

過渡安定度向上を目的としたSVG

正城健次* 西村和敏**
 山中大輔*
 貞廣光紀**

SVG for Transient Stability Improvement

Kenji Masaki, Daisuke Yamanaka, Koki Sadahiro, Kazutoshi Nishimura

要旨

電力システムには、系統安定度や電圧変動といった系統問題がある。FACTS(Flexible AC Transmission Systems)機器は、安価で効率的に系統問題への対策が可能であり、最近では、様々な系統問題を解決する手段として、FACTSの適用が広がっている。

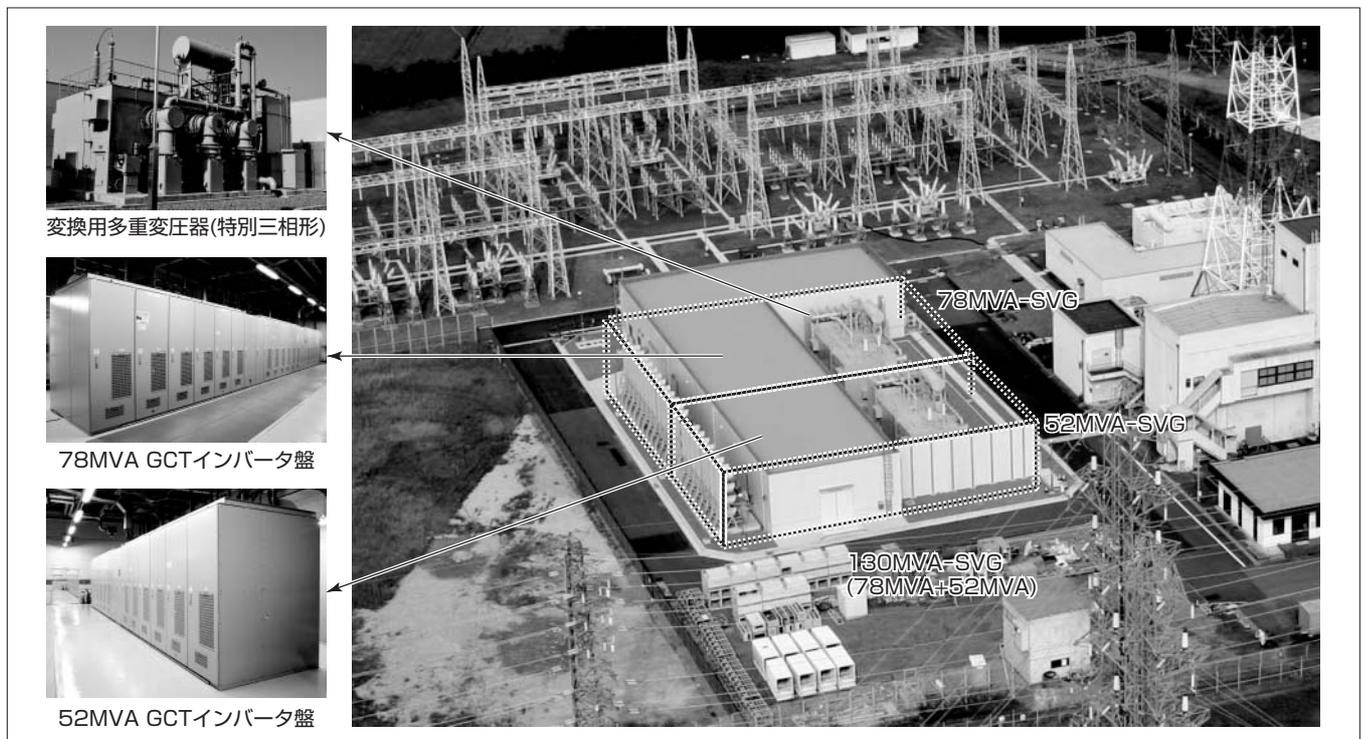
三菱電機は、1991年に世界で初めて静止型無効電力補償装置SVG(Static Var Generator)^(注1)を関西電力株の犬山開閉所に納入した。このSVGの目的は、水力幹線系統の定態安定度の向上であった。その後、関西電力株神崎変電所に電圧安定性の向上を目的としたSVGを設置した。

