

電圧変動問題の解決に貢献する配電系統用静止型無効電力補償装置

Distribution Static Var Compensators and Static Synchronous Compensators for Suppressing Voltage Fluctuation

小島 武彦 KOJIMA, Takehiko

磯谷 仁志 ISOTANI, Hitoshi

山田 真 YAMADA, Makoto

近年、太陽光発電の導入が急速に拡大しているが、導入の拡大に伴って配電線の電圧上昇などの問題が生じてくる可能性がある。富士電機では、配電系統の電圧問題の対策として無効電力により電圧を制御する静止型無効電力補償装置（SVC）を開発している。他励式配電系統用 SVC は、高調波フィルタが不要なことからシンプルな装置構成であり、東北電力株式会社管内でのフィールド試験により電圧上昇を抑制する効果を確認した。自励式配電系統用 SVC は、SiC 素子を用いており、その低損失の特性を生かした自然空冷で単柱への取付けが可能な小型・軽量の装置である。

The rapidly expanding introduction of photovoltaic power systems in recent years may cause problems such as a voltage rise in distribution lines. To solve the voltage problems in distribution systems, Fuji Electric has developed static var compensators (SVCs) and static synchronous compensators (STATCOMs), which control voltage with reactive power. Fuji Electric's SVCs offer a simple equipment configuration without the need for a harmonic filter. We confirmed the effect of suppressing a voltage rise by conducting a field test within the territory of Tohoku Electric Power Co., Inc. The distribution STATCOMs are compact and lightweight devices that use SiC devices to achieve single-pole tower mounting with natural air cooling by taking advantage of these low power dissipation characteristics.

① まえがき

近年、「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」（FIT）などにより、太陽光発電の導入が急速に拡大している。一方、太陽光発電は天候により出力が変動する不安定な電源であり、導入の拡大に伴って配電線の電圧上昇などの問題が生じる。従来の電圧制御方法は、配電線の自動電圧調整器（SVR：Step Voltage Regulator）などにより、適正電圧の範囲内に収まるようにしていた。SVR は、タップ切換えによる段階的な電圧制御や時間遅れがあるため、不規則かつ急峻（きゅうしゅん）な電圧変動への対応は困難であった。

富士電機では、配電系統の電圧を安定化させるため、無効電力で電圧を制御する配電系統用の静止型無効電力補償装置（SVC：Static Var Compensator）を提供している。本稿では、この配電系統用 SVC の構成や特徴について述べる。

② 配電系統用 SVC の特徴

2.1 SVR と SVC の違い

図 1 に、SVR と SVC における電圧調整の概念図を示す。

従来の電圧制御の中心となっている SVR は、変圧器のタップを切り換えることにより電圧を調整する直列機器である。タップが切り換えられると、SVR が設置された地点より先の電圧が一律に変更される。SVR による電圧の制御方法は、SVR の設置点における電圧および通過電流を計測して目標の電圧になるようにタップを動作させるものである。タップ動作であるため、図 1 (a) に示すように電圧調整は 100 V 幅など段階的となる。

