



自立マイクログリッドシステムの最適運用

Optimal Energy Management System for Isolated Micro Grids

石垣 圭久*

Yoshihisa Ishigaki

三好 秀和

Hidekazu Miyoshi

木村 恵敬

Yoshitaka Kimura

山岸 健太郎

Kentarou Yamagishi

松末 育美

Ikumi Matsusue

近年、エネルギーの効率的利用が求められており、スマートグリッドと呼ばれる次世代電力網がその解として期待されている。当社は2011年6月に、次世代電力網の1形態である自立マイクログリッドシステムを大阪製作所内に構築した。本稿では、当社が構築したマイクログリッドシステムの特徴である、自然エネルギーの発電機だけで構成されることによる課題、および既存の電力会社の系統から独立した自立型であるゆえに生じる課題を解決するエネルギーマネジメントシステムを開発、実証した結果について報告する。

We have developed an energy management system (EMS), which controls power generation and consumption using the mixed integer linear programming method. The system has been connected to the isolated micro grid in our Osaka Works, distributing power to a secondary battery and facilities. The system aims to control unstable renewable energy, monitor the battery's state of charge (SOC), and maintain the automatic operation. The system has successfully operated, meeting the above three purposes for six months.

キーワード：マイクログリッド、需給制御、自然エネルギー、混合整数線形計画法

1. 緒言

近年、東日本大震災による電力危機や環境問題意識の高まりにより、エネルギーを効率的に利用することが重要課題となっている。その解としてスマートグリッドと呼ばれる次世代電力網に期待が寄せられている。当社では2010年1月より次世代電力網向けの機器・システム開発を専門とした研究開発部門を立ち上げ、新市場に参入するべく取り組みを進めている。

スマートグリッドは電力の流れを需要側と供給側から制御することにより、エネルギーを高効率で利用することができるシステムである。中でも、分散型電源と負荷が組み合わせられた小規模システムをマイクログリッドシステムと呼ぶ。当社は、2011年6月に大阪製作所内に発電装置として太陽光発電と風力発電、蓄電池としてレドックスフロー(RF)電池を持ち、既存の電力会社の系統から独立した自立マイクログリッドシステムを構築した^{(1), (2)}。

本マイクログリッドシステムは、自立型である上に自然エネルギーを用いた発電装置のみで構成されているため、発電電力が急峻に変動し、安定した品質の電力供給が困難である。その上、発電電力は気象条件に左右されるため、需要に応じた発電が常時叶うとは限らない。つまり、電力品質を安定させること、需要に応じて電力を供給することの2点の課題を抱えている。本稿では、これら課題を解決するエネルギーマネジメントシステム(EMS)を開発し、実証した結果について報告する。

2. 自立マイクログリッドシステム構成

図1に当社が開発したマイクログリッドシステムの概要を示す。本マイクログリッドシステムは商用系統と独立した自立型システムである。分散型電源として市販の多結晶シリコン太陽光発電装置(SiPV) 4kW、CIGS化合物太陽光発電装置(CIGSPV) 2kWと自社開発の集光型化合物太陽光発電装置(CPV)^{(3), (4)} 1kW、風力発電装置1kWをDC/DCコンバータを介して総線路長約1kmのDCバスで連結している。DCバスのほぼ中間地点には、蓄電池として最大充放電容量4kW、電池容量10kWhのRF電池⁽⁵⁾が

