

Collection de la Direction
des Études et Recherches
d'Électricité de France

96

Simulation des réseaux électriques

Jean-Paul Barret
Pierre Bornard
Bruno Meyer

Préface de
Paul Caseau


EYROLLES

TABLE DES MATIERES

Chapitre 1. Introduction.....	1
1.1. L'étude des systèmes d'énergie électrique	1
1.2. Outils de simulation.....	1
1.2.1. Les modèles réduits.....	2
1.2.2. Les modèles analogiques.....	3
1.2.3. La simulation numérique.....	3
1.2.4. Les modèles hybrides.....	4
1.2.5. Les modèles équivalents.....	4
Bibliographie.....	4
Chapitre 2. Modélisation.....	5
2.1. Rôle, importance et contrainte de la modélisation	5
2.2. Modèle de connaissance - Modèle de comportement.....	5
2.2.1. Modèles de connaissance.....	6
2.2.2. Les modèles de comportement.....	6
2.3. Données.....	7
Bibliographie.....	9
Chapitre 3. Régimes stationnaires.....	11
3.1. Introduction.....	11
3.2. Modélisation du réseau	12
3.2.1. Modélisation des lignes et des câbles.....	12
3.2.2. Modélisation des transformateurs	13
3.2.3. Modélisation des productions et des consommations.....	17
3.3. Equations du réseau.....	17
3.3.1. Equations matricielles.....	18

3.3.2.	Relations exprimant les puissances actives et réactives en fonction des modules et des phases des tensions.....	18
3.3.3.	Prise en compte des régleurs en charge.....	20
3.4.	Calculs de répartition.....	20
3.4.1.	Définition.....	20
3.4.2.	Propriétés du système non linéaire.....	22
3.4.3.	Résolution du système non linéaire.....	27
3.4.4.	Le découplage CRIC.....	30
3.5.	L'approximation du « courant continu »	33
3.6.	Du calcul de répartition à l'optimisation sous contraintes.....	35
3.6.1.	Méthodes de résolution.....	39
3.6.2.	Optimisation du plan de tension et détermination des moyens de compensation de la puissance réactive.....	41
3.6.3.	Optimisation du plan de tension et détermination des moyens de compensation de l'énergie réactive avec règles de sécurité.....	43
	Bibliographie.....	51
Annexe A.3.1.	Algorithmes de programmation quadratique successive.....	54
A.3.1.1.	Algorithme à convergence globale.....	54
A.3.1.2.	Algorithmes à convergence locale superlinéaire.....	57
	Bibliographie.....	62
Chapitre 4.	Courants de court-circuit.....	65
4.1.	Introduction.....	65
4.2.	Définition du courant de court-circuit.....	66
4.3.	Méthode de calcul des courants de court-circuit.....	67
4.3.1.	Méthode des composantes symétriques appliquées au calcul des courants de court-circuit.....	67
4.3.2.	Calcul des grandeurs électriques dans le cas général.....	71
4.3.3.	Techniques de résolution.....	72

18	4.4. Modélisation des éléments du réseau	74
20	pour les calculs de court-circuit.....	74
20	4.4.1. Lignes aériennes et câbles.....	74
20	4.4.2. Transformateurs.....	74
22	4.4.2.1. Transformateur étoile-triangle.....	75
27	4.4.2.2. Transformateur étoile-étoile.....	76
30	4.4.2.3. Réactances des transformateurs	82
33	à trois enroulements.....	83
35	4.4.3. Machines synchrones.....	85
39	4.4.4. Machines asynchrones.....	85
41	4.4.5. Charges.....	85
	Bibliographie.....	85
	Chapitre 5. Phénomènes dynamiques lents.....	87
	5.1. Introduction.....	87
	5.2. Modèle dynamique lent.....	88
	5.2.1. Principes généraux.....	88
	5.2.2. Méthode de calcul.....	91
	5.2.3. Modélisation des composants du système électrique.....	91
	5.2.3.1. Réseau.....	91
	5.2.3.2. Ensembles de production.....	92
	5.2.3.3. Modélisation des charges.....	92
	Bibliographie.....	96
	Annexe A.5.1. Représentation d'une tranche thermique	
	classique avec chaudière à ballon.....	97
	Annexe A.5.2. Représentation d'une tranche	
	nucléaire à eau pressurisée.....	101
	Annexe A.5.3. Modélisation d'un groupe hydraulique.....	104
	Chapitre 6. Stabilité et oscillations électromécaniques.....	107
	6.1. Introduction.....	107
	6.2. Stabilité transitoire.....	109
	6.2.1. Modélisation des composants du système électrique.....	109

