

直流マイクログリッドシステム

綾井直樹*・久田俊哉・柴田俊和
三好秀和・岩崎孝・北山賢一

DC Micro Grid System — by Naoki Ayai, Toshiya Hisada, Toshikazu Shibata, Hidekazu Miyoshi, Takashi Iwasaki and Kenichi Kitayama — A DC micro grid system has been proposed as a power network that enables the introduction of a large amount of solar energy using distributed photovoltaic generation units. To test the feasibility of the system, we have developed a demonstration facility consisting of silicon photovoltaic (Si-PV) units, copper indium gallium (di)selenide photovoltaic (CIGS-PV) units, concentrating photovoltaic (CPV) units, an aerogenerator, and redox flow battery. The redox flow battery, a key component for supply-demand adjustment in the micro grid system, successfully balanced supply and demand in the grid by its rapid charge-discharge ability even under the fluctuating condition of power generation and consumption.

Keywords: micro grid, DC distribution network, redox flow battery

1. 緒言

太陽光発電の導入量を如何にすれば高めることができるかという視点で、発電装置から需要地で電力を消費する電気製品に至るまでの経路を概観する。太陽光発電モジュールで発生する電力は直流である。現状ではこの電力を電力会社の送配電網を経由して需要地まで送るために、電力変換装置で送配電網に同期した交流電力に変換する。その後は、電力会社の変電設備で、送電ロスを軽減するため66 kV以上の高電圧に昇圧されて需要地近くまで送られ、変電所、柱上変圧器を通過する間に何段階ものプロセスを経て、例えば100Vまで電圧が下げられて住宅などのコンセントに届けられる。よって、電力インフラの構成機器として太陽光発電を考えるのであれば、発電設備の設置コストとその効率、耐用年数で決まる発電単価もさることながら、送配電をいかに効率よく行うかという視点が欠かせない。

夜間や悪天候時に発電しない太陽光発電は、発電装置自体がそうであるのと同じく送配電設備の利用率も低い。太陽光発電で得られる電力の全体に占める割合がわずかであれば、既存の送配電設備の予備容量の範囲内で吸収できるが、その比率が高まると許容範囲を超えるため送配電設備を増設しなければならない。問題を分かりやすくするために、仮に太陽光発電で原子力発電所並みの大電力を得ることを考えてみる。設置面積あたりの発電容量が低い太陽光発電でこのような大電力を得るためには広大な敷地が必要になる。よって、その設置場所は大消費地から遠く離れたところとせざるをえない。送電設備の容量は、最も天候の良い条件で発電されるピーク電力を送るのに十分なものが必要となるが、この送電設備は発電が行われない時間帯では、使われないものとなってしまふ。安定した大電力を絶

え間なく供給することができるダム式水力発電所や原子力発電所であればこそ、需要地から遠く離れた場所にこれらを建設して、遠大な送電線路で大消費地と結ぶシステムも成立するが、太陽光発電には向かない。

発電の変動を蓄電池などの電力貯蔵装置で吸収して、送電する電力を一定に平準化する方法も考えられる。この場合は送電設備は平均電力を送るだけの容量で足りるが、巨大な電力貯蔵装置を準備するためのコストが加算されるため、そのコストがよほど下がらない限りは、設備全体のコストは増えてしまう。それでは、大規模太陽光発電所へ出力調整が比較的容易とされるガスタービン方式の火力発電所を併設してはどうだろうか。この方法であれば、発電の変動をある程度は平準化して、送電設備の稼働率も高めることができそうだが、太陽光発電に匹敵する規模の火力発電所を同時に建設することになる。最初に掲げた「如何にすれば太陽光発電を増やせるか」というテーマからすると迂遠な感が否めない。

以上述べてきたように、需要地から遠く離れた大規模太陽光発電は送配電システムの経済性に大きな課題があり、需要地内とその近傍に分散配置することにより、太陽光発電の導入量を高める方策が求められる。本稿で述べる直流マイクログリッドシステムは、太陽光発電が電力インフラに大量導入される時代にとりうる一形態として提案するものである。

2. 直流マイクログリッドの目的と構成

直流マイクログリッドの目的を簡単にまとめると以下の

三点に集約される。

- ①電力の需要地およびその近隣における分散型太陽光発電の導入許容量を高める。
- ②太陽光発電および蓄電池と、交流の商用系統との接続箇所をまとめて、設備コストを圧縮すると共に、直交変換に伴う損失を低減する。
- ③系統停止時にも、独立運用して直流マイクログリッド内の常用配線を通して電力を供給する。

