

Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables

Benoît Robyns, Arnaud Davigny,
Bruno François, Antoine Henneton,
Jonathan Sprooten

hermes

Lavoisier

Table des matières

Préface	13
Bernard MULTON	
Introduction	15
Chapitre 1. La production décentralisée d'électricité à partir d'énergie renouvelable	19
Benoît ROBYNS	
1.1. La production décentralisée	19
1.2. La problématique des énergies renouvelables.	20
1.2.1. Constats.	20
1.2.1.1. Changement climatique	21
1.2.1.2. Augmentation de la demande d'énergie	22
1.2.1.3. Limitation des réserves de combustible fossile	22
1.2.1.4. Faible rendement global du système énergétique	23
1.2.1.5. Dépendance énergétique	23
1.2.2. Le contexte du développement durable	24
1.2.3. Engagements et perspectives	24
1.2.3.1. Protocole de Kyoto.	24
1.2.3.2. L'Union européenne et le développement énergétique durable	25
1.2.3.3. Ouverture du marché de l'électricité	25
1.2.3.4. Perspectives technologiques	26
1.3. Les sources d'énergie renouvelable.	27
1.3.1. L'éolien.	27
1.3.2. Le solaire	28
1.3.3. L'hydraulique	29

1.3.4. La géothermie	30
1.3.5. La biomasse	30
1.3.6. Contribution des différentes énergies renouvelables	31
1.4. La production d'électricité à partir d'énergies renouvelables	32
1.4.1. Les chaînes de production de l'électricité.	32
1.4.2. Facteur de rendement.	35
1.5. Bibliographie.	36
Chapitre 2. Le solaire photovoltaïque.	37
Arnaud DAVIGNY	
2.1. Introduction.	37
2.2. Caractéristiques de la ressource primaire	39
2.3. La conversion photovoltaïque	43
2.3.1. Introduction	43
2.3.2. L'effet photovoltaïque	43
2.3.3. La cellule photovoltaïque	45
2.3.3.1. Technologies de cellules solaires	45
2.3.3.2. Analogie avec la diode	48
2.3.3.3. Modèle équivalent	53
2.3.3.4. Puissance maximale d'une cellule.	56
2.3.3.5. Rendement.	58
2.3.4. Association de cellules.	61
2.4. L'extraction du maximum de puissance électrique.	66
2.5. Les convertisseurs d'énergie.	70
2.5.1. Introduction	70
2.5.2. Structure des chaînes de conversion photovoltaïque	71
2.5.2.1. Sans transformateur d'isolement.	71
2.5.2.2. Avec transformateur d'isolement	72
2.5.3. Le hacheur	73
2.5.3.1. Introduction	73
2.5.3.2. Hacheur à deux interrupteurs.	73
2.5.4. L'onduleur	76
2.5.4.1. Introduction	76
2.5.4.2. Onduleur monophasé	77
2.5.4.3. Onduleur triphasé.	79
2.6. Le réglage de la puissance active et réactive	81
2.7. La centrale solaire	82
2.7.1. Introduction	82
2.7.2. La centrale autonome.	82
2.7.3. La centrale raccordée au réseau.	83
2.8. Exercices	84

2.8.1. Caractéristique d'un panneau photovoltaïque	84
2.8.2. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome	86
2.9. Bibliographie	88
Chapitre 3. L'éolien	91
Bruno FRANÇOIS et Benoît ROBYNS	
3.1. Caractéristique de la ressource primaire	91
3.1.1. Variabilité	91
3.1.2. Distribution de Weibull	92
3.1.3. Effet du relief	95
3.1.4. Taux de charge	95
3.1.5. Rose des vents	96
3.2. Energie cinétique du vent	97
3.3. Turbines éoliennes.	99
3.3.1. Eoliennes à axe horizontal.	99
3.3.1.1. Présentation	99
3.3.1.2. Conversion en puissance mécanique par effet de la portance	101
3.3.1.3. Influence de la vitesse de rotation sur l'angle d'attaque	104
3.3.1.4. Rendement et coefficient de puissance	106
3.3.2. Eoliennes à axe vertical	106
3.3.3. Comparaison des différents types de turbine	110
3.4. Limitation de puissance par variation du coefficient de puissance	111
3.4.1. Le système « pitch » ou à angle de calage variable	111
3.4.2. Le système « stall » ou à décrochage aérodynamique.	113
3.5. Couplages mécaniques entre la turbine et la génératrice électrique	114
3.5.1. Lien entre vitesse mécanique, vitesse de synchronisme et fréquence du réseau électrique.	114
3.5.2. Eoliennes à « attaque directe » (sans multiplicateur)	116
3.5.3. Utilisation d'un multiplicateur de vitesse	116
3.6. Généralités sur l'induction et la conversion mécano-électrique	117
3.7. Eolienne à « vitesse fixe » à base de machine asynchrone	119
3.7.1. Principe physique	119
3.7.2. Constitution de la machine asynchrone	120
3.7.3. Modélisation	121
3.7.3.1. Schéma monophasé équivalent.	121
3.7.3.2. Caractéristiques statiques	124
3.7.4. Système de conversion.	126
3.7.5. Caractéristiques de fonctionnement	127
3.8. Eolienne à vitesse variable.	128

