

World Report from Spain

「風力発電大国」の実像 ～その背景に電力系統制御への挑戦～

石原孟

東京大学 大学院工学系研究科  
社会基盤学専攻 教授

スペインは、欧州でも最も風力発電の導入に熱心な国の一つといえる。これまで、風力発電を大量に導入できるのは、デンマークやドイツのように国際連系の強い電力系統を持つ国だけだとされてきた。ところが、スペインは国際連系が非常に弱い。にもかかわらず、2010年まで2068万kWの風力発電が導入されている。

スペインでも、デンマークやドイツと同様、固定価格買取制度や高い国家目標が風力発電の導入を促進したのは事実である。その一方で、風力発電の特性を考慮した電力系統の制御システムを用意したことも、大きな役割を果たした。風力発電出力予報の実施と、その予報に基づく風力発電所の出力抑制と電力調整によって、安定した電力系統の運用を実現した。こうした取り組みが、電力系統安定化対策費用の最小化も可能にしたのである。

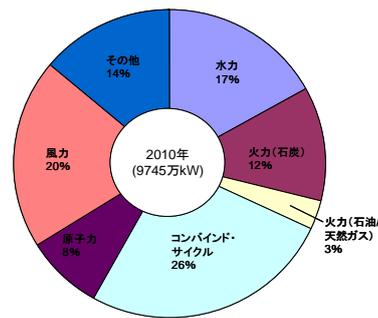
スペインの電源構成を見ると、最も多いのは火力であり、設備容量全体の41%を占めるが、再生可能エネルギーである風力と水力の合計も同37%に達している(図1)。2010年末でのスペインにおける再生可能エネルギーを除く発電設備容量は6384万kWであり、東京電力の6554万kWとほぼ同規模だった<sup>1)</sup>。

スペインにおける唯一の系統運用会社であるRed Electrica de Espana (REE社)によると、風力発電の設備容量は2000年の223万kWから2010年には約10倍の2068万kW<sup>3)</sup>まで拡大した(図1)。さらに2020年までに4500万kWの風力発電を導入する目標を掲げている<sup>3), 注1)</sup>。

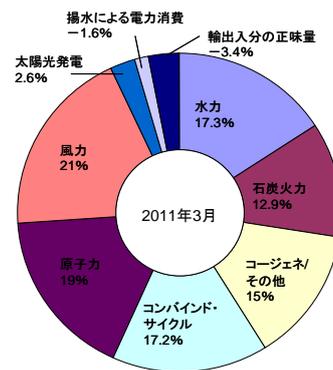
風力発電が最大の電源に

発電量で見ると、風力発電は今やスペインの

年間電力需要の16.6%を賄っている<sup>3)</sup>。しかも、時期によっては最大の発電源となっている。例えば、2010年11月9日には、1日の供給電力量(kWh)に占める風力発電量の比率は43%に達した<sup>2)</sup>。さらに、2011年3月における風力発電の発電量は同月全体の21%を占め、原子力発電の同19%を抜いて第1位の電源となった<sup>2)</sup>(図1)。



(a) 電源別設備容量



(b) 電源別発電量

図1 電源別設備容量と電源別発電量

(スペインの設備容量は日本の約53%である。2011年3月には、風力発電の1ヶ月の発電量が原子力発電を超えた。)

電力系統は東日本の系統に酷似

スペインは大西洋と地中海に囲まれている

ため、電力系統の国際連系が弱い。

スペインとフランスとの間の連系線の容量は、輸入が130万kW、輸出が50万kWであり、モロッコとの連系線の容量は輸入で60万kWと輸出で90万kWである(図2)4)、注2)。デンマークの場合は最大需要に対してほぼ100%の容量の国際連系線があるが、スペインでは最大需要の4412万kWに対して約4%と、非常に少ない。

発電設備の規模や外部との連系が弱い点で、スペイン、および同国と交流連系線で結ばれているポルトガルの電力系統は、日本の東京電力と東北電力のそれによく似ている。

スペインは風力発電適地と電力消費地域が一致していないという問題も抱えている。適地は、東部から北西のガリシア地方に偏在しているのに対して、電力需要はマドリード、バルセロナといった大都市に集中している(図3)。この点でも、東日本の電力系統とよく似ている。

