

再生可能エネルギーの導入に貢献する 静止型無効電力補償装置

Static Var Compensator Contributing to Introduction of Renewable Energy Power Generation Systems

福島 大史 FUKUSHIMA Daishi 田村 裕治 TAMURA Yuji

再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）による発電システムの導入が進み、日照時間が長い九州地方では、太陽光発電（PV）を代表とする分散型電源が増加している。しかし、これら分散型電源は出力が不安定であることから、電力系統に及ぼす電圧変動を抑制する対策が求められている。このため、電力系統を適正電圧に保つ対策として、静止型無効電力補償装置（SVC）の設置が各所で行われている。

東芝エネルギーシステムズ（株）は、大容量のTCT（Thyristor Controlled Transformer）を採用し、省スペース化と導入コストの低減を図ったSVCを開発し、九州電力（株）熊本変電所に納入した。この装置（以下、熊本SVCと呼ぶ）は、直列リアクトル及びC-type交流フィルターの採用とTCT用変圧器の高インピーダンス化による高調波性能の向上や、PV向けの制御仕様の最適化、収納ハウスの採用による工期の短縮などを図っている。解析や、工場試験、現地で据え付けた後の系統連系試験などの結果、その有効性を確認できた。

The introduction of renewable energy sources has recently accelerated toward the realization of a low-carbon society. Particularly in Japan's Kyushu region, grid-connected distributed power generation systems such as photovoltaic (PV) systems have been progressively installed, taking advantage of the long hours of sunlight in that region. This, in turn, has resulted in increased demand for static var compensators (SVCs) in order to maintain the grid voltage within the appropriate level by suppressing voltage fluctuations caused by such PV power generation systems.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has developed a static var compensator (SVC) equipped with a large-capacity thyristor-controlled transformer (TCT), which makes it possible to achieve space saving and reduce introduction costs, and delivered it to the Kumamoto Substation of Kyushu Electric Power Co., Inc. The newly developed SVC offers the following features: (1) enhancement of harmonic performance, achieved by applying a series reactor and a C-type AC filter and increasing the impedance of the TCT transformer, (2) optimization of specifications for control of PV systems, and (3) shortening of the period required for construction by using package houses. We have confirmed the effective operation of this SVC through the results of analyses, factory tests, and system interconnection tests at the site.

1. まえがき

脱炭素社会の実現に向けて再エネの導入が進み、PVなどの分散型電源が世界中で増加している。我が国の九州地方は、日照時間が長いことからPVの立地に適しており、PVを代表とする分散型電源の導入が進んでいる。近年、これらの電源の大量導入とその発電量の変動に対し、電力系統の電圧変動抑制対策が重要となっている。このため、熊本県においても、再エネの導入促進に向け、電圧変動を抑制する対策が必要となっている。

これを受けて、東芝エネルギーシステムズ（株）は、熊本SVCを受注し、システム設計から、各種装置設計、製作、工場試験、出荷、現地での据え付け、組み合わせ試験、系統連系試験までを、2019年12月末に完了した。そして、2020年内に運用開始の予定である。

熊本SVCは、誘導性（遅相）40 Mvarから容量性（進相）

-35 Mvarまでの無効電力を連続的に制御し、系統の電圧変動を高速に抑制できるので、再エネの導入促進に貢献できる。

ここでは、熊本SVCの設置目的、特長、及び導入効果の一部について述べる。

2. 熊本SVCの設置目的

電力系統に接続するPVは、一般に系統の需要家側に分散配置されており、これらの系統を集約した変電所に向けて有効電力を出力する。その際、以下に述べる(1)、(2)の理由から、電力系統に電圧変動が発生する。

- (1) PV接続端の電圧は、PVから変電所までの送電線の抵抗値によって、変電所の電圧を基準として上昇する。
- (2) 変電所の電圧は、PVからの有効電流と系統の誘導性リアクタンスによって、変電所の上位の電圧階級に対応した電圧を基準として降下する。

