

## ハイブリッドマイクログリッドシステムにおける加重移動平均フィルタを用いた電圧安定化の改善

著者	石田 聖也, 呉 国紅
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	55
号	1
ページ	1-9
発行年	2021-02
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1204/00024689/">http://id.nii.ac.jp/1204/00024689/</a>

## ハイブリッドマイクログリッドシステムにおける 加重移動平均フィルタを用いた電圧安定化の改善

### Improvement of Voltage Stabilization in a Hybrid Microgrid Supplied by RES by use of Weighted Moving Average Filter

石田 聖也\*

呉 国紅\*

Seiya Ishida

Guohong Wu

**Abstract:** This study presents a new method for bus voltage stabilization in a hybrid microgrid supplied by renewable power sources. To date, we have presented some experimental study results obtained from a hybrid microgrid prototype system, that was developed and installed Tagajo Campus of Tohoku Gakuin University, Japan. The microgrid consisted of a secondary battery and electrical double layer capacitors (EDLC) and have significantly different charging/discharging properties as well as cycle life, cost, and size. Therefore, to properly control the power storage devices in this microgrid the measured voltage signal needs to be divided into those with different frequencies. Thus far, only low pass filter (LPF) has been adopted in our previous studies to realize this separation; however, our experimental studies have shown that a time delay may occur in some cases and may deteriorate the voltage stabilization ability of the system. Therefore in this study a new signal processing method was designed to improve the voltage stabilization, called as weighted moving average filter and based on the weighted moving average formula used in the field of statistic. This paper presents the simulation results with a microgrid system model that has the same configuration as the developed hybrid microgrid. Furthermore, the improved DC bus voltage stabilization through the application of the proposed WMAF was examined and addressed in this paper.

**Keywords:** Hybrid Microgrid, LPF, Power Storage, Renewable energy, Voltage stabilization, Weighted Moving Average Filter.

## 1 はじめに

近年、化石燃料などのエネルギー枯渇問題やオゾン層破壊や気候変動などの地球環境問題が注目され、京都議定書やパリ協定など、様々な取り組みが行われている。その一つとして、太陽光発電、風力発電、地熱発電などの再生可能エネルギー発電の導入が世界中で急速に進められている。再生可能エネルギー発電の特徴として、天候や環境条件に大きく影響する可能性がある。その結果、既存の電力網に大量の再生可能エネルギー発電を想定した場合、電圧と周波数の安定性を維持する必要があると同時に様々な課題がある。

再生可能エネルギー発電の変動性、間欠性、不確実性があることで電圧や周波数の安定性に問題が生じ、電気機器や設備の故障や動作不良など、さまざまな問題が発生する可能性がある。このような問題を解決するためには、マイクログリッド技術は有効な方法であることが証明されている<sup>[1]</sup>。マイクログリッドは、通常、太陽光発電、風力発電、小型水力発電などの複数の再生可能エネルギー発電と、この発電による電力不均衡や変動に対処することを目的とした二次電池や EDLC などの電力貯蔵装置を含む。

マイクログリッド技術は長年にわたって研究され、いくつかの実証プロジェクトを実施し、完了または世界中において進行中である<sup>[2]</sup>。これらのマイクログリッド技術の中には、交流電力でやり取りを行うための AC マ

\* 東北学院大学大学院

マイクログリッドと、直流電力でやり取りを可能とした DC マイクログリッドがある。当研究室では、2007 年から DC と AC の両方に同時に電力を供給できるハイブリッドマイクログリッドの提案・開発を行った。その研究成果の一つとして、東北学院大学多賀城キャンパスに小型試作システムを設計し設置されている<sup>[3][4]</sup>。このハイブリッドマイクログリッドシステムでは、再生可能エネルギー発電の電力が需要負荷を供給するのに十分でない場合に備えて、電力貯蔵装置から電力の不足分を補償することも可能である。開発されたマイクログリッドシステムは、単なる実験用の設備ではなく、新しいマイクログリッド関連技術の様々なさらなる開発に適した設計である。