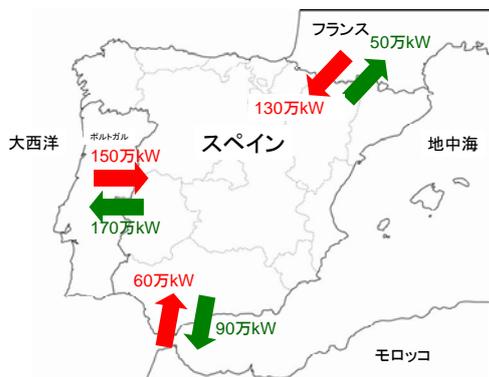
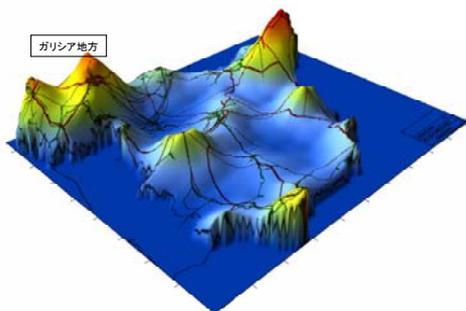
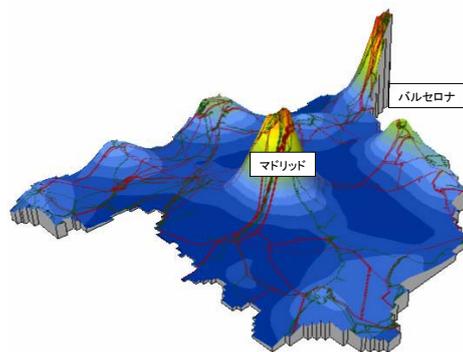


図2 フランスとアフリカとも電力を融通

(2010~2011年の冬期における、スペインの周辺各国との電力融通状況を示した。アフリカ大陸のモロッコとも、ジブラルタル海峡を越えて電力をやりとりしている。)



(a) 風力賦存量の分布



(b) 電力消費地域の分布

図3 風力発電の適地と電力需要の高い地域

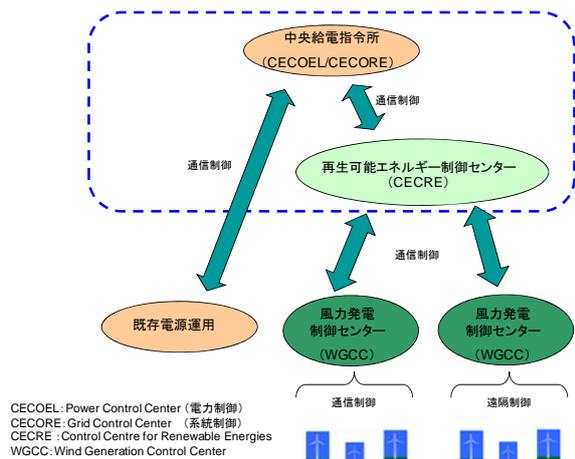
(スペインでの風力発電の賦存量分布(a)と、電力需要の分布(b)を3次元表示で示した。それぞれ任意単位である。風力発電の適地は、東部から北西のガリシア地方に偏在している。一方、電力需要はマドリード、バルセロナといった大都市に集中している。)

世界初の電力制御技術を活用

こうした点から、スペイン/ポルトガルの電力系統は、東日本の電力系統と同様、風力発電の大量導入に不利である。ところが、スペインの風力発電の設備容量は、東日本の89万kWの23倍もある。

この一見矛盾していると思える状況は、スペインが2006年から取り組んで来た「新しい挑戦」によって実現した。具体的には、再生可能エネルギー制御センター「CECRE(Control Center for Renewable Energies)」をマドリード北部近郊に設置し、世界初の技術と体制で電力系統の制御を実行し始めたのである5)。

CECREは、上述したような問題を抱えるスペインの電力系統において、その安定性を損なうことなく、再生可能エネルギーを最大限に導入することを目的としている。具体的には、風力、太陽光、小水力、バイオマスなどの再生可能エネルギーとコージェネレーションを対象とし、電力需要に応じてその発電電力の管理・調整を行う注3)。また、CECREは、風力を含む対象発電設備の状態をオンラインで監視・制御しており、スペインの電力系統全体を制御する中央給電指令所の一部として運用されている(図4)。



