

自然エネルギー発電のための 電力貯蔵技術



自然エネルギー，再生可能エネルギー，電力貯蔵，電力品質，需給
制御



高野 富裕

1. はじめに

京都議定書の発効に伴い，我々が消費するエネルギー源を，再生可能な自然エネルギーに転換していく努力が世界レベルで進められている。特に電力の世界では，風力発電機や太陽光発電システムなどの性能向上と価格低下が進んだこともあり，近年はこれら自然エネルギー発電の導入量が指数関数的に増加し続けている。

しかし発電出力を能動的に制御できず，出力予測も困難であるという特性は電力系統に外乱を与え，電圧変動や周波数変動などの問題を引き起こす可能性が指摘されている⁽¹⁾。一方で電力貯蔵技術は，蓄電池や電気二重層コンデンサ（キャパシタ），フライホイールなどの実用化により，実用性は増す一方である⁽²⁾⁽³⁾。本稿では，この自然エネルギー発電と電力貯蔵技術の融合について，最近の技術動向を踏まえて解説する。

2. 自然エネルギー発電の普及と課題

2.1 地球温暖化と自然エネルギー発電

「地球温暖化」関連のトピックスが，昨今マスメディアで頻繁に取り上げられている。人が快適な生活を送るために大量に排出する二酸化炭素（CO₂）など温室効果ガスが年々増加し，徐々に地球の平均気温を引き上げている。言うまでもなく，最も効果的な温暖化対策は，化石燃料の燃焼を減らすことである。しかし都市ガスやLPガスは言うに及ばず，我々の生活で欠かすことのできない電気の60%以上は，化石燃料を燃やす火力発電によって賄われている。水道もまた，上下水とも浄水処理の過程で大量の電力を消費する。

電気の使用量を半減できれば，かなりのCO₂削減が期待

たかの・とみひろ（正員） 1989年3月京都大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機（株）入社。先端技術総合研究所に勤務し，電力系統の運用・制御・保護，分散型電源の制御やマイクログリッド，新エネ関連の研究開発に従事。計測自動制御学会，CIGRE 会員。

できるが，我々の生活を考えれば，現状では難しい。そこで数年前より，世界レベルで，CO₂を殆ど発生させない自然エネルギー発電の導入が加速している。

2.2 自然エネルギー発電の種類

自然エネルギー発電としては，現在では風力発電と太陽光発電が代表格として最も注目されている。他にも，地熱発電や従来からの水力発電（海流発電，波浪発電も広義の水力発電と言える）も含まれる。近年ではバイオマス発電も含めた“再生可能エネルギー”と同じ意味合いで使われることが多い。また，コージェネ等も含めた“新エネルギー”という広範な概念もあり，風力発電と太陽光発電は，新エネの一部としての位置づけもある。これらのエネルギー活用は，2002年に制定された新エネルギー等の利用に関する特別処置法（RPS：Renewables Portfolio Standard 法）により，普及が加速した。

2.3 電力系統への影響

風力発電・太陽光発電は出力制御が殆ど不可能な発電である。厳密には，風力発電では羽のピッチ制御や解列により，太陽光発電ではパワーコンディショナ（直流—交流変換器）での調整制御により，出力抑制方向では若干制御可能であるが，逆方向は調整できない。基本的には天候任せであり，発電出力が分刻みで変化するため，電力系統に対して以下の2つの問題が発生する（図1）。

（1）電圧変動

特に配電系統で問題視されている。配電系統は国内では22/33 kV以下の電圧階級に該当し，主体は6.6 kVの高压系統，100/200 Vの低压系統である。それ以上は送電系統の扱いになる。配電系統に限らず，交流の電力系統でも，

