

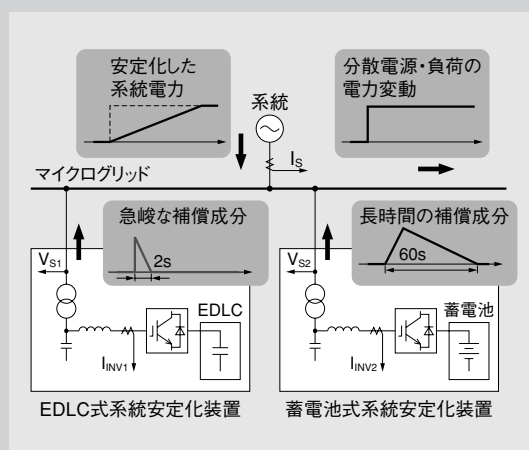
系統安定化装置の複数台協調制御

🔌 電気二重層キャパシタ，系統安定化装置，電力品質，協調制御，マイクログリッド

* 宗島正和 Masakazu Muneshima * 大井一伸 Kazunobu Oi

概要

太陽光や風力による発電などは発電電力が変動する。このような分散電源が接続された配電系統は電圧や周波数が不安定になりやすい。この対策として、蓄電池と電気二重層キャパシタ（EDLC）の2種類の蓄電デバイスに対応した系統安定化装置を開発した。EDLC式装置は高速な繰り返し充放電に適しているため、急峻な電力変動を補償する。蓄電池式装置は長時間の電力変動を補償する。このように蓄電デバイスの異なる系統安定化装置を協調制御させることで、高速かつ補償時間の長い電力補償が可能である。また、各系統安定化装置が独立に電流・電圧検出と電力補償を行い、装置間通信を不要としたので、中央監視の無いシステムに適用できる。



2種類の蓄電デバイスに対応した系統安定化装置の協調制御

1. ま え が き

エネルギー問題への関心に伴い、太陽光や風力などの自然エネルギーによる発電システム（以下、分散電源）が盛んに研究されている。これらの分散電源は日射量や風速により発電量が変動するため、分散電源を配電系統に連系した場合に電圧や周波数などの電力品質の管理が課題となる。

当社はこの課題に対する取り組みとして、独立して運転可能な小規模な系統に、複数の分散電源を接続するマイクログリッドの研究を行ってきた⁽¹⁾。マイクログリッドでは系統に接続する系統連系モードと、系統から切り離してグリッド内の分散電源だけで自立運転する発電機連系モードの2種類が存在する。系統安定化装置は、系統連系モードの場合には系統母線からマイクログリッドに流れ込む潮流を一定に保ち、自立運転する発電機連系

モードの場合には負荷変動によって生じる発電機の回転数変動を抑制するように負荷変動成分をアシストする。ここで負荷装置の補償能力として、負荷変動の急峻な変化を補償するための高速補償機能と、発電機制御が応答するまでの比較的長い時間の補償を行う機能の両方が必要になる。そこで、第1図のように高速な充放電が可能な電気二重層キャパシタ（EDLC：Electric Double Layer Capacitor）を用いた装置と、補償時間の長い蓄電池（BATT.：Battery）を用いた装置の2種類の系統安定化装置を組み合わせる方式を開発した。

本稿では、複数の連系モードや異なる蓄電デバイスに対応するために、制御を共通化して様々な条件に対応できる制御方式について紹介する。更に、複数台の系統安定化装置の制御を、各装置が独立に電流・電圧検出と電力補償を行うことで、

*基礎技術開発部

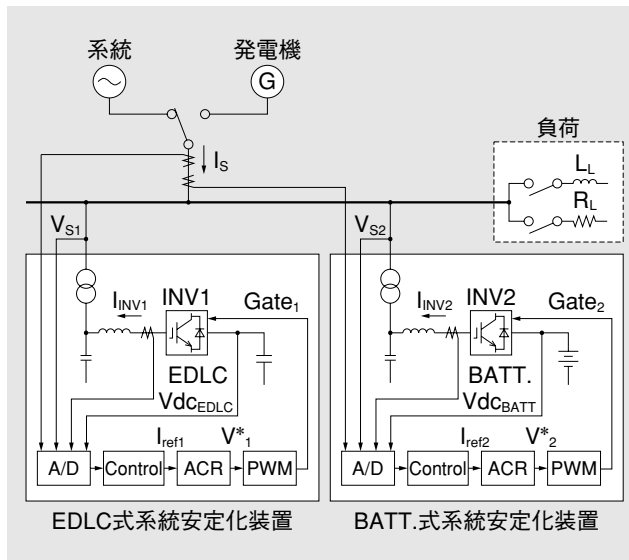
上位コントローラによる協調制御や装置間の通信無しに自動的に協調制御と等価な動作が可能な制御アルゴリズムを採用した。この分散独立制御による協調制御方式と、その機能を検証した社内試験結果について紹介する。