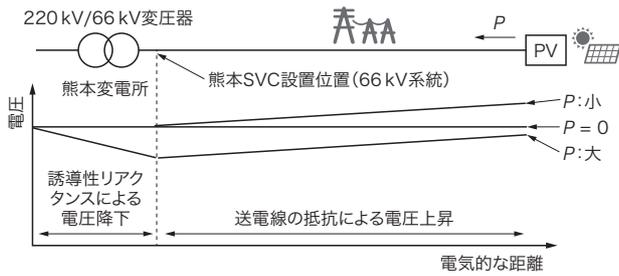


図1. PV発電量と電圧変動との関係

PVの電圧を発電前後で比較すると、 P の大きさにより上昇、下降のどちらの電圧変動も起こり得る。

Relationship between PV power generation and voltage fluctuations

この事象を図1に模式的に示す。実際の電力系統は、変電所から複数の送電線が接続されており、その末端に複数のPVが接続されている。PVで発電される有効電力 P が大きいと、(2)により変電所の母線電圧(図1の熊本SVC設置位置)が変動し、その影響は複数の送電線から成る系統全体に波及する。したがって、急激な天候変化や系統事故により一部地域のPV発電量が大きく変化した場合には、変電所の母線電圧を安定させることが系統全体の電圧安定化に寄与することになる。SVCは、無効電力の高速かつ連続的な制御により電圧変動を抑制できる。したがって、更なるPV導入のため、熊本変電所のSVC設置が必要となった。

3. 熊本SVCの特長

熊本SVCを図2に、単線結線図を図3に、機器配置を図4に、それぞれ示す。当社は、これまでに複数のSVCの納入実績があるが、熊本SVCの特長は以下のとおりである。

3.1 省スペースと高調波の低減

SVCは、変換器(サイリスターバルブ)とリアクトルを組み合わせ、サイリスター素子のスイッチング制御を行うことで可変の誘導性出力を発生させるTCR(Thyristor Controlled Reactor)方式と、高インピーダンス変圧器を用いることで当該リアクトルを削減できるTCT方式があり、熊本SVCではTCT方式を採用した。

TCTは、省スペースで初期コストを低減でき、当社では複数の納入実績がある^{(1), (2)}。しかし、TCRと比較して系統へ流出する高調波電流が大きくなるなどの点から、TCTの大容量化は難しいと考えられてきた。熊本SVCでは、(1)直列リアクトルの採用、(2)C-type交流フィルターの採用、(3)TCT用変圧器の高インピーダンス化、という高調波の低減施策によって、大容量のTCTを採用でき、省スペース化及び初期コストの低減を実現した。

