海外における風力発電の導入状況と電力システムへの影響

解説

キーワード

風力発電, 電力システム, 系統連系, 出力変動, 電力品質

七原 俊也

(財)電力中央研究所

1. はじめに

風力発電は追い風を受けている。たとえば、わが国では昨年(1999年)11月に北海道苫前町で初の民間大規模ウィンドパーク(容量20MW, 1MW×20機)が運転を開始した。また欧州ではドイツ、デンマークなどの国で風力発電導入が進むとともに、米国でも最近、1980年代以来の風力発電開発のブームを迎えている。

しかし電力システムの観点から見ると、風力発電は出力変動が大きい間欠電源である上に、系統から励磁電流の供給を受ける誘導発電機を用いることが多いため、電圧や周波数などの電力品質等に影響を及ぼすことが懸念される。ことに風力発電が大量に導入された場合の影響が懸念されるが、これについてはわが国での経験は非常に限られていることもあり、不明な点が多い。その影響を的確に理解するためには、風力発電の実運用の経験等が必要であることもあり、既に大量の風力発電を導入している諸外国の実態や経験が注目されている。

本解説は、これらの背景を踏まえ、欧米を中心に海外における風力発電の導入状況と系統影響についてまとめたものである。そこではまず海外における風力発電の現状と将来見通しについて述べ、次いで電力システムから見た風力発電の特徴を要約する。次に電圧と系統周波数への影響に焦点を絞り、風力発電の系統影響についての欧米での解析結果や経験について述べる。なお欧米の事情については、できるだけ公開の資料によるよう努めたが、一部の情報は面談内容によらざるをえなかった点には配慮されたい。

2. 海外における風力発電の導入動向

2.1 風力発電設備の現状

最近、風力発電の設備容量は、欧米を中心に著しい伸びを示している。すなわち図1に示すように、1998年の1年間だけを見ても、世界の風力発電設備容量は3割程度も増加している。国別の容量を見るとドイツ、アメリカ合衆国、デンマーク、インド、スペインの順で大きく、ドイツ、アメリカ合衆国、デンマークの風力発電容量(1998年末までの

導入量)はそれぞれ2,874MW, 2,141MW, 1,420MWに達している⁽¹⁾。

これに伴い、電源構成に占める風力発電の割合も増大している。表1に風力発電容量の大きい国における風力発電容量と総発電容量とを対比して示す。同表によれば、デンマークにおける風力発電の電源構成比率が高く、オランダとドイツがそれに次いでおり、特にデンマークでは風力発電設備が電源設備の10%強にも達していることが分かる。また風の強い地方、たとえばドイツ北部およびデンマーク西部の電気事業では、風力発電の電源構成比率が2割程度にも達していることもある。なおスウェーデンのゴトランド島などのように、島嶼部でローカル的に風力発電の電源構成比率が大きいこともあるが、その電力システムは内燃力発電主体の独立系統であったり、海底ケーブルで電力を供給しているなど、大連系系統とはやや異なる構成となっていることが多い。

これらの風力発電設備の増大の背景には、風力発電設備の低価格化、高信頼度化とともに、各国での種々の助成策の存在がある。本解説では、各国でどのような助成策が講じられているかなど政策的な側面については触れないため、それについてはたとえば文献(2)などを参照されたい。

2.2 風力発電設備の将来動向

欧州では再生可能エネルギー利用の一環として、風力発電の開発について高い目標を掲げている。すなわち風力発電の設備容量を、ドイツでは2005年に10,000MW、イギリスでは2010年に5,000MW、デンマークでは洋上立地(off-shore)だけでも2008年までに7,500MWとするなど、風力発電開発について野心的な計画を立てている。しかし一方では、陸上立地型風力発電は景観や騒音の面からパブリック・アクセプタンスを得ることが難しくなっている。このため、たとえばイギリスでは一昨年の新設は2機にとどまっている。今後は洋上立地に重点が移ろうとしているが、これについても立地問題と無縁ではないため、今後の展開には不透明な点がある。

一方、米国で1980年代にカリフォルニア州を中心に各地に風力発電設備が導入されたが、最近の開発の主流は、たとえばミネソタ州、アイオワ州、テキサス州など中西部に移ろうとしている⁽⁴⁾。同国でも、鳥類保護などの面から風力発電の建設に対しての反対運動がある⁽⁴⁾が、欧州に比べれば概して障害は少ないように見受けられる。

Recent Situation of Wind Power in Foreign Countries and Their Impact on Electric Power System

By Toshiya Nanahara, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry)