一方、SVC は無効電力を系統に注入することにより電

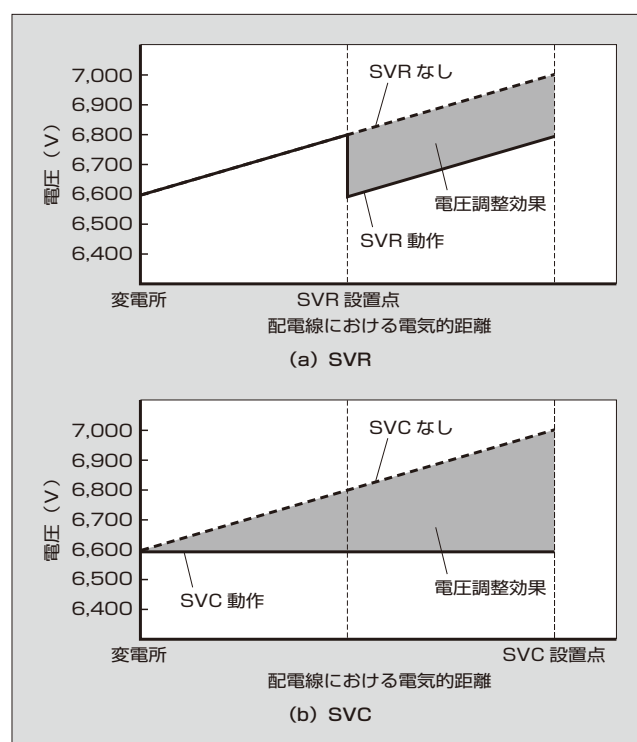


図 1 電圧調整の概念図

圧を調整する並列機器である。SVC の設置点と変電所の間におけるインダクタンス X と無効電力 Q の関係は次の式で近似的に計算できる。

$$\Delta V = \frac{X \cdot Q}{V} \dots\dots\dots (1)$$

ΔV ：電圧の調整幅（V）

X ：変電所から SVC 設置点までのインダクタンス（Ω）

Q：無効電力（var）
V：系統の電圧（V）

SVC による電圧の制御は、SVC の設置点で計測した電圧と目標電圧の差に応じて必要な無効電力を出力することによって行う。なお、SVC の無効電力は連続的な出力ができるため、図 1 (b) に示すように電圧調整幅は連続的となる。

SVC は、変電所からのインダクタンスが大きくなる箇所、つまり変電所から離れた箇所に設置する方が変電所に近い箇所に設置するより電圧を調整できる。そのため、太陽光発電などにより変電所から離れた地点で電圧上昇などの問題が発生した場合は、SVC による電圧調整が有利となる。また、太陽光発電などによる急峻な電圧変動を SVR で対応しようとする、SVR の機械的なタップ動作の回数が増加してしまい、場合によっては SVR の交換時期が早まってしまう恐れもある。一方、SVC であれば急峻な電圧変動を制御しても機械的な動作がないため交換周期が短くなることはない。

SVR と SVC の特徴を考慮すると、SVR を変電所側に設置し、SVC を配電線の末端側に設置することがそれぞれの特長を生かす方法となる。図 2 に、SVR を 2 台設置した場合と、SVR および SVC を 1 台ずつ設置した場合の電圧調整の概念図を示す。

図 2 (a) では 2 台の SVR により電圧調整を行っているが、末端で電圧上昇が発生している。一方、図 2 (b) では SVR と SVC により系統全体で電圧上昇の発生を抑制できている。特に、末端の電圧上昇は SVC の制御によって抑制し、変電所側の電圧上昇は SVR の制御によって抑制できている。

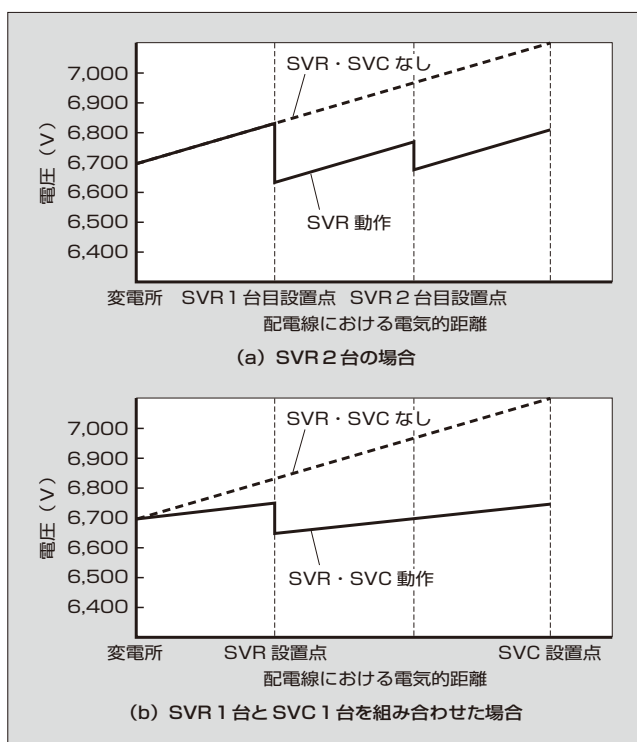


図 2 複数台による電圧調整の概念図

る。このように既存の SVR と SVC で協調しながら系統全体の電圧を健全に保つことが可能となる。

なお、SVC には 2 種類あり、リアクトルなどに流れる電流を制御することで無効電力を発生させる他励式 SVC、ならびに自己消弧形のスイッチング素子を用い、任意の位相の電流または電圧を発生することで無効電力を発生させる自励式 SVC がある。富士電機が開発している他励式および自励式の配電系統用 SVC について次に述べる。