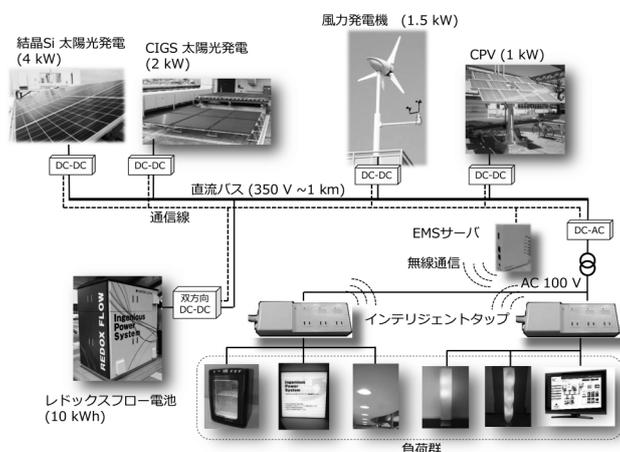


図1 自立マイクログリッドシステム

双方向DC/DCコンバータを介して接続されている。発電された電力は、まずDC/DCコンバータで直流のまま350Vに昇圧され、直流バスを経由してRF電池に貯蔵、あるいはDCバス的一端に設置された最大出力4kWのインバータにより交流に変換され、スマート分電盤、インテリジェントタップを経て、各種負荷機器に供給される。発電電力が必要電力に対し不足している場合には、RF電池からの放電によって負荷に電力が供給される。用意した負荷は6種類、合計750Wである。表1に本システムの設備構成をまとめる。

表1 自立マイクログリッドシステムの設備構成

直流バス (電圧,総延長)		350V, 1km	
蓄電	レドックスフロー電池 (最大出力,容量)		4kW, 10kWh
発電	太陽光	多結晶シリコン	4kW
		CIGS 化合物	2kW
		集光型化合物	1kW
	風力発電	1.5kW	
消費	インバータ (最大出力)		4kW
	負荷	テレビ	150W
		フロア照明 1	100W
		フロア照明 2	10W
		ダウンライト	180W
		パネル照明	250W
		ワインクーラー	60W

各発電装置及びRF電池の各種DC/DCコンバータ、インバータおよび各種負荷機器が接続されるスマートタップは有線/無線のネットワークを介してEMSに接続され、発電、蓄電および消費の電力と電力量を収集すると同時に、運転開始、停止等の操作を遠隔で行うことができる。収集した発電、蓄電および消費の計測データは、本報告内容である充電残量の最適管理に使用される他、リアルタイムの状況や、過去の発電、消費データのトレンドのディスプレイ表示に使用される。

3. エネルギーマネジメントシステム

3-1 システム概要

本マイクログリッドシステムの構成から、電力の需給をバランスできる設備はRF電池だけであることに着目すると、自然エネルギーの急峻な変動および需要に対する発電の過不足をRF電池の充放電によって賄う必要がある。当然ながら、RF電池が充放電可能であるためには、充電残量が空の状態または満充電の状態となってはならない。このような状態を回避するためには、消費および発電を適切に制御する必要がある。

これら要件を満足するべく開発したシステムの構成図を

図2に示す。開発したシステムは、充電残量が空の状態、満充電でない条件下で需給バランスを実現する「DCバス電圧一定化制御」と、発電予測と需要パターンに基づいて最適な発電と消費の抑制を計画することで、充電残量が空の状態または満充電の状態とならないように管理する「充電残量最適管理」によって構成される。

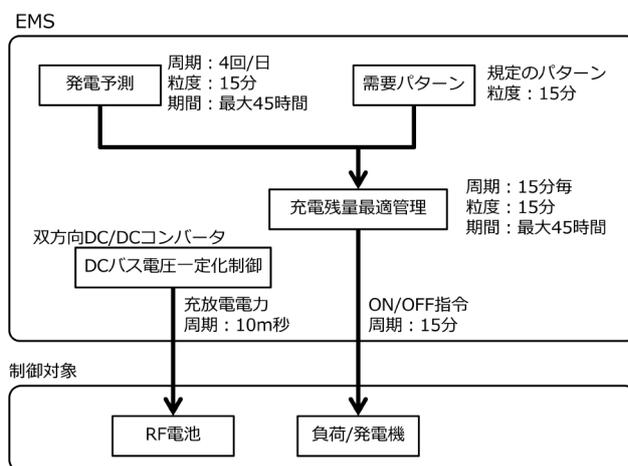


図2 EMSシステム構成図

充電残量最適管理では、モデル誤差や発電予測の誤差等の外乱に対応するため、15分の粒度で最大45時間先までの計画を15分毎に計算することとした。計画の期間については、本マイクログリッドシステムの発電電力が太陽光発電装置に依るところが大きいことから、少なくとも翌日の天候を考慮して今日の消費計画を立てる必要性を考慮した結果である。

