseau » peuvent être prises en compte comme autant de données d'entrée et de contraintes de conception. C'est le cas en particulier pour ce qui concerne les domaines de variation de la tension et de la fréquence au point de raccordement d'un groupe de production au réseau, les réponses en puissance attendues de la part des groupes en réponse à des variations de fréquence du réseau, ainsi que les possibilités d'échanges de puissance réactive avec le réseau. Au-delà de cet aspect, ces notions pourront également être appliquées à la prise en compte, lors de la conception, et à la valorisation, lors de la phase d'exploitation de la centrale, de « services au système », par exemple la production ou l'absorption de puissance réactive par un groupe, ou encore la participation d'un groupe au réglage secondaire fréquence-puissance.

Enfin, s'est posée la question de la référence à des normes et standards internationaux. La difficulté liée à de telles références est le caractère évolutif des éditions successives des normes. C'est pourquoi l'ouvrage s'appuie sur des normes uniquement lorsque celles-ci contiennent des données d'entrée standardisées indispensables à l'exposé. C'est le cas par exemple pour des séries normalisées de tensions ou des valeurs normalisées de tensions de tenue à la fréquence industrielle et aux chocs. Les normes citées sont en très grande majorité celles de la Commission électrotechnique internationale et reflètent l'état de l'art communément admis au niveau international. On trouvera à la fin de cet ouvrage la liste des normes citées.

Puissent les utilisateurs de cet ouvrage y trouver des méthodes qui les guideront dans leurs choix de conception et dans le dimensionnement électrique des centrales.

Christophe SCHROEDER

Remerciements

Je remercie M. Philippe SASSEIGNE, directeur de la Division Production Nucléaire d'Electricité de France (EDF), de m'avoir fait l'honneur de préfacer ce livre et d'avoir rappelé l'importance des systèmes électriques à la fois comme finalité et comme composante des centrales de production électrique.

Je remercie également M. Philippe EGROT, ingénieur senior à EDF – Recherche et Développement, pour son travail de relecture du manuscrit de cet ouvrage, ainsi que pour ses encouragements. Ses suggestions et ses commentaires ont permis d'enrichir différents points de l'exposé, tout particulièrement ceux qui concernent les réseaux de transport d'électricité et les liaisons électriques associées. Qu'il trouve donc ici l'expression de ma reconnaissance.

Mes remerciements vont aussi à tous ceux qui m'ont apporté leur soutien et m'ont aidé à publier cet ouvrage :

M. Jean-Paul CHABARD, directeur scientifique d'EDF – Recherche et Développement,

Mme Sandrine DYEUVRE, chargée de communication à EDF – Recherche et Développement,

M. Stéphane DUPRE LA TOUR, délégué normalisation du groupe EDF,

M. François MOLHO, directeur de la communication à EDF – Recherche et Développement,

M. François WAECKEL, directeur délégué Pilotage Technique Transverse à la Division Production Nucléaire d'EDF.

J'adresse tout spécialement mes remerciements aux Éditions LAVOISIER pour le professionnalisme apporté au travail de composition et d'édition de cet ouvrage.

Je remercie enfin l'Agence française de normalisation (AFNOR) et Mme Isabelle SITBON, directrice des éditions AFNOR, de m'avoir autorisé à citer et à reproduire des extraits de normes françaises et de la Commission électrotechnique internationale.

Christophe SCHROEDER

Table des matières

Préface	V
Avant-propos	VII
Remerciements	XI

Chapitre 1

Généralités sur les centrales et leur conception électrique – Définitions – notations adoptées	1
1. Classification et principes de fonctionnement des différents types de centrales.	1
1.1. Classification des centrales	1
1.2. Centrales thermiques	2
1.3. Centrales nucléaires	8
1.4. Centrales hydroélectriques	12
1.5. Centrales éoliennes	15
1.6. Centrales géothermiques	16
1.7. Centrales photovoltaïques	17
1.8. Centrales de base, de semi-base et de pointe	18
1.9. Notion de tranche de puissance	19
2. Alimentation électrique d'une centrale	20
2.1. Nécessité d'une alimentation électrique – Auxiliaires	20
2.2. Exemple : auxiliaires d'une centrale thermique au charbon	21
2.3. Classification des auxiliaires	25
3. Notion de « réseau »	26
3.1. Définition – Classification des différents types de réseaux	26
3.2. Différents aspects du fonctionnement du système production- réseau-utilisateurs	29

