

配電線用SVCの開発

Development of SVC for Power Distribution Line

梶田 寛^{※1}
Hiroshi Kajita
若松 友晴^{※2}
Tomoharu Wakamatsu
苅川 謙治^{※3}
Kenji Fukawa
菅沼 政美^{※4}
Masami Suganuma

1 まえがき

SVC (Static Var Compensator)は、1970年頃から、鉄鋼メーカーをはじめ電気炉を使用する特高需要家などで、電圧降下の抑制装置として広く用いられてきた。電気炉などの大量の遅相無効電力を消費する装置は、その遅相電流により電圧降下を引き起こす。それを補償するために、SVCが用いられ、進相電力を発生させ、遅相電力を補償すると同時に電圧降下も抑制している。

これらのSVCは個別負荷対応装置といえるが、最近では高圧(6.6kV)配電線路の電圧調整に適用することが注目されている。

電力会社では、供給電力の品質向上施策として、配電線の電圧の適正管理、電圧変動の抑制対策などの施策が行われている。このなかで、高圧配電線に自動電圧調整器(SVR: Step Voltage Regulator)を設置することは広く行われている。特に電源から末端までの距離(以下、亘長(こうちょう))の長い配電線においては、SVRを多段に設置したり、柱上変圧器のタップの調整、場合によっては配電線の太線化が必要となる。

一方、配電線の電圧管理システムを将来的に見ると、長亘長線路の誘導負荷対策や、太陽光発電など分散型電源の系統連系による電圧変動などについての対策検討が必要となってきた。

これらのことを考慮しながら、配電線の電圧安定化を目的に、独自の主回路構成により、小形軽量で柱上設置可能な配電線用SVCを開発した。

なお、本装置の開発は中部電力㈱殿との共同研究により実施したものである。

以下に装置の特徴、動作原理、仕様、設置効果などについて紹介する。

2 配電線用SVCの目的と効果

配電線にSVCを設置する目的は、無効電力(遅相)補償や長亘長線路の末端電圧補償である。これは、結果的にその配電線の電圧安定化に寄与することとなる。

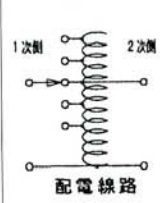
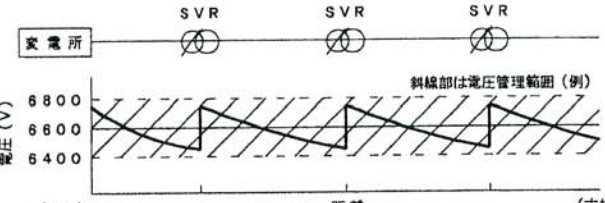
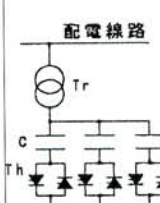
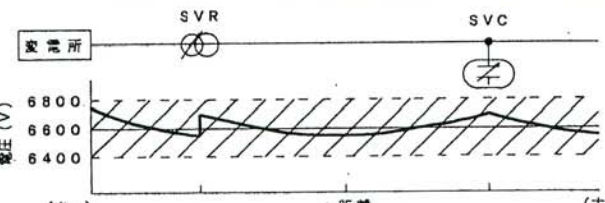
今回開発したSVCの設置効果を現状のSVRと比較したものが表1である。

SVRは、機械的な接点で変圧器のタップを切換え電圧を調整している。このため、接点寿命や、他のSVRとの協調を考慮して、応答時間は数十秒間で調整してある。また補償される電圧は設置点以降に限られる。

ところで、長亘長配電線では、SVRを多段に設置する必要があるが、この時、SVRがハンチング動作する恐れがある。これは、多数のSVRが独自に電圧調整動作を行うため、複数のSVRが互いにタップ切換を長時間繰返してしまう現象のことである。ハンチングを防止するために

