

再生可能エネルギー安定化用 レドックスフロー電池

柴田俊和*・隈元貴浩・長岡良行
川瀬和典・矢野敬二

Redox Flow Battery for Stable Operation of Renewable Energy — by Toshikazu Shibata, Takahiro Kumamoto, Yoshiyuki Nagaoka, Kazunori Kawase and Keiji Yano — Renewable energies, such as solar and wind power, are increasingly being introduced as alternative energy sources on a global scale toward a low-carbon society. For the next generation power network, which uses a large number of these distributed power generation sources, energy storage technologies will be indispensable. Among these technologies, battery energy storage technology is considered to be most viable. Sumitomo Electric Industries, Ltd. has developed a redox flow battery system suitable for large scale energy storage, and carried out several demonstration projects on the stabilization of renewable energy output using redox flow battery systems. This paper describes the merits of a redox flow battery and reviews these demonstration projects.

Keywords: redox flow battery, energy storage, renewable energy, smart grid, wind turbine, photovoltaics

1. 緒言

近年、低炭素化社会の実現を目指したゼロエミッション電源比率向上に向けて、太陽光発電、風力発電等の再生可能エネルギー導入が推進されてきた。また、2009年の米国でのオバマ大統領就任直後に打ち出されたグリーンニューディールを発端に、次世代送配電システム（スマートグリッド）への関心が世界各国において高まり、電力インフラおよびそれを構築する電力機器の研究開発が推進されてきた。さらに、2011年3月の東日本大震災および福島第一原子力発電所の事故をきっかけに、原子力発電への依存度を下げ、太陽光発電、風力発電等の再生可能エネルギーを活用した電力インフラ構築への期待に拍車がかかっている。一方で、太陽光発電、風力発電は発電電力が気象条件により出力が変動するため、適切な対策なしに系統に大量導入されると、電圧上昇、周波数変動、余剰電力発生等の問題が生じる可能性がある。次世代送配電システムの定義は明確でなく、本問題を解決する手段についても様々な形態が提案されてはいるが、根底にある要件は、①地球環境に配慮したシステム、②高品質で安定した電力供給、③安全で効率的なシステム構成および運用の実現と考える。これらの要件を上記背景に照らし合わせると、「ゼロエミッションかつ安全な電源である太陽光発電と風力発電を、電力系統の品質を落とさずに、効率よく低コストに連系する技術」が重要と考える。これを実現するための技術として、電力貯蔵技術が注目されており、なかでも蓄電池に寄せられる期待が大きい。これ以外にも今後の電力インフラにおいて、図1に示すようなシーンでの蓄電池のニーズがあると考えている。当社では1980年代よ

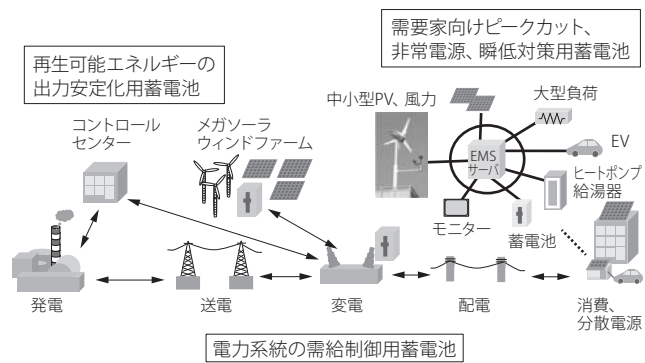


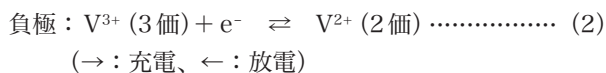
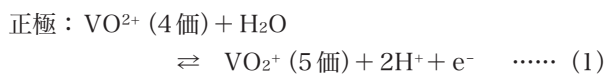
図1 蓄電池に期待される用途

りレドックスフロー電池の開発を行っており⁽¹⁾、レドックスフロー電池を用いての再生可能エネルギーの安定化に関する幾つかの実証試験を行ってきた。本稿では、レドックスフロー電池の特徴とこれらの実証試験の結果について報告する。

2. レドックスフロー電池の原理

活物質にバナジウムを用いたレドックスフロー電池の原理概略を図2に示す。レドックスフロー電池は、電池反応を行う流通型電解セル、活物質の溶液（電解液）を貯液するタンク、および電解液をタンクからセルに循環させるポンプで構成される。レドックスフロー電池に電流を流すと、

図2および次式に示すように正極、負極にてバナジウムの価数変化を伴う電池反応が起こり、隔膜を介してプロトンが移動する。これがレドックスフロー電池の充放電原理である。



上記の電池反応を行う流通型電解セルを複数枚積層したものをセルスタックと呼んでいる。セルスタックの構成図を図3に示す。単セルの電圧は約1.4Vであり、図3に示すようにセルを多数直列接続してセルスタックとすることで、実用的な電圧を得ることができる。

