

一般論文

関連するSDGs



地域マイクログリッドにおけるパワーコンディショナ自立運転時の課題とその対策についての取組み

Consideration of Possible Problems and Measure to Them in Case of Independent Operation of Power Conditioner in Regional Microgrids

柏原 弘典 Kashihara Hironori	雨森 一洋 Amemori Kazuhiro
宇田 怜史 Uda Satoshi	坪田 慎二 Tsubota Shinji
黒田 和宏 Kuroda Kazuhiro	河崎 吉則 Kawasaki Yoshinori

概要

当社では、再生可能エネルギー（以下、再エネ）の主力電源化および災害対策における電力レジリエンス向上のために、地域マイクログリッドにおける蓄電池用パワーコンディショナ（PCS）を電源に利用したときの運転継続能力および、電力品質の向上を目指した制御技術の開発に取り組んでいる。本稿ではその成果を紹介する。

Synopsis

In order to improve the resilience of electric power in the context of disaster countermeasures and the shift to renewable energy as the main power source, we are developing a control system to improve the operation continuity capability and power quality when Power Conditioner (PCS) is used as the power source in a regional microgrid. This paper presents an overview of our work.

1. はじめに

近年、再エネの大量導入に代表される電力供給構造の変化や、頻発する自然災害の激甚化に伴い、系統混雑の回避や電力の安定供給を実現するために、電力レジリエンスの強化が求められている。その対策の一つとして、地域マイクログリッドによる自立・分散型エネルギーシステムの構築が推進されている⁽¹⁾。こうした背景のもと、当社は、これまで太陽光発電用・蓄電池用PCSや、自家消費型太陽光発電ソリューションの提供等によって、地域マイクログリッドの構築に貢献してきた。最近では、離島の地域マイクログリッド構築にも参画している⁽²⁾。

加えて、当社では、地域マイクログリッドにおける電力安定供給を実現するため、主として、非常時のマイクログリッドの運転継続能力および電力品質の向上

に向けて、蓄電池用PCSの制御技術開発に取り組んでいる。本稿では、その開発成果を紹介する。

2. 開発コンセプト

2.1 地域マイクログリッドの課題

地域マイクログリッドとは、図1のイメージのように、平時に地域の再エネを地産地消しつつ、系統から電力供給を受ける需要家系統である。一方、停電などの非常時は、系統から地域の送配電網を切り離し、マイクログリッド内の再エネや蓄電池を主体とした分散型エネルギーリソースを用いて自立運転することで、マイクログリッド内の各負荷に、地域の配電網（一般送配電事業者から借用）を介して、電力を供給する。

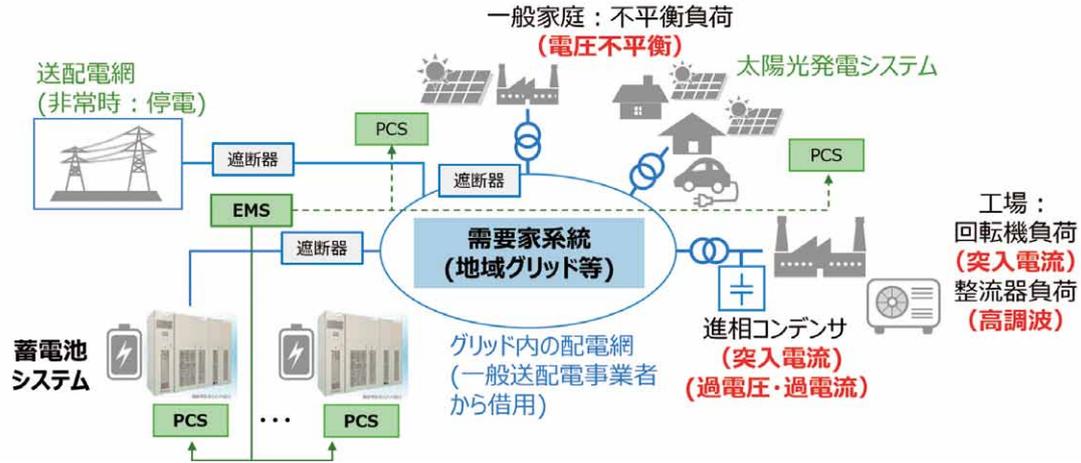


図1 地域マイクログリッドのイメージと非常時電力供給における課題

地域マイクログリッドの非常時自立運転における問題と課題を図1、表1に示す。このうち、系統電源にインバータ電源のみを用いた場合の課題は、主として電力品質の向上、継続運転能力、保護・保安のしやすさ、ブラックスタート^(注)への対応に大別される⁽³⁾。これらの課題に対して、当社は、蓄電池用PCSの運転制御技術の影響が大きいものとして、電力品質と運転継続能力に着目した。