表1 SVCとSVRの比較

Table 1. Comparison between SVC and SVR

機器の種類	結線図	配電線の電圧分布	電圧調整の特徴	その他特徴
SVR			1. 変圧器の昇圧、降圧原理により線路電圧を調整する 2. 段階的に制御 3. 電圧分布が鋸状 4. 補償される電圧は設置点より後方 5. 変電所の近くでも効果がある	1. 配電線に直列接続 2. 調整容量は配電線通過容量以上必要 3. 逆潮流時は固定タップへ移行する例が多い
SVC			1. 線路のインダクタンス分とSVCの進相電流により電圧を上昇させる 2. 段階的制御(昇圧) 3. 電圧分布が滑らか 4. 補償される電圧が設置点の前後に及ぶ 5. 変電所の近くでは効果が小さい	1. 配電線に並列接続 2. 調整容量は配電線通過容量と無関係 3. 逆潮流対応可能

※1 機器開発事業本部 電力機器開発部
※3 電力事業部 小形変圧器部

※2 電力事業部 制御機器部
※4 機器開発事業部 産業機器開発1部

は、各 SVR の電圧調整時限に差を持たせる必要があり、多段の場合は非常に長い時間を設定せざるを得ない場合がある。こうした配電線に、大容量の誘導性負荷が接続された場合、それに起因する電圧変動に対して SVR は高速応答ができないので、十分な電圧補償が困難となる。

一方、SVC はコンデンサをサイリスタスイッチで開閉することにより、電圧補償に必要な進相無効電力を配電線に供給する。半導体素子のスイッチは動作回数に制限が無く、応答速度も速い。また、補償される電圧は設置点の前後におよぶ利点がある。特に、長亘長配電線において、SVC は、線路のインダクタンス分による電圧降下が補償されるため、SVR の設置台数が削減できる。また、遅相無効電力量が減少するため、電力損失の抑制、送電容量の増加に寄与するという、SVR には無い効果が得られる。

3 SVC方式と動作原理

SVC には各種方式があるが、大別すると下記の三つの基本方式に分けられる。表 2 に、その 3 方式の構成、動作原理、特徴をまとめた。以下にその概要を説明する。

(1) TSC (Thyristor Switched Capacitor) 方式

サイリスタスイッチにより複数のコンデンサバンクを線路に投入／開放することにより、無効電力を段階的に補償する方式である。

特長として、高調波の発生が無く、常時の電力損失が小さいことが挙げられる。その反面、進相側のみの調整機能しかなく、また TCR 方式より応答が遅い。

(2) TCR (Thyristor Controlled Reactor) 方式

サイリスタにより、リアクトルに流れる電流を位相制御することで遅相無効電力を連続可変し、並列に設置した進相コンデンサと組み合わせることで、進相から遅相までの無効電

力を調整する方式である。

特長として、進相から遅相まで応答が速く滑らかな連続制御が可能なが挙げられる。その反面、常時サイリスタを導通させるため電力損失が大きく、また線路側に電流位相制御による高調波が流出するデメリットがある。

(3) SCC (Self Commutated Converter) 方式

電圧形アクティブフィルタ(自励インバータ)を用いて無効電力を進相から遅相まで連続制御する方式である。

この方式は、SVG (Static Var Generator) とも呼ばれ、原理上 TCR 方式より高速であり、外部にリアクトルやコンデンサが不要である反面、制御が複雑で、高速のスイッチング素子が必要となり高価となる。

今回の開発目的は配電線に適用する SVC であるため、下記の項目を満足する必要があった。

- ①配電線の電圧安定化を目的とすること。
- ②小形、軽量で柱上設置可能なこと。
- ③高調波の発生が無いこと。
- ④無負荷時の損失が小さいこと。
- ⑤応答が速いこと。
- ⑥高信頼性であること。
- ⑦安価であること。