図1 諸外国における風力発電容量の増加⁽¹⁾

3. 系統影響の面から見た風力発電の特徴

本章では、次項以降で系統影響を議論するにあたって前提となる風力発電の一般的な特徴について、一部、海外の実情を交えながら記す。

3.1 電源として見た場合の特徴

風力発電の発電出力は、風という自然現象を利用したものであるため、電源として見ると次の特徴がある。

- 電力貯蔵装置を併設しない限り、出力の調整ができない。もちろん風力発電機を停止することはできるが、その場合にはエネルギーを無駄にすることとなる。
- 出力の現れ方は、年、日、時間、分などいずれの時間オーダーで見ても、きわめて確率的である。
- 一地点の風力発電出力を見ると、かなりの確率で出力が零となる。
- 風の強さは短い周期で変動するため、同じ自然エネルギー発電である流込み式水力の出力等と比べ、短周期

の変動が顕著である。

次節では、これらのうち風力発電で特徴的な出力変動に焦点を絞って、その特徴を述べる。

3.2 出力変動の問題

系統影響の面から見た風力発電の第一の特徴として、出力変動が大きいことがある。たとえば米国のウィンドファームでの経験によれば、数十ユニットからなるウィンドファームでも、日常的に、1分間に最大で4割強程度の出力変動があるとされている。図2に出力変動の一例を示すが、風力発電出力はいわゆる不規則振動的な様相を呈し、予測も容易ではない。風力発電の出力に変動が大きいのは、風自身に相当の変動がある上に、風の保有するエネルギーが風速の3乗に比例することに起因している。

しかし風には地点毎の違いも大きいため、複数の場所に風力発電機が設置されている場合には、各々の出力変動には不等時性も期待できる⁽⁵⁾。n台の発電機があり、各発電機の出力が独立に変動するなら、それらの合計出力はnに

表1 海外における風力発電容量と総電源容量⁽¹⁾⁽³⁾

(注) 1. 開発量に違いのある電源のみを示した。

2. デンマーク、オランダ、インドの総発電容量は1996年の値。

	風力発電容量	総発電容量	(A)/(B)
	1998年末	1998年末	
	(A)	(B)	
	(MW)	(MW)	(%)
ドイツ	2,081	119,808	1.7%
アメリカ合衆国	1,611	830,170	0.2%
デンマーク	1,116	10,730	10.4%
インド	940	96,803	1.0%
スペイン	512	48,204	1.1%
オランダ	329	18,280	1.8%
イギリス	328	72,498	0.5%
スウェーデン	122	34,536	0.4%

図2 風力発電の出力変動の例

比例するが、標準偏差は $\sqrt{n}$ に比例するため、変動係数(=標準偏差/期待値)は $1/\sqrt{n}$ に比例することとなる。すなわち短周期変動については、多数台となると変動自体は大きくなるものの、全体で見れば出力は安定化することとなる(平滑化効果)。ただし平滑化効果の効き方が変動周期によって異なる点には注意が必要である。たとえば1日以上の周期を有する変動については、数百km離れた地点の風力発電でさえ、かなりの相関を有する場合がある。

また風力発電の出力変動の他の特徴として、風車の回転周期に対応する1Hzオーダーの周波数の出力変動が含まれる点が挙げられる⁽⁶⁾。この出力変動はタワーの影に起因する気流の乱れなどに起因するものであり、欧州での経験によれば、その大きさは単機で見れば定格出力の2割程度に達することもあるとされている。この変動は電圧フリッカを引き起こす可能性がある。

3.3 誘導発電機利用に伴う問題

風力発電では、発電機として誘導発電機を利用し、それを直接に系統に連系する型が広く用いられている。誘導発電機の利用に際しては、以下の点に配慮する必要がある。

- 電力システムから励磁電流を得るため、誘導発電機は進相の無効電力を必要とし、しかも力率も低い。
- 起動電流が大きいと、系統の瞬時電圧低下をもたらす。起動電流を制限する必要がある。
- 単独運転状態となった時、自己励磁現象により過電圧等が生じる可能性がある。

なお最近では欧州では誘導機直結型とは異なる可変速タイプの風力発電の導入も進んでいる。これについては5.1節で触れる。

4. 風力発電連系の面から見た欧米の電力システム

風力発電の系統連系に関わる問題の背景には、多くの場合、一般に風力発電の適地はしばしば電力需要密度の低い地域であり、送電系統が弱いことがある。たとえば米国では中西部での風力開発が増える見込みであるが、同地方でも系統の弱さが風力開発のネックとなる可能性がある⁽⁴⁾と指摘されている。一般に欧米とも電力輸送設備の建設は遅れがちであり、特に米国では電力自由化に伴い送変電設備への設備投資が控えられる傾向にある⁽⁷⁾。このため電力輸送設備は将来さらに重潮流化すると予想されるが、これも将来の風力発電開発に影響を及ぼす可能性がある。

