

COLLECTION GÉNIE ÉLECTRIQUE

# Gestion et valorisation du stockage de l'énergie dans les réseaux électriques

Benoît Robyns, Bruno François  
Gauthier Delille et Christophe Saudemont



ISTE  
editions

---

## Table des matières

---

<b>Préface</b> .....	13
Eric MONMASSON	
<b>Introduction</b> .....	15
<b>Chapitre 1. Problématique du stockage de l'énergie électrique</b> ...	19
1.1. Difficultés du stockage de l'énergie électrique .....	19
1.2. Pourquoi stocker l'énergie électrique ? .....	20
1.3. Valorisation du stockage dans les réseaux électriques. ....	24
1.4. Gestion du stockage .....	27
1.5. Bibliographie .....	30
<b>Chapitre 2. Etat de l'art du stockage de l'énergie</b> .....	33
2.1. Introduction .....	33
2.2. Les technologies de stockage .....	33
2.3. Caractéristiques d'un système de stockage .....	35
2.3.1. Capacité énergétique de stockage .....	35
2.3.2. Puissance maximale et constante de temps .....	35
2.3.3. Pertes énergétiques et rendement .....	36
2.3.4. Vieillessement .....	36
2.3.5. Coûts .....	37
2.3.6. Energie et puissance spécifique .....	37
2.3.7. Temps de réponse .....	38
2.3.8. Energie grise .....	39
2.3.9. Etat d'énergie .....	39

2.3.10. Autres caractéristiques . . . . .	40
2.4. Stockage hydraulique . . . . .	40
2.4.1. Principe du stockage hydraulique . . . . .	40
2.4.2. Exercice : centrale du Lac Noir . . . . .	42
2.5. Stockage par air comprimé . . . . .	46
2.5.1. Principe du stockage par air comprimé . . . . .	46
2.5.2. Stockage par air comprimé de première et seconde générations . . . . .	46
2.5.3. Stockage par air comprimé adiabatique . . . . .	48
2.5.4. Stockage de l'air . . . . .	49
2.5.5. Stockage hydropneumatique . . . . .	50
2.6. Stockage thermique . . . . .	51
2.6.1. Stockage en chaleur sensible . . . . .	51
2.6.2. Stockage en chaleur latente . . . . .	53
2.7. Stockage chimique . . . . .	53
2.7.1. Stockage électrochimique . . . . .	53
2.7.1.1. Batteries au plomb-acide . . . . .	54
2.7.1.2. Batteries lithium-ion . . . . .	54
2.7.1.3. Batteries sodium-soufre . . . . .	56
2.7.1.4. Batteries à base de nickel . . . . .	57
2.7.1.5. Batteries à circulation d'électrolyte . . . . .	57
2.7.2. Stockage d'hydrogène . . . . .	58
2.8. Stockage cinétique . . . . .	59
2.9. Stockage électrostatique . . . . .	60
2.10. Stockage électromagnétique . . . . .	61
2.11. Performances comparées des technologies de stockage . . . . .	63
2.12. Bibliographie . . . . .	64

### Chapitre 3. Valorisation du stockage de l'énergie dans les réseaux électriques . . . . .

	67
3.1. Introduction . . . . .	67
3.2. Introduction aux systèmes électriques et à leur fonctionnement . . . . .	70
3.2.1. Les groupes de production . . . . .	71
3.2.1.1. La production centralisée . . . . .	71
3.2.1.2. La production décentralisée . . . . .	73
3.2.2. Les réseaux électriques . . . . .	75
3.2.3. La consommation . . . . .	78
3.2.4. Quelques éléments de fonctionnement des systèmes électriques . . . . .	79
3.2.4.1. Se prémunir contre l'écroulement de fréquence . . . . .	80

