

特 集 論 文

リチウム二次電池の開発と自然エネルギーの系統連系円滑化蓄電システムへの適用

Development of Lithium Ion Battery and Grid Stabilization Technology for Renewable Energy Using Secondary Battery System

橋 本 勉*¹
Tsutomu Hashimoto橋 崎 克 雄*²
Katsuo Hashizaki西 田 健 彦*³
Takehiko Nishida重 水 哲 郎*⁴
Tetsuro Shigemizu田 島 英 彦*⁵
Hidehiko Tajima足 立 和 之*⁶
Kazuyuki Aadachi和 田 好 広*⁷
Yoshihiro Wada倉 山 功 治*⁸
Kouji Kurayama

自然エネルギーは変動が激しいため、小規模な系統に自然エネルギーからの電力を供給するためには大型二次電池を用いて系統連系を円滑化することが望ましい。九州電力(株)と当社で開発中の大型リチウム二次電池は、大容量で長寿命という特長がある。そこで、実際のウインドファームの出力を計測し、この大型リチウム二次電池を平滑化するために必要なシステムの仕様を予測した。この結果、コストなどの課題は残るが、鉛蓄電池を用いた場合に比べ、現実的なサイズのシステムが構築できることが分かった。

1. は じ め に

現在、化石燃料の価格高騰や地球温暖化の問題に対処するため、風力発電や太陽光発電、バイオマス燃料発電などの再生可能エネルギー（新エネルギーともいう）の導入拡大が活発化している。ヨーロッパでは EC による再生可能エネルギー発電の促進にかかわる指令（Directive 2001/77/EC 指令）が出たこともあり、すべての EU 加盟国が再生可能エネルギーによる電力消費比率の国別目標を設定した。この目標を合計すると、各国の 2010 年の電力消費の 21% が再生可能エネルギーによるものになる。日本でも“電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法（RPS 法）”が施行され、平成 22 年度における再生可能エネルギーによる電気利用目標値を 122 億 kWh と定めた。ただし、この値は国内の販売電力量の約 0.39% に過ぎないため、今年経済産業省では新たに平成 26 年度の目標値を 160 億 kWh（1.35%）と定めている。

再生可能エネルギーのうち、風力発電や太陽光発電などの自然エネルギーは天候による出力変動が起こりやすい。最新の大容量風車では種々の技術導入により出力変動を減少させているが、風が止まれば出力ゼロとなることは避けられない。よって、電力の受入れ能力が弱い系統に対して、自然エネルギー発電の容量が大きい場合は、出力変動を抑制するシステムが必要となり、大型二次電池で自然エネルギーを蓄えて平滑化する技術が有望視されている。ここでは、九州電力(株)

との共同研究で開発した大型リチウム二次電池及び電力貯蔵装置の性能や九州電力(株)と共に平成 18 年度からの(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)事業で実施中の系統連系円滑化蓄電システム技術開発における検討結果について紹介する。

2. リチウム二次電池及び電力貯蔵システムの開発

2. 1 リチウム二次電池の原理・特長

リチウム二次電池の反応原理を図 1 に示す。正極（Cathode）にはリチウム含有金属酸化物、負極（Anode）にはカーボン材料が使用されており、リチウムイオンが充電時に正極から負極へ、放電時に負極から正極へと移動する性質を利用している。両極共結晶構造を維持したままイオンの移動だけで充放電が進むため、鉛蓄電池やニッケル水素蓄電池など、充放電により電極の構造が変化する従来の二次電池に比べて、劣化が少なくエネルギー効率が良いなどの特長を

