

研究論文

風力発電出力変動の評価

Assessment of Output Changeability of Wind Power

茅 陽 一*

Yoichi Kaya

(原稿受付日2007年2月1日, 受理日2007年6月8日)

Abstract

Wind power has a serious problem when connected to the grid, which is output changeability with time. Since the total supply of the grid power should be always equal to the total demand the above changeability has to be compensated by other power resources within the grid. This paper indicates that the costs for the compensation are facility costs of compensating power plants which are equal to or even higher than normal power generation costs in terms of per kwh. Costs for batteries reducing output changeability of wind power are at this stage as high as the above external costs, so that novel methods for reducing the external cost are required for wind power to expand further as effective power sources in the grid in future.

1. 風力発電の進展と出力変動問題

風力発電は、再生可能エネルギーの中でも近年特に高いのびを示している。図1に示したのは最近の世界の動向¹⁾だが、今世紀に入ってから一年に30%近い驚異的なのびとなっていることがわかる。この動きをうけて、各国は風力の将来に大きな期待をかけており、全電力需要のうち、ドイツは2025年までに25%、デンマークにいたっては2030年までに50%を風力発電で賄う、ことを目標としている²⁾。

近年は、風力発電のコストは技術進歩もあって低下し、従来の系統電力単価にかなり近いものが出現している。更に、風力発電は二酸化炭素を排出しないクリーンなエネルギーであり、気候変動の抑制の立場からも資源的にもこのような期待がかかるのは理解できる。

しかし一方、風力発電はその出力が時間的に大きく変動する、という基本的な問題点を持っている。当然のことながら、電力は常に供給=需要の条件を満たさなければならず、供給の変動をそのままにすると上記の条件を満たすように電力系統の周波数と電圧が変動することになる。これを防ぐためには、系統内の他の発電施設、ないし蓄電施設が風力発電電力の変動を補償するよう出力を調整していく必要がある。図2に示したのは、ドイツの例で、上の図は風力1基の場合、下の図は約1,500基の風力発電出力を集約した場合の出力である³⁾。

これをみるとわかるように、風力発電はたとえ相当数の

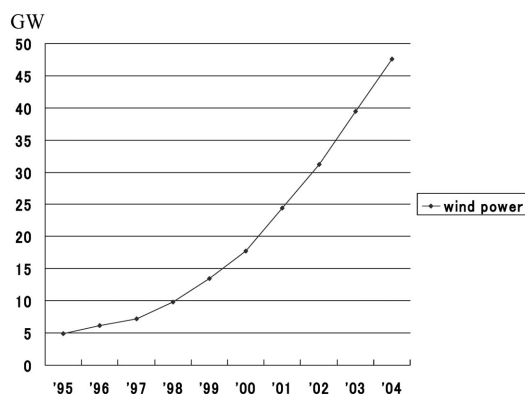


図1 世界の風力発電容量の最近動向

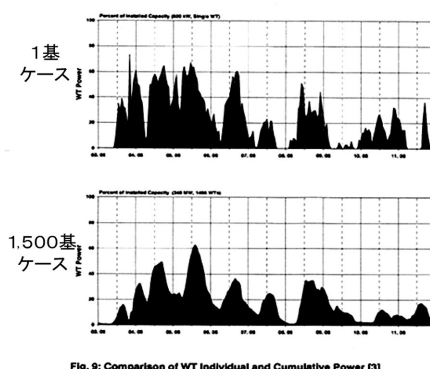


Fig. 2: Comparison of WT Individual and Cumulative Power [3]

図2 ドイツの風力発電出力の例：9時間データ

発電機をとりまとめても、出力の平滑効果は少なく、時間的に相当に大きな変動があることがよくわかる。したがって、ひとつの電力系統内に多数の風力発電が連携されているときは、その数の如何にかかわらずこの変動を調整する

* (財)地球環境産業技術研究機構副理事長 研究所長
〒105-0003 東京都港区西新橋2-23-1
E-mail: kaya@rite.or.jp

表1 風力発電の現状と将来目標

	現在の発電容量 (2004)	将来目標 (電力内のシェア)
ドイツ	16.6 GW	25 % (2025)
スペイン	8.3 GW	-----
米国	6.8 GW	6 % (2020)
デンマーク	3.1 GW	50 % (2030)
日本	0.9 GW	-----

