# 直流マイクログリッドにおける階層型自律分散制御方式の開発

## Development of Hierarchical Autonomous Decentralized Control Method in DC Microgrid

伊藤光洋\*1<br/>Mitsuhiro Ito可知純夫\*1<br/>Sumio Kachi笠原淳一\*1<br/>Junichi Kasahara野呂泰平\*2<br/>Taihei Noro渡部大介\*1<br/>Daisuke Watanabe若菱忠高\*1<br/>Tadataka Wakabishi

## 〈概要〉

2050年のカーボンニュートラルの達成に向けて,再生可能エネルギーの大量導入,電気自動車の 普及が予測される。これらの電源は直流で入出力する特性を持ち,直流接続で統合された直流電力シ ステムは,既存の交流電力システムに比べて直流/交流または交流/直流の変換時に生じる電力損失 を低減することができ,経済的に優れた運用を実現できる。

本研究は,当社が独自に考案した急峻な電力需給変動に対してロバストに電力安定供給を行う自律 分散制御と,電気料金を最小化する全体最適運用を両立する階層型自律分散制御方式,並びに当社内 で構築した階層型自律分散制御方式のミニモデルの構成及び夏季,冬季,中間期の電力需給パターン における運用試験について紹介する。

#### 1. はじめに

2050年のカーボンニュートラルの実現に向け、太陽光発電 (PV)などの再生可能エネルギー(再エネ)の主力電源化,新車 販売の大半が電気自動車(EV)に置き換わると予想される<sup>1)</sup>。 しかし、このように再エネやEVの大量導入に伴い、解決すべ き課題もある。

まず,再エネの中でもPVや風力のような出力変動性のある 電源は,天候や季節に大きく依存するため,電力供給の不安定 性が課題として挙げられる。これにより,電力の同時同量を保 つことができなくなり,停電が発生するリスクが増大すること が懸念されている。

また, PVの導入が増加する中で,電力会社からの出力抑制 要請が増加している。電力会社は電力需給予測を行う際, PV 発電による余剰電力があると予測すると,発電事業者に対して 停電回避のために発電停止依頼を行い,発電事業者は要請に従 う必要がある。その出力抑制量は年々増加し,2023年度には 全国で約18億9000万 kWhに到達した<sup>2)</sup>。このようなことが続 くと,再エネが非効率と見なされ,再エネの普及を妨げてしま う恐れがある。

更に, 再エネ発電事業者から購入した電力や再エネ発電に

よって設備増強した送配電設備にかかるコストは,ユーザの電 気代に上乗せされることになる。

以上のことから,カーボンニュートラル社会に求められる今 後の電力システムとして,既存系統への負担を軽減し,平常時 の環境性・経済性と災害時のレジリエンス強化につながる,エ ネルギーの地産地消を前提とした自家消費型の電力システムが 望ましいと考える。

再エネを自家消費する場合, PVやEV, 蓄電池といった機器は直流機器であるため, それらの機器を直流接続で統合化することで, 電力変換ロスを低減し, 再エネを高効率で活用できる。また, 系統が停電した際にもPVや蓄電池を活用することで, 域内のユーザは継続的な電力利活用が可能となる。

更に、直流の場合は、交流のように周波数や位相などの考慮 を必要としないため、交流の制御と比べてシンプルであり、負 荷設備へ供給する電力の品質が向上する。また、負荷変動によ る高調波やフリッカなどの問題が軽減されるなどのメリットが ある。このように直流機器を直流接続で統合化した電力システ ムを直流マイクログリッド (DC Microgrid (DC-MG))と呼び、 国内外で実証事例が報告されている (図1)<sup>3).4)</sup>。

一方,現在,直流にかかわる標準・規格は整備が進んでおらず, 安全基準の策定や異なるベンダとの相互運用に向けた環境整備 が求められている<sup>5).6)</sup>。

<sup>\*1</sup> 研究開発本部 エレクトロニクス研究所

<sup>\*2</sup> 営業統括本部 レーザ応用事業部



Schematic diagram of DC-MG.