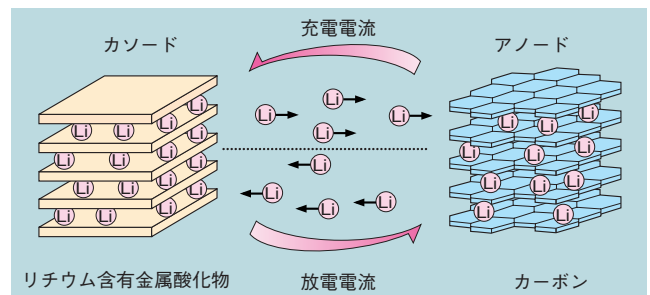


図 1 リチウム二次電池の反応原理
リチウム二次電池の電極間で起こる化学反応を示す。

*¹ 原動機事業本部新エネルギー事業推進部技術グループ*² 長崎造船所ボイラ技術部燃料電池課主席*³ 技術本部長崎研究所制御システム研究室主席*⁴ 技術本部長崎研究所制御システム研究室*⁵ 技術本部長崎研究所化学研究室主席*⁶ 九州電力(株)総合研究所リチウム電池 EV 推進グループ長*⁷ 九州電力(株)総合研究所リチウム電池 EV 推進グループ主幹*⁸ 九州電力(株)総合研究所リチウム電池 EV 推進グループ

有している。

一般的なりチウム二次電池の特長を以下に記す。

- 電圧が高い（公称電圧は3.6～3.8 V）
- エネルギー密度が高い
- メモリー効果がない
- 低温でも使用可能
- サイクル寿命が長い
- 急速充放電可能
- 保存特性が良い

反面、従来のリチウム二次電池では正極にコバルト系の酸化物を用いているため、高コストであるという問題点もある。そこで、リチウム二次電池は携帯電話やノートパソコンなどのモバイル機器の高付加価値電池として使用されているが、今後低コスト化・大型化が進めば、電気自動車向けの移動体用、電力貯蔵や系統連系円滑化蓄電システム等の定置用の普及が進むと推測される。

2. 2 大型リチウム二次電池の開発

カソードに低コストで安全性の高いマンガン系の酸化物を用いると共に、単電池及びモジュール電池の構造上の安全設計により、電力貯蔵用の大型リチウム二次電池を開発した。図2に大型リチウム二次電池の構造、表1に性能を示す。

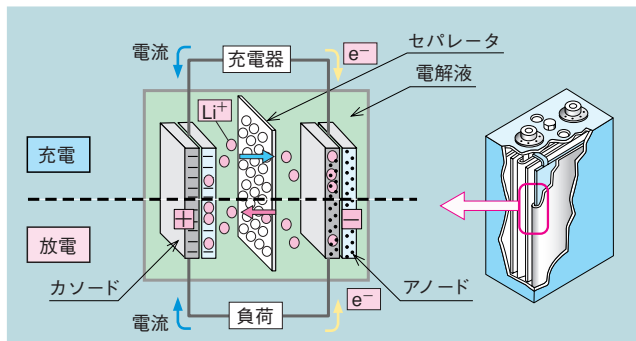


図2 単電池の構造
開発した角型リチウム二次電池の構造を示す。

表1 開発したリチウム二次電池の性能

仕様		単電池	モジュール電池
重量 (kg)		2.88	12.3
サイズ (mm)	W	66.5	160
	L	116	262
	H	175	238
公称放電電圧 (V)		3.8	15.6
公称容量 (Ah)		105	
公称エネルギー容量 (Wh)		399	1596
公称エネルギー密度 (Wh/kg)		139	130
最大容量 (Ah)		136	
最大エネルギー容量 (Wh)		499	1996
最大エネルギー密度 (Wh/kg)		173	162

この電池はマンガン系のカソード活物質と黒鉛系のアノード活物質を成膜した集電板を交互に積層する構造であり、電極サイズや積層枚数を多くすることで公称容量 399 Wh（最大 500 Wh）の電池が得られている。過去には、マンガン系のカソード活物質はエネルギー密度が小さく、寿命が短いと評されていた。しかし、今回開発した電池では、電極や電解液の改良により、公称エネルギー密度は 139 Wh/kg が得られ、単電池 4 セル分の充放電のばらつきを補正するセルバランス回路を搭載したモジュール電池でも公称エネルギー密度は 130 Wh/kg に達した。図3に充放電サイクル試験を実施したときの容量変化を示す。運転容量を 340 Wh としてサイクル試験を行い、残容量が 340 Wh に達するまでの寿命を求めると、予想寿命は 3500 サイクル以上となり、1 日 1 サイクルであれば、約 10 年の耐久性があることが予想されている。

