

仮想同期発電機機能付き蓄電池用インバータ（VSG-PCS）の開発

大原 尚 Takashi Ohara
 栗原重雄 Shigeo Kurihara
 野田秀樹 Hideki Noda
 鈴木茂之 Shigeyuki Suzuki
 井上稔也 Toshiya Inoue

キーワード 仮想同期発電機制御, 慣性力, 電圧制御, 自立運転

概要



製品評価モデル

我が国ではカーボンニュートラルに向けて、エネルギーミックスのとおり、再生可能エネルギーの導入拡大と同期発電機（SG）である火力発電の削減によって、電力系統の慣性が著しく減少し、再生可能エネルギーの発電電力や需要負荷電力の急峻な変化による擾乱発生時に系統の安定度が低下するなどの課題がある。

そこで、蓄電池用のインバータに慣性力機能を持たせた仮想同期発電機機能付き蓄電池用インバータ（VSG-PCS）の実現に向け、製品評価モデルを製作し、動作検証を実施した。

製品評価モデルは、製品機の電流定格を1/100スケールダウンした定格出力6kVAのVSG-PCS 2台並列システムである。本モデルでは、VSG-PCSとSG及び太陽光PCS（PV-PCS）を組み合わせた回路構成で性能評価を実施し、良好な結果が得られた。

1 まえがき

近年、地球環境問題への対応などから、太陽光発電・風力発電などの再生可能エネルギーの導入拡大が急速に進んでいる。今後、インバータを用いた分散型電源が配電系統に大量に導入されるようになると、電力系統内の同期発電機（SG）の稼働台数が減少する。SG減少によって電力系統全体の慣性が減少し、擾乱発生時に系統の安定度が低下するなどが懸念されており、その対策が新たな課題となっている。

これらの対策として、系統連系インバータに疑似慣性を持たせる仮想同期発電機（VSG）制御が提案されているが、実用化には至っていない。

そこで、東京電力パワーグリッド(株)と(株)明電舎は共同でVSG機能を持たせた蓄電池用インバータの実現に向け、仮想同期発電機機能付き蓄電池用イ

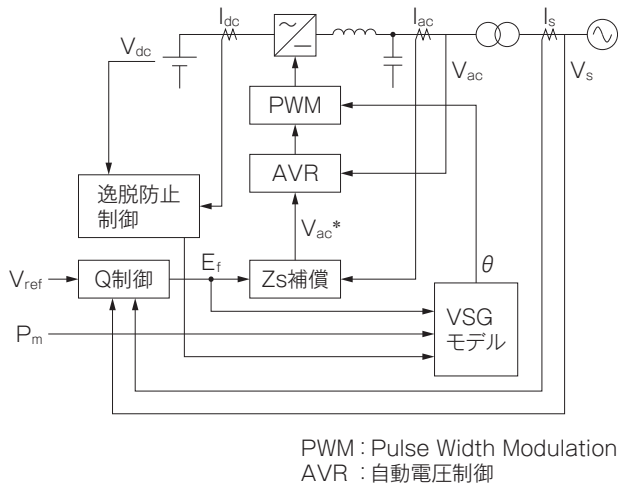
ンバータ（VSG-PCS）を開発し、製品評価モデルによる評価を実施した。本稿では、VSG制御、製品機の仕様・機能、製品評価モデルの構成、評価結果を紹介する。

2 VSG 制御

第1図にVSG制御のブロック図を示す。SGを内部誘起電圧 E_f 、同期インピーダンス $Z_s = r + jx$ として簡易的にモデル化し、この簡易モデルの出力端子電圧 V_{ac} は式(1)で表される。

$$\dot{V}_{ac} = \dot{E}_f - \dot{Z}_s \dot{I}_{ac} \dots\dots\dots(1)$$

この出力端子電圧を出力電圧指令値 V_{ac}^* として電圧制御を行うことで、SGの同期インピーダンスを模擬した出力を行う。



第 1 図 VSG制御ブロック図

VSG制御の概略制御ブロック図を示す。

第 1 表 製品機仕様

開発する製品機は、定格電圧6600V・定格容量600kVAのVSG-PCSとなる。

項目	仕様
装置容量	600kVA
定格交流出力	600kW
商用周波絶縁連系変圧器	あり
直流部	
最大許容電圧	750V
運転電圧範囲	432～745V
交流部	
定格出力電圧	6600V (3300Vも可)
定格出力電流	52.5A
定格周波数	50/60Hz
相数	三相3線式

VSGモデルではSGの動揺方程式に基づいて位相角 θ を算出することで、SGの持つ慣性力に相当する出力を行う。

VSG-PCSの制御方式として電圧制御方式を採用し、電力系統の有無によらず安定運転ができる。当社の既存製品では系統連系と自立運転で制御方式を切り替える必要があるため、電力系統との並列や解列時に一度装置を停止する必要があるが、本開発では制御方式の切り替えがないため、シームレスに実現できる。