## 2. DC-MGの制御方式

### 2.1 中央制御と自律分散制御

DC-MGの電力制御方式として一般的には中央制御方式が知られている(図2)。中央制御方式は、すべての機器を一台の中 央制御装置(Energy Management System (EMS))が制御する 方式であり、全体最適な運用が可能な反面、EMSとコンバー 夕間でより高速な通信が求められる。そのため、災害時の通信 遮断やEMSの単一故障によりすべての機器が停止してしまう 恐れがある。また、機器の増設時にはEMSの改修や高速通信 網の設置が必要であることからシステム構成の拡張性が低いな どの課題もある。一方、自律分散制御方式(図3)は、各機器が 自端の電圧を測定し、その電圧に応じて機器ごとに制御を行う



Schematic diagram of central control.



図3 自律分散制御の概略図 Schematic diagram of autonomous decentralized control.

方式であり,全体最適な運用が難しいものの,EMSとコンバー タ間で高速な通信が不要であり,通信コストを軽減することが できる<sup>7)</sup>。また,通信が一時的に途絶してもシステムが成立し, 単一故障によってすべての機器が停止してしまうことを避ける ことができるため,信頼性の高いシステムを構築することがで きる。筆者らは,これらの自律分散制御方式のメリットに注目 し,DC-MGの検証を行ってきた。

## 2.2 電圧マージン方式<sup>8),9)</sup>による自律分散制御

電圧マージン方式は図4のように、電力値を一定に制御する 定電力 (CP) 制御と電圧値を一定に制御する定電圧 (CV) 制御 を組み合わせた制御である。各機器は自端の電圧を測定し、電 圧に応じて制御モードと目標値を決定する。この電圧マージン 方式では、CP制御とCV制御という比較的容易な構成で実現 できるというメリットがある。一方、各電圧領域において電圧 維持を行うCV制御機器が複数あると、負荷分担が定まらず、 バス電圧が不安定になるため、各電圧領域におけるCV制御機 器を一台しか設定できないというデメリットがある。このため、 複数台の蓄電池やEVの充放電を行う際に、蓄電池同士、若し くはEV同士における充放電量の割合を自律分散的に任意の割 合で制御することができない。これにより、機器間で蓄電池の 充電状態 (State Of Charge (SOC))の乖離や充電時間の不平等 が生じてしまうことが筆者らの検討により明らかになってい る。また、機器ごとの干渉を防ぐために、CV制御部の設定電 圧には機器ごとに一定以上の電圧差を設ける必要があり、接続 できる機器台数に制限が生じてしまう。



#### 2.3 Droop方式による自律分散制御

これらの課題を解決するため、自律分散制御としてDroop方 式を採用することを検討した<sup>10)</sup>。Droop制御は**図5**のように電 力と電圧の関係が1次関数的に変化する制御のことで、その一 次関数がDroop関数と呼ばれる。このように関数に傾斜をつけ ることで、複数の機器に同じ関数を設定した場合でも、電圧の 平衡点が定まるため、バス電圧が不安定になることがない。こ のDroop関数の傾斜は大きくすることで制御性が高くなりノ イズにも強くなるが、反面、必要な電圧範囲が広くなってしま うトレードオフの関係がある。このDroop関数を適切に設定す ることで、蓄電池同士、若しくはEV同士における充放電量の 割合を自律分散的に任意の割合で制御することが可能となる。 例えば、複数の機器間で同じDroop関数を使用することで、蓄 電池間でSOCの乖離が発生させず、EV充電の不平等を起こさ ない均等な充放電が実現できる。



#### 3. 階層型自律分散制御

Droop制御により,従来の電圧マージン方式の課題を解決で きる一方で,Droop制御も自律分散制御方式の一種であるため, それだけでは最適な制御を実現することができない。そこで, Droop方式を用いて最適な制御を実現するために,全体最適制 御と自律分散制御を組み合わせた階層型自律分散制御を新たに 考案した。