4.	Notations adoptées et conventions d'écriture	30
4.1.	Abréviations et symboles utilisés – Écriture des nombres complexes	30
4.2.	Représentation des systèmes triphasés	32
4.3.	Rappels sur les transformations	33
4.4.	Utilisation des valeurs réduites	34
4.5.	Conventions de représentation des générateurs et des moteurs	35
5.	Rappels sur les puissances en régime alternatif sinusoïdal	36
5.1.	Expression de la puissance instantanée	36
5.2.	Natures des puissances active et réactive	37
5.3.	Puissance apparente – Puissance complexe	38
5.4.	Cas des systèmes polyphasés	38
5.5.	Impédance équivalente à un récepteur absorbant une puissance active et une puissance réactive données	39

Chapitre 2

Organisation générale du système de distribution électrique d'une centrale	41	
1.	Définition des différentes sources d'alimentation électrique de puissance	41
1.1.	Liaison d'évacuation d'énergie	41
1.2.	Définition des différents modes de soutirage	42
1.3.	Source externe principale – Ilotage	43
1.4.	Source externe auxiliaire	44
1.5.	Source interne de secours	45
1.6.	Conditions de dimensionnement	45
2.	Architecture du système de distribution électrique	46
2.1.	Désignation des niveaux de tension	46
2.2.	Répartition des tableaux électriques selon les domaines de tension	48
2.3.	Répartition des tableaux électriques selon leur fonction	49
3.	Basculements entre sources externes	52
3.1.	Nécessité de changements de sources – Types de basculement envisageables	52
3.2.	Basculement provoqué par un ordre de l'opérateur, sans mise en parallèle des sources	54
3.3.	Basculement provoqué par un ordre de l'opérateur, avec mise en parallèle des sources	55
3.4.	Basculement provoqué par un ordre automatique avec « temps mort » imposé	56
3.5.	Basculement provoqué par un ordre automatique avec contrôle angulaire	56
4.	Sources de contrôle-commande	58
4.1.	Notion de système de contrôle-commande	58
4.2.	Alimentation électrique du système de contrôle-commande	59
4.3.	Sources de contrôle-commande à courant continu	60
4.4.	Sources de contrôle-commande à courant alternatif	61

Chapitre 3

Données et choix fondamentaux pour le dimensionnement	65
1. Choix des niveaux de tension	65
1.1. Valeurs de tension normalisées	65
1.2. Données extérieures imposées.	68
1.3. Choix des niveaux de tension internes à la centrale.	71
2. Bilan de puissance des auxiliaires	73
2.1. Généralités – Principe	73
2.2. Bilan de puissance d'un tableau.	73
2.3. Bilan de puissance des auxiliaires.	75
2.4. Expression des puissances pour les types usuels d'auxiliaires	75
2.5. Exemples d'application	78
3. Choix des symboles de couplage des transformateurs	80
3.1. Modes de couplage des enroulements et indices horaires	80
3.2. Exemples d'applications	82
3.3. Choix des symboles de couplage et des indices horaires	85
3.4. Vérification en courant continu de l'indice horaire d'un transformateur	86
3.5. Conséquences : ordre de succession des phases en tout point de l'installation	87
4. Choix des schémas de liaison à la terre.	90
4.1. Définition et symboles utilisés	90
4.2. Schéma IT.	91
4.3. Schéma TN	95
4.4. Schéma TT	97
4.5. Choix des schémas de liaison à la terre	97
5. Cas particulier des réseaux à neutre isolé – Risques de ferro-résonance	99
5.1. Introduction sur le phénomène de ferro-résonance	99
5.2. Indications théoriques	100
5.3. Exemple d'application : réseau HTA en sortie d'alternateur – Lien avec le schéma de liaison à la terre	103

Chapitre 4

Échanges de puissance entre la centrale et le réseau – Diagrammes U/Q	105
1. Définition et finalités d'une étude des domaines de fonctionnement U/Q en régime permanent	105
1.1. Définition.	105
1.2. Finalités de l'étude	106
2. Limitations imposées par l'alternateur.	107
2.1. Fonctionnement d'un alternateur en régime permanent synchrone – Diagramme de Blondel	107
2.2. Diagramme de marche d'un alternateur à entrefer constant	109
2.3. Diagramme de marche d'un alternateur à entrefer variable.	112
2.4. Vue d'ensemble sur les caractéristiques de l'alternateur.	113

