
Table des matières

Préface	13
Eric MONMASSON	
Introduction	15
Chapitre 1. Problématique du stockage de l'énergie électrique	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
Chapitre 2. Etat de l'art du stockage de l'énergie	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 ₂	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	151
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

4.3. Association éolien-stockage inertiel sur site isolé avec générateur Diesel	165
4.3.1. Introduction	165
4.3.2. Stratégie de gestion énergétique	165
4.3.3. Superviseur à logique floue	167
4.3.3.1. Fuzzification	168
4.3.3.2. Inférence	168
4.3.3.3. Défuzzification	169
4.3.4. Résultats de simulation avec le superviseur flou	169
4.3.5. Résultats de simulation avec un simple filtrage	172
4.4. Conclusion	174
4.5. Bibliographie	175

Chapitre 5. Méthodologie de construction du superviseur d'une source éolienne associée à du stockage	177
5.1. Introduction	177
5.2. Le système énergétique étudié	178
5.3. Méthodologie de développement du superviseur	178
5.4. Le cahier des charges	179
5.4.1. Les objectifs	179
5.4.2. Les contraintes	180
5.4.3. Les moyens d'action	181
5.5. La structure du superviseur	181
5.5.1. Les grandeurs d'entrée	181
5.5.2. Les grandeurs de sortie	182
5.5.3. Les outils de développement du superviseur	182
5.6. Identification des différents états de fonctionnement : le graphe fonctionnel	186
5.6.1. Graphe de niveau N1	187
5.6.2. Graphe de niveau N1.1	187
5.6.3. Graphe de niveau N1.2	188
5.6.4. Graphe de niveau N1.3	189
5.7. Les fonctions d'appartenance	190
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

6.5. Appendices	236
6.5.1. Plage de variation des grandeurs de sortie	236
6.5.2. Lois floues	238
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
7.2.1. Planification du stockage	244
7.2.2. Réglage de fréquence	245
7.2.3. Gestion des congestions	245
7.2.4. Garantie de production renouvelable variable	245
7.3. Stratégie de supervision	246
7.3.1. Méthodologie	246
7.3.2. Objectifs, contraintes, moyen d'action	247
7.3.3. Structure du superviseur	248
7.3.4. Détermination des graphes fonctionnels	248
7.3.5. Détermination des fonctions d'appartenance	254
7.3.6. Détermination des graphes opérationnels	256
7.3.7. Extraction des lois floues	256
7.3.8. Indicateurs	256
7.4. Valeur économique des services	256
7.4.1. L'action achat/vente	258
7.4.2. Facturation du réglage de fréquence	259
7.4.3. Facturation des services supplémentaires	259
7.5. Application	259
7.5.1. Réseau de test	259
7.5.2. Intérêt de la contribution du stockage aux services système	261
7.5.3. Intérêt du superviseur flou par rapport à un superviseur booléen	264
7.6. Conclusion	266
7.7. Remerciements	267
7.8. Bibliographie	267
Index	269