図1に直流マイクログリッドの概念図を示す。直流マイクログリッドはその名が示す通り直流バスを用い、住宅地であれば数十世帯から百世帯程度のコミュニティを対象とする。従来の交流200V/100Vの配電線路の代わりに400V程度の直流バスを敷設して、高圧の商用グリッドとは双方向の直交変換器を介して接続する。コミュニティ内の太陽光発電装置は全て、この直流バスに接続する。各住宅にインバータを設置して交流200V/100Vに変換すれば、既存の電気製品をそのまま使用することができるが、将来はその高い効率が周知され、開閉器、コンセント等の周辺機器の規格が整備されると、直流のまま利用する方式が普及するものと思われる。さらに、コミュニティ内で共同利用する蓄電池を直流バスに接続する。なぜ直流かというと、太陽光発電と蓄電池が直流、インバータ技術の進歩により電気製品の電源も直流が主流となっているからである。これらを主体として配電システムを構築することから、基幹ラインは直流化した方が設備コストを抑制でき、直流交流変換によって生ずる損失も低減できる。

太陽光発電装置は電力の需要地内に分散して設置するため、発電した電力を遠隔地まで運ぶための送電線は必要ない。コミュニティ内には電源と負荷の両方が存在し、両者の差分が変動要素となる。このうち短周期の変動は蓄電池によって平準化され、コミュニティ内の需給バランスは自律的に維持される。昼夜間等の長周期の変動も蓄電池

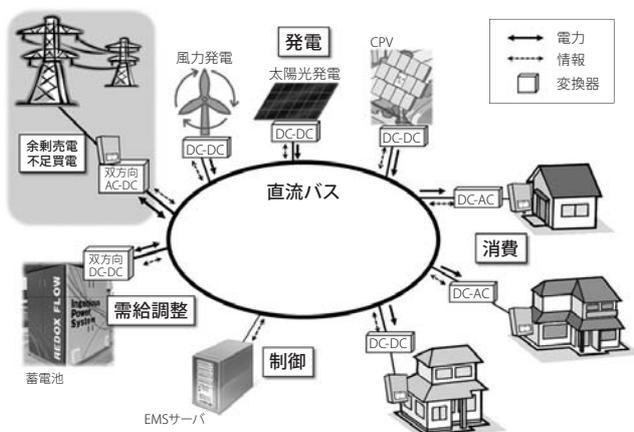


図1 直流マイクログリッドの概念

である程度は平準化され、これと連系する商用グリッドから見るとなだらかに変動する負荷あるいは電源として振る舞うため、商用グリッド側の系統安定化対策は軽減することができる。

直流マイクログリッドではコミュニティ内の需給差の積分値が、蓄電池の充電状態として常に明示される。発電が消費よりも多い時間帯が続けば電池は満充電に近づき、逆に消費が多ければ放電限界に近づく。充電状態に応じて商用系統からの電力の出し入れを調整すれば、マイクログリッド内の電力供給を持続することができる。しかしながら、系統全体の安定化のために、マイクログリッドへの買電あるいは売電が制限される事態も想定しておかなければならない。

系統と協調してマイクログリッドを運用するためには、系統の状況を検知する手段が必須である。現在の系統連系規定でも、直交変換器には、系統との接続箇所において電圧、周波数を監視して、異常値を検出した際には出力を停止する機能の付与が義務付けられている⁽¹⁾。これに加えて、商用系統の制御所からの売電および買電の制限値指令を受けて、電流値を制御する機能を直交変換器に付与する必要がある。

そのための通信インフラを整備する必要があるが、同じ通信回線を使ってマイクログリッド側から売買電量を系統側の制御所に送れば、課金を自動化することもできる。このような商用系統とマイクログリッドの間の双方向通信が実現すれば、売電および買電の単価を変動制にして細かく設定することもできる。系統全体で電力供給が逼迫しているときには、商用グリッドからの買電単価、商用グリッドへの売電単価を共に上げて消費の抑制を促し、供給に余裕があるときには、売買電単価を下げて、消費を促進するのである。このとき、商用グリッドは巨大な電力取引市場と化し、いよいよ統制を掛けなければならない事態に至るまでは、系統の運用の一部が市場原理に委ねられることになる。

以上の、系統との協調制御を実現するには、直流マイクログリッドが高い自律的調整能力を備えていなければならない。蓄電池の容量が十分に大きければ良いが、設置コストとスペースの限界がある。例えば、系統全体で電力が余り、系統への売電が制限される時間帯で、蓄電池が満充電になるとマイクログリッド内の需給バランスを保つためには太陽光発電の出力を抑えるしかない。こういう残念な事態を回避するには、可能なものは蓄電池が満充電に近づいたときに仕事をさせれば良い。逆に電力が足りないときには不急の負荷は停止する。制御対象としては、空調設備、照明、タンク式給湯器、洗濯機、食洗機、電気自動車の充電、ビルや集合住宅では、エレベータ、屋上貯水槽への給水ポンプ等が考えられる。