2. システム構成

第1図に今回検証したマイクログリッドを模擬した補償システム構成を示す。系統としては電力母線と分散電源の発電機を切り替えることを想定している。また、第1表の装置定格に示すEDLC式系統安定化装置とBATT.式系統安定化装置の2台を並列接続している。そして、系統連系モードにおいて、分散電源の電力変動が生じて系統母線への潮流変動を抑制させるために、個別の装置ごとに系統から流入する系統電流 I_s を検出している。自立制御を行う発電機連系モードにおいては、負荷変動により生じたグリッドの電圧・周波数の変動を抑制するために、各系統安定化装置とグリッドの接続点の電圧 V_{S1} と V_{S2} をそれぞれ検出している。

系統安定化装置内部では、上記の系統から流入する電流やグリッドの電圧・周波数を用いて各モードと各蓄電デバイスに対応した制御演算を行い、電流指令値 I_{ref1} と I_{ref2} を作成している。この電流指令値以降の電流制御及びPWM (Pulse Width Modulation) は共通であり、電流制御は系統の電圧検出からPLL (Phase-Locked Loop) により作成した同期位相を基準とする回転座標上で構成している。電圧と同期した位相をd軸とし、それより 90° 進んだ位相をq軸としている。今回は、インバータ出力電流のひずみを抑制するために、三相のインバータ電流検出値 I_{INV1} に帯域通過フィルタ (BPF: Band Pass Filter) を施してフィードフォワードする制御を追加している。

各装置の最大補償時間については、第1表及び第2図の補償電力の波形例のように、EDLC式系統安定化装置は2s間の充放電時間に、BATT.式系統安定化装置は60s間の充放電時間に設計している。



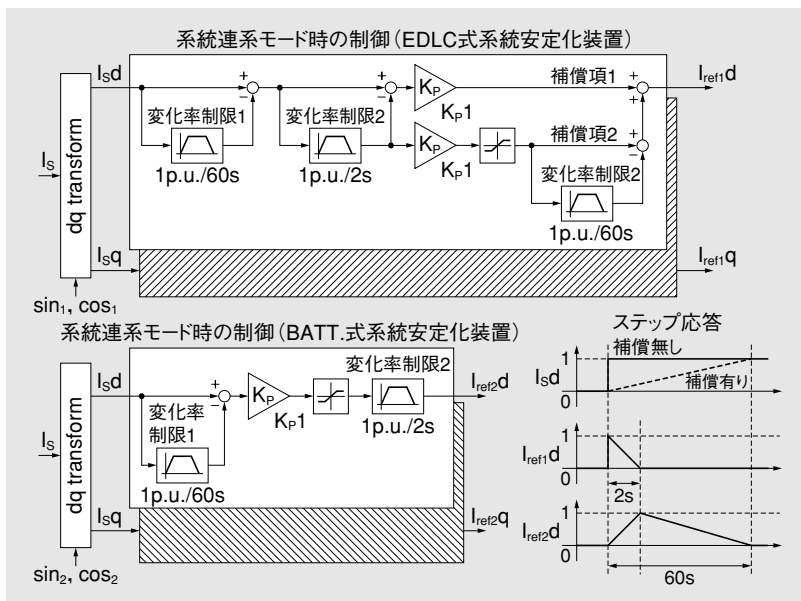
第1図 システム構成

系統と発電機を切り替え可能な試験システムを示す。負荷の入り切りにより電力変動を模擬する。

第1表 装置定格

試験システムの定格条件を示す。

系統		
系統 (グリッド) 電圧	$V_{S1} (V_{S2})$	380V
系統 (グリッド) 周波数	f	50Hz
負荷装置		
抵抗負荷	R_L	100kW 有効電力
リアクトル負荷	L_L	100kvar 無効電力
EDLC式系統安定化装置		
装置容量		100kVA
直流電圧	V_{dcEDLC}	415V
充放電時間		2s
BATT.式系統安定化装置		
装置容量		100kVA
直流電圧	V_{dcBATT}	390V
充放電時間		60s