他の種類のマイクログリッドと同様に、このハイブリッドマイクログリッドシステムの主要な課題の1つは、再生可能エネルギー発電によって発生する電力は不安定であり、不確実で断続的な発電による変動電圧である。したがって、提案されたシステムは、それぞれ鉛蓄電池と EDLC を用いることで電圧変動を軽減する。また、2種類のエネルギー貯蔵装置を組み込むことで容量、応答、コストを考慮する必要がある。これらのエネルギー貯蔵装置は、良い安定化効果を得るために、電圧変動の異なる部分を協調的に補償することに使用される。これらの目的のために、測定された母線の電圧信号を鉛蓄電池と EDLC の協調制御のために、周波数が異なる2つの部分に分ける必要がある。信号分離を実現するために、これまでの研究では LPF(Low Pass Filter)を採用してきたが、LPF の時間遅延が制御応答を劣化させ、電圧安定化効果を悪化させる可能性があることがわかった。そこで本研究では信号分離のために、金融や気象等の広い分野で分析を行う際に使用される加重移動平均式に基づいて設計する加重移動平均フィルタ(WMAF)を使用した<sup>[5]</sup>。また、開発したハイブリッドマイクログリッドと同じ構成に基づくシミュレーションモデルを完成させ、開発したシステムから得られた実験データの一部を利用した。

その結果、提案した WMAF 法の適用により、測定された電圧信号を迅速に適切な信号に分離して鉛蓄電池と EDLC の協調制御を行うことにより直流母線電圧を効果的に安定化できることが分かった。

この論文では、次の内容を説明する。第2章では、マイクログリッドと DC マイクログリッドを説明した後、ハイブリッドマイクログリッドについて説明する。第3章では、ハイブリッドマイクログリッド内の直流母線電圧の安定化制御に関して説明する。第4章では、安定化制御の際に使用するフィルタとして、今回新しく提案する加重移動平均フィルタに関して説明を行う。第5章では、この加重移動平均フィルタを用いたシミュレーションを行い、その結果に関して考察する。第6章では、今回の研究に関する結論を述べる。

## 2 ハイブリッドマイクログリッド

ハイブリッドマイクログリッドは、従来のマイクログリッドの特徴を持ち、また DC マイクログリッドのような、近年増えつつある直流で動く製品に、高効率で電力を供給することが出来る特徴も持つ。本章では、最初にマイクログリッドと DC マイクログリッドを説明し、その後ハイブリッドマイクログリッドについて説明する。

### 2.1 マイクログリッドの概要

マイクログリッドとは、電源を太陽光発電や風力発電のような再生可能エネルギー発電を電源として、電力を需要設備に供給するための小規模なエネルギーネットワークである。そのため、火力発電所や原子力発電所などのような既存の発電所に依存しないという特徴を持つ。さらには電源が太陽光発電や風力発電等の場合、それぞれ自然エネルギーを利用して発電することが可能であり温室効果ガスの削減に繋がるため、環境に負荷をかけないというメリットもある。他のメリットとして電力を送電、供給等のための電力システムを構築することが困難な孤島のような地域では、このマイクログリッドの技術

は有効な手段になる。また、従来マイクログリッドは、交流で動く電気機器が多かったため、電力を交流でやり取りをすることが多かった。しかしながら、近年バッテリーや太陽光電池のような直流で動作する機器が多くなったため DC マイクログリッドという直流で電力のやり取りを行うものも研究や開発が進められている。

## 2.2 DC マイクログリッドの概要

前述により従来のマイクログリッドは、交流で電力のやり取りを行うことが多かったが、近年パソコン関連機器や太陽光電池のような直流で動作する製品が多くなってきている。再生可能エネルギー発電やエネルギー貯蔵装置の大部分は直流電力である。

交流を用いた従来のマイクログリッドでもコンバータ等を用いて交流を直流に変換し、直流で電気機器を動作させる方式で電力供給を行うことが可能であるが、電力変換時の損失が生じるため効率が落ちてしまうことがある。そこで、直流電源を用いて電力を供給することができる DC マイクログリッドが必要になる。この DC マイクログリッドは、比較的回路構成が簡単なチョッパ回路や DC/DC コンバータと接続することも可能であり、従来のマイクログリッドと DC マイクログリッドのそれぞれのメリットを生かした新たなマイクログリッドとしてハイブリッドマイクログリッドを構成することができる。