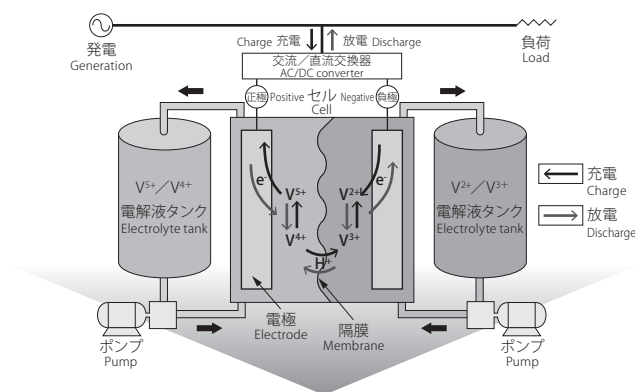


図2 レドックスフロー電池の概略構成

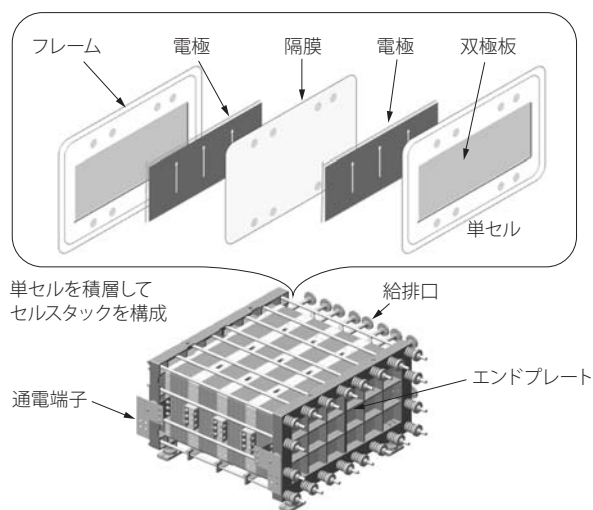


図3 セルスタックの構造

3. レドックスフロー電池の特長

バナジウム系のレドックスフロー電池では、正極、負極での電池反応が、ともにバナジウムの価数変化であること、固相を伴わない反応であることから、反応が可逆であり、充放電サイクル寿命が長い、深い放電、不規則な充放電によっても電解液の寿命が阻害されない等の特長を有する。また、電解液が不燃性であることから安全性が高い。さらに、再生可能エネルギーの安定化用に蓄電池を適用する際には、(1) 大型化に適すること、(2) 充電状態 (SOC: State of Charge) の管理が可能なこと、(3) 高速応答であること、(4) 短時間高出力運転が可能であること、が要件となる。以下に示すようにレドックスフロー電池はこれらの要件を全て満足する。

3-1 大型化 (高出力、大容量化) レドックスフロー電池では、セルスタックの台数により出力を、電解液の量により時間容量をと、出力と容量を独立に設計可能である。このため、タンクの大型化、増設等により大容量化が容易である。また、液体流通型の電池であることから、以下に示すように接続する電池の特性を容易に揃えられることから大型化に適する。図4に電池を直列接続した際の、一般の電池とレドックスフロー電池の模式図を示す。図中の電池内の濃淡は充電状態 (充電残量) を模式的に表している。電池を直列接続して連続運転を行うと、内部抵抗、自己放电量、経年劣化の個体差、設置環境温度差等により、各電池の充電状態に差が生じる。充電状態に差が生じると各電池の起電力に差が生じ、電池の劣化を促す過電圧となる可能性がある。このため、一般の電池では、大型電池システムを構成する際に、各電池の端子電圧を常時監視して適宜個別に放電するシステムを組む対策や、適宜、満充電にすることで充電状態を均等にする対策 (均等充電) が必要となる。一方、レドックスフロー電池では、同一のタンクから各電池に同じ充電状態の電解液を流通させるため、常に各電池の充電状態が均等となる。すなわち、レドック

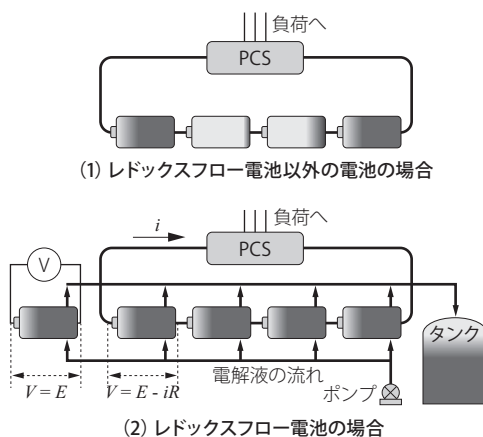


図4 電池の充電状態の模式図

スフロー電池は複雑な構成なしに容易に接続する電池の特性を揃えられ、大型化に適する。

3-2 充電状態の計測、管理 一般的な電池では、運転中の電池の端子電圧が、起電力と電池内部抵抗による電圧降下の和となるため、運転中の起電力の測定はできない。一方、レドックスフロー電池では図4に示すように、外部との充放電に寄与しない電池（モニターセル）に、同じタンクから電解液を流すことで、運転中であっても起電力の測定が可能である。起電力がわかれば、次式に示すNernstの式より充電状態を求めることができるため、レドックスフロー電池では、運転中の時々刻々変化する充電状態をリアルタイムに測定可能である。