3-2 DCバス電圧一定化制御

本マイクログリッドシステムでは、発電装置から直流バスに電荷が流れ込み、負荷によって直流バスから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。そこで、電力の需給をバランスさせるために、蓄電池に接続された双方向DC/DCコンバータがバス電圧を常時監視し、目標値よりも高ければ充電、低ければ放電を行うことにより、DCバス電圧を一定に保つように制御する。このフィードバック制御を本システムでは10msという高速な制御周期で行うことによって自律的に需給バランスの維持を実現した。本稿では、この制御をDCバス電圧一定化制御と呼ぶ。制御の詳細は文献(7)に譲る。ところで、RF電池は高速の応答特性を持ち、また充放電深度に依らず充放電サイクル寿命が長いという特徴を持っており、本制御に適した電池であること⁽⁵⁾を付記しておく。

3-3 発電予測

充電残量最適管理にて使用する太陽光発電と風力発電の予測を1日4回、15分刻みの予測を最大45時間先まで出力する⁽⁶⁾。詳細を表2に示す。

予測すべき対象としては需要も挙げられるが、本実証においては需要パターンを任意に設定することとし、需要の予測は行わない。

表2 発電予測

予測時刻	予測期間
6:00	27時間先(翌日 9:00)まで
9:00	27時間先(翌日 12:00)まで
12:00	27時間先(翌日 15:00)まで
15:00	45時間先(翌々日 9:00)まで

3-4 充電残量最適管理

充電残量最適管理の制御対象は、インテリジェントタップに接続された負荷(家電)それぞれのコンセント単位のON/OFF、発電機に取り付けられた昇圧コンバータの起動/停止、RF電池に取り付けられた双方向コンバータの起動/停止である。負荷の制御は充電残量が空の状態を回避するためであり、発電機の制御は充電残量が満充電の状態を回避するためである。蓄電池の起動/停止制御は、全ての発電装置および負荷を停止させる状況において補機電力による消費などを減ずるための措置である。

充電残量を管理する主目的は、充電残量が空の状態および満充電の状態の回避である。本システムでは充電残量を管理するための手段として発電と消費の抑制を行うが、発電を抑制することは本来活用できるはずであったエネルギーを無駄にすることであり、効率的なエネルギー利用という意図に反する。また、消費を抑制することは需要家に対して満足な電力供給ができない状況であるため、これもまた望ましくない。以上より、充電残量の管理を行う上で発電と消費の抑制は必要であるが、実施する抑制は最小限に抑えることが肝要である。

充電残量最適管理では、抑制を実施せざるを得ない場合には、あらかじめ設定した負荷および発電機それぞれの優先度に基づいて算出する「抑制された場合の不満度」を定義し、不満度を最小化する運用を狙う。

3-5 充電残量の制約

図3に充電残量に関する設定を示す。蓄電池の充電残量が空の状態および満充電の状態を回避するため、計画内のすべての時刻(t)において「4% < 充電残量 < 96%」を制約条件とする。その上で、予測の誤差や外乱等の要素によって計画と実績に差が生じることを考慮し、図3に示すように充電残量が8%→4%(92%→96%)へと近づくにつれ増大するペナルティを設定した(図3(a))。さらに、計画の最後の15分間(計画最終時刻)については図3(b)に示すように充電残量が一定以下で少量のペナルティが生じる設定とした。これは、予測可能な期間が有限であるため、予測期間よりも未来における不測の事態を回避するための予防策である。

ナルティを設定した(図3(a))。さらに、計画の最後の15分間(計画最終時刻)については図3(b)に示すように充電残量が一定以下で少量のペナルティが生じる設定とした。これは、予測可能な期間が有限であるため、予測期間よりも未来における不測の事態を回避するための予防策である。