## 2.3 ハイブリッドマイクログリッドの構成

当研究室で開発したハイブリッドマイクログリッドは、独立した直流母線の電圧と交流母線の電圧を介して交流負荷と直流負荷の両方に同時に電力を供給することが可能である。直流母線と交流母線がそれぞれあることで、パソコン、LED、EV 充電器などの直流負荷およびモーターや家電などの交流負荷に直接電力を供給することが可能になる。直流母線と交流母線は双方向の DC/AC インバータを介して相互接続されており、再生可能エネルギー発電とディーゼル発電機

で発電された電力を交流母線に送電し、交流母線から電力を受け取ることも可能である。これにより、直流母線と交流母線間で電力を双方向に伝送し、交流負荷と直流負荷に同時に供給することが可能である。ハイブリッドマイクログリッドは、交流母線と直流母線から直接、交流負荷と直流負荷に電力を供給できるため高い電力変換効率を有する可能性があると言える。

また、このマイクログリッドの主要電源は太陽光発電や風力発電等といった再生可能エネルギー発電である。そのため、ハイブリッドマイクログリッドにおける母線の電圧は、単独運転における電力需給の不均衡に加えて、再生可能エネルギー電源の変動により不安定になりがちである。有効かつ安定した動作を実現するために、鉛蓄電池と EDLC の蓄電装置がそれぞれ必要になる。

図 1 の写真は、開発したハイブリッドマイクログリッドシステムである。以下に機能を示す。

- (1) 再生可能エネルギー発電(太陽光発電、風力発電等)を主電源として使用している。
- (2) 直流負荷と交流負荷の両方に、同時に安定して供給が可能になる。
- (3) 安定した回復力のある電源は、電源管理および電圧安定化のための各種電源貯蔵装置の導入により得られる。



図 1 ハイブリッドマイクログリッドシステム

## 2.4 各コンポーネントの仕様

図 1 に示すハイブリッドマイクログリッドシステムの各部の仕様を以下に示す。

### A) 分散電源

- ・太陽光発電システム: PV アレイ (180[W] ×

9枚、多結晶パネル)MPPT制御を使用して電圧を変換することを可能にする。DC/DCコンバータを介してDC電圧バスに接続されている。

- ・風力発電システム:固定ピッチ(1.0[kW])を備えた三相交流誘導機で交流を直流に変換するための整流回路を介して直流母線系統に接続されている。

- ・ディーゼル発電システム:電圧スライダ(3.5[kW])で接続された三相ACエンジン発電機で風力発電システムと同様に、交流を直流に変換するための整流器を介して直流母線系統に接続されている。

### B) 電力貯蔵設備

- ・EDLC:70[F]電気二重層コンデンサ(3セット)はDC/DCコンバータを介して直流母線系統に接続され、直流電源による双方向の充電と放電が可能である。

- ・二次電池:105[Ah](12セット)の容量を持つ鉛蓄電池を用いる。EDLCと同じように、鉛蓄電池は双方向DC/DCコンバータを介して直流母線電圧に接続される。

## 3 直流母線電圧の安定化制御

従来のマイクログリッドシステムでは、直流母線電圧は通常、限られた範囲内で変動することが許される。しかし、直流負荷に直接電力を供給する直流母線系統を備えたハイブリッドマイクログリッドでは、直流母線から直接に負荷へ電力供給を行っているため直流電圧の安定性が極めて重要となり、許容範囲内に維持されるように安定化する必要がある。前述のように、鉛蓄電池とEDLCの2種類の蓄電装置を用いて直流バス電圧を安定させ、電力変動を緩和する。このため、電力貯蔵装置への充放電電力に双方向DC/DCコンバータを利用している。これら2種類の電力貯蔵装置は、時間応答、コスト、サイズなど、大きく異なる機能を備えている。鉛蓄電池等の二次電池は、充放電を繰り返す場合に極めて深刻な劣化を起し、二次電池のサイクル寿命が著しく短くなる可能性がある。しかし、エネルギー密度が大きく、