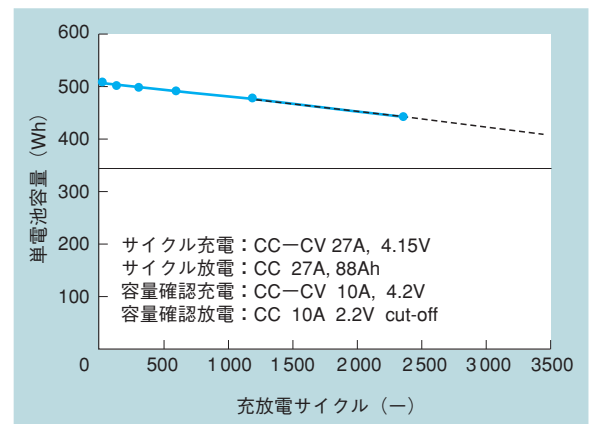


図3 リチウム二次電池のサイクル特性
開発した電池は充放電サイクル試験の結果、3500 サイクル以上の寿命を有することを示している。

2. 3 電力貯蔵システムの開発

電力貯蔵システムは、系統から安価な余剰電力を貯蔵して、負荷側の電力使用量が多いときに放電するロードレベリングや契約電力を負荷が超えそうになったときに放電するピークカットに対応することが可能である。また、災害が発生した際には、停電時の非常用電源として使用することもできる。電力貯蔵システムには、前項で開発した電池が搭載され、さらに、単電池の異常監視・保護のための電池保護回路をモジュール電池単位で設置し、双方向インバータを介して電力系統と連系接続されている。

図4に1.5kW システム及び3 kW システムの外観を示し、表2にシステム仕様を示す。3 kW システムは 32 kWh 分のリチウム二次電池が搭載されており、AC 端での充放電エネルギー効率は 86 % が得られた。



図4 電力貯蔵装置の外観（左：1.5 kW 級システム、右：3 kW 級システム）
1.5 kW 級は家庭用、3 kW 級は業務用に適したサイズである。

表2 開発した電力貯蔵システムの仕様

用途例	家庭用	業務用
出力 (kW)	1.5	3
端子電圧	1φ3W AC101/202V (50/60Hz)	
放電時間 (h)	8~9	8~10
充放電効率 (%)	83	86
サイズ (mm)	600 ^W ×550 ^D ×1625 ^H	980 ^W ×550 ^D ×1825 ^H

現在、3 kW システムは屋外にてフィールド試験を実施中であり、900 サイクルを到達している。同様に、1.5 kW システムも実際のオール電化住宅にてフィールド試験を実施中である。

3. リチウム二次電池を用いた自然エネルギー系統連系円滑化蓄電システム

3. 1 系統連系円滑化システムの原理

図5に二次電池を用いた風力発電の系統連系円滑化蓄電システムの構成図を示す（太陽光発電を用いた場合も基本構成は同じである）。風況や日射量によって急速に変化する自然エネルギーの発電出力に対し、過不足分を二次電池に充電あるいは二次電池から放電することにより、合成出力を安定化するという仕組みである。よって二次電池側は、システムの入出力要求値に対して、時間遅れなしに瞬時に入出力できる必要がある。

系統連系円滑化蓄電システムの基本仕様である二次電池の最大出力 (MW) やエネルギー容量 (MWh)、インバータの入出力値 (MW) 等は、運転モードや平滑化運転条件、夜間対策の有無によって決まる。運転モードには、風力発電の出力値を用いて合成出力の目標値を計算し、その目標値になるように二次電池の充放電で電力を補う平滑化運転モードと、特定の運転時

