

分散電源システムと電力系統を橋渡しするパワーエレクトロニクス

Power Electronics Technologies Bridging Electric Power Systems and Dispersed Generation

篠原 裕文
SHINOHARA Hirofumi

渡辺 政人
WATANABE Masahito

田能村 顕一
TANOMURA Ken-ichi

現在、燃料電池、太陽光発電、風力発電などの新エネルギー発電システムや、電力貯蔵システムの技術開発及び実証試験が各所で進められ、系統連系型分散電源の実現の可能性が検討されている。将来には、これらの分散電源システムや電力貯蔵システムが電力系統に多数接続されることが考えられる。このような状況で、分散電源システムや電力貯蔵システムの中で直流電力を交流電力に変換し、かつ電力系統との接続を安全に行うパワーコンディショニングシステム(PCS)はますます重要な役割を担う。

当社は、今後の分散電源の動向に対応するために、小型・高効率のIGBTインバータと信頼性の高い系統連系保護システムを搭載したPCSを製品化し、運転実績を増やしつつある。

Renewable, dispersed, and utility-interactive power generation systems such as fuel cells, photovoltaic systems, and wind power systems, as well as battery energy storage systems (BESSs), are being developed and constructed today to demonstrate their performance. In the near future, these systems are expected to be connected to utility grids in large numbers.

In dispersed power generation systems, the power conditioning system (PCS), which is the part containing power electronics, plays an important role interfacing between the utility grid and the energy source. The PCS is equipped with insulated gate bipolar transistor (IGBT) inverters and reliable control and protection functions.

Toshiba PCSs have been installed in various systems, in which operating experience is being obtained.

1 まえがき

国内では、燃料電池発電、太陽光発電、風力発電などの分散電源を電力系統に連系して、自設備内の消費電力の一部を賄うシステムの設置例が増えている。発電電力を配電線へ流し込む(逆潮流させる)方式も可能である。また、新型電池の開発により、電池電力貯蔵システムが経済的に成立する可能性が出てきた。

分散電源や電力貯蔵に用いられるPCSは、パワーエレクトロニクス技術を用いて、太陽電池、燃料電池などが発生する直流(DC)電力を交流(AC)電力に変換するインバータ機能を持つとともに、分散電源や電力貯蔵システムの中で、制御・保護に関する中心的な役割を果たす。

近年、自然エネルギー発電や燃料電池発電、あるいは電力貯蔵の技術開発が進み、配電系統へ連系設置される分散電源の台数、総容量は増える傾向にある。分散電源の普及に伴って、配電線の電圧、電圧波形などの電力品質を維持・向上するために、インバータ技術を使った電力調整装置の必要性が検討されている。

このような、分散電源の導入量の増大に際し、ますます重要な役割を果たすPCSとパワーエレクトロニクス技術の動向、適用状況について述べる。

2 分散電源システムの概要

分散電源及び電力貯蔵システムの構成別の分類を表1に示す。電力系統に連系する分散電源/電力貯蔵システムをそのシステム構成で整理すると、燃料電池発電、太陽光発電、

表1. 分散電源及び電力貯蔵システムの構成別分類
Grouping of dispersed power systems and energy storage systems

電力源から系統連系点までの電力変換	分散電源の種類	分散電源・PCS制御の特徴
DC電源 ACに変換し、連系	燃料電池発電	出力電流による電池電圧の変化にPCSを追従させる。
	太陽光発電	日射強度による自動起動・停止、太陽電池の最大電力点追従を行う。
	電池電力貯蔵	充・放電に対応して、ACとDCの双方向の電力交換を行う。出力電流によって電池電圧が変化するのにPCSを追従させる。
AC電源 DCに変換再度ACに変換し、連系	可変速風力発電	風速の変動を回転エネルギーで吸収して出力変動を抑える。
	マイクロガスタービン発電	高周波のAC出力を一度DCに変換し、再度商用周波のACにする。
ACのまま連系	可変速二次励磁フライホイール	励磁電流の周波数をインバータで変化させ、回転子回転数が変わっても同期運転を保つ。
	誘導機風力発電	誘導機を系統に投入する瞬時の過渡電流を、リアクトルやサイリスタソフトスタートで抑制する。
	ディーゼルエンジン発電	同期発電機を使う。