$$E = E_0 + \frac{RT}{F} \ln \frac{[VO_2^+][V^{2+}]}{[VO^{2+}][V^{3+}]} \dots\dots\dots (3)$$

E_0 : 標準起電力、 R : 気体定数、 F : ファラデー定数、 T : 絶対温度

風力発電の出力平滑化運転や、電力系統の需給制御等の運転では、不規則な充放電運転を連続して行う必要があるが、過充電、過放電になることなく運用するには、充電状態の常時管理、さらには充電状態をパラメータとした充電補正、放電補正制御（補充放電制御）が必須であり、充電状態を常時管理できるレドックスフロー電池は、このような用途に適する。

3-3 高速応答性 出力平滑化、需給制御運転等では速い応答速度が要求される。図5は後述のウィンドファーム出力平滑化用6MWレドックスフロー電池システムを用いた実験結果である⁽²⁾。定格充電（6MW）運転中に、模擬信号にてウィンドファーム出力を30MWから瞬時に0MWに低下させ、平滑化動作により定格放電（6MW）となるまでの応答時間を測定した。応答時間を目標値の63%（1-1/e）に到達する時間と定義すると応答速度は57msec、90%到達時間定義では170msecで

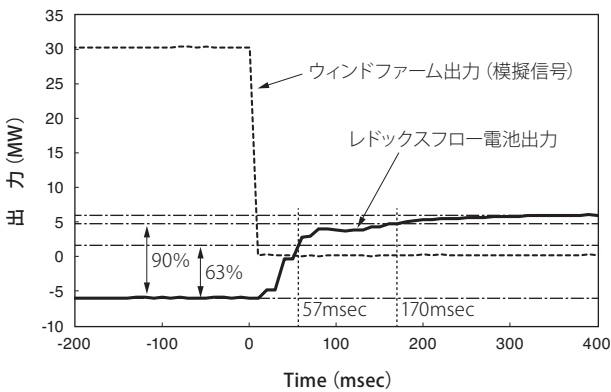


図5 レドックスフロー電池の応答速度測定例

あった。本応答速度は制御系、信号計測系により律速されており、本電池の応答速度が十分に速いことを確認できた。

3-4 高出力運転特性 再生エネルギーの平滑化運転では、瞬時的に必要な最大出力は平均出力の数倍となる。このような用途では、定格出力に対して瞬時的には高出力を取り出せる電池がコスト面で有利となる。図6に1.1kW×1Hのレドックスフロー電池を用いて実測した高出力運転時の放電可能時間を示す⁽³⁾。

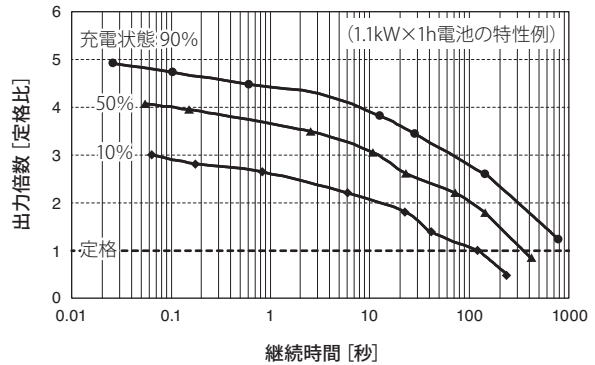


図6 レドックスフロー電池の高出力特性

放電可能時間は、電池セルの内部インピーダンス、電池セル内の電解液の充電状態、電池容量の大きさにより制限される。レドックスフロー電池の等価回路は図7のように、①時定数が数秒である構成部材の導電抵抗および電極での反応抵抗、②時定数が数分以内のセルへの電解液供給流量に依存する抵抗、③それ以上の時定数である電池容量の和で表現できる。瞬時応答に対しては、電気回路的に上記③の成分が寄与しないため、レドックスフロー電池では瞬時であれば定格の数倍の高出力を取り出すことができる。

上記のレドックスフロー電池の特長は、再生可能エネルギー安定化用蓄電池に求められる要件を満たし、本用途に適する蓄電池と考えられる。一方で、電解液に蓄積できるエネルギー密度が低いため、他の蓄電池と比較してサイズが大きくなるデメリットがある。

