

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協調制御に関する実験検討

五十嵐 隼斗*

Hayato Igarashi

呉 国紅*

Guohong Wu

Abstract: This paper presents the results of our experimental studies with a hybrid microgrid system, which was proposed and implemented in the Itsutsubashi campus of Tohoku Gakuin University, Japan. The developed microgrid system is designed to utilize renewable power generations such as solar power and wind power as major power sources, and be able to supply power simultaneously to DC loads such as EV chargers and next generation DC-driven electrical equipment, and AC loads such as the existing AC motor-driven electrical alliances. In addition, two types of energy storage devices with different characteristics, which are rechargeable battery and EDLC (Electric Double Layer Capacitors) are employed to mitigate DC voltage fluctuations due to renewable power generations and DC load consumptions. In these experimental studies, DC load module are controlled to simulate the switch-on/off operation of DC appliances and the EV charging behavior. The purpose of these experimental studies is to verify the effectiveness of cooperated control of battery and EDLC for DC voltage stabilization and stable power supply to AC and DC loads in case with considerable power fluctuations in renewable generation and load consumption. The results of these experimental studies show that the developed hybrid microgrid and its control system can operate properly.

キーワード: マイクログリッド、再生可能エネルギー発電、電圧安定化、エネルギー貯蔵
Keywords: microgrid, renewable power generation, voltage stabilization, energy storage.

1. はじめに

近年、地球環境問題やエネルギーセキュリティ問題を背景とし、太陽光発電や風力発電に代表される再生可能エネルギー発電への注目、期待が高まっており、再生可能エネルギー市場報告書から 2021 年から 2022 年にかけての 1 年間で 24.8[GW]の導入があり、再生可能エネルギー発電は、国際会議で決められる温室効果ガスの排出量削減のための施策の一つとして、世界各国で導入を推奨または助成する動きがある^[1]。しかしながら、多くの再生可能エネルギー発電は、気候に左右されて発電出力が変動してしまう欠点がある。このような電力変動を含む再生可能エネルギー発電が大量に接続されると、既存の電力システムの電圧や周波数が変動し、電力品質の低下を招く危険性がある。そのため、再生可能エネルギー発電の加速度的

普及に伴い、この問題への懸念も散見されるようになった。再生可能エネルギー発電の電力変動による電力システムへの悪影響を緩和し、かつ再生可能エネルギー発電や熱利用を含めた分散型電源を有効活用することができるマイクログリッドが、将来の電力システムの形態の一つとして期待され、研究が盛んに行われている^[2]。

マイクログリッドとは、ある地域内に再生可能エネルギー電源をはじめとする分散型電源及び負荷を持つ小規模システムである。マイクログリッド内で安定な電力供給網を形成し、その上で系統連系を行うことで、電力システムに擾乱を与えずに分散型電源を運用することができる。また、電力システムに依存せずに安定な電力供給網を形成する能力を持つことから、電力システムに事故があった場合には連系を解消して自立した単独運転を行うことができる。加えて、孤島など発電所を作る用地がなく、本島からの電力システムを送電することが困難な場合、マイクログリッドは非常に有効な手段となる^[3]。

* 東北学院大学大学院

マイクログリッドが電力系統から独立して運転できるほどの高い電力品質を実現するためには、再生可能エネルギー電源などの変動を補償し、電力の過不足を補う電力貯蔵装置の設置が不可欠である。また、それを制御する電力変換制御回路を構築する必要がある。二次電池をはじめとした電力貯蔵装置には様々な種類と特性があり、適切な制御を行うことではじめて、高い電力品質を実現することができる。

一方、最近の電力利用におけるポイントとして、直流電力の活用がある。パワーエレクトロニクス技術の発展と普及により、一般的な電気製品のほとんどが内部で直流電力を利用するようになった。加えて、マイクログリッドに設置される太陽電池や二次電池は直流電力を発生する装置であり、特にマイクログリッドにおいては系統内の直流機器の割合は高いと言える。しかし、電力供給網の主流は交流送配電であり、直流-交流の電力変換損失が問題視されている。これに対して電力供給を直流で行う直流電力供給という提案があり、直流機器を多く使用する設備では採用の動きがある。

