

電力貯蔵技術の現状と今後の展望

嶋田 隆一

1. はじめに

人間が電気を本格的に使い始めてからせいぜい130年しか経っていない。しかし、今や現代の便利な機器のほとんど全てが電気を利用しているといっても過言ではなく、電気なしには一瞬も立ち行かない社会になっている。社会を支えるシステムをインフラと呼ぶが、通信網や交通システムがインフラなら、電気はさらにそれを支えるインフラのインフラ、最も重要なインフラである。水道もATMもエレベータも電話もインターネットも電気なしには動かないのである。交通信号にもバックアップ電源が必要なのではないだろうか。日本は東日本大震災を経験し、従来の電力網と原子力に頼ってきた電力システムのままではいけないとだれもが考えるようになった。電力貯蔵技術はエネルギー技術の中で最も望まれている技術であるにもかかわらず困難で、未だ開発途上である。本特集では、電力貯蔵技術に関する現状、最新動向および今後の展望を述べる。

2. 電力貯蔵の必要性

いまこそ、電力貯蔵技術が注目されている。奇しくも東日本大震災と福島第一原子力発電所の重大事故により、電気の重要性が広く衝撃的に認識させられることになった。原子力発電所ばかりではなく、東日本の多くの火力発電所、変電所、送電網も壊滅的被害を受け、数日間、周波数は50 Hzを下回り、通常考えられない周波数不安定で推移していたのだが、全停電（ブラックアウト）には至らず乗り切ったのは一般の人々の節電と電力会社の努力の結果といえ

る。しかし、忘れてはいないだろうか、輪番停電などという戦中戦後の混乱期におこなわれた手法、変電所の地域区割りでも電力をカットするという無差別停電によって負荷電力調整をおこなったのである。通常、電力需要は季節・曜日・時間によって絶えず変動するので、供給側では負荷に合わせて常に需給のバランスを調整する。その差が周波数変動（通常0.05 Hz以下）となり、系統全体の慣性により決まる変化の時定数は10秒程度と意外と短く、発電側がいつぱいになると負荷側での調整しか手はなくなるのである。周波数が変化すると、位相差が生じて、限界を超えると送電線の連系が図れず電力が送れない。負の連鎖により連鎖停電、いわゆる大停電、全停電に陥ると回復には数日を要するであろう。

電力貯蔵は、供給側がおこなう大規模なものや工場やビル、機器毎に電気を貯蔵して停電に備える需要家側の小規模のものがある。日本の気候と文化的な事情から、わが国の電力消費は空間的には都市部に集中し、時間的には夏の冷房需要時に集中することが特徴である。年平均で見ると、発電設備の設備利用率（負荷率または稼働率）は55%程度である。欧米では75%であるので日本は極端に低い。供給側が電力貯蔵設備を設置して夜昼の電力需要を平準化すると、発電所の稼働率が上がり、電力の安定供給の観点だけでなく発電コストも低減する。電力貯蔵技術の重要性はこのような観点に由来している。

原子力発電は、東日本震災前では、CO₂排出量削減のため推進すべきエネルギー源と考えられてきたが、実は原子力発電は出力変動は極力避けたいシステムであるので、電力貯蔵設備とペアで建設する必要がある。電力会社は大型の揚水発電設備を建設し、夜間の余剰電力を蓄積して、昼に発電してピークをシフトしてきた。その結果、なんと世界の揚水発電所の23%、2300万kWの設備が日本にあるのである。しかし、状況は大きく変わろうとしている。原発事故の反省で日本が脱原発の方向になれば、新エネルギー、太陽光や風力などの再生可能（自然）エネルギーの開発導入に向かうことになる。そうなれば、夜間の原子力発電の貯蔵のために必要だった揚水発電は、変動する再生可能エネルギーへの動揺対応へと運転目的を変えることがで



Electric Energy Storage Technology Now and Future

Ryuichi SHIMADA

1975年 東京工業大学工学部電気工学科大学院博士課程修了

現在 国立大学法人東京工業大学 原子炉工学研究所 大学院創造エネルギー専攻 卓越教授

連絡先：〒158-0085 東京都目黒区大岡山 2-12-1 原子炉工学研究所 N1-33

E-mail rshimada@nr.titech.ac.jp

2012年11月26日受理

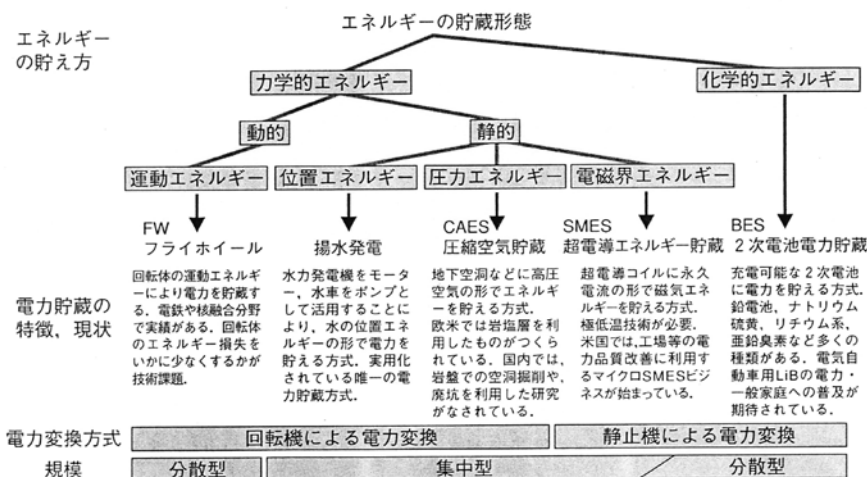


図1 エネルギーの貯蔵形態(図説 電力システム工学 丸善から転載)