近年、電力会社では経済性や供給信頼性を考慮した送電系統の再構築が行われ、三菱電機は其中で生じる様々な系統問題を解決する手段として、より高度な系統要求である過渡安定度向上機能で事故時の発電機脱調防止を可能にするSVGを開発した。

2013年に三菱電機は世界に先駆けて過渡安定度向上機能を持つ130MVA-SVGを関西電力株犬山開閉所に納入した。

定態安定度向上に対する冗長性を持つ78MVA-SVGと52MVA-SVGの2系並列システムである。SVGが連系する水力幹線系統を詳細に模擬したリアルタイムシミュレータで、系統事故時の過渡安定度向上性能検証試験を実施して、発電機の脱調を防止することを確認した。フィールド試験では、SVGによって定態安定度を向上させ、送電可能容量が全発電機連系時の最大潮流まで増加することを確認した。また、運転開始後に得られた系統事故時の実測波形から、SVGが良好な運転継続性能を持ち、適正に動作することを確認した。

(注1) SVGを欧米ではSTATCOM(STATIC synchronous COMPensator)と称する。



関西電力株犬山開閉所の130MVA GCT-SVG

定格容量130MVAのSVGであり、2013年6月から運用を開始している。GCT(Gate Commutated Turn-off)サイリスタを適用したインバータをPWM(Pulse Width Modulation)制御して、無効電力を進相から遅相まで高速かつ連続に補償することができる。この装置には、無効電力補償によって定態安定度を向上させる従来機能に加え、系統事故による発電機脱調を防止する過渡安定度向上機能を世界で初めて搭載しており、水力幹線系統の安定化に寄与している。

1. ま え が き

三菱電機は、関西電力(株)犬山開閉所に水力幹線系統の定態安定度の向上、送電可能電力量の増大を目的として、1991年に80MVAのSVGを世界で初めて納入し、水力エネルギーの安定供給に20年以上寄与してきた。

近年、経済性や供給信頼性を考慮した送電系統の再構築が行われ⁽¹⁾、その中で、系統の様々な問題を解決する手段として、安価で効率的に対策が可能なSVGに対する要求も高度化し、新たに過渡安定度の向上による事故時の発電機脱調防止が期待されていた。

三菱電機は、従来の系統要求である定態安定度向上に加え、より高度な系統要求である過渡安定度向上を可能にするSVGを開発し、関西電力(株)犬山開閉所の80MVA-SVGを世界初の過渡安定度向上機能を持つ130MVA-SVGに更新した。

本稿では、その過渡安定度向上SVGについて、システム仕様、主回路技術、過渡安定度向上制御技術、電力系統シミュレータによる検証試験、系統連系試験、運転開始後の系統事故時の運転実績について述べる。

2. システム概要

2.1 目 的

SVGが設置されている水力幹線系統は、図1のように水力発電所群からの潮流が154kV長距離送電線を介して約250km離れたB変電所、C変電所まで送電される。そのため、重潮流時は定態安定度が厳しくなり、発電機全台分の出力が送電できなくなる。また、重潮流時は過渡安定度も厳しくなり、154kV系統以外での過酷な系統事故に対して発電機が脱調するおそれがある。

これらの系統問題を解決するため、系統解析によって定態安定度向上及び過渡安定度向上に必要なSVGシステムを求めたところ、過渡安定度向上に130MVA-SVGが必要であるため、定態安定度向上に対する冗長性を考慮して78MVA-SVGと52MVA-SVGの2系並列システムを導入

