

# 疑似慣性があるGFMインバーターと同期発電機の並列運転による系統安定化

Parallel Operation of BESS Incorporating GFM Inverters with Inertia-Supporting Control and Diesel SG for Stabilization of Low-Inertia Microgrids

司城 徹 SHIJO Tetsu 林 強 LIN Qiang

電力系統では、火力発電や水力発電の同期発電機に接続されるタービンなど回転体の慣性力で系統安定が保たれていたが、再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）の主力電源化によって慣性力の不足が懸念される。特に、災害などによる広域停電時や、離島・山間地域で電力系統から独立し、自立して電力供給ができるマイクログリッドでは、慣性力不足が早期に顕在化することが予想される。

今回東芝は、慣性力不足への対策として、疑似慣性があるGFM（Grid Forming）インバーター制御を搭載した定格20 kW、電池容量14.9 kWhの蓄電池システム（BESS：Battery Energy Storage System）を開発した。このBESS 5台と定格125 kVAのディーゼル同期発電機1台が並列運転する評価用マイクログリッドを構築し、疑似慣性の導入による系統安定への有効性を、実験で確認した。

The stability of power grids has conventionally been maintained by the large inertia of turbines and other rotating equipment connected to synchronous generators such as those in thermal and hydroelectric power stations. However, the reduction of inertia due to the rapid introduction of renewable energy in recent years has become a serious issue. In particular, inertia reductions tend to occur during wide-area blackouts caused by disasters, as well as in renewable energy microgrids constructed on isolated islands and in mountainous areas to realize self-sufficiency in electricity.

In order to develop measures appropriate for such low-inertia power grids, Toshiba has constructed a test environment that can simulate various types of microgrids. This test environment contains five 20 kW battery energy storage systems (BESS), each having a capacity of 14.9 kWh, which can be equipped with either grid-forming (GFM) inverters with inertia-supporting control (supplying virtual inertia) or grid-following (GFL) inverters without inertia-supporting control (without virtual inertia), connected in parallel with a 125 kVA diesel synchronous generator (SG). Through the results of tests, we have confirmed the effectiveness of the operation of five BESS incorporating GFM inverters with inertia-supporting control operating in parallel with a diesel SG for the stabilization of low-inertia microgrids without increasing the load shared by the diesel SG.

## 1. まえがき

我が国は、2020年10月に「2050年カーボンニュートラルの実現」を宣言し、脱炭素社会に向けて、太陽光発電や風力発電などの再エネの主力電源化を進めている。火力発電や水力発電は、流体が持つエネルギーをタービンで運動エネルギーに変換し、運動エネルギーの回転力を同期発電機で電力に変換する。電力系統の需要変動、再エネの出力変動、及び電源脱落による周波数変動に対して、タービンなどの回転体の慣性力が系統安定に寄与している（図1）。今後、再エネの主力電源化により、慣性力が不足することが懸念される。特に、災害などによる広域停電時や、離島・山間地域で電力系統から独立し、自立して電力供給するマイクログリッドでは、早期に慣性力不足が顕在化することが予測される。

再エネ電源では、発電電力を系統電力に変換するPCS（Power Conditioning Subsystem）で、GFL（Grid Follow-

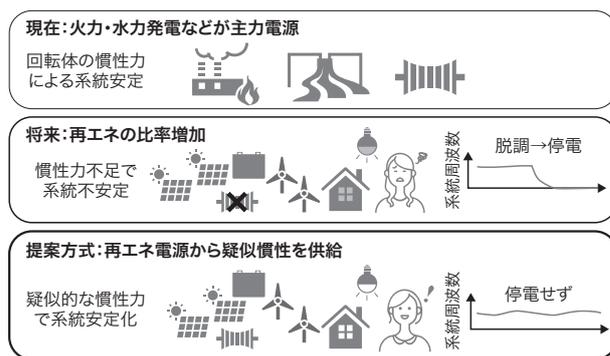


図1. 系統安定に寄与する慣性力

再エネ電源から疑似慣性を提供して、系統安定化を図る。

Contribution of inertial force to stabilization of power grid

ing) インバーター制御が広く使われている。GFLインバーターは、PCSの電力系統への出力電圧は系統に従属であり、出力電流を制御対象にしている。電力系統が停電している

場合、GFLインバーターは電圧を出力できないため、自立運転できない。近年、PCSの出力電流ではなく、出力電圧を制御するGFMインバーター制御<sup>1)</sup>の開発が進んでいる。GFMインバーターは、系統停電時も電圧を出力することができ、自立運転可能である。