2.2 他励式配電系統用 SVC の構成

一般に、他励式配電系統用 SVC には、サイリスタを用いてリアクトルに流れる電流を直接スイッチングすることにより制御するサイリスタ制御リアクトル方式（TCR：Thyristor Controlled Reactor）がある。この方式では、リアクトルの電流をサイリスタによって直接入切するため高調波フィルタが必要である。これに対して、富士電機は、東北電力株式会社と共同研究を行い、磁束制御技術を適用した可変インダクタを用いて新型の他励式配電系統用 SVC を開発した⁽¹⁾。この方式では、直流電流によってリアクトルに流れる電流を制御することから高調波フィルタが不要となり、従来に比べてシンプルな装置構成の SVC を実現できる。

新型の他励式配電系統用 SVC の基本原理を図 3 に示す。従来の他励式配電系統用 SVC とは原理が異なっている。磁心に交流巻線と制御巻線を実装しており、制御巻線に直流電流を流すと磁気飽和が生じ、実効的な透磁率が減少する。この原理により、磁束密度を制御し、透磁率を変化させることで実効的なインダクタンスを制御することができ、系統に流入する無効電力を調整することができる。主回路が鉄心や巻線のみで構成できるため、サージなどに対する耐性が強く信頼性を確保しやすい構成が可能となる。また、無効電力の出力を調整する制御電流は直流であるため、制御回路およびソフトウェアのアルゴリズムもシンプルに構成できる。

開発した他励式配電系統用 SVC の外観を図 4 に、仕様を表 1 に示す。

2.3 自励式配電系統用 SVC の構成

自励式配電系統用 SVC は、自己消弧形のスイッチング素子を用いて無効電力を調整し、電圧を調整する装置であ

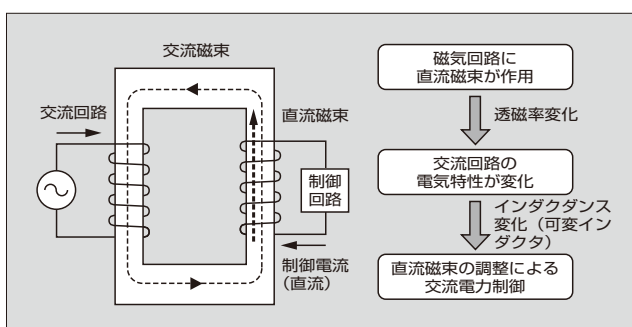


図 3 他励式配電系統用 SVC の基本原理



図4 他励式配電系統用 SVC

表1 他励式配電系統用 SVC の仕様

項目	仕様
定格容量	300 kVA
可変容量	0 ~ 300 kvar (遅れ)
定格電圧	6,600 V
周波数	50/60 Hz
冷却方式	自然空冷
質量	4,000 kg 以下
外形寸法	W2,500 × D1,500 × H2,000 (mm)
主回路	可変インダクタ (高調波フィルタレス)

る。従来の自励式配電系統用 SVC は Si (シリコン) 半導体素子を用いたものであり、高耐圧と高周波スイッチングが難しく、損失と騒音の低減に限界があった。このため、従来は冷却ファンが必須であることからメンテナンス性に難があり、電柱への取付けは 2 本柱が必要であった。

富士電機では、この対策として、冷却ファンが不要な自励式配電系統用 SVC の実現を目指し、Si 素子に代わるパワー半導体素子として SiC (炭化けい素) 素子を適用した SVC の開発を進めている。SiC は Si に比べて、高耐圧と高周波スイッチングが可能な半導体材料である。現在、3.3 kV 200 A の SiC パワー半導体を開発し適用している。開発した自励式配電系統用 SVC の回路を図 5 に、仕様を表 2 に示す。

3.3 kV の SiC-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) と SiC-SBD (Schottky Barrier Diode) からなる SiC モジュールを用いた 3 レベルインバータと連系変圧器によって、自励式配電系統用 SVC を構成している。熱解析を行うことにより、本構成で冷却ファンが不要な自然空冷を達成できる見通しを得ている。

