

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	IX
1 • Introduction	1
1.1 Généralités	1
1.2 Énergie mondiale et changement climatique	2
1.3 Énergie éolienne	5
1.4 Options de conception	8
1.5 Parcs éoliens	11
1.6 Aspects économiques	13
1.7 Intégration et variabilité : les points essentiels	15
1.8 Développements futurs	20
2 • Systèmes électriques	23
2.1 Introduction	23
2.2 Principes de base	23
2.3 Alimentation électrique CA	31
2.4 Introduction aux systèmes électriques	37
2.5 Transmission de puissance	47
3 • Technologie éolienne	55
3.1 Introduction	55
3.2 Historique	55
3.3 Options de conception des grandes éoliennes	57
3.4 Extraction d'énergie et régulation de puissance	58
3.5 Éoliennes à vitesse constante	66
3.6 Éoliennes à vitesse variable	75
3.7 Limite de Betz	89

4 • Intégration de l'énergie éolienne aux réseaux électriques	91
4.1 Introduction	91
4.2 Démarrage du parc éolien	91
4.3 Régulation de la tension du réseau	93
4.4 Gestion de la puissance thermique/active	110
4.5 Gestion de la qualité de l'énergie du réseau	121
4.6 Performance du système en régime transitoire	123
4.7 Problèmes de niveau de défaut	133
4.8 Informations	135
4.9 Protection	136
5 • Fonctionnement des réseaux électriques	143
5.1 Introduction	143
5.2 Réglage puissance/fréquence	143
5.3 Intégration de sources éoliennes aux systèmes électriques	157
5.4 Équilibrage	216
5.5 Stockage de l'énergie/gestion de la charge	219
6 • Prévion de production d'énergie éolienne	231
6.1 Introduction	231
6.2 Introduction à la météorologie	232
6.3 Prévion numérique du temps	234
6.4 Prévion par modèle de persistance	236
6.5 Systèmes avancés de prévion de production éolienne	245
6.6 Conclusions	259
7 • Énergie éolienne et marchés de l'électricité	261
7.1 Introduction	261
7.2 Marché de l'énergie électrique	263
7.3 Équilibrage, capacité et services auxiliaires	266
7.4 Mécanismes de soutien	267
7.5 Coûts	269
7.6 Avantages	271
7.7 Investissement et risque	273
7.8 Évolution des marchés	274

8 • L'avenir	277
8.1 Introduction	277
8.3 Coexistence avec d'autres moyens de production bas carbone	279
8.4 Gestion de la demande	280
Annexe	283
1. La technologie FACTS	283
2. Référentiel technique pour le raccordement de parcs éoliens au réseau de transport	289
Bibliographie	303
Index	315

AVANT-PROPOS

Le développement de l'énergie éolienne pose, en termes de planification, exploitation et gestion des futurs systèmes de fourniture d'énergie, des défis que la libéralisation du marché de l'électricité depuis les années 1990 n'a fait que renforcer. Nous analyserons ici les principaux obstacles à l'intégration à grande échelle de l'énergie éolienne dans les approvisionnements électriques avant de nous intéresser à quelques solutions nées de la recherche en cours et de l'expérience de terrain en matière d'intégration de l'éolien aux systèmes électriques.

Le développement de l'éolien est favorisé à la fois par l'engagement européen d'accroissement de la part des sources d'énergies renouvelables dans l'approvisionnement électrique (20 % d'ici 2020) et par la baisse considérable du coût des équipements éoliens et donc de celui de l'énergie éolienne. Les coûts de production d'électricité d'origine éolienne sont aujourd'hui pratiquement les mêmes que ceux de l'électricité produite par une centrale à turbine à gaz à cycle combiné (TGCC) là où la vitesse moyenne du vent atteint au moins 8 m/s et l'éolien n'est grevé d'aucune hypothèque quant à la disponibilité et au coût à long terme de la ressource. Côté face, malheureusement, la production d'énergie éolienne est irrégulière et imprévisible. Dans l'incapacité de garantir des approvisionnements réguliers ou « fermes », les exploitants de parcs éoliens souffrent d'un handicap commercial sévère sur les marchés de l'électricité comme le BETTA (accords britanniques de vente et de transport d'électricité). Pour compenser ce handicap et stimuler la production d'électricité verte, certains pays ont mis en place un système de certificats ouvrant droit à l'obligation d'achat d'électricité produite à partir d'énergies renouvelables (ROC). Ce système garantit aux producteurs d'appréciables compléments de ressources financières et les incite à investir dans l'électricité dite verte. Il devrait permettre d'atteindre l'objectif des 10 %. En fait, l'Allemagne, l'Espagne et l'Irlande ont déjà atteint des taux de pénétration éoliens d'environ 5 % et le Danemark avait déjà atteint un taux de 20 % il y a dix ans.