第2図 系統連系モードの電流指令値演算ブロック

系統連系モードにおける電流指令値演算ブロックを示す。

3. 制御方式

3.1 制御方式の共通化

今回開発した制御方式は、第3図のように共通の制御方式を用いており、内部スイッチを切り替えることで2種類の蓄電デバイスに対応できるようにした。このため、蓄電デバイスにより充放電指令値の切り替えを行うが、電圧検出値 V_{S1} 及び V_{S2} をPLL検出した制御基準位相 θ を演算する部分と、電流検出及び電流制御以降は共通である。

制御モードにより異なるのは電流指令値 (I_{ref1d} , I_{ref1q} , I_{ref2d} , I_{ref2q}) の演算方法であり、系統連系モードでは系統の潮流電流の変化を抑制するために第2図で演算する電流指令を選択し、発電機連系モードでは電圧振幅と周波数を補償するため第4図で演算する電流指令値を選択している。また、蓄電デバイスによる制御の切り替えについては、第2図と第4図の内部で2種類の方式を切り替えている。

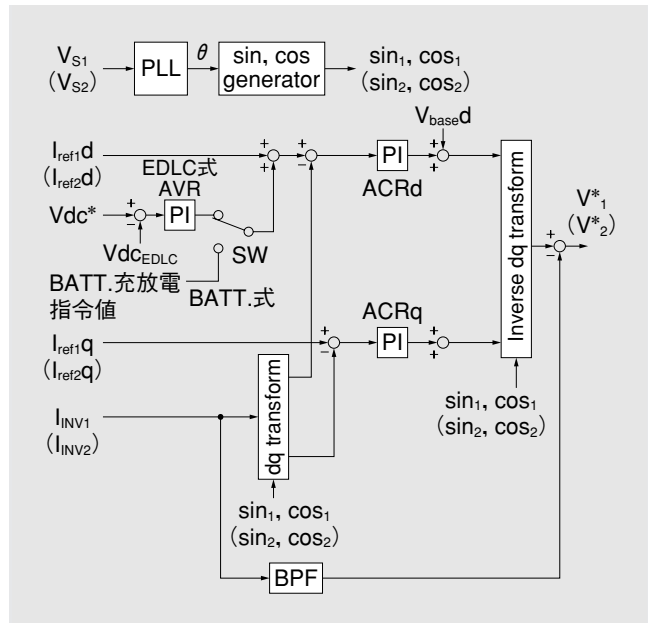
3.2 系統連系モードの電流指令値演算

第2図のステップ応答波形例に示すように、EDLC式系統安定化装置は I_{ref1d} のように負荷変動に急峻に応答するが、2sで補償を終了するよう補償量を減衰させている。一方、BATT.式系統安定化装置は逆にEDLCの補償量の減衰を補うように補償量を増加させて、その後、ゆっくりと補償量を減衰させている。このように2台が独立協調しているように動作させて、系統の潮流変化が緩やかになるように補償することができる。

このような2種類の電流指令値の波形を生成するために、BATT.側は第2図の下段のように、系統から流入する電流 I_s からこれを60sの変化率制限1を通したものを減算した値に補償ゲインを乗算して2台合計の補償電流指令を作成し、その後、2sの変化率制限2を利用してEDLC側の補償成分を削除している。

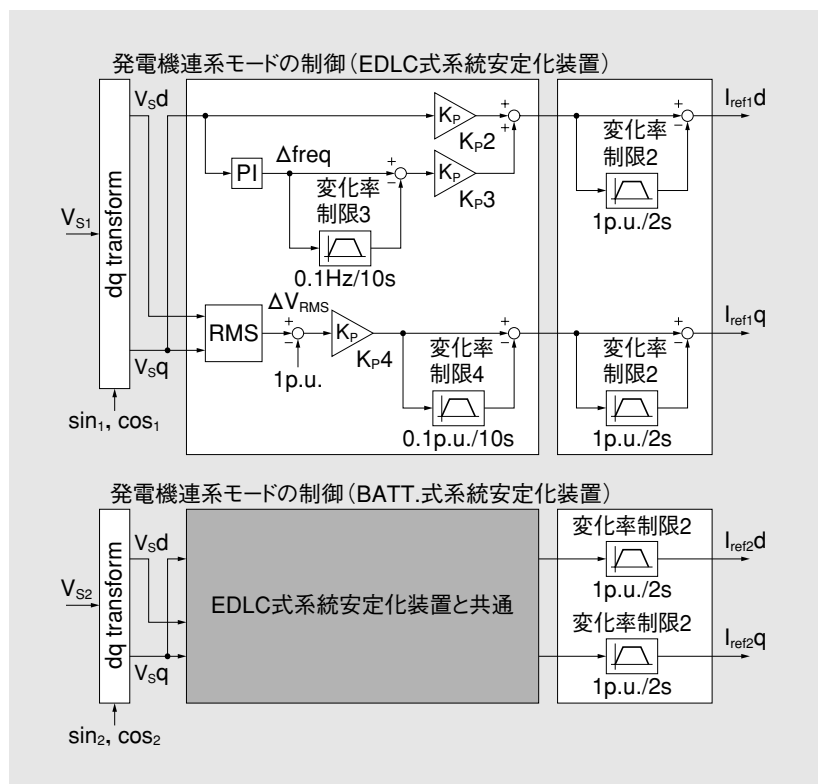
EDLC側では第2図の上段のように、いったんBATT.側と同じ変化率制限1を用いた合成補償波形を作成し、