当社ではこれらの要求仕様を満足する方式として、TSC 方式を採用した。その上で、従来の TSC 方式での初期充電、補充電、及びサイリスタ誤点弧時に発生する各問題を解決し、なおかつ信頼性の向上や低コストが図れる新しい TSC 方式を考案し今回採用した。

4 新 TSC 方式について

図 1 に従来回路方式、図 2 に新回路方式の構成を示す。また、表 3 に従来方式と新方式との動作比較を示す。

表2 SVCの各種方式

Table 2. Several SVC system

方式	(1)サイリスタON・OFF制御方式(TSC)	(2)サイリスタ位相制御方式(TCR)	(3)自励インバータ方式(SCC)
構成			
動作原理			
特徴	高調波発生無し 損失が小さい 進相側のみの段階制御 正弦波電流	応答が比較的早い 進相から遅相まで連続制御 損失が大きい 歪波電流	応答が早い 進相から遅相まで連続制御 制御が複雑、価格が高価 正弦波電流

4.1 従来方式

TSC方式ではコンデンサバンクを直流充電しておき(表2(1)参照)、バンク投入後の突入電流発生を防止している。しかし、SVCの運転開始時には、初期充電が必要となる。初期充電時には、突入電流が流れたり、共振によりコンデンサに過電圧が発生するなどの種々の問題がある。

従来方式ではそれらを解決するために、別回路や、サイリスタの位相制御による初期充電を行うといった複雑な制御が必要であった。

さらに別の問題としてサイリスタ誤点弧時に保護協調が難しい点がある。表2(1)の電圧波形からわかるように、サイリスタの点弧は、線路電圧がコンデンサ充電電圧と一致した時に行っており、その時以外では過大な突入電流が流れてしまう。最悪の場合は、線路電圧が逆極性のピーク時点である。このとき、極端な共振充電となり、コンデンサ電圧が電源電圧の3倍以上に、サイリスタ電圧が4倍以上に達することがある。このようなサイリスタ誤点弧にも耐えるように半導体スイッチは電圧・電流定格の大きいものを、コンデンサは電圧定格の高いものを選択する必要が生じ、装置が大形・高価となる問題があった。当社ではこれらの問題を解決する新方式を考案した(特許出願中)。

4.2 新方式

図2に示すように、新方式では中性点に限流抵抗が挿入されている。単純なようであるが、これにより、従来方式の前記問題点が一気に解決される。その基本原理を以下に示す。

- ①通常の定常電流は中性点を通らない(三相平衡電流)。
- ②初期充電や誤点弧による電流は、必ず中性点を通る(中性点を帰路とした単相電流)。

この原理により、中性点に抵抗を挿入すれば、初期充電時や誤点弧時の過大電流を限流し、コンデンサの過充電を抑制することができる。しかも、定常時にはこの抵抗に電流はほとんど流れないので、電力損失はほとんどない。しかし、各相のインピーダンスのアンバランスによる電流(零相電流)は若干流れるので、設計上は限流抵抗の抵抗値設定に留意する必要がある。

この新方式により、初期充電装置が不要となり、サイリスタの位相制御による初期充電制御も不要となるため、単純なダイオードとサイリスタの逆並列アーム構成が可能となった。また、誤点弧に対する保護協調も十分取れることから、サイリスタとコンデンサの耐量を下げることが可能となり、信頼性の向上とコストを低減することが出来た。