品質と運転継続能力への影響が懸念される。地域マイクログリッド内の需要家負荷ごとに懸念される課題を表2に示す。

平時の外部電源による電源供給と比較して負荷比率が高く、PCSの機器耐量が少ない条件下で、これらの課題への対策を実現するには、これまでよりも高度なPCSの運転制御技術が要求される。

表1 地域マイクログリッド自立運転時の問題と課題

関係する機器	自立運転時の問題	課題
PCS 整流器負荷 不平衡負荷 進相負荷	電圧・周波数変動・高調波・フリッカ等でグリッド内の配電網・電力機器や需要家負荷設備に脱落・損傷が発生する。	電力品質
PCS 整流器負荷 回転機負荷 進相負荷	負荷投入時の突入電流により、インバータ電源が停止してマイクログリッド内が停電する。	運転継続
PCS	インバータ電源によってグリッド内事故時に短絡電流が減少し、事故点の除去が遅れ、機器損傷の拡大や火災を招く。	保護保安
PCS 変圧器 回転機負荷	ブラックスタート時の突入電流により、インバータ電源が停止してマイクログリッド内が停電する。突入電流に伴う電圧低下によって負荷等の脱落や機器の損傷が発生する。	ブラックスタート機能

※文献(3)を元に当社で作成

着目した課題

2.2 技術課題と開発目標

地域マイクログリッドの自立運転時にグリッド内で供給対象とする負荷は、配電設備や工場内の管理された機器だけではなく、一般需要家の機器も対象となる。これらの負荷によって、自立運転時の電力

表2 PCS制御の技術課題と対策

課題	負荷	技術課題	対策案
電力品質	不平衡負荷	供給力に対する負荷比率が高い状態で、電圧不平衡を抑制する制御技術が必要	不平衡電圧抑制制御
電力品質 運転継続	整流器負荷	・同条件で、高調波を抑制する制御技術が必要 ・負荷投入時の突入電流を抑制し、電圧変動を緩和する制御技術が必要	高調波電圧抑制制御
電力品質 運転継続	進相負荷	・同条件で共振現象が発生しても、過電圧・過電流を抑制する制御技術が必要。 ・負荷投入時の突入電流を抑制し、電圧変動を緩和する制御技術が必要	過電流抑制制御

当社では、地域マイクログリッドに使用できる蓄電池システム向けPCSとして、運転制御技術のうち不平衡補償、高調波補償、過電流抑制制御の開発に取り組んだ。開発における具体的な蓄電池用PCS制御の目標値を表3に示す。目標値設定にあつては、前述の供給対象である多様な負荷を想定して、負荷力率変動範囲に進み力率も加え、考慮することとした。

(注) 停電の状態から、外部電源より発電された電気を受電することなく、停電解消のための発電を行うこと

表3 蓄電池用PCSの開発目標値（制御）

項目		開発目標値(制御)		運用ケース (PCS)
定常	電圧精度	±2%以内	負荷力率変動 範囲 0.7 (遅れ) ~10~ 0.7 (進み)	単機 自立運転 複数台 並列運転
	周波数精度	±0.1Hz以内		
	電圧波形 歪率	3%以下 (THD) 5%以下 (50%非線形負荷)		
	電圧不平衡比	3%以下 (負荷不平衡50%)		
過渡	過渡電圧変動	定常±10%以内かつ カーブ2※以内 (0⇔50%)		単機 自立運転 複数台 並列運転
	PQ出力分担	定格容量の±5%以内 (負荷投入/並列運転から1秒以内)		