3.2.4.2. Se prémunir contre l'écroulement de tension . . . . .	87
3.2.4.3. Se prémunir contre les ruptures de synchronisme. . . . .	91
3.2.4.4. Se prémunir contre les surcharges en cascade . . . . .	91
3.3. Services pouvant être rendus par le stockage . . . . .	92
3.3.1. Introduction . . . . .	92
3.3.2. Services obligatoires pour le raccordement sur le réseau public de transport . . . . .	93
3.3.2.1. Contribution au réglage de la fréquence . . . . .	94
3.3.2.2. Contribution au réglage de la tension . . . . .	95
3.3.3. Services potentiels supplémentaires pour un gestionnaire de réseaux de transport. . . . .	96
3.3.3.1. Réserve tertiaire pour le réglage de fréquence. . . . .	96
3.3.3.2. Traitement des congestions . . . . .	96
3.3.3.3. Reconstitution du réseau et renvoi de tension . . . . .	98
3.3.4. Services potentiels du stockage pour un gestionnaire de réseaux de distribution . . . . .	98
3.3.4.1. Lissage des transits de pointe. . . . .	98
3.3.4.2. Réglage local de la tension . . . . .	102
3.3.4.3. Secours par l'ilotage contrôlé de poches locales . . . . .	104
3.3.4.4. D'autres services potentiels du stockage pour un gestionnaire de réseaux de distribution . . . . .	108
3.3.5. Services pour un producteur centralisé . . . . .	111
3.3.5.1. Le report d'énergie. . . . .	112
3.3.5.2. La réduction des émissions de CO <sub>2</sub> . . . . .	112
3.3.5.3. La réduction de la maintenance . . . . .	112
3.3.5.4. Le report des services système et de la réserve . . . . .	112
3.3.6. Services pour un producteur décentralisé renouvelable. . . . .	113
3.3.6.1. Contexte et introduction aux problèmes . . . . .	113
3.3.6.2. Report d'injection . . . . .	115
3.3.6.3. Garantie d'un profil de production auprès des acheteurs et du transporteur . . . . .	118
3.3.6.4. Contribution aux services systèmes et réglage de la fréquence . . . . .	119
3.3.6.5. Valorisation des effacements techniques . . . . .	119
3.3.7. Services pour les consommateurs . . . . .	121
3.3.7.1. Lissage de la pointe . . . . .	121
3.3.7.2. Report de blocs de consommation. . . . .	122
3.3.7.3. Effacement transparent . . . . .	124
3.3.7.4. Exigence particulière de qualité de l'électricité . . . . .	124
3.3.7.5. Continuité d'alimentation . . . . .	125

3.3.7.6. Limitation des perturbations induites sur le réseau HTA ou BT amont . . . . .	125
3.3.7.7. Compensation de puissance réactive . . . . .	126
3.3.8. Services rémunérés au sein des activités de marché . . . . .	126
3.3.8.1. Achat et vente de blocs d'énergie . . . . .	126
3.3.8.2. Le marché des services système . . . . .	128
3.4. Exemple d'apport du stockage pour le traitement des congestions . . . . .	129
3.4.1. Indicateur de l'état de charge du réseau . . . . .	129
3.4.2. Scénario d'évolution du réseau électrique . . . . .	130
3.4.3. Traitement des congestions en Bretagne . . . . .	131
3.5. Exemple d'apport du stockage pour le soutien dynamique au réglage de la fréquence dans un réseau insulaire . . . . .	132
3.5.1. Contexte et intérêt potentiel du service . . . . .	132
3.5.2. Qu'est-ce que le délestage fréquence-métrique ? . . . . .	132
3.5.3. Spécifications techniques du soutien dynamique . . . . .	133
3.5.4. Méthode utilisée pour l'étude détaillée du soutien dynamique . . . . .	136
3.5.5. Etape 1 : approche théorique . . . . .	136
3.5.5.1. Modèle d'un système isolé autour d'un point d'équilibre . . . . .	137
3.5.5.2. Evolution temporelle de la fréquence . . . . .	139
3.5.5.3. Détermination de la fréquence minimale . . . . .	140
3.5.5.4. Dimensionnement du stockage . . . . .	140
3.5.6. Etape 2 : simulations dynamiques . . . . .	141
3.5.7. Etape 3 : mise en œuvre expérimentale au laboratoire . . . . .	142
3.5.8. Valorisation économique . . . . .	144
3.5.9. Bilan de l'exemple . . . . .	145
3.6. Conclusion . . . . .	145
3.7. Bibliographie . . . . .	145

#### Chapitre 4. Introduction à la logique floue et application à la gestion d'un stockage inertiel dans un système hybride éolien-diesel . . . . .