再エネ大量導入時の慣性力不足に伴う系統安定度の低下に対して、GFLインバーターやGFMインバーターに代わって、同期発電機の疑似的な慣性を電力系統に提供する仮想同期発電機 (VSG : Virtual Synchronous Generator) 制御<sup>2)</sup>が提案されている。

今回、東芝製リチウムイオン二次電池 SCiB を搭載した定格 20 kW、電池容量 14.9 kWh の BESS に、疑似慣性あり GFM インバーター<sup>3)</sup> を実装した GFM-BESS を開発した。

ここでは、開発した GFM-BESS 5 台と定格 125 kVA のディーゼル同期発電機が並列稼働する評価用マイクログリッドの構築と、評価用マイクログリッドを用いた疑似慣性あり GFM インバーターによる系統安定性の実機検証<sup>4)</sup>について述べる。

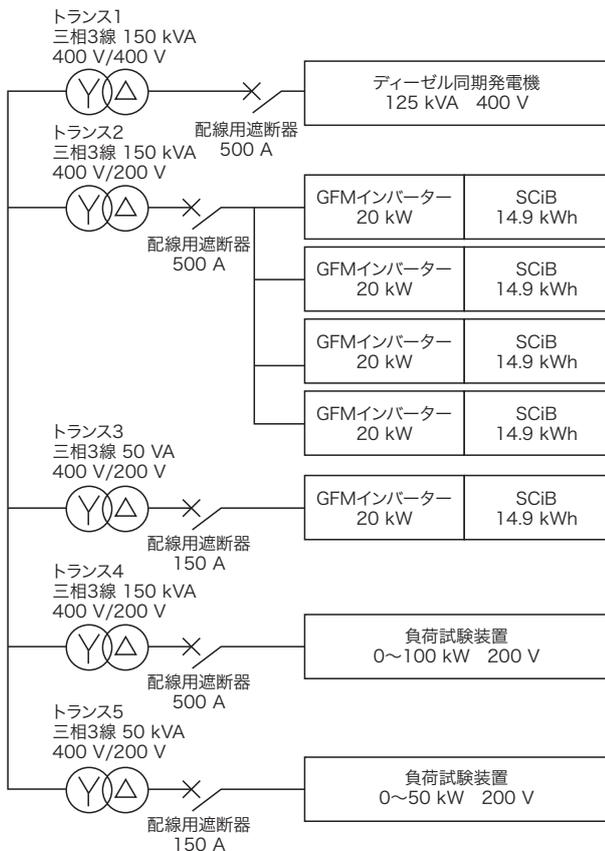


図2. 評価用マイクログリッドの構成

疑似慣性あり GFM インバーターとディーゼル同期発電機が並列運転するマイクログリッドで、系統安定の効果を検証した。

Configuration of experimental microgrid

## 2. 評価用マイクログリッドの構築

2019年、令和元年房総半島台風により千葉県で広域停電が発生した。その際に、千葉県睦沢町にあるマイクログリッド「むつざわスマートウェルネスタウン」は、地産の天然ガスを利用したコジェネレーションの同期発電機で発電を開始するブラックスタート機能により、道の駅及び住宅への電力供給を再開した。

今回、開発した GFM-BESS による系統安定への貢献を実機検証するために、むつざわスマートウェルネスタウンを参考に、同規模のマイクログリッドを社内実験室内に構築した(図2, 図3, 図4)。コジェネレーションシステムには、レシプロエンジンであるガスエンジン同期発電機が使われて



図3. 蓄電池システム、トランス、及び負荷

実験室内に、評価用マイクログリッドを構築した。

BESS, transformers, and load banks

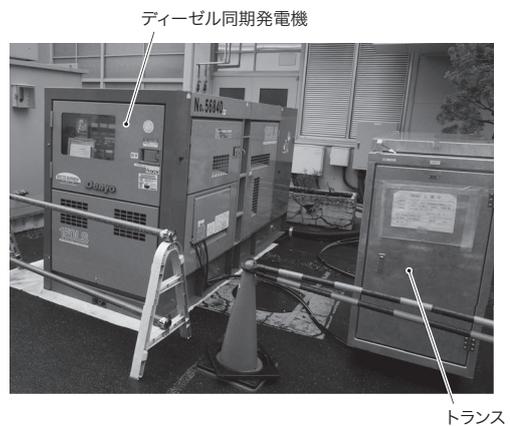


図4. 定格 125 kVA のディーゼル同期発電機

屋外に設置したディーゼル同期発電機と、実験室内の評価用マイクログリッドを、接続した。

125 kVA diesel SG

いる。レシプロエンジンの同期発電機は、タービンエンジンよりも回転体が小型で慣性が小さいため、再エネ電源の割合が増えたときの慣性力不足が大きく影響する。

そこで、定格80 kVAガスエンジン同期発電機2台の代わりに、同じくレシプロエンジンである非常用のディーゼル同期発電機(定格125 kVA)で代替した。マイクログリッド内で、ディーゼル同期発電機1台とGFM-BESS 5台が並列運転する。むつぎわスマートウェルネスタウンの実際の電力需要データを参考に負荷を変動させたときの、各発電機の負荷分担とグリッド内の系統周波数を評価する。

