

EGEM

Génie électrique

SmartGrids

les réseaux électriques intelligents

sous la direction de

Jean-Claude Sabonnadière

Nouredine Hadjsaïd

EGEM

hermes

Lavoisier

Table des matières

Chapitre 1. Des réseaux électriques aux SmartGrids	19
Nourredine HADJSAÏD et Jean-Claude SABONNADIÈRE	
1.1. Introduction	19
1.1.1. Le nouveau paradigme énergétique	19
1.2. Les technologies de l'information et de la communication au service du réseau	24
1.3. Intégration des nouvelles technologies.	26
1.4. Le contexte français dans la perspective européenne	28
1.5. Report sur le vecteur électrique	35
1.6. Les principaux déclencheurs du développement du réseau intelligent .	35
1.7. Définitions de « réseau intelligent » ou « SmartGrids ».	36
1.8. Quels objectifs un réseau de transport intelligent permet-il d'atteindre ?	37
1.9. Quels objectifs un réseau de distribution intelligent permet-il d'atteindre ?	39
1.9.1. L'évolution souhaitée des réseaux de distribution : vers des réseaux de distribution intelligents	39
1.9.2. Objectifs techniques	40
1.9.3. Objectifs socio-économiques et environnementaux.	41
1.10. Les acteurs concernés par la mise en œuvre du réseau intelligent . . .	42
1.11. Recherche et aspects scientifiques du réseau intelligent.	43
1.11.1. Exemples de concepts innovants en développement.	44
1.11.2. Les verrous scientifiques, technologiques, commerciaux et sociologiques	48
1.12. Préparer les compétences nécessaires au développement des SmartGrids	50

1.13. Conclusion	51
1.14. Bibliographie	52
Chapitre 2. Du SmartGrid au SmartCustomer : Catherine FAILLIET	55
2.1. Les grandes tendances	55
2.1.1. La crise	55
2.1.2. La prise de conscience environnementale	57
2.1.3. Les nouvelles technologies	57
2.2. L'évolution de la relation des citoyens à l'énergie	59
2.2.1. La curiosité	59
2.2.2. L'exigence de transparence	60
2.2.3. La responsabilité	61
2.3. Le modèle historique des énergéticiens	61
2.3.1. Des opérateurs historiques en monopole naturel	61
2.3.2. Une dominante technique	62
2.3.3. Une relation client peu développée	63
2.4. Les SmartGrids vus du client	65
2.4.1. La première étape : la révolution des données	65
2.4.2. La seconde étape : la mise en place d'un écosystème intelligent	68
2.4.3. Les freins des consommateurs	70
2.5. Quid des possibles modèles d'affaire	72
2.5.1. Un buzz mondial inédit... et la quête d'un modèle d'affaire	72
2.5.2. La recherche par les pouvoirs publics d'un modèle de régulation vertueuse	75
2.5.3. Une ouverture pour de nouveaux acteurs	77
2.6. Bibliographie	79
Chapitre 3. Les réseaux de transport, acteurs des SmartGrids Hervé MIGNON	81
3.1. Un contexte énergétique en mutation : le développement des énergies renouvelables	82
3.2. Un contexte énergétique en mutation : de nouveaux modes de consommation	86
3.3. De nouveaux défis	92
3.4. Un réseau de transport en évolution	97
3.5. Conclusion	100
3.6. Bibliographie	102