上記の理由から、当研究室では再生可能エネルギー発電を主電源とし、交流負荷と直流負荷に同時に安定な電力を供給できるハイブリッドマイクログリッドの実験研究用システムを2007年に開発し、DC-DCコンバータや、DC-ACインバータ等に改良を加えながら実用化に向けて必要なマイクログリッド技術を検討している [4][5]。本研究では、当初東北学院大学多賀城キャンパスに導入された実験システムを改善して五橋キャンパスに再構築されたハイブリッドマイクログリッドの実験システムを用いて実験研究を行い、太陽光発電の電力変動および負荷変動に起因する直流電圧の変動を2種類の電力貯蔵装置の協調制御によって安定化できるかどうかについて確認し、実証した。

2. ハイブリッドマイクログリッド実験システム

ハイブリッドマイクログリッドは、従来の交流で送電を行うマイクログリッドシステムを兼ね備え、DCマイクログリッドの特徴である直流で動作する機器に高効率で電力を供給するための直流送電も行える特徴を持つ。

当研究室で開発したハイブリッドマイクログリッドシステム全体の外観を図1に、その回路構成を図2に示す。当該システムは、独立した直流母線と交流母線を通じて、交流負荷と直流負荷の両方に同時に電力供給が可能である。直流母線と交流母線が個別に存在することにより、パソコン、LED照明、電気自動車の充電器などの直流負荷に加えて、モーター、家電製品などの交流負荷に電力を直接供給することが可能となる。また、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やディーゼル発電機から発電された電力を交流母線に送電することや、逆に交流母線から電力を取り込むことが可能である。これにより、電力を双方向に直流母線と交流母線間で伝送し、交流負荷と直流負荷の両方に同時に電力供給が可能となる。

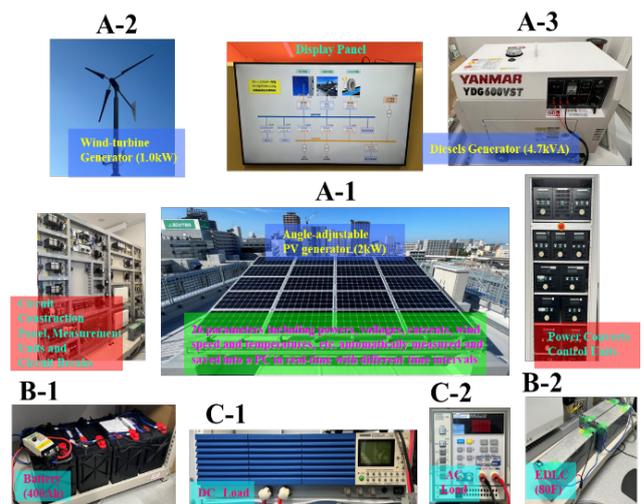


図1 ハイブリッドマイクログリッドシステム

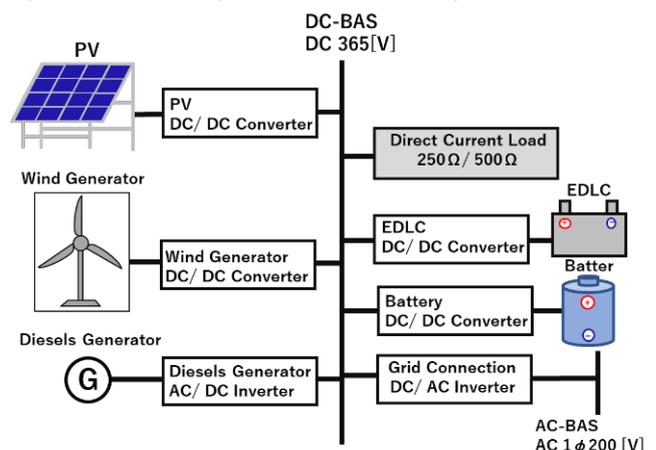


図2 ハイブリッドマイクログリッド実験システムの構成図

ハイブリッドマイクログリッドシステムは、直流母線と交流母線から直接電力を供給できるため、高い電力変換効率を実現することが可能となる。また、提案したハイブリッドマイクログリッドシステムの主要な電源は再生可能エネルギー発電（太陽光発電、風力発電など）であるため、マイクログリッド内の母線電圧は、電力供給の不均衡に加えて、再生可能エネルギー源の変動によって不安定になることが考えられる。そのため、安定した電力品質を得るためには、電力管理および電圧安定化を目的とした鉛蓄電池と EDLC(電気二重層コンデンサ)を組み合わせた蓄電システムを設計し、本システムに導入した。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装置の仕様を以下に示す。

A) 分散電源

A-1...太陽光発電システム：PV アレイ（100[W]×20 枚、単結晶パネル 品番:DBG100-12）。MPPT 制御により電圧を変換し、DC/DC コンバータを介して直流母線に接続される。