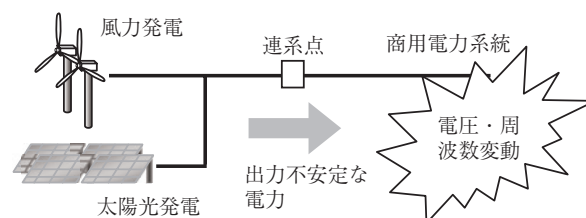


図1 自然エネルギーによる商用系統への影響

表 1 電力貯蔵装置の代表的な種類と特徴

	蓄電池	超電導磁気エネルギー貯蔵 (SMES)	電気二重層コンデンサ (キャパシタ)	フライホイール	揚水発電
エネルギー変換	電気化学	電磁気	静電気	運動 (回転)	位置
貯蔵効率	70 ~ 75%	80 ~ 90%	80 ~ 90%	80 ~ 90%	65 ~ 75%
一般的に使われる貯蔵期間	中長期 (分~日)	短中期 (秒~時)	短期 (秒~分)	短中期 (秒~日)	長期 (半日~)
貯蔵密度	大	中	中	中	小
サイクル寿命	2,000 ~ 4,500 回	1 万回 ~ (未知数)	10 万回 ~	10 万回 ~	(特になし)

注) 蓄電池の特性は、種類によって大幅に異なる。ここでは鉛、NAS 電池を参考とした。

直流回路でのオームの法則（電圧＝抵抗×電流）同様、流れる電流と線路抵抗に比例して電圧が変動する。特に配電線では、コスト面から細い線を使用しているため、線路抵抗が大きい。結果、系統に流れる電力の変動が、電圧変動として顕著に現れる。

(2) 周波数変動

特に送電系統で問題視されている。系統全体の需給バランスが一瞬でも崩れると、そのまま系統周波数の変動へとつながる。例えば供給過多になると、発電機から見た負担が減るので、発電機駆動力の制御遅れにより、回転速度が一時的に上昇するためである。通常は電力会社が調整用電源（火力や水力）で需給アンバランスを吸収するが、調整能力が低くなる夜間では、風力発電の多い東北や北海道では限界に達しつつある。また離島など電力系統規模の小さいエリアでは、需給調整用に相当の調整用電源を待機させる必要があり、クリーンな自然エネルギー発電を導入しても、逆に環境性や経済性を悪化させる要因となる。

2.4 電力価値の向上

風力・太陽光発電のみでは、火力発電並みの安定出力は不可能である。そのため、電力としての利便性は低く、したがって売電単価も低い。前日に発電計画を立てて取引市場に出せば 10 円/kWh 程度の売買価値であるが、“成り行き発電”の電力の価値は、3, 4 円/kWh 程度である。一般に風力発電の発電単価は 8 ~ 14 円/kWh（規模や助成金有無により異なる）、太陽光発電の発電単価は 30 ~ 60 円/kWh と言われており、RPS 証書（RPS 法に基づく新エネ発電の環境価値）の単価 5 ~ 7 円/kWh を加味して、大規模風力発電でかろうじて利益が拠出できる程度である。

2010 年政府普及目標値は、風力発電 300 万 kW、太陽光発電 482 万 kW であるのに対し、2005 年 3 月時点では風力 93 万 kW、太陽光 113 万 kW に留まっている。今後は、民間企業を対象とした発電事業への展開シナリオが必要である。

2.5 “制御不可能” から “制御可能” へ

系統への影響緩和と事業性の観点から、風力・太陽光発電は従来の成り行き運転から、出力制御可能な電源への変遷期を迎えようとしている。東北電力(株)では、2006 年度

より蓄電池併設型風力発電の一部として、出力一定制御型運転（要するに、前日発電計画を通知する計画運転＋短期出力変動制御）枠を試験的に設定・募集している⁽⁴⁾。この募集枠では、運用後 1 年間を実証試験として運用し、計画運転と変動抑制の仕上がりを評価することになっている。このような試みが今後増加していくと予想される。