4.1. Introduction . . . . .	151
4.2. Introduction à la logique floue . . . . .	151
4.2.1. Principe du raisonnement flou . . . . .	152
4.2.2. Logique floue et logique booléenne . . . . .	153
4.2.3. Etapes d'un superviseur flou . . . . .	156
4.2.4. Exemple de raisonnement flou . . . . .	160

125	4.3. Association éolien-stockage inertielle sur site isolé	
126	avec générateur Diesel . . . . .	165
126	4.3.1. Introduction . . . . .	165
126	4.3.2. Stratégie de gestion énergétique . . . . .	165
128	4.3.3. Superviseur à logique floue . . . . .	167
129	4.3.3.1. Fuzzification . . . . .	168
129	4.3.3.2. Inférence . . . . .	168
130	4.3.3.3. Défuzzification . . . . .	169
131	4.3.4. Résultats de simulation avec le superviseur flou . . . . .	169
132	4.3.5. Résultats de simulation avec un simple filtrage . . . . .	172
132	4.4. Conclusion . . . . .	174
133	4.5. Bibliographie . . . . .	175
136	<b>Chapitre 5. Méthodologie de construction du superviseur</b>	
136	<b>d'une source éolienne associée à du stockage . . . . .</b>	<b>177</b>
137	5.1. Introduction . . . . .	177
139	5.2. Le système énergétique étudié . . . . .	178
140	5.3. Méthodologie de développement du superviseur . . . . .	178
140	5.4. Le cahier des charges . . . . .	179
141	5.4.1. Les objectifs . . . . .	179
142	5.4.2. Les contraintes . . . . .	180
144	5.4.3. Les moyens d'action . . . . .	181
145	5.5. La structure du superviseur . . . . .	181
145	5.5.1. Les grandeurs d'entrée . . . . .	181
145	5.5.2. Les grandeurs de sortie . . . . .	182
145	5.5.3. Les outils de développement du superviseur . . . . .	182
145	5.6. Identification des différents états de fonctionnement :	
145	le graphe fonctionnel . . . . .	186
151	5.6.1. Graphe de niveau N1 . . . . .	187
151	5.6.2. Graphe de niveau N1.1 . . . . .	187
152	5.6.3. Graphe de niveau N1.2 . . . . .	188
153	5.6.4. Graphe de niveau N1.3 . . . . .	189
156	5.7. Les fonctions d'appartenance . . . . .	190
160	5.8. Le graphe opérationnel . . . . .	193
	5.8.1. Graphe de niveau N1 . . . . .	194
	5.8.2. Graphe de niveau N1.1 . . . . .	194
	5.8.3. Graphe de niveau N1.2 . . . . .	195
	5.8.4. Graphe de niveau N1.3 . . . . .	195
	5.9. Les règles floues . . . . .	196
	5.10. Validation expérimentale . . . . .	197

5.10.1. L'implantation du superviseur . . . . .	197
5.10.2. La configuration expérimentale . . . . .	199
5.10.3. Résultats et analyses . . . . .	201
5.10.3.1. Superviseur à puissance lissée . . . . .	201
5.10.3.2. Superviseur à puissance constante . . . . .	204
5.11. Conclusion . . . . .	205
5.12. Bibliographie . . . . .	205