Chapitre 4. SmartGrids et conduite de réseaux de transport Jean-Louis COULLON	103
4.1. Introduction	103
4.2. La gestion des ressources de production distribuée : les énergies renouvelables	104
4.2.1. Caractérisation de la production renouvelable distribuée	105
4.2.2. L'intégration des énergies renouvelables dans les processus de conduite	108
4.3. La gestion de la demande (<i>Demand Response</i>)	111
4.4. Le développement du stockage, les microréseaux, les véhicules électriques	116
4.4.1. Les nouveaux modes de stockage	116
4.4.2. Les microréseaux	117
4.4.3. Les véhicules électriques	117
4.5. Le pilotage des liens à courant continu HVDC	118
4.6. L'analyse de sécurité	120
4.6.1. La stabilité et le modèle de réseau	120
4.6.2. L'analyse continue : les PMU	121
4.6.3. Les limites dynamiques	123
4.6.4. Les réseaux autoéquilibrants (<i>self-healing</i>)	124
4.7. La gestion intelligente des équipements	125
4.8. Le déploiement des SmartGrids : les besoins réglementaires	128
4.8.1. Les besoins des projets pilotes	129
4.8.2. Les incitations à l'investissement dans la sécurité du réseau	129
4.8.3. Les renouvelables	129
4.8.4. Les incitations à l'investissement pour l'efficacité énergétique	130
4.8.5. La répartition des coûts/bénéfices	130
4.8.6. Les nouveaux cadres réglementaires	131
4.9. Les standards	131
4.9.1. Le cas des SmartGrids	131
4.9.2. Les travaux en cours	132
4.9.3. Les coopérations	134
4.10. Eléments d'architecture des systèmes	134
4.10.1. Élargir la vision	134
4.10.2. Considérer les changements « verticaux »	138
4.10.3. Développer les outils de l'intégration	139
4.11. Bibliographie	140
4.12. Remerciements	140

Chapitre 5. Le gestionnaire des réseaux de distribution au cœur de la révolution des SmartGrids 141

Pierre MALLET

5.1. Bref rappel de quelques éléments généraux sur les réseaux électriques de distribution	142
5.2. Les changements en cours : vers plus de complexité	143
5.3. Les réseaux intelligents permettent la transition vers une énergie décarbonnée	144
5.4. Les différents volets des SmartGrids	145
5.5. La gestion intelligente des actifs	145
5.6. L'exploitation et la conduite intelligentes	146
5.7. Le comptage intelligent	147
5.7.1. Le projet <i>Linky</i>	147
5.7.2. De nouveaux services pour les clients	148
5.7.3. Le comptage intelligent permet de moderniser fortement la gestion du réseau	149
5.8. Les services intelligents	149
5.9. L'optimisation locale intelligente	150
5.9.1. Production décentralisée	150
5.9.2. Gestion active de la demande	152
5.9.3. Moyens de stockage décentralisés	153
5.9.4. Nouveaux usages dont les véhicules électriques	153
5.9.5. Optimisation locale du système	154
5.10. Le distributeur ERDF est au cœur des réseaux intelligents de l'avenir	155
5.11. Bibliographie	155

Chapitre 6. Architectures, planification et reconfiguration des réseaux de distribution 157

Marie-Cécile ALVAREZ, Raphaël CAIRE et Bertrand RAISON

6.1. Introduction	157
6.2. Structure des réseaux de distribution	159
6.2.1. Postes de livraison HTB/HTA	160
6.2.2. Réseaux bouclés ou maillés	161
6.2.3. Types de conducteurs	163
6.2.4. Souterrain/aérien	164
6.2.5. Postes HTA/BT	164

6.3. Planification des réseaux de distribution 165

6.3.1. Principes de planification	166
6.3.2. L'ensemble des critères que doivent respecter les architectures proposées	168
6.3.3. Planification long terme et planification moyen terme	173
6.3.4. Impact du raccordement des GED sur la structure du réseau HTA	179
6.3.5. Proposition d'une nouvelle architecture bouclée : la structure hybride	188
6.4. Reconfiguration pour la réduction des pertes Joule	191
6.4.1. La problématique des pertes Joule	191
6.4.2. Formulation mathématique du problème d'optimisation	193
6.4.3. Optimisation combinatoire	200
6.4.4. Différentes approches pour la recherche de la configuration optimale	205
6.4.5. Reconfiguration des réseaux partiellement maillés	216
6.5. Bibliographie	218

Chapitre 7. Outils de pilotage et d'aide à la décision 221

Yvon BISANGNER, Bertrand RAISON, Raphaël CAIRE et Tran-Quoc TUAN

7.1. Introduction	221
7.2. Le réglage de tension	222
7.2.1. Introduction au réglage de tension dans les réseaux de distribution	222
7.2.2. Réglage de la tension dans les réseaux de distribution actuels	223
7.2.3. Le réglage de tension dans les réseaux de distribution avec production décentralisée	224
7.2.4. Conclusion sur le réglage de tension	235
7.3. Plan de protection	236
7.3.1. Plan de protection HTA	238
7.3.2. Régime de neutre HTA	240
7.3.3. Caractéristiques des défauts	241
7.3.4. Les coupures	242
7.3.5. Impact de la production décentralisée sur le fonctionnement des protections des départs	243
7.4. Reconfiguration suite à un défaut : résultats du projet INTEGRAL	246
7.4.1. Bais du projet INTEGRAL	246
7.4.2. Description du démonstrateur	247
7.4.3. Principes généraux de l'auto-cicatrisation	250
7.4.4. Quelques résultats	253

