

再生可能エネルギー発電および可制御DC負荷を用いたハイブリッドマイクログリッドにおける直流電圧安定化の実験研究（翻訳論文）

著者	小野 善幸, 高野 良博, 呉 国紅
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	48
号	1
ページ	48-53
発行年	2014-02
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00000128/

翻訳論文

再生可能エネルギー発電および可制御 DC 負荷を用いたハイブリッドマイクログリッドにおける直流電圧安定化の実験研究

Experimental Study of DC Voltage Stabilization in a Hybrid Microgrid with Renewable Power Generations and Controllable DC Loads

小野 善幸* 高野 良博* 呉 国 紅**
Yoshiyuki ONO Yoshihiro TAKANO Guohong WU

Abstract: This paper presents the results of our experimental studies with a hybrid microgrid system, which was proposed and implemented in the Tagajo campus of Tohoku Gakuin University, Japan. The developed microgrid system is designed to simultaneously supply power to DC and AC loads mainly using renewable power supplies such as PV (Photovoltaics), wind power generators and etc. In addition, two types of energy storage devices consisting of a secondary battery and an EDLC (electrical double-layer capacitor) with different characteristics and costs, are adopted to mitigate the fluctuation of the DC voltage, which may be caused by these renewable power supplies and the DC loads including EV (Electric Vehicle) battery charger and next-generation DC electrical appliances. Furthermore, these DC loads are controlled to simulate the switch on-off operations of DC appliances and power charging of EVs. The purpose of this experimental study is to verify and enhance the islanded operation properties for stable power supply to AC and DC loads, even in cases of considerable power fluctuation in the renewable power supplies and load power consumption. The result of these experimental studies shows that the developed hybrid microgrid and its control systems can operate perfectly as designed.

Keywords: Hybrid microgrid, Renewable power generation, Voltage stabilization, Energy storage, Islanded operation

本論文の翻訳元

本論文は

Y. Ono, Y. Takano, G. Wu: "Experimental Study of DC Voltage Stabilization in a Hybrid Microgrid with Renewable Power Generations and Controllable DC Loads," proc. International Smart Grid Conference & Exhibition 2013, No. SREO-0272, (2013)

を翻訳したものであり、併せて参照頂きたい。

1 はじめに

近年、化石燃料枯渇の懸念がなく、発電時の温室効果ガスの排出もない太陽光、風力などの再生可能エネルギー発電の開発および導入が急速に進められている。太陽光発電の例でいえば、2012年までに世界全体で約99.3[GW]の累積導入量となっており、前年と比べ40%以上増加している¹⁾。しかしながら、再生可能エネルギー発電は天候などによって発電電力が変動する不安定な電源である。また、既存の電力網は再生可能エネルギーの利用を考慮せずに構築されているため、再生可能エネルギー発電などの分散型電源が配電系統に大量導入された場合には、電力品質や出力変動などの問題が懸念される。

* 東北学院大学大学院電気工学専攻

** 東北学院大学工学部電気情報工学科

電力変動を抑制し、電力貯蔵および管理機能を持つマイクログリッドは、再生可能エネルギー発電などの分散型電源の利用を促進するのに効率的である。太陽光発電、風力発電などの再生可能エネルギー発電は自然条件などによる不確実性を持つため、それらを電源とするマイクログリッドには安定した出力電圧で電力を供給することが要求される。したがって、マイクログリッドにディーゼル発電機や電力貯蔵装置などの安定した分散型電源装置を設置することは重要である。これは、システムとの接続を利用した安定化が見込めない単独運転時のマイクログリッドにおいては特に重要となる。

一方、太陽光発電装置や分散型電力貯蔵装置などは直流ベースの装置である。さらに、風力発電機や小容量の水力発電機などの交流電源は、電力システムに接続する場合インバータベースのインターフェースを必要とする。また、パワーエレクトロニクス技術の発達によって、照明、パソコン、電化製品、AV 機器などの多くの機器の内部で直流電源が利用されている。これらのことから、直流電力供給は電力利用率や電力変換の面で有利と考えられる。従って、これらの直流機器を直結して利用することができ、周波数や無効電力補償の問題も無いため、直流電力供給方式のマイクログリッドが注目を集めている^{2,3)}。