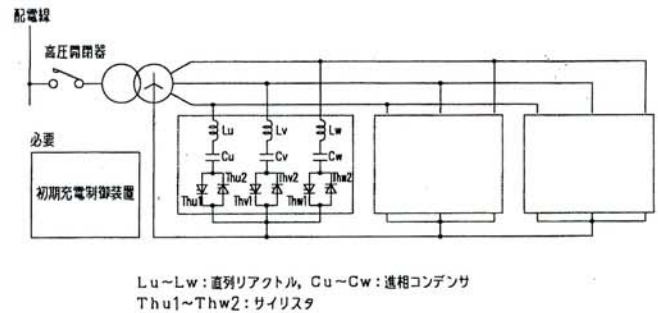


図1 従来回路方式

Fig. 1. Conservative circuit system

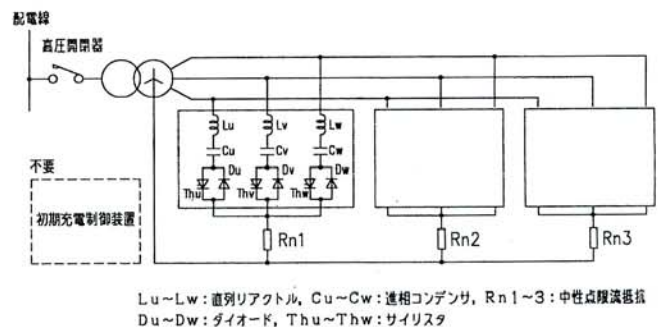


図2 新回路方式

Fig. 2. New circuit system

表3 新方式と従来方式の比較

項目	新方式	従来方式
初期充電	高圧開閉器を投入するだけで良い ↑ RnがLC共振を抑制するので過電流、コンデンサ過充電を防止できる	別の初期充電回路もしくは複雑なサイリスタ制御による初期充電が必要(過充電防止のためダイオードの使用不可)
補充電 定常時、コンデンサ投入による突入電流を防止するための充電	ダイオードによりコンデンサ電圧を電源電圧ピーク値に維持する ↑ 別システムによる初期充電動作が不要となったのでダイオードが使用可能となった	複雑な制御による補充電が必要
定常運転	定常運転において、Rnには殆ど電流が流れない ↑ 3相のインピーダンスのアンバランス分の電流のみが流れる(損失は定格の0.1%程度)	
誤点弧 サイリスタ誤点弧に対する保護協調	コンデンサ過充電、サイリスタ過電圧の防止。→信頼性向上 ↑ RnがLC共振を抑制	最悪の場合、コンデンサ充電電圧が電源電圧の3倍以上、サイリスタは4倍以上になる →コンデンサ劣化 サイリスタ高耐圧化必要

5 装置の概要

5.1 基本構成

図3に本SVCの基本構成を示す。

本SVCは高圧開閉器を介して配電線に接続される。開閉器を投入することで自動運転を開始する。万一装置が故障したときは、配電線への影響を防ぐため、さらに装置自体を保護するため開閉器を開放する保護動作を行っている。

5.2 主回路構成

図4に今回開発したSVCの主回路を示す。

本装置は電圧調整器部、コンデンサ部、及び制御部で構成されている。以下にその概要を説明する。

(1) 電圧調整器部

電圧調整器部は降圧変圧器、サイリスタスイッチ、制御電源用トランス、計測用VT、CTから構成されている。

降圧変圧器の結線は一次側を三角、二次側を星形結線とし、巻線を一次二次共に3回路に分離したスプリット巻線構造として、2次集中ハイインピーダンス変圧器とした。これにより、直列リアクトルを省略してコンデンサバンクを構成することができ、装置の簡略化、小形化が可能となった。

また、サイリスタスイッチはサイリスタとダイオードを逆並列接続とし、3相分を1スタックで構成した。使用するサイリスタは、新しく考案した回路方式により、定格値を低く抑えた汎用品のサイリスタが使用でき、コストダウンが可能となった。

(2) コンデンサ部

コンデンサは単相コンデンサを3個組み合わせて3相用のバンクとした。バンクの容量構成は75 kVA、150 kVA、150 kVAの3バンクで合計375 kVAである。

