



EGEM

électronique – génie électrique – microsystemes

Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques

*sous la direction de
Michel Crappe*

hermes

Lavoisier

Table des matières

Avant-propos	15
Michel CRAPPE	
Chapitre 1. L'instabilité de tension	17
Thierry VAN CUTSEM	
1.1. Introduction	17
1.2. Phénomènes d'instabilité de tension	19
1.2.1. Puissance maximale délivrable à une charge	19
1.2.2. Courbes PV et QV	20
1.2.3. Instabilité de tension à long terme illustrée par un exemple simple	21
1.2.3.1. Premier scénario	22
1.2.3.2. Second scénario	25
1.2.4. Restauration de la charge	26
1.2.4.1. Moteurs asynchrones	26
1.2.4.2. Thermostats	27
1.2.4.3. Modèles génériques de charge restaurative	27
1.2.5. Classification des instabilités	28
1.3. Parades contre l'instabilité de tension	31
1.3.1. Compensation	31
1.3.2. Automates et régulateurs	31
1.3.3. Gestion prévisionnelle	33
1.3.4. Temps réel	33
1.3.5. Protections système	34
1.3.5.1. Actions sur les régleurs en charge	34
1.3.5.2. Délestage de charge	35
1.4. Méthodes d'analyse de la stabilité et de la sécurité de tension	36
1.4.1. Analyse d'incidents	36
1.4.1.1. <i>Load flow</i> postincident	37

- 1.4.1.2. Simulation temporelle complète 38
- 1.4.1.3. Simulation quasi-statique à long terme 39
- 1.4.2. Détermination de limites de mise en charge 40
 - 1.4.2.1. Méthodes par continuation 41
 - 1.4.2.2. Optimisation 41
 - 1.4.2.3. Simulation temporelle et analyse de sensibilité 42
 - 1.4.2.4. Courbes QV 42
- 1.4.3. Détermination de limites de sécurité préincident 42
- 1.4.4. Commande préventive 46
- 1.5. Conclusion 46
- 1.6. Bibliographie 47

Chapitre 2. Stabilité transitoire : évaluation et commande 51

Daniel RUIZ VEGA et Mania PAVELLA

- 2.1. Introduction 51
- 2.2. Stabilité transitoire 52
 - 2.2.1. Position du problème 52
 - 2.2.2. Modes opératoires 53
 - 2.2.2.1. Mode préventif : contextes d'utilisation 53
 - 2.2.2.2. Mode curatif 54
 - 2.2.3. Libéralisation du secteur électrique 55
 - 2.2.3.1. Nouvelles données 55
 - 2.2.3.2. Nouveaux défis 55
- 2.3. Méthodes d'évaluation de la stabilité transitoire : bref historique 56
 - 2.3.1. L'approche conventionnelle temporelle : forces et faiblesses 56
 - 2.3.2. Les approches directes : bref historique 58
 - 2.3.3. Note sur les approches de l'apprentissage automatique 60
- 2.4. La méthode SIME 61
 - 2.4.1. Fondements 61
 - 2.4.2. Formulation 62
 - 2.4.2.1. Principe de base 62
 - 2.4.2.2. Paramètres et équation dynamique de l'OMIB 63
 - 2.4.2.3. Critères d'égalité des aires 64
 - 2.4.2.4. Identification de l'OMIB 66
 - 2.4.2.5. Notations 67
 - 2.4.3. SIME préventive *versus* SIME curative 68
- 2.5. Descriptions diverses des phénomènes transitoires 69
- 2.6. La méthode SIME préventive 73
 - 2.6.1. Limites de stabilité 74
 - 2.6.2. FILTRA : un logiciel générique de filtrage de contingences 76
 - 2.6.3. Stabilisation de contingences (commande) 78
 - 2.6.4. Evaluation et commande de la stabilité transitoire : logiciel intégré et exemple d'application 80
 - 2.6.5. Statut actuel de la SIME préventive 85
- 2.7. La méthode SIME curative 85

- 2.7.1. Objectifs
- 2.7.2. Fondements
- 2.7.3. Estimation
- 2.7.4. Illustration
- 2.7.5. Note sur les
- 2.7.6. Conclusion
- 2.8. Bibliographie

Chapitre 3. Sécurité
MARC STUBBE et Jacques

- 3.1. Introduction
- 3.2. Les mécanismes
 - 3.2.1. Le système
 - 3.2.2. Continuité
 - 3.2.3. Les mécanismes
 - 3.2.3.1. Le
 - 3.2.3.2. Développement
 - 3.2.3.3. La perm
 - 3.2.3.4. La perm
 - 3.2.3.5. La perm
 - 3.2.4. Facteurs de
 - 3.2.4.1. Etat de
 - 3.2.4.2. Evénem
 - 3.2.4.3. Facteur
- 3.3. Les actions de
 - 3.3.1. Instabilité
 - 3.3.1.1. Hausses
 - 3.3.1.2. Baisse
 - 3.3.1.3. Reman
 - 3.3.2. Instabilité
 - 3.3.2.1. Hausses
 - 3.3.2.2. Baisse
 - 3.3.3. Perte de
 - 3.3.4. Déclenche
 - 3.3.5. Notion de
- 3.4. Le modèle élec
 - 3.4.1. Définition
 - 3.4.2. Simulation
 - 3.4.3. Propriétés
 - 3.4.4. Algorithm
 - 3.4.4.1. Le syst
 - 3.4.4.2. L'algori
 - 3.4.4.3. La méth
 - 3.4.4.4. Traiteme

