

風力発電と その電力システムへの連系

博士（工学） 七原 俊也 著

コロナ社

ま え が き

本書では、風力発電の概要、および風力発電の電力システムへの影響について述べる。これはいくつかの大学で実施してきた講義に肉付けして作成したものである。

筆者は、もともと電力システム工学を専門としてきたが、かれこれ30年来、風力発電の電力システムへの影響に関わる研究に携わってきた。その中でこの分野を学ぶのに手頃な書籍（特に和書）が少ないことを痛感してきた。それに応えるべく企画したのが本書である。

しかし、いざ執筆に着手してみると、これはきわめて難しい作業であることを再認識させられることとなった。まず対象とする分野が、風という気象現象から、風力発電装置という機械装置、さらには電力システムまできわめて多岐にわたる。しかも電力システムへの影響を論じるには、多岐にわたる影響の全般をカバーせざるを得ない。また近年の風力発電の導入拡大に呼応して、風力発電技術は日進月歩で進歩している。一方、電力システムへの連系に関わる技術課題やそれへの対策技術も変化しつつある。このような状況のもと、得ることができる限られた情報の中で、内容をどのように取捨選択するかも悩ましい課題であった。

結局、本書では風および風力発電装置から電力システムまでを扱うという分不相応な取組みを目指した。その中で特に以下の点に心を配った。

- 風、風力発電、電力システムの各分野の初学者にも（ある程度は）理解してもらえるようになっていねいな記述に努めた。
- できるだけ興味・実感がわくよう、可能な範囲で実際のデータを載せた。また、関連する具体的なエピソードを「コーヒールーム」で紹介した。
- 数式などの導出過程もできるだけ明記するようにした。

- 例えば、電気機器の教科書などでは補足的にしか扱われていないが、風力発電では重要度の高い誘導発電機などについて、詳しい説明を行った。
- 風力発電装置でなぜ同期発電機を電力システムに直接接続して運転しないのかなど基本的な事項についても、歴史的経緯にも触れつつ説明した。
- 風力発電を電力システムに大量に導入した場合に今後予想される技術課題については、研究レベルの内容を含めて記述した。

しかし、これらは浅学非才の徒には過ぎた試みであり、これらの目的を十分に達したとは思えない。また、本書は筆者の30年来の勉強の結果ではあるが、対象が広範にわたるため、誤りも少なくないと考えられる。ぜひとも読者の叱正をお願いしたい。

本書の執筆にあたっては、原稿全般にわたり河辺賢一 博士から貴重なご意見をいただいた。加えて松本光弘 氏、三田裕一 氏、早崎宣之 氏からは執筆にあたり多大な助力をいただくとともに、板井準 氏、山本将士 氏、荒井有美 氏からは図の作成などに助力をいただいた。さらに名前は挙げないが、関係する仕事と一緒に携わった多数の諸兄から学ばせていただいた内容が、本書の礎となっている。週末にいつもパソコンに向かっている筆者を我慢強く見守ってくれた家族とともに、お世話になった皆様に深く感謝の意を表します。

2020年6月

七原 俊也

目 次

1. 風力発電と電力システム

1.1 概 説	1
1.2 本書の構成	3
引用・参考文献	4

2. 風と風力発電の概要

2.1 風の有するエネルギーとベッツの法則	5
2.2 風車におけるエネルギー変換	7
2.3 風車のタイプ	9
2.4 風の性質	14
補 足	
2.1 ベッツの法則の導出	24
引用・参考文献	26

3. 風力発電装置と風力発電所

3.1 風力発電装置	27
3.1.1 風力発電装置の概要	27
3.1.2 風力発電装置の基本的な制御方式	32
3.1.3 風力発電装置の特徴	35
3.2 風力発電装置の発電性能	38
3.3 風力発電所	43

補 足

3.1 2 質点系の共振周波数を表す式 (3.5) の導出	48
引用・参考文献	51

4. 風力発電装置で用いる発電機と半導体電力変換装置

4.1 発 電 機	52
4.1.1 同 期 発 電 機	52
4.1.2 誘 導 発 電 機	62
4.2 半導体電力変換装置	79

補 足

4.1 送電線の送電電力を表す式 (4.4) の導出	82
4.2 発電機の動揺方程式を表す式 (4.5) の導出	83
4.3 二重給電誘導発電機における回転子電流の目標値	84
引用・参考文献	86