6.2.1.1.	Représentation des groupes de production	109
6.2.1.2.	Modélisation des charges.....	123
6.2.1.3.	Modélisation des éléments de compensation.....	125
6.2.1.4.	Modélisation du réseau.....	129
6.2.2.	Méthode de résolution	129
6.3.	Stabilité en petits mouvements.....	130
6.3.1.	Utilisation du modèle de stabilité transitoire	130
6.3.2.	Méthode des transmittances.....	131
6.3.3.	La méthode des valeurs propres.....	136
Annexe A.6.1.	Représentation de la saturation.....	138
Annexe A.6.2.	Représentation des défauts	140
A.6.2.1.	Représentation du réseau soumis à des défauts symétriques	140
A.6.2.2.	Représentation du réseau soumis à des défauts dissymétriques.....	140
Annexe A.6.3.	Représentation des machines tournantes en tenant compte des amortisseurs.....	143
Bibliographie.....		148
Chapitre 7. Transitoires électromagnétiques.....		151
7.1.	Introduction.....	151
7.2.	Phénomènes physiques nécessitant une modélisation des transitoires électromagnétiques	152
7.3.	Les modélisations utilisées.....	154
7.3.1.	Modélisation des lignes aériennes.....	154
7.3.2.	Modélisation des transformateurs	173
7.3.3.	Représentation des machines synchrones.....	181
7.4.	Méthodes de résolution	191
Bibliographie.....		193

Chapitre 8. Harmoniques	195
8.1. Introduction	195
8.2. Modélisation des réseaux en régime harmonique.....	195
8.2.1. Détermination des impédances harmoniques	196
8.2.1.1. Mesure de l'impédance harmonique d'un réseau.....	196
8.2.1.2. Calcul de l'impédance harmonique des réseaux.....	199
8.2.2. Les sources d'harmoniques.....	201
8.2.2.1. Les harmoniques propres aux réseaux.....	201
8.2.2.2. Les charges du réseau.....	201
8.3. Méthode de calcul.....	206
8.4. Propagation des harmoniques sur les réseaux.....	206
8.4.1. Propagation des harmoniques sur les réseaux de distribution arborescents	208
8.4.1.1. Propagation des courants harmoniques de la BT vers la HT	210
8.4.1.2. Propagation des tensions harmoniques de la HT vers la BT	214
8.4.2. Propagation des harmoniques sur les réseaux de transport HT et THT	217
8.5. Conclusion.....	221
Bibliographie.....	222
Annexe A.8.1. Représentation des éléments du réseau	223
Annexe A.8.2. Caractéristiques du réseau de distribution étudié	226
Chapitre 9. Simulation temps réel numérique	229
9.1. Introduction.....	229
9.2. Simulation temps réel pour l'entraînement des dispatchers	230
9.2.1. La mesure du temps.....	230
9.2.1.1. Le temps réel étendu.....	231