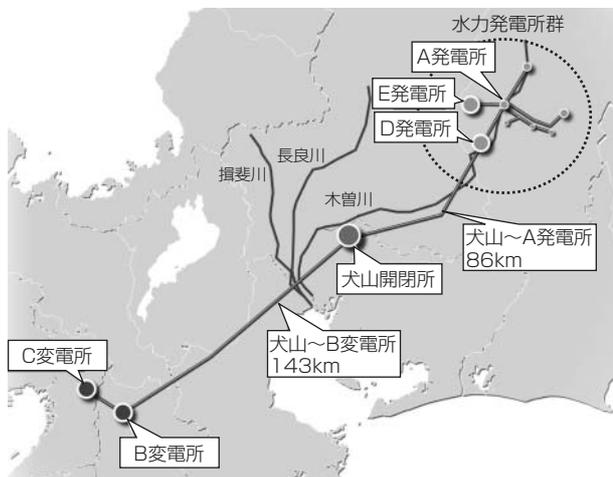


図1. 水力幹線系統

することとした⁽²⁾。また、SVG設置場所は、定態安定度及び過渡安定度の向上に最も効果的な基幹系統と水力発電機群の電気的中間地点に当たる犬山開閉所とした。

2.2 主回路構成

130MVA-SVGの主回路構成を図2に示す。主回路は単相3レベルインバータを適用し、多重変圧器で直列接続している。78MVA-SVGは3段直列多重構成、52MVA-SVGは2段直列多重構成であり、それぞれ多重変圧器で154kV系統と接続している。主回路素子にスナパレスの大容量6kV-6kA GCTサイリスタを用いることで、高信頼性、コンパクト化、低損失を実現することができる。表1に過渡安定度向上SVGの主な仕様を示す。

2.3 過渡安定度向上制御

2.3.1 基本構成

図1の水力幹線系統は送電距離が長いため、重潮流時は同期化力と制動力が弱くなる。そのため、定態安定度と過渡安定度が低くなり、それらを向上させるためには系統の同期化力と制動力を向上させる必要がある。

そこで、SVGの系統制御の基本構成は、図3に示すように系統の同期化力向上を図るAVR(Automatic Voltage Regulator)制御、制動力向上を図るPSS(Power System Stabilizer)制御及び重潮流時に所定の無効電力を出力して定態安定度向上と送電ロス軽減を図るQバイアス制御で構成した⁽³⁾。

2.3.2 過渡安定度向上制御

AVR制御とPSS制御によって過渡安定度が向上するが、更に過渡安定度を向上させるために系統事故時の系統状態

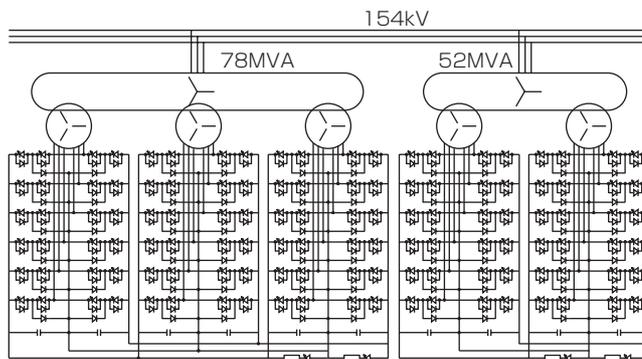


図2. 主回路構成

表1. 過渡安定度向上SVGの主な仕様

系構成		78MVA側	52MVA側
定格容量		±130MVA (78MVA+52MVA)	
定格交流電圧		154kV	
装置構成		2系システム(3段直列多重+2段直列多重)	
インバータ仕様	素子	6kV-6kA GCT, 1S1P	
	インバータ方式	3レベル×三相×3段	3レベル×三相×2段
	PWM制御	5パルス	
	定格交流電圧	3.846V(相電圧)	
定格交流電流		2.253A	
変換用多重変圧器	定格容量	1次:78MVA 2次:26MVA×3段	1次:52MVA 2次:26MVA×2段
	結線	1次:星型, 2次:開放星型	
	定格電圧	1次:154kV, 2次:3.846V×√3	

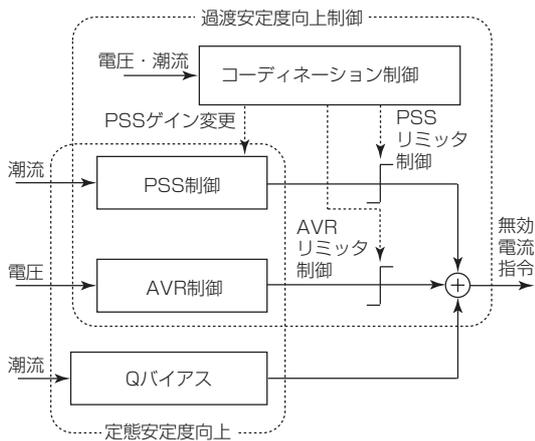


図3. 過渡安定度向上の制御方式

に応じてAVR制御とPSS制御の協調を図るコーディネーション制御を採用した。

まず過渡安定度向上の対象となる系統事故を検出すると、系統事故中のPSS制御出力を制限して、系統事故中のSVGの無効電力出力をAVR制御が支配することで同期化力向上効果を高め、過渡一波脱調を防止する。