電池電力貯蔵などのDCを発生する電力源にインバータをつないで商用周波数のACを出力するもの、可変速風力発電、マイクロガスタービン発電、可変速二次励磁フライホイールなどの周波数の変化する電力源にインバータをつないで商用周波数のACを出力するもの、誘導機風力発電、ディーゼルエンジン発電、ガスタービン発電などの回転機のAC出力をインバータなしで直接に出力するものに分けることができる。

これらに用いられるPCSの中から、当社の製品事例について以下に述べる。

3 太陽光発電用PCS

住宅用などの、単体当たり10 kW未満の太陽光発電システム用には、系統連系技術要件ガイドラインに示された系統連系にかかわる安全対策と電力品質を満たし（財）電気安全環境研究所による認証試験に適合したPCSが使われる。

太陽光発電用PCSは、半導体スイッチングによるDCからACへの変換機能を備えると同時に、太陽電池出力に合わせた自動運転機能、電力系統との接続にかかわる安全確保の機能をも兼ね備える。当社の住宅用太陽光発電PCSは、1986年から10年間にわたって行われた新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の太陽光発電用周辺装置技術開発のなかで開発・検証された技術を活用している。PCSの商品化に際しては、専用の電気室などを必要とせず、住宅内に設置することが可能で、低コスト、薄形壁取付け、低騒音、点検の容易さという目標を設定し、これらを高周波スイッチング、トランスレス方式の回路によって実現している。

住宅用太陽光発電PCSをトランスレス化するためには、AC回路へのDC流出防止、DC地絡の確実な検出・系統解列がキー技術である。当社のPCSは、出力波形に含まれるDC分を抑制する制御によって、AC電流波形の正・負方向への変動を最大1%×0.5秒以下に抑えてDC流出防止を実現し、また、DC入力側の正・負両極電流の差動分検出によって高速・高信頼度のDC地絡検出をしている。半導体スイッチング素子にはIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を約17 kHzの高周波PWM（Pulse Width Modulation）で使い、スイッチング音は聴感上ほとんど感じられない。

また、近年、住宅用4 kW級PCS（図1）のトランスレス技術を10 kW級PCS（図2）に適用し、多数台を並列接続してシステム容量の拡大を図るタイプが、各地のビルや公共施設向け太陽光発電システムで使われている。

ここでは、LONWORKS^(注1)による相互通信技術を適用し、ビル構内に分散設置されたPCS相互の協調運転、運転監視、気象観測システムの接続などが容易な制御システムの構成を実現している。

（注1） LONWORKSは、米国Echelon社の商標。



図1 4 kW住宅用太陽光発電PCS 個人住宅内に設置するPCSで、トランスレス方式である。
4 kW photovoltaic PCS for residential use

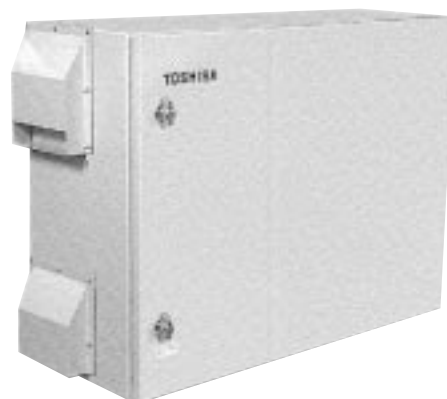


図2 10 kW太陽光発電PCS 並列接続により、基本的にはシステム容量の上限がない。
10 kW photovoltaic PCS

4 燃料電池発電用PCS

燃料電池の中では、リン酸型燃料電池の実用化技術開発がもっとも進んでおり、既に各地で商用運転が行われている。当社は、90年に米国IFC社と、需要家端に設置するリン酸型燃料電池発電システムの商用化のためにONSI社を設立し、以来、200 kW燃料電池プラントPC25TMシリーズを供給してきた。