SiC 素子の適用で自励式配電系統用 SVC は他励式配電系統用 SVC と比較して軽量化でき、単柱への取付けも可能な質量と体積となっている。

2017 年度に一般財団法人 電力中央研究所の赤城試験センターでの実証試験を予定しており、2018 年度には電力会社のフィールドでの実証を予定している。

なお、この自励式配電系統用 SVC の成果は、国立研究

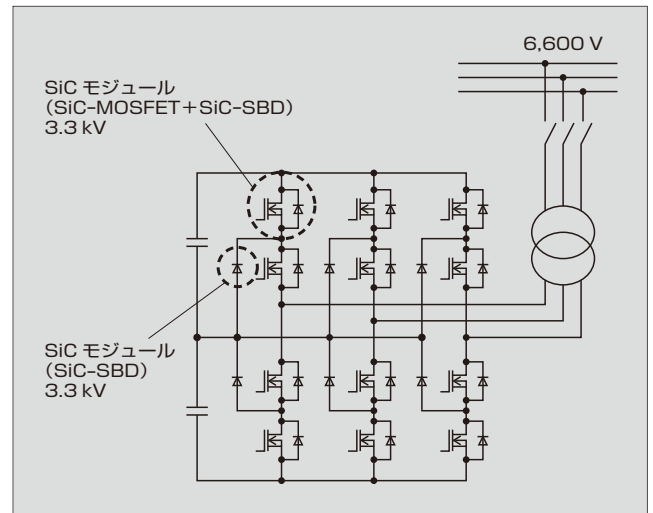


図5 自励式配電系統用 SVC の回路

表2 自励式配電系統用 SVC の仕様

項目	仕様
定格容量	300 kVA
可変容量	0 ~ 300 kvar (進み, 遅れ)
定格電圧	6,600 V
周波数	50/60 Hz
冷却方式	自然空冷
質量	1,800 kg 以下 (60 Hz)
外形寸法	W1,300 × D1,000 × H2,500 (mm) 以内
主回路	変圧器, インバータ

開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の“分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業”において得られたものである。

③ 配電系統における SVC の動作

新型の他励式配電系統用 SVC による電圧調整の動作を確認するため、東北電力株式会社の協力を得て、東北電力株式会社管内の実配電線においてフィールド試験を実施している。^{(2),(3)} フィールド試験における系統図を図 6 に、設置状況を図 7 に示す。

フィールド試験の結果を図 8 と表 3 に示す。図 8 は、他励式配電系統用 SVC を設置する前後のそれぞれ 1 日間の電圧変化の例を示したものである。このケースでは、他