その後、2sの変化率制限2を利用して補償波形を2sで減衰するように補正している。このように、装置ごとに独立な制御演算であるが、入力 of 系統電流が共通であることと各装置の補償時間を変化率制限として互いに共有することにより協調制御させている。



第3図 電流制御ブロック

EDLC式系統安定化装置とBATT.式系統安定化装置の共通の電流制御ブロックを示す。



第4図 発電機連系モードの電流指令値演算ブロック

発電機連系モードにおける電流指令値演算ブロックを示す。

3.3 発電機連系モードの電流指令演算

第4図に発電機連系モードの電流指令値演算ブロックを示す。このモードでは電圧検出の振幅成分からグリッドの電圧を補償するために必要なq軸電流指令を演算し、また検出電圧のq軸成分からグリッドの周波数を補償するために必要なd軸電流指令を作成している。

周波数補償演算は、電圧検出 V_{sq} を安定化するための比例ゲイン K_{P2} による補償項と、周波数を安定化するための V_{sq} を零にするようにPI演算して求めた周波数補償量 $\Delta freq$ を用いた補償項の2種類を実装している。

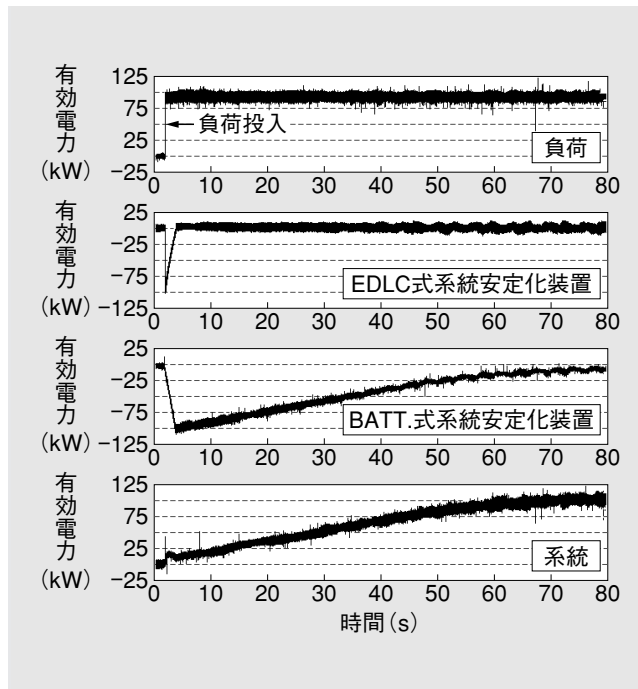
電圧振幅補償演算は、 V_{sd} と V_{sq} からRMSブロックで電圧振幅を合成した後、基準電圧指令との差分と比例ゲイン K_{P4} により I_{refq} を計算している。ここで、時定数が10sの変化率制限3及び変化率制限4を用いて、それぞれの補償波形を一定時間で減衰するように補正を加えている。EDLC式系統安定化装置とBATT.式系統安定化装置ともこの電圧と周波数補正演算までは共通であり、この補償量に2sの変化率制限2を用いて、短時間補償成分と長時間補償成分に波形を制限したのち各装置の電流指令値として出力している。

