

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

Static Var Compensator for Long-Distance AC Cable Transmission System

田村 裕治 宮崎 保幸

■ TAMURA Yuuji ■ MIYAZAKI Yasuyuki

長崎県西部の五島列島の電力は、54 kmというわが国最長の66 kV海底ケーブル送電で九州本土から供給されているが、この長距離ケーブルの交流送電に起因する電圧変動や高調波共振が懸念された。

東芝はこの対策として、系統電圧の安定化などを目的とする静止型無効電力補償装置(SVC:Static Var Compensator)を開発し、五島列島内の九州電力(株)66 kV奥浦系統開閉所に設置した。当社は、系統解析技術を駆使してこの装置の制御機能を開発し、設置面積を低減できるTCT(Thyristor Controlled Transformer)+交流フィルタの構成を採用した。更に、サイリスタバルブや制御保護装置をパッケージハウスに収納して工場出荷することで、現地での据付け期間を短縮している。

今回開発したSVCは、今後増加する離島や遠隔地への交流ケーブル送電に適用される見込みである。

Toshiba has developed a static var compensator (SVC) and delivered it to the Oku-Ura Switching Substation of Kyushu Electric Power Co., Inc. for a 54 km, 66 kV AC submarine cable transmission system, the longest such system in Japan.

For the development of the SVC control system, we utilized our accumulated experience in power system analysis technology in order to solve problems such as voltage fluctuations and harmonic resonance of the power system due to the long distance of the AC cable transmission system from the Kyushu mainland to the Goto Islands. In addition, we adopted a thyristor-controlled transformer (TCT) and harmonic filters to realize a compact SVC configuration, and installed the thyristor valves and control/protection cubicles in a package house at the factory to shorten the construction period.

The newly developed SVC is expected to offer a technical solution for the interconnection of long-distance cables between mainland locations and remote islands.

1 まえがき

長崎県西部の五島列島と九州本土を交流で連系する、わが国最長(約54 km)の66 kV海底ケーブル送電システムの運用が、九州電力(株)で2005年6月から開始された。計画段階で、長距離ケーブル送電という特殊な形態に起因する、受電端(五島列島側)での電圧変動や高調波共振などの特殊現象が懸念された。

この対策として、五島列島の福江島にある九州電力(株)奥浦系統開閉所に容量30 MVAの静止型無効電力補償装置(SVC:Static Var Compensator)を設置し、2007年6月に運転を開始した(図1)。

ここでは、懸念された系統の特殊現象と対策、SVCの最適設計、開発したSVCの概要、及び工場シミュレータ試験と系統接続試験の一部について述べる。

2 系統の特殊現象と対策

2.1 電圧変動

九州本土との交流連系ケーブルや島内ケーブル送電線で系統事故などが発生した場合、故障送電線を開放し復旧する際



に、開放中は電圧低下、復旧後は電圧上昇が発生する。この電圧変動は、ケーブル系統の対地静電容量に起因する現象で

ある。そこで、島内に高速の電圧調整機能を持つSVCの設置が必要となった。

2.2 高調波共振

長距離の交流連系ケーブルを計画したときには、ケーブルの対地静電容量に起因する受電端での共振周波数が5次以下となるよう、九州本土側の連系変圧器インピーダンスを標準の15%から31%に代えている^{(1), (2), (3)}。しかし、系統条件によっては、九州本土側と五島列島内を発生源とする残留高調波による5次電圧ひずみが一部の66 kV変電所で拡大する、という解析結果が確認された。対策として島内に交流フィルタの設置が必要となり、進相無効電力出力と共用する交流フィルタをSVCに含めた。

3 SVCの最適設計

3.1 容量と設置位置の検討

系統事故時の電圧変動、設置面積、及び騒音条件によるケーススタディを実施し、SVCの容量は進相側20 MVA、遅相側10 MVAまでが必要であり、設置場所は奥浦系統開閉所が最適との結論を得た。

3.2 構成の検討

交流フィルタを含むSVCの構成として、次の2案を検討した。

- (1) TCR (Thyristor Controlled Reactor) と交流フィルタをSVC用変圧器の二次側に接続
- (2) TCT (Thyristor Controlled Transformer) と交流フィルタを66 kV系統に接続

高調波解析とレイアウト検討の結果、残留高調波電圧ひずみの抑制効果を十分に得るためには、交流フィルタを66 kV系統へ接続する必要がある、また、設置面積に限られるため、(2)の構成が、要求仕様に対し最適との結論になった。