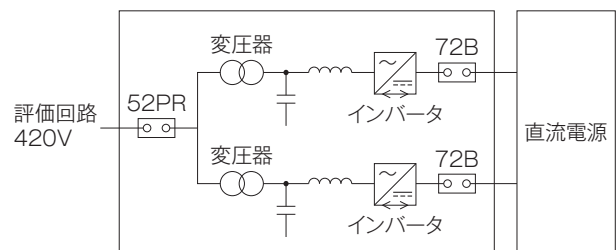
3 製品機の仕様・機能

第 1 表に開発する製品機の仕様を示す。製品機は定格出力600kVA、直流運転電圧範囲は432～750V

第 2 表 機能一覧

開発したVSG-PCSの代表的な機能を示す。

機能名称
VSG-PCSの瞬時起動
慣性力機能
ガバナフリー
アイソクロナス
同期投入
過電流抑制及び事故電流の供給
ブラックスタート
ソフトストップ
送出し電圧一定制御
横流抑制
直流電圧／電流の逸脱防止制御



第 2 図 製品評価モデル構成

製品評価モデルの構成を示す。

で、蓄電体にはリチウムイオン電池を想定している。第 2 表に製品機の機能一覧を示す。VSG-PCSとして必要な機能に加え、蓄電池インバータとしての機能や小規模系統で、電源として使用する場合を想定した機能も持つ。

4 製品評価モデル及び評価試験回路

4.1 製品評価モデルの構成

第 2 図に製品評価モデルの構成を、第 3 表に仕様を示す。製品評価モデルは、製品機の電流定格を1/100スケールダウンした定格出力6kVAのVSG-PCS 2台並列システムである。

製品評価モデルは、連系用遮断器 (52PR)・連系変圧器・インバータ・直流遮断器 (72B) で構成される。また、実際の製品では直流側に蓄電池が接続されるが、本モデルでは蓄電池の模擬として直流電源を用いて構成した。

4.2 評価試験回路

第3図に製品評価モデルの評価試験回路を示す。
評価試験回路は、系統電圧を模擬するための系統電

第3表 製品評価モデル仕様

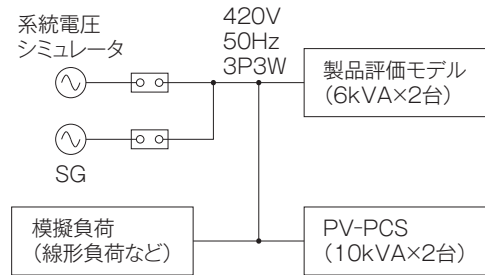
製品評価モデルは、製品機の1/100にスケールダウンした容量としている。

項目	仕様	
装置容量	6kVA	
定格交流出力	6kW	
商用周波絶縁連系変圧器	あり	
直流部	定格直流電圧	666V
	定格直流電流	9.0A
	運転電圧範囲	432~745V
交流部	定格出力電圧	420V
	定格出力電流	8.2A
	定格周波数	50Hz
	相数	三相3線式

