

Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables

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



049800

②

Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables

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

hermes
Science
—publications—

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. Énergie cinétique du vent	97
3.3. Turbines éoliennes	99
3.3.1. Éoliennes 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. Éoliennes 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. Éoliennes 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. Éolienne 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. Éolienne à vitesse variable	128

3.8.1. Intérêt	128	4.1.3.5. Rendement des turbines hydrauliques.	172
3.8.2. Classement des structures selon les technologies de machines	129	4.1.3.6. Modèle d'une turbine hydraulique.	173
3.8.3. Principe de dimensionnement des éléments	132	4.1.4. Conversion électromécanique pour la petite hydroélectricité	174
3.8.4. Réglage des puissances actives et réactives.	134	4.1.4.1. Fonctionnement sur charges isolées	174
3.8.5. Aérogénérateurs basés sur une machine asynchrone à double alimentation	137	4.1.4.2. Fonctionnement couplé au réseau	176
3.8.5.1. Machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation	137	4.1.4.3. Fonctionnement à vitesse variable.	176
3.8.5.2. Caractéristique de fonctionnement d'une éolienne basée sur la machine asynchrone à double alimentation	140	4.1.5. Exercice : petite centrale hydroélectrique au fil de l'eau	177
3.8.6. Aérogénérateurs basés sur une machine synchrone	142	4.2. L'énergie hydraulique de la mer	186
3.8.6.1. Eoliennes de grande puissance	142	4.2.1. Energie des vagues	186
3.8.6.2. Petit éolien.	148	4.2.1.1. Origine et description des vagues	186
3.9. Fermes d'éoliennes	150	4.2.1.2. Potentiel	189
3.10. Exercices	152	4.2.1.3. Ressource mondiale	190
3.10.1. Eolienne à vitesse fixe	152	4.2.2. Energie des courants océaniques continus	190
3.10.2. Caractérisation d'une turbine et estimation de la puissance générée	154	4.2.2.1. Description du phénomène des courants	190
3.10.3. Eolienne de forte puissance à vitesse variable	158	4.2.2.2. Potentiel	192
3.10.3.1. Fonctionnement nominal en négligeant toutes les pertes	158	4.2.3. Energie des marées	193
3.10.3.2. Fonctionnement nominal en considérant les pertes	159	4.2.3.1. Phénomène des marées	193
3.10.3.3. Fonctionnement à puissance réduite (vent faible) en négligeant toutes les pertes	160	4.2.3.2. La hauteur de marée	194
3.10.3.4. Fonctionnement à puissance réduite en considérant les pertes	160	4.2.3.3. Le courant de marée	196
3.11. Bibliographie	161	4.2.3.4. Potentiel	196
Chapitre 4. L'hydroélectricité terrestre et marine : houle et marées	163	4.2.4. Production houlomotrice, houlogénérateurs	198
Benoît ROBYNS et Antoine HENNETON		4.2.4.1. Récupération de l'énergie primaire	198
4.1. L'hydraulique au fil de l'eau.	163	4.2.4.2. Conversion électromécanique à débattements limités linéaires.	202
4.1.1. L'hydroélectricité	163	4.2.4.3. Conversion électromécanique rotative	209
4.1.1.1. Historique	163	4.2.4.4. Les caractéristiques de la production électrique.	218
4.1.1.2. Principe de l'hydroélectricité.	164	4.2.5. Production par les courants marins.	219
4.1.2. Petite hydroélectricité	166	4.2.5.1. Système de conversion mécanique : l'hydrolienne	219
4.1.3. Turbines hydrauliques	168	4.2.5.2. La conversion électromécanique.	220
4.1.3.1. Turbine Pelton	169	4.2.5.3. Comparaison entre la production éolienne et hydrolienne.	227
4.1.3.2. Turbine Crossflow	170	4.2.6. Production marémotrice	228
4.1.3.3. Turbine Francis	170	4.2.6.1. Historique	228
4.1.3.4. Turbine Kaplan	170	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 SPROOTEN	
		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

6.3.3.1. Harmoniques de courant	295
6.3.3.2. Fluctuations de la tension	296
6.3.4. Puissance de court-circuit	297
6.3.5. Protection du système électrique	297
6.3.6. Couplage des installations de production au réseau	298
6.3.7. Autres contraintes	299
6.3.7.1. Participation à la reconstitution du réseau	299
6.3.7.2. Programme de fonctionnement de l'installation de production	299
6.4. Limitations du taux de pénétration	300
6.4.1. Participation aux services système	300
6.4.2. Déconnexions intempestives	300
6.4.3. Prévion de la production	301
6.4.4. Capacité d'accueil du réseau	302
6.5. Perspectives pour une meilleure intégration dans les réseaux	302
6.5.1. Actions au niveau des sources	303
6.5.2. Actions au niveau des réseaux	305
6.5.2.1. Traitement des congestions	305
6.5.2.2. Réseaux intelligents (<i>Smart Grid</i>)	307
6.5.2.3. Architecture des réseaux	308
6.5.2.4. Services mutualisés ou multiples du stockage	310
6.5.3. Actions au niveau des consommateurs	311
6.5.3.1. Bâtiment à énergie positive (commerciaux, quartiers, habitat, micro-réseaux)	311
6.5.3.2. Véhicules électriques	313
6.6. Bibliographie	313

Index	317
------------------------	------------

Les questions de développement durable et de projection des besoins futurs favorisent l'apparition de nouvelles technologies de production d'énergie et entraînent un changement de comportement des usagers.

Ce livre contribue à une meilleure appréhension de ces technologies émergentes de production d'électricité. Il analyse leurs enjeux, leurs sources et leurs moyens de conversion électrique. Suivant une approche didactique et générale, cet ouvrage présente :

- les systèmes de production d'électricité à partir de ressources énergétiques renouvelables des petites aux moyennes puissances (jusque 100 à 200 MW),
- les notions électrotechniques de base nécessaire à la compréhension des caractéristiques de fonctionnement de ces convertisseurs,
- les contraintes et problèmes d'intégration dans les réseaux électriques de ces moyens de production.

Les auteurs

Benoît Robyns est professeur et directeur de la recherche à l'École des Hautes Etudes d'Ingénieur de Lille (HEI), et responsable de l'équipe RESEAUX du laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance de Lille.

Arnaud Davigny est docteur et enseignant-chercheur à l'École des Hautes Etudes d'Ingénieur de Lille (HEI).

Bruno François est professeur à l'École Centrale de Lille.

Antoine Henneton est docteur et responsable de la recherche de HEI Campus Lille.

Jonathan Sprooten est docteur, enseignant-chercheur à HEI entre 2007 et 2011, et actuellement membre du Département Power System Security Assessment de Elia en Belgique.

hermes
Science
— publications —

www.hermes-science.com

978-2-7462-2489-6



9 782746 224896