きる。日本が既に世界最大の揚水発電設備(2300万kW)を有することは、新エネルギーの導入のために大いに有利である。再生可能エネルギー導入のもうひとつの問題は、新エネルギーが小規模に分散することで、ローカルに電圧変動が起きることである。これはフリッカ対策、すなわち電力系統を電圧変動に強くすることによって解決できる。例えば、フライホイール付発電機を設置して変動抑制の電圧源として機能させる。著者らが提唱する短時間のエネルギー貯蔵、キャッシュ・パワー(Cash Memoryからの造語)が自動的に電圧変動を緩和する。高速でアクティブなSVC(Static VAR Compensator)や連系インバータによる無効電力制御でも電圧を制御することができる¹⁻³⁾。

需要家側でも電力貯蔵の必要性はますます高くなっている。停電が無いということでは世界一の電力品質を誇った日本であるが、一旦、電力系統の信頼性が失われるとその反動で一挙に需要家側でも電力貯蔵の導入がすすむことになるであろう。需要家側で停電の危機に対処することに所定のコストを計上するのは、世界標準では当然の危機管理である。想定外の停電に対処することは極めて重要で不可欠なことである。スマートグリッドでは、スマートメータの普及で、時間帯で電気料金が変わるようになる。需要家に電力貯蔵設備があれば、経済的にメリットが出てくることになると同時に停電対策にもなる。スマートグリッド構想の目玉はコジェネといわれる電熱併給である。例えば個人住宅でも、ディーゼルエンジン発電機による発電と排熱による暖房や給湯などに熱供給をおこなえば、そのエネルギー効率は最新鋭の火力発電所の効率を軽く超え、70%にもなる。そのとき、電気と熱の需要が時間的に一致しない場合が問題であるが、余った電気は電力会社に売ってもよいし、貯蔵して高いときに売ればさらに経済効果がある。中小工場の現場では、停電の問題より瞬低問題が大きな問題である。瞬低とは瞬時の電圧低下の略で、数サイクル

表1 単位体積当たり(cm^3)のエネルギー密度

蓄積手段	材質	蓄積密度 [J/cm^3]
化学エネルギー	TNT火薬	10 kJ/cm^3
	鉛蓄電池	100 J/cm^3
圧力エネルギー	圧縮空気(20気圧)	20 J/cm^3
運動エネルギー (フライホイール)	鋼鉄	20 J/cm^3
	ピアノ線	980 J/cm^3
	カーボン繊維(700 kg/mm^2)	3.4 kJ/cm^3
磁界エネルギー	真空中7Tの磁界	20 J/cm^3
電界エネルギー	電解コンデンサ	0.2 J/cm^3
	フィルムコンデンサ	0.08 J/cm^3
重力エネルギー	揚水発電落差500 m	0.5 J/cm^3
石油燃料	酸素含まず	40 kJ/cm^3

の間、電圧が7割程度以下まで落ちる現象で、地方の電力系ではかなり頻繁に起こっている。これは電力送電網への落雷でアーク発生後の続流を遮断し、アークを消弧するための高速度再閉路方式による保護動作である。故障ではないので電力会社は補償してくれない。この瞬低事故によって産業界の生産性が数%も下がっているといわれている。産業用ロボットでは、安全停止できるまでの数秒間、停電が遅れるだけでも大いに助かるのである。停電猶予可能な瞬低対策のバックアップ電源UPS(Uninterruptable Power Supply)では、2次電池やフライホイールを常時充電した状態で待機している。

3. 電力貯蔵手段と将来の動向

電力貯蔵は、その使われ方の特質から貯蔵手段を選択しなければならない。乾電池など一次電池も充電はしないがエネルギー物質を貯蔵している電力の貯蔵手段である。そう考えると、燃料を備蓄して必要なときに発電する非常用発電設備も電力貯蔵といえる。太陽熱発電では熔融塩を用いて熱の形で夜まで備蓄して発電するが、これも電力貯蔵の範疇になる。