直流マイクログリッドは災害にも強い。商用系統が停電したときも、連系点でマイクログリッドを解列してこれを独立で運用することができる。負荷への電力供給には常用

配線をそのまま使用することができるので、非常用電源のための専用配線を布設する必要はない。外部からの電力、燃料の供給が断たれている状況でも、太陽さえ昇っていれば電源が確保できる。この状況下で独立運用を持続するには、供給を制限することになるが、非常時であれば同じ地域に住むもの同士が互いに譲り合って貴重な電力を役立てるに違いない。

学校は元々昼間に電力消費が発生し、夜間は消費が少ないので、太陽光発電との相性が良いが、直流マイクログリッド化して蓄電池の状態に応じて空調を制御し、これを生徒達にも知らせるようにすれば、実体験に基づいて省エネ意識を高める教育ができる。災害時の避難所になることも多いが、独立運用が可能な直流マイクログリッドがあれば非常用電源も確保できる。

3. 蓄電池による需給制御

以上述べてきた直流マイクログリッドの要は基幹直流ケーブルに接続する蓄電池とその制御である。短周期の変動を吸収するため、蓄電池は瞬時に充放電電流が変化する動作を頻繁に繰り返さなければならず、この動作に追従できる高速応答性と、耐久性を備えたものでなければならない。また、数十から百世帯ほどのコミュニティーに使うのであるから数百kWhから1MWh級の大容量化が可能なものでなければならない。さらに、充電状態によって負荷運用や、系統からの売買電を制御するため、上記の頻繁に充放電を繰り返す運用下で、正確な充電状態を常に検知する手段が備わっていなければならない。

以上、直流マイクログリッドに求められる高速応答、耐久性、大容量化、充電状態検出の4条件を備えた蓄電池に、レドックスフロー電池（RF電池）がある。図2にRF電池の原理図を示す。RF電池は溶液中のイオンの酸化還元反応で電力の出し入れを行う蓄電池で、電子をやり取りするセル部と、電解液を貯蔵するタンクの間で、電解液を循環して反応を進行させる。一般に、電池は鉛電池、リチウムイオン電池等のように、その活物質を冠して呼ばれることが多いが、この電池はその構造が、他の電池とは大きく異なるため、reduction（還元）-oxidation（酸化）の短縮表現であるredoxと、液循環を示すflowを組み合わせた名称で呼ばれている。電池活物質は正極・負極ともバナジウムイオンを用いる。電極で固体析出は起こらず、電解液中でイオンの価数が増えることで反応が進行するため応答が速く、充放電サイクルによる電解液の劣化も起こらない。また、構造が単純で大型化にも適し、風力発電装置を複数台設置したウィンドファームの出力変動を平滑化する実証研究で用いられた6MWhの実績がある⁽²⁾。循環している電解液の電位を計測することによって、セルに電流が流れている運転中においても常に充電状態を把握することができるのも、他の電池にない特長である。

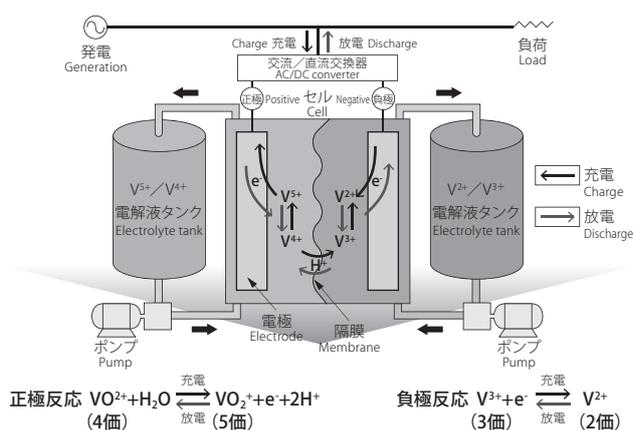


図2 レドックスフロー電池の基本原理

以上の特長は正しく直流マイクログリッドに好適であるが、その一方で、RF電池は他の蓄電池と比べるとエネルギー密度が低く、大きな設置スペースを必要とするという難点もある⁽²⁾。実用化されている二次電池の中で、エネルギー密度が高く、直流マイクログリッドに利用できる可能性があるものとしては、ナトリウム硫黄電池やリチウムイオン電池が挙げられる。これらの電池はRF電池と比べると、高速応答性能と充放電サイクル寿命に課題があるが、近年その性能が飛躍的に向上している電気二重層キャパシタと組み合わせることによってこの問題を克服できるものと期待される。