低コストという利点もあり、また、保護・監視装置などの他の設備等のようなコストはかからないというメリットがある。一方で、EDLCは充電・放電処理において劣化が少なく、速い変動を補うことが可能であるが、電力密度が低く、他のエネルギー貯蔵装置に対しては高コストである。これらの要因を考慮に入れると、鉛蓄電池は大容量のエネルギー貯蔵および緩やかな大幅の電力変動の補償に適していると考えられ、一方EDLCは急峻な充電、放電を繰り返される小容量の電力変動補償で使用するのに適している。

鉛蓄電池とEDLCは同じ直流母線に接続されるため、装置同士の干渉を避けるために、これらの電力貯蔵装置の協調制御が必要になるこのため、これら2種類のエネルギー貯蔵装置の協調制御手法が提案されている<sup>[6][7]</sup>。その他でもEDLCは系統などの安定化装置として使用されることもある<sup>[8]</sup>。この協調制御では、測定された変動電圧信号は、それぞれ高周波と低周波の2種類の制御信号に分けられる。次に、高周波の信号からEDLCの出力を制御し、低周波の信号から鉛蓄電池を制御し補償する。図2に、提案する協調制御方法の基本的な考え方を示す。

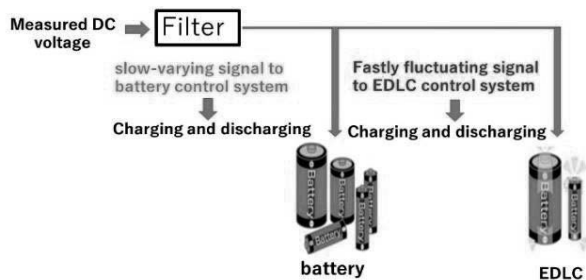


図2 協調制御の基本的な考え方

## 4 加重移動平均フィルタ

図2に示すように、2種類のエネルギー貯蔵装置の協調制御では、測定された電圧信号を高周波と低周波の信号に分ける必要がある。先行研究では、この信号分離機能は、事前に決定されたカットオフ周波数を有するLPFを用いて行なっている。しかし、LPFによって引き起こされる時間遅延がシステム

全体の制御応答を悪化させる可能性があることが分かった。そこで本研究では、改善された電圧安定化効果を得るために、加重移動平均の計算方法に基づいた新たなフィルタ（これを WMAF とする）を設計し、これを利用することで信号分離用の LPF の代わりに提案する。さらにこの提案した WMAF フィルタを用いた協調制御システムに組み込む取り組みを行った。

これまでの研究に用いた LPF は、多くの信号処理分野において信号を異なる周波数に分ける方法として採用されることが多く、信号分離において比較的簡単な方法であることが分かった。しかしながら、LPF は時定数に応じて時間遅延が生じる。一般的にこの時間遅延は深刻な問題を生じることはない可能性もあるが、直流母線電圧の変動を補償する必要がある場合においてエネルギー貯蔵装置の協調制御では、時間遅延が電力貯蔵装置の充電と放電の応答に影響を及ぼす。このため、直流母線系統の電圧変動に追いつかないという問題を引き起こす可能性がある。したがって、本研究では WMAF を提案し、LPF と比較することで優れた制御特性であることを明らかにする。

WMAF では、サンプリング時間間隔 [s] を持つ測定データの最後の 5 つのデータを抽出して図 3 に示した計算式を使用して平均値の計算を行う。重み係数は、最新の測定データから大きい係数をつけていく。これは、最新のデータが最終的に計算された平均データに対してより大きな影響を与えることを意味し、最新の電圧状態に応答することを目的とする。これにより従来の制御方法よりも変動に対する応答性をあげることができる。これらのことにより、WMAF アルゴリズムは計算が非常に簡単であり、さらに、サンプリング時間間隔の時間遅延しか持たなかったことから遅延による影響も少ないことが期待できる。サンプリング時間が非常に短いことを考えると、WMAF はハイブリッドマイクログリッド内の電力貯蔵装置の協調制御に適用されている間、LPF よりも高い応答性を期待できる。