## **Chapitre 6. Construction du superviseur d'une source hybride multisources-multistockages . . . . . 207**

6.1. Introduction . . . . .	207
6.2. Méthodologie de construction du superviseur d'une source hybride intégrant de l'éolien . . . . .	209
6.2.1. Détermination du cahier des charges du système . . . . .	209
6.2.2. Structure du superviseur . . . . .	211
6.2.3. Détermination des graphes fonctionnels . . . . .	214
6.2.4. Détermination des fonctions d'appartenance . . . . .	218
6.2.5. Détermination des graphes opérationnels . . . . .	221
6.2.6. Extraction des lois floues . . . . .	223
6.3. Performances comparées de différentes variantes de source hybride . . . . .	223
6.3.1. Caractéristiques du système simulé . . . . .	224
6.3.1.1. L'éolien . . . . .	224
6.3.1.2. La source prévisible . . . . .	224
6.3.1.3. Le système de stockage . . . . .	225
6.3.1.4. Le réseau extérieur . . . . .	225
6.3.2. Simulations de différentes variantes de source hybride . . . . .	226
6.3.2.1. Simulation de la centrale multisources complète (topologie A) . . . . .	226
6.3.2.2. Association d'une éolienne et d'une source prévisible (topologie B) . . . . .	229
6.3.2.3. Association d'une éolienne, d'une source prévisible et d'un système de stockage court terme (topologie C) . . . . .	231
6.3.2.4. Association d'une éolienne, d'un stockage court terme et d'un système de stockage long terme (topologie D) . . . . .	232
6.3.2.5. Association d'une éolienne et d'un système de stockage court terme (topologie E) . . . . .	233
6.3.3. Comparaison des performances des différentes sources hybrides au moyen d'indicateurs . . . . .	235
6.4. Conclusion . . . . .	236

07	6.5. Appendices . . . . .	236
09	6.5.1. Plage de variation des grandeurs de sortie . . . . .	236
11	6.5.2. Lois floues . . . . .	238
11	6.6. Bibliographie . . . . .	240

## Chapitre 7. Gestion et valorisation d'un stockage à air comprimé adiabatique intégré dans un réseau électrique . . . . . 243

	7.1. Introduction . . . . .	243
	7.2. Services fournis par le stockage . . . . .	244
07	7.2.1. Planification du stockage . . . . .	244
07	7.2.2. Réglage de fréquence . . . . .	245
	7.2.3. Gestion des congestions . . . . .	245
09	7.2.4. Garantie de production renouvelable variable . . . . .	245
09	7.3. Stratégie de supervision . . . . .	246
11	7.3.1. Méthodologie . . . . .	246
14	7.3.2. Objectifs, contraintes, moyen d'action . . . . .	247
18	7.3.3. Structure du superviseur . . . . .	248
21	7.3.4. Détermination des graphes fonctionnels . . . . .	248
23	7.3.5. Détermination des fonctions d'appartenance . . . . .	254
	7.3.6. Détermination des graphes opérationnels . . . . .	256
23	7.3.7. Extraction des lois floues . . . . .	256
24	7.3.8. Indicateurs . . . . .	256
24	7.4. Valeur économique des services . . . . .	256
24	7.4.1. L'action achat/vente . . . . .	258
25	7.4.2. Facturation du réglage de fréquence . . . . .	259
25	7.4.3. Facturation des services supplémentaires . . . . .	259
26	7.5. Application . . . . .	259
26	7.5.1. Réseau de test . . . . .	259
26	7.5.2. Intérêt de la contribution du stockage aux services système . . . . .	261
29	7.5.3. Intérêt du superviseur flou par rapport à un superviseur booléen . . . . .	264
31	7.6. Conclusion . . . . .	266
32	7.7. Remerciements . . . . .	267
	7.8. Bibliographie . . . . .	267

33	<b>Index . . . . .</b>	<b>269</b>
----	------------------------	------------



L'essor des énergies renouvelables et le besoin de moyens de transport décarbonnés donnent un nouvel intérêt pour le stockage de l'énergie devenu désormais un élément clé du développement durable.

*Gestion et valorisation du stockage de l'énergie dans les réseaux électriques* présente et compare les différentes technologies de stockage mises en œuvre à l'heure actuelle. Dans une perspective de développement durable, il étudie plus particulièrement l'importance de la gestion énergétique de systèmes associant source d'énergie à base de ressources renouvelables et unités de stockage, pour leur intégration harmonieuse au sein des réseaux électriques intelligents (*smart grids*).

Pédagogique, cet ouvrage propose également des outils méthodologiques et des exemples concrets permettant la mise en place d'un système de gestion énergétique du stockage.

#### Les auteurs

Directeur de la recherche au HEI Lille, Benoît Robyns est responsable de l'équipe réseaux du Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP) de Lille.

Professeur à EC-Lille, Bruno François est membre de l'équipe réseaux du LE2P de

Docteur de EC-Lille, également ingénieur chercheur chez Elec Lamart.

Enseignant-chercheur, Philippe Saudemont est membre de l'équipe e.



**ISTE**  
editions