5. 発電機構成から見た風力発電装置の種類

5.1 タイプⅠ：誘導発電機直結方式	88
5.2 タイプⅡ：誘導発電機の二次抵抗制御方式	93
5.3 タイプⅢ：誘導発電機の二次励磁制御方式	94
5.4 タイプⅣ：同期発電機によるフルスケールコンバータ方式	98
引用・参考文献	102

6. 電力システムとその特性

6.1 電力システムの概要	103
6.2 電力システムの需給運用・制御	106
6.3 電力システムの系統運用・制御	114
6.3.1 潮 流 計 算	115
6.3.2 電圧・無効電力制御	121
6.3.3 電力システムに接続したさまざまな発電機の安定性	128

6.3.4	電力システムにおける事故波及	135
6.3.5	電力システムの信頼度	144
6.3.6	海底ケーブルによる送電	149
補 足		
6.1	送電線の電力潮流を表す近似式の導出	152
引用・参考文献		154
7. 風力発電を電力システムに連系した場合の影響		
7.1	電力システムから見た風力発電の特徴	156
7.2	分散形電源を電力システムに連系する際の要件	159
7.3	風力発電の連系に伴う局所的な影響	164
7.3.1	電力品質	164
7.3.2	保護協調	167
7.3.3	短絡容量	171
7.3.4	送電線の送電容量	175
7.4	風力発電の連系に伴う広範囲への影響	178
7.4.1	電力システムの需給バランス	178
7.4.2	電源脱落時などにおける周波数異常	190
7.4.3	事故時における風力発電装置の一斉脱落	195
7.4.4	風力発電の過渡応答と電力システムの安定性	201
補 足		
7.1	平滑化効果の理論	205
引用・参考文献		207

付 録

A.	パワースペクトル	211
B.	クロススペクトル	216
C.	風力発電の出力予測	220

索 引	225
-----------	-----

コーヒールーム

2.1 揚力形風車と抗力形風車の比較	11
2.2 風速のスペクトル	17
3.1 風力発電にとっての代表的な風速とは	40
3.2 実測データに基づく風速と発電出力の関係例	41
3.3 ウィンドファームの設備利用率の実績例	45
4.1 風力発電装置ではなぜ同期発電機を電力システムに直結しないのか	55
4.2 二重給電機の歴史	75
6.1 欧米で見直されている同期調相機	126
6.2 潮流過負荷の連鎖によるヨーロッパ大停電（2006年11月4日）	136
6.3 北海道胆振東部地震に伴うブラックアウト（2018年9月6日）	139
6.4 2003年8月14日の北米大停電	141
7.1 わが国における分散形電源の系統連系要件の変遷	162
7.2 インバータが主体の電力システムの技術課題：直流送電線で連系した 洋上風力発電装置群をつなぐ交流系統の例	174
7.3 ウィンドファーム出力における平滑化効果	179
7.4 非同期電源比率：アイルランドのアプローチ	192

1. 風力発電と電力システム

1.1 概 説

地球環境問題への関心が高まる中、この数十年の間に、風力発電の設備容量は急増している。図 1.1 にわが国における風力発電の設備容量の推移を、また、図 1.2 に海外の風力発電の設備容量の推移を示すが、国内外ともに風力発電容量は急増している。この趨勢は今後とも継続していくと考えられる。

このような設備容量の増大は、風力発電が有している以下の特長①～③が評価されていることと、風力発電の大形化や性能向上などの技術進歩がその誘因になっているものと考えられる。

- ① 二酸化炭素を排出しないクリーンエネルギーであること。
- ② 太陽起源の風が有している無尽蔵な国産エネルギーを用いていること。
- ③ 再生可能エネルギーを用いた発電方式の中では比較的、発電コストが安いこと。

一方、風力発電はエネルギー源として風を利用しているため、立地点が風況の良い地点に限られるとともに、以下のような課題①～③も有している。

- ① 風のエネルギー密度は低いため広い土地が必要である。また、多くのエネルギーを取得するには多数の風力発電装置が必要である。
- ② 風は、年オーダーから秒オーダーに至るまで、さまざまな時間スケールで見ても変動が大きい。また、例えば台風時に非常に強い風の吹くことがあり、風力発電装置はこれらに対応する必要がある。