2.7.1. Objectifs	85
2.7.2. Fondements.	86
2.7.3. Estimation des durées impliquées par les différentes tâches	88
2.7.4. Illustration	89
2.7.5. Note sur la commande curative en boucle ouverte.	91
2.7.6. Conclusion	92
2.8. Bibliographie	92
Chapitre 3. Sécurité, sauvegarde et simulation numérique	97
MARC STUBBE et Jacques DEUSE	
3.1. Introduction	97
3.2. Les mécanismes de dégradation du fonctionnement des réseaux	98
3.2.1. Le système	98
3.2.2. Continuité de service	101
3.2.3. Les mécanismes de dégradation	104
3.2.3.1. Le déclenchement en cascade.	104
3.2.3.2. Développement d'oscillations non amorties	104
3.2.3.3. La perte de stabilité angulaire.	105
3.2.3.4. La perte de stabilité de fréquence	106
3.2.3.5. La perte de stabilité de tension	107
3.2.4. Facteurs défavorables provoquant l'extension de l'incident	109
3.2.4.1. Etat du système avant l'incident	109
3.2.4.2. Evénements déclenchant l'incident	110
3.2.4.3. Facteurs particuliers	111
3.3. Les actions de défense et la notion de plan de sauvegarde	111
3.3.1. Instabilité de fréquence.	112
3.3.1.1. Hausses de fréquence	112
3.3.1.2. Baisse de fréquence	112
3.3.1.3. Remarque	114
3.3.2. Instabilité de tension	114
3.3.2.1. Hausses de tension	114
3.3.2.2. Baisse de tension.	115
3.3.3. Perte de synchronisme	115
3.3.4. Déclenchement en cascade	116
3.3.5. Notion de plan de sauvegarde	117
3.4. Le modèle électromécanique étendu	117
3.4.1. Définition, domaine de validité	117
3.4.2. Simulation numérique	119
3.4.3. Propriétés mathématiques	120
3.4.4. Algorithmique	120
3.4.4.1. Le système algébro-différentiel à résoudre	120
3.4.4.2. L'algorithme de Gear-Hindmarsch	121
3.4.4.3. La méthode mixte d'ADAMS-BDF	124
3.4.4.4. Traitement des discontinuités.	126

3.5. Exemples d'étude d'actions de défense 127

3.5.1. Considérations méthodologiques 127

3.5.2. Délestage de charge sur critère de tension 128

3.5.2.1. Contexte 128

3.5.2.2. Brève description de l'incident type dont on veut se prémunir 128

3.5.2.3. Analyse sommaire 129

3.5.2.4. Modélisation 131

3.5.2.5. Schéma de protection proposé 134

3.5.3. Plan d'ilotage en cas de perte de synchronisme 136

3.5.3.1. Contexte 136

3.5.3.2. Modélisation 136

3.5.3.3. Méthodologie 137

3.5.4. Réseaux industriels 138

3.5.4.1. Spécificité de la modélisation 139

3.5.4.2. Types d'investigation 140

3.6. Perspectives d'avenir 144

3.6.1. Evolution des moyens de simulation 144

3.6.2. Actions curatives en temps réel 145

3.6.3. Actions sur la charge 146

3.6.4. Production décentralisée 146

3.7. Bibliographie 147

Chapitre 4. Les systèmes flexibles de transport de l'énergie électrique 149

Michel CRAPPE et Stéphanie DUPUIS

4.1. Introduction : liaisons en courant continu et FACTS 149

4.2. Concepts généraux du réglage des transferts d'énergie 152

4.2.1. Introduction 152

4.2.2. Transmission de puissance au travers d'une réactance 152

4.2.3. Modification de la réactance de liaison X 155

4.2.4. Modification de la tension et méthode de sectionnalisation 157

4.2.5. Modification de l'angle de transmission 157

4.2.6. Comparaison des trois méthodes dans un cas simple 157

4.3. Contrôle des transits de puissance dans les réseaux 159

4.3.1. Circulation des puissances dans un réseau maillé.

Concept de boucle de puissance 159

4.3.1.1. Méthode simplifiée de calcul des transits.

Modèle courant continu 159

4.3.1.2. Méthode de calcul itératif des écoulements de charges (*load flow*) 160

4.3.1.3. Influence de la modification de l'impédance d'une des liaisons du réseau par compensation série 161

4.3.1.4. Influence d'une modification de l'angle de transport d'une des liaisons 161

4.3.2. Modification des transits sur lignes parallèles d'un corridor 162

4.4. Classification des

selon le mode de conne

4.4.1. Contrôleur de t

4.4.2. Contrôleur de t

4.4.3. Compensateurs

4.5. Amélioration de la

4.5.1. Introduction à la

4.5.2. Etude simplifiée

par le critère des aires

4.5.3. Etude d'un cas

4.5.4. Amélioration à

parallèle idéale

4.5.5. Compensateur

4.5.6. Compensation

(*Static Var Generators*)