このシリーズでは、分散型コジェネレーション用燃料電池プラントのユーザーにとって重要な特性として、発電効率の高さ、徹底的な小型化、屋外設置での耐環境性、遠隔での監視性能を追求しており、PCSもこれに協調した設計としている。

燃料電池本体は、コスト低減のために電池セルの積層数を減らして、DC出力電圧を低く、電流を高くとっている。このため、PCSの主回路電流が増えるので抵抗損失を抑える必要がある。最新型PC25CTM用のPCSは、従来型にあったDC電圧調整用チョップ回路を持たない単純な三相ブリッジ1組で構成することで電力変換効率94%以上を達成した（図3）。このために、スイッチング素子の電圧・電流の使用

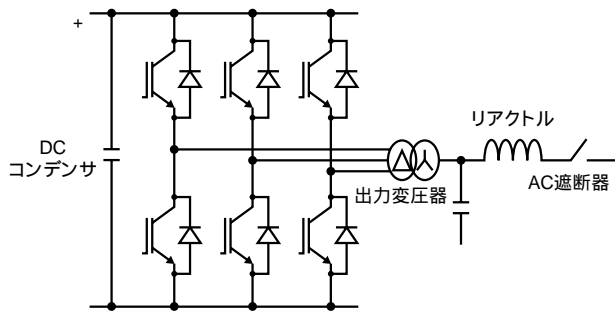


図3 . 200 kWリン酸型燃料電池のPCS主回路構成 単純な6アーム構成として効率向上を図った。

Main circuit configuration of 200 kW molten carbonate fuel cell (MCFC) PCS

範囲が広くなり、600 A・800 Vの大容量IGBTをスイッチング周波数3.75 kHzで使っている。

PCSの冷却は、従来、空冷式であったが、燃料電池プラント内を流れる二次冷却水をPCSインバスタックに流す水冷方式とすることにより、大幅な小型化を進めた。シリーズの最新型であるPC25C™用PCSの外形寸法は、幅1,575 mm×奥行き889 mm×高さ2,032 mm、質量は2,100 kgである(図4)。

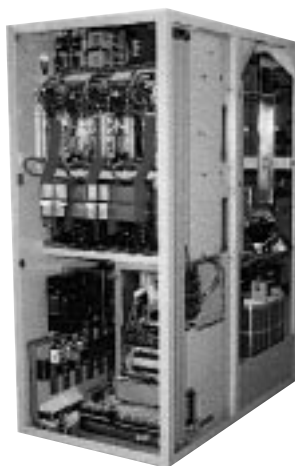


図4 . 200 kWリン酸型燃料電池PCS システム全体のコンパクト化のため大幅な小型化を図った。

200 kW MCFC PCS

PCS制御装置は、燃料電池プラント全体の制御装置の下位に置かれ、LANの標準規格の一つであるARCNETによる機器内イントラネット通信を介して協調制御を行う。このシステムは、遠隔監視のために一般公衆回線を使う通信用のポートを持ち、ユーザー及びメーカー工場から接続して各部の運転状況、故障点を把握できる。また、連系運転・自立運転モードを持ち、停電・復電時に自動的に運転モードを切

り換える機能を持つ。更に、国内などでユーザーの受電点から上位への逆潮流を行わない場合には、外部基準信号によって出力制御を行う機能を設けている。

5 電力貯蔵用PCS

改良鉛電池、NAS(ナトリウム・硫黄)電池、V(バナジウム)どうし、又はFe(鉄)とCr(クロム)の電気化学反応を用いるレドックスフロー電池ほか、新型二次電池の技術革新が進み、変電所あるいは需要家端での電力負荷平準化システムが経済的に成り立つ可能性が検討されている。二次電池電力貯蔵システム(BESS: Battery Energy Storage System)は、二次電池とPCSを組み合わせて電力系統に連系するシステムであり、電力系統に有効電力を出し入れすることができる。ここに使われるPCSの機能を生かして、自然エネルギー発電の変動吸収や、無効電力の調整によるローカルな系統電圧安定化にも有効である。BESSの実用化においては、これらのPCS機能を活用した複合機能のBESSが、変電所あるいは電力需要家端に設置されることが予想される。