2 1. 風力発電と電力システム

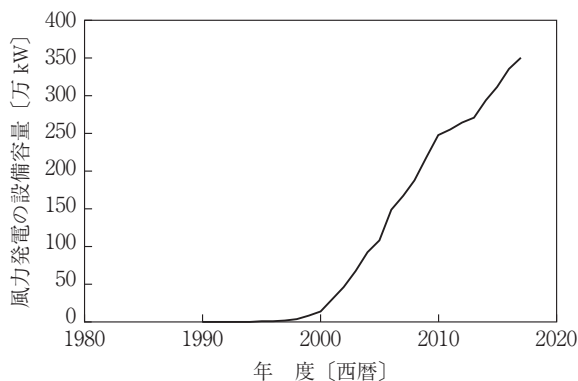


図 1.1 わが国における風力発電の設備容量の推移^{1)†}

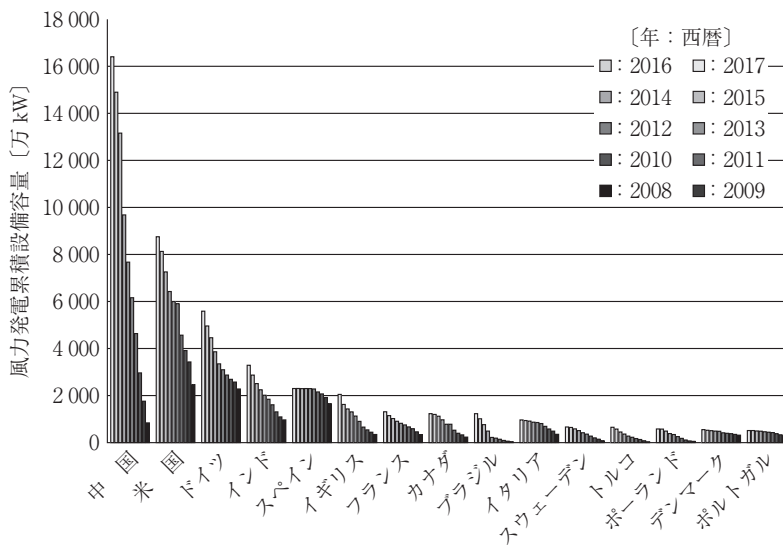


図 1.2 各国における風力発電の設備容量の推移²⁾

③ 騒音（低周波音を含む）、景観や鳥獣などの環境に対する影響への配慮が必要である。

また風力発電装置は、独立電源として蓄電池などと組み合わせて利用される

† 肩付き数字は各章末の引用・参考文献の番号を表す。

ような事例を除けば、電力システムに接続して運転し、その発電電力を電力システムに送電する。しかし、風況の良い地点は概して大需要地から遠隔の地にあり、そこからの送電線の送電容量はあまり大きくないことが多い。加えて風力発電は、出力変動が大きいこと、発電機として誘導発電機やインバータを用いることが多いことなど、火力発電、水力発電、および原子力発電などの在来型電源と異なる特徴を有している。

従来の電力システムは、これまで在来型電源の特性を前提として構築されてきた。したがって、風力発電はそれが大量に導入されると、電力システムへの影響が懸念される発電方式でもある。近年、国内外ともに太陽光発電の導入も急増しているが、太陽光発電も風力発電とおおむね似通った特徴を有している。したがって、電力システムは、風力発電や太陽光発電の増加に伴い変貌しつつあり、この傾向は今後さらに加速していくものと考えられる。

さらに、従来は陸上に設置されてきた風力発電が、最近は洋上への設置例が増加するなど、風力発電の導入形態も変化しつつあり、これに伴い風力発電の電力システムへの導入形態にも変化が現れつつある。

1.2 本書の構成

本書は、このような背景を踏まえ、風力発電の概要とその電力システムへの影響について説明する。第2章から第5章までは風力発電装置について、特に電気工学的側面に重点を置いて説明する。また、第6章で電力システムの概要について説明した後、第7章で風力発電システムを大量に導入した場合の電力システムへの影響について説明する。図1.3に、本書の全体構成を示す。

