

蓄電装置の設備容量半減を実現する制御によるガスエンジン発電機を主体とした高品質自立電力供給

杉本 貴之 下田 英介 山根 俊博 山本 裕治
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Islanding Operation for Step Load Change of Large-scale Shaking Table using Downsized Energy Storage

Takayuki Sugimoto, Eisuke Shimoda, Toshihiro Yamane and Yuji Yamamoto

停電時に安定かつ高品質な電力供給を行うには、発電機と蓄電装置を組み合わせたマイクログリッドが有効であるが、蓄電装置の高コストが課題となっている。そこで我々は、当社が開発した従来のマイクログリッド制御手法と比較して、蓄電装置の設備容量が半分で同等品質の電力供給を可能とする自立運転制御手法を開発した。本制御手法により、マイクログリッド導入時のコスト削減が可能となる。本制御手法を用いて停電を想定した自立運転実証試験を実施し、周波数の最大変動幅が0.175Hz（目標：50±0.2Hz以内）となり、高い電力品質を実現した。

We have developed a control method for islanding operation of micro-grid with downsized energy storage system. The micro-grid system consists of lithium ion capacitor as electric energy storage and a gas engine generator. This control method can reduce the capacity of energy storage by half compared with our conventional method. This paper describes the experimental results of micro-grid islanding operation. As a result, the maximum fluctuation of the system frequency was 0.175Hz (target : within 50±0.2Hz). These results lead to the conclusion that the control method can be applicable to cost saving for the micro-grid.

1. はじめに

近年、我が国では再生可能エネルギーの導入拡大が政策的に進められている。しかし、太陽光発電（以下、PV）など天気によって出力が変動する再生可能エネルギーが電力系統に大量導入されると、電力系統の電力品質や安定性に影響を及ぼすことが懸念されている。これに対し当社では、需給バランスをとりながら安定的に電力を供給する、発電機と蓄電装置など複数の分散型電源を組み合わせたマイクログリッドの研究開発を進めてきた。

2006年には当社技術研究所にて600kW級マイクログリッドの運用を開始した。電力系統からの受電電力が一定になるように分散型電源の出力調整を行う連系運転^{1),2)}と、電力系統から切り離して分散型電源のみでマイクログリッド内に高品質な電力供給を行う自立運転^{3),4)}を実現している。2009年には中国・杭州電子科技大学にて400kW級マイクログリッドの運用を開始した。発電設備容量の50%がPVという構成でも安定して電力供給が可能なことを実証した⁵⁾。

2011年3月11日に発生した東日本大震災にともなう大規模停電の発生以降、BCP（Business Continuity Plan）対策として停電時の電力供給ニーズが高まっており、発電機の導入事例が増えている。停電時でも高い電力品質を要求する負荷設備を活用したい施設においては、当社が開発・実用化しているマイクログリッドが有効である。しかしながら蓄電装置の導入コストが高いことから、マイクログリッドに必要となる蓄電装置の設備容量（以下、kW容量）と蓄電容量（以下、kWh容量）を削減することが課題となっている⁶⁾。

マイクログリッドで高品質な電力供給を行うには、負荷変動の大きさと同程度のkW容量を持つ蓄電装置が必要となる。特に大電力かつ急峻な変動負荷の場合、kW容量が大きくなる。

そこで我々は、当社が開発した従来のマイクログリッド制御手法（以下、従来手法）と比較して、蓄電装置のkW容量を半減しつつ同等品質の電力供給が可能な制御手法（以下、プレチャージ制御⁷⁾）を開発した。これにより、マイクログリッド導入時のコストダウンが可能となる。なお、プレチ

ャージ制御は大電力かつ急峻な変動の発生が既知である負荷に対して適用される。

本論文では、今回開発したプレチャージ制御について述べる。さらに、当社技術研究所の先端地震防災研究棟（以下、本建物）に構築したマイクログリッドを対象に自立運転実証試験を行い、電力供給品質を評価した結果を報告する。

2. システム概要

2.1 システム構成

マイクログリッドのシステム構成と構成機器の外観をそれぞれ図-1と写真-1に示す。主力電源装置であるガスエンジン発電機（以下「GE」、定格700kW）、急峻な負荷変動補償用に蓄電装置であるリチウムイオンキャパシタ（以下「LIC」、定格250kW、4.2kWh）、監視制御装置であるスマート BEMS（Building Energy Management System）で構成される^{7),8)}。