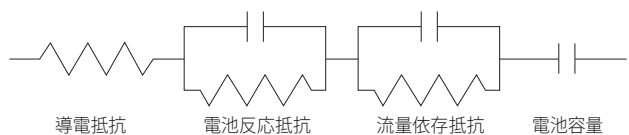


図7 レドックスフロー電池の等価回路

4. 再生可能エネルギー安定化の制御原理

電力系統を成立させるには同時同量の原則で発電量と消費量の需給バランスを維持する必要がある、一般には発電所の出力を制御してこれを実現している。風力発電、太陽光発電等の再生可能エネルギーを利用した発電は、自然エネルギーによるクリーンな発電である一方で、発電電力が風況や日射に依存するため、出力の予測が困難な上に、変動が大きい問題がある。このため、再生可能エネルギー発電では、火力発電等のように計画的な運用ができないだけでなく、需給制御を維持するための発電機自体が需給バランスを崩す要因となる問題があり、電力系統に連系可能な量が制限される。再生可能エネルギーの普及には、出力の安定化が必要であり、蓄電池により出力変動を吸収して平滑化することが対策手法の1つとして期待されている。

ウィンドファームを例として、発電出力の短周期変動をレドックスフロー電池によって平滑化する制御フローを図8に示す⁽²⁾。

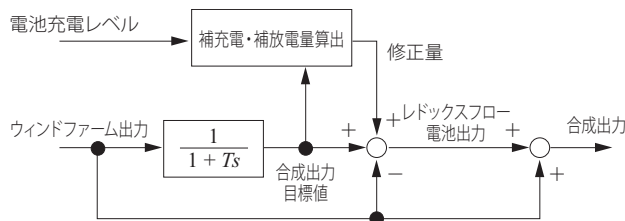


図8 レドックスフロー電池による平滑化フロー

図8にて、合成出力とはウィンドファーム出力と電池出力の和であり、レドックスフロー電池にて平滑化した後の出力を意味する。合成出力の目標値は、ウィンドファーム出力を時定数 T の一次遅れ要素で平滑化した値である。レドックスフロー電池に要求される出力は、合成出力の目標値とウィンドファーム出力の差分となる。ただし、電池の容量は有限であるため、電池ロスにより充電レベルが下限に達することや、風況により充電量が放電量を上回り充電レベルが上限に達することが考えられる。これを回避するために平滑化制御を行いながら、適切な充電補正、放電補正を行い常に充電状態を適切なレベルに維持する制御が必要となる。平滑化制御運転時の適切な充電状態は以下のように考えられる。

ウィンドファーム出力を $G(s)$ 、合成出力目標値を $X(s)$ 、電池出力を $Y(s)$ 、充電残量を $Z(s)$ とすると、合成出力目標値は、ウィンドファーム出力を一次遅れ要素で平滑化した値であり、次式で表せる。

$$X(s) = \frac{1}{1 + Ts} G(s) \quad \dots\dots\dots (4)$$

電池システムのロス（電池ロス、交直変換器ロス、等）、および補充電および補放電を考慮しない場合、電池に要求される出力は合成出力目標値とウィンドファーム出力の差となるため、次式で表せる。

$$Y(s) = X(s) - G(s) = -TsX(s) \quad \dots\dots\dots (5)$$

充電状態は電池の充放電により増減するため、電池出力の積分値となり次式で表せる。

$$Z(s) = \frac{-1}{s} Y(s) = TX(s) \quad \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式より理想状態では、電池の充電状態と合成出力目標値が比例の関係にあることがわかる。すなわち、この関係を維持するように充放電の補正を行うことで、適切な充電状態を保ち、安定な連続運転が可能となる。図9に本アルゴリズムにて平滑化制御を行った際の各出力および充電状態の推移を示す。

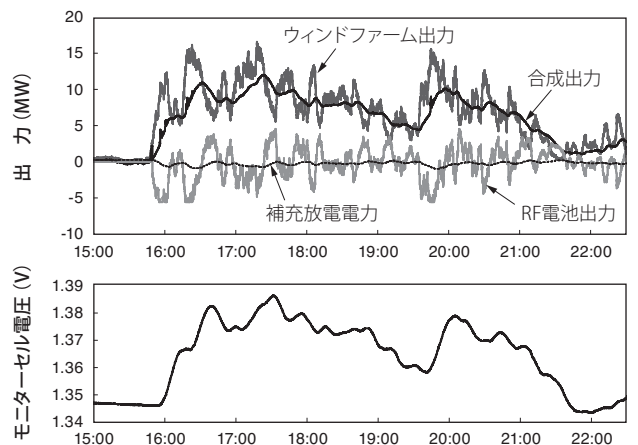


図9 平滑化制御波形例

本制御を実現するには充電状態のモニタリングが必須となる。前述のようにレドックスフロー電池は、セルスタックに電池起電力を測定するセル（モニターセル）を設けることで、起電力測定値から充電状態を正確に把握できるため、本制御を実現することができる。