4. 試験結果

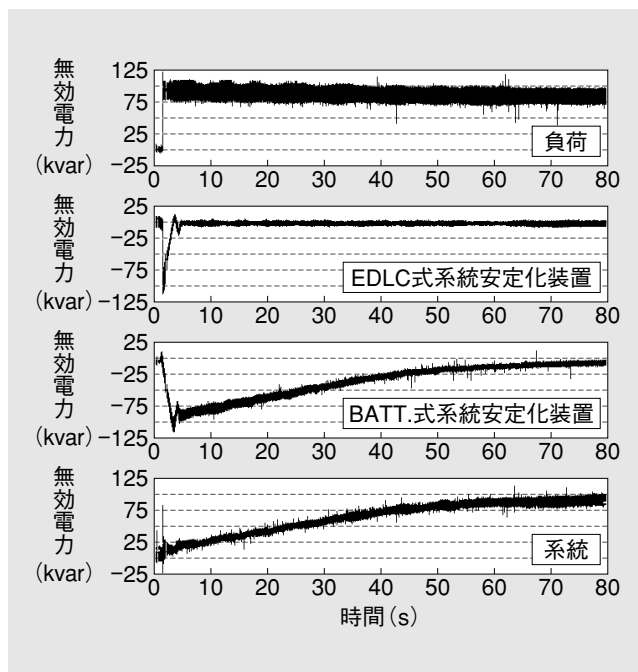
4.1 系統連系モードの試験結果

第5図に系統連系モード時に抵抗負荷を投入した時の有効電力変動の試験結果を示す。また、第6図にリアクトル負荷投入時の無効電力変動の試験結果を示す。負荷が投入されると、負荷に入力される電力が急峻に増加し、通常であれば系統にも電力変動が生じる。第5図の波形では、EDLC式系統安定化装置の有効電力が瞬時に立ち上がり約2s間かけて出力を減少させており、この2s間にBATT.式系統安定化装置の出力する有効電力が立ち上がり、約60s間かけて出力を絞っている。

その結果、系統の有効電力波形は抵抗負荷が投入されて約60sかけて緩やかに増加しており、急峻な電力変動が抑制されている。また、EDLC式系統安定化装置とBATT.式系統安定化装置の出力に干渉がないことが分かる。第6図の無効電力変動の試験結果も同様であり、いずれも良好な試験結果が得られた。



第5図 系統連系モード時の抵抗負荷投入試験結果
系統連系モード時に抵抗負荷を投入し、有効電力を変動させた時の試験波形を示す。EDLC式系統安定化装置は約2s、BATT.式系統安定化装置は約60sの電力を出力して、系統の急峻な電力変動を抑制している。