7.5. La sûreté de fonctionnement 257
 7.5.1. Concepts de base de la simulation Monte-Carlo 258
 7.5.2. Conclusion sur la sûreté de fonctionnement 265
 7.6. Bibliographie 266

Chapitre 8. SmartGrids et intégration des véhicules électriques 269
 Florent CADOUX et George GROSS

8.1. La révolution du transport individuel électrique 269
 8.1.1. Contexte 269
 8.1.2. Une technologie de plus en plus crédible 270
 8.1.3. Exemple : la Fluence ZE 270
 8.1.4. Quelles conséquences sur le réseau électrique ? 271
 8.1.5. Gestion de la demande et V2G 272

8.2. Les véhicules électriques comme « charges actives » 272
 8.2.1. Services énergétiques 273
 8.2.2. Régulation de fréquence 274
 8.2.3. Réserve et effacement de charge 275
 8.2.4. Autres services 276

8.3. Impacts économiques 276
 8.3.1. Un marché potentiellement lucratif mais limité 276
 8.3.2. De nouveaux modèles d'affaire 277
 8.3.3. Intégration aux marchés 278

8.4. Impacts environnementaux 278
 8.4.1. Synergie avec les sources intermittentes 278
 8.4.2. Efficacité énergétique 279
 8.4.3. Autres avantages 280
 8.4.4. Evaluation des gains environnementaux 280

8.5. Défis technologiques 281
 8.5.1. Architecture 281
 8.5.2. Infrastructure de communication 281
 8.5.3. Stratégie de contrôle 282
 8.5.4. Retour d'information 283

8.6. Facteurs de risque 283
 8.6.1. Adoption des véhicules électriques 283
 8.6.2. Viabilité de la gestion de la demande 284
 8.6.3. Risques technologiques 284
 8.6.4. Risques économiques 284

8.7. Conclusion 285
 8.8. Bibliographie 286

Chapitre 9. Comment les technologies de l'information et de la communication vont transformer les réseaux électriques
 Gilles PRIVAT

9.1. Introduction
 9.2. Enjeux de centralisation du contrôle
 9.2.1. Pourquoi les SmartGrids ne seront pas des « réseaux intelligents »
 9.2.2. Du Home Area Network au smart home grid : l'extension du réseau local de données au réseau électrique de la maison
 9.2.3. Le smart home grid pour l'optimisation locale de l'efficacité énergétique
 9.2.4. De la maison aux microgrids, vers l'autonomie de contrôle de sous-réseaux
 9.3. Interopérabilité et connectivité
 9.3.1. Grid computing, utility computing : lorsque le réseau électrique est un modèle pour les technologies de l'information
 9.3.2. Avatars de la connectivité, lorsque la connectivité remonte de la couche physique jusqu'aux modèles d'information
 9.4. Du synchronisme à l'asynchronisme
 9.4.1. Synchronisme absolu et relatif, de bas niveau et de haut niveau
 9.4.2. Des données asynchrones à l'électricité asynchrone
 9.4.3. De l'information asynchrone à l'énergie « paquetisée » asynchrone
 9.5. L'Internet du futur pour les SmartGrids
 9.5.1. Vers une infrastructure partagée pour les SmartGrids et les réseaux physiques : côté capteurs
 9.5.2. Vers une infrastructure partagée : côté cloud
 9.6. Conclusion
 9.7. Bibliographie

Chapitre 10. Les systèmes d'information dans le comptage et la gestion du réseau
 Hervé BARANCOURT

10.1. Introduction
 10.1.1. Classification des systèmes d'information
 10.1.2. Démarche
 10.2. Le système d'information de comptage
 10.2.1. Présentation du système de comptage
 10.2.2. Architecture du système de comptage