5. 再生可能エネルギー安定化への適用例

レドックスフロー電池設備を再生可能エネルギーの安定化に適用した、(1) ウィンドファーム出力安定化、(2) 太陽光発電出力安定化、(3) マイクログリッドの需給制御、の3件の実証試験について以下に示す。

5-1 ウィンドファーム出力安定化 ウィンドファーム出力の短周期変動をレドックスフロー電池にて平滑化した実証試験例を以下に記す。本件はNEDOの「風力発電電力系統安定化等技術開発」事業にて、電源開発(株)の苫前ウィンビラ発電所（出力30,600kW、風力発電機19基）に、レドックスフロー電池6MWhを併設して2005年1月から2008年2月の期間に実施されたものである^{(2)、(4)、(5)}。併設したレドックスフロー電池設備の基本仕様並びに機器構成、機器レイアウト、回路構成を表1、図10、図11に

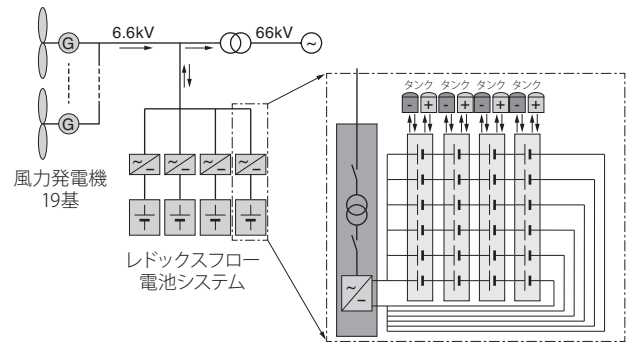


図11 6MWhレドックスフロー電池基本回路構成

表1 6MWhレドックスフロー電池システム仕様

項目	仕様	
連系電圧	三相三線 6,600V ± 5%、50Hz ± 1Hz	
定格交流出力	交直変換装置定格 : 1,500kVA × 4バンク 蓄電池定格 : 1,000kW × 4バンク	
定格放電容量	6,000kWh	
構成機器	数量	内訳
交直変換装置	4面	1面/バンク
セルスタック	96台	24台/バンク
熱交換器盤	16面	4面/バンク
電解液タンク	32基	正負各4基/バンク
電解液循環ポンプ	32基	正負各4基/バンク
電池制御盤	4面	1式/バンク
バンクコントローラ	1面	1面/4バンク

示す。レドックスフロー電池システムは4バンク構成とし、ウィンドファーム出力に応じて稼働バンク数を変化させることで、補機動力損失を低減する設計である。また、各々のバンクに設置したレドックスフロー電池の定格出力は1,000kWであるが、前述の短時間高出力特性の特長を活かし、連系のための各バンクの交直変換装置定格は1,500kWとし、電池定格出力の1.5倍までの交流出力が可能な設計とした。

本システムを用いて、平滑化時定数30分にてウィンドファームの出力平滑化を行った例を図12に示す。ウィンドファームの定格出力に対し、蓄電池の最大出力は6MWと小さいため、ウィンドファーム出力急変時には出力変動に追従できなくなる。このため、本システムではウィンドファーム出力急変時に一時的に平滑化時定数を小さくして、蓄電池への出力要求値を最大出力以下にする制御を行っている。図12に示すように、本制御および第4章に示した補充電/補放電制御を行うことで、ウィンドファーム出力に応じて、適切に時定数が変化し、電池容量が破綻することなく、安定に平滑化運転が行われていることがわかる。

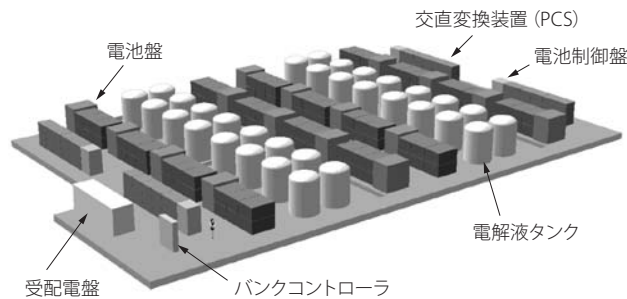


図10 6MWhレドックスフロー電池レイアウト

5-2 太陽光発電への応用 レドックスフロー電池を用いての様々な制御実証および長期信頼性実証を目的として、太陽光発電設備（100kW）とレドックスフロー電池（1MW × 5h）にて構成される実証システム（メガワット級