※JIS C 4411-3の過渡変動特性

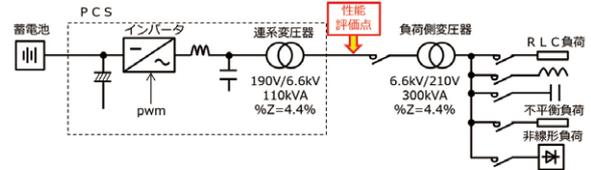


図2 シミュレーション回路モデル

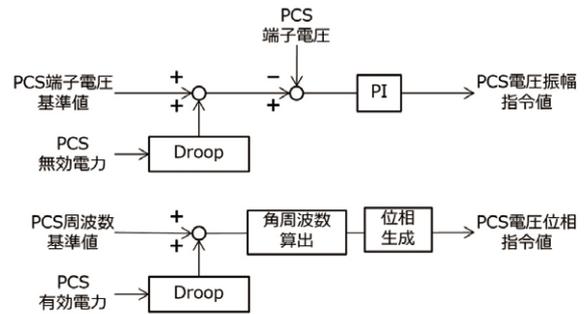


図3 PCS電圧制御ブロック

3. 蓄電池用PCS制御技術の理論検討

3.1 シミュレーションモデル

表2に挙げた技術課題の対策として、検討した対策案の効果について、実機試験を想定したシミュレーションモデルにて確認した。PCS自立運転のシミュレーションモデルを図2に示す。地域マイクログリッドへの電力供給を想定して、メガワットクラスのシステムへの適用を目標としているが、まずは100kWミニモデルでの動作試験を実施するため、シミュレーションモデルも同等の容量とした。評価対象とする蓄電池用PCSは、定格容量100kW、60Hz、連系変圧器を介して高压連系する構成で、負荷は、負荷側変圧器を介して低压側で接続している。また、負荷は、RLC並列負荷・不平衡負荷・整流器負荷を並列接続し、性能評価項目に応じて切り替えられるように設定した。蓄電池用PCS並列運転のシミュレーションでは、性能評価点にもう1台PCSが接続される構成でモデルを構築した。

蓄電池用PCSの制御ブロックを図3に示す。本制御では、自立運転が可能な制御とするため、電圧振幅及び位相を自己生成する電圧制御としている。また、蓄電池用PCS並列運転のためにドロップ制御を採用し、本PCS自身の有効電力出力に応じて周波数を、無効電力に応じて電圧振幅を変動させることで、均等な負荷分担ができるように制御している。

さらに、表3の開発目標を達成するための対策案と制御機能の改良内容を表4に示す。次節以降で、各制御の機能モデルの詳細について述べる。

表4 負荷に応じたPCSの対策案と改良内容

負荷	対策案	改良内容	詳細
不平衡負荷	不平衡電圧抑制制御	他対策案と制御が干渉しないようにパラメータを調整	図5
整流器負荷	高調波電圧抑制制御	進相負荷の改良と両立させる形で、高調波電圧を抑制するようパラメータを調整	図4 図5
	過電流抑制制御	負荷投入・開放時にインバータ過電流を抑制しつつ、電圧変動が発生しないような電流制限手段を構築	図7
進相負荷	高調波電圧抑制制御	共振条件でも過電圧・過電流が発生しないよう仮想抵抗を構築	図4 図5
	過電流抑制制御	整流器負荷と同様	図7

3.2 高調波・不平衡電圧抑制制御モデル

一般的にPCSの制御には、高調波電圧歪みや不平衡電圧を抑制するための機能がある。本制御では、電圧フィードバック制御を用いた高調波電圧・不平衡電圧抑制制御を用いている。ただし、電圧制御系は電流制御系と違い、負荷特性によって出力特性が変わるため、さまざまな負荷特性で安定して、動作させることが難しい。

特に、蓄電池用PCSにおいては、負荷が高調波補償の補償対象次数に共振点を持った場合、電圧制御だけでは不安定となり、電圧波形が発散する可能性が高くなる。この対策として、図4に示すように、特定の周波数帯において、蓄電池用PCSのインバータは負荷との間に仮想抵抗R'が挿入されている状態となるようにインバータ制御をおこなっている。制御ブロックを図5に示す。