4 開発したSVCの概要

4.1 構成

開発したSVCの全景を図2に、単線結線図を図3に、及び機器の配置を図4に示し、主要な機器について以下に述べる。

- (1) TCT用変圧器 高インピーダンスで、SVC用変圧器とTCRリアクトルとを組み合わせた機能を兼ね備えており、SVC全体の設置面積を低減できる。
- (2) 交流フィルタ 高調波解析による検討結果に基づき、5次交流フィルタにハイパス型を採用し、残留高調波の抑制効果を高めている。
- (3) サイリスタバルブ収納ハウス サイリスタバルブ、純水冷却装置、及び制御保護装置を、工場であらかじめ収納ハウス(図2左端)に据付けを完了して出荷することで、設置面積の縮小と現地での工期短縮を実現した。



図2. SVCの全景 — 左端はサイリスタバルブ収納ハウスである。
Overview of SVC

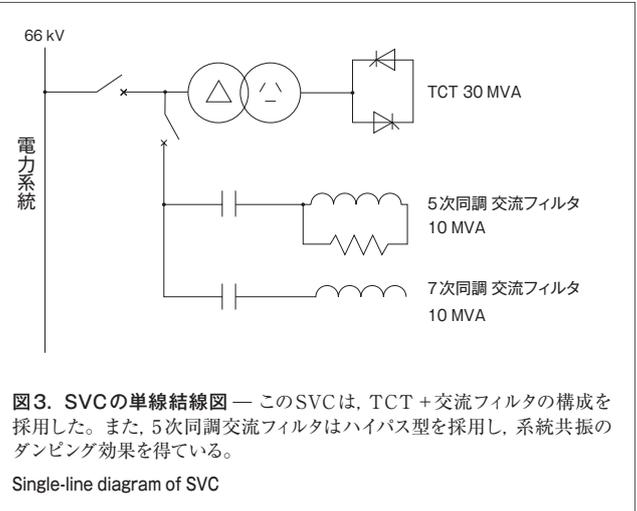


図3. SVCの単線結線図 — このSVCは、TCT + 交流フィルタの構成を採用した。また、5次同調交流フィルタはハイパス型を採用し、系統共振のダンピング効果を得ている。
Single-line diagram of SVC

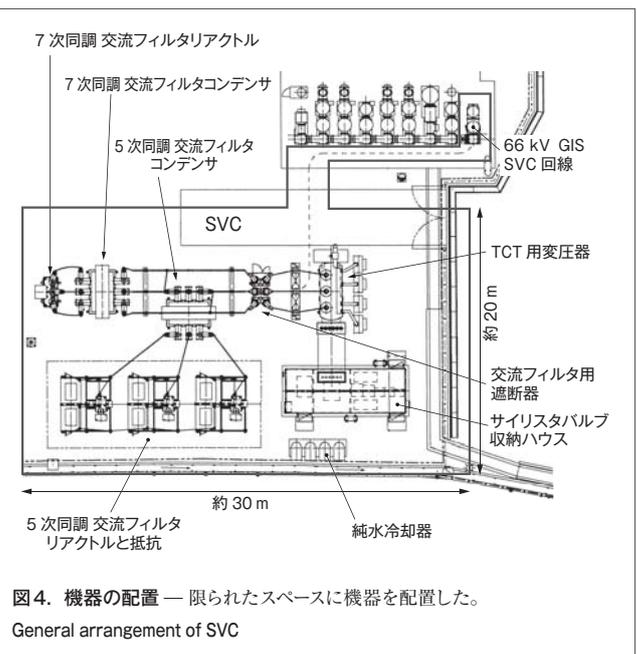
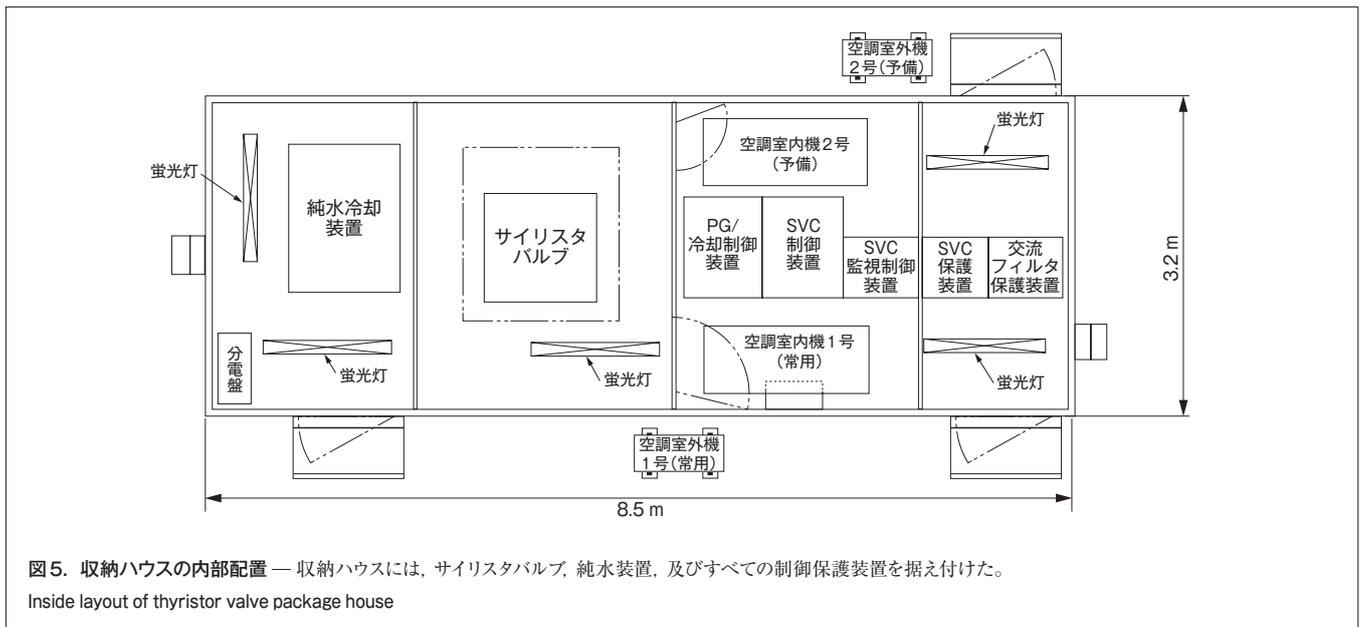