(a) 電力制御システムの概念図



(b) 再生可能エネルギー制御センターの様子

#### 図4 風力発電を含む電力系統制御システム

(スペインの電力系統制御システムの構成を示した (a)。同国の再生可能エネルギーによる発電出力は、従来の電力源とは別に「再生可能エネルギー制御センター」によって遠隔監視・制御されている (b)。同センターからの指令は、全国 21 カ所にある風力発電制御センターを介して各風力発電所に送られる。)

電力系統全体の運用に責任を持つ REE 社は、風力発電所の制御に加え、火力/水力/原子力発電所や国際連系も制御している。具体的には、風力発電出力の予報結果に基づき、毎日午前 11 時に翌日の調整電源(火力/水力/揚水)が十分かどうかの評価を行う。これとは別に、15 分ごとに更新される予報結果に基づき、5 時間先の調整電源の必要量の最終評価も逐次行っている<sup>8)</sup>。供給電力の優先順位は、CO<sub>2</sub>削減という観点から①風力、②他の再生可能エネルギー、③原子力、④石炭火力、⑤コンバインド・サイクル、⑥石油・ガス火力、⑦水力、⑧揚水(発電運転)、の順と決められている。

CECRE の傘下には、21 箇所の風力発電制御センター「WGCC (Wind Generation Control Center)」があり、中堅・大手発電事業者や電力の取引事業者により設置・運用されている。風力発電所の発電電力量、運用パラメータ(有効電力、無効電力、風速および気温など)の情報を取得して CECRE にその情報を伝達すると共に、15 分以内に CECRE からの制御指令を実行することが主な役割である。

CECRE は、ほぼリアルタイムで電力系統を監視・制御し、風力発電を最大に活用するために、「GEMAS (Maximum Admissible Wind Power Generation in System)」というプログラムを用いている。GEMAS の最大のポイントは、非常に高い精度で、風力発電による出力を予測できることである。予測が大きくとずれると出力の抑制量が増えるため、風力発電事業者の採算性を大きく左右するからだ。

具体的には、20 分ごとに発電電力・系統情報を計測・解析し、各風力発電所の最大発電可能電力を算出する。そして、WGCC を通じて各地にあるすべての風力発電所に制御信号を送ることで、風力発電出力の抑制(最大出力制限)を実行する<sup>注4)</sup>。GEMAS はこの抑制量をリアルタイムに算出するが、それを実際に計測された抑制量の値と常時照合し、次の予測値を補正に用いている(図5)。

#### 正確な出力予測で損失も低減

GEMAS では、REE 社が Carlos III University of Madrid と共同開発した「SIPREOLICO」と呼ばれる予報モデルを用いて風力発電出力予報を行っている<sup>9)</sup>。このモデルは、電力系統全体を対象として、スペインの既存の気象モデル「HIRLAM」による数値気象予報データとスペイン全土の 8 割の風力発電所の SCADA†のデータを基に、スペイン全土の風力発電出力の予報を行う。具体的には、風力発電量を 1 時間単位で 48 時間後分まで予測し、しかも 15 分ごとにそれらのデータを更新している。