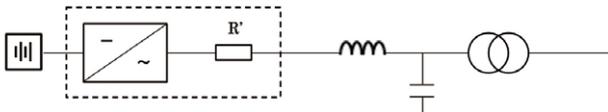


図4 仮想抵抗の挿入イメージ

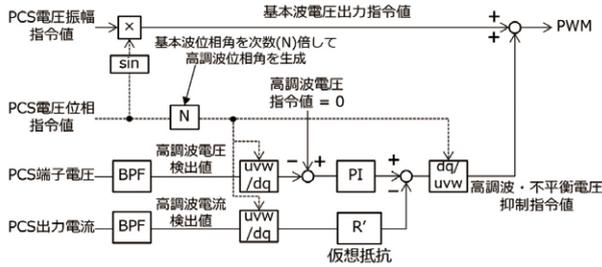


図5 高調波・不平衡電圧制御モデルブロック図

具体的な動作としては、蓄電池用PCS出力に含まれる補償対象の高調波電流と仮想の抵抗値から仮想の電圧降下を算出して、これを高調波抑制電圧指令値から差し引くことで、高調波電圧制御出力を、ダンピングさせ、高調波電圧制御の安定化を図っている。また、特定の周波数帯にのみ、仮想抵抗を模擬しているため、基本波制御には、影響を与えないような構成としている。このような構成にすることで、さまざまな負荷条件でも安定して動作可能な高調波・不平衡負荷補償を実現できる見込みを得た。

また、仮想抵抗によるダンピング効果のシミュレーション結果を図6に示す。

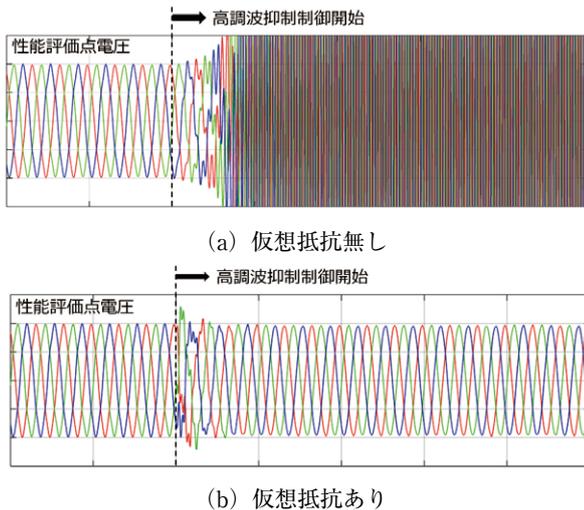


図6 (シミュレーション) 5次共振回路での高調波補償

第5次高調波で、蓄電池用PCS連系リアクトルおよび変圧器の誘導性リアクタンスと直列共振するように、進相負荷容量を選定した。図6 (a)は仮想抵抗がない状態 ($R'=0\Omega$) で第5次高調波を抑制す

る高調波補償を動作させたシミュレーションの結果である。第5次高調波においては、蓄電池用PCSから見たインピーダンスがほぼ短絡状態に見えるため、高調波電圧制御出力をわずかに変動させることで、第5次高調波電流が拡大し、電圧制御が不安定となることがわかる。図6 (b)は、第5次高調波において、仮想抵抗 ($=10\Omega$) を模擬したインバータ制御で、第5次高調波抑制制御を動作させたシミュレーション結果である。共振回路において、仮想抵抗から算出した電圧降下による高調波電圧制御出力のダンピングにより、電圧波形の急変を抑制しており、安定して動作できる見込みを得た。

また、不平衡電圧抑制制御は、高調波電圧抑制制御と同じ制御モデルで、逆相電圧を検出して制御している。ただし、仮想抵抗は $R'=0\Omega$ としている。

3. 3 過電流抑制制御モデル

一般的なPCSは、過電流耐量が小さい。本開発では変動によるインラッシュ (励磁突入) 等により、PCSが過電流で停止しないように、図7に示すような過電流抑制制御機能を搭載している。