3.8.1. Intérêt	128
3.8.2. Classement des structures selon les technologies de machines	129
3.8.3. Principe de dimensionnement des éléments	132
3.8.4. Réglage des puissances actives et réactives.	134
3.8.5. Aérogénérateurs basés sur une machine asynchrone à double alimentation	137
3.8.5.1. Machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation	137
3.8.5.2. Caractéristique de fonctionnement d'une éolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation	140
3.8.6. Aérogénérateurs basés sur une machine synchrone	142
3.8.6.1. Eoliennes de grande puissance	142
3.8.6.2. Petit éolien.	148
3.9. Fermes d'éoliennes	150
3.10. Exercices	152
3.10.1. Eolienne à vitesse fixe	152
3.10.2. Caractérisation d'une turbine et estimation de la puissance générée	154
3.10.3. Eolienne de forte puissance à vitesse variable	158
3.10.3.1. Fonctionnement nominal en négligeant toutes les pertes	158
3.10.3.2. Fonctionnement nominal en considérant les pertes	159
3.10.3.3. Fonctionnement à puissance réduite (vent faible) en négligeant toutes les pertes	160
3.10.3.4. <i>Fonctionnement à puissance réduite</i> en considérant les pertes	160
3.11. Bibliographie	161

Chapitre 4. L'hydroélectricité terrestre et marine : houle et marées 163

Benoît ROBYNS et Antoine HENNETON

4.1. L'hydraulique au fil de l'eau.	163
4.1.1. L'hydroélectricité	163
4.1.1.1. Historique	163
4.1.1.2. Principe de l'hydroélectricité.	164
4.1.2. Petite hydroélectricité	166
4.1.3. Turbines hydrauliques	169
4.1.3.1. Turbine Pelton	170
4.1.3.2. Turbine Crossflow	170
4.1.3.3. Turbine Francis	170
4.1.3.4. Turbine Kaplan	170

4.1.3.5. Rendement des turbines hydrauliques	172
4.1.3.6. Modèle d'une turbine hydraulique	173
4.1.4. Conversion électromécanique pour la petite hydroélectricité	174
4.1.4.1. Fonctionnement sur charges isolées	174
4.1.4.2. Fonctionnement couplé au réseau	176
4.1.4.3. Fonctionnement à vitesse variable	176
4.1.5. Exercice : petite centrale hydroélectrique au fil de l'eau	177
4.2. L'énergie hydraulique de la mer	186
4.2.1. Energie des vagues	186
4.2.1.1. Origine et description des vagues	186
4.2.1.2. Potentiel	189
4.2.1.3. Ressource mondiale	190
4.2.2. Energie des courants océaniques continus	190
4.2.2.1. Description du phénomène des courants	190
4.2.2.2. Potentiel	192
4.2.3. Energie des marées	193
4.2.3.1. Phénomène des marées	193
4.2.3.2. La hauteur de marée	194
4.2.3.3. Le courant de marée	196
4.2.3.4. Potentiel	196
4.2.4. Production houlomotrice, houlogénérateurs	198
4.2.4.1. Récupération de l'énergie primaire	198
4.2.4.2. Conversion électromécanique à débattements limités linéaires	202
4.2.4.3. Conversion électromécanique rotative	209
4.2.4.4. Les caractéristiques de la production électrique	218
4.2.5. Production par les courants marins	219
4.2.5.1. Système de conversion mécanique : l'hydrolienne	219
4.2.5.2. La conversion électromécanique	220
4.2.5.3. Comparaison entre la production éolienne et hydrolienne	227
4.2.6. Production marémotrice	228
4.2.6.1. Historique	228
4.2.6.2. Conversion de l'énergie potentielle	230
4.2.7. Exercice : estimation de la production d'une usine marémotrice simple effet	239
4.3. Bibliographie	240
Chapitre 5. La production d'origine thermique	245
Jonathan SPROUTEN	
5.1. Introduction	245
5.2. La géothermie	245

5.2.1. Introduction	245
5.2.2. La ressource	246
5.2.3. Caractéristiques des fluides	247
5.2.4. Le principe des centrales géothermiques	249
5.2.5. La conversion thermodynamique.	251
5.2.5.1. Introduction. Le cycle de Carnot.	251
5.2.5.2. Le cycle de Rankine et de Hirn.	254
5.2.5.3. Choix du fluide caloporteur.	255
5.2.6. La turbine à vapeur	256
5.2.7. L'alternateur	258
5.2.7.1. Schéma équivalent et modélisation	259
5.2.7.2. Contrôle des puissances actives et réactives	262
5.3. La production solaire thermodynamique.	265
5.3.1. Introduction	265
5.3.2. Principe de la concentration.	265
5.3.3. Le captage cylindro-parabolique	270
5.3.4. La tour solaire	273
5.3.5. Le captage parabolique.	274
5.3.6. Comparaison des productions solaires thermodynamiques	276
5.4. La cogénération par biomasse	276
5.4.1. Origine de la biomasse. Intérêt énergétique.	276
5.4.2. Principe de la cogénération	277
5.5. Bibliographie	280

Chapitre 6. Problématique de l'intégration de la production décentralisée dans le réseau électrique 283

Benoît ROBYNS

6.1. D'un réseau centralisé vers un réseau décentralisé.	283
6.1.1. Le réseau de transport	283
6.1.2. Le réseau de distribution.	284
6.1.3. Les services pour le système électrique	286
6.1.3.1. Réglage de la fréquence	287
6.1.3.2. Réglage de la tension	289
6.1.4. Vers la décentralisation des réseaux	290
6.2. Tension de raccordement.	291
6.3. Contraintes de raccordement et vérifications d'usage	292
6.3.1. Réglage de la tension.	292
6.3.1.1. Raccordement au réseau de distribution	292
6.3.1.2. Raccordement au réseau de transport	293
6.3.2. Réglage de la fréquence	294
6.3.3. Qualité de l'onde électrique	295