REE 社は、2005 年に 24%であった 24 時間先の予報の誤差(平均出力によって無次元化さ

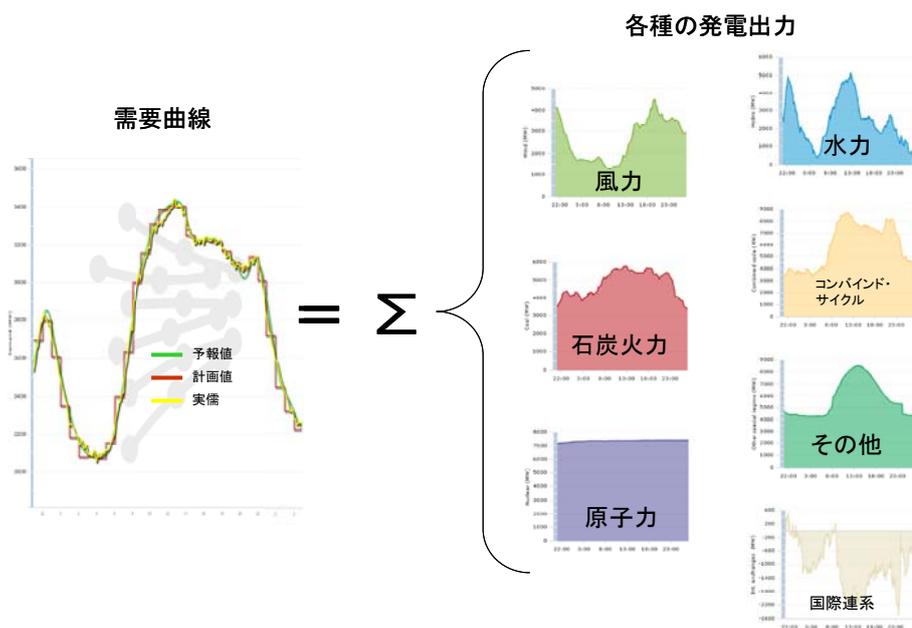


図5 電源ごとの出力曲線により構成される需要曲線

(スペインの2011年6月5日22:00~7日の2:00の需要曲線の予報、計画、実需の値と、電源別の出力の様子を示した。各電源は出力曲線が全く異なるが、足し合わせた結果が、需要曲線と重なるように、その出力を予報し、必要なら出力を抑制する。)

れた平均絶対誤差)を2007年に19%にまで低減させた<sup>7)</sup>。これは、ドイツにおける風力発電出力の予報誤差とほぼ同じ水準である<sup>注5)</sup>

これにより、風力発電出力の予報誤差を補うための調整電源を低減でき、その結果、電力系統安定化対策費の削減が可能となった。

### 導入するほど予報誤差は減る

風力発電出力の予報誤差を低減するには、予測技術の向上の他に、風力発電の導入量を増やすことも有効である。導入量の増大に伴って、各風力発電所の出力変動が互いに相殺する度合いが高まり、風力発電全体の出力変動が減少するためである。結果として、風力発電出力予測が容易になり、予測精度が向上する。ちなみに2万kW程度の風力発電所の出力の予測誤差は、定格出力で無次元化した場合で20%程度である。このことから、個々の風力発電所で出力調整を行うよりも電力系統全体で調整した方が、電力系統安定化対策費用の低減につながる事が分かる。

### 新制御技術で6000万kWが視野に

スペインにおける風力発電の導入は、今後も続く見通しだ。ただし、事業者にとっては、風力発電所の出力抑制(Power Curtailment)の頻度が、採算性に直結する重要な問題になる。特に、風力賦存量の高いガリシア地域とカステーリャ・イ・レオン地域では、電力系統の容量が相対的に低いため、発電出力抑制が行われる可能性も高い<sup>注6)</sup>。

REE社はこの問題を解決するために、「低電圧ライドスルー対策」<sup>†</sup>を含め、スペインの電力系統のピークおよびオフピーク時の風力最大許容発電電力を決めるための過渡安定解析<sup>†</sup>を行い、有効電力および無効電力の許容値を決定している<sup>2)</sup>。

従来は、風力発電所の系統連系点で10%以上の電圧変動が生じた場合には、瞬時に風力発電所を系統から解列<sup>†</sup>させる方式が取られていた<sup>9)</sup>。しかし、この方式では、大量の風力発電が連系された場合に、1ヶ所の系統事故に伴う電圧降下が瞬時にスペイン全土に波及してしまう。

そこで、2008年以降の新規の風力発電所には、電圧低下中も電力系統から解列せず、風力発電所の運転を継続させるための低電圧ライドスルー対策を付加することが義務付けられた。既設の風力発電設備に対しても、2012年を目処に対策を施すこととなっている。REE社は、こうした対策を行うことにより、風力発電の設備容量は6000万kWまで系統連系可能であるとの試算を行っている。

最後に風力発電のコストについて触れておこう。現在世界の大規模風力発電所の発電コストは10円/kWh程度である。ユーロ(116円/ユーロ)に換算すると、約8.6ユーロセント/kWhとなる。ただし、実際の総コストには、発電コストに加え、電力系統安定化対策費(出力抑制費用やインバランス費用など)が含まれる。