機能を系統内の他の設備に依存しなければならないことがわかる。

このような風力発電の出力変動は系統にかなりの負担を与えることになり、系統連携風力発電の規模に制限を設ける電力会社も出ているが、この負担を数量的に明確に示した例は筆者の知る限りない。そこで本論文では、経済分析的な立場から、この出力変動が系統にどの程度の負担を与えているかを定量的に明確にすることを目的としている。

2. 風力出力変動時の系統運用コストの計算

この問題を考えるにあたって、次の2つの前提をおくこととする。

- 風力発電出力は系統需要と独立に不規則な変化をする。
- 経済的立場から定める電力系統の電源構成と基本運用方式は、風力発電とは別にあらかじめ定められたものとする。

前者は、風力が気象という自然要因のみで、電力需要がさまざまな人工的要因で定まることを考えれば妥当な仮定であろう。後者は、風力が系統規模にくらべ比較的小さいときには明らかに成立する。

ここで、次のように記号を定める。

Sw：風力発電出力 Swmax：風力発電容量
 Si：{i=1,2,...,n} 系統内通常電源出力 Simax：Siの容量
 fw：風力発電可変費 Kw：風力発電固定費
 fi：{i=1,2,...,n} Siの可変費 Ki：Siの固定費
 D(t)：系統電力需要 t：時間

簡単のため、系統予備率、割引率はいずれも0とする。

分析の手法はおおよそ次の方式による。ここでは、風力発電の出力変動そのものを扱うのではなく、風力発電を系統に接続した場合、接続のない場合に比べて系統の電力単価がどれだけ変化するかを検討する。すなわち、風力発電を導入したとき、需要が導入前と同一とすれば、系統電源

は風力発電貢献分だけ出力が減少するが、もし風力発電導入が系統の負担にならないときは、系統全体の発電単価は全く変わらないはずである。他言すると、この場合の発電単価の上昇分が風力発電導入の負担を示すこととなる。以下では、この考え方で検討を進める。

1) 風力発電のないときの系統コストJo

$$J_o = \sum f_i \int S_{io} dt + \sum K_i S_{imax} \cdots (1)$$

$$\text{ここで } S_{imax} \geq S_i \cdots (2)$$

$$\text{また } \sum S_{io} = D \cdots (3)$$

ここでS_{io}は風力のない場合のS_iを表す。

各電源のkWhあたりコストをP_i (i=1,2,...,n) とすると、

$$J_o = \sum P_i \int S_{io} dt \cdots (4)$$

であるから、P_iは(1)より

$$P_i = f_i + K_i S_{imax} / \int S_{io} dt \cdots (5)$$

2) 風力発電が系統連携された場合の系統コストJ

前記ii)の仮定から、風力発電が導入されても系統側の電源構成は変わらないので、Jは下ようになる。

$$J = f_w \int S_w dt + K_w S_{wmax} + \sum f_i \int S_i dt + \sum K_i S_{imax} \cdots (6)$$

$$\text{ここで } \sum S_i + S_w = D \cdots (7)$$

(7)で示したように、それぞれの系統電源の出力は風力の導入によって削減される。その削減量をS_{id}とすると

$$S_i = S_{io} - S_{id}; i=1,2,\dots,n \cdots (8)$$

$$S_w = \sum S_{id} \cdots (9)$$

このS_{id}は、系統電源の運用原則で定まる。

3) 風力発電の外部コスト

上記(6)式の第一、第二項は風力発電単独の総合コストで、そのkWhあたりコストをP_{w0}と書くと、この2項の和はP_{w0} ∫ S_w dtとあらわされる。これと(8)を(6)に代入すると

$$J = P_{w0} \int S_w dt + \sum \{ f_i \int (S_{io} - S_{id}) dt + K_i S_{imax} \} \cdots (10)$$

一方、定義からこの系統コストは風力負担コストと系統電源コストの和となる。ここで、系統電源のkWh単価が風力発電連携前と同じだとすると、これは明らかに(5)のP_iと系統電源分担需要 ∫ (S_{io} - S_{id}) dt を乗じて総和したものとなる。すなわち、(10)のJは下のように書けるはずである。

$$J = (P_{wo} + P_{ex}) \int S_w dt + \sum P_i \int (S_{io} - S_{id}) dt \cdots (11)$$