#### 3.1 階層型自律分散制御の概要

階層型自律分散制御は、全体最適制御と自律分散制御から構成される(図6)。全体最適制御では、需要予測やPV発電予測に基づいた最適なエネルギー運用計画の立案及びDroop関数設計を行う。一方、自律分散制御では、自端電圧と受信した Droop関数に基づきDroop制御を行うことで、複数の機器が協調しながらバス電圧の安定制御を実現する。例えば、全体最適制御はEMSに、自律分散制御は電力変換器に搭載される。この階層型自律分散制御により、DC-MGに接続された複数の機器を経済合理的かつ安定的に制御することができる。



図6 階層型自律分散方式の概略図 Schematic diagram of hierarchical decentralized control.

#### 3.2 全体最適制御

全体最適制御においては、EMSが各機器の電力状態や需要 予測、PV発電予測などを考慮しながら、評価指標(例えば、 電気従量料金の最小化など)に基づいて数理最適化計算を実施 し、運用計画を策定する。更に、策定された運用計画の実現と バスの安定性を両立するためのDroop関数を設計し、目標 SOCや契約電力といった情報と合わせて各機器に送信する。 全体最適制御の周期は数十分から1時間程度を想定している。

#### 3.3 自律分散制御

自律分散制御においては、各制御機器が自端電圧を観測し、 受信したDroop関数に追従するようにDroop制御を行う。 Droop関数は図7のように機器ごとに設定され、各機器がロー カルに観測する情報(例えば、蓄電池のSOC、積算電力、停電 情報、EMSとの通信途絶情報など)に基づいて動的に更新され る(例えば、目標SOCより現在のSOCが低い場合には充電が 優先されるDroop関数に変更する、契約電力を超えそうな場合 には系統からの買電電力を抑制するDroop関数に変更する、な ど)。



図7 各機器のDroop 関数の例 Example of Droop function for each device.

#### 4. 実証実験

#### 4.1 実験環境

Droop方式を用いた階層型自律分散制御により、複数の蓄電 池やEVを最適かつ安定に運用できることを実証するために、 模擬機器を使用したミニモデルの実証環境を構築した。図8に 構築したDC-MGのミニモデルの概略図、表1にDC-MGを構成 する各機器の定格を示す。



図8 実証環境の概略図

Schematic diagram of demonstration system.

## 表1 各機器の定格

Specification of each device.

機器	定格
DC/DC	300 W
電池	100 W/700 Wh (1台当たり)
EV	200 W/100 Wh (1台当たり)
PV	125 W(1台当たり)
直流負荷	150 W

なお、本実験では、電池や交流系統は双方向直流安定化電源、 PVは直流電源とPV出力特性を模擬した回路装置、EVは鉛蓄 電池で代用した。また、AC/DCに関してはインバータではな く、他の機器と同型のDC/DCで代用して実証試験を行った。

本検証では、(1)バス電圧が正常範囲内で運用されるか、 (2)2台の電池のSOCが乖離せず、正常範囲に収まっているか、 (3)2台のEVが同時に充電を行った際に、バスの余剰電力が不 足した場合に2台のEVが均等に充電抑制を行うか、(4)30分 単位の平均買電電力が契約電力内に収まっているか、の4点を 確認した。

## 4.2 電池1, 電池2の設定

SOCの正常運用範囲を25-95%とし、SOCが全体最適制御に よって定められた目標SOCに近づくように自律分散制御を行 う。例えば、図9のように予測ずれなどにより目標SOCと実 際のSOCの間に乖離が生じた場合には、通常時のDroop関数 から充電または放電を優先する関数に変更することで,SOC を目標SOCに近づける制御が実施される。今回の実証では, EMSから設定する通常時のDroop関数,充電または放電を優 先するDroop関数はいずれも電池1と電池2で同じ関数を使用 することで,2台の電池間で均等な充放電を実現する。