圧シミュレータ・SG・PV-PCS・模擬負荷で構成される。

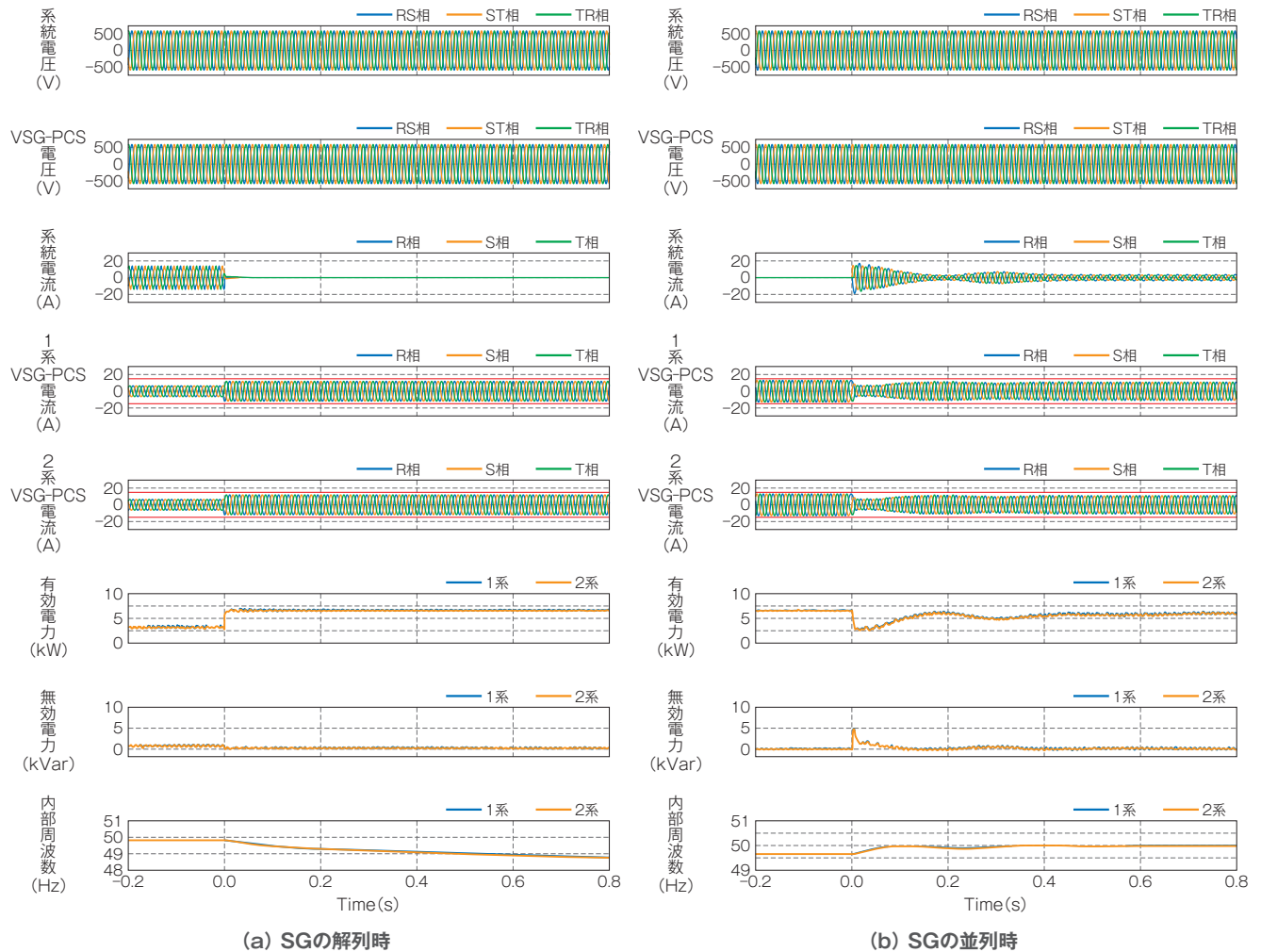
4.2.1 SG

SGは、定格交流出力50kVAで、出力電圧420V・出力周波数50Hzとなるように調整した状態で使用した。



第3図 評価試験回路

評価試験回路の構成を示す。



第4図 VSG-PCSとSGの組み合わせ試験結果 (SGとVSG-PCS 2台並列運転)

SGとVSG-PCSを組み合わせさせた場合、負荷急変させたときの電圧・電流波形を示す。

4.2.2 PV-PCS

10kVAのPV-PCSのミニモデルを2台使用した。

4.2.3 模擬負荷

模擬負荷は、線形負荷・非線形負荷・不平衡負荷・短絡試験治具で構成される。線形負荷は、抵抗負荷・遅れ負荷・進み負荷を並列接続し、それぞれの負荷量を調整することで負荷力率を調整した。

5 評価試験結果

製品評価モデルの評価は、様々な条件で実施しているが、ここでは代表的な評価結果として、VSG-PCSとSG及びVSG-PCSとPV-PCSの組み合わせ試験の結果を紹介する。