さらに、重潮流で過渡安定度が厳しい系統断面では、事故が除去された後は、AVR制御及びPSS制御のリミッタを調整するとともに、更に制動力を向上させるため、PSSゲインを上げる。二波目以降の系統動揺に対してPSS制御による制動力向上効果を高めることで発電機の脱調を防ぐ。

このSVGでは、このようなコーディネーション制御によって過渡安定度向上効果を最大限に高めている。

3. 性能検証試験

3.1 シミュレータ試験

図1の水力幹線系統を詳細に模擬したリアルタイムシミュレータに130MVA-SVGミニモデルを接続し、様々な系統事故を発生させたときのSVGの動作を検証した⁽⁴⁾。図4にシミュレータ試験構成を示し、図5に安定化対象事故のうち最過酷事故時のシミュレータ試験結果を示す。

系統事故が発生すると、SVGはコーディネーション制御によってPSS制御の出力を制限し、AVR制御による同期化力向上効果を高め、進相無効電力をフル出力して過渡一波脱調を防止している。事故が除去されると、AVR制御、PSS制御のリミッタが大きく開くとともにPSSゲインを高くすることで制動力向上効果を高め、二波目以降の系統動揺を抑えて発電機の脱調を防止できていることが分かる。また、事故中、SVG接続母線電圧は0.7pu程度まで低下しているが、SVGはGB(Gate Block)せず運転継続しており、過渡安定度向上効果が確認できた。