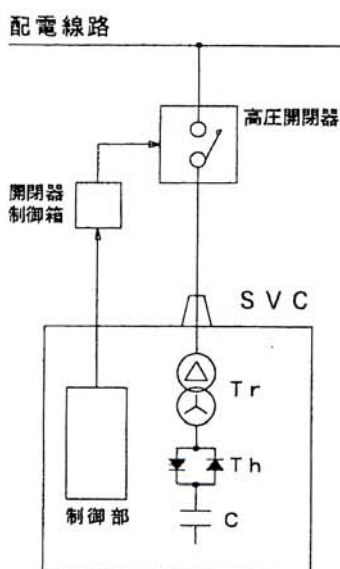


図3 SVCの基本構成
Fig. 3. Basic diagram of SVC

(3) 制御部

制御部は電圧調整や各種の保護機能を備えた制御ユニットと、サイリスタスイッチのオン・オフ制御を行うゲートアンプユニットで構成されている。

5.3 制御機能

制御機能としては、本来機能である電圧調整機能と装置の万一の故障発生時のための保護機能を備えている。以下にその概要を説明する。

(1) 電圧調整機能

本SVCは配電線の電圧安定化を主眼としている。このため、配電線の電圧を予め設定してある基準電圧に調整するようにコンデンサを入り／切り制御する電圧制御方式を採用した。この方式は、力率制御により間接的な電圧調整を行う従来方式と違い、直接的に電圧を調整するため、配電線の電圧管理に対しては有効な制御方式である。

また、今回の電圧制御方式には零不感帯積分リレーを採用した。このリレーアルゴリズムは、動作回数制限のために設けられた不感帯を無しとしているので、動作回数に制限が無い電圧調整器に適用した場合に最大の効果を発揮する。これにより、通常の不感帯付き電圧調整リレーより繊細で応答性が良い電圧調整が可能となった。