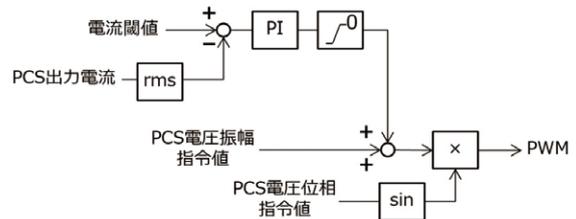


図7 過電流抑制制御ブロック図

動作原理は、各相のPCS出力電流実効値を常時フィードバック制御しており、PCS出力電流がしきい値を超えた場合に、電圧指令値を抑制して過電流を防止するというものである。定常時は計測値<閾値となり、フィードバック制御出力が正の値となるため、正の値はリミッタで通過させないようにすることで、基本波制御に影響を与えないようにしている。本制御機能は、電流実効値で制御することで、電流抑制時も電圧歪みが生じにくいことを特徴としている。

蓄電池用PCSにも同様の機能を実装することで対応可能である。

4. 実機試験

蓄電池用PCSに高調波・不平衡電圧抑制制御と過電流抑制制御を適用し、表3で示した負荷条件にて、シミュレーションを実施した結果、自立運転および自立

並列運転の定常、過渡のすべての条件において、表3の目標性能を満足する見込みを得た。よって、これらの結果を踏まえて実機検証を行った。本章では、シミュレーション結果と合わせ、実機による試験結果を記載する。

4.1 自立運転試験

実機試験回路を図8に示す。

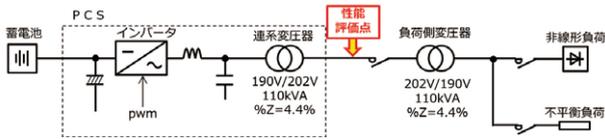
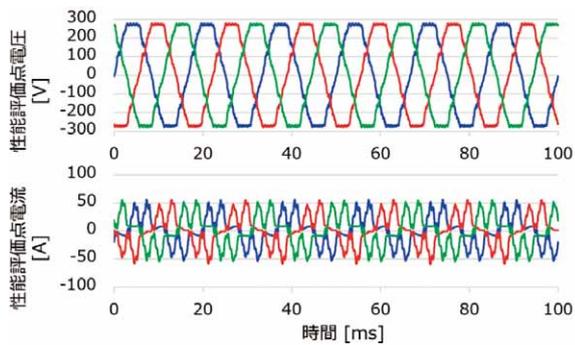


図8 自立運転試験回路

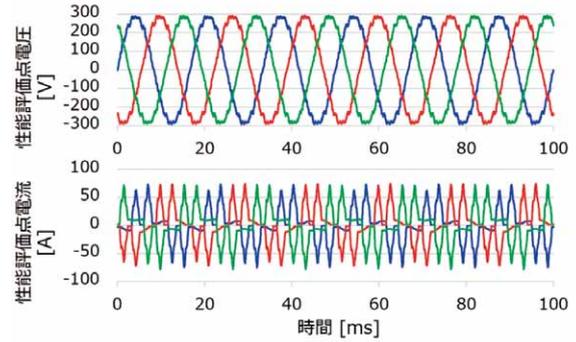
本回路では、蓄電池用PCSと負荷変圧器を介して、負荷と接続する構成とした。また、性能評価点の電圧が低圧である点を除き、図2のシミュレーション回路と同等の回路構成としている。蓄電池用PCSは、系統停電を模擬した状態から、起動させた。

実機試験では、RLC負荷、不平衡負荷、整流器負荷の試験をそれぞれ実施しており、本稿では、負荷として整流器負荷、不平衡負荷（抵抗負荷、U相欠相）において、負荷率はそれぞれ10%、高調波抑制制御は第5次、7次、11次を対象とした試験結果について、報告する。

図9に、整流器負荷での動作試験の試験結果について示す。図9(a)に、高調波補償前の試験結果を、図9(b)に高調波補償後の試験結果をそれぞれ示す。また、表5に高調波補償前後の各次高調波含有率を示す。



(a) 性能評価点における補償前の電圧と電流



(b) 性能評価点における補償後の電圧と電流

図9 整流器負荷動作結果

表5 高調波含有率の改善結果

補償動作 次数	電圧高調波次数成分 (%)			
	5次	7次	11次	総合
補償前	3.41	2.38	2.22	5.98
補償後	0.23	0.06	0.17	3.79