3.	Méthode d'étude des domaines de fonctionnement U/Q d'un groupe couplé au réseau	115
3.1.	Principe de calcul	115
3.2.	Notations	116
3.3.	Relation entre la tension du réseau et la tension de l'alternateur	117
3.4.	Équations de conservation des puissances	120
3.5.	Élaboration et tracé des diagrammes U/Q	122
3.6.	Conséquences dans le cas d'un transformateur principal muni d'un changeur de prises en charge	123
4.	Exemple d'application numérique et de tracé de diagramme U/Q	123
4.1.	Données numériques	123
4.2.	Calcul d'un point de fonctionnement	124
4.3.	Tracé de la totalité du diagramme pour la prise $k = +2$	126
4.4.	Choix optimal de la prise de réglage sur le transformateur principal	127
5.	Interprétation des diagrammes U/Q	129
5.1.	Équipotentiels	129
5.2.	Courbes d'équipuissance réactive	130
5.3.	Autres constats remarquables	132

Chapitre 5

Calcul des courants de court-circuit	135
1. Objet, définitions et méthode	135
1.1. Objet	135
1.2. Définitions	135
1.3. Méthode	136
2. Représentation des éléments par leurs impédances équivalentes	139
2.1. Généralités et définitions	139
2.2. Réseau d'alimentation externe	140
2.3. Transformateurs	140
2.4. Lignes aériennes	147
2.5. Câbles	149
2.6. Moteurs asynchrones	151
2.7. Notion de court-circuit proche ou éloigné d'un alternateur	153
3. Expressions utilisées pour le calcul des courants de court-circuit	153
3.1. Expression du courant de court-circuit symétrique initial	153
3.2. Valeur de crête du courant de court-circuit	158
3.3. Composante continue des courants de court-circuit	161
3.4. Courant de court-circuit coupé	162
3.5. Courant de court-circuit permanent	163
3.6. Cas d'un court-circuit alimenté par plusieurs sources indépendantes	163
4. Cas élémentaire d'un court-circuit au niveau d'un tableau de distribution ou aux bornes d'un auxiliaire	164
4.1. Énoncé du problème	164

4.2.	Détermination des courants de court-circuit au niveau du jeu de barres BT	165
4.3.	Contribution des moteurs asynchrones.	171
4.4.	Détermination du courant de court-circuit aux bornes d'un auxiliaire	174
5.	Courts-circuits alimentés par un alternateur	179
5.1.	Rappels sur l'expression du courant de court-circuit triphasé aux bornes d'un alternateur à vide	179
5.2.	Cas d'un alternateur fonctionnant en charge.	182
5.3.	Représentation d'un alternateur par une impédance équivalente.	184
5.4.	Valeur de crête du courant de court-circuit	186
5.5.	Composante continue du courant de court-circuit.	188
5.6.	Courant de court-circuit coupé	189
5.7.	Exemple d'application numérique.	189
5.8.	Courant de court-circuit permanent	190
5.9.	Application : dimensionnement de l'impédance de limitation placée dans la connexion de neutre de l'alternateur.	191
6.	Courts-circuits sur la liaison d'évacuation d'énergie	197
6.1.	Courts-circuits alimentés par l'alternateur seul	197
6.2.	Courts-circuits alimentés par le réseau seul	200
6.3.	Courts-circuits alimentés par l'alternateur et par le réseau.	201
6.4.	Exemple d'application numérique.	205
7.	Calcul des courants de court-circuit dans un réseau en charge	215
7.1.	Principe de calcul.	215
7.2.	Premier exemple d'application : calcul des courants de court-circuit aux bornes d'un auxiliaire fonctionnant en charge	219
7.3.	Second exemple d'application : calcul du courant de court-circuit aux bornes d'un alternateur représenté par son impédance équivalente avec prise en compte de la charge initiale	223
8.	Lien entre les valeurs des courants de court-circuit et les caractéristiques de l'appareillage	225
8.1.	Caractéristiques de l'appareillage	225
8.2.	Valeurs d'intensités normalisées	227
8.3.	Le cas particulier des disjoncteurs d'alternateur	228
9.	Vue critique sur la détermination des courants de court-circuit	229
9.1.	Considérations générales	229
9.2.	Modélisation de la décroissance de la composante périodique	230
9.3.	Modélisation de la décroissance de la composante continue	231
9.4.	Modélisation des impédances équivalentes	232
10.	Complément : modalités de l'essai en court-circuit permanent de l'alternateur	233
10.1.	Objectifs et intérêt de l'essai en court-circuit permanent.	233
10.2.	Première méthode : court-circuit réalisé aux bornes de l'alternateur	235
10.3.	Seconde méthode : court-circuit réalisé sur les conducteurs de liaison entre l'alternateur et le transformateur principal.	236
10.4.	Troisième méthode : court-circuit réalisé en aval du transformateur principal.	237