PVを導入した電力系統では、PV用パワーコンディショナー

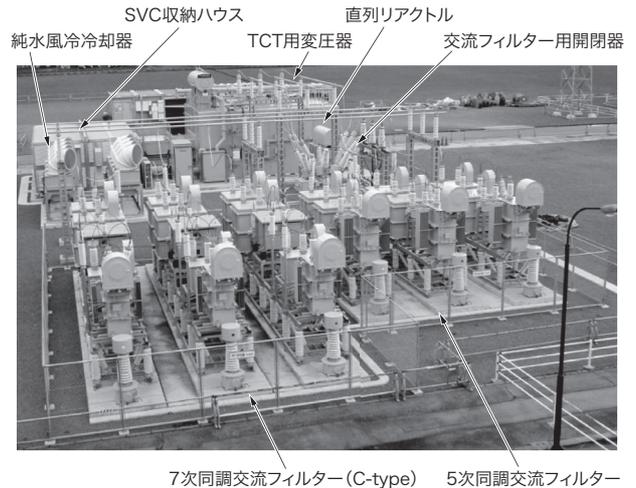


図2. 熊本SVC

SVC収納ハウス内に、サイリスターバルブ、制御保護装置、及び純水冷却装置を収納している。

SVC installed at Kumamoto Substation

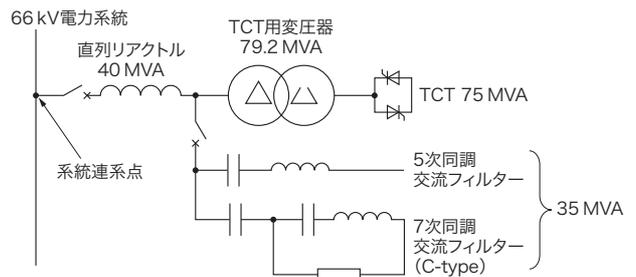


図3. SVCの単線結線図

直列リアクトルや、大容量かつ高インピーダンスのTCT用変圧器、C-typeの7次同調交流フィルター、5次同調交流フィルターなどを採用している。

Single-line diagram of SVC

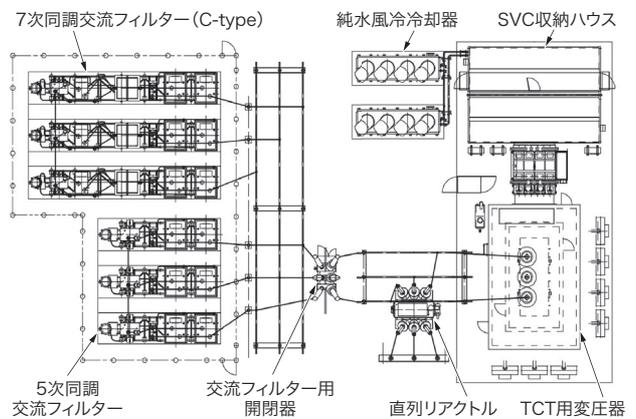


図4. SVCの機器配置

限られたスペースの中、変電所の敷地境界の近接点で低騒音となるように各機器を配置した。

Layout of SVC equipment

(PCS)からの高次高調波の発生や、PCSのフィルターを構成するコンデンサーの影響による高次の系統共振点などが懸念される。熊本SVCでは、前述の高調波対策により、PCSに起因する高次高調波の抑制にも貢献できる。

(1) 直列リアクトルの採用 単線結線図(図3)のとおり、系統連系点にリアクトルを直列に設置した。直列リアクトルは、以下の利点を持っている。

- (a) SVCが発生する高調波のうち、高次高調波や発生量の大きい5次・7次高調波などに対し、系統流出の抑制効果が大きい。
- (b) インダクタンスが小さく、必要な敷地面積も小さい。また、工場から一体輸送できるため、現地での油処理は不要である。

直列リアクトルの有無による解析結果と、直列リアクトルを採用した熊本変電所での系統連系試験結果を図5に示す。解析では、電力系統の構成とSVCの機器定数を変えた数千ケースを含む条件で検討した。図5の直列リアクトルの有無による解析結果の比較から、特に5次・7次高調波の系統流出電流が抑制できることを確認した。また、系統連系試験結果のとおり、実機を用いた試験でも、高調波の流出量が十分に抑制できていることを確認した。

(2) C-type交流フィルターの採用 SVCの発生する高調波は、5次・7次高調波が大きいので、それぞれの高調波の系統流出を抑制するため、交流フィルターを設置する。交流フィルターは、高次高調波が大きくなる場合にハイパスフィルター(抵抗回路)を追加する。前述したとおり、PVを導入した電力系統では高次高調波に注意する必要がある、熊本SVCでもハイパスフィルターを追加した。系統解析で高次高調波の抑制効

果が大きいという結果が得られたC-typeフィルターを、ハイパスフィルターとして7次同調交流フィルターに採用した。C-typeフィルターは、図3に示すとおり、コンデンサーを二つに分割した構成で、国内SVCでは初めて^(注1)採用した。また、C-typeの採用により、7次同調交流フィルター全体の合成インピーダンスを7次高調波に同調させながら、抵抗と並列に接続するコンデンサーとリアクトルは基本波に同調させることで、抵抗回路に分流する基本波成分を抑制し、損失の低減も実現した。

(3) TCT用変圧器の高インピーダンス化 TCT用変圧器の高インピーダンス化によって、発生高調波の低減を実現した。変圧器の設計では、内部の温度上昇や騒音などに十分配慮することで、TCT用変圧器としては大容量(79.2 MVA)で高インピーダンス(77 MVA変圧器における55%のインピーダンス)を実現できた。

3.2 工期短縮と地震地域への対策

SVCは、変換器や制御保護装置などを建屋内部に設置することが一般的であるが、建屋の代わりにアルミニウム製パッケージの収納ハウスを採用することで、作業工数と作業期間を削減できる。収納ハウスは可搬なので、当社工場内で収納ハウスの中に装置の設置とほとんどの配線を終えてから出荷すれば、現地での作業は少なくなる。熊本SVCは、これまでの収納ハウス型SVCよりも大容量で大型であるため、2台のパッケージを連結した収納ハウスを初めて採用した。出荷前に分割したパッケージを現地で連結する様子を図6に示す。2台のパッケージの連結と据付工事は、2日間