10.2.3. Les données manipulées	321
10.2.4. Le déploiement d'un système de comptage	323
10.3. Le SI Comptage dans la gestion du réseau	325
10.3.1. Les liens avec les SI de gestion du réseau de distribution	325
10.3.2. Le triptyque du SmartGrid	327
10.4. Conclusion : urbanisation du système de comptage	327
10.4.1. Deux approches	327
10.4.2. L'information du « consomm'acteur »	329
10.4.3. Synthèse	330
10.5. Bibliographie	331

Chapitre 11. *Smart meters* et SmartGrids : une approche économique 333

Jacques PERCEBOIS

11.1. La <i>Demand Response</i> , conséquence de la libéralisation de l'industrie électrique et de la montée des préoccupations environnementales	334
11.1.1. Spécificités de l'électricité	334
11.1.2. Impact de l'ouverture à la concurrence	335
11.1.3. Impact des objectifs de réduction des émissions de CO ₂	338
11.2. La régulation traditionnelle par la tarification ne suffit plus à éviter le risque de « défaillance » en pointe	338
11.2.1. Faire face à la défaillance	338
11.2.2. Des moyens de pointe coûteux, ce qui réduit l'incitation à investir	339
11.2.3. Accentuer la différenciation horo-saisonnière des tarifs	340
11.3. Les <i>smart meters</i> , un outil au service de l'effacement et du marché de capacité	343
11.3.1. Vers un marché de l'effacement	343
11.3.2. Qui finance l'installation des compteurs ?	346
11.3.3. Bilan économique de l'opération	347
11.4. Des <i>smart meters</i> aux SmartGrids : quel bilan ?	349
11.5. Bibliographie	351

Chapitre 12. La régulation des réseaux électriques intelligents 353

Didier LAFFAILLE

12.1. La régulation et le financement des réseaux électriques intelligents	353
12.1.1. Les dépenses de R&D doivent-elles être soumise à un mécanisme incitatif ?	354

12.1.2. Comment faire face aux coûts de déploiement des SmartGrids ?	355
12.1.3. Quels sont les investissements devant être supportés par les tarifs d'acheminement et dans quelle mesure ?	355
12.1.4. Une coopération à mettre en place ?	355
12.2. La régulation et les modèles économiques	356
12.3. L'évolution de la chaîne de valeur	358
12.3.1. Comment vont s'imbriquer les secteurs de l'énergie et celui des technologies de l'information et des télécommunications ?	358
12.3.2. Quel sera le rôle du consommateur et des nouveaux acteurs dans la chaîne de valeur ?	360
12.4. L'émergence d'un modèle économique des réseaux électriques intelligents	361
12.4.1. Faut-il un cadre réglementaire pour favoriser le déploiement des SmartGrids à l'échelon de l'Union européenne ?	361
12.4.2. Quelle déclinaison en France ?	363
12.5. La régulation peut apporter une aide à l'émergence des réseaux électriques intelligents	363
12.5.1. Comment s'assurer que les gestionnaires de réseaux tiendront compte de l'intérêt général dans leurs décisions d'investissement ?	363
12.5.2. L'exemple du compteur évolué <i>Linky</i>	363
12.5.3. Comment financer les investissements dans les réseaux intelligents ?	366
12.5.4. Quel cadre de régulation pour encourager des investissements efficaces dans les réseaux intelligents ?	37
12.5.5. Quelle évolution des tarifs est acceptable par les consommateurs ?	37
12.5.6. Quels sont les autres champs d'action du régulateur pour favoriser le développement d'un écosystème des réseaux intelligents ?	37
12.6. Les modèles économiques sont à créer	37
12.7. La normalisation des réseaux électriques intelligents	37
12.7.1. Pourquoi la normalisation est-elle un élément essentiel pour un développement efficace du système électrique ?	37
12.7.2. La normalisation, une réponse aux besoins d'interopérabilité dans les réseaux électriques intelligents ?	37
12.7.3. Quels sont les travaux de normalisation des réseaux électriques intelligents en Europe ?	37

18 SmartGrids

12.7.4. La normalisation, un enjeu commercial important pour la filière industrielle française et européenne ?	380
12.8. En conclusion	381
12.9. Bibliographie	382
Index	385