これらのような現状を踏まえ、本研究では再生可能エネルギーの導入に大きな役割を果たすべくマイクログリッドの開発および動作特性について検討する。そのため、従来から検討されている交流マイクログリッドに直流電力供給機能を導入し、直流および交流負荷に同時に安定した電力を供給できる DC/AC ハイブリッドマイクログリッドシステムを提案し、自然条件や負荷の変動がある環境下でも安定した単独運転動作を行うことを目的とする⁴⁾。本論文では、ハイブリッドマイクログリッドシステムの直流および交流電圧安定化のための制御系を設計して本学で開発したマイクログリッド装置に実装し、さらに EV (Electric Vehicle: 電気自動車) への充電を想定した負荷を含む直流負荷と交流負荷の両方に安定した電力を供給できることを実験研究によって確認する。

2 ハイブリッドマイクログリッド

本節では、実験研究に使用したハイブリッドマイクログリッドシステムについて解説する。

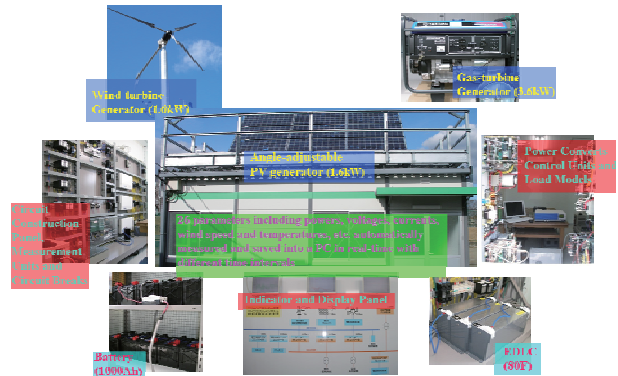


Fig.1. Hybrid Microgrid System

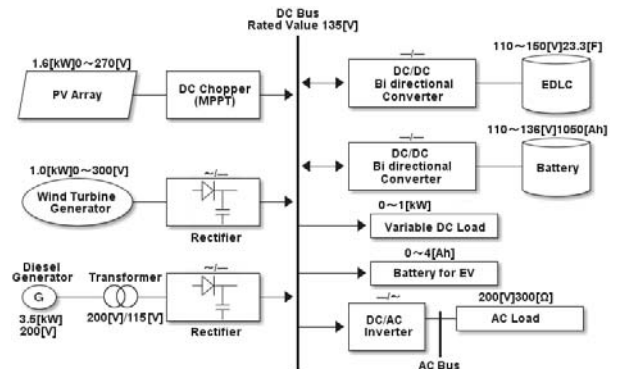


Fig.2. Experimental Circuit

2.1 概要

本実験研究で用いたマイクログリッドシステムは直流、交流の両方の負荷に対し電力を供給する機能を持つハイブリッドマイクログリッドシステムである。本実験に使用した実験装置を Fig.1 に示す。なお、この装置は、本学の提案および設計に基づき、クリーンエネルギー発電の教育・研究のために開発されたものであり、2011年に本学工学部多賀城キャンパス内に導入された。この実験システムは、再生可能エネルギーを利用した次世代住宅、工場およびローカルな電力供給システムに関わる様々な技術の研究・開発に利用することができる。ハイブリッドマイクログリッドシステムは、直流および交流の2つの母線を介して負荷に電力を供給する。そのため、2つの母線電圧の安定が重要となる。

本実験装置において、直流母線電圧は EDLC (Electric Double Layer Capacitor: 電気二重層キャパシタ) と蓄電池の2種類の電力貯蔵装置によって制御されている。交流母線電圧は系統連系運転では系統電圧に支配されるため、通常の場合安定性は問題にならない。単独運転時は DC/AC インバータにより制御される。