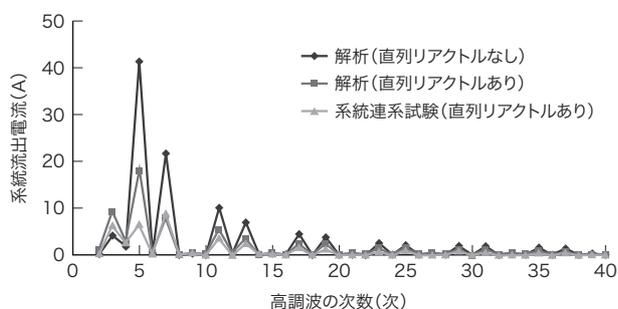


図5. 高調波解析と系統連系試験による高調波抑制結果

次数ごとの結果を最大値と比較している。直列リアクトルにより、5次、7次だけでなく、更に高次の高調波も大幅に低減していることが分かる。

Results of harmonic analyses and system interconnection tests to verify harmonic suppression effect of series reactor



図6. 収納ハウスの据え付け

サイリスターバルブの収納ハウスに、制御保護装置用の分割パッケージをクレーンで連結する様子である。

Installation of package houses for thyristor valve and cubicles

(注1) 2019年12月時点、当社調べ。

で完了し、建屋を新たに建設する場合と比較して、工期短縮に大きく貢献できた。

また、熊本変電所は、2016年の熊本地震が発生した地域にあるため、耐震規格JEAG 5003-2019(一般社団法人日本電気協会 電気技術指針 5003-2019)「変電所等における電気設備の耐震設計指針」に加えて、特定地震波に対する機器、装置ごとの耐震仕様を検討した。熊本地震の地震波形を基に、収納ハウスをはじめとした全ての機器や装置を、同程度の地震に耐えられるように設計した。

3.3 低騒音化

SVCは、図4の機器配置に示すように、複数の機器・装置の組み合わせで、各機器から異なる騒音が発生するため、変電所の敷地境界における騒音に注意を要する。熊本SVCでは、この評価に3D(3次元)解析を適用し、各機器や装置から発生する音を合成して評価した。騒音仕様と変電所内の機器・装置の配置方法を条件として解析し、最小限の対策で低騒音となるようにシステムを設計した。騒音値は、現地での実測により解析結果の妥当性を検証し、低騒音なSVCシステムが実現できていることを確認した。

3.4 系統事故からの復電時における電圧変動の抑制機能

SVCは、系統事故などによる1~2秒間の系統電圧低下時でも、運転を継続する。したがって、復電時は、SVCの制御定数や設定によらず、系統に対して不要な無効電力出力及び電圧変動を引き起こさないように、解析を行って検討する必要がある。特に、過電圧を発生させてPV用PCSを停止させないようにすることが重要である。

熊本SVCでは、電圧・電流制御に新たな機能を追加することで、復電後のSVCからの不要な出力を抑制した。この制御の効果は、系統解析、及び制御装置を電力系統RTDS(Real Time Digital Simulator)と組み合わせた工場試験(シミュレーター試験)で検証した。

3.5 自動起動・停止機能

系統の負荷変動や送電線の投入開放時の電圧変動抑制に用いられるSVCは24時間運転するが、PV用のSVCは夜間運転が不要である。したがって、夜間のSVC停止によりSVC稼働に伴う消費電力を低減することが考えられる。熊本SVCでは、GPS(全地球測位システム)アンテナと時刻発生器を設置して、自動で起動・停止信号を出力する機能を採用した。この機能により、SVC稼働に伴う消費電力を低減するとともに、運転員による毎日の起動・停止操作を不要にした。

4. SVCの正常動作及び導入効果の確認

SVCの正常動作及び導入効果は、工場シミュレーター試

験と現地で据え付けた後の系統連系試験で確認した。

- (1) 工場シミュレーター試験 PVが接続される電力系統と主回路機器をRTDSで模擬し、制御装置の動作を確認した。また、SVCによる良好な系統電圧制御特性も確認した。試験内容の例を、以下に示す。
 - (a) 起動・停止などの基本機能の確認
 - (b) PV発電量の急変に対する、SVC出力による電圧変動の抑制効果を確認
 - (c) 系統事故からの復電時に、SVCが不要な出力をしない電圧制御機能の確認
- (2) 系統連系試験 現地で据え付けた後の単体試験、組み合わせ試験を全て完了した後、実系統に接続したSVCの動作試験を実施し、良好な系統電圧制御特性を確認した。試験内容の例を、以下に示す。
 - (a) 起動・停止などの基本機能の確認
 - (b) PV発電量の変動の代替として、調相設備の投入/開放や主変圧器の操作により電圧変動を発生させた場合に、SVCの出力によって電圧変動が抑制されることを確認
 - (c) ヒートラン試験で機器の温度上昇、騒音、高調波の発生量が、設計及び解析結果と比較して問題のないことを確認