3. 電力貯蔵技術

3.1 電力貯蔵装置の課題と現状

熱エネルギーは、断熱性を高めた貯湯槽などで容易に貯蔵できる。それに比べ電気エネルギー貯蔵は、表 1 に示すように化学エネルギーなど別形態へ変換して貯蔵する方式が主体であり、エネルギー変換効率、時間経過による放出ロスが大きい。数十年にも及ぶ技術開発により、低コスト化、長寿命化、エネルギー変換効率向上や放電ロス低減が図られ、ここ 10 年でようやく電力事業に応用可能な貯蔵装置が市場投入され始めた。

3.2 蓄電池の種類

蓄電池（二次電池）としては現状多種の電池が開発されており、その代表としては、鉛電池、ナトリウム硫黄電池 (NAS 電池)、レドックスフロー電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池などがある。一定エリア内の複数電源を一括制御し、エネルギー供給の自立性を高める、いわゆるマイクログリッドでは、鉛電池や NAS 電池を使った NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）委託事業による実証試験が進行中である^{(4)~(7)}。図 2 はその一つ、八戸市で試験中の「水の流れを電気で返すプロジェクト」で使用している鉛蓄電池（インバータ出力 ± 100 kW、蓄電容量 1440 kWh）である。電力用は屋外設置のため、同図のような盤に収納されており、相当の設置スペースと基礎工事が必要である。

3.3 電力貯蔵装置の評価側面

種々の電力貯蔵装置から適用装置を選択する場合、最も重要な要素は、使用目的に適した容量 (kW/kWh) とコストと言える。しかし、電力貯蔵装置は多種多様な個性を持っており、下記のように多面的に評価する必要がある。

・貯蔵効率：貯蔵装置本体の充放電効率＋インバータ効

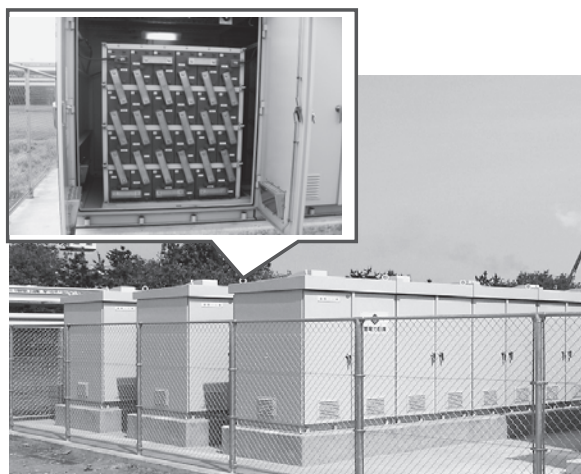


図2 電力・産業用蓄電池の例

率で評価する。平均的な充放電量やばらつきなど、運用によって効率は変化する

- ・貯蔵時間：貯蔵効率と関連するが、時間経過によっても放電ロスが発生する。
- ・密度：貯蔵密度（単位体積あたりの kWh 容量）と出力密度（単位体積あたりの kW 容量）がある。設置面積や重量に影響する。
- ・寿命：何回の充放電に耐え得るかのサイクル寿命と、経年劣化による寿命がある。
- ・環境・安全性：LCA（Life Cycle Assessment）による原料採取・製造から廃棄に至る環境影響評価が注目されている。また設置上、必要とされる安全管理体制や法規制などにも注意する必要がある。

例えば貯蔵密度と費用対効果の高さから、NAS 電池が最近注目されている。NAS 電池は 300 ～ 360℃ という運転温度を維持するため、自身の放電反応熱だけで熱が不足する場合は貯蔵電力をヒータ加熱に消費する。したがって充放電量の少ない変動吸収のみに使用すると、総合効率が低下するため、鉛蓄電池や電気二重層コンデンサなど他の電力貯蔵装置との併用も視野に入れることが望ましい。

4. 電力貯蔵併設型の自然エネルギー発電

4.1 電力貯蔵併設による発電制御

2 章で述べた自然エネルギー発電の三つの課題（電圧への影響・周波数への影響・電力価値の向上）を解決すべく、電力貯蔵装置の併設による取り組みが、主に次の 2 目的でなされている。