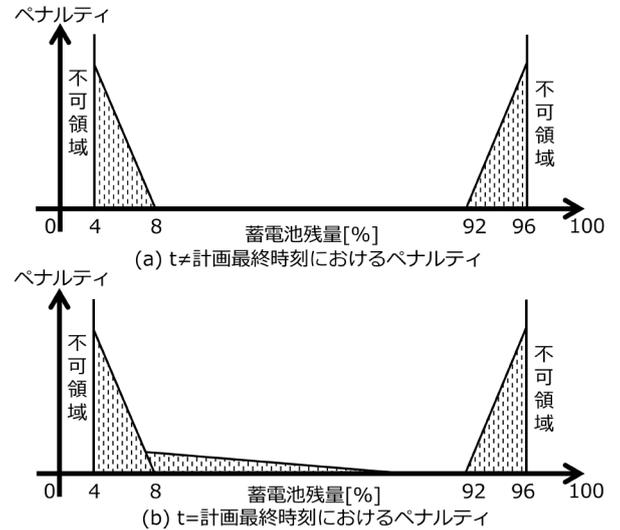


図3 充電残量の制約設定

3-6 需要パターンと負荷抑制時の不満度

図4に負荷の需要パターンを示す。設置されている負荷を昼間は全て使用し夜間は全て停止する。実験のための恣意的な需要パターン形状ではあるが、本実証の主旨はいかなる需要パターンであったとしても不満度を最小化するシステム開発であることから、需要パターンの形状は本質的な問題ではない。

負荷の抑制に対する不満度は、需要パターンを満足する状態を不満度が最小とし抑制が行われるほどに不満度が大きくなる設定とする。また、負荷間では優先すべきもの

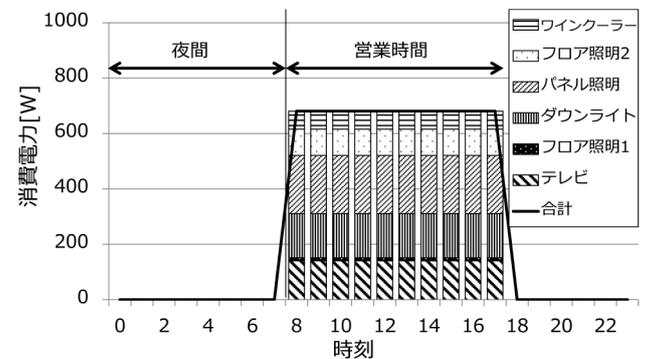


図4 需要パターン

を抑制した場合の方が高い不満度とする。ここで、本マイクログリッドシステム固有の条件を考慮する。本システムは実証用であると同時に技術PRの用途を兼ねているため、不定期に見学者が訪れる。見学者の予定は予め入力されるが、見学時には案内者がシステムの説明を行うために特定の負荷を使用する必要がある。この見学時と平時の2種類について設定した不満度（ペナルティ）を表3に示す。

表3 負荷抑制時の不満度設定

	不満度（ペナルティ）	
	平時	見学時
テレビ	6	—（必須）
フロア照明 1	5	—（必須）
フロア照明 2	2	2
ダウンライト	4	—（必須）
パネル照明	3	—（必須）
ワインクーラー	1	1

3-7 発電抑制時の不満度

発電機についても、抑制を行わないことが望ましい状態であることから抑制が行われない状態を不満度が最小とし、抑制が行われるほどに不満度が大きくなる設定とする。また、複数の発電機を抑制する場合は、優先すべきものを抑制した場合の方が高い不満度とする。表4に発電機の不満度（ペナルティ）の設定を示す。