A-2...風力発電システム：三相交流誘導発電機(1.0[kW]、固定ピッチ)。三相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る。

A-3...ディーゼル発電システム：ディーゼル発電機（定格出力 4.7[kVA]）。再生可能エネルギー電力不足時にバックアップ安定電源として稼働。AC/ DC インバータを介して直流母線系統に接続される。

B) 電力貯蔵設備

B-1...二次電池：容量 105[Ah]の鉛蓄電池が 4 セット使用され、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、双方向の充電および放電が可能である。

B-2...電気二重層コンデンサ (EDLC)：70[F]の電気二重層コンデンサが 3 つのセットで、バッテリーと同様に、双方向 DC/DC コンバータを介して直流母線系統に接続される。

C) 負荷装置

プログラマブル直流負荷装置(C-1)と交流負荷装置(C-2)がそれぞれ直流母線と交流母線に接続される。EV 充放電動作や電気機器の切換動作などによる電力の変化パターンを模擬できる。

3. 直流母線の電圧安定化制御

従来の AC マイクログリッドシステムでは、DC/ AC インバータにより直流電力が交流電力に変換され、交流電圧を一定に制御できれば、直流母線電圧は一定の範囲内で変動しても問題はなかった。しかし、ハイブリッドマイクログリッドシステムでは、直流母線から直接負荷に電力供給機能を有するため、直流電圧の安定性が極めて重要であり、安定した状態を維持する必要がある。このために、開発されたハイブリッドマイクログリッド実験システムでは、鉛蓄電池と EDLC の 2 つの蓄電装置を使用して、直流母線電圧を安定化し、電力変動を緩和する手法を提案した^{[6][7]}。この手法では、電力貯蔵装置の充放電電力に双方向 DC/DC コンバータが活用され、2 種類の異なる特徴を持つ電力貯蔵装置の協調制御によって直流母線電圧を安定にしている。

以下に鉛蓄電池並びに EDLC の特徴を示す。

・**蓄電池**：エネルギー密度が高く、大容量の充電が可能で電力貯蔵能力に優れている。その上、低コストなため、保護・監視装置等の設備が不要であり、運用コストも低いといったメリットがある。しかし、鉛蓄電池などの二次電池は繰り返しの充放電に対して劣化が進みやすく、その結果、サイクル寿命が著しく低くなるといったデメリットがある。

・**EDLC**：充電・放電処理において劣化が少ないといったメリットがある。しかし、電力密度が低く、設備等含めても高コストであることがデメリットとして挙げられる^[8]。

これらの要因を考慮すると、鉛蓄電池は大容量のエネルギー貯蔵と緩やかな電力変動の補償に適していると考えられ、一方で EDLC は急激な充放電を繰り返す小容量の電力変動補償に適していると考えられる。

以上のようにこれらの 2 つの電力貯蔵装置は、時間応答、コスト、サイズなど、異なる機能を備えており、それぞれの長所を活かし、また、それぞれの短所を補う形での運用が望ましいと考えられる。

図 3、図 4 に提案された協調制御手法について示す。図 3 の蓄電池用充放電制御は、一般的な上下限 PID 制御により、直流電圧測定値と指令値（365[V]）との差を抑制するように充放

電電力を制御する。一方、図4のEDLC用充放電制御は、測定した直流電圧信号からLPF（ローパスフィルター）を通して低周波成分を得て、次に元の直流電圧測定値からLPF後の信号を減算することで、周波数の速い高調波成分とリップル成分を抽出し、この帯域での充放電電力を制御する。よって、EDLCは主に高調波・リップル成分の抑制に動作する。

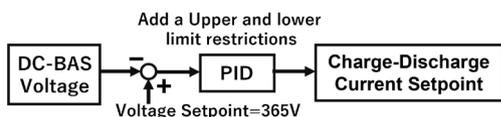


図3 蓄電池用電力制御ブロック図



図4 EDLC用電力制御ブロック図

図3と図4に示す電力貯蔵装置の制御により、鉛蓄電池とEDLCが同時に接続されている直流母線では、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー発電および直流負荷の変動による電圧の変動は、まずは迅速な充放電が可能なEDLCによって高調波・リップル成分が抑制され、それから残っている電圧の変動分は大容量の鉛蓄電池によって補償を行っている。このように、異なる電気特性を持つ2種類の電力貯蔵装置により、それぞれ直流電圧の異なる変動分を補償し、協調で直流電圧の安定化を図る。