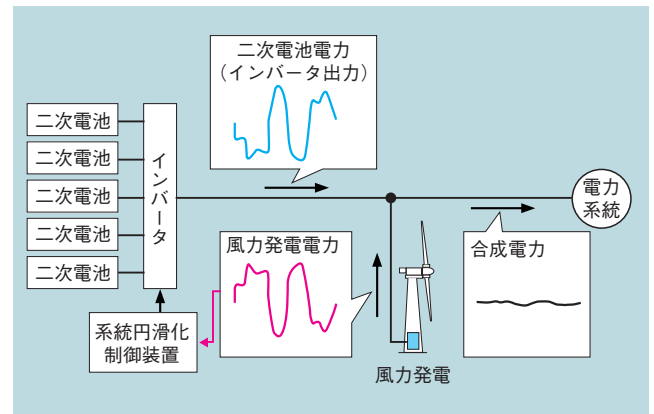


図5 風力発電系統連系円滑化蓄電システムの構成図
風力発電と電池を組み合わせた系統連系円滑化蓄電システムの原理を示す。

間間隔ごとに合成出力の目標値を固定して、その目標値になるように二次電池の充放電で電力を補うフラット運転モードがある。平滑化運転の条件として、平均化時間を比較的短く設定した（例えば20分以内）短周期変動対策と、比較的長く設定した長周期変動対策がある。また、夜間対策とは、電力需要が低下する夜間に風力発電出力を完全に二次電池に充電し、昼間は短周期変動対策運転を行う運転方法である。

3. 2 ウインドファーム発電出力の平滑化シミュレーション方法

NEDO 事業にてウインドファームにおける発電出力データを取得し、平滑化運転のシミュレーションを行った。図6に今回データを取得した瀬戸ウインドヒルの位置と写真を示す。瀬戸ウインドヒルは愛媛県西部に位置し、1000kW 級風車を11基有する。図7に瀬戸ウインドヒルの出力データおよび平滑化時定数を30分、60分、200分とした場合の出力波形を示す。図8に上記の平滑化時定数を用いた場合の電池システムからの出力値を示す。図7の瀬戸ウインドヒルの出力データは測定開始から数十分間は風がないため出力