蓄電池の充放電を制御するため双方向DC-DCコンバータを介して、基幹直流ケーブルに接続する。直流バスには発電装置から電荷が流れ込み、負荷によって電荷が引き抜かれる。前者が後者に対して大きければバスの電圧は上昇し、逆に後者が大きければ電圧は低下する。双方向DC-DCコンバータはバス電圧を常時監視し、目標値よりも高ければ充電を行い、低ければ放電を行うことにより、これを一定に保つ。この実には単純な制御で需給バランスを維持することができる。ただし、バス電圧は蓄電池の接続箇所を検出した値を参照値として、一定化制御が行われるため、マイクログリッド内で蓄電池から離れた地点のバス電圧は目標値からのずれが生じる。発電が消費よりも多く電流が蓄電池に向かって流れているときには、その地点の電圧は目標値よりも高くなり、蓄電池が放電しているときには低くなる。よって、直流マイクログリッドを設計する際には、終端部まで電圧が許容範囲に収まるように、線路長と電流を考慮してケーブルサイズを決めなければならない。直流バスの線路長が長くなり、そのインピーダンスによってバス電圧の均一化が困難になる場合には、複数の蓄電池を分散配置する必要がある。

4. レドックスフロー電池による需給制御実験

蓄電池による直流マイクログリッド内の需給調整を実証するための実験設備を構築した。表1に実験設備の諸元、図3に構成、写真1、写真2および写真3に主な機器の外観を示す。実験の目的が蓄電池によるマイクログリッド内の需給調整であるから、外部の系統とは連系しない独立システムとした。直流マイクログリッドが実際に運用されるスケールと比較すると、本実験設備はその線路長においては同程度であるが、取り扱う電力は十分の一から百分の一である。

直流バスは目標電圧を350V、総延長は約1kmとした。蓄電池は、この実験のために当社で、最大充放電容量4kW、電池容量が10kWhのRF電池を開発して、双方向DC-DCコンバータを介して直流バスのほぼ中間地点で連結した。

発電設備は太陽光発電と風力発電を直流バス上に分散配置した。これらの最大出力を合わせると約8kWである。太陽光発電モジュールは市販の多結晶シリコンおよびCIGS化合物に加えて、当社開発の集光型太陽光発電装置

(CPV)の3種類を設置した。CPVは変換効率が極めて高い化合物系発電素子を用い、太陽を正確に追尾してレンズで集めた光で発電するため、晴れの日にはモジュールの面積が同じ一般的な多結晶シリコンパネルと比べて、およそ2倍の高い出力を得ることができる。従来のCPVモジュールは分厚く重いという難点があったが、薄型化、軽量化を実現した。風力発電は市販の1kW出力の装置を設置した。小型のため太陽光発電と同様に、人が居住する地域内に設置することができるものである。各発電設備と直流バスの間にDC-DCコンバータを設置して、日射や風の条件に応じて、常に最大の出力が得られるように制御した。

表1 直流マイクログリッド実験設備の諸元

直流バス	350 V/1 km
レドックスフロー電池	4 kW/10 kWh
太陽光発電	
多結晶シリコン	4 kW
CIGS化合物	2 kW
集光型化合物	1 kW
風力発電	1 kW
インバータ	4 kW
負荷	
空調、照明等	2 kW
EV充電ステーション	2 kW