#### 4.3 EV1, EV2の設定

EVは1台当たり1日2回の頻度で満充電(SOC100%)する。 EVの充電は10時ごろに2台,17時ごろに1台ずつ充電を開始 する設定となっている。なお、EVの充電開始タイミングは全 体最適制御で予測できないものとする。今回の実証では、 EMSから設定する充電用のDroop 関数はEV1とEV2で同じ関 数を使用することで、2台のEV間での均等な充電抑制を実現 する。

## 4.4 交流系統及びAC/DCの設定

契約電力を130 Wとし、交流系統からの買電電力が契約電 力を超えないように自律分散制御を行う。例えば、買電電力の 実績が契約電力に対して大きい場合には買電電力を抑制し、逆 に小さい場合には定格を超えない範囲で買電電力を増加させる 制御が実施される。なお、本試験ではAC/DCの交流側に交流 負荷を設けず、AC/DCの交流側の入力電力をそのまま買電電 力とした。

#### 4.5 PV1, PV2, 直流負荷の設定

図10のように、昼頃に最大となるPV発電パターンと、9時 から12時にかけて最大となる直流負荷パターンを作成し、そ れぞれのパターンを実現するために直流電源及び直流負荷を PCで10秒ごとにリモートコントロールを行った。EMSで使用







する PV 及び負荷の予測データには、作成したパターンに対し て、PV には 60-120%、直流負荷には 80-120% 程度の予測ずれ が発生するように設定した。

## 5. 運用試験の結果・考察

運用試験の結果を図11に示す。上段から各機器のバス側電 力,バス電圧,電池1及び電池2のSOC,更に30分単位の平均 買電電力の時間変化を示している。30分単位の平均買電電力 は、30分毎のデータであり,それ以外のデータはいずれも10 秒毎となっている。バス側電力の時間変化の結果から,終日に 渡って,電力収支のバランスが取れた同時同量の制御ができて いることが分かる。

## 5.1 バス電圧の運用結果

図11のバス電圧の時間変化の結果から,終日に渡ってバス 電圧が正常範囲内で運用されていることを確認した。Droop制 御では,バス電圧がバスの電力収支によって上下するため, PVの余剰電力が多く発生している時間帯(12時ごろ)ではバス 電圧が上昇し,逆にEV充電により電力が不足する時間帯(10時, 17時ごろ)にはバス電圧が低下する結果となる。なお,バス電 圧に関しては10秒毎のデータに加え,DC/DCにおいて10 ms オーダで測定を行い,正常範囲内で運用されていることを別途 確認している。

## 5.2 電池 SOC の運用結果

図11の電池1及び電池2のSOCの時間変化の結果から、2台 の電池のSOCが乖離せず(グラフ上ではほぼ重なっている), 正常範囲に収まっていることを確認した。図12に電圧マージ ン方式を用いて同様の試験を行った場合との比較を示す。今回 の試験条件では、10時半ごろから電池が充電を開始するが、 電圧マージン方式では同じ関数を使用できないため、充電の優 先順位をつける必要がある。図12の関数設定(青実線が電池2, 青破線が電池1の電圧マージン関数)では、電池1が優先的に 充電されることになる。その結果、電池1と電池2の間で8% 以上のSOC乖離が発生してしまっている。一方、Droop方式 では同じ関数を使用することで電池1と電池2が均等に充電を 行い、その結果、SOCの乖離はほとんど発生しない。このよ うに、Droop方式では複数の電池の充放電を公平に制御できる ことを確認した。