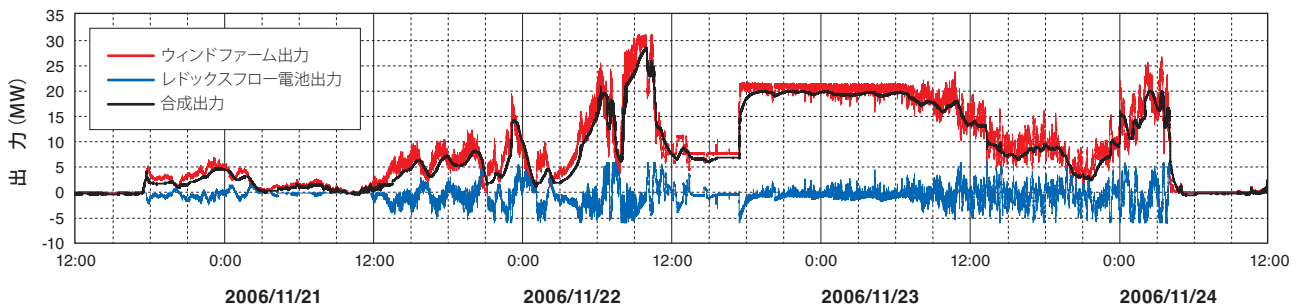


図12 ウィンドファームの出力平滑化例

大規模蓄発電システム⁽⁶⁾を当社横浜製作所内に設置した。構築したシステムの外観を写真1に示す。本システムでの実証試験の狙いは、レドックスフロー電池を用いての太陽光発電の出力平滑化と計画運転の実証である。また、本システムと既設のコージェネレーション発電機との最適運用による工場動力のエネルギー管理の検証を行う狙いもある。レドックスフロー電池は500kW、250kW、250kWの3バンク構成、太陽光発電設備は当社で開発した集光型太陽光発電設備⁽⁷⁾を採用した4ストリング100kW構成である。また、併設のコージェネレーション発電設備(ガスエンジン)は6台で構成され定格出力は3.6MWである。これらの設備の接続概略を図13に示す。また、レドックスフロー電池設備の機器構成を表2に示す。



写真1 メガワット級蓄発電実証システム外観

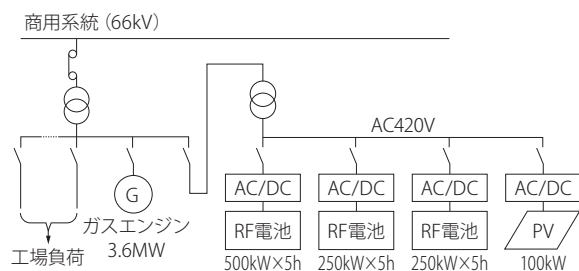


図13 システム構成

表2 レドックスフロー電池システム機器構成

構成機器	数量	内 訳
電池盤	8面	125kW×8面 (各盤にポンプ2台、電池制御盤を内蔵)
電解液タンク	16基	25m ³ ×2基×8組 (各電池盤に正負2基が接続)
交直変換装置(PCS)	3面	500kW×1面、250kW×2面 (各PCSはAC420Vにて連系)

本設備の設置にあたっては、セルスタック構成部材の材料開発による長寿命化、および構造改良による電極単位面積あたりの高出力化を図った新型セルスタックを適用し

た。写真2にセルスタックならびにセルスタックを収納する電池盤の外観を示す。



写真2 新型セルスタックと電池盤外観

2012年7月より本システムにて実証試験を実施中である。これまでに得られている試験結果の一部を以下に紹介する。

(1) 太陽光発電出力平滑化運転

太陽光発電出力変動を時定数60分で平滑化運転を行った時の運転波形例を図14に示す。測定日は晴天で太陽光発電出力の変動は比較的小さいものの、出力短周期変動、出力急増(9:00頃)、出力急減(15:40頃)をレドックスフロー電池により吸収し、滑らかな合成出力を実現できている。

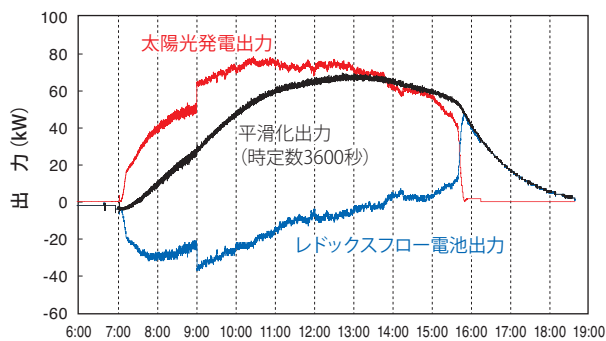


図14 平滑化運転波形例

(2) 太陽光発電計画運転

予め発電出力の計画(スケジューリング)を行い、各時点での計画出力値と瞬時の太陽光発電出力の差分をレドックスフロー電池の充放電で補う運転を計画運転と称する。図15に計画運転試験結果を示す。本試験での計画出力値は7:00から10:00間は50kW、10:00から15:00間は100kW、15:00から18:00間は50kWである。本試験時の天気は曇りで、日射量変動が大きく、その結果、太陽光