風力発電出力が電力需要を超えると予測される場合には、風力発電所の出力抑制によって制御する。ただし、その際に失われた風力発電の出力は、出力抑制費用として計上される。一方、風力発電による出力が予報を下回る、あるいは風力発電所が系統から解列された場合には、調整電源による発電が必要となる<sup>注7)</sup>。

スペインにおいて、2004年に5ユーロセント/kWhと予測された電力系統安定化対策費は、2007年には実際1.4ユーロセント/kWhにまで低減した<sup>8)</sup>。理由としては、風力発電の導入を進めたことで、出力変動がある程度平滑化されたこと、さらにCECREの設置により風力発電量の予報誤差が減少し、調整電源の運用が減ったことなどが挙げられる。

## 注釈

- 注1) スペインの面積は51万km<sup>2</sup>(日本比135%)、人口は4412万人(日本比35%)である。また供給電力は260TWh、日本の約1/3であるが、風力発電の設備容量(2068万kW)は、日本(230万kW)の約9倍である。
- 注2) ここで言う連系線の容量は物理的な制約に加え、各国の電力系統の安定性を考慮して季節別にヨーロッパ電力系統運用者ネットワークが決めたものであり、図中の数

字は2010年から2011年冬季の値である。

- 注3) 2007年6月30日から、スペインでは風力に限らず、設備容量が10MWを超える全ての発電設備はCECREにより直接制御されるようになった。
- 注4) なお、REE社ではリアルタイムで風力発電電力、需用電力、需給バランスおよび計画値と実測値を自社のホームページ(Red Electrica de Espana, <http://www.ree.es/ingles/home.asp>)に示している。
- 注5) ドイツでは、風力発電の予報誤差に、定格出力により無次元化された値を用いており、その値は5%程度とされている。設備利用率を25%と仮定した場合、定格出力により無次元化された予測誤差は、平均出力により無次元化された予測誤差の1/4になると換算できる。
- 注6) ただし、実際に2008年3月には低電圧対策により、大規模な出力制限が行われた際に失われた風力発電出力は全体の1%に留まっている<sup>8)</sup>。
- 注7) より詳しく説明すると、風力発電事業者またはその代理人は当日に先立つ30時間前(ただし、電力調整市場が開始される1時間前に予測値の修正を行うことが可能)に当日の1時間単位の発電電力量予測値をREE社に通知する。通知した予測値と実際の発電量との差が許容範囲を超える場合には差分に基づく費用の負担が求められ、インバランス費用として計上される。

## 用語説明

- † コンバインド・サイクル: ガスタービン発電と蒸気タービン発電を組み合わせた発電方式のこと
- † SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition): コンピュータによる監視制御とデータ収集システムのこと
- † 低電圧ライドスルー対策(low voltage fault ride through): 電力系統の電圧が低下したときに風力発電機を解列せずに運転を続けるために用いる装置のこと
- † 過渡安定解析: 発電機が脱調した場合に電力系

統に生じる電圧・電流等の過渡的な変化を解析すること。

† 解列：発電機を電力系統から切り離すこと。

#### 参考文献

- 1) Red Electrica de Espana, The Spanish Electricity System, Preliminary Report, 2010.
- 2) Red Electrica de Espana, <http://www.ree.es/>
- 3) Global Energy Wind Council, <http://www.gwec.net/>
- 4) Net Transfer Capacity Map, <https://www.entsoe.eu/resources/ntc-values/ntc-map/>
- 5) Red Electrica de Espaea, Integration of large scale wind in the grid - The Spanish Experience, 2008.
- 6) Rodriguez-Gracia, J., et al., Large integration of wind power: The Spanish experience, 2007.
- 7) Jose Luis Fernandez: Wind energy integration in Spain, The view of the TSO, 2009
- 8) Wind Directions, Integrating Europe's growing wind capacity, Vol.27, No.5, 2008
- 9) T. Dominguez, et al., Renewable energy supervision and real time production control in Spain, Int. Conf. on Renewable Energies and Power Quality, OCREPQ'08, pp. 1-6. 2008