今回導入した LIC は放電レートが最大 100C（1C：定電流放電して1時間で放電終了となる電流値）程度であるため、高出力でありながら kWh 容量を必要最小限に抑えることができる。LIC と同じ 250kW の出力をリチウムイオン電池で実現するには、最低 50kWh 程度の kWh 容量が必要となる。

通常時、GE と LIC は構内の系統に連系して電力供給を行っている。停電時、図-1中の遮断器を開放することによって、マイクログリッドの自立運転に移行する。自立運転時は GE が電力系統の役割を果たす。GE は自立範囲の周波数と電圧が一定になるように、装置側で自律的に制御（以下、ローカル制御）される⁹⁾。

本建物の負荷電力、GE と LIC の出力は電子式マルチメータにより計測され、スマート BEMS に伝送される。これらの計測値を基にスマート BEMSにより0.1秒毎にLICに電力指令値を与えている。

2.2 電源特性

マイクログリッドにより安定した電力供給を行うには、各分散型電源に対してその応答特性に見合った周波数帯域の負荷変動を補償するように電力指令値を与える必要がある¹⁰⁾。そこでまず、GE と LIC の応答特性を求めるため、電力指令値に対するそれぞれの出力を計測した。

GE と LIC の応答特性の測定結果を図-2に示

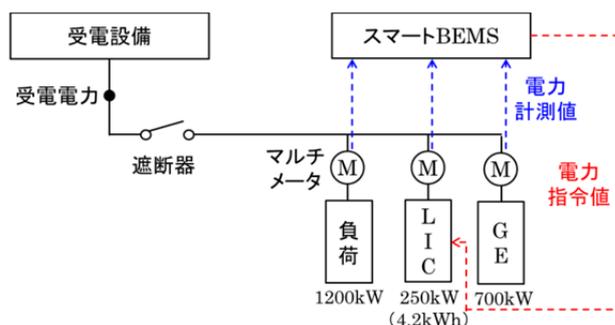


図-1 マイクログリッドのシステム構成



(a) ガスエンジン発電機 (b) リチウムイオンキャパシタ



(c) スマート BEMS

写真-1 システム構成機器の外観

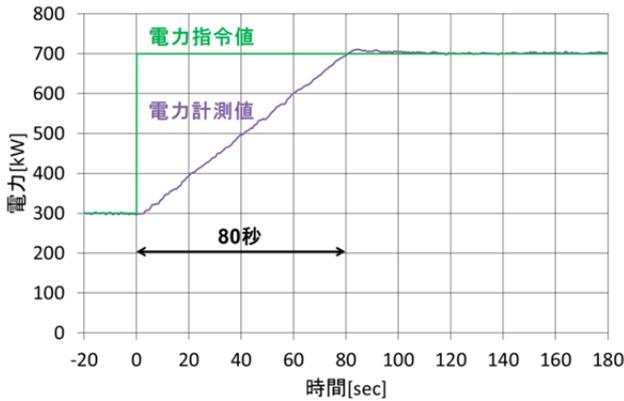
す。双方ともステップ状に変化する電力指令値に対して出力はランプ状に変化していて、GEでは300kWから700kWまで増加するのに要した時間は約80秒であった。LICでは-250kW（充電）から250kW（放電）変化するのに要した時間は約0.17秒であった。このうち無駄時間が約0.09秒、立ち上がり時間が約0.08秒であった。

2.3 負荷特性

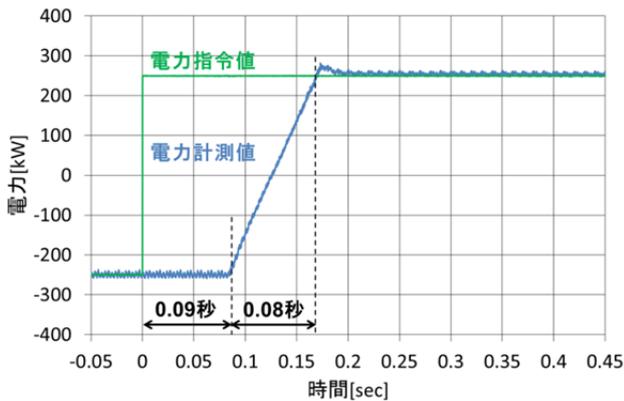
本建物には、巨大地震を想定した加振実験等を行うため、大型振動台（写真-2参照）が導入されている⁸⁾。大型振動台の最大消費電力は1100kWであり、本建物の負荷電力の大部分を占める。