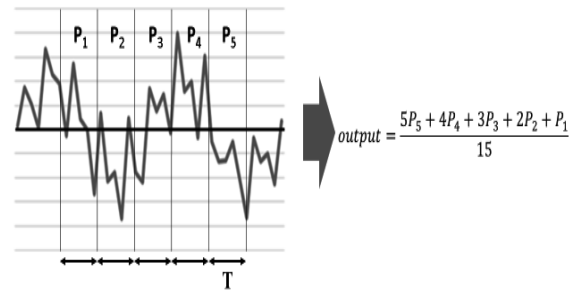


図 3 WMAF 法の計算アルゴリズム

## 5 シミュレーションモデルと結果

### 5.1 シミュレーションモデルと条件

本研究では、開発したハイブリッドマイクログリッドの構成に基づいて、図 4 に示すシミュレーションモデルを作成し、Matlab/Simulink を用いてシミュレーションを行った。ハイブリッドマイクログリッドの機能として、直流負荷と交流負荷のそれぞれに電力供給をすることが可能な系統と接続する運転モードと太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギー発電を電源として、自立的な運転を目的とした運転モードがあるが、今回の研究では、太陽光発電や風力発電を用いた協調制御を行うため後者の運転モードを採用した。

開発したハイブリッドマイクログリッドシステムを用いた実験棟の測定データを用いることで、太陽光発電と風力発電のシミュレーションモデルが作成され、出力が 4.0[kW] の範囲内で変化するように設定する。今回は太陽光発電の制御方法として MPPT 制御を適用した。実際の家電製品や電気機器の電力需要として、直流負荷も 4.0[kW] 以内のものと想定する。鉛蓄電池と EDLC の定格電圧は、ハイブリッドマイクログリッドプロトと同じ 48.0[V] に設定した。

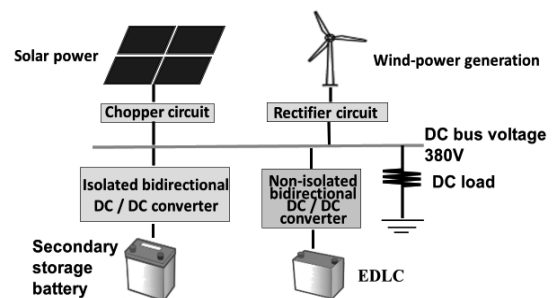


図 4 シミュレーションスタディ用マイクログリッドモデル

充放電制御を行う際、DC/DC 双方向コンバータを用いる。バッテリー用 DC/DC コンバータは絶縁型であり、EDLC 用 DC/DC コンバータは非絶縁型である。2種類のコンバータを使用する理由としては、鉛蓄電池が大容量であり、鉛蓄電池に接続しているコンバータは回路保護および安全性に優れており、一方、EDLC は容量が小さく、比較的高電圧に耐えることができ、EDLC に接続されるコンバータは高い応答と低い電力損失で動作することが可能になる。

また、本シミュレーションにおいて、以下の2つの項目を検討する。1つ目は、協調制御によって目標値として 380[V]になるように直流母線電圧を効果的に安定させることが可能かどうかを確認する。もう一つは、WMAF 法の適用による改善効果を検証する。

## 5.2 協調制御の実現

協調制御の流れとして、ブロック図を図5に示す。前述で説明したように、測定され直流母線の電圧は WMAF または LPF を使用して高周波信号と低周波信号に分離して、それぞれ EDLC と鉛蓄電池の出力を制御する必要がある。今回の研究では、LPF のカットオフ周波数を 0.2[Hz]に設定した。WMAF では、5つのデータにおいてサンプリング時間を 0.045[s] に設定した。目標電圧(ref)に関しては、先行研究で使用している実験棟の電圧を参考にして 380V にした。