本書で扱う風力発電システムの電力システムへの影響は新しい技術課題である。一方、風力発電とそれを電力システムに接続する技術の進展も目覚ましい。このような中で、今後、風力発電などの導入量が増えた場合の影響を見通すことは至難の業である。このため特に第7章で述べる風力発電システムを大量に導入した場合における電力システムへの影響については、現時点での試論

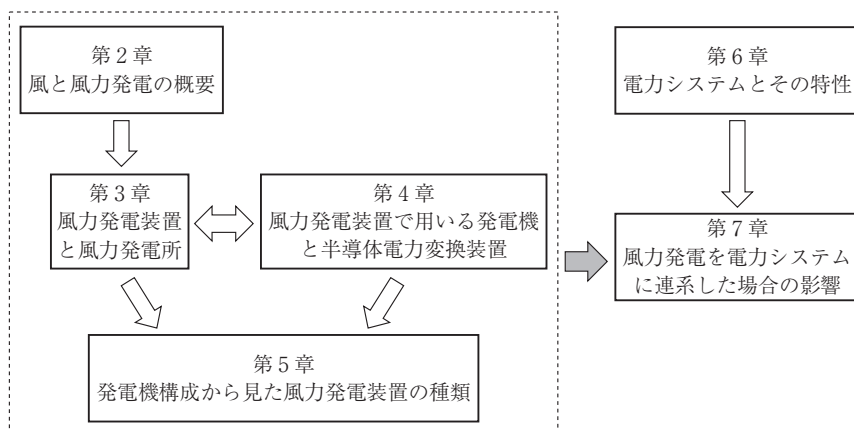


図 1.3 本書の全体構成

と考えていただきたい。なお、第 7 章などで風力発電の導入が進むヨーロッパの事例をいくつか取り上げているが^{†1}、これは今後わが国が直面するであろう技術課題について示唆する点があると考えたためである。

引用・参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）ホームページ^{†2}：日本における風力発電設備・導入実績
<https://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/state/1-01.html>
 - 2) IREA：Renewable Capacity Statistics
<https://www.irena.org/publications>
- （文献 1）、2）ともに参照日：2020 年 4 月 20 日）

† 1 電力システムの構成などは、国土の構成や歴史的経緯などさまざまな要因に左右され、各国で異なっている。このため安直な国際比較は慎むべき場合も多い。本書では国際比較にあたり、電力システムの違いなどに触れつつ説明したが、この点には配慮されたい。

† 2 本書に記載される URL については参照日時点のものであり、変更される場合がある。

索引

【あ】	
アクティブストール制御	35
アップウィンド方式	12
【い】	
一斉脱落	195
逸走	71
一般モデル	203
インバータ	54
【う】	
ウィンドウ	215
ウィンドファーム	43
渦	14
運転予備力	113
【え】	
永久磁石式同期発電機	53
【か】	
界磁	52
海底ケーブル	149
回転磁界	56, 74
風が持っているエネルギー	5
カットアウト	38
カットイン	38
過渡リアクタンス	58
ガバナフリー運転	111
過負荷の連鎖	175
可変速機	94
間欠電源	157
慣性応答	81, 111
基幹系統	103

【き】	
極数切換制御	74
近似ネットワーク	118
【く】	
空力トルク	28
グリッドコード	161
クロススペクトル	216
クローバー	98
クローバー回路	198
【け】	
経済負荷配分制御	113
系統運用	114
系統定数	112
系統連系規程	161
【こ】	
高速フーリエ変換法	214
高調波	166
後流	21
抗力	7
抗力形風車	10
抗力係数	7
固定速機	90
コヒーレンス	217
【さ】	
最大3日平均電力	107
最大出力点追従制御	96
最低周波数	190
最低出力	109

【し】	
軸ねじれ振動	36
事故時運転継続	169
事故波及	135
失速	8
収束	19
周速比	9
充電深度	188
周波数	107
周波数異常の連鎖	138
周波数変化率	190
需給運用	106
需給バランス	178
主軸	28
出力係数	6
出力制御	185
出力抑制	183, 187
出力予測	220
瞬動予備力	113
擾乱	158
初期過渡リアクタンス	58
自励式静止形無効電力補償装置	125
自励式変換装置	79, 152
需要の自己制御性	111
信頼度基準	146
信頼度制御	145
【す】	
ストール制御	34
滑り	63
滑り・電力特性	69