3.2 系統連系試験

系統連系試験では、送電容量の向上確認試験や1回線開放時の系統動揺抑制試験を行い、SVGによる定態安定度向上効果を確認した⁽⁵⁾。

過渡安定度向上を目的としたSVG・正城・山中・貞廣・西村

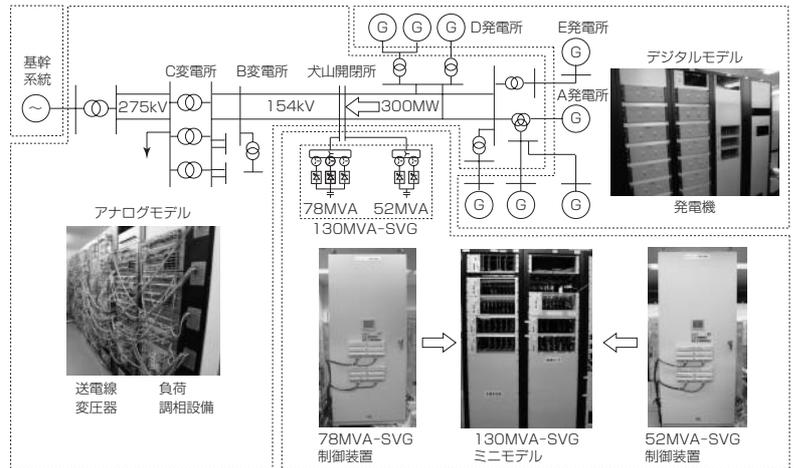


図4. シミュレータ試験の構成

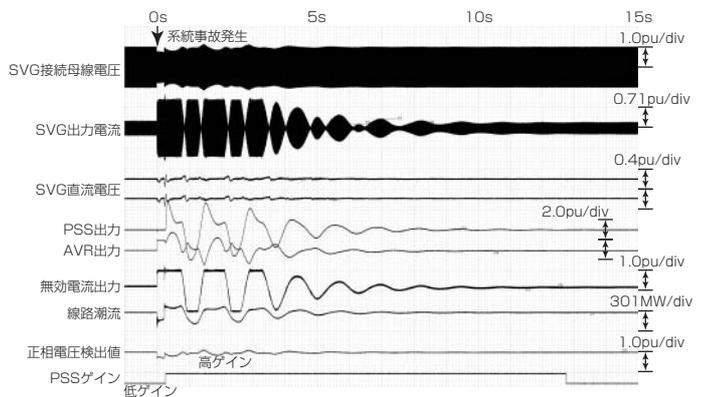


図5. シミュレータ試験の結果

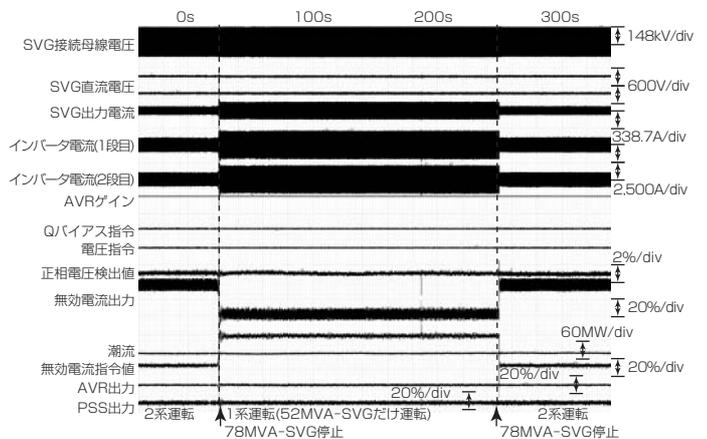


図6. 送電容量向上確認試験の結果

3.2.1 送電容量向上確認試験

図1に示す水力発電機群からC変電所までの送電線を全て2回線として水力発電機群の出力を徐々に増加させ、安定して送電できる電力の限界値がSVGによって水力発電機群の全台定格出力時の最大潮流まで増加することを検証した。最大潮流時の試験結果を図6に示す。

最大潮流でも系統電圧や潮流、SVGの無効電流出力は安定であり、SVGによって定態安定度が向上して最大潮流まで送電容量を向上できることを確認した。容量が小さい52MVA-SVGだけで定態安定度を維持できるため、冗長性も確認できた。