### 3. 疑似慣性ありGFMインバーターによる系統安定化の実機検証

評価用マイクログリッドのBESS 5台の制御は、BESSごとに、従来の疑似慣性なしGFLインバーター制御と疑似慣性ありGFMインバーター制御のどちらにも切り替えられる。5台のBESSの、制御方法の構成割合を変えて、負荷変動時の各電源の負荷分担と系統周波数の過渡特性を評価する。実験開始から1.5 sの時点で、負荷が72 kWから120 kWに変わる負荷変動を与えた。

5台のBESSを、疑似慣性なしGFLインバーター制御した場合の負荷変動時の負荷分担を、図5に示す。負荷変動が発生しても疑似慣性なしGFLインバーター制御のBESSは負荷分担せず、ディーゼル同期発電機が全負荷変動を負っている。次に、5台のBESSのうち2台を、疑似慣性ありGFMインバーター制御した場合を図6に示す。疑似慣性ありGFMインバーター制御のBESSの負荷分担が増え、ディーゼル同期発電機の負荷分担が減っている。更に、BESS 5台を疑似慣性ありGFMインバーター制御した場合を図7に示す。ディーゼル同期発電機の負荷分担が大幅に軽減される。

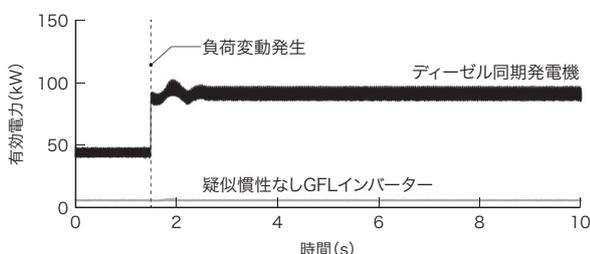


図5. 疑似慣性なしGFLインバーター制御のBESS 5台をディーゼル同期発電機と組み合わせた場合の負荷分担

負荷変動時に、疑似慣性なしGFLインバーターの負荷分担はなく、ディーゼル同期発電機が全て負荷分担する。

Load shared by five BESS using GFL inverters without virtual inertia and diesel SG

また、図6及び図7において、時刻1.7 s付近で、疑似慣性ありGFMインバーターの負荷分担の割合が、大きくなっていることが分かる。ディーゼル同期発電機に使われるレシプロエンジンの慣性が、疑似慣性ありGFMインバーターよりも弱いと推定される。

5台のBESSのうち、疑似慣性なしGFLインバーター制御と疑似慣性ありGFMインバーター制御の動作台数割合を、0:5, 3:2, 5:0とした場合の、負荷変動時の系統周波数の変化を、図8に示す。5台のBESSを疑似慣性なしGFLインバーター制御した場合、系統周波数が47.6 Hzまで急減している。ディーゼル同期発電機のエンジンに掛かる負荷が増加したため、回転速度が下がり、周波数が低下したものと考えられる。周波数(回転速度)の変化に伴い、発電機のガバナ( Governor)の機能でエンジン出力が上がり、速度調定率で定められた周波数までエンジンの回転速度が回復し、周波数が49.5 Hzまで戻った。

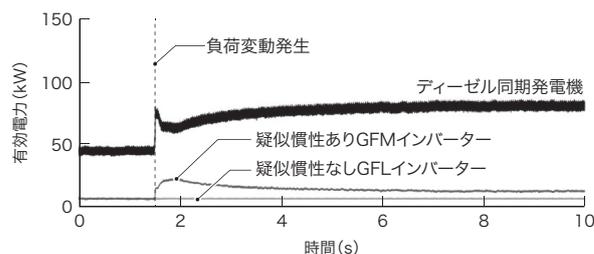


図6. 疑似慣性なしGFLインバーター制御のBESS 3台と疑似慣性ありGFMインバーター制御のBESS 2台をディーゼル同期発電機と組み合わせた場合の負荷分担

負荷変動時に、疑似慣性なしGFLインバーターの負荷分担はないが、疑似慣性ありGFMインバーターが負荷分担して、ディーゼル同期発電機の負荷分担が減少する。

Load shared by three BESS using GFL inverters without virtual inertia, two BESS using GFM inverters with virtual inertia, and diesel SG