東京電力(株)川崎電力貯蔵連系試験場に設置された500 kW級NAS電池電力貯蔵システム用650 kW PCSを図5に示す。このシステムは、今後の変電所設置用BESSの実証機として低コスト・高効率な特性を目指して製作され、AC端500 kW運転時に96%以上の高い変換効率を実現した。このPCSはガバナフリー機能を持ち、系統周波数変動を抑制する方向に動作させることができる。また、無効電力補償機能、自動再起動機能など、将来の変電所に設置するBESSを想定した機能を搭載している。主回路は1,700 V・360 AのIGBTを1S・2P(注2)で用いた三相ブリッジ×4段で構成する。

また、同所に設置された250 kW級NAS電池電力貯蔵シス



図5 . 650 kW変電所向け実証用NAS電池電力貯蔵用PCS 変電所設置用として高効率化を図った。

(写真提供: 東京電力(株))

650 kW NAS BESS PCS for trial service station use

(注2) Sは直列数, Pは並列数を示す。

テム用275 kW PCSを図6に示す。このシステムは、需要家設置のBESS実証機として製作され、非常用電源を兼用することを想定してPCSに自立運転機能を持たせている。制御装置のマンマシンインタフェースには、産業用パソコンにCRT (Cathode Ray Tube) タッチパネルを適用してわかりやすい運転パターンの設定、監視制御を実現した。屋外のNAS電池と屋内のPCS、制御装置間の信号取り合いは光ケーブルによるRS-232Cのシリアル伝送としている。主回路は、1,200 V・500 AのIGBTを1S・3Pで単相ブリッジとし、これを3台組み合わせることで三相出力としている。



図6 . 275 kW需要家向け実証用非常電源機能付きNAS電池電力貯蔵用PCS 需要家設置用として自立運転機能を持つ。
(写真提供：東京電力(株))

275 kW NAS BESS PCS for trial industrial use

これまでの製作実績で、変電所設置、需要家端設置のBESS用PCS技術が確立した。今後の新しいBESSの活用方法の一つとして、自然エネルギー出力を補完する用途が考えられる。

沖縄電力(株)宮古太陽光発電実証設備内に設置された100 kW級NAS電池電力貯蔵用PCSを図7に示す。このシス



図7 . 200 kW周波数調整機能付きNAS電池電力貯蔵用PCS BESS機能の実証用として、太陽光発電の出力変動抑制、ガバナフリー、無効電力調整などの機能を持つ。

200 kW NAS BESS PCS for power system stabilization

テムは、太陽電池アレーとNAS電池のDC出力を並列に接続して一台のPCSに入力する構成としている。太陽光発電出力の出力変動をNAS電池出力で補うことにより、変動する自然エネルギー発電出力を外部からは一定出力の電源として扱えるようにしている。

このシステムは、電力系統の電源脱落など緊急時を想定してNAS電池から短時間に定格の2倍出力を出す構成で、PCSの定格容量は200 kVAである。1,200 V・500 AのIGBTを使い1S・6P・6A^(注3)のブリッジとし、4.5 kHzの高周波スイッチングを行い、インバータ出力部の高調波を抑制している。

変換器用変圧器には、一般汎用の単純な2巻線の油入自冷型を採用した。また、PCSにガバナフリー機能、無効電力補償機能を持たせており、前述の自然エネルギー変動補償や、緊急応援動作を含めたBESSの幅広い系統安定化効果を検証するフィールド試験を沖縄電力(株)と共同で実施している。このシステムは、離島などに置かれる場合を考慮して無人運転が可能な構成としており、運転データは現地ローカルLANにより収集し、電話回線を経由して遠方でデータ解析が行える。

6 配電線無効電力調整装置

配電線末端部に誘導機直結型の風力発電など、それ自身では電圧調整機能を持たない分散電源が設置されたときに、配電線に有効電力が逆潮流すると、分散電源出力端の電圧が上がる場合が考えられる。ここに、静止型無効電力調整装置(図8)を適用することによって無効電力を調整し、