また最近の欧米における電力自由化は、次のような点でも風力発電に影響を及ぼしている。すなわち、たとえばスウェーデンでは風力発電の購入価格が昨年より電力市場の価格にリンクするように変更されたし、米国では周波数調整や電圧調整など補助的サービス(ancillary service)と風力発電の関係について検討が始まっている⁽⁸⁾。

なお第2章に述べた欧州での風力発電の増大の背景には、数万kWオーダーのウィンドファームが開発されるなどウィンドファーム自体の大規模化がある。従来の小さなウィンドファームは10～30kVなどのいわゆる中圧(medium volt-

age)系統に連系されることが多かったが、大規模なウィンドファームは110kV、132kVなどの送電系統に連系されるようになってきている。将来、洋上立地が進むようになると、さらに大規模化と上位電圧への連系が進むと考えられる。風力発電は分散型電源と位置づけられることが多いが、このように集中型電源の様相を呈するようになってきていることには注意が必要である。

5. 風力発電の系統影響

本章では、風力発電の系統影響として電圧問題と周波数変動の2つを取り上げ、一般的な特徴と欧米事情を紹介する。

5.1 電圧問題

風力発電では、風力発電の出力変動が大きいこと、誘導発電機を利用することが多いこと、また弱い系統に連系されることが多いことから、連系にあたってローカルの電圧問題が懸念される。

風力発電の連系に伴う電圧問題は次の3つに大別できる。

- 風力発電からの逆潮流による静的な電圧変動。誘導発電機を利用し無効電力補償が十分でない時には、有効電力潮流と無効電力潮流が逆方向となることもある。この場合、電圧が上昇するか低下するかは送電線のR/X比にも影響される⁽⁹⁾。
- 風力発電の出力には、1Hzオーダーと周期が短く、かつ相当の大きさの変動が含まれることがあるため、電圧フリッカが問題となることがある。
- 起動時に、大きな突入電流のため、系統の瞬時電圧低下を引き起こすことがある。

欧米での経験によっても、風力発電の大量導入に伴う連系問題として、特に脆弱な系統での電圧問題が課題となることが多いとされている⁽¹⁰⁾。そこでは逆潮流に伴う静的な電圧変動が問題となることが多く、次いでフリッカが問題となっている。起動時の瞬時電圧低下については、パワーエレクトロニクス素子を用いたソフトスタートなどを用い起動電流を制限するとともに、ウィンドファームでは複数台の同時起動を避けるよう制御していることなどにより、問題となっている例は少ない。

電圧問題への対応のためには、調相設備の設置を含む系統の増強などが必要となる場合がある。また風力発電による潮流増に対応するために系統増強が必要となる場合もある。ほとんどの欧州諸国では、系統で問題が予測される時には、風力発電事業者の負担による系統増強が前提とされている。ただし場合によっては、必要な時に風力発電出力を制御(風力発電機を停止)するという条件を付し風力発電機を連系することもある。

また最近、欧州では、系統問題の緩和も視野に入れつつ、可変速風車の設置される例が増えている。可変速風車は、主回路に交流一直流一交流の変換装置を設けることにより、または発電機を低周波数の交流で励磁することにより、風力タービンの回転数を変更可能とするものである。これにより風力発電出力の短周期変動の緩和が可能となるとも

に、風力発電により無効電力の供給・調整も可能となる。

なおスウェーデンのゴトランド島では、昨年、電圧問題に対応するために自励式変換装置を用いた直流送電(ABB社のHVDC Light, $\pm 80\text{kV}$, 50MW)が設置された。同設備は、多数台の風力発電に起因する電圧フリッカ対策として設置されたものである。同設備では、島内の潮流制御を行うとともに、SVC(静止形無効電力補償装置)と同様に高速の電圧制御を行っている。

5.2 周波数問題

風力発電の出力変動は大きいので、それが大量に導入された場合には、それが需給制御ひいては系統周波数に及ぼす影響が懸念される。風力発電は昼夜の別なく発電を行うので、一般に需給制御・運用の観点からは、風力発電出力の電力需要に対する比が大きくなる深夜軽負荷時に厳しい状況となる。電圧問題がローカルの問題であるのに対し、需給制御ないしは周波数問題は、運転予備力や周波数調整容量などとも関係した系統全体の問題となる。このため、全系への風力発電の導入量との関係で議論されることも多い。