（1）出力変動抑制

電力品質（電圧・周波数）への影響緩和に限定した制御である。

（2）計画発電

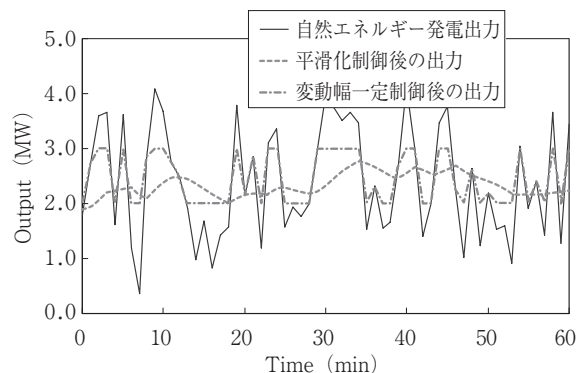


図3 平滑化と変動幅一定制御の仕上がり例

事前に予告したとおりの発電量を供給することによる、主に電力価値向上を目的とした制御である。

4.2 出力変動抑制

電力貯蔵を用いた出力変動抑制の方式としては、図3のように一次遅れなどの平滑化フィルタで合成出力目標を設定し、差分を電力貯蔵で充放電する方式が主である。ただし電力貯蔵による充放電が常時行われるため、合成出力は滑らかになるが、充放電ロスが増加する。そこで、所定の不感帯を逸脱した場合のみ逸脱分を充放電で吸収する“変動幅一定”方式などさまざまなアプローチが考えられる。

変動抑制効果としては、式1の変動縮小率、並びに変動縮小範囲内の時間滞在率が多く用いられている。

$$\text{変動縮小率} = \frac{\text{発電出力変動幅} - \text{合成出力変動幅}}{\text{発電出力変動幅}} \quad (\text{式1})$$

要求される変動縮小率や滞在率の考え方については、系統規模、電圧階級などによってさまざまである。電力貯蔵容量を大きくとれば変動縮小率や滞在率は向上できるが、発電システム全体のコストアップへとつながる。自然エネルギー発電普及に向けて、連系系統と制御目標の相関を明確化し、必要にして十分な制御目標を設定する指針が望まれる。

4.3 計画発電

毎朝時点での、翌日 24 時間分の発電計画通告による電力取引を前提とする。30 分刻みで売電電力量 (kWh) を契約し、± 3% の精度で達成する。3% を逸脱すれば売電単価の約 10 倍のペナルティを課せられるため、自然エネルギー発電では、高度な発電予測技術、計画発電技術と出力制御技術が要求される。また、電力会社からは通常、出力変動抑制も同時に要求される。

図4は、発電計画の例である。通常、売電単価が低い夜間ではフル充電し、単価の高くなる昼間に放電する。そのため、出力変動抑制では電力貯蔵装置は kW 容量がネックとなるが、計画発電では kWh 容量が制御上のネックとなる。

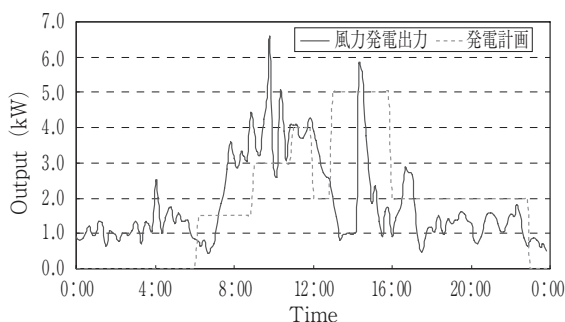


図4 風力発電出力と計画発電の例

る。

4.4 電力貯蔵併設の適用性

最も適用効果が大きい地域としては離島が考えられる。離島では、

- ・火力発電用燃料の輸送費が高く、火力発電による発電単価は本土の数倍となる
- ・したがって発電単価の高い風力発電や太陽光発電が事業として成立する。
- ・しかし離島では系統規模が小さいため、わずかな需給アンバランスでも周波数が大きく変動する