図-3に大型振動台運転時の本建物の負荷電力の一例を示す。待機中の負荷電力は約450kWであり、加振を開始すると加速度（単位は[gal]）に応じ100~300kWステップ状に増加している。大型振動台の運転により、任意のステップ状の負荷変動を発生させることができる。

以降、プレチャージ制御の評価を行うため、大



(a) ガスエンジン発電機



(b) リチウムイオンキャパシタ

図-2 マイクログリッドの応答特性



写真-2 大型振動台の外観

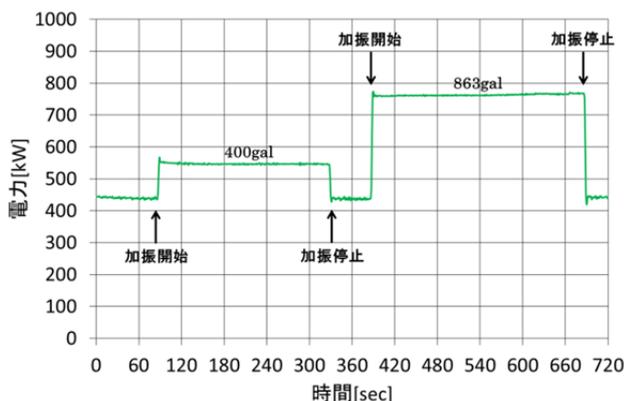


図-3 大型振動台運転時の負荷電力

型振動台の加振にともなうステップ状の負荷変動を補償し、高品質な電力供給を行うことを目標として実証試験を行った。

3. 自立運転制御の概要

3.1 従来の負荷変動補償

自立運転時の従来手法の概念図を図-4に示す。発電機の場合、発電機が負荷電力の全てを賄うように運転される。D[kW]のステップ状の負荷変動により発電機の出力が急激に変動すると、自立範囲の周波数は低下する(同図(a))。そこで、急峻な負荷変動を応答特性の速い蓄電装置で補償し、発電機の急激な出力変動を抑制する。ただし、蓄電装置は kWh 容量が限られており、長時間の放電出力を継続できないため、発電機の出力を増加させ、蓄電装置が受け持っている出力を発電機に持ち替える(同図(b))。従来手法の場合、蓄電装置の最大出力が D[kW]となり、負荷変動の大きさと同等な蓄電装置の kW 容量が必要となる。

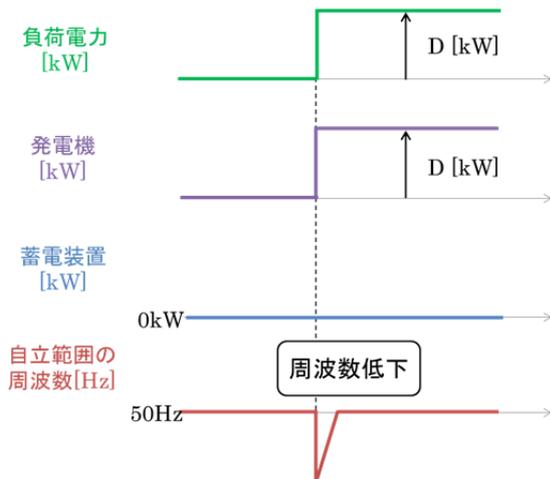
3.2 プレチャージ制御を用いた負荷変動補償

プレチャージ制御では、負荷変動が発生する前に充電を開始することにより蓄電装置の定格出力を従来手法の 1/2 にする。前節の従来手法(発電機+蓄電装置)にプレチャージ制御を組み込み、負荷変動補償を行う。その概念図を図-5に示す。プレチャージ制御の制御シーケンスを下記に示す。

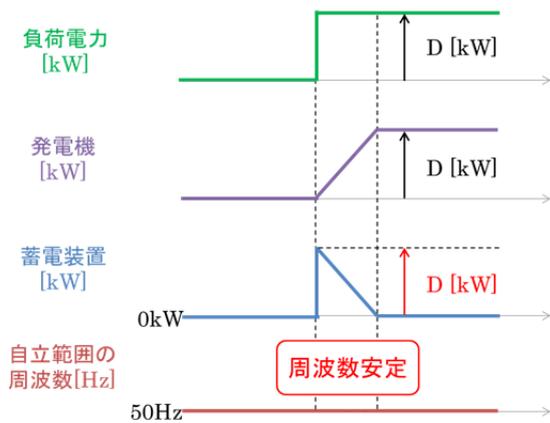
- ①プレチャージ制御中の充放電停止を防ぐため、電池残量[%]を中心付近(50%)に保つ制御(以下、SOC (state of charge) 制御)を実施^{7),8)}。
- ②負荷電力が増加する T_p [sec]前に蓄電装置の充電出力の増加を開始(プレチャージ制御開始)。
- ③蓄電装置の充電出力の増加に合わせて、発電機の出力を増加。
- ④負荷変動時、蓄電装置の出力が $-D/2$ [kW]に到達し、プレチャージ制御終了。