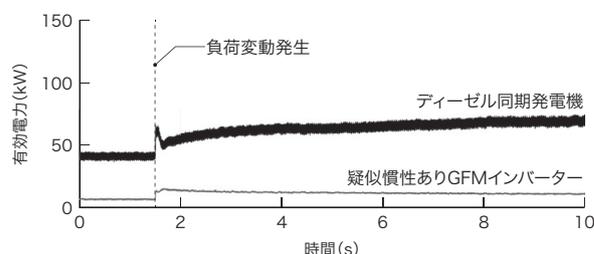


図7. 疑似慣性ありGFMインバーター制御のBESS 5台をディーゼル同期発電機と組み合わせた場合の負荷分担

負荷変動時に、疑似慣性ありGFMインバーターが負荷分担し、ディーゼル同期発電機の負荷分担が大幅に減少する。

Load shared by five BESS using GFM inverters with virtual inertia and diesel SG

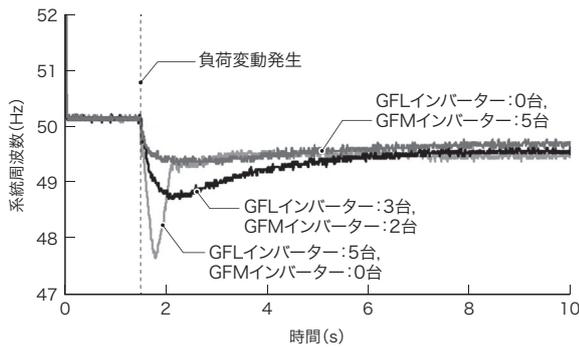


図8. 負荷変動時の系統周波数の過渡特性

負荷変動時に、疑似慣性なしGFLインバーターのBESS 5台の場合は、系統周波数が47.6 Hzまで低下するが、疑似慣性ありGFMインバーターのBESS 5台の場合は49.4 Hzまでしか低下しない。

Transient characteristics of frequency of each experimental microgrid at time of load fluctuation

疑似慣性ありGFMインバーター制御のBESSの割合を増やすことで、系統周波数の低下は49.4 Hzまで改善されている。

再エネ電源のPCSが、疑似慣性なしGFLインバーター制御をした場合、負荷分担が同期発電機に偏る。再エネ電源の割合が増えるに従って同期発電機の負担割合が増え、需要変動が大きくなると脱調し、停電が発生するおそれがある。疑似慣性ありGFMインバーター制御により、再エネ電源の割合が増えても、ディーゼル同期発電機の負担分担を増やすことなく、系統安定に貢献できることを確認した。

#### 4. あとがき

今回、疑似慣性ありGFMインバーター制御による系統安定化の効果を、評価用マイクログリッドを構築して実機検証した。再エネが主力電源のマイクログリッドで、グリッド内の同期発電機と、疑似慣性ありGFMインバーター制御による再エネ電源を並列運転させることで、再エネ電源の割合を増やしても、同期発電機の負担を抑えて、電力を安定供給できる。

この研究は、2019～2021年度の環境省によるCO<sub>2</sub>排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業の一環として「変動性再生可能エネルギーの活用に向けた仮想同期発電機概念に基づく連系用インバータ制御技術の開発」を受託し、パシフィックパワー（株）、環境エネルギー技術研究所（株）、及び国立研究開発法人 産業技術総合研究所と共同で、実施したものである。

#### 文献

- (1) Lin, Y. et al. Research Roadmap on Grid-Forming Inverters. NREL. 2020, NREL/TP-5D00-73476, 58p. <<https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/73476.pdf>>, (accessed 2022-04-25).
- (2) Beck, H.; Hesse, R. "Virtual Synchronous Machine". Proc. 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, Spain, 2007-10. IEEE, 2007, p.107-112.
- (3) 野呂康宏. エネルギー貯蔵で構成される電力システムを可能とするインバータ制御方法の提案. 電気学会論文誌B. 2018, **138**, 11, p.854-861.
- (4) Lin, Q. et al, Field Demonstration of Parallel Operation of Virtual Synchronous Controlled Grid-Forming Inverters and a Diesel Synchronous Generator in a Microgrid, IEEE Access. 2022, **10**, p.39095-39107.



司城 徹 SHIJO Tetsu, Ph.D.  
 研究開発センター 情報通信プラットフォーム研究所  
 ワイヤレスシステムラボラトリー  
 博士(工学) IEEE・電気学会・電子情報通信学会会員  
 Wireless System Lab.



林 強 LIN Qiang  
 研究開発センター 情報通信プラットフォーム研究所  
 ワイヤレスシステムラボラトリー  
 IEEE・電気学会会員  
 Wireless System Lab.