試験結果から、高調波補償によって、各次の高調波含有率が1%未満まで抑制されていることを確認した。総合含有率は、5.98%から3.79%に改善し、目標性能（総合含有率5%以下）を達成している。また、補償後の総合含有率に関しては、13次高調波による影響が最も大きいことが分かった。これは、整流器負荷は交流リアクトルがないダイオード+コンデンサの組み合わせで構成しており、JIS規格で規定されている条件よりも、高調波が発生しやすい負荷条件としていること、計測器の制約で本来は対象とならない次数まで含んだ算出方法となっていることが、主な要因と考えている。

今後、共振点負荷での確認試験が必要であるが、本試験により、仮想抵抗制御が高調波抑制に有効であることを確認した。

次に、不平衡負荷での動作結果を図10に示す。

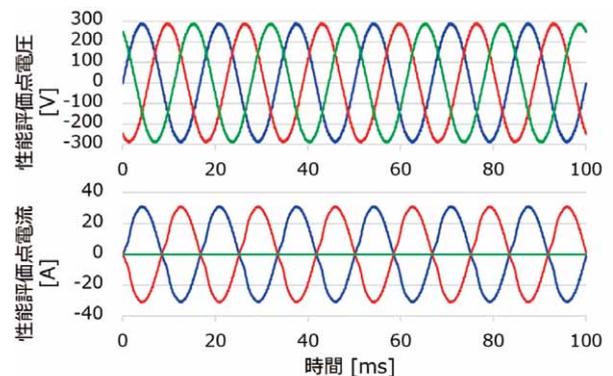


図10 不平衡負荷動作結果（補償後）

実機試験では、三相10kWの抵抗負荷から一相の負荷を開放して、不平衡負荷を模擬している。電圧不平衡補償前後の各線間電圧実効値は、表6に示すとおりで、不平衡補償前の電圧不平衡比は0.99%であったが、不平衡補償後には0.05%に改善していることを確認した。

表6 電圧不平衡の改善効果

	Vuv [V]	Vvw [V]	Vwu [V]	電圧不平衡比 [%]
補償前	204.5	201.0	202.5	0.99
補償後	202.8	202.6	202.7	0.05

最後に、実機試験結果一覧を表7に示す。

表7 PCS自立運転試験結果まとめ

項目	条件	整流器負荷	不平衡負荷
		10kVA	R=10kW 一相欠相
定常	電圧精度 ±2%以内	+0.34% (+0.31%)	+0.39% (+1.05%)
	周波数精度 ±0.1Hz以内	0.00Hz (0.00Hz)	0.00Hz (0.00Hz)
	電圧波形歪率 THD3%以下(線形負荷) THD5%以下(非線形負荷)	3.79% (5.98%)	1.82% (1.51%)
	電圧不平衡比 3%以下	0.17% (0.14%)	0.05% (0.99%)

※表中()は対策前

定常特性における高調波補償・不平衡補償の動作試験を優先した結果であるが、目標性能を達成できる結果になった。

そのほかの項目においても、試験を実施予定である。

4. 2 蓄電池用PCS自立運転 (2台並列) 試験

蓄電池用PCS2台並列での自立並列運転の試験回路を、図11に示す。

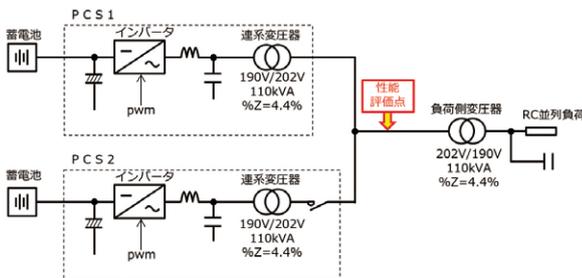
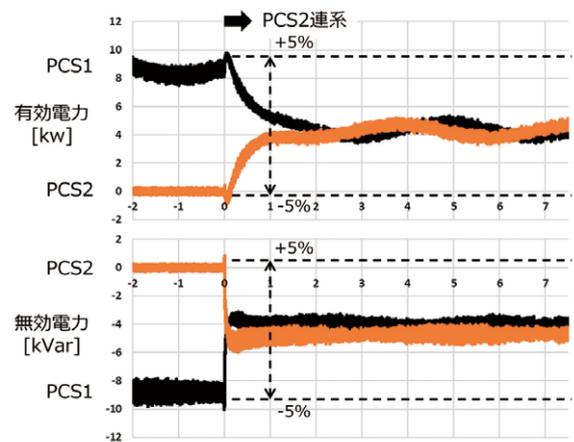