Chapitre 6

Coordination des tensions	241
1. Formulation générale du problème	241
1.1. Introduction	241
1.2. Expression de la chute de tension	243
1.3. Coordination des tensions	244
1.4. Application de la coordination des tensions	245
2. Alimentation des auxiliaires HTA en régime établi	246
2.1. Coordination des tensions	246
2.2. Exemple d'application numérique	247
3. Détermination d'un changeur de prises en charge sur le transformateur de soutirage	250
3.1. Définitions	250
3.2. Détermination d'un changeur de prises en charge sur un transformateur de soutirage à un seul secondaire	252
3.3. Détermination d'un changeur de prises en charge sur un transformateur de soutirage à deux secondaires	253
4. Alimentation des auxiliaires BT en régime établi	257
5. Démarrage de l'auxiliaire le plus puissant	258
5.1. Exposé du problème	258
5.2. Représentation des différents éléments	259
5.3. Cas d'un transformateur d'alimentation à deux enroulements secondaires	262
5.4. Interprétation des résultats obtenus	263
5.5. Exemple d'application numérique	265
5.6. Procédés permettant de réduire la chute de tension au démarrage	266
6. Reprise en bloc des auxiliaires	269
6.1. Description du régime transitoire considéré – Critères fonctionnels associés	269
6.2. Indications sur la mise en équation	269
6.3. Indications sur l'interprétation des résultats obtenus	271
7. Application : prise en compte de la coordination des tensions dans le dimensionnement des liaisons électriques	273
7.1. Généralités : principes de dimensionnement des liaisons électriques	273
7.2. Dimensionnement vis-à-vis de l'échauffement admissible en régime permanent	274
7.3. Dimensionnement vis-à-vis de l'échauffement admissible en cas de court-circuit	277
7.4. Dimensionnement vis-à-vis de la chute de tension admissible	279
7.5. Exemple d'application numérique	280
8. Coordination de l'isolement	283
8.1. Définition	283
8.2. Valeurs normalisées	284
8.3. Surtensions représentatives	288

8.4.	Dispositifs de protection contre les surtensions	290
8.5.	Notion connexe : niveaux de pollution des isolateurs	292
9.	Vue critique sur la coordination des tensions	294
9.1.	Critique des méthodes applicables aux régimes permanents	294
9.2.	Critique des méthodes applicables aux régimes transitoires	295

Chapitre 7

Protections électriques	297
1. Principes généraux	297
1.1. Rôle et constitution d'un système de protections électriques	297
1.2. Modes de détection des défauts	299
1.3. Effets produits par les protections électriques	300
1.4. Spécification des transformateurs de courant	301
1.5. Spécification des transformateurs de potentiel	304
1.6. Principe des protections différentielles	307
2. Protection des alternateurs	311
2.1. Protection contre les défauts à la masse	311
2.2. Protection contre les défauts entre phases et entre conducteurs d'une même phase	313
2.3. Protection de surintensité du stator	314
2.4. Protections à maximum et à minimum de tension	315
2.5. Protections à minimum et à maximum de fréquence	316
2.6. Protection de déséquilibre	317
2.7. Protection contre les ruptures de synchronisme	319
2.8. Protection contre les pertes d'excitation	325
2.9. Protection à retour de puissance active	327
3. Protection des transformateurs	327
3.1. Protection contre les défauts entre phases	327
3.2. Protection contre les défauts à la masse	330
3.3. Protection à maximum de courant homopolaire dans le neutre	330
3.4. Problème du courant d'enclenchement	331
4. Protection des moteurs électriques	337
4.1. Protection contre les défauts monophasés à la terre	337
4.2. Protection contre les défauts entre phases	337
4.3. Protection contre les défauts du rotor	338
4.4. Protection contre les surcharges	338
4.5. Protection contre les démarrages trop longs et le blocage du rotor	339
4.6. Protections spécifiques aux moteurs synchrones	340
4.7. Autres protections	341
5. Désignation normalisée des fonctions de protection	341
6. Sélectivité des protections	343
6.1. Définition	343
6.2. Sélectivité ampèremétrique	343
6.3. Sélectivité chronométrique	344
6.4. Sélectivité logique	345