(2) 保護機能

万一の装置故障時に配電線に影響を与えず、また装置自身を保護するための機能である。これら各種保護機能の内容を紹介する。

① 過電圧保護

配電線の電圧が過電圧の場合、自動及び手動でのコンデンサ投入動作(昇圧動作)を中止する。これにより、配電系統に不要な擾乱を与えないようにしている。

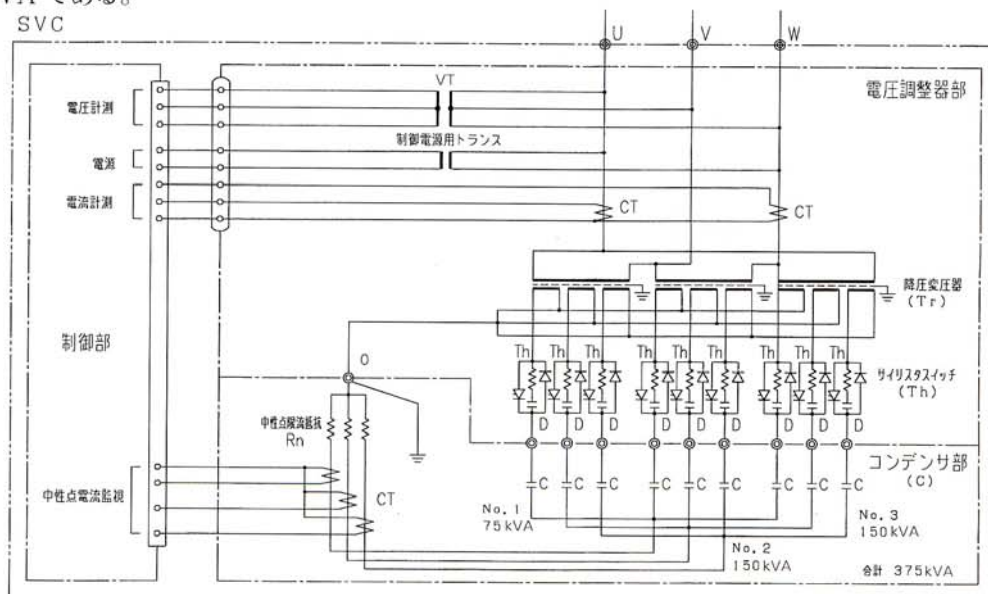


図4 SVCの主回路
Fig. 4. Main circuit of SVC

②不足電圧保護

配電線の電圧が低下した場合、自動及び手動でのコンデンサ開放動作(降圧動作)を中止する。これにより、配電系統に不要な擾乱を与えないようにしている。

③瞬停保護

配電線の電圧が②の検出レベルより更に下がった場合、配電線の停電とみなしコンデンサを全て開放する。これにより復電時の突入電流による配電系統の動揺を防止する。

④コンデンサ投入監視

SVCへの流入電流を監視し、投入段数及び装置の正常動作判定を行う。異常検出でコンデンサを全て開放し電圧制御を中止する。異常が継続する場合は、装置故障とみなし、高圧開閉器の開放により、SVCを線路から切り離す。

⑤コンデンサ過電流保護

コンデンサの過電流を検出した場合、装置故障とみなしSVCを線路から切り離す。

⑥中性点過電流保護

中性点の過電流を検出し、サイリスタ誤点弧など装置異常を検出する。中性点の過電流は低レベル(時限動作)領域と高レベル(瞬時動作)領域に分け検出する。

低レベル領域の過電流を検出した場合、コンデンサを全て開放し電圧制御を中止する。異常が継続する場合は、装置故障とみなしSVCを線路から切り離す。

高レベル領域の過電流を検出した場合も、装置故障とみなしSVCを線路から切り離す。

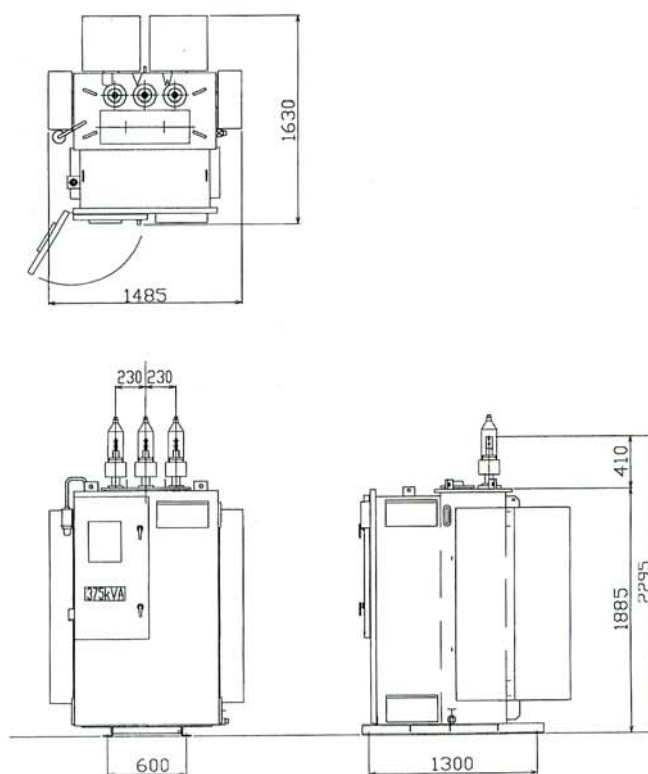


図5 SVCの外形寸法

Fig. 5. Outline dimension of SVC

5.4 仕様一覧

表4に今回開発したSVCの仕様を示す。

図5にSVCの外形寸法、図6にSVCの外観を示す。

表4 SVCの仕様

Table 4. Specification of SVC

分類	項目	内容
定格	冷却方式	油入自冷式(コンデンサ部気中自冷式)
	相数	3相
	定格周波数	60Hz
	定格一次電圧	6600V
	定格進相容量	375kVA
	定格1次電流	32.8A
性能	進相容量切換段数	6段階 0-75-150-225-300-375kVA
	無負荷電流	2.0%以下
	無負荷損	1000W以下
	全損失	10000W以下
	電圧調整範囲	5280V~6930V(範囲外で調整動作ロック)
	コンデンサ最小切換間隔	3秒
寸法・質量	基準電圧整定範囲	6000V~6900V 30Vステップ
	積分時間整定範囲	0%秒~500%秒 10%秒ステップ
	不感帯幅	0V
	幅	1485mm
	奥行	1630mm
	高さ	2295mm
	油量	630ℓ
	総質量	3200kg