図11 自立並列運転試験回路

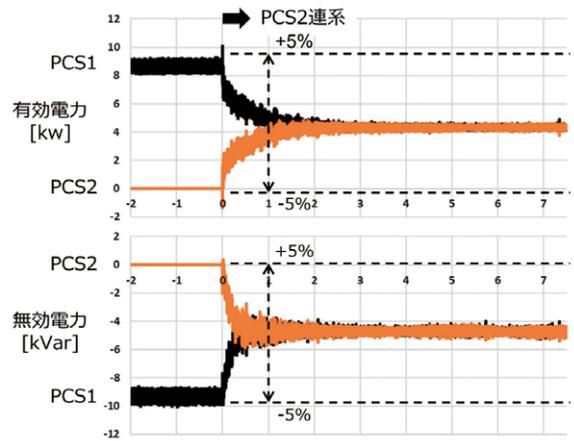
自立運転試験で用いた蓄電池用PCSを性能評価点で2台並列に接続している。試験の概要は次の通りである。

はじめに、自立運転試験と同じく系統停電を模擬した状態で、1台を起動させ、負荷に電力を供給する。その後、2台目を起動させ、同期制御でPCS1の電圧振幅・位相・周波数に合わせて同期投入する。この時に、ドループ制御で2台均等に負荷分担ができるかどうかを確認する。負荷条件はRC負荷(8kW,10kVar)とし、まずは、高調波・不平衡補償は動作させず、ドループ制御のみで試験を実施した。

実機試験結果を図12(a)に示す。



(a) 実機



(b) シミュレーション

図12 自立並列運転試験結果 (RC並列負荷)

2台目の蓄電池用PCSが同期連系後、2台の蓄電池用PCSが、ドループ制御で均等に出力分担できており、目標性能である1秒以内に出力誤差5%以内を満足できていることを確認した。これは、図12 (b) に示す同条件でのシミュレーション結果とおおよそ同じ傾向での動作であると評価できる。これらの結果を表8に示す。今後、高調波補償・不平衡補償を適用した状態で並列運転の評価を実施する予定である。

表8 自立並列運転試験結果まとめ

項目		条件	RC並列負荷
			R=8kW C=10kVar
過渡	有効電力P出力分担 同期投入から1秒以内に定格容量の±5%以内	実機	0.9%
		シミュレーション	0.6%
	無効電力Q出力分担 同期投入から1秒以内に定格容量の±5%以内	実機	0.6%
		シミュレーション	0.2%

5. まとめ

当社では、災害対策・再エネ主力電源化における電力レジリエンス向上に寄与する製品開発に取り組んでいる。本論文では、地域マイクログリッドの災害時の電力品質向上を目的とした蓄電池用PCSの制御技術開発において、シミュレーション技術を活用して進めている内容を紹介した。今回報告した地域マイクログリッドにおける災害時の電力安定供給確保などの新しい取組みに対応した技術開発を続け、再エネ普及に貢献する所存である。

参考文献

- (1) 経済産業省：「第6次エネルギー基本計画(2021)」
<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html> (参照：2021/12/10)
- (2) 日新電機HP「地域マイクログリッド」：
<https://nissin.jp/spss/island/microgrid2.html>
- (3) 経済産業省：「マイクログリッド構築のてびき」(2021)
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/energy_resource/015.html (参照：2021/11/30)

執筆者紹介



柏原 弘典 Kashihara Hironori
研究開発本部
電力技術開発研究所



雨森 一洋 Amemori Kazuhiro
電力・環境システム事業本部
システム装置事業部



宇田 怜史 Uda Satoshi
研究開発本部
電力技術開発研究所
主査



坪田 慎二 Tsubota Shinji
電力・環境システム事業本部
システム装置事業部
グループ長



黒田 和宏 Kuroda Kazuhiro
研究開発本部
電力技術開発研究所
主幹



河崎 吉則 Kawasaki Yoshinori
研究開発本部
電力技術開発研究所
参与