7.	Réglage et coordination des protections associées au système de distribution électrique – 1 ^{re} partie : protections de phases	346
7.1.	Nature des défauts envisageables	346
7.2.	Départs de type « disjoncteurs » alimentant des moteurs	347
7.3.	Départs de type « contacteur-fusibles » alimentant des moteurs. . .	348
7.4.	Départs de type « contacteur-fusibles » alimentant des transformateurs.	350
7.5.	Départs de type « disjoncteurs » alimentant des transformateurs. .	353
7.6.	Réglage des protections équipant les arrivées des tableaux.	354
7.7.	Protections liées à la tension	356
7.8.	Protections contre les phénomènes de perte de phase.	357
8.	Réglage et coordination des protections associées au système de distribution électrique – 2 ^e partie : protections homopolaires.	359
8.1.	Généralités.	359
8.2.	Cas d'un réseau dont le point neutre est raccordé à la terre à travers une résistance de limitation	360
8.3.	Calcul des courants capacitifs.	364
8.4.	Exemples de réglages	365
8.5.	Protection homopolaire dans le neutre du transformateur de soutirage.	367
8.6.	Conséquences sur le dimensionnement de la résistance de mise à la terre.	368

Chapitre 8

Phénomènes déterminant le fonctionnement des groupes de production couplés à un réseau	371
1. Propriétés des liaisons entre deux points à potentiel tenu.	371
1.1. Définitions	371
1.2. Chute de tension	371
1.3. Expressions des puissances actives et réactives.	372
1.4. Interprétation des résultats obtenus.	373
2. Stabilité statique	374
2.1. Fonctionnement d'un groupe à excitation constante raccordé à un réseau infini – Définition de la stabilité statique.	374
2.2. Fonctionnement d'un groupe à tension constante raccordé à un réseau infini.	378
2.3. Fonctionnement d'un groupe raccordé à un réseau infini à travers une liaison d'évacuation d'énergie.	380
2.4. Exemple d'application numérique.	385
2.5. Cas d'un alternateur à entrefer variable	386
2.6. Cas d'un réseau multi-machines.	393
3. Réglage de la tension.	393
3.1. Définitions	393
3.2. Régulateur élémentaire de tension.	393
3.3. Dispositifs stabilisateurs	394
3.4. Dispositifs de limitation d'angle interne	396
3.5. Réglages secondaire et tertiaire de tension	396

4.	Réglage de la fréquence	398
4.1.	De la nécessité de régler la fréquence.	398
4.2.	Autoréglage du réseau	399
4.3.	Réglage primaire de vitesse	400
4.4.	Cas d'un réseau multi-machines.	404
4.5.	Réglage secondaire fréquence – puissance – Principes	405
4.6.	Mise en œuvre du réglage secondaire fréquence-puissance.	408
4.7.	Résumé des paramètres et des lois de réglage de la fréquence	412
5.	Stabilité transitoire.	413
5.1.	Définition – Introduction au problème posé	413
5.2.	Équation générale du mouvement du rotor – Problèmes associés	413
5.3.	Indications sur les approches analytiques	417
5.4.	Formulation de la condition de stabilité transitoire.	418
5.5.	Première application : augmentation brusque de l'impédance de liaison d'un groupe de production au réseau	425
5.6.	Seconde application : court-circuit proche d'un groupe de production	427
5.7.	Extension au cas d'un réseau multi-groupes.	430
5.8.	Remarques sur les facteurs favorisant la stabilité transitoire	430
6.	Indications sur le rôle des groupes de production dans la reconstitution d'un réseau en cas d'incident de grande ampleur.	431
7.	Démarrage autonome d'une tranche (<i>black-start</i>)	433
8.	Complément : démarrage des turbines à combustion	433
8.1.	Introduction au problème posé – Solutions envisageables	433
8.2.	Principe du démarrage par convertisseur statique de fréquence	434
8.3.	Conséquences sur le schéma HTA en sortie d'alternateur	438