米国では、この問題について1980年代に複数の検討がなされてきたが、最近では中西部での風力開発の進展を受け同問題が再び関心を集めつつある。一方、欧州ではEUで研究プロジェクトが組織され、検討が行われてきた。これらについては、検討結果を調査・整理した報告がある⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ため、本解説ではその概要を紹介することとした。

文献(10)は、EU大での研究プロジェクトのもと欧州各国が行ったシミュレーション解析等の結果をまとめたもので、風力発電容量が年最大電力の約4%以上となると部分負荷運転の火力機台数を増やし周波数調整容量を増すなど、対策の必要が生ずるとしている。またこの比率は、最低負荷の大きさなど負荷パターンの特徴や、一定出力運転を行う電源の比率など電源構成の違い等の要因に左右されることを指摘している。さらに風力発電の出力をどの程度の精度で予測できるかも、これに影響するとしている。

一方、文献(11)では、需給制御・運用について需給のアンバランス(地域要求量, AR)の変動、軽負荷時の余剰電力の発生、発電コストへの影響、特殊な気象条件のもとでの風力発電出力の急変の可能性など、様々な観点から行った検討結果を整理している。それによれば、多くの検討結果は、風力発電が系統負荷の5%程度以下である限り問題を引き起こすことは少ないという点で一致していることを明らかにしている。ただし系統影響の大きさは負荷パターンや電源構成などとともに、風力発電の発電パターンにも大きく影響されるため、風力発電パターンについて知見を蓄積することが重要であることを指摘している。

第2章ではデンマークなどの国で風力発電の電源構成比率が大きいことを述べたが、そこでの比率は上記の比率4%ないしは5%を上回っている。そのためこれらの国の事情が注目される。しかしこの辺りの事情を明らかにするには、個々の系統の状況を十分に理解した上で分析することが必要となる。たとえばデンマークでは、他国との系統連系が密で

あり、しかも連系系統全体から見た同国の系統容量が小さいことから、需給制御の一部を他の系統に依存するなどにより、風力発電容量の増大に対応している模様である。

なお需給運用・制御の面からは、風力発電出力の予測も重要な課題である。これについてはいくつかの国で試行されているが、精度的にはまだ改良の余地が大きいように見受けられる。

6. むすび

本解説では、海外における風力発電の導入状況と系統影響について述べた。海外の情報からわが国への示唆を探る場合、各国の事情の詳細に十分配慮する必要がある点には注意が必要である。

本解説に述べた海外事情の調査に際しては、資源エネルギー庁、新エネルギー・産業技術開発機構を始め、非常に多くの方のお世話になった。お世話になった皆さんに深く感謝の意を表することを記して結びとしたい。

(平成11年12月27日受付)

文 献

- (1) 新エネルギーデータ集(平成11年度版)新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1999年。
- (2) 明里史樹: 世界の風力発電の現状と海上風力発電の可能性, 海外電力, 1999年3月号, pp.17-27
- (3) 海外電気事業統計(1999年版), 海外電力調査会, 1999年8月
- (4) Wind power takes off, Electric Perspectives, Nov./Dec. 1999, pp.36-48.
- (5) たとえばG. McNerney, et al.: The statistical smoothing of power delivered to utilities by multiple wind turbines, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.7, No.4, pp.644-647, December 1992.
- (6) たとえばE. Bossanyi, et al.: Prediction of flicker produced by wind turbines, Wind Energy, 1, pp.35-51, 1998.
- (7) Electricity technology roadmap - 1999 summary and synthesis, Electric Power Research Institute, 1999.
- (8) Brendan Kirby, et al.: Electric industry restructuring, ancillary services, and the potential impact on wind, Proceedings of American Wind Energy Association, June 15-18, 1997, Austin Texas.
- (9) Torbjorn Thiringer: Power quality measurements performed on a low-voltage grid equipped with two wind turbines, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.11, No.3, pp.601-606, September 1996.
- (10) David Milborrow: Understanding integration, Windpower Monthly, Vol.9, No.9, pp.27-33, 1993.
- (11) Yih-huei Wan and Brian K. Parsons: Factors relevant to utility integration of intermittent renewable technologies, NREL/TP-463-4953 August, 1993.

七 原 俊 也 (正員) 1955年生まれ。1977年3月京都大学工学部電気工学科卒業, 1979年3月同工学研究科修了。同年4月(財)電力中央研究所入所。1984~1985年テキサス大学アーリントン校客員研究員, 1988~1990年科学技術庁科学技術政策研究所客員研究員。主として電源計画, 需給計画, 分散型電源, エネルギーシステムに関わる研究に従事。工学博士。