Le présent ouvrage entend proposer une information aussi complète et variée que possible sur les principaux aspects de l'intégration de l'éolien. Il s'agit aussi bien de permettre à l'ingénieur mécanicien de comprendre la régulation de tension d'un parc éolien et les problèmes liés au maintien de l'alimentation en creux de tension que de permettre à l'ingénieur électricien d'appréhender les caractéristiques aérodynamiques des éoliennes. Il s'agit aussi d'expliquer à l'un et à l'autre le fonctionnement des marchés de l'électricité et, en particulier, de l'électricité d'origine éolienne.

L'introduction retrace l'essor remarquable de l'énergie éolienne depuis 1990, présente les différentes options techniques pour l'extraction de cette énergie, recense les problèmes posés par l'intégration à grande échelle de l'électricité d'origine éolienne aux réseaux et propose quelques solutions envisageables.

L'introduction au génie électrique proposée au chapitre 2 permettra aux ingénieurs non-électriciens de maîtriser les concepts présentés aux chapitres 3 et 4. Le chapitre 3 traite de la technologie des aérogénérateurs et particulièrement des éoliennes à vitesse variable. Le chapitre 4 traite de la connexion des parcs éoliens aux réseaux et de son impact sur la conception de ces réseaux, notamment en l'absence de méthodologies permettant de faire face aux fluctuations de la puissance fournie.

Le chapitre 5 porte sur la question cruciale de l'exploitation du système électrique face à l'imprévisibilité de l'éolien et à la difficulté à le réguler. Des solutions séduisantes se dessinent en matière de stockage de l'énergie avec des options très réalistes et économiques comme les centrales de stockage par pompage stockant la production excédentaire. Le chapitre 6 insiste sur la nécessité de la prévision de production d'énergie éolienne. Il fait valoir les progrès encourageants de la dernière décennie et notamment les prévisions d'ensemble, outil opérationnel fort utile en ce qu'il donne notamment aux gestionnaires de réseaux une indication de la fiabilité des prévisions. Enfin, le chapitre 7 décrit brièvement les principaux types de marchés de l'électricité, analyse les perspectives du marché de l'électricité d'origine éolienne, puis explique et analyse les principaux programmes de soutien aux énergies renouvelables.

Les contenus de l'ouvrage doivent beaucoup à un certain nombre d'ateliers sur l'« Exploitation des réseaux intégrant une part significative d'électricité d'origine éolienne » organisés dans le cadre du réseau de l'EPSRC (Conseil de recherche en ingénierie et en sciences physiques), devenu le réseau BLOWING (Intégration à grande échelle de l'électricité d'origine éolienne aux réseaux électriques). Ils reflètent de nombreuses discussions animées entre les auteurs et les membres du réseau, dont Graeme Bathurst, Richard Brownsword, Edward Clarke, Ruairi Costello, Lewis Dale, Michael Farrell, Colin Foote, Paul Gardner, Sean Giblin, Nick Goodall, Jim Halliday, Brian Hurley, Michael Jackson, Daniel Kirschen, Lars Landberg, Derek Lumb, Andy McCrea, Philip O'Donnell, Thales Papazoglou, Andrew Power et Jennie Weatherill. Janaka Ekanayake, Gnanasambandapillai Ramtharan et Nolan Caliao ont participé à l'élaboration du chapitre 3. Il convient également de mentionner le Dr Shashi Persaud, dont les travaux de doctorat, à Queen's University, à la fin des années 1990, ont contribué à l'élaboration du projet de réseau et qui a, par la suite, participé activement à sa gestion.

Dr. B. Fox, Belfast, novembre 2006.

■ Au sujet de la deuxième édition

La production d'électricité d'origine éolienne augmente sans cesse dans le monde et, notamment, en Chine et aux États-Unis où elle atteint 60 GW. La technologie dominante est celle des éoliennes à vitesse variable dont la puissance tend vers 10 MW. L'éolien offshore gagne également du terrain, notamment au large de

l'Europe du Nord-Ouest, le Royaume-Uni occupant la première place avec plus de 3 000 MW de puissance installée. Mais les coûts de l'éolien offshore demeurent élevés et l'objectif des dix prochaines années sera de les rapprocher de ceux du nucléaire.

Les résistances à l'éolien se développent presque aussi vite que l'éolien lui-même. Les critiques se concentrent sur l'impact visuel des parcs éoliens terrestres – ce qui se comprend dans les zones à forte densité de population. Et les opposants ciblent particulièrement le coût de l'éolien offshore, que justifie pour une large part le coût de l'innovation permanente sans laquelle l'offshore ne pourrait pas de développer.

Dans la présente deuxième édition d'Énergie électrique éolienne les chiffres ont été mis à jour et les auteurs mettent l'accent sur des réponses économiques aux défis posés par l'accroissement rapide des capacités de production. Ils prennent également en compte les limites à la pénétration de l'éolien, en espérant que cette nouvelle édition sera utile aux ingénieurs et techniciens et nourrira un débat rationnel sur les possibilités de contribution de l'éolien au développement d'un système durable d'approvisionnement en électricité.

Brendan Fox, Belfast, décembre 2013.