プレチャージ制御により、 $-D/2 \sim D/2$ [kW]の蓄電装置の出力変化で D[kW]の負荷変動に対応することができるため、蓄電装置の kW 容量は $D/2$ [kW]となる。なお、負荷電力が減少する場合は蓄電装置の充放電は逆となる。

T_p [sec]は、負荷変動の大きさ D[kW]と GE の応答特性により、負荷変動時に LIC が $-D/2$ [kW]に到達するようにあらかじめ設定する。この場合、



(a) 発電機のみ



(b) 発電機+蓄電装置

図-4 従来の自立運転制御

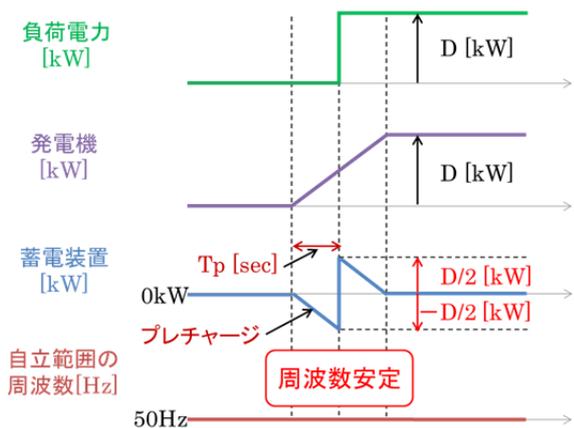


図-5 プレチャージ制御を用いた自立運転制御

プレチャージ制御開始から T_p [sec]後に D [kW]以下の変動が発生する負荷に対して、プレチャージ制御を適用することができる。

4. 連系運転実証試験

プレチャージ制御を用いた自立運転制御の事前検証として、まず連系運転実証実験を行った。連系運転では、図-6に示す統合カスケード制御¹¹⁾を用いて図-1中の受電電力が一定になるように負荷変動補償を行う(以下、潮流一定運転)。この統合カスケード制御にプレチャージ制御を組み込んだ。潮流一定運転では、受電電力の目標値100kWに対する変動幅を評価した。図-6中のローパスフィルタの高域遮断周波数は、2.2節のGEとLICの応答特性の測定結果に基づいて決定した。

図-7に、約120kWの負荷変動を対象に従来手法による潮流一定制御を行った結果を示す。負荷電力の増加に対して、まずLICの出力で変動を吸収する。以降、GEの出力が増加するに従いLICの出力が減少し、受電電力が目標値を維持している。受電電力の最大変動幅は8.4kWとなった。負荷変動時に受電電力が1秒間だけ目標値に対して大きく変動している。これは計測値の遅延によるスマートBEMSの制御遅れが原因である。

次に、約260kWの負荷変動を対象にプレチャージ制御を用いて潮流一定制御を行った結果を図-8に示す。潮流一定運転により受電電力の目標値を維持していることがわかる。LICの最大出力は133kWであり、従来手法とは異なり負荷変動の大きさの半分程度となった。受電電力の最大変動幅は8.9kWであり、従来手法の制御結果と同等となった。図-7と同様、制御遅れにより負荷変動時は受電電力が1秒間だけ大きく変動している。

以上の結果より、プレチャージ制御を用いた場合においても従来手法と同等の精度の負荷変動補償が可能であることを確認できた。

5. 自立運転実証試験

図-1中の遮断器を開放し、模擬停電させることにより自立運転実証試験を行った。電力品質として基準周波数50Hzに対する変動幅を評価した。周波数は、図-1中の負荷電力用の電子式マルチメータと同じ計測点に電力品質アナライザ(日置電機製)を接続して計測した(写真-3参照)。