この (11) で、 $P_{ex} \int S_w dt$ の項は風力発電の系統連携によって生じた系統コストの増分である。これは風力発電が負担せねばならないコストで、風力発電の間接コスト、あるいは出力変動による風力発電の外部コストとよぶべきだろう。そして P_{ex} はその場合の外部コスト単価（単位 kWh あたりコスト）ということになる。(11) に (5) を代入し、それと (10) を等しいとおけば、 P_{ex} が求められる。結果は、

$$P_{ex} = \sum C_i \Gamma_i \cdots (12)$$

ただし、

$$C_i = K_i S_{imax} / \int S_{io} dt \cdots (13a)$$

S_i の kWh あたり固定費

$$\Gamma_i = \int S_{id} dt / \int S_w dt \cdots (13b)$$

S_i (i 種電源) の風力調整分担率

この (12) が、風力発電が自己の出力変動のために系統連携したときに負担すべき外部コストをあらわしている。簡単なケースとして、系統側電源で風力対応調整にたずさわる電源の種類がただ一つとすると、 i は 1 のみとなるので、 $\Gamma_i = 1$ となり、

$$P_{ex} = C_1 \cdots (14)$$

これは系統調整電源の kWh あたり固定費と等しい。(12) は、風力発電の容量が大きくなり、2 種以上の電源が調整にたずさわるようになったときは、風力出力変動の外部コストがそれら電源の調整分担量を重みとした平均設備コストになることをあらわしている。

3. 風力発電外部コストの解釈

(12) は、考えてみると当然の結果で、風力発電は不規則な出力で需要のピーク時にも出力がゼロとなる可能性があるため、系統側の従来電源容量は風力発電と無関係に需要ピークに対応する容量を必要とする。いいかえると、風力発電は kWh というエネルギー価値は有するものの、kW という設備価値がない電源と考えられる。したがって、その設備価値分を系統の従来電源に依存することになる。

実際、もし風力発電の出力がピーク需要を低減する性質を持った場合は、この外部コストはその分だけ低減されることが容易にわかる。すなわち、風力発電容量の α 分が系統需要最大値の低減に貢献すると仮定すると、風力発電の外部コスト P_{ex} は、(14) の $(1 - \alpha)$ 倍となることが容易に証明できる。太陽光発電も、風力発電と似た出力変動

を有するが、真夏の日照の大きいときに出力最大となるので、需要のピークと高い相関を持つ可能性があり、そのときは系統連携外部コストは軽減されることになる。

ここでは、風力発電の出力変動をその系統連携時外部コストという形で表現したが、系統全体の電力単価の上昇としてとらえることももちろん可能である。系統全体の電力単価は、風力連携前は

$$P_o = J_o / \int D dt \cdots (15)$$

風力連携後は

$$P = J / \int D dt \cdots (16)$$

となるので、この差を簡単に求めることが出来る。問題を簡単化するため、 $i = 1$ のケースについて計算すると、

$$P = P_o + \gamma \{(P_w - P_1) + C_1\} \cdots (17)$$

$$\text{ただし、} \gamma = \int S_w dt / \int D dt \cdots (18)$$

風力の電力貢献率

C_1 は系統電源の kWh あたり固定費にあたる。 P_1 は系統電源の kWh あたり総コストになる。

この (18) は次のことを述べている。仮に風力発電の直接コストが安くなり、系統電源と同一 ($P_w = P_1$) としても、系統電力単価は γC_1 だけ、つまり系統電源固定費に風力の電力貢献率を乗じた分だけ上乗せされることになる。すなわち、この部分が風力の出力変動による系統のコスト負担増であり、これは風力の比率があがるほど増大する。