4.5.7. Compensation

de liaison

4.5.8. Compensation

de transport

4.6. Amortissement des

4.7. Maintien du plan

4.8. Classification et in

4.8.1. Les systèmes c

4.8.1.1. Les systèm

4.8.1.2. Les systèm

4.8.1.3. Le compen

4.8.1.4. Le compen

4.8.2. Les systèmes à

4.8.2.1. Le compen

SVG ou STATCOM

4.8.2.2. Le contrôle

4.8.2.3. Le compen

4.8.3. Liste des acros

4.9. Commande et pou

4.10. Modélisation en

4.10.1. UPFC représ

4.10.2. UPFC représ

et une source de cou

4.10.3. UPFC représ

4.10.4. UPFC représ

4.10.5. Modèles inte

4.11. Perspectives d'a

4.12. Bibliographie

Index

127	4.4. Classification des systèmes de contrôle	
127	selon le mode de connexion au réseau	162
128	4.4.1. Contrôleur de type série	162
128	4.4.2. Contrôleur de type parallèle ou <i>shunt</i>	164
	4.4.3. Compensateurs de types série-série et série-parallèle	165
128	4.5. Amélioration de la stabilité transitoire des alternateurs	166
129	4.5.1. Introduction à la stabilité transitoire	166
131	4.5.2. Etude simplifiée de la stabilité transitoire	
134	par le critère des aires	167
136	4.5.3. Etude d'un cas d'application	170
136	4.5.4. Amélioration de la stabilité transitoire par compensation	
136	parallèle idéale.	172
137	4.5.5. Compensateur parallèle de type SVC	174
138	4.5.6. Compensation parallèle à convertisseur de type SVG	
139	(<i>Static Var Generator</i>)	176
140	4.5.7. Compensation de type série par modification de la réactance	
144	de liaison	177
144	4.5.8. Compensation de type série par modification de l'angle	
145	de transport.	178
146	4.6. Amortissement des oscillations	179
146	4.7. Maintien du plan de tension	179
147	4.8. Classification et inventaire des FACTS	180
	4.8.1. Les systèmes classiques à thyristors	180
149	4.8.1.1. Les systèmes hybrides	180
	4.8.1.2. Les systèmes à gradateurs	181
	4.8.1.3. Le compensateur statique de puissance réactive, SVC	182
149	4.8.1.4. Le compensateur série à circuit bouchon, TCSC ou ASC	184
152	4.8.2. Les systèmes à éléments entièrement commandables	186
152	4.8.2.1. Le compensateur statique avancé de puissance réactive,	
155	SVG ou STATCOM	187
157	4.8.2.2. Le contrôleur universel de puissance, UPFC	190
157	4.8.2.3. Le compensateur statique convertible, CSC	192
157	4.8.3. Liste des acronymes	194
157	4.9. Commande et protection des FACTS	194
159	4.10. Modélisation et simulation numérique	195
	4.10.1. UPFC représenté par deux sources de tension	197
159	4.10.2. UPFC représenté par une source de tension série	
	et une source de courant parallèle	197
159	4.10.3. UPFC représenté par deux sources de courant	199
160	4.10.4. UPFC représenté par deux injections de puissance	200
161	4.10.5. Modèles internes de l'UPFC	201
	4.11. Perspectives d'avenir	202
	4.12. Bibliographie	203
161	Index	207
162		

GÉNIE ÉLECTRIQUE

Le traité Electronique, Génie Electrique, Microsystèmes répond au besoin de disposer d'un ensemble de connaissances, méthodes et outils nécessaires à la maîtrise de la conception, de la fabrication et de l'utilisation des composants, circuits et systèmes utilisant l'électricité, l'optique et l'électronique comme support.

Conçu et organisé dans un souci de relier étroitement les fondements physiques et les méthodes théoriques au caractère industriel des disciplines traitées, ce traité constitue un état de l'art structuré autour des quatre grands domaines suivants :

- Electronique et micro-électronique
- Optoélectronique
- Génie électrique
- Microsystèmes

Chaque ouvrage développe aussi bien les aspects fondamentaux qu'expérimentaux du domaine qu'il étudie. Une classification des différents chapitres contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions ou pour ses choix.

Les savoirs, théories et méthodes rassemblés dans chaque ouvrage ont été choisis pour leur pertinence dans l'avancée des connaissances ou pour la qualité des résultats obtenus.

hermes
Science
— publications —

www.hermes-science.com

ISBN 2-7462-0607-2



9 782746 206076