図6 SVCの外観

Fig. 6. External view of SVC

6 実配電線への適用結果

本SVCは中部電力(株)殿のご協力により、約6ヶ月間実配電線での運転を行い、数多くのデータを収集することができた。以下にその結果を紹介する。

対象となった配電線は全亘長が約13kmあって、電圧調整装置が変電所側から末端へ向かって順に、SVRが2台(SVR1, SVR2)、次にTVR(Thyristor Voltage Regulator)が1台設置され、末端にはトンネル工事用の機器負荷が接続されていた。試験用の当SVCはTVRより末端側、変電所から約11kmの地点に設置した。以下に配電線の主要地点におけるSVCによる電圧改善効果について紹介する。

(1) SVC設置点の配電線電圧

図7のデータは、SVC設置点における配電線電圧記録である。図7の(a)はSVCによる電圧制御が無い場合、(b)は電圧制御が有る場合である。両結果を比較すると明らかにSVCによる電圧改善効果が確認できる。なお、図(b)の初期時に電圧低下が見られるのは、SVCの補償容量が不足しているためである。

(2) SVRの動作状況

図8のデータは、SVC制御無し、制御有りについてSVR1, SVR2のデータを比較したものである。この結果から、SVC運転によりSVR2の動作回数が低減し、タップ位置が2段(SVR2の素通しタップ)で運転される割合が増える結果を得た。これは、SVCの電圧補償効果がSVR2の設置点までおよび、それによりSVRの電圧補償動作を軽減させたことを示している。

一方、SVR1は、SVCとの距離が遠くSVR2のような大きな改善効果は確認できなかった。TVRに関しては、正確な動作は把握できなかったが、SVC設置点の電圧変動に対しTVRより速くSVCが応答していることが確認でき、TVRに対しても動作を軽減させていることが推定できる。

(3) 変電所

図9のデータは、配電線出口の各電気諸量の変化を、SVC制御無しの場合と、制御有りとで比較したものである。

この結果から、SVC運転により、変電所の遅れ無効電力量が削減されるとともに力率が改善され、変電所の負担軽減が図れることが認められる。このように、SVCを末端近くに設置しただけで、その改善効果は配電線全体に現れることが分かる。