表4 発電機抑制時の不満度設定

		不満度（ペナルティ）
太陽光	多結晶シリコン	3
	CIGS 化合物	2
	集光型化合物	4
風力発電		1

3-8 その他諸設定

その他の設定条件を列挙する。

- ① いずれかの発電機もしくは負荷を運転させる場合には、必ず蓄電池も運転させる。
- ② 土日祝日は負荷および発電機、蓄電池を全て停止する。

3-9 定式化

ここまで述べてきた条件を最適化問題として定式化すると次のようになる。

【目的関数】

$$\text{minimize } \Sigma \text{ペナルティ}$$

【制約条件】

- ① 充電残量の時間軸方向への連続性
- ② 充電残量の上限/下限
- ③ 充電残量の上限/下限付近のペナルティ
- ④ 充電残量の計画最終時刻におけるペナルティ
- ⑤ 蓄電池の充放電出力制約
- ⑥ 電力需給バランス制約
- ⑦ 負荷抑制時の不満度設定
- ⑧ 発電機抑制時の不満度設定

【制御変数】

- ① 各種負荷のON/OFF
- ② 各種コンバータのON/OFF

4. 実証結果

4-1 DCバス電圧一定化制御による需給バランス

充電残量最適管理を行わず、DCバス電圧一定化制御のみで運用した、ある1日のDCバス電圧と発電、消費、充放電による電力の様子を図5に示す。本実証では、自然エネルギーによる不安定な発電の変化に加え、急峻な変化を伴う需要パターンを設定することで、需給のバランスが困難な条件を設定している。図5の結果では、発電および消費の急峻な変動に依らず、DCバス電圧が一定に維持されていることから、RF電池が充放電量を適切に調整し需給をバランスできていることがわかる。

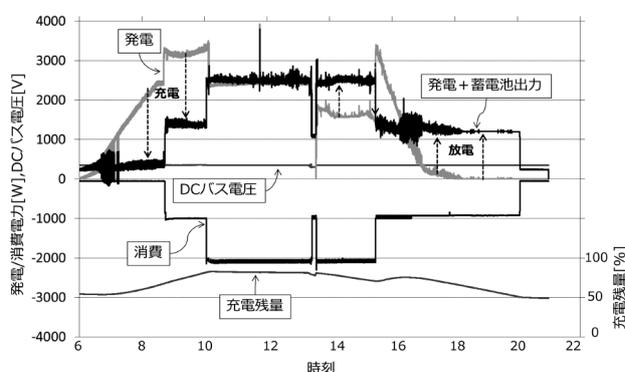


図5 DCバス電圧一定化制御結果

4-2 充電残量最適管理による効果

図6に充電残量最適管理を運用した2013年6月24日～7月13日の3週間の結果を示す。まず、3週間どのような天気や見学予定があろうとも、充電残量が空の状態と満充電の状態を回避できていることがわかる。1週目の6月24日～6月28日は充電残量が少なく発電電力量が少ないため、消費電力を抑えた運用となっており、負荷は優先度に基づ

いて、テレビとフロア照明1を優先して使用していた。2週目の7月1日～7月6日には天候が比較的改善したため、負荷の消費が多くなってきているが、見学によって電力を大きく消費していることもあり、負荷は抑制気味で推移している。3週目の7月9日～7月13日においては、快晴が続いたことから十分な発電量が得られ、消費の抑制はほぼ行われていない。一方で7月11日～7月13日では、充電残量が十分であることから、発電機の抑制が行われている。

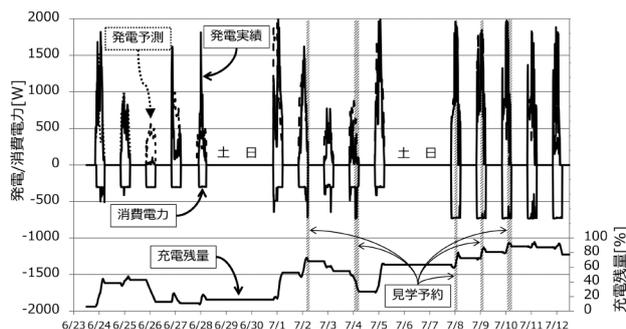


図6 充電残量最適管理による長期運用結果

4-3 充電残量最適管理における短周期再計画の効果

充電残量最適管理の1日の運用について考察する。図7は2013年7月15日の午前0時に立てた計画と15分毎に再計画を繰り返した結果を示したものである。この日は午前0時段階の発電予測が1日を通じて十分に大きいため、需要パターンを満足するべく消費を最大とする計画が立案されている。しかし、発電予測が大きく外れたため、仮にこの計画を運用したならば、20時時点の充電残量は30%程度へと推移することになっていた。一方、15分毎に再計画する運用では、11時付近から充電残量の減少を鑑みて、消費を抑制する計画へとシフトすることで、極端な充電残量