図8 . 静止型無効電力調整装置 IGBTの自励式インバータで、高速の無効電力制御を行う。

Static var compensator system

(注3) Aはアーム数を表す。アーム数とは、ACが両端にかかり、中央からDCが出るインバータ回路の1単位を示す。

配電線電圧を一定範囲以内に抑えることができる。同時に、配電線の高調波ひずみを打ち消す方向の波形を出力し、複数調波に対応可能なアクティブフィルタとして動作させることもできる。

無効電力調整装置のインバータは、IGBTを使う自励式であり、接続する電力配電線の系統電圧、電圧波形を取り込んでこれを一定の範囲内に抑えるように、無効電力・電圧波形を調整する。

7 系統解析技術

今後、分散電源の適用拡大に伴う配電線への影響を事前に予測し、分散電源の制御機能、設置形態にフィードバックして未然に問題を解消するための系統解析技術が重要となる。具体的には、系統全体で見た分散型電源の大規模な導入形態をモデル化し、変電所や負荷装置の安全な運転に支障をきたさないことを確認する電力運用にかかわる解析がある。また、より具体的な分散電源の計画容量、出力特性などを基に電力系統の乗数、発電機特性、変電所タップ動作などを考慮して、分散電源による高調波、電圧変動、保護協調などへの影響を予測し、対策として望まれる無効電力調整装置の位置、容量などを求め、顧客の検討に役だてる目的の解析がある。

これらの解析検討では、当社が開発した実効値解析ツール⁽³⁾と、世界で使用されている瞬時値解析ツールEMTP⁽⁴⁾、EMTDC⁽⁵⁾を前述の目的に合わせて使用している。

実効値解析ツールは、潮流状態や電圧分布、分散電源や周辺の発電機の安定性検討に使用し、瞬時値解析ツールは、分散電源の起動・停止時の過渡応動や、高調波あるいは他の機器との相互作用などによる異常現象などの発生予測に使用する。これらの解析ツールには、パワーエレクトロニクス機器や風力発電用誘導機などの分散電源モデルが用意、又は、すぐに構築できるようになっており、顧客の分散電源

(注4) EMTPIは、Electro Magnetic Transients Programの略で、米国ボンネビル電力局による公開プログラム。

(注5) EMTDCは、米国マントバハイドロ社の商標。

の導入計画に合わせた解析を短期間に行い、ビジュアルな表現によって最適な分散電源と電力品質補償の適用方法を協議していくための提案型検討ツールとして整備されている。

8 あとがき

今後、分散電源の適用拡大が予想されるが、これに対応する分散電源及び電力貯蔵用PCSのインバータと制御技術、並びに系統解析技術を中心に述べた。ひと言に電力系統との連系用PCSと言っても、当然その顧客の使用形態、容量領域などによって満たすべき特性や保守の体制などが異なる。これらのPCSが顧客の利益に最大限に貢献する製品として普及するよう、各方面のご指導をいただきながら努力を続けていきたい。

文献

- (1) 篠原裕文、ほか：太陽光発電用インバータの新しい単独運転検出保護。電気学会誌B.114,7/8,1994,p.732-738.
- (2) 吉野輝雄、ほか：省エネ・新エネ対応及び電源品質改善のためのパワーエレクトロニクス。東芝レビュー.55,7,2000,p.33-36.
- (3) 小坂葉子、ほか：“電力系統エンジニアリングツールの開発”。平成12年電気学会全国大会.6-005,3,2000.



篠原 裕文 SHINOHARA Hirofumi

電力システム社 府中電力システム工場 パワエレシステムエンジニアリングセンター主査。電力用パワーエレクトロニクス装置のシステム取りまとめに従事。電気学会会員。

Fuchu Operations - Power Systems



渡邊 政人 WATANABE Masahito

電力システム社 燃料電池事業推進部参事。燃料電池システムの開発、システム取りまとめに従事。電気学会会員。



田能村 顕一 TANOMURA Ken-ichi

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター 電力システム開発部主務。

電力系統解析技術の研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center