2.2 システム構成

本論における実験研究では、ハイブリッドマイクログリッド実験装置を用い単独運転試験を行った。実験回路を Fig.2 に示す。単独運転中、ハイブリッドマイクログリッドは以下の要素から構成される。

a) 直流母線及び交流母線

直流母線は電源、電力貯蔵装置と接続されており、直流負荷に電力を供給する。交流母線は DC/AC インバータを介して直流母線と接続されており、交流負荷に電力を供給する。DC/AC インバータは定電圧制御により 200[V]一定の交流電圧を交流母線に供給する。

b) 分散電源

本装置は再生可能エネルギー電源として太陽光発電装置、風力発電機を持つ。また、予備電源としてのディーゼル発電機を持つ。

太陽光発電装置は 180[W]の定格容量を持つ単結晶パネル 9 枚を直列に接続した合計定格容量 1.62[kW]の太陽電池アレイを持ち、降圧チョップにより直流母線に接続されている。降圧チョップは MPPT (Maximum Power Point Tracking: 最大電力点追従) 制御により制御され、太陽光発電装置は時々刻々の日射強度に応じた最大電力を供給する。

風力発電装置は定格容量 1[kW]の小型風力発電機を使用している。風力発電機は固定ピッチ角の風車を持つ三相誘導発電機で、三相整流器により交流から直流に変換され、直流母線に接続されている。

ディーゼル発電機は後述する電力貯蔵装置の容量が足りなくなった場合に稼動する予備電源である。発電機は定格容量 3.5[kW]の三相誘導発電機であり、三相整流器を介して直流母線に接続されている。ディーゼル発電機稼働中は直流母線電圧は 115[V]に維持される。

c) 電力貯蔵装置

実験装置は直流母線電圧制御および電力管理のために電力貯蔵装置を搭載している。電力貯蔵装置は蓄電池および EDLC の 2 種類を使用した。

EDLC は定格容量 70[F]のもの 3 つを直列に接続した、合計の定格容量 23.3[F]の EDLC を使用した。EDLC は双方向 DC/DC コンバータにより直流母線に接続されており、直流母線電圧が 135[V]一定となるように制御する。

蓄電池は定格電圧 12[V]、定格容量 105[Ah] (20 時間率) のもの 10 個を直列に接続して使用し

た。合計定格電圧は 130[V]、容量は 1050[Ah] (20 時間率) となる。蓄電池は EDLC と同様に双方向 DC/DC コンバータを介して直流母線と接続されており、充電時は直流母線電圧 140[V]一定、放電時は 130[V]一定となるように制御する。

d) 負荷

本実験では、従来の交流負荷、近い将来に現れる直流電気製品負荷および EV の充電を想定した直流負荷の 3 種類の模擬負荷を使用した。

直流負荷は消費電力を変動できるプログラマブル電子負荷装置を使用した。この装置では約 0~1[kW]の消費電力をプログラムにより様々な負荷パターンで設定することが可能で、実験中に変動させることができる。直流負荷は将来的に使用されるであろう一般家庭におけるインバータベースの電化製品や照明器具を想定している。

交流負荷は 300[Ω]の負荷を使用した。これは従来の一般的な交流負荷を想定している。

EV の充電を想定した直流負荷は、前述の直流負荷と同様の電子負荷装置を使用して EV 用蓄電池の充電特性を再現している。充電特性(負荷変動パターン)は、実際の EV 用蓄電池を用いて測定実験を行い、測定した結果に基づいた充電電力特性を電子負荷装置により再現した。

3 単独運転試験

本節では、前節のハイブリッドマイクログリッドシステムを用いた単独運転試験について、実験条件および実験結果を記述する。

3.1 実験条件

ハイブリッドマイクログリッド単独運転試験は 2013 年 4 月 23 日午前 11 時に行われた。実験開始時の EDLC 電圧は 140[V]、蓄電池電圧は 124[V]であり、双方ともある程度充電されている状態であった。

Fig.3 に実験中の日射強度と太陽光発電装置の発電量を示す。実験中の天候は晴れであり、極端な日射強度の変動はないものの、実験の後半では日射強度の低下が見られた。太陽電池出力は日射強度に変動があった場合、それに追従して変化していることがわかる。また、降圧チョップの MPPT 制御により日射強度に対する最大電力を得ることができている。