5.1 SGとの組み合わせ試験

第4図にVSG-PCSとSGの組み合わせ試験結

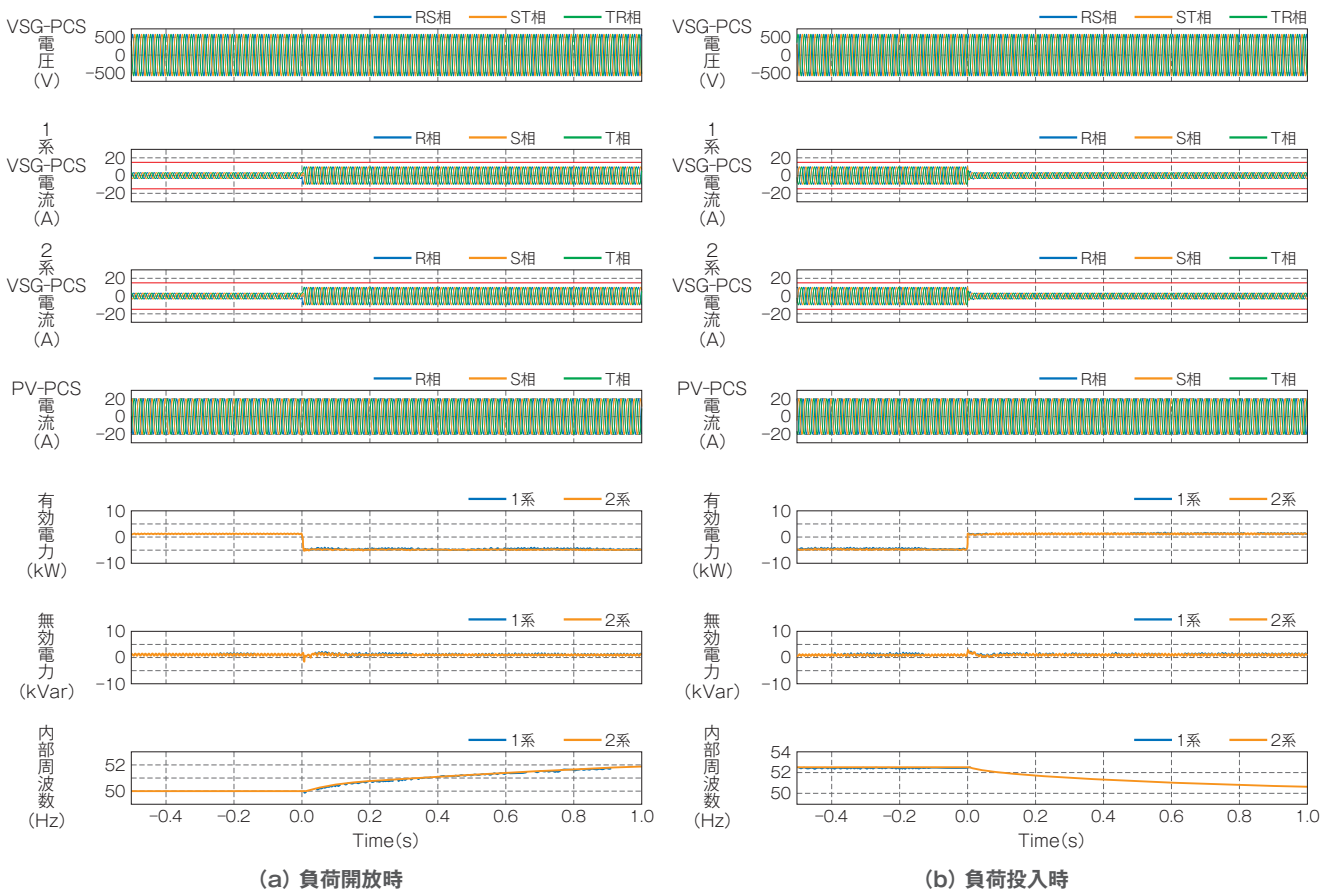
果を示す。VSG-PCS 2台とSGの並列運転状態で、線形負荷（力率1.0、12kW）を接続する。SGを解列・並列し、その時の動作を確認した。

VSG-PCS 2台の並列運転状態でも出力電圧への影響がほとんどなく、SGの並解列が行えることを確認した。

5.2 PV-PCSとの組み合わせ試験

第5図にVSG-PCSとPV-PCSの組み合わせ試験結果を示す。VSG-PCS 2台の並列運転状態で、PV-PCS 2台を連系運転させ、線形負荷（力率1.0、12kW）を接続し、PV-PCSの出力を各5kWに調整した状態で負荷を投入及び開放し、負荷変動による動作を確認した。

負荷が開放されるとすぐにPV-PCSの出力をVSG-PCSが充電することで、出力電圧を定格電圧に維持できていることを確認した。



第5図 VSG-PCSとPV-PCSの組み合わせ試験結果（VSG-PCS 2台とPV-PCS 2台並列運転）

PV-PCSとVSG-PCSを組み合わせた場合、負荷急変させたときの電圧・電流波形を示す。

6 むすび

6kVAの製品評価モデル2台並列システムを製作し、様々な条件で評価を実施した。各種条件で良好な結果が得られ、その中で代表的な評価として、VSG-PCSとSG及びPV-PCSを組み合わせた回路構成での結果を本稿で紹介した。

今後は、製品化に向けて開発を進めていく。

- ・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《執筆者紹介》



大原 尚
Takashi Ohara
東京電力パワーグリッド(株)



栗原重雄
Shigeo Kurihara
東京電力パワーグリッド(株)



野田秀樹
Hideki Noda
東京電力パワーグリッド(株)



鈴木茂之
Shigeyuki Suzuki
電力・エネルギー事業部技術部
蓄電池システムの企画・開発に従事



井上稔也
Toshiya Inoue
製品技術研究所
パワーエレクトロニクスの制御開発に従事