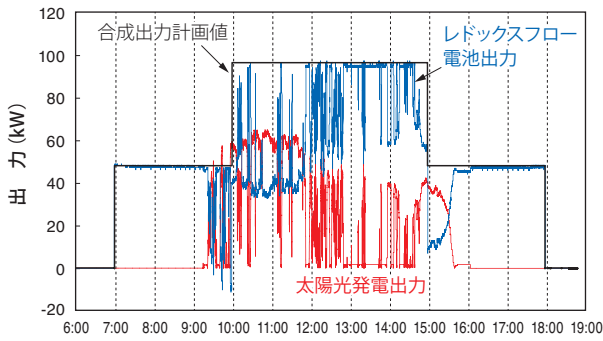


図15 計画運転波形例

発電の出力も変動が大きいですが、各変動を吸収し、かつ合成出力が計画値になるようにレドックスフロー電池からの充放電が実現できていることがわかる。

(3) 製作所受電電力ピークカット運転

再生可能エネルギーの安定化とは異なるが、既設のコージェネレーション発電機と組み合わせて受電電力のピークカットを行った例を図16に示す。夏の昼間の電力ピーク時の9:00から17:00間に本システムから出力することで、製作所電力需要ピーク値対比40%の受電電力削減を実現した。

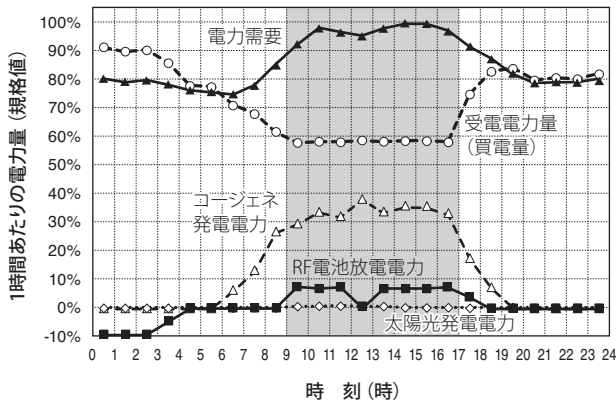


図16 ピークカット運転例

5-3 マイクログリッドの需給調整 最後にレドックスフロー電池を用いた需給調整制御試験について記す。実証システムの構成を図17に示す^{(8),(9)}。図17に示すように、本システムは商用系統から独立したマイクログリッドであり、電力供給側は、太陽光発電と小型風力発電機の自然エネルギーだけで構成される電源系と、グリッド安定化のためのレドックスフロー電池で構成される。これらの機器の出力が直流であることに着目し、本システムでは直流/交流変換ロスの低減を目的に、全ての機器を直流にて

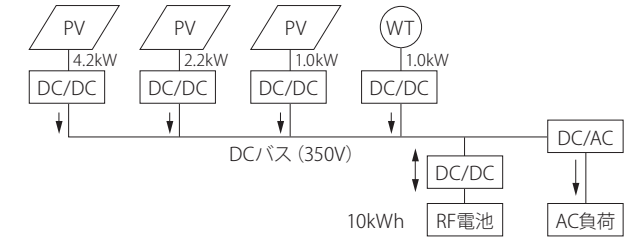


図17 マイクログリッドシステム構成

連系している。発電電力は直流で送電され、需要端にて交流に変換され接続される負荷 (LCD、LED照明、小型冷蔵庫、等) で消費される。

本システムは商用系統に連系されていないため、グリッド内で電力の需給バランスを常時維持する必要がある。本システムでは発電電力は天候に依存し、電力需要に応じた出力制御ができないため、電力需給のアンバランス分を、レドックスフロー電池の充放電にて常時補償する制御を行って、需給バランスを維持している。電力の需給バランスが崩れると連系点の直流電圧が変動するため、本電圧値を一定に維持するように充放電電力を常時調整することで需給バランス制御を実現している。写真3に需給制御に用いたレドックスフロー電池およびセルスタックの外観を示す。レドックスフロー電池の仕様は2kW×5hと前述の2つのシステムと比較して各段に小さいため、必要な電解液量は少なく、セルスタック、タンク、ポンプ等を全て1つの盤に収納した形態をとっている。