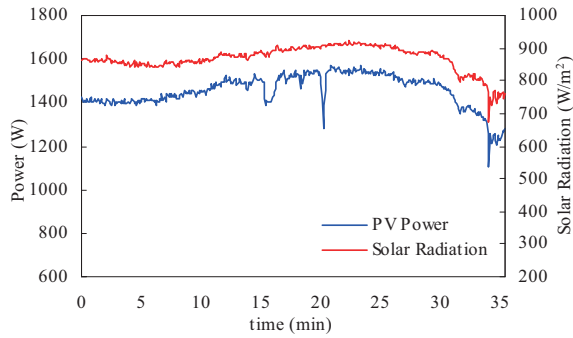


Fig.3. Measured data for PV generation

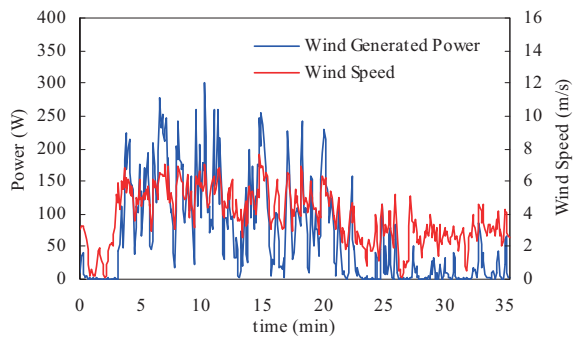


Fig.4. Data for wind power generation

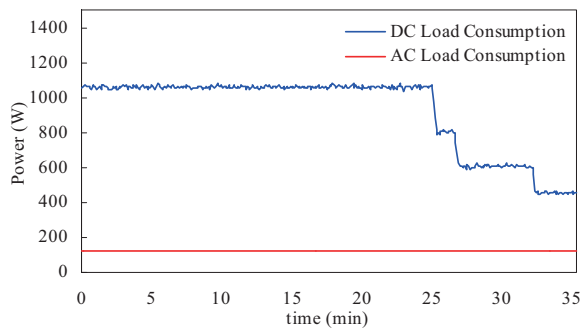


Fig.5. Load power pattern of DC and AC

実験中の風速および風力発電機発電量を Fig.4 に示す。風力発電機のカットイン風速を $2[m/s]$ としているため、風速 $2[m/s]$ 以下の場合には電力を供給していないが、 $2[m/s]$ よりも大きい場合には風速の変化に応じて電力を供給していることがわかる。発電電力は風速の 3 乗に比例するため、その出力波形は大きく変動している。

直流負荷及び交流負荷の消費電力を Fig.5 に示す。直流負荷として使用している電子負荷装置は定電力負荷モードで動作し、実験中に 3 回消費電力を変更している ($1050[W]$ 、 $800[W]$ 、 $600[W]$ 、 $450[W]$)。

Fig.6 に電気自動車の充電状態を模擬した電子負荷装置の消費電力を示す。この消費電力特性については、実際の電気自動車用蓄電池の充

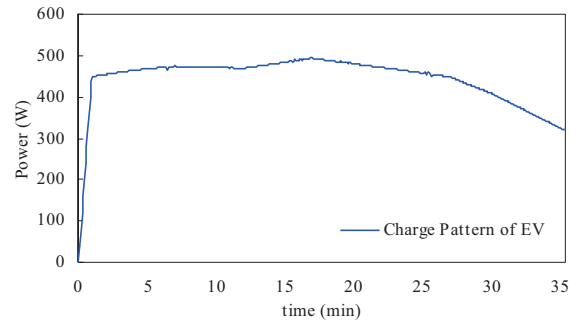


Fig.6. Load power based on EV charging

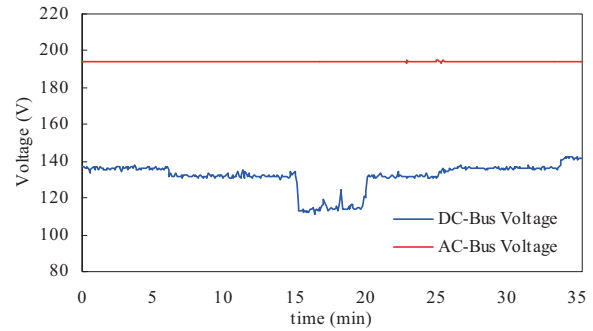


Fig.7. Voltage profiles at DC and AC Bus

電時の特性を測定した結果に基づき、実際の EV に使用される蓄電池の約 $1/8$ の蓄電池容量を想定して計算された消費電力パターンを電子負荷装置により再現している。