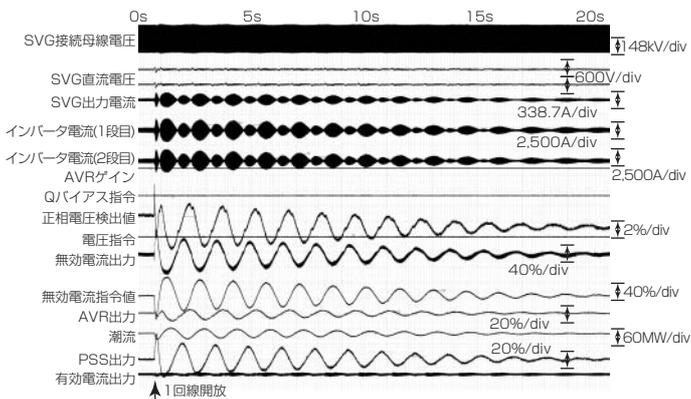


図7. 系統動揺抑制効果確認試験の結果

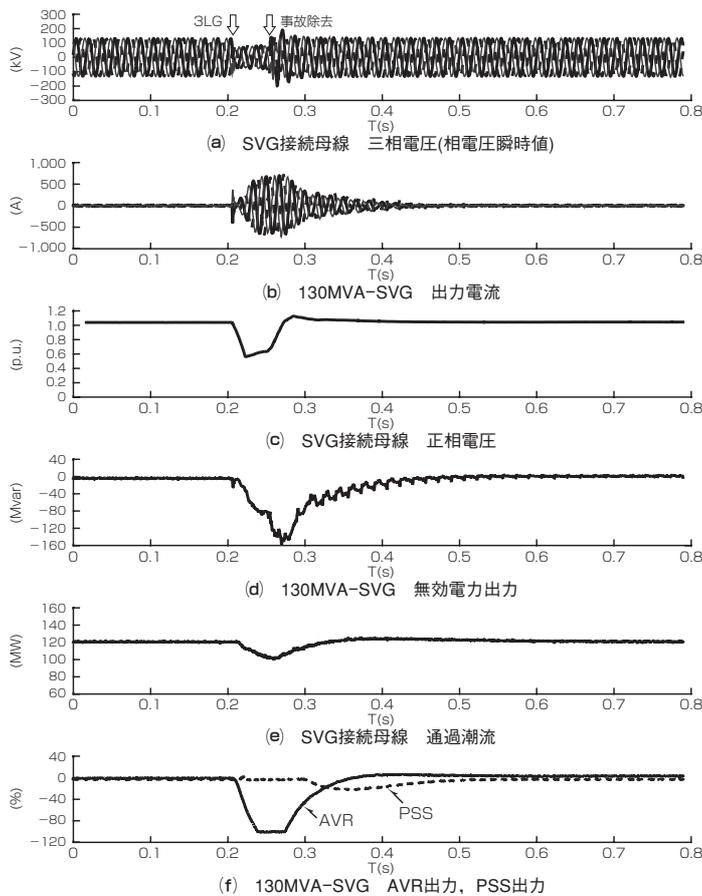


図8. 1回線三相地絡事故時の実測結果

3.2.2 系統動揺抑制効果確認試験

犬山開閉所からB変電所までの送電線を1回線開放して系統に動揺を発生させ、その動揺をSVGが十分に抑制して定常安定度を維持することを検証した。SVGは2系のうち容量の小さい52MVA-SVG 1台の運転とした。試験結果を図7に示す。

1回線開放によって系統インピーダンスが急増し、水力発電機群の相差角が拡大して系統動揺が発生する。SVGがない場合は、系統の同期化力と制動力が不足して脱調にいたるケースであるが、52MVA-SVGで動揺が抑制されて1回線停止時の定常安定度を確保することが確認できた。

4. 運転実績

130MVA-SVGは、2013年6月から運転が開始され、一相地絡事故、二相地絡事故、三相地絡事故といった様々な系統事故の実測波形が得られた⁽⁶⁾。図8にB変電所からC変電所までの送電線で発生した1回線三相地絡事故時の実測波形を示す。

三相地絡事故でSVG接続母線電圧は60%以下まで低下したが、事故発生時や除去時の急峻(きゅうしゅん)な電圧変化にも耐え、SVGはGBせず運転を継続した。

SVGは、系統事故を検出すると、系統事故発生から除去までの間、コーディネーション制御でPSS制御出力を制限している。AVR制御で系統事故による電圧低下を抑制するために、SVGは安定に進相無効電力100%出力を行っており、事故中の系統電圧を10%程度高めている。SVGは、復電を検出すると二波目以降の系統動揺に備え、PSS制御の制限を解除して系統の制動力向上を図っている。

130MVA-SVGが良好な運転継続性能を持ち、かつ過渡安定度向上制御が適正に動作することを確認できた。

5. むすび

世界初の過渡安定度向上機能を持つ130MVA-SVGに適用した技術及びその性能検証について述べた。

電力系統を取り巻く環境の変化に伴い顕在化する系統問題に対して、SVGなどのFACTS機器はますます重要な役割を担うことが期待される。

参考文献

- (1) Yagi, M., et al: Methodology of Power System Redesign Aimed at Reducing Capital Investment and Maintenance Costs for Aged Assets, Proc. of 2006 CIGRE, C1-107 (2006)
- (2) 松下義尚, ほか: 過渡安定度向上機能を有する130MVA-SVG設置計画, 平成25年電気学会電力エネルギー部門大会論文集, 152 (2013)
- (3) 岩崎慎也, ほか: 130MVA-SVGの制御方式検討, 平成25年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 153 (2013)
- (4) 今西隆夫, ほか: 過渡安定度向上SVGの制御装置検証試験, 電気学会電力技術研究会資料. PE, No.110, 1~4 (2013)
- (5) 藤井俊成, ほか: 犬山開閉所新SVG(STATCOM)の運用前試験その2~系統連系試験~, 平成26年電気学会全国大会講演論文集, 6-187 (2014)
- (6) 今西隆夫, ほか: 犬山開閉所新SVG(STATCOM)における系統事故時の運転実績, 平成26年電気学会電力エネルギー部門大会講演論文集, No.111 (2014)