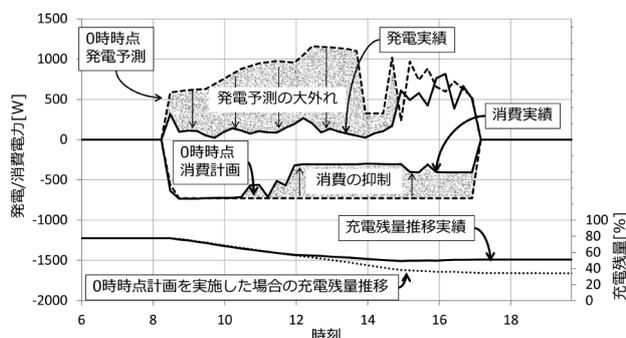


図7 2013年7月15日の運用結果

の減少を回避している。このことから、高精度な予測が難しい自然エネルギーを対象とした最適計画を行う場合には、短周期の再計画によって予測誤差を吸収することが有効であることを示せた。

7. 結 言

エネルギーの高効率利用の一方策であるマイクログリッドシステムの中でも、商用電力系統と連系しない自立型かつ自然エネルギーのみを用いた自立マイクログリッドシステムにおいて、不安定かつ限られた電力を安定した品質で最適に供給するEMSを開発した。本EMSにより、当社のマイクログリッドシステムは2013年4月1日から本稿執筆時である2013年10月31日まで、充電残量が空の状態および満充電の状態に至ることなく自動で最適な運用を実現し続けている。

用語集

※1 スマートグリッド

電力の流れを供給側・需要側の両方から制御することで電力需給の最適な調整を行える送電網。省エネとコスト削減および信頼性と透明性の向上を図ることができる。

※2 マイクログリッド (小規模発電網、分散型電力網)

ガス/ディーゼル発電、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、域内の電力需要を賄う電力システム。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、発電と同時に得られる熱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もできる。

参 考 文 献

- (1) 綾井直樹、久田俊哉、柴田利一、三好秀和、岩崎孝、北山賢一、「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)
- (2) 石垣圭久、奥村俊明、久田俊哉、綾井直樹、北山賢一、松末育美、三好秀和、「DCマイクログリッドの開発(1) -自律分散電源システムの開発-」、平成24年電気学会電力・エネルギー部門大会、132、pp.06-5-6 (2012)
- (3) 鳥谷和正、安彦義哉、岩崎孝、「DCマイクログリッドの開発(4) -集光型太陽光発電装置の開発-」、平成24年電気学会電力・エネルギー部門大会、135、pp.06-11-12 (2012)
- (4) 斉藤健司、安彦義哉、鳥谷和正、森宏治、古結靖和、岩崎孝、「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)

- (5) 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)
 - (6) Y. Abiko, K. Hirotsu, Y. Ishigaki, J. Itoh, T. Iwasaki, Y. Kimura, K. Saitou, K. Toya, and K. Yamagishi, "CPV Power Generation Estimation Based on Weather Forecast Information" 9. International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, Poster Session 2 P32, Miyazaki, Japan (April 2013)
 - (7) 奥村俊明、石垣圭久、久田俊哉、綾井直樹、「DCマイクログリッドの開発(2)ーDCバス制御の開発ー」、平成24年電気学会電力・エネルギー部門大会、133、pp.06-7-8 (2012)
-

執筆者

石垣 圭久* : パワーシステム研究開発センター



木村 恵敬 : パワーシステム研究開発センター



松末 育美 : インフォコミュニケーション・
社会システム研究開発センター



三好 秀和 : インフォコミュニケーション・
社会システム研究開発センター
グループ長



山岸健太郎 : パワーシステム研究開発センター
部長



* 主執筆者