(4) 実配電線での装柱

本SVCはH柱に設置したが、取付け架台は当社SVR(5000kVA)用をそのまま用いることができた。図10に今回の実フィールド設置状況を示す。

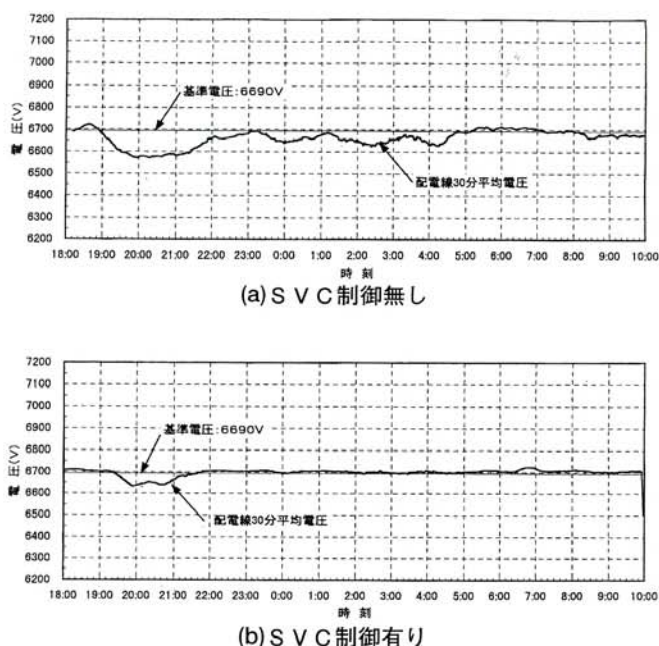


図7 SVC設置点の配電線電圧

Fig. 7. Voltage diagram of SVC in use

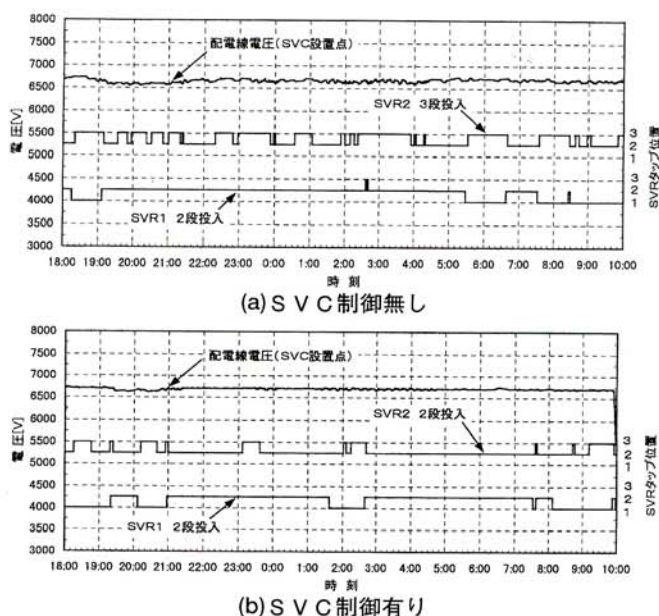


図8 SVRの動作状況

Fig. 8. Operation diagram of SVR

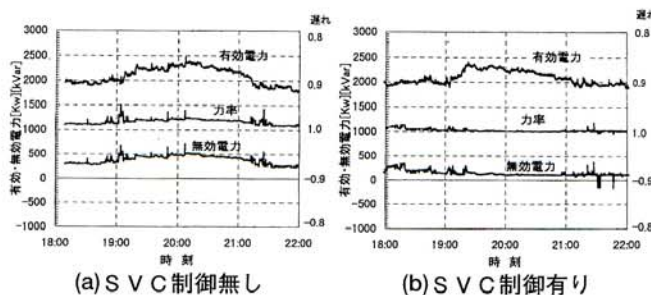


図9 変電所データ

Fig. 9. Data diagram of substation Transformer



図10 SVCの装柱風景
Fig. 10. View of SVC mounted on pole

7 あとがき

本SVCは配電線の電圧安定化を目的に開発し、実配電線においてその効果を確認することができた。

また独自の主回路構成及び変圧器構成を用いたことで装置の簡略化及び小形化を実現すると共に、各種保護機能を付加し装置の信頼性を向上することができた。

今後は、補償容量の増加を図ると共に、特定負荷にも対応した制御方式を追加し、更に応用性を高めた装置とするよう改良を進めたい。

最後に、本SVCの開発、設置及び実配電線適用試験などにご協力いただいた中部電力様、ならびに関係者各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 川崎, 吉田:「電源品質改善装置」OHM, 3, (1998)
- (2) 大西, 陰野 他:「SVCの電力系統への適用」OHM, 7, (1989)

筆者紹介



梶田 寛

機器開発事業部 電力機器開発部
電力機器制御装置の開発に従事



若松 友晴

電力事業部 制御機器部
電力機器制御装置の設計に従事



苅川 謙治

電力事業部 小形変圧器部
SVCの設計に従事



菅沼 政美

機器開発事業部 産業機器開発1部
パワーエレクトロニクス製品の
開発に従事