

 **edf** COLLECTION EDF R&D

# Électrotechnique des centrales électriques

Christophe Schroeder



*Lavoisier*  
TEC & DOC

# Table des matières

Préface .....	V
Avant-propos .....	VII
Remerciements .....	XI
<i>Chapitre 1</i>	
<b>Généralités sur les centrales et leur conception électrique – Définitions – notations adoptées .....</b>	<b>1</b>
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*

<b>Organisation générale du système de distribution électrique d'une centrale . . . . .</b>	<b>41</b>	
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

<b>Données et choix fondamentaux pour le dimensionnement</b> . . . . .	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

<b>Échanges de puissance entre la centrale et le réseau – Diagrammes U/Q</b> . . . . .	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.	Équipotentiellles. . . . .	129
5.2.	Courbes d'équipuissance réactive . . . . .	130
5.3.	Autres constats remarquables . . . . .	132

### *Chapitre 5*

<b>Calcul des courants de court-circuit</b> . . . . .	<b>135</b>
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

<b>Coordination des tensions</b> .....	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

<b>Protections électriques</b> . . . . .	<b>297</b>
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 <sup>re</sup> 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 <sup>e</sup> 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 du neutre. . . . .	368

### *Chapitre 8*

<b>Phénomènes déterminant le fonctionnement des groupes de production couplés à un réseau . . . . .</b>		<b>371</b>
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

<b>Dimensionnement des circuits à courant continu . . . . .</b>	<b>439</b>	
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*

<b>Synthèse – Comment concevoir une centrale de production électrique, la raccorder au réseau et l'exploiter : les grandes étapes resumées . . . . .</b>	<b>461</b>
<b>Index des symboles et abréviations . . . . .</b>	<b>467</b>
<b>Liste des normes citées . . . . .</b>	<b>469</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>471</b>