熊本変電所の分路リアクトル(ShR: Shunt Reactor)投入時の試験結果を図7に示す。SVCがない場合には系統電圧に0.9kVの電圧降下が発生するが、SVCがある場合にはSVCが瞬時に動作し、電圧降下を抑制していることを確認した。また、電圧降下を抑制するため、容量性の-33Mvarの無効電力を出力することを確認した。系統短絡容量を用いた計算によると、SVCは想定どおりの出力量であ

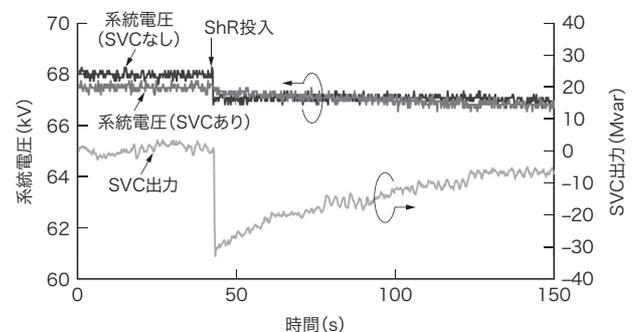


図7. 系統連系試験での分路リアクトル投入時の電圧変動測定結果
SVCがない場合に発生していた、系統電圧の急激な変動を抑制するため、SVCから容量性の無効電力を出力していることが分かる。

Results of measurements of voltage fluctuations when switching shunt reactor in system interconnection tests

り、良好な動作特性が得られた。これらにより、PV発電量の急変時にも良好な電圧変動の抑制効果が得られることを検証できた。

また、熊本SVCは、緩やかな電圧変動には応答せず、瞬時の系統電圧変動には高速に動作して数分後に0 Mvar出力まで戻す制御（フローティングVref制御³⁾）方式を採用している。図7でも、SVC動作後に出力が0 Mvarに戻る動きが確認できる。この制御方式を採用することで、SVCはPV発電量の急変などによる瞬時の電圧変動だけに動作し、その後0 Mvarまで戻ること、次の電圧変動に備えて出力量を確保できる。

5. あとがき

再エネの導入に伴う電圧変動対策として設置した、九州電力(株)熊本SVCの特長と、設置効果の一部についてまとめた。熊本SVCは、発生高調波を抑制するための直列リアクトルの採用や、系統事故からの復帰後に再エネ発電を阻害しないための制御機能、工期短縮のためのSVC収納ハウスによるパッケージ工法などの特長を持っている。このSVC適用による有効性は、解析や、工場試験、現地での据付工事、系統連系試験などの各段階で、それぞれ確認した。

SVCは、再エネの導入促進に際して有効な設備であり、熊本SVCの知見を生かすことで、今後の電力系統の品質向上に貢献していく。

謝 辞

熊本SVCのシステム設計や工場・現地試験などにあたり助言・指導をいただいた九州電力(株)の関係各位に、深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 金武茂幸, ほか, “SVCの長距離交流ケーブル連系系統への適用”, 平成20年電気学会全国大会論文集 分冊6. 福岡, 2008-03, 電気学会, 2008, 6-236, p.396-397, (CD-ROM).
- (2) 田村裕治, 宮崎保幸, 遠隔地への交流ケーブル送電用 静止型無効電力補償装置, 東芝レビュー, 2008, **63**, 8, p.48-52.
- (3) 田村裕治, ほか, 長距離交流ケーブル送電系統用無効電力補償装置の電圧制御方式, 電気学会論文誌B, 2011, **131**, 11, p.896-904.



福島 大史 FUKUSHIMA Daishi
東芝エネルギーシステムズ(株) グリッド・アグリゲーション
事業部 電力変電技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



田村 裕治 TAMURA Yuji, Ph.D.
東芝エネルギーシステムズ(株) グリッド・アグリゲーション
事業部 電力変電技術部
博士(工学) 電気学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.