図4. 機器の配置 — 限られたスペースに機器を配置した。
General arrangement of SVC



(4) サイリスタバルブ及び純水装置 サイリスタバルブの点弧は光直接点弧方式とし、絶縁冷却は気中絶縁水冷方式で、純水を循環させる1重ループ構成としている。純水は収納ハウスの横に配置した純水冷却器で冷却する。

4.2 制御保護装置

制御保護装置は、すべて収納ハウス内に設置した(図5)。各制御保護装置の機能について以下に述べる。

(1) SVC監視制御装置 SVCの起動、停止、27停止(系統電圧低下時の自動停止)、及び27再起動(系統電圧復電時の自動起動)といったシーケンス制御をつかさどり、SVC用遮断器と交流フィルタ用遮断器の開閉、及びサイリスタバルブの運転停止を一連の順序で自動的に制御する。

後述する制御機能の切替え、SVCの目標電圧・電流値の設定、及びこれら目標値のスケジュール設定の各機能を備える。上位システムへのSVCの故障・状態信号の送出、及び制御信号の授受は、すべてこの装置を介して接続されている。これらは、盤面に集約表示し、個別表示は各装置に備えた。

(2) SVC制御装置 SVCの系統電圧制御とサイリスタバルブへの点弧位相制御をつかさどる装置である。32ビットデジタル制御方式を採用している。波形記録装置を備え、SVCが保護停止したときや系統電圧の変動幅が規定の範囲を超えたときに波形を記録・保存し、事後の各種分析に活用している。

(3) PG (Pulse Generator) / 冷却制御装置 SVC制御装置からの点弧位相制御信号を基に、サイリスタバルブへ適切なタイミングで光点弧信号を送出する機能と、サイリスタバルブの異常を検出する機能を備える。また、サイリ

スタバルブを冷却する純水冷却装置の純水温度制御や純水流量監視などの保護機能を備える。

(4) SVC保護装置 この装置にはデジタル継電器方式を採用した。TCT用変圧器の保護を主目的とするが、サイリスタバルブの過電流保護も兼ねている。更に、その変圧器二次回路の地絡保護機能では、非接地単相回路をサイリスタでスイッチングする極めて特殊な電圧波形から地絡を検出する。

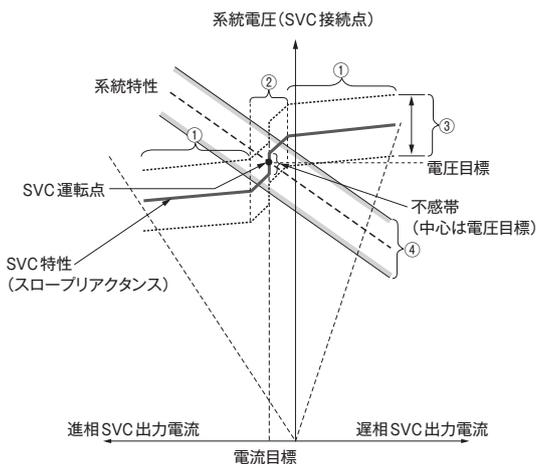
(5) 交流フィルタ保護装置 交流フィルタ保護を主目的としたアナログ・デジタル継電方式を採用している。コンデンサ保護、リアクトル保護、及び高調波を含む過電流保護などの機能を備えている。