図6 瀬戸ウインドヒル

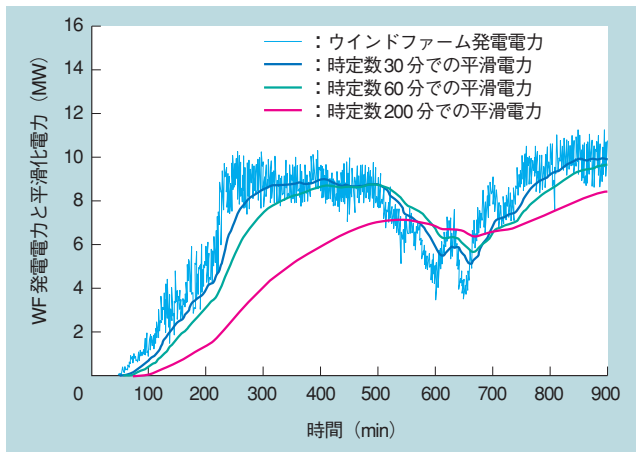


図7 ウインドファームの発電電力（実測値）及び蓄電池による平滑電力（計算値）
瀬戸ウインドヒルで計測した発電電力と各時定数で平滑化した電力を示す。

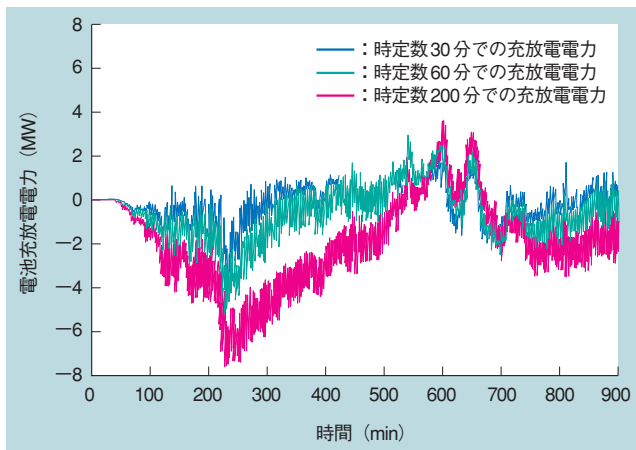


図8 風力発電の平滑化に必要な二次電池の充放電電力（計算値）
平滑化のために必要な電力量は平滑化の時定数が大きくなるほど大きくなる事が分かる。

0で始まっているが、その後、風力が強まり大きく変動していることが分かる。この出力変動をできるだけ平滑化するためには時定数が長い平滑化運転をすれば良いということになるが、図8のように時定数が長くなると電池側に求められる出力及び容量が大きくなる事が分かる。ただし、どの程度の時定数で平滑化すればよいかは、そのウインドファームの出力特性や運転パターン、系統の耐力にもよるため、一概には決められないが、周辺に電力変動に追従可能な発電設備がある程度存在すれば、時定数60分で十分と考えられる。よって以降では20MWのウインドファームを時定数60分で平滑化する場合を想定し、理論上算出されるエネルギー容量20MWhの蓄電システムを検討した。なお、系統連系円滑化蓄電システムが所定の出力・容量を出すためには、電池や配線の抵抗やインバータ効率に伴う損失分を考慮する必要がある。ここでは、システムが最大容量（20MWh）を出す際の電池及び

配線などの放電損失を9%、インバータ損失を5%と仮定した。

3.3 リチウム二次電池による系統連系円滑化蓄電システムの検討結果及び考察

(1) 単電池

前述のシステム運用条件に適合する単電池としては、できるだけ大容量で軽量、コンパクトなものが要求される。また、出力特性としては1C程度の充放電（1時間で充電・放電ができること）が必要である。表1に示した開発済みのリチウム二次電池であれば、大幅な設計変更は行わず、高出力化のための改良を加えることで、目標の性能が達成できると予想される。

(2) ユニット電池

ユニット電池とは、直並列で単電池を直接つなぎ、制御機構を搭載して入出力を可能とした組電池の最小単位ことである。コンバータやインバータはユニット電池毎に設置するが、これらの電気品の全体コストに占める割合は大きいので、システムの低コスト化のためにはユニット電池は高電圧で高エネルギー容量のほうが有利である。一方で、ユニットの電圧は、法規上の電圧区分（低圧は直流750V以下）、モジュールと系統間に用いられるインバータなどのスイッチ運用電圧（1200V耐圧スイッチでは通常600V程度）等を考慮する必要もある。そこで本検討では上限4.15Vの単電池を140直して581Vとし、約600V級のユニットとした。また、他用途に柔軟に対応できるエネルギー容量とするため、2並列化することで100kWh級のユニットを設計した。この結果、ユニット電池1台に搭載される単電池は280個で合計容量は95kWh、重量は約860kgとなることが分かった。

(3) システム

表3にシステム仕様の検討結果を示す。システムが20MWhの容量を出す際のエネルギー損失を考慮すると、システムに要する電池合計の容量は23.1MWhとなり、重量はリチウム二次電池（モジュール容器含む）で209tとなった。

鉛蓄電池は一般的にエネルギー密度が小さいため、系統連系円滑化蓄電システムを構築すると重量・体積とも大きくなりすぎるという課題がある。また、当社ではシール型鉛蓄電池を用いた風力発電の系統連系円滑化システムを開発・設置した実例があり、運転結果から電池寿命が短いことも分かっている⁽¹⁾。これに対し、我々が開発したリチウム二次電池を適用する場合、鉛蓄電池に比べて体積および重量を1/10程度まで低減できることが分かった。リ