写真1 レドックスフロー電池

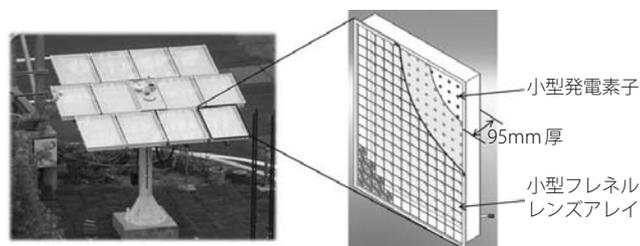


写真2 集光型太陽電池

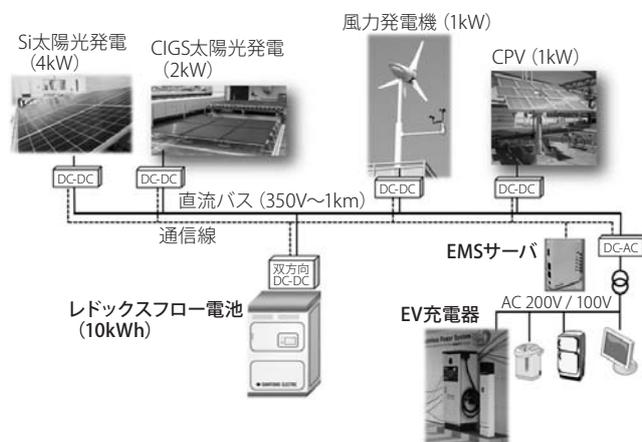


図3 直流マイクログリッド実験設備の構成



写真3 インバータと負荷

負荷は、直流バス的一方の終端に定格出力4kWのインバータを設置して60Hz単相3線の交流に変換し、全てその下位に配置した。インバータの出力は、消費電力を計測して無線通信で管理サーバに計測値を送信することができるスマート分電盤およびインテリジェント電源タップを経由して、空調設備、テレビ、各種の照明、冷蔵庫、EV充電器に給電した。

各発電設備にDC-DCコンバータ、RF電池に双方向のDC-DCコンバータ、負荷側にインバータの合計6台の変換器を設置したが、これらは全て本実験のために当社で開発したもので、LAN接続機能を付与した。制御のため変換器内部で検出した入力および出力の電流、電圧などの運転状態を、管理サーバに送信することができる。

図4にある一日の出力変化を示す。発電および消費の変動に応じて、RF電池が充放電量の調整により需給バランスをとり、直流バス電圧が一定に維持されていることが分かる。本実験装置は既に6か月以上の連続運転を継続しており、RF電池で直流マイクログリッドの需給調整が十分に可能であることを示すことができた。

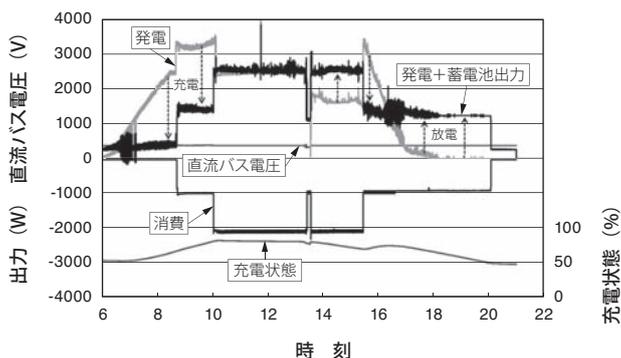


図4 直流マイクログリッド実験設備の運転状況

5. 結 言

送配電を含む電力システム全体で経済性を考慮すると、設備稼働率が低い太陽光発電は電力の需要地内に設置する分散電源とすることが合理的である。この考えに基づいて、本稿では、需要地における太陽光発電の大量導入と系統安定化を両立する手法として、直流マイクログリッドを提案した。また、このシステムの要である蓄電池による需給制御を実証するために行ったRF電池による直流マイクログリッドの実験について述べた。この実験によって、直流マイクログリッドは技術的には十分に可能であることを実証できたと考える。今後は社会状況に応じて、この技術の具体的な用途開拓を推進し、その経済性を更に高める検討も継続したい。

用語集

※1 マイクログリッド (小規模発電網、分散型電力網)
 ガスタービン発電、太陽光発電、風力発電、燃料電池など小規模の発電施設を電力需要地内に設置して連結し、域内の電力需要をまかなう電力システム。遠隔地に建設する大規模集中発電方式に比べて、送電設備の建設費用が安価で、送電によるエネルギーロスが少ない。発電設備が需要地内にあるため、電力と同時に得られる熱と蒸気を利用するコジェネレーションシステムを構築して、エネルギー利用効率を高めることができる。

※2 DC-DCコンバータ (直流・直流変換器)
 ある電圧の直流電流を異なる電圧の直流電流へ変換する装置。

※3 EMS (エネルギーマネジメントシステム)
 電力の安定供給や省エネのために電力の運用を管理するシステム。

※4 電気二重層キャパシタ
 電気二重層という物理現象を利用することで蓄電容量を高めたコンデンサ。

参考文献

- (1) 系統連系専門部会 JEAC 9701-2010 日本電気技術規格委員会 JESC E0019 (2010) 系統連系規格
- (2) 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)

執筆者

綾井 直樹* : パワーシステム研究所 グループ長
 電力制御機器・システムの開発に従事



久田 俊哉 : パワーシステム研究所 主席
 柴田 俊和 : パワーシステム研究所 グループ長
 三好 秀和 : パワーシステム研究所 主席
 岩崎 孝 : パワーシステム研究所 グループ長
 北山 賢一 : パワーシステム研究所 主席

*主執筆者