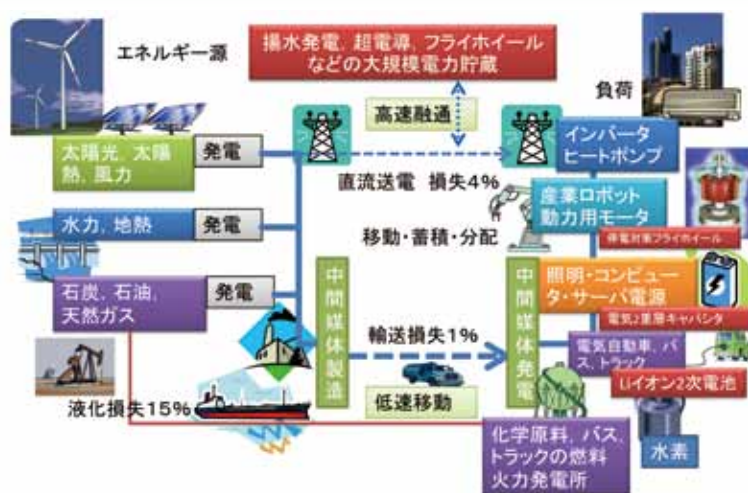


図2 未来のエネルギー貯蔵と輸送

種々なエネルギー源からの電力発生，移動，貯蔵手段が今後のエネルギーシステムの鍵になることは論を俟たない。例えば，取り扱いの困難な水素を，中間媒体として有機ケミカルハイドライド，アンモニアそして個体のマグネシウムとして輸送と貯蔵を可能にする研究がある。これらの研究には大きな可能性を感じる。

電力貯蔵では，エネルギーの形態，密度，容量にも注意しなければならない。図1にエネルギーと電力貯蔵の系譜を示す。表1に貯蔵手段とエネルギーの貯蔵密度(サイズ)を示す。

また，利用の形態によっても特質がある。例えば，揚水発電は大容量の電力貯蔵で実用化されているが，電力貯蔵密度は最小でも安全に扱いやすいので数十万kW，数時間分の電力を貯蔵できる。最大のエネルギー蓄積密度は，火薬で約10 kJ/cm³であるが制御が困難で扱いにくい。一般にエネルギー蓄積密度が高いものは制御が困難である。表中に石油燃料は酸素を含まないと注釈があるように，石油は酸素がある場所でしか使えないが，40 kJ/cm³と桁違いに大きい。これが現在世界のエネルギーシステムを石油が支えている理由である。石油のエネルギーシステムは石炭エネルギーにくらべて輸送に利便性があり，燃焼後に灰がないのもよい。直流送電は瞬時に1000 kmを超えて送ることができて，しかも，送電損失は変換器を入れてもわずか4%程度と低いのであるが，石油を石油タンカー，タンクローリーで運ぶ場合，時間がかかるが運ぶのに必要なエネルギーは1%にもならない。さらに，需要地の発電所に備蓄することができる。ガスタービン発電は，負荷応答性(数十秒)が良いので必要に応じて発電することができる。震災後，東京電力(株)はガスタービン発電機を大量に購入することにより，震災後の夏のピーク負荷を乗り切ったと聞く。現在，このガスタービン発電機が原発数基分の容量があるはずで，負荷追従運転をすれば，東京電力は世界一電力動揺に強い，すなわち，風力発電や太陽光発電が相当量

導入されても周波数動揺の問題がない電力系統ということになるだろう。

本特集で解説される種々な規模と方法の電力貯蔵を組み合わせることで問題を改善することができ，研究開発と導入が促進される。需要家側でも，ある程度の危機管理と電力コスト削減のための電力貯蔵の導入を不可欠とするなど震災以後社会の意識が変わってきたと思われる。社会の安定・安全・安心のためにも，いわゆる想定外に対処することが求められているのである。今回の特集では，水素を最終的には燃料電池で使うにしても，その中間形態を大量備蓄・輸送することが提案されている。その考え方はこれまでの電力貯蔵技術の一枚上を行くシステムを提示している。液体媒体はポンプとパイプラインで大量の移送可能であるので大容量向き，マグネシウムなど固体媒体は軽いので乾電池のような小容量に向くと思われるが，備蓄と輸送の利便性により電力システムは大変革を迎えることになる。図2に将来のエネルギーの貯蔵と輸送を示す。砂漠地帯や過疎地の大規模な太陽光や風力発電所では，電力の一部は直流送電線を介して，位相や周波数の問題なく電力融通可能な世界送電網に送る。これとあわせて，中間貯蔵媒体である有機ケミカルハイドライド，アンモニア，マグネシウムなどを合成して，タンカーなどで運ぶ。需要地ではこの中間媒体を備蓄することで電力のセキュリティを確保し，燃料電池やエンジン発電機でコジェネをおこない，発電の排熱にインバータ式ヒートポンプで数倍の熱を足すことにする。それは総合熱効率が100%を超えるエネルギーシステムになると私は思っている。

- 1) 加藤修平，程苗苗，炭谷英夫，嶋田隆一：フライホイール誘導機式瞬低保護装置の貯蔵容量設計と50 kW機による実験的検証，電気学会論文誌D, 129-D (4), 446-452, 2009.
- 2) Cheng, M-M., S. Kato, H. Sumitani and R. Shimada : A Novel Method for Improving Overload Capability of Stand-alone Power System Based on a Flywheel Induction Motor, *IEEJ Trans. on Industry Applications*, 129 (10), 957-963, 2009.
- 3) 嶋田隆一：第3章 超電導電力貯蔵と日本縦断・電力新幹線，平成23年度研究報告書，超電導エネルギー貯蔵研究会，2012.