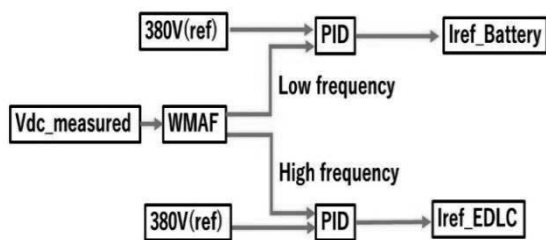


図 5 EDLC と鉛蓄電池の協調制御

図3に示した加重移動平均のアルゴリズムは、図6に示す計算ブロックによって実現した。これは、図3の各測定データの重みのための係数をそれぞれ 5.0、4.0、3.0、2.0、お

よび 1.0 に設定した。出力信号は、過去5つのサンプリング時間によって抽出したデータを使用して平均値として計算される。また、サンプリング周波数よりも周波数の高い入力データは計算プロセス中に自動的に無視される。このようにして、図6の出力信号において、遅い周波数を持つ信号はバッテリー側で制御を行い、早い周波数を持つ信号は EDLC 側で制御を行う。以上のことから計算の流れは、以下のようになる。

- (1) 変動時に波形を測定する。
- (2) 波形データにおいて直近からサンプリング時間を元に5点のデータを取る。
- (3) 図3の公式を元に信号に含まれる高周波部分を平滑化する。

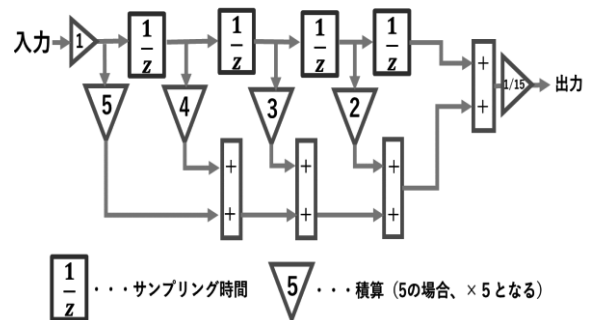


図 6 WMAF の計算の流れ

## 5.3 シミュレーション結果

図7から図10において、縦軸が電力(W)、横軸が時間(s)となっている。また、図11は縦軸が電圧(V)、横軸が時間(s)となる。図7は、シミュレーションによる再生可能エネルギー発電(太陽光発電+風力発電)と負荷消費曲線を示している。さらに、電力の不均衡(再生可能エネルギー発電の出力 - 負荷の消費電力)を図8に示す。これらのデータから、再生可能エネルギー発電と負荷電力の変動の大きな変動とこの変動により電力供給と負荷の電力の間に余剰と不足が生じていることが分かる。電力の不均衡は-1800[W]から2400[W]までさまざまである。このような電

力の不均衡において、電力の供給時の電圧変動や高周波信号が含まれていることがあるため、電気機器の故障や動作不良を引き起こすおそれがある。

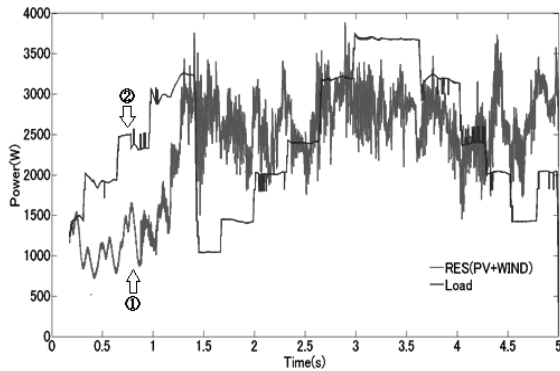


図 7 RES (PV+風力) 発電および負荷消費電力 赤線①: RES 発電 青線②: 負荷消費電力

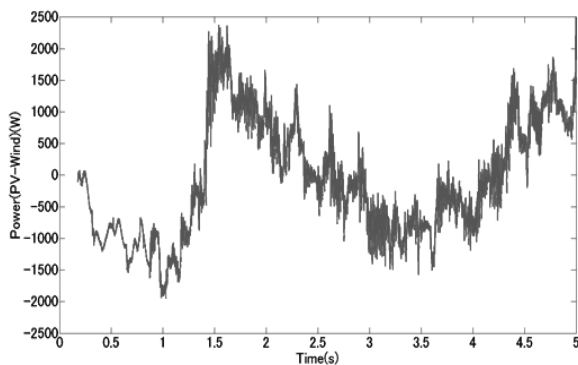


図 8 RES と負荷の電力の不均衡 (RES 電力 - 負荷消費電力)