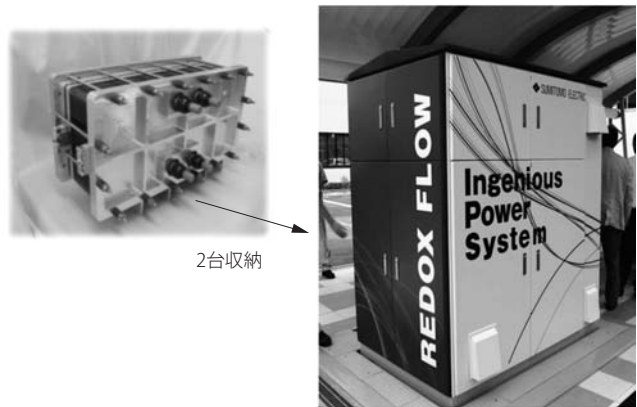


写真3 10kWhレドックスフロー電池外観

図18にレドックスフロー電池を用いて実施した本マイクログリッドの需給調整結果の例を示す。同図より発電電力と消費電力の変動に応じて、レドックスフロー電池が需

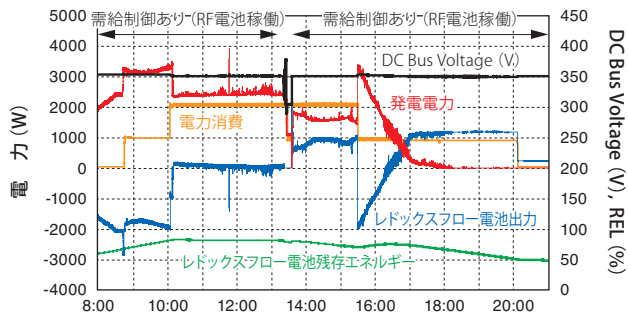


図 18 レドックスフロー電池による需給制御

給バランスを維持するように充放電を行っているのを確認できる。また、その結果、連系点での直流バス電圧が一定に維持されていることがわかる。本システムは、規模は小さいものの、既に1年以上の連続運転を継続しており、大規模化することでレドックスフロー電池にて系統の需給制御が可能であることを示唆する結果と考えている。

6. 結 言

資源枯渇、エネルギー自給の観点から、風力発電、太陽光発電の導入促進が期待される一方で、これらの再生可能エネルギー発電の出力は天候に依存し、計画的に運用できない問題がある。本問題に対し、再生可能エネルギー発電の出力を効率的に利用すべく、レドックスフロー電池を用いた実証試験3件について概要を述べた。ウィンドファームや太陽光発電の出力の短周期変動を平滑化することで、系統に与える擾乱を抑制し再生可能エネルギー発電の連系可能量を増加させる一助になると考えられる。また、蓄電池を用いて、ウィンドファーム、太陽光発電出力をスケジューリングできることで、火力発電等と同様にこれらの発電を計画的に運用することができるようになり、発電の価値向上を促し、導入促進に寄与すると考えられる。また、レドックスフロー電池の高速応答性、短時間高出力特性を活かして、電気事業用の需給制御装置への応用も期待できる。一方で、レドックスフロー電池を含め、蓄電池のコストが高いことが指摘されており、上記の可能性を実現するには、低コスト化開発が非常に重要と受け止めている。今後、レドックスフロー電池の長期信頼性実証、ならびに事業化に向けての低コスト化開発を進め、再生可能エネルギーの有効利用にレドックスフロー電池を役立てていく所存である。

参 考 文 献

- (1) 重松敏夫、「電力貯蔵用レドックスフロー電池」、SEIテクニカルレビュー第179号、P.7 (2011)
- (2) 柴田俊和、「レドックスフロー電池の風力発電出力平滑化用途への適用」、電気設備学会誌、10月号、P.800 (2005)
- (3) 佐々木鉄於、「レドックスフロー電池の応答特性とモデリングに関する考察」、電学論B、121巻 (2001)
- (4) 小林康一、「風力発電電力系統安定化技術開発について」、エネルギー・資源、Vol.25、No.6、P.394 (2004)
- (5) NEDO、平成19年度成果報告書、「風力発電電力系統安定化等技術開発」(2008)
- (6) 中幡英章、「スマートグリッド実証システムの開発」、SEIテクニカルレビュー第182号、P.4 (2013)
- (7) 斉藤健司、「集光型太陽光発電システムの開発」、SEIテクニカルレビュー第182号、P.18 (2013)
- (8) 綾井直樹、「直流マイクログリッドシステム」、SEIテクニカルレビュー第181号、P.124 (2012)
- (9) T. Shibata, "Performance results of Redox Flow Battery System applied to DC micro grid", International Flow Battery Forum 2012 (2012)

執 筆 者

柴田 俊和*：パワーシステム研究所 グループ長



隈元 貴浩：パワーシステム研究所 主席
 長岡 良行：パワーシステム研究所 主席
 川瀬 和典：パワーシステム研究所 主査
 矢野 敬二：パワーシステム研究所

*主執筆者