スマートBEMSのみでLICを制御した場合、制御遅れによる影響で周波数が大きく変動するため¹²⁾、制御遅れの小さい(数ミリ秒)ローカル制御で負荷変動補償を行う。LICの制御ブロック図を図-9に示す。LICのローカル制御の指令値に

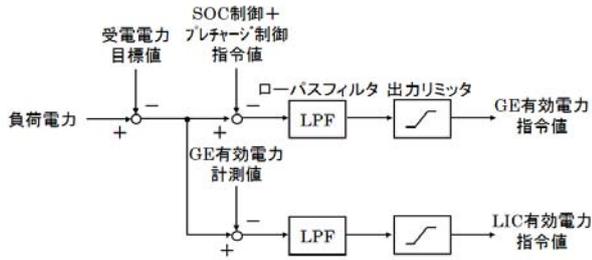


図-6 統合カスケード制御

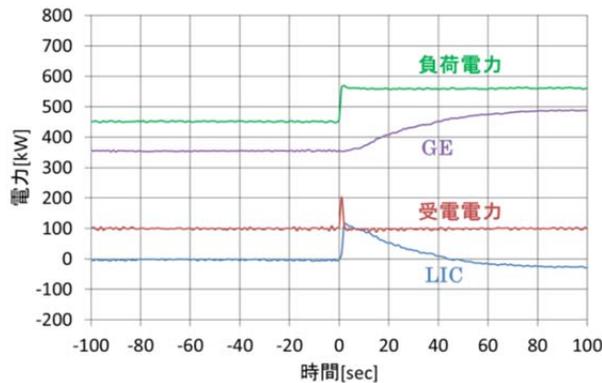


図-7 従来の潮流一定運転

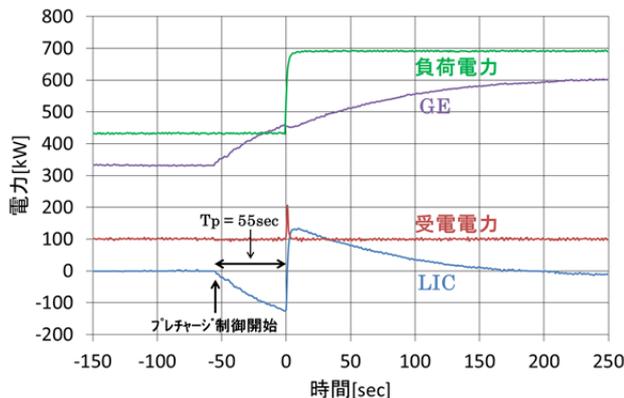


図-8 プレチャージ制御を用いた潮流一定運転

スマート BEMS による SOC 制御とプレチャージ制御の指令値を加算して、LIC の有効電力指令値とした。

連系運転時と同様に、約 260kW の負荷変動を対象にプレチャージ制御を用いて自立運転を行った結果を図-10 に示す。LIC の最大出力が 134kW で負荷変動の大きさの半分程度となった。周波数の最大変動幅は 0.175Hz であり、これまで目標値として設定してきた電力会社の管理基準 (50±0.2Hz) の範囲内であった。プレチャージ制御を実装した場合においても、LIC の精緻な負荷変動補償により周波数変動が抑制されることが確認された。蓄電装置の最大出力を半減しつつ、従来手法と同程度のマイクログリッドの自立運転を実現できた。