4. 実験条件と結果

4.1 実験条件

- 気象条件: 晴、気温: 28.4°C
測定時間: 180秒間。
- 電源条件:
電源(PV): 20×100[W] 単結晶
パネル制御方式: MPPT 制御
PV 発電量を図5に示す。
- 負荷(DC 負荷)条件:
0~60秒間: 500Ω
61~120秒間: 250Ω
121~180秒間: 500Ω
DC 負荷の変化を図6に示す。

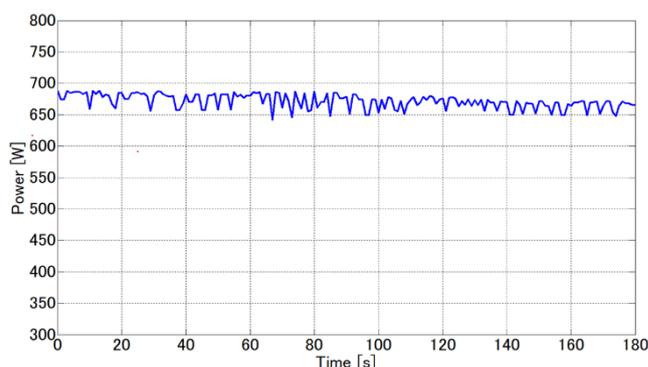


図5: PV 発電量の計測波形(W)

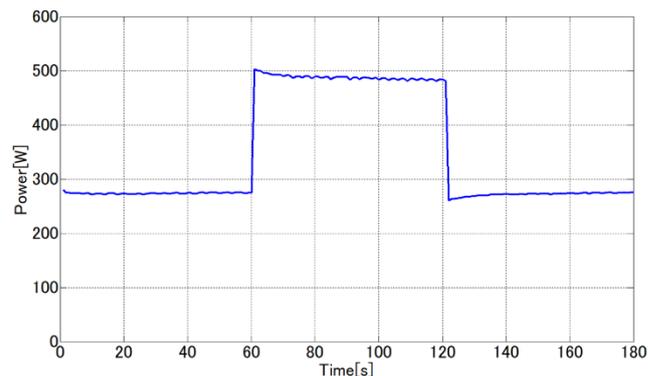


図6 実測した直流負荷の変化波形(W)

4.2 実験結果

今回の実験検討では、導入された図1のハイブリッドマイクログリッド実験装置を用いて図2に示す実験回路を構築し、鉛蓄電池とEDLCの協調制御によって得られた、太陽光発電および負荷変動による母線電圧変動の抑制効果を確認する実験研究を行った。図7に実験で計測された直流母線電圧、図8に交流母線電圧を示す。また、図9に蓄電デバイスである蓄電池並びにEDLCの電流の変化を表している。

これらの結果から、図7の直流母線電圧は、DC負荷が重くなるとわずかな電圧降下が発生することがあるものの、電圧が350~365Vと満足できる範囲に制御されたことが確認された。また、電圧降下が発生した理由として、発電電力が負荷変動時におおよそ一定であるPV発電電力を供給している直流母線に定抵抗負荷を接続したことによって電圧降下が発生したと考える。図8の交流母線電圧は、直流負荷が変化するたびに短時間の過渡現象が発生するが、電圧は一定に保持されていることが確認された。また、過渡現象が発生した理由として、直流母線がDC-ACインバータを介して系統連系された交流母線に接続されている関係上、直流母線が負荷変動時に電圧降下が発生した際に、

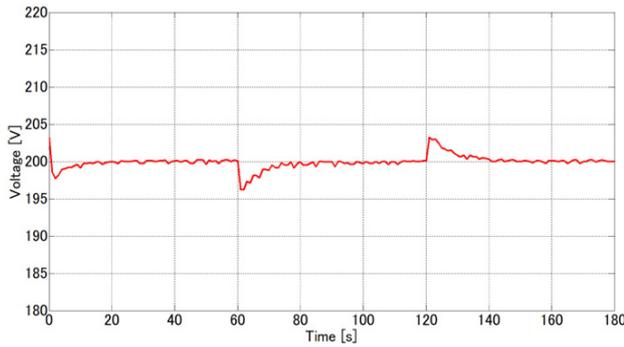


図 7 直流母線電圧の計測波形(V)