4. わが国における風力発電の出力変動負担

上記の結果を、具体的にわが国にあてはめてみよう。(12) に示した外部コストを求めるには、風力発電の出力変動に対応する電源を特定しなければならない。すなわち、(13b) にある系統内各電源の分担率をすべて求めなければならないが、風力発電の出力変動を系統のどの電源が負担するかは時間帯によっても異なってくるので、この計算を精密に行うことは当該風力と連携系統電力の詳細なデータがない限り不可能である。ここでは、そうした精密な計算を行うのではなく、 P_{ex} のおおよその値を推定することに目的がある。そこで、風力発電が比較的小さく、 $i = 1$ 、すなわち出力変動に対応する調整電源が一種の場合を考えよう。従来の系統運用の状況を考えると、これは揚水発電か石油火力となる。しかし、風力発電の大きな利点は化石燃料を代替して二酸化炭素を削減できることであることを考え、石油火力を代替するものとする。わが国の現在の kWh あたり石油火力固定費は、戒能によると⁴⁾ 15 円/kWh

とかなり高い。これは一つには石油火力の稼働率が調整運転のためにかなり低いことに原因があると考えられる。なお、前述のように実際には時間帯に応じて複数の電源が風力の出力変動調整を分担する可能性があり、その場合は(12)のようにそれらのコスト平均をとることとなり、上記の値よりは若干低下する可能性がある。

一方、このコストは二酸化炭素代替の立場からはどうか。石油火力の発電効率を40%とすると、石油火力のkWhあたりCO₂排出はほぼ1kgとなるので、これからPexのコストがCO₂排出削減に支払われたとすると、コストは15,000円/ton CO₂となる。この値は、風力発電そのもののコストを含んでいないので、それを含めると当然これよりかなり高くなる。

一方、EUのCap and Trade方式で、2008年以後のCap超過罰金は、100ユーロ/ton CO₂であるから、上記の値はほぼこれと一致することになる。EUの場合、各企業はこの罰金を前提としてEU-ETSを利用した排出権取引でCO₂削減を行う状況にあることを考えると、この罰金額はEU各国のCO₂削減コストの上限、と考えられていることがわかる。一方、わが国の風力発電の場合、その外部コストだけでこの罰金額とほぼ同額になる、という上記の結果は、わが国の風力が二酸化炭素排出削減手段としてはかなり高価なものになっていることを示している。

5. バッテリーバックアップのコスト

上記のように、風力発電の出力変動は大きな外部コストに換算されるが、これを低減する一つの方策として従来から考えられているのが、バッテリーなどの蓄電装置で風力出力を平滑化することである。これは現実にもある程度すでに用いられている方法であるが、問題はそのような蓄電装置のコストがどの程度になるかである。

この検討のためには、与えられた風力発電に対してどの程度の容量のバッテリーが必要かを決定しなければならないが、その方式としては、まず風力発電の出力データを取り上げ、そこで蓄電放電をくりかえすおおよその周期Tを定め、この期間でのトータルの発電量Swmax Tδのうち、どの程度(α)蓄電すればこの期間の出力を平滑化できるか、を求めることになる。なお、ここでδは風力発電の稼働率である。ただ、このような長期の風力発電データは入手困難なので、とりあえず図2のドイツの例について、仮にT=8hとして概算を行ってみた。結果は、δ=0.26, α=0.45であった。実際にわが国の風力でTをどの程度にとればよいかは不明確だが、気象が日照と関係することを考えるとT=24hとするのが一つの考えであろう。そこで、わが国の比較的風況のよい地域での発電を考え、δ=0.25とすれば、1kWの風力発電の必要とするバッテリー容量

は $24\delta\alpha\text{ kWh}=6\alpha\text{ kWh}$ となる。鉛電池の場合、エネルギー密度はほぼ35Wh/kgなので、必要重量は $6\alpha/0.035\text{ kg}=170\alpha\text{ kg}$ である。一方、電気自動車用鉛電池価格はほぼ1,250円/kg⁵⁾なので、総バッテリーコストはこの両者の積となる。ここで、鉛電池の寿命を仮に3年⁵⁾とすると、この間の1kW風力の総発電量は $8,760\times 3\times\delta\text{ kWh}$ だから、出力1kWhあたりのバッテリーコストBは

$$\begin{aligned} B &= 170\alpha \times 1,250\text{円} / 8,760 \times 3 \times \delta\text{ kWh} \\ &= 16\text{円/kWh} \quad \alpha=0.5 \\ &= 10\text{円/kWh} \quad \alpha=0.3 \quad \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