という特徴がある。そのため自然エネルギー発電には電力貯蔵装置の併設が必須とも言え、それでもコストメリットが期待できる。また海外のジャングルや砂漠など未開地域も同様であり、試験的に運用され始めている。

4.5 電力貯蔵併設の技術課題

電力貯蔵装置を自然エネルギー発電の出力変動抑制、計画発電に適用する場合、下記が技術課題となる。

(1) 仕上がり品質の設定

電力貯蔵装置で自然エネルギー発電の全変動を吸収するには、理論上発電定格と等価な電力貯蔵kW容量が必要となる。一部を電力系統に負担してもらうなど、必要十分な合成出力の品質設定が必要である。

(2) 電力貯蔵の容量の選定

電力貯蔵装置は高価であり、経済性を考えれば必要最低限の容量で済ませたい。(1)の仕上がり品質の設定に基づき、シミュレーション等で必要なkW, kWhを算定する。

(3) 電力貯蔵の種類の選定

電力貯蔵装置は、短周期変動吸収に適したもの、長時間の蓄電に適したものなど多種多様であり、その中から運用コスト面も加味して最も適切な貯蔵装置を選定する。電力

貯蔵としては一種類に限定する必要はなく、複数電力貯蔵からなるハイブリッド型とする選択肢もある。またインバータの変換ロスを抑えるべく、直流回路内で自然エネルギー発電と電力貯蔵を接続する方式も開発されつつある。

(4) 電力貯蔵の制御技術

自然エネルギー発電量と電力貯蔵残量をリアルタイムで計測しつつ、系統安定化や計画発電を行う需給制御システムが必要である。電力貯蔵装置は電気エネルギーを別形態に変換しているため、正確な残量把握が困難であるなど、管理には深い知識とノウハウが必要である。また、充放電ロスを回避し長寿命化を図る意味でも、充放電量を最小化する制御が理想的である。

(5) 系統からの充電防止

自然エネルギー発電は、RPS証書という付加価値がつくが、そのためには電力系統側の電力と明確な区別が必要である。したがって、自然エネルギー発電の出力が急激に低下した場合でも、電力系統からの充電による混合を避けるべく、電力貯蔵装置の高速制御が必要である。

5. おわりに

本稿では、現在指数関数的に増加している風力発電・太陽光発電といった自然エネルギー発電の更なる普及に向け、電力貯蔵装置併設による出力変動抑制や計画発電の可能性について解説した。現在NEDOや電力会社で、その実現に向けたプロジェクトが多数進行しつつあり、それらの実証を通じた定量的評価を今後注目していきたい。

(平成19年7月12日受付)

文 献

- (1) 例えば、「風力発電系統連系対策小委員会・中間報告書」, 総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会 (2004)
- (2) 「電力システムにおける電力貯蔵の最新技術」, シーエムシー出版 (2006)
- (3) 「エネルギー新技術体系」, 日本電熱学会編, エヌ・ティー・エス出版 (1996)
- (3) 例えば東北電力 HP
<http://www.tohoku-epco.co.jp/oshirase/newene/04/index.html>
- (4) 「マイクログリッド」, エネルギー新書 (2004)
- (5) 小島康弘・古塩正展: 「マイクログリッドの実証による検討その2～マイクログリッドの需給制御技術～」, 平成18年電学大全, Vol. 6-050 (2006)
- (6) 角田二郎・西岡宏二郎・木村泰崇・渡辺雅浩: 「愛知万博におけるマイクログリッドの電力品質」, 平成18年電気学会全国大会, Vol. 6-05 (2006)
- (7) 高坂幹・飯間孝仁・川崎憲介・合田忠弘・高野富裕: 「マイクログリッドとその実証試験」, OHM2005年4月号, **92**, 4, pp.22-25 (2005)