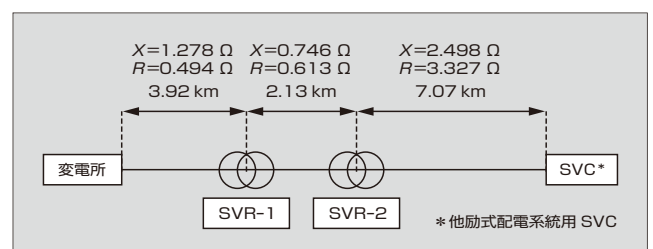


図6 フィールド試験系統図



図7 フィールド試験における他励式配電系統用 SVC の設置状況

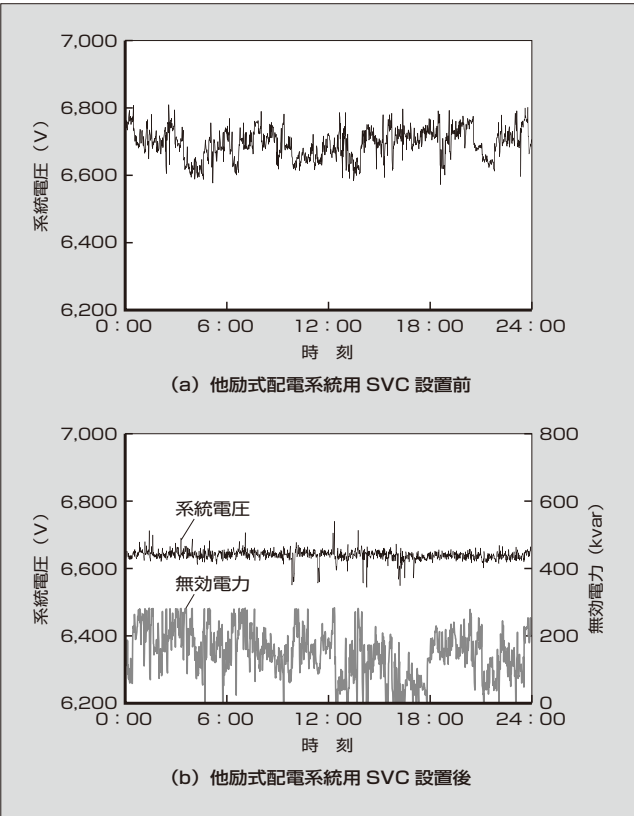


図8 フィールド試験結果の例

表3 フィールド試験の結果

項 目	試験結果	
	設置前	設置後
平均電圧	6,680 V	6,639 V
最大電圧	6,838 V	6,740 V
最小電圧	6,512 V	6,543 V
電圧管理範囲内の頻度 *1	72.9%	99.9%
平均無効電力量	—	146 kvar
最大電圧変化 *2	210 V	120 V
SVR-2 の動作回数	15 回	5 回

* 1：管理範囲を 6,350 V から 6,720 V と仮定し、1 日を 100% とした際に電圧が範囲内にある割合
* 2：現在の電圧データと 1 分前の電圧データとの差分の絶対値で最大のもの

励式配電系統用 SVC の制御として上限電圧（6,700 V）を超過すると無効電力を出力して電圧上昇を抑制する制御方式としている。対象の系統は、他励式配電系統用 SVC を設置する前は一時的に 6,800 V を超える電圧が発生するなど平均的に電圧が高い系統であった。設置後では、最大電圧および平均電圧が低下し、電圧上昇を抑制できていることが確認できる。さらに、急峻な電圧変動を抑制する効果も確認できる。

また、系統内の SVR-2 における一日の動作回数が他励式配電系統用 SVC を設置する前に比べ、設置後には減少していることが確認できる。一般に、SVC と SVR を同一系統に設置した場合に、お互いの制御が干渉して SVR の動作回数が多くなるハンチング現象や、SVC のみに制御が偏って SVR が動作しなくなるという問題が起こることがある。しかし、SVR の設置位置や整定値を考慮し、SVC の制御や整定を適切に行うことによりハンチングなどの問題を抑制することができる。今回のフィールド試験において、SVR の動作回数が多くなるなどの問題が発生せず良好な結果となり、SVR と他励式配電系統用 SVC が協調して制御できることを確認できた。太陽光発電の導入が増えるとその出力変動が問題となるが、それに起因した SVR の動作回数の増加を抑制する効果があることが分かった。

4 あとがき

本稿では、配電系統用 SVC について電圧調整方法や自励式および他励式の原理や構成について述べた。他励式配電系統用 SVC のフィールド試験において電圧上昇を抑制する効果が確認でき、SVC によって太陽光発電による配電系統の電圧変動問題の解決に貢献できる。

富士電機では、配電系統用 SVC の製品開発を継続し、太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入拡大に貢献する装置を提供していく所存である。

最後に、他励式配電系統用 SVC の開発・設計・実証試験に多大なるご指導とご協力をいただいた東北電力株式会社殿、ならびに自励式 SVC の開発・設計に多大なるご指導をいただいた国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）殿の“分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業”の関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

- (1) 有松健司ほか. 磁束制御型高圧電圧調整装置の制御特性およびフィールド試験結果. 平成24年電気学会電力・エネルギー部門大会 No.28.
- (2) 大日向敬ほか. 磁束制御型高圧電圧調整装置の協調動作に関する一考察. 平成26年電気学会電力・エネルギー部門大会 No.171.
- (3) 大日向敬ほか. 磁束制御型高圧電圧調整装置の協調動作に

関する一考察（その2）、平成27年電気学会電力・エネルギー部門大会 No.199.



小島 武彦

電力・エネルギー制御システムの開発およびエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部次世代配電プロジェクト部担当部長。電気学会会員。



山田 真

電力流通分野の制御・保護・解析装置の企画・開発・エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部電力流通総合技術部課長補佐。電気学会会員。



磯谷 仁志

配電自動化システムの開発およびエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社発電・社会インフラ事業本部社会システム事業部次世代配電プロジェクト部課長補佐。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。