【せ】		【つ】	二次励磁制御方式	94
静止形無効電力補償装置	125	翼		
設備利用率	43		【は】	
セルビウス方式	79		背後インピーダンス	124
【そ】		【て】	配電線	103
増速機	28, 36	定態安定度	バックアップ電源	183
想定事故	146	テブナンの定理	ハブ	27
送電系統運用者	176	電圧安定性	パワーカブ	38
送電系統の構成	144	電圧異常の連鎖	パワースペクトル	15, 211
送電容量	147, 176	電圧高め解	半導体電力変換装置	79
速度三角形	8	電圧低め解		
ソフトスタート回路	90	電圧フリッカ	【ひ】	
【た】		電圧変動	ピッチ制御	33
タイプⅠ	88	電圧・無効電力制御	非同期電源	192
タイプⅡ	93	電源周波数制御	避雷針	29
タイプⅢ	94	電流制御型インバータ	比例推移	68, 93
タイプⅣ	98	電力システム		
ダイレクトドライブ	36	電力貯蔵設備	【ふ】	
ダウンウィンド方式	12	電力品質	風向・風速計	32
卓越風向	19	電力方程式	風車	27
タワー	27		風車間離隔	22
タワーシャドウ効果	35, 91	【と】	風速欠損	21
単一故障	147	同期安定性	風力発電所	43
単位法	49	——の崩壊	風力発電装置	27
単独運転	170	同期運転	フェーズ	217
単独運転防止	169	同期回転数	負荷周波数制御	112
短絡電流	125	同期調相機	負荷制限	190
短絡容量	125, 171, 173	同期発電機	負荷変化速度	109
短絡容量比	171	同期リアクタンス	物理モデル	220
【ち】		統計モデル	部分可変速機	94
地域供給系統	103	動揺方程式	プラットフォーム	48
地域要求量	113	ドライブトレイン	フルスケールコンバータ方式	98
着床式	48			
超同期セルビウス方式	79	【な】	ブレーキングチョッパ回路	199
潮流過負荷の連鎖	135	ナセル		
潮流計算	117		【に】	
直流送電	151	二次抵抗制御	プロペラ式風車	10, 12
		二次電池	分散形電源	159
		二重給電発電機	分路リクトル	125
		二重給電誘導発電機		
		二次励磁制御	【へ】	
		二次励磁制御法	平滑化効果	179
			平均絶対誤差	223
			並列コンデンサ	90, 125

べき指数	20			ヨー制御装置	29
べき乗則	20	【ゆ】		弱い系統	172
ベッツの法則	24	有効電力損失	120	【ら】	
		誘導機の等価回路	66	ランプ変動	183
【ほ】		誘導発電機	62, 130	乱流強度	12
保護リレー	167	——の二次抵抗制御方式	93	【れ】	
		誘導発電機直結方式	88	レイリー分布	22
【む】		【よ】		レセプタ	32
迎え角	7	洋上風力	47	連系	159
無効電力損失	120	揚水式水力	183	連鎖	135
無効電力注入	202	揚力	7	【わ】	
		揚力形風車	10	ワイブル分布	22
【も】		揚力係数	7		
モジュラーマルチレベル変換器	152	余剰電力	183		

【1】		【F】		【W】	
$1/\sqrt{N}$ 則	206	FRT 能力	196	WECC	204
【B】		【L】			
BTB 変換器	54, 78, 79	LVRT 能力	196		

— 著者略歴 —

1977年 京都大学工学部電気工学科卒業
1979年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了（電気工学専攻）
1979年 財団法人電力中央研究所入所
1984年
～85年 テキサス大学アーリントン校客員研究員（併任）
2000年 博士（工学）（京都大学）
2001年
～05年 東京工業大学大学院客員教授
2013年
～15年 東北大学大学院客員教授
2015年 東京工業大学大学院教授
2020年 東京工業大学名誉教授
2020年 愛知工業大学教授
現在に至る

風力発電とその電力システムへの連系

Wind Power Generation and its Interconnection to Power Systems

© Toshiya Nanahara 2020

2020年8月7日 初版第1刷発行



検印省略

著者 七原 俊也
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00935-4 C3054 Printed in Japan

(大井)



【JCOPY】 <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。