4.3 系統電圧制御方式

SVCの電圧制御特性を図6に示す。無効電力出力の制御目標値は、系統電圧及びSVC出力電流に設定する。系統電圧の目標値の設定には、固定値制御方式、又は系統電圧の緩やかな変動に追従し系統の変圧器タップ制御と協調するフローティング制御方式を選択できる。また、どちらの制御方式であっても、電圧と電流の目標値を1日の系統負荷変動に応じたあらかじめ設定した値に自動的に変化させる、スケジュール設定機能を備えている。電圧調整感度を定めるにあたって設定するSVC特性(スロープリアクタンス)に不感帯付きの折れ線を採用し、小さな電圧変動と大きな電圧変動に対するSVCの感度を変えることができるようにした。

九州本土との長距離交流ケーブルで、1回線開放から復旧する場合の解析結果を図7に示す。

SVCがない場合、五島列島内の系統で20%程度の電圧低下が、また、復旧時に10%程度の過電圧が見られるが、SVCがある場合は、いずれも±数%以内の電圧変動に収まる。



- ①大きな電圧変動(事故時)運転領域。
- ②小さな電圧変動(通常時)運転領域。
- ③フローティング制御方式の場合、電圧目標は系統電圧検出値の数分オータの時定数による一次遅れ出力を使用し、SVC特性は系統電圧の緩やかな変動に追従する。
- ④常時の負荷変動などによる系統電圧変動範囲。

図6. SVCの電圧制御特性 — SVCの電圧制御は、電圧目標値のフローティング制御機能と、折れ線スローリアクタンス特性を備えている。
Voltage control characteristics of SVC

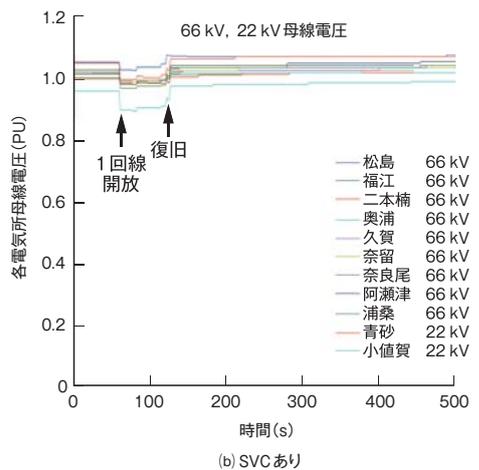
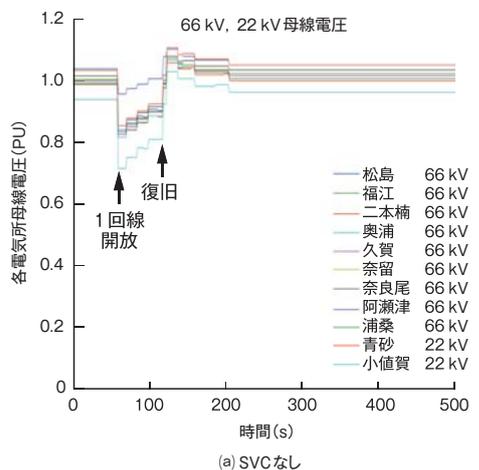
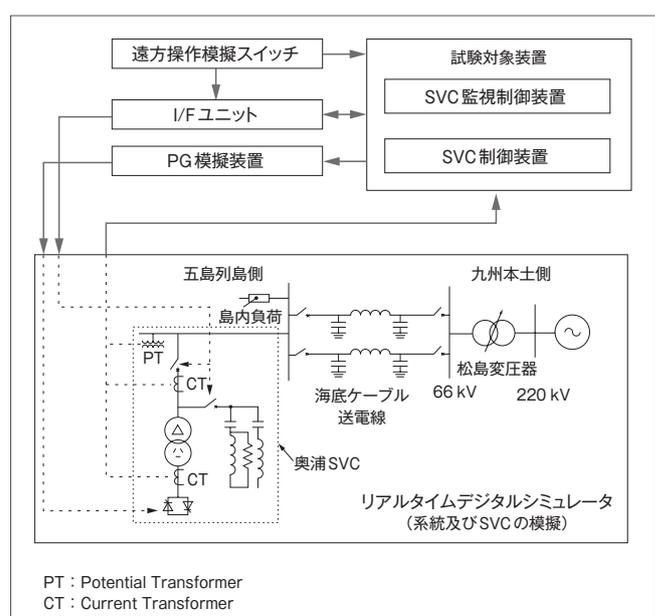