### 5.3 EV充電の運用結果

図11のバス側電力の結果が示すとおり、10時ごろにはEV1 とEV2の同時充電が発生している。この時間帯では、その充 電量(200 W×2=400 W)を他の機器で補う十分な電力が確保 できないため、EV側で充電量の抑制が発生する。その際、2台 のEVが均等に充電抑制を行っていることを確認した。図13に 電圧マージン方式を用いて同様の試験を行った場合との比較を 示す。電圧マージン方式では、電池の場合と同様に同じ関数を 使用できないため、充電の優先順位をつける必要がある。図13 の関数設定(緑実線がEV2,緑破線がEV1の電圧マージン関数) では、EV1が優先的に充電され、EV2のみが抑制されるため、 EV2が先に充電を開始したにも関わらず、充電の終了タイミ ングがほとんど同じという不公平な結果になっている。一方、 Droop方式ではEV1とEV2で均等抑制がなされており、複数 のEVの充放電を公平に制御できることを確認した。





図12 電池充電における Droop 方式と電圧マージン方式の比較 Comparison of Droop Method and Voltage Margin Method in battery charging.



図13 EV充電抑制における Droop 方式と電圧マージン方式の比較 Comparison of Droop Method and Voltage Margin Method in EV charging control.

#### 5.4 系統買電電力の運用結果

図11の30分単位の平均買電電力の時間変化の結果から,終 日に渡って契約電力を超えることなく買電を行っていることを 確認した。特に10時及び17時ごろは,契約電力を超えない範 囲で最大限の買電を行いながらEVに充電している。また,18時 以降はEV充電によって低下した電池のSOCを回復するため, 同じく契約電力を超えない範囲で最大限の買電を行いながら電 池の充電を行っている。

### 5.5 長期試験の運用結果

夏季,冬季,中間期のPV発電パターン及び直流負荷パターン(28日分)を作成し,同様の運用試験を28日間に渡って実施した。運用試験と同じく4点で評価を行い,28日間に渡って正常な運用がなされていることを確認した。

### 6. おわりに

従来方式で認められた複数台の蓄電池間における電力制御ば らつきによって生じるSOCの乖離やEV充電の不平等は生じ ず,階層型自律分散制御方式によって,夏季,冬季,中間期の 各期間で正常な運用ができることを確認した。

今回は一例としてEVと蓄電池の両方で均等に充放電を行う 制御を実施したが,充放電の割合は任意に制御可能であり,ユー ザの行動志向と蓄電池容量に応じて経済合理性のあるエネル ギーマネジメントが可能となる。

今後,今回開発した技術を用いて実スケールでの実証に進み, 直流マイクログリッドの社会実装を目指す。

## 参考文献

- 一般社団法人 太陽光発電協会: "PV OUTLOOK 2050 (2024年 版ver.1)"
- 2) 資源エネルギー庁: "再生可能エネルギーの出力制御の抑制に向けた取組等について"(参照日:2024年5月24日)
- 3) 雪田和人: "マイクロ・スマートグリッドと直流給電技術", Journal of JSES, 45 (2019), 6.
- 4) 廣瀬圭一: "海外における直流利活用の動向(その2)", 電気設備学会誌, 44 (2024), 561.
- 5) 直流利活用に関する調査委員会:"直流利活用に関する技術マッ プ及び技術ロードマップ策定に関する調査報告書",国立研究 開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構,(2020).
- 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構: "超分 散エネルギーシステム分野(直流技術)の技術戦略策定に向け て", TSC Foresight Vol.115.
- FAHAD SALEH AL-ISMAIL: "DC Microgrid Planning, Operation, and Control: A Comprehensive Review", IEEE Access, 9 (2021), 36154.
- 8)石川厳,町田武彦,藤井徳寿,渡部篤美:"直流多端子送電集中 制御装置の開発",電気学会論B,97 (1977),17.
- Moussa Belgacem: "Modeling and Control of Multi-Terminal Direct Current with Voltage Margin Control Strategy", 4th ICPEA, (2019), 25.
- カ宗真寛 他: "直流マイクログリッド制御手法の開発" 古河電工 時報141 (2022), 13.