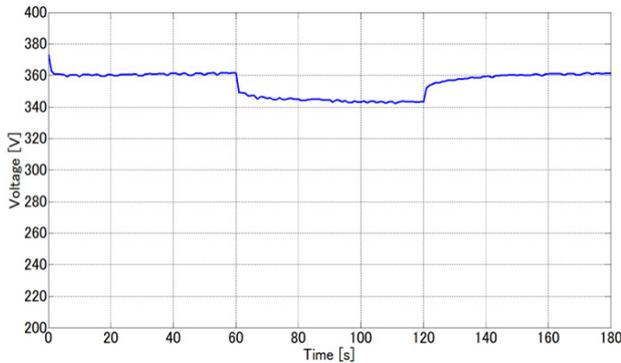


図 8 交流母線電圧計測波形(V)

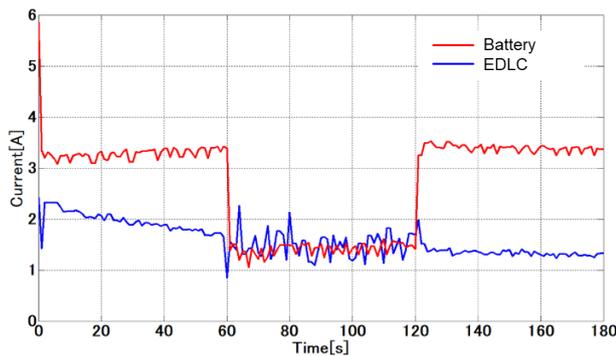


図 9 蓄電池と EDLC の充放電電流波形(A)

DC-AC インバータ内のインダクタの影響で負荷変動時に遅れが発生し、過渡現象が発生していると考えられる。

0～60 秒の間では、負荷の消費電力よりも供給電力が大きいため、電池と EDLC の両方が充電されており、PV 発電および蓄電池の充電によるリップルを EDLC が補っていることが確認できる。また、60 秒時点での過渡過程においては蓄電池よりも EDLC において応答が速いことが確認できる。

60～120 秒間の蓄電デバイスの充電電流の変化においては、直流負荷が重くなり、余剰電力が小さくなるため、EDLC と蓄電池の充電電流も小さくなる傾向にあることが確認できる。また、EDLC の出力は直流電圧のリップル成分を補償していることがわかる。また、120 秒時点

での過渡過程では、直流負荷が軽負荷に変化した後、バッテリーの出力が急激に増加し、EDLC は負荷変化直後に素早く応答するが、小さな高調波やリップル成分の補償のために小さな出力にとどまっていることが確認される。

120～180 秒間での充電電流においては、PV 電力と負荷電力の間の余剰電力は主にバッテリー電力で補われ、EDLC は小さな高調波とリップル成分を補うだけであることが確認できる。

5. 結論

風力発電や PV 発電などの再生可能エネルギー発電を主電源としたマイクログリッドでは、これらの変動電源および負荷変動に起因する電力変動により、交流母線並びに直流母線の電圧が変動し、電力品質の低下を招く恐れがある。本研究では、東北学院大学五橋キャンパスに導入されたハイブリッドマイクログリッド実験システムを用いて、2 種類の電力貯蔵装置（蓄電池と EDLC）の協調制御によって直流母線電圧並びに交流母線電圧の安定化効果について実験研究を行い、実証した。

実験結果から、蓄電池と EDLC の協調制御系は、再生可能エネルギー発電および負荷変動による電力変動に対して高速に対応し、直流母線と交流母線の安定化制御が実現されていることが確認された。

今後は、マイクログリッドにおける高調波抑制方法や長期運転のエネルギー管理手法などについて検討していく。

6. 参考文献

- [1] F. Birol et al. “Renewable Energy Market Update”, OECD (<https://www.oecd.org/>), Sept. 17, 2023
- [2] N. Hatzigiorgiou, H. Asano, R. Iravani, and C.Marnay. “Microgrid,” IEEE power & energymagazine, vol 5, issue 4, pp. 78-94, July 2007
- [3] B. Kroposki, R. Lasser, 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, issue3, pp.40-53, May 2008
- [4] G.Wu, S.Kodama, Y. Ono, Y. Monma, “A Hybrid Microgrid System Including Renewable

Power Generations and Energy Storage for Supplying both the DC and AC Loads,” Proc. IEEE Int. Conf. on Renewable Energy Research and Applications, No.ISS-6, p.6, 2012

[5] 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

[6] 小野善幸, 「再生可能エネルギー発電の有効利用のためのハイブリッドマイクログリッドマイクログリッドの構築および安定化に関する研究.」 東北学院大学工学研究科電気工学専攻 修士論文, Japan. 2015

[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.Shimoda, 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