LPF または提案する WMAF を用いて、電源と負荷の電力不均衡によって生じた変動した信号を、図 2 の協調制御の基本的な考え方において、それぞれ EDLC と鉛蓄電池の協調制御の信号として高周波および低周波信号に分離し鉛蓄電池と EDLC でそれぞれ充放電制御を行う。そこで、鉛蓄電池と EDLC からの出力のシミュレーション結果を図 9 と図 10 に示し、直流母線系統の電圧を図 11 に示す。これらの図は、LPF と WMAF のシミュレーション結果を比較して示す。

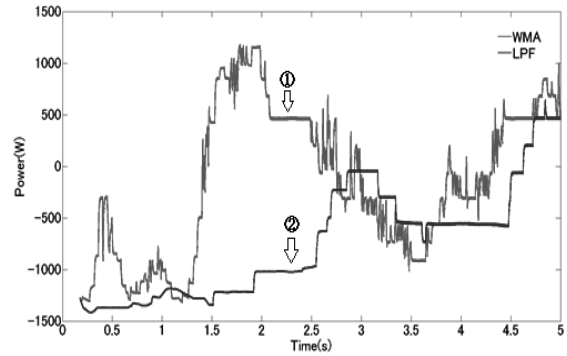


図 9 バッテリからの電源出力(+:充電) 赤線①: WMAF (WMA) 青線②: LPF

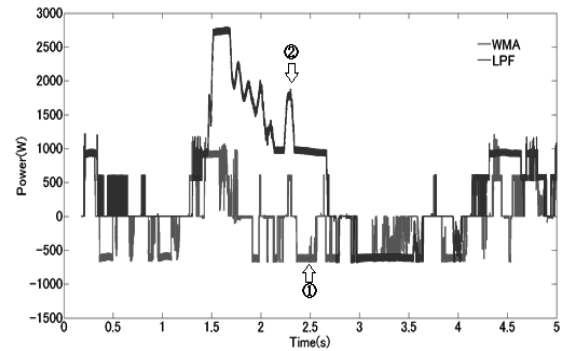


図 10 EDLC からの電力出力(+:充電) 赤線①: WMAF (WMA) 青線②: LPF

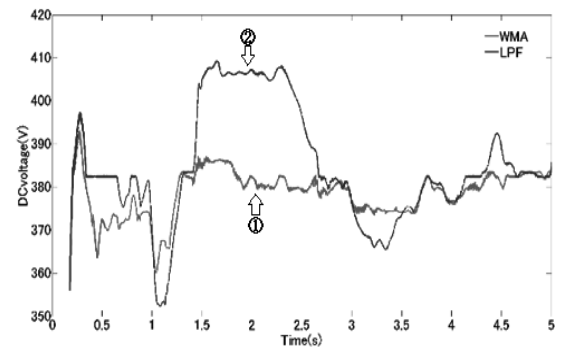


図 11 直流電圧曲線の比較 赤線①: WMAF (WMA) 青線②: LPF

これらの結果から以下のことがわかった:

- 鉛蓄電池の充電と放電の際に発生する電力は約-1500[W]~1000[W]の間で、遅い変化をする電力変化を補い、EDLC は比較的高速な電力の補償を行うことが可能である。
- WMAF の場合、鉛蓄電池の出力は、電力の不均衡の変化に迅速に対応し、その変化を



追従することが可能である。また、鉛蓄電池は大きな電力変動の大部分を補うことができ、EDLCは高速な電力の変動を緩和することが可能である。

・LPF法においての鉛蓄電池の充放電は不均衡電力の変化を追跡しにくく、その出力に時間遅延が生じる。一方、EDLCは、鉛蓄電池で補うことができない余分な電力を補償するために比較的大きな電力を出力する必要がある、これは非常に高いコストをもたらす、実際の機器を想定した場合、実用的ではない可能性がある。