表3 20 MW 級ウインドファームの系統連系円滑化蓄電システム仕様案

項 目		設計値	備 考
システム仕様	システム入出力 (MW)	20	一般的なウインドファームサイズ
	システム容量 (MWh)	20	時定数60分の平滑化を想定
電池部分の仕様	電池全体の合計出力 (MW)	21.1	インバータロス5%と仮定
	電池全体の合計容量 (MWh)	23.1	インバータと電池抵抗のロスを考慮
	単電池の個数 (個)	34022	寿命を考慮して単電池容量340 Whで計算
	全電池の体積 (m ³)	170	電池とモジュール容器のみで計算
	全電池の重量 (t)	209	

チウム二次電池の寿命については、今後、系統連系円滑化蓄電システムによるフィールド試験などで確認する必要がある。

3. 4 今後の課題

前述のようにリチウム二次電池は他の二次電池に比べてエネルギー密度が高く、設置面積・重量共小さいが、系統連系円滑化蓄電システムとして用いる場合は課題も残っている。

(1) エネルギー密度

風車の設置条件を妨げないように更に高エネルギー密度化することで、軽量・コンパクト化することが望まれる。

(2) 出力特性

上記仕様では、1時間で充電・放電できる電池を仮定したが、現状の電力貯蔵用電池は8時間率を定格として最適化されたものである。今後、電解液組成などを改良し、内部抵抗低減による高出力化を図る必要がある。

(3) 寿命

一般的にリチウム二次電池は鉛蓄電池に比べて充放電深度が深いサイクルでも長寿命という特長があり、当社の電池も一定電流で3500サイクル以上と予想されている。電池に大電力で入出力を繰り返すと、電池温度が上昇し、電池の劣化が加速される可能性があるため、今後、電池の内部抵抗を低減するとともに実際のウインドファームの模擬波形で寿命評価を行う予定である。

(4) コスト

現状では生産規模が小さいこともあり、数十万円／kWhと高価であるが、将来的には高容量・低コスト材料の採用や生産規模の拡大により、低コスト化することが可能と考えられる。ただし、風力発電単独のシステムに比べると発電単価が上昇することになるため、現状のままでは市場原理に基づく生産規模の拡大は望めない。今後、自然エネルギーを増加するためには、系統連系円滑化蓄電システムの技術開発と並行して、海外のような自然エネルギー発

電による電力買取り制度の充実や設備投資の融資制度の見直しなど、系統連系円滑化蓄電システムを付設した風力発電の導入を促進する仕組み作りが期待される。

4. ま と め

自然エネルギーの発電量を大幅に増やすためには、系統連系円滑化蓄電システムの導入を促進する必要がある。リチウム二次電池は他の電池に比べて高い性能を持つことから、電気自動車などの移動体用を始め、自然エネルギーの系統連系円滑化蓄電システムや電力貯蔵などの定置用としても注目されている。従来の二次電池（鉛蓄電池）では、設置面積が大きくなりすぎるなどの問題が発生し、実用に適していなかったが、大型のリチウム二次電池を用いれば、実用的なシステムが構築可能である。現在、更なるリチウム二次電池の高性能化・低コスト化が求められているが、自然エネルギーの増加に伴うCO₂削減の経済価値を総合的に判断すると、系統連系円滑化蓄電システムの早期の実用化及び導入拡大が望まれる。

参 考 文 献

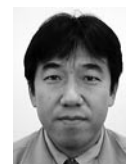
- (1) 後藤正人ほか、ハイブリッド風車発電システムの開発、電気設備学会誌 21巻8号(2001) p.647



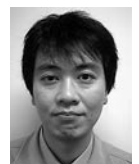
橋本勉



橋崎克雄



西田健彦



重水哲郎



田島英彦



足立和之



和田好広



倉山功治