3.2 実験結果

前項に記載した条件下において、単独運転試験を行った。計測した直流母線電圧および交流母線電圧波形を Fig.7 に示す。

直流母線電圧は EDLC、蓄電池、ディーゼル発電機によって維持されており、Fig.3-6 に示したような再生可能エネルギー発電や負荷変動の影響が抑制され、直流母線電圧が一定の範囲内で安定に維持されていることが確認できる。また、交流母線電圧は DC/AC インバータによって一定に保たれていることが確認できる。

実験中の EDLC、蓄電池、ディーゼル発電機のそれぞれの出力波形を Fig.8-10 に示す。

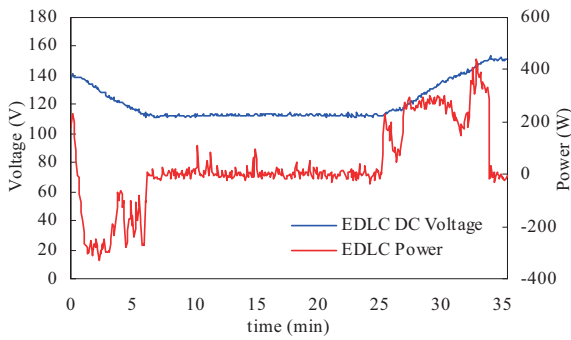


Fig.8. Power output and DC voltage of EDLC

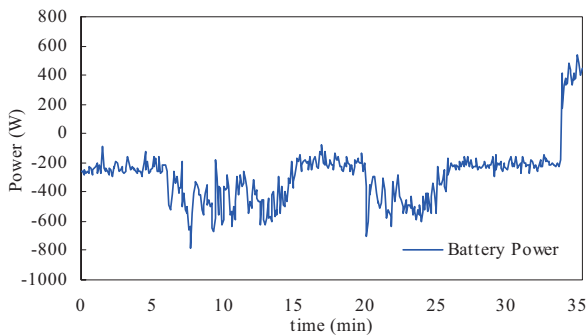


Fig.9. Power output of Battery

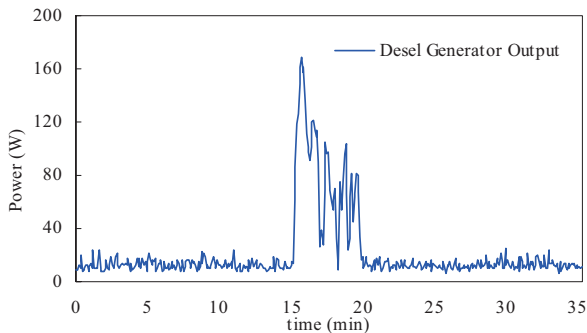


Fig.10. Power output from diesel generator

実験結果は、直流母線を制御している機器の切替により、6段階に分けられる。

[Step1] Start-6min.

再生可能エネルギー発電量 < 負荷消費電力量

直流母線電圧は EDLC 放電により 135[V] に制御される。EDLC は放電動作を行い、EDLC 電圧はこの間徐々に低下する。

[Step2] 6min.-15min.

再生可能エネルギー発電量 < 負荷消費電力量

EDLC 電圧が 110[V] に到達しそれ以上放電ができなくなったとき、この状態へと移行する。直流母線電圧は蓄電池の放電によって 130[V] に保たれる。

[Step3] 15min.-20min.

再生可能エネルギー発電量 < 負荷消費電力量

蓄電池の残容量が低下し放電の継続が困難になった場合、ディーゼル発電機が自動的に稼働し母線電圧を維持する。実験で用いた蓄電池は容量が大きく、残存容量が低下するまでに長時間かかるため、本実験では蓄電池の出力電力を制限してこの状態を模擬した。この状態になると蓄電池により維持されていた直流母線電圧が低下し、それが 115[V] 付近になるとディーゼル発電機が動作を開始する。母線電圧はディーゼル発電機によって 115[V] 付近に保たれる。この状態中に母線電圧が数ボルト上昇する現象が見られるが、これは再生可能エネルギー発電量が増加し、ディーゼル発電機が放電を必要としない期間が数秒間あったためと考えられる。

[Step4] 20min.-25min.

