

配電系統における SVR と SVC の協調動作に対する基礎研究

大貫悟志*1, 岩崎敬亮*1, 長谷川巧*1, 青木秀憲*2

Basic Research on Cooperation between Step Voltage Regulator and Static Var Compensator in Distribution System

by

Satoshi OHNUKI, Keisuke IWASAKI, Takumi HASEGAWA and Hidenori AOKI

(Received on Sep.28, 2006 & accepted on Nov.22, 2006)

Abstract

In recent years, small-capacity power supplies called “distributed generators (DGs)” have received much attention and have been used in distribution systems. The main driving forces behind this development are liberalization of electricity and increased concern for the environment. Moreover, increasingly stringent electricity quality control is required with the progress of our information-oriented society. In this study, we propose the cooperation between voltage management machinery. We assess the feasibility of introducing “the cooperative control of” voltage management machinery in practical distribution systems using a step voltage regulator (SVR) and a static var compensator (SVC), and consider “the effects of such control”.

Keywords: Static var compensator, Step voltage regulator, Distributed generators, Distribution system, Cooperation work

1. はじめに

近年、電力の自由化に伴う企業や各自治体の発電事業への参入、省エネルギーや環境問題などにより再生可能エネルギーへの意識が高まりつつある。これに伴い、電力系統には太陽光発電や風力発電、コジェネレーション、燃料電池に代表される様々な発電システムが分散型電源として今後ますます連系されることが予想される。これらは、送電損失の軽減や大規模電源の代替、設備の繰り延べ、大気汚染の問題などを効果的に解決する働きを持っている。一方、このような分散型電源が連系される配電系統は、系統の末端に位置し系統の容量が小さいので、分散型電源の大量連系に伴い逆潮流現象が生じ、その影響により電圧管理が困難になるなど、従来の配電系統では起こらなかった問題が懸念されている。そのため、配電系統の電圧管理に対しては、従来からの緩慢な日負荷電圧変動に加え、逆潮流連系可能な分散型電源の並行列時や高圧需要家の電動機の始動時に生じる急峻な電圧変動などを考慮する必要がある。このような状況に対しても系統電圧を規定値範囲内に収まるように各電圧制御機器の最適な運用状態が図られなければならない⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。

本論文では、上記の問題点を解決するために従来から配電系統の電圧制御機器として用いられ、高圧配電線の途中に設置可能なステップ式自動電圧調整器(SVR: Step Voltage Regulator)と高速かつ連続的に電圧を補償することが可能な静止型無効電力補償装置(SVC: Static Var Compensator)に着目する。そして、これらの協調運転により系統の安定運用が実現できることを確認するために、各機器の特徴を活かした制御を図っている。結果として、コスト面においても効果的と思われる制御が可能となる操作過程について検討している。

2. 潮流計算

2.1 DistFlow 法について

配電系統は放射状の構造を持つため、その特性を考慮した潮流計算が必要となる。本稿では、配電系統の潮流計算に適し、主フィーダと分岐フィーダの最上流母線の状態から、末端までの母線電圧や線路電流などの状態量を逐次的に高速な計算を実現できる DistFlow 法⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾を用いている。この手法は NR(ニュートン・ラプソン)法と比較して非常に早く系統の状態量を評価することが可能である。Fig.1 の放射状配電系統は、主フィーダと分岐フィーダを示したものであり、次のような関係がある。

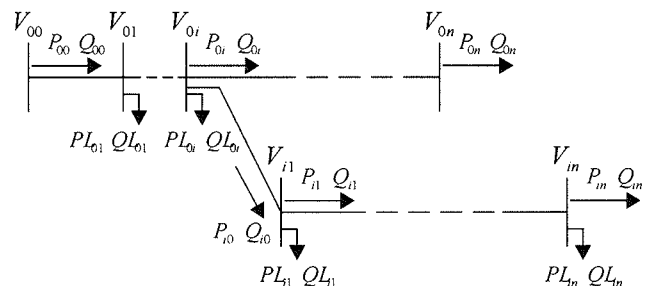


Fig.1 Radial distribution systems

Fig.1 において V_{00} は配電用変電所の送り出し電圧の大きさを示しており、既知の値である。上流母線 i の状態量とその下流 $i+1$ から成るブランチ潮流方程式は、次のようになる。

$$P_{0(i+1)} = P_{0i} - r_{0(i+1)} \frac{P_{0i}^2 + Q_{0i}^2}{V_{0i}^2} - PL_{0(i+1)} \dots \dots \dots (1)$$

* 1 工学研究科電気電子システム工学専攻
* 2 工学部電気電子工学科教授

$$Q_{0(i+1)} = Q_{0i} - x_{0(i+1)} \frac{P_{0i}^2 + Q_{0i}^2}{V_{0i}^2} - QL_{0(i+1)} \dots\dots\dots(2)$$

$$V_{0(i+1)}^2 = V_{0i}^2 - 2(r_{0(i+1)}P_{0i} + x_{0(i+1)}Q_{0i}) + (r_{0(i+1)}^2 + x_{0(i+1)}^2) \frac{P_{0i}^2 + Q_{0i}^2}{V_{0i}^2} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 $P_{0(i+1)}$ ($Q_{0(i+1)}$): 母線 $i+1$ から流れ出る有効(無効)電力潮流、 $PL_{0(i+1)}$ ($QL_{0(i+1)}$): 母線 $i+1$ に接続された有効(無効)電力負荷、 $r_{0(i+1)}$: 配電線 $i+1$ の抵