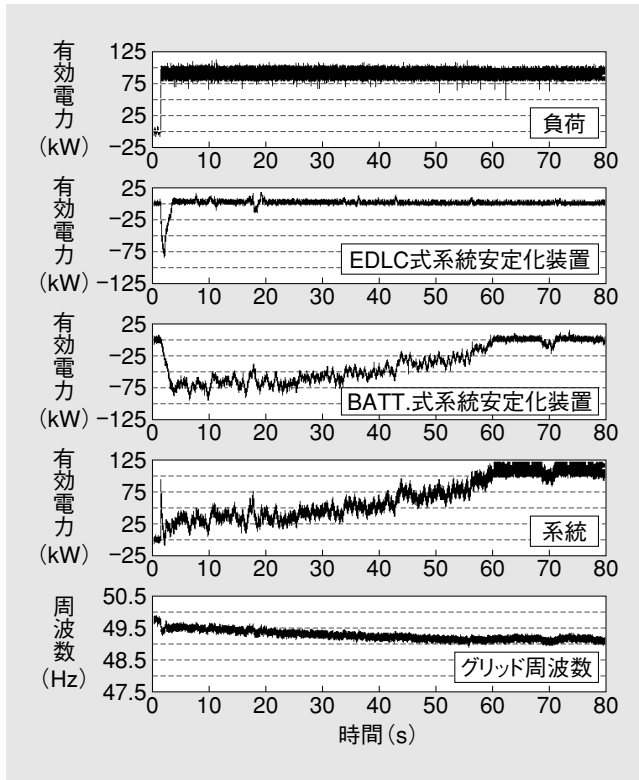


第6図 系統連系モード時のリアクトル負荷投入試験結果

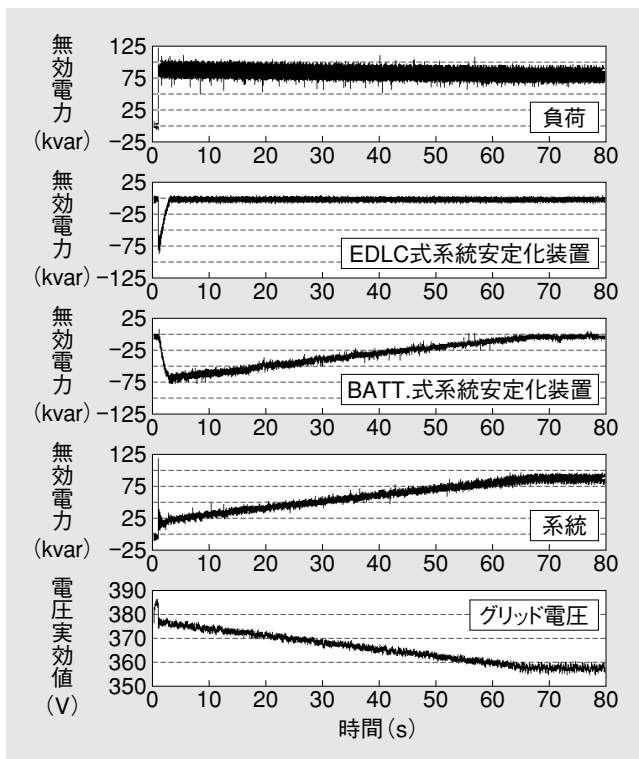
系統連系モード時にリアクトル負荷を投入し、無効電力を変動させた時の試験波形を示す。EDLC式系統安定化装置は約2s、BATT.式系統安定化装置は約60sの電力を出力して、系統の急峻な電力変動を抑制している。

4.2 発電機連系モードの試験結果

第7図に発電機連系モード時に抵抗負荷を投入した時の周波数変動の試験結果を示す。また、



第7図 発電機連系モード時の抵抗負荷投入試験結果
 発電機連系モード時に抵抗負荷を投入し、グリッドの周波数を変動させた時の試験波形を示す。EDLC式系統安定化装置は約2s、BATT.式系統安定化装置は約60s間の電力を出力し、周波数変動を抑制している。



第8図 発電機連系モード時のリアクトル負荷投入試験結果

発電機連系モード時にリアクトル負荷を投入し、グリッドの電圧を変動させた時の試験波形を示す。EDLC式系統安定化装置は約2s、BATT.式系統安定化装置は約60s間の電力を出力し、電圧変動を抑制している。

第8図にリアクトル負荷投入時の電圧変動の試験結果を示す。第7図では抵抗負荷の投入直後から約2s間かけてEDLC式系統安定化装置による電力補償が行われ、その後はBATT.式系統安定化装置により約60s間の有効電力の補償が行われる。抵抗負荷の投入直後においても、周波数の急峻な変動が抑制できている。また、BATT.式系統安定化装置が出力する有効電力波形に脈動が見られるが、補償対象である周波数には脈動がなく緩やかに減少している。

第8図においても、リアクトル負荷の投入直後から系統安定化装置により無効電力補償が行われる。これにより、グリッドの電圧に急峻な変動はなく緩やかな減少に抑制されている。

5. む す び

本稿では、蓄電デバイスとして電気二重層キャパシタ及び蓄電池を用いた系統安定化装置の評価試験の結果を報告した。今回は、複数台の系統安定化装置を協調制御し、特に各装置が独立に電流・電圧検出と電力補償を行う新制御方式について検討した。本制御を適用して社内試験を行った結果、EDLC式系統安定化装置とBATT.式系統安定化装置を装置間の通信無しで協調制御できることを確認した。また、系統連系時の系統の電力変動及び発電機連系時のグリッド電圧・周波数変動といった補償特性も良好であることが確認できた。

今回の試験においては、EDLCに2s間の充放電を、蓄電池には60s間の充放電を分担させたが、より長時間にするなど任意の分担に設計することも可能である。従って、高速且つ補償時間の長い電力補償システムを実現でき、お客様の多様な仕様に応えることができる。

今後は、フィールド試験や発電機との協調運転などを行い、本装置の有効性を確認したい。

《参考文献》

- (1) 鈴木, 植田, 沼田, 森野, 傳田: 「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～電気二重層キャパシタを適用した系統安定化装置の開発～」, 平成18年電気学会エネルギー部門大会, 2006, pp.8-19-8-20

(2) 宗島, 大井, 鈴木: 「複数台の系統安定化装置における出力電力監視を用いないローカル制御と協調制御の提案」, 平成20年電気学会産業応用部門大会, No.1~68, 2008, pp.321~323

《執筆者紹介》



宗島正和 Masakazu Muneshima
電力変換装置の開発に従事



大井一伸 Kazunobu Oi
電力変換装置の開発に従事