Chapitre 9

Dimensionnement des circuits à courant continu	439
1. Introduction	439
2. Paramètres de dimensionnement	439
2.1. Choix des niveaux de tension et définition des domaines de variation de la tension.	439
2.2. Bilan de puissance des auxiliaires alimentés par un tableau à courant continu	440
3. Choix des schémas de liaison à la terre.	441
3.1. Généralités.	441
3.2. Schéma IT.	441
3.3. Schéma TN	442
3.4. Schéma TT	444
4. Principes de fonctionnement des sources à courant continu	444
5. Coordination des tensions.	446
5.1. Coordination des tensions aux bornes des utilisateurs, de la batterie d'accumulateurs et des redresseurs-chargeurs	446
5.2. Dimensionnement des liaisons à courant continu	448
5.3. Coordination de l'isolement.	449

6. Paramètres de dimensionnement des batteries d'accumulateurs	450
7. Paramètres de dimensionnement des redresseurs-chargeurs	452
8. Calcul des courants de court-circuit	453
8.1. Principes	453
8.2. Contribution de la batterie d'accumulateurs au court-circuit	453
8.3. Contribution du redresseur-chargeur	454
8.4. Courant de court-circuit résultant en un point quelconque du réseau	455
9. Caractéristiques de l'appareillage de coupure	456
10. Protections électriques	457
10.1. Nature des défauts envisageables	457
10.2. Protections ampèremétriques	457
10.3. Protections relatives à la tension	459
10.4. Appareillage de contrôle de l'isolement des réseaux isolés de la terre	460

Chapitre 10

Synthèse – Comment concevoir une centrale de production électrique, la raccorder au réseau et l'exploiter : les grandes étapes resumées	461
--	------------

Index des symboles et abréviations	467
---	------------

Liste des normes citées	469
--	------------

Bibliographie	471
--------------------------------	------------

Christophe Schroeder est ingénieur de l'École Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg et diplômé de l'École Supérieure d'Électricité. Entré à Électricité de France en 1993, il a occupé différentes fonctions techniques dans l'ingénierie, tant de conception que d'exploitation des centrales nucléaires et thermiques classiques, avec une constante forte : les systèmes électriques. Il coordonne actuellement le domaine des sources électriques de secours du parc nucléaire d'EDF.

Électrotechnique des centrales électriques expose les principes de conception des systèmes électriques de puissance qui composent les centrales de production d'électricité. Ces systèmes sont, d'une part ceux qui permettent la production et l'évacuation de l'énergie électrique vers le réseau externe, et d'autre part ceux qui assurent la distribution d'énergie électrique au sein des centrales; ils sont traditionnellement représentés par le schéma électrique général de la centrale. Leur fonctionnement peut être caractérisé par un ensemble de paramètres – tensions, courants, impédances, puissances – qui doivent être coordonnés de manière à former un tout cohérent. Cette notion de coordination est fondamentale et ses différents aspects sont abordés avec clarté et rigueur comme autant d'étapes du dimensionnement électrique d'une centrale : choix des niveaux de tension, calcul des courants de court-circuit, calcul des échanges de puissance entre la centrale et le réseau, coordination des tensions, fonctionnement statique et dynamique de l'interface entre la centrale et le réseau. D'autres aspects de la conception sont également abordés, comme le choix des protections électriques et la détermination de leurs valeurs de réglage.

C'est tout l'intérêt et l'originalité de l'ouvrage de Christophe Schroeder que d'exposer une vue d'ensemble de la conception électrique des centrales. Il trouve également une résonance particulière dans le contexte relativement nouveau des réglementations européennes en matière de conditions d'accès aux réseaux électriques. Un autre mérite de ce livre réside dans l'illustration des procédés de calcul par de nombreux exemples d'application numérique.

Les principes exposés s'appliquent essentiellement aux centrales de grande puissance mettant en œuvre une transformation électromécanique de l'énergie avec groupe tournant.

Cet ouvrage est destiné avant tout aux ingénieurs de bureaux d'ingénierie appelés à concevoir des projets de nouvelles centrales ou de rénovation des installations électriques de centrales existantes. Les élèves ingénieurs des filières spécialisées en électrotechnique pourront également y trouver un complément à l'enseignement reçu.