写真-3 自立範囲の周波数の測定

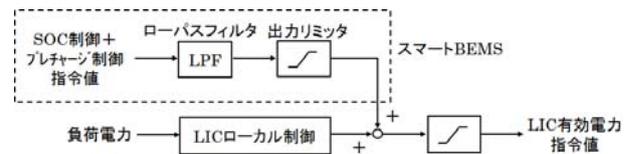


図-9 自立運転時の LIC 制御

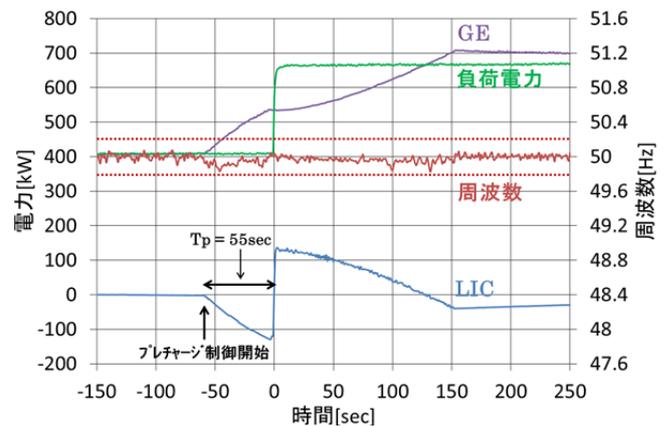


図-10 プレチャージ制御を用いた自立運転

6. まとめ

本論文では、従来手法と比較して、蓄電装置の kW 容量を半減しつつ同等品質の電力供給が可能とするプレチャージ制御について述べた。プレチャージ制御を用いた自立運転制御の事前検証として、まず連系運転実証試験にて潮流一定運転を行い、受電電力の目標値に対する変動幅を評価した。その結果、約 260kW の負荷変動に対して LIC の最大出力が 133kW であり、従来手法の 1/2 程度となった。プレチャージ制御を用いた場合においても受電電力の最大変動幅は 10kW 未満となり、従来手法と同等の負荷変動補償が可能であることを確認した。

次に自立運転実証試験を行い、自立運転時の周波数を定量的に評価した。その結果、連系運転実証試験と同様、LIC の最大出力が従来手法の 1/2

程度となった。周波数の最大変動幅は0.175Hzであり、電力会社の管理基準以内となり、従来手法と同等の高い電力品質を実現した。

プレチャージ制御を用いることにより、蓄電装置のkW容量の削減が可能となる。したがって、大電力かつ急峻に変動する負荷設備が導入されている施設に対して、停電時の高品質な電力供給が可能なマイクログリッドをコストダウンできる。

<参考文献>

- 1) 下田英介、沼田茂生、森野仁夫、田邊隆之、伊藤孝充：“マイクログリッドにおける複数分散型電源の出力協調制御1”、平成18年電気学会電力・エネルギー部門大会、pp.17-18、2006年
- 2) 鈴木茂之、植田喜延、沼田茂生、森野仁夫、傳田篤：“マイクログリッドにおける複数分散型電源の出力協調制御2”、平成18年電気学会電力・エネルギー部門大会、pp.19-20、2006年
- 3) 下田英介、沼田茂生、馬場旬平、河内駿介、正田英介、仁田旦三：“非常時を想定したマイクログリッド72時間連続自立運転(1)”、平成22年電気学会全国大会、pp.286-287、2010年
- 4) 河内駿介、馬場旬平、下田英介、沼田茂生、正田英介、仁田旦三：“非常時を想定したマイクログリッド72時間連続自立運転(2)”、平成22年電気学会全国大会、pp.288-289、2010年
- 5) 森野仁夫：“中国浙江省・杭州電子科技大学における都市型マイクログリッドの実証研究”、クリーンエネルギー(日本工業出版)、pp.61-67、19巻、2010年
- 6) 河内駿介、萩原裕人、馬場旬平、古川慧、下田英介、沼田茂生：“空調用ヒートポンプを用いた短周期電力変動補償に関する実機検討”、電気学会論文誌B、pp.77-85、132巻、2012年
- 7) 杉本貴之、山根俊博、山本裕治：“蓄電装置の設備容量削減を目的としたマイクログリッド制御”、2016年(第34回)電気設備学会全国大会、pp.172-173、2016年
- 8) 杉本貴之、下田英介、山本裕治：“ガスエンジンとリチウムイオンキャパシタを用いたスマートBEMSによるエネルギー管理制御”、2015年(第33回)電気設備学会全国大会、pp.47-48、2015年
- 9) 沼田茂生、下田英介、馬場旬平、鈴木茂之、古賀毅、仁田旦三、正田英介：“自律的に出力協調された複数分散型電源による自立運転模擬試験”平成19年電気学会全国大会、pp.62-63、2007年
- 10) 下田英介、沼田茂生、馬場旬平、仁田旦三、正田英介：“マイクログリッドにおける負荷変動解析と電源周波数特性評価を用いた複数分散型電源の制御戦略と設備容量設計

法”、電気学会論文誌B、pp.1553-1559、129巻、2009年

- 11) J.Baba, et al.: “Combined power supply method for micro grid by use of several types of distributed power generation systems”, Proc. EPE2005, Dresden, Germany, 2005
- 12) 馬場旬平、下田英介、沼田茂生、菊池卓郎、広橋滋人、仁田旦三、正田英介：“有効電力統合カスケード制御を用いた複数種類分散型電源によるマイクログリッドの自立運転模擬試験”、平成19年電気学会全国大会、pp.65-66、2007年