9.2.1.2.	Le temps réel souple.....	230
9.2.1.3.	Le temps réel gelé	230
9.2.2.	La réalité simulée	230
9.2.2.1.	Limitation sur les phénomènes représentés.....	230
9.2.2.2.	Limitation sur la représentation des appareils.....	233
9.2.2.3.	Limitation en taille.....	233
9.2.3.	Réalisme de la simulation.....	233
9.2.3.1.	Domaine de validité	234
9.2.3.2.	Domaine de simulation.....	234
9.2.4.	Application	235
9.2.4.1.	Le simulateur d'entraînement d'Electricité de France.....	235
9.2.4.2.	Contraintes de simulation.....	235
9.2.4.3.	Solution retenue pour le simulateur d'EDF.....	237
9.2.4.4.	Utilisation type du simulateur.....	240
9.2.4.5.	Retour sur le temps.....	243
9.2.5.	Conclusion	243
9.3.	La simulation en temps réel pour tests d'équipements	244
9.3.1.	Pourquoi faut-il tester des équipements ?	244
9.3.2.	De l'analogique au numérique.....	244
9.3.3.	Les simulateurs numériques.....	245
9.3.3.1.	Les équations du système électrique.....	246
9.3.3.2.	La clef du succès pour le temps réel : le parallélisme.....	247
9.3.3.3.	Les architectures informatiques possibles	248
9.3.4.	Conclusion	248
	Bibliographie.....	249
	Chapitre 10. Les moyens de calcul.....	251
10.1.	Introduction	251
10.2.	Architecture informatique.....	252
10.2.1.	La problématique.....	252
10.2.2.	Le système d'information réseau.....	253
10.2.3.	Les techniques informatiques.....	254
10.2.4.	Perpectives	256

231	III.3 Interface Homme-Machine.....	258
232	III.3.1. Quelques principes généraux.....	258
232	III.3.2. L'évolution des IHM.....	259
232	III.3.3. Perspectives.....	260
233	Bibliographie.....	260
233		
233	Chapitre 11. Nouveaux développements.....	261
234		
234	III.1 Le couplage des différentes échelles de temps.....	261
235	III.1.1. L'origine physique du couplage.....	261
235	III.1.2. Le « raccordement » des modèles.....	263
235		
237	III.2 Unification de la stabilité et de la dynamique lente.....	264
241		
243	III.3 Nouveaux besoins, nouvelles réponses.....	266
243	III.3.1. Un besoin de performances toujours accru.....	266
244	III.3.2. Les voies de progrès.....	267
244	III.3.2.1. Les algorithmes.....	267
244	III.3.2.2. Les méthodes directes.....	268
245	III.3.2.3. La simulation par modèleur- solveur-afficheur.....	271
246	Bibliographie.....	272
247		
248	Annexe A.11.1. Méthodes d'intégration d'Eurostag.....	275
248	A.11.1.1. Le problème.....	275
249	A.11.1.2. Le vecteur de Nordsieck.....	275
251	A.11.1.3. Méthode d'Adams d'ordre r, implicite.....	276
251	A.11.1.4. Méthode des différences rétrogrades d'ordre r, implicite.....	276
252	A.11.1.5. Choix d'une méthode d'intégration.....	277
252		
252	Annexe A.11.2. Méthode de différentiation automatique.....	278
253	A.11.2.1. Introduction.....	278
254	A.11.2.2. Principe de la méthode.....	279
256	A.11.2.3. Application à la simulation des réseaux électriques : implantation dans EUROSTAG.....	280
	A.11.2.4. Résultats d'essais réalisés avec EUROSTAG.....	281

Bibliographie.....	281
Annexe A.11.3. Application d'un modèle unique de dynamique lente et de stabilité transitoire (EUROSTAG).....	281
Annexe A11.4. Application de modélisation par modeleur-solveur.....	281
Bibliographie.....	281
Annexe A.I. Modélisation des liaisons à courant continu.....	291
A.I.1. Constitution des liaisons à courant continu.....	291
A.I.2. Mode de fonctionnement et de régulation d'une station.....	291
A.I.3. Caractéristiques d'une station continue $U_D = F(L_D)$	292
A.I.4. Mode de fonctionnement de deux stations reliées par une liaison unique à courant continu.....	295
A.I.5. Modélisation des liaisons à courant continu.....	295
Bibliographie.....	297



ISSN 0399-4198