再生可能エネルギー発電量 < 負荷消費電力量

バッテリーの出力制限を解除し Step2 と同様の状態へと移行した。直流母線電圧は蓄電池の放電により 130[V] に保たれている。

[Step5] 25min.-33min.

再生可能エネルギー発電量 > 負荷消費電力量

直流負荷の消費電力が低下しこの状態へと移行した。蓄電池が放電動作を停止し母線電圧が増加し、135[V] に到達すると EDLC が充電動作を開始する。直流母線電圧は EDLC によって 135[V] に制御される。EDLC 電圧は充電によりこの間上昇していく。

[Step6] 33min.-end.

再生可能エネルギー発電量 > 負荷消費電力量

EDLC 電圧が 150[V] に達しそれ以上充電できなくなったとき、この状態へと移行する。母線電圧は蓄電池の充電によって 140[V] に維持される。

4 結論

本論文では、再生可能エネルギー発電などの分散型電源の利用の助けとなるマイクログリッドシステムについて検討した。従来のマイクログリッドシステムは再生可能エネルギー発電などの分散型電源装置で生産した電力を交流電力に変換し、配電系統やマイクログリッド内の負荷に供給するのが一般的であるが、本論文においては直流負荷および交流負荷の両方に電力供給が可能なハイブリッドマイクログリッドシステムを提案し、実験研究を行った。ハイブリッドマイクログリッドは太陽光発電装置や分散型電力貯蔵装置をはじめとする直流ベースの装置を電力変換の損失なく利用できること、

無効電力や周波数問題を考慮する必要が無いことで有利である。

本論文では主に、ハイブリッドマイクログリッドシステムの運用において重要となる直流母線および交流母線の電圧制御について検討し、実験によりその効果を確認した。直流母線電圧についてはEDLCと蓄電池の2種類の分散型電力貯蔵装置およびそれらが動作できない場合の予備電源であるディーゼル発電機を用いることで安定化を図った。2種類の電力貯蔵装置は、それぞれ双方向DC/DCコンバータにより直流母線と接続されており、容量に応じてどちらかが使用される。また、交流母線電圧は、DC/ACインバータにより安定化を図り、直流・交流母線ともに実験により安定化効果を確認することができた。これらの効果は再生可能エネルギー発電電力や負荷の消費電力に変動がある場合にも得られ、実験に用いたハイブリッドマイクログリッドシステムが単独運転時に安定運用できることを確認することができた。

今後は直流母線電圧をより安定化させ、より小さい電圧幅で母線電圧を安定制御するために制御方法の改善を行っていく予定である。

参考文献

- 1) IEA Photovoltaic Power System Programme, “Trends in Photovoltaic Applications 2013”
- 2) K. Hirose, “Trends of DC power Technologies and their Applications”, *IEEJ Trans. on Power & Energy*, Vol.131, No.4, 358/361, (2011)
- 3) H. Kakigano; Y. Miura; T. Ise; R. Uchida, “DC Voltage Control of the DC Micro-Grid for Super High Quality Electric Power Distribution”, *IEEJ Trans. on Industry Application*, Vol.127, No.8, 890/897, (2007)
- 4) X. Liu; P. Wang; P. C. Loh, “A Hybrid AC/DC Microgrid and Its Coordination Control”, *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol.2, No.2, 278/286, (2011)
- 5) G. Wu; Y. Yoshida; T. Minakawa, “Mitigation of Wind Power Fluctuation by Combined Use of Energy Storages with Different Response Characteristics”, *Proc. IEEE International Conf. on Smart Grid and Clean Energy Technology*, No.NEU040, 605/611, (2011)
- 6) A. Izumida; A. Sobu; G. Wu, “A Basic Study of Operation of Distributed Power Generations in a Small Micro Grid”, *Proc. IEEJ 2011 Annual Conf.*, Vol.6, No.203, (2011)
- 7) 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 International Conf. on Renewable Energy Research and Applications*, No.ISS6, p.6, (2012)