

14591

Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables



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

Hermès
Science
— publications —

Lavoisier

Direction éditoriale Jean-Claude Sabonnadière

COLLECTION SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENERGIE ELECTRIQUE
SOUS LA DIRECTION DE BERNARD MULTON

René Le Doeuff - M.E Zaïm, *Machines électriques tournantes de la modélisation matricielle à la mise en œuvre*, 2009.

Jean-Paul Louis, Emmanuel Hoang et Gilles Feld, *Actionneurs à courant continu et synchrone autopiloté choix, dimensionnements, commande d'axe un problème de synthèse*, 2009

Jean-Claude Sabonnadière et Nouredine Hadjsaid, *Lignes et réseaux électriques 4, exercices et problèmes*, 2008.

Jean-Claude Sabonnadière et Nouredine Hadjsaid, *Lignes et réseaux électriques 3, fonctionnement dans le cadre de la libéralisation des marchés*, 2008

Jean-Claude Sabonnadière et Nouredine Hadjsaid, *Lignes et réseaux électriques 2, méthodes d'analyse des réseaux électriques*, 2007.

Jean-Claude Sabonnadière et Nouredine Hadjsaid, *Lignes et réseaux électriques 1, lignes d'énergie électrique*, 2007.

R Perret *et al*, *Entraînements électriques 2*, 2007

Jaime Fandino *et al*, *Entraînements électriques 1*, 2006.

Hubert Razik, *La machine asynchrone à vitesse variable 2*, 2006

Hubert Razik, *La machine asynchrone à vitesse variable 1*, 2006.

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

6 Energie électrique a partir des sources renouvelables

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. Fonctionnement à puissance réduite 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	168
4.1 3.1 Turbine Pelton	169
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 SPROOTEN

5 1 Introduction	245
5.2 La géothermie	245

10 Energie électrique à partir des sources renouvelables

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	Prévision 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

Préface

Ecrire la préface d'un livre que l'on a « commandé » en tant que directeur de collection est un exercice un peu particulier .

J'étais conscient de l'ampleur de la tâche, lorsqu'en 2008, j'ai sollicité Benoît Robyns pour l'écriture d'un livre à vocation pédagogique, qui regrouperait, dans un seul volume, les connaissances synthétiques concernant les moyens de production d'électricité à partir des ressources renouvelables. Mais, je savais également que son environnement lillois était fertile. Il a su le prouver en réunissant une équipe compétente associant cinq enseignants-chercheurs dont l'expérience et la pratique sont internationalement reconnues, lui-même, Benoît Robyns, Arnaud Davigny, Bruno François, Antoine Henneton et Jonathan Sprooten.

Si la gestation fut longue (plus de 3 ans), elle révèle bien la difficulté et l'étendue du travail. Mais aujourd'hui, le résultat est là, et nous disposons d'un livre synthétique couvrant le large spectre des sciences et des technologies de la conversion en électricité des ressources énergétiques renouvelables.

Une introduction contextuelle présente l'immense potentiel des ressources renouvelables, ressources qui sont sans aucun doute les seules à offrir à toute l'humanité un avenir durable. Ensuite, les auteurs ont traité le sujet, de la façon la plus concise afin de permettre l'accessibilité de cet ouvrage à des personnes dont le niveau de formation scientifique est post baccalauréat. Ils ont mis en lumière les principes de conversion et les technologies associées suivants : photovoltaïque, éolien, hydraulique (solutions terrestres et marines, incluant houlogénérateurs et hydroliennes) et thermodynamique (biomasse, géothermie, énergie thermique des mers). En guise de conclusion, le dernier chapitre traite de l'intégration dans les réseaux d'une production très décentralisée.

Je remercie vivement les cinq auteurs de cet ouvrage pour leur ténacité et pour leur bonne volonté face à mes exigences (mes relectures scrupuleuses .) qui auraient pu les décourager ! Il faut admettre que, face à des sujets encore insuffisamment matures, la pédagogie adaptée à un public d'électriciens n'est pas encore stabilisée. C'est sans doute sur ce volet que leur effort a été le plus intense.

Aujourd'hui, la collection « Sciences et technologies de l'énergie électrique » s'est enrichie d'un nouvel ouvrage dont j'espère que le rayonnement sera à la hauteur de son ambition. Je suis convaincu qu'il constituera une référence pour la communauté du génie électrique et je souhaite surtout qu'il accélère la pénétration de ces technologies. Une meilleure formation, à la fois des enseignants et des étudiants, constitue en effet un incontournable vecteur pour que la France prenne sans plus tarder le train (à grande vitesse .) de l'énergie soutenable, afin d'assurer la durabilité, tant de son économie que de son environnement !

Bernard MULTON