また、図11からは、WMAFの場合、まだいくつかの小さな変動があるが直流負荷を供給する際に許容される370[V]~385[V]の範囲に対して、効果的に安定していることが分かる。一方LPFの場合、DC電圧は350[V]から410[V]まで変化しており、DC負荷を直接供給するのに適した電圧範囲ではない可能性があることが示唆された。

## 6 結論

ハイブリッドマイクログリッドシステムにおける電圧安定化の問題において、大量の再生可能エネルギー発電の導入および負荷変動等の要素によって安定化状態が悪化する恐れがある。本研究では、開発したハイブリッドマイクログリッドシステムの基本構成について、2種類のエネルギー貯蔵装置の協調制御を検討した。提案した協調制御により、効果的な電圧安定化効果を達成するためには、測定された電圧を異なる周波数の信号に適切に分離する必要がある。これまでの研究で使用したLPFによる時間遅延が電圧安定化効果を悪化させる可能性があるため、今回はWMAFと呼ばれる新しい方法を提案し、シミュレーションを行うことにより、その改善効果を検証した。

その結果、ハイブリッドマイクログリッド内の電力貯蔵装置に対して適切に設計された協調制御を導入することにより、再生可能エネルギー発電と負荷需要変化による電圧変動を許容範囲に効果的に安定させることが確認された。さらに、電力貯蔵装置の制御

信号における信号分離は、その安定化効果に大きな影響を与える。本シミュレーションの結果から、提案したWMAFを用いた協調制御は、LPFよりも再生可能エネルギー発電の電力変動や負荷需要電力変化に対して、高速に対応し、より優れた電圧安定化効果をもたらすことを明らかにした。

## 参考文献

- [1] N. Hatzigiorgiou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrid," IEEE power & energy magazine, vol. 5, issue 4, pp. 78-94, July 2007
- [2] B. Kroposki, R. Lasseter, T. Ise, S. Morozumi, P. Stavros, and N. Hatzigiorgiou, "A Look at Microgrid Technologies and Testing Projects from Around the World: Making Microgrids Work," IEEE power & energy magazine, vol. 6, issue 3, pp. 40-53, May 2008
- [3] G. Wu, S. Kodama, Y. Ono, Y. Monma, "A Hybrid Microgrid System Including Renewable Power Generations and Energy Storages for Supplying both the DC and AC Loads," Proc. IEEE Int. Conf. on Renewable Energy Research and Applications, No. ISS-6, p.6, 2012
- [4] G. Wu, Y. Ono, M. Alishahi, "Development of a Resilient Hybrid Microgrid with Integrated Renewable Power Generations Supplying DC and AC Loads," Proc. of 37th Int. Telecommunications Energy Conf. Vol. 1, No. TS10-1, pp. 248-252, Oct. 2015
- [5] 平林明憲, 伊庭斉志, "遺伝的アルゴリズムによる外国為替取引手法の最適化", The 22nd Annual Conf. of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2008, p.2
- [6] 篠原勝次, 新羽坪藏人, 飯盛憲一, 山本吉朗, 猿喰考倫, 山衛守貴博, "風力発電システムへのPWMインバーター付加による高調波電流・無効電力補償", IEEJ Transactions on Electronics, Vol. 124, No. 12, pp.1173-1181, 2004
- [7] 齋藤明登, "再生可能エネルギー発電有効利用のためのハイブリッドマイクログリッドシステム安定化に関する実験及び研究." 東北学院大学工学研究科電気工学専攻 修士論文, Japan. 2017
- [8] T.Tanabe, S.Suzuki, Y.Ueda, T.Ito, S.Numata, E.Sh

Imoda, T., Funabashi, R., Yokoyama, Ryuichi, "Control performance verification of power system stabilizer with an EDLC in islanded microgrid". IEEJ Transactions on Power and Energy, pp.139-148, 2009