この結果は、奇しくも前節で計算した風力出力変動の外部コストPexとほぼ同程度の額となる。なお、上記の結果にはインバータなどの変換装置のコストが一切含まれておらず、これを含めるともう少し高い価格となる。

ただ、上記の結果は、蓄放電周期を24時間に設定したことと多分に依存しており、数十%の不確実性があることも考慮すべきである。実際には、必要な蓄電装置の容量は、長期の風力出力データを詳細に分析しそれにもとづいて初めて正確に定められる。

上記の試算からわかるように、バッテリーを出力平滑化に用いたとしても、現状では必ずしも風力の外部コストが大幅に低減できるとは限らず、バッテリー併置が問題解決の答えになるとはいえないことを指摘したい。

6. 風力発電活用の方策

上記のように、風力発電はそのまま系統連携したとき、かなり大きな外部コストを発生することとなり、経済的にも系統運用上もかなり負担の大きい電源となることは明らかである。しかし一方、風力発電は有力な再生可能エネルギーであり、それを生かすことは資源的にも環境的にも大きな意義を持つので、そのための方策を考える必要がある。第一の方策はいうまでもなくバッテリー総コストの削減である。そのためにのぞましいのは単位蓄積エネルギーあたりで低コストのバッテリーの開発である。エネルギー密度の高いリチウム電池などはその意味で将来の有力な候補だろう。バッテリー総コスト削減のもうひとつの方策としては、対象となる風力発電の出力特性をあらかじめ詳細に検討し、需要ピーク時の出力を出来るだけ高めることを前提に必要な蓄電容量を出来るだけ少なくすることであろう。このような検討は従来まだ殆どされておらず、今後の研究を待ちたい。

第二の方策は、風力発電を系統連携せず、蓄電型の需要を中心に利用することである。たとえば、電気自動車、あるいは温水器などがこの範疇に入る。現段階ではこれらの需要機器を大々的に利用するシステムがないが、たとえば

プラグイン・ハイブリッド車の大幅普及などが起これば、このような新しい風力の利用システムが可能となる。

7. おわりに

風力発電は、その出力変動への対応のために、系統連携をしたとき、対応調整電源の設備コストと等しい外部コストを発生することになる。この値は、風力を二酸化炭素削減の手段と考えた場合は現在のEUの2008年以後キャップ超過罰金と同程度であり、きわめて高い。

したがって、今後の風力発電を拡大し再生可能資源としての資源環境性を生かすには、出来るだけ低コストでこの出力変動を軽減する方策を講ずるか、あるいは系統連携せず独立電源としてうまく利用する方策を探索するべきである。

なお、ここでの分析はあくまで静学的なもので、需要の

増加にしたがって連携風力発電が増大するような場合の経済インパクトは、別途論ずべき問題であることを付記する。

参考文献

- 1) (財)新エネルギー財団, 風力発電システムの導入促進に関する提言, (平成18年3月)。
- 2) 同上, p. 10.
- 3) EWEA-Altener Project AL/98/395, Study 4, Increasing the penetration of wind energy in the European Network, (Feb.2000)。
- 4) 戒能一成; 電源構成試算モデルと発電コスト比較について, (平成15年7月),
eneken.ieej.or.jp/japac/document/1310301120715_jp.pdf
(アクセス日 2007.2.13)
- 5) 「電気自動車のQ & A」,
www.cev-jari.jp/h18_kouhou/ev_qanda.html (アクセス日 2007.2.13)

協賛行事ごあんない

「第10回新・省エネルギーシンポジウムinかんさい2007」 ～地球温暖化といまみんなのできること～

〔日 時〕 平成19年11月21日(水) 13:00～17:00
〔場 所〕 ホテルモントレ大阪 7階「アマリエ」
(大阪市北区梅田)
〔主 催〕 (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構
(NEDO技術開発機構) 関西支部
〔後 援〕 中部経済産業局, 近畿経済産業局, 四国
経済産業局 (予定)
〔協 賛〕 (社)日本エネルギー学会, (財)大阪科学技
術センター 他 (予定)

〔問合せ先〕
(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構
(NEDO技術開発機構) 関西支部
〒530-0001 大阪市北区梅田 3-3-10
梅田ダイビル16F
TEL: 06-4306-5020 FAX: 06-6344-4575