図7. SVC適用効果の解析例 — SVC設置の効果の一例として、その電圧制御方式を考慮した系統電圧変動解析結果を示す。SVCありのケースでは、電圧変動が大幅に抑制されている。
Results of numerical simulation of SVC performance

5 工場シミュレータ試験

SVCの電圧制御機能とシーケンス制御機能を検証する目的で、電力系統リアルタイム デジタルシミュレータを用いた組合せ試験を、工場パッケージ内へ据え付ける前に実施した。試験時の構成を図8に示す。シミュレータ内にSVC及び主要な系統を模擬し、試験用のインタフェース (I/F) ユニット及び模擬PG装置を介して、試験対象であるSVC監視制御装置とSVC制御装置を接続した構成で、実システムと同様の操作と監視ができる環境を構築して実施した。



PT : Potential Transformer
CT : Current Transformer

図8. シミュレータ試験の構成 — 工場パッケージハウスの前に制御装置を組み合わせて、シミュレータ試験を実施した。
Configuration of simulator test

この組合せ試験でシーケンス制御の一部を改良し、基本制御機能の期待どおりの動作を検証でき、SVCのもっとも重要な制御機能をあらかじめ確認することで、現地での問題発生リスクを最小限にした。

6 系統接続試験

2007年2月から機器の搬入を開始し、単体試験と無課電組合せ試験を完了後、同年5月から6月まで系統接続試験を実施した。系統接続試験の試験項目は下記のとおりである。

- (1) 電圧制御機能の確認試験
- (2) 系統構成の変更試験
 - (a) 本土側変圧器のタップ変更時
 - (b) 五島列島内電力用コンデンサのオン/オフ時
 - (c) 五島列島内66kV送電線の2回線と1回線の切替え時
 - (d) 本土連系66kV送電線の2回線と1回線の切替え時
 - (e) 27停止、27再起動
 - (f) 五島列島内の発電機運転時
- (3) ヒートラン試験
- (4) 実運用試験

系統接続試験を計画するときに、SVCの効果、五島列島内の電圧変動、及び高調波性能の事前解析を実施した。系統接続試験とこれらの解析の結果はほぼ一致し、目標とする制御性能の達成が確認された。

7 あとがき

長距離交流ケーブル連系の受電端では、系統電圧変動と高調波共振が懸念される場合がある。このような懸念への対策として、TCT + 交流フィルタで構成されるSVCが有効である。

SVCの開発にあたっては系統解析技術を駆使し、十分な事前評価を行って実機に反映させ、系統接続試験でその性能を検証した。

今回開発した九州電力(株)奥浦系統開閉所向けSVCは、系統接続試験において、電圧変動と高調波の抑制性能が目標効果を達成していることを確認した後、運用開始以来、五島列島の電力品質の向上に寄与している。

今後増加する離島や遠隔地への長距離交流ケーブル送電において発生する同様な問題に対し、今回開発したSVCの適用は非常に有効な対策である。

謝 辞

このSVCの開発に対し、有益なご助言やご指導をいただいた、特に九州電力(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 阿南文政, ほか. "長距離ケーブル系統の特殊現象の概要と体系化". 平成18年電気学会全国大会, 横浜, 2006-03, 電気学会, 7-127. (CD-ROM).
- (2) 飯山和彦, ほか. "わが国最長の交流長距離ケーブル系統における高調波共振とその対策". 平成18年電気学会全国大会, 横浜, 2006-03, 電気学会, 7-128. (CD-ROM).
- (3) Anan, F., et al. "Countermeasure for Substation Equipment Against Various Special Phenomena in Japan's Longest (54km) AC Cable Transmission System". IEEE PES General Meeting, Denver, USA, 2004-06, IEEE. (CD-ROM).



田村 裕治 TAMURA Yuuji

電力流通・産業システム社 電力流通システム事業部 海外電力技術部主務。変電システムの営業技術に従事。電気学会会員。
T&D Systems Div.



宮崎 保幸 MIYAZAKI Yasuyuki

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター エネルギーソリューション開発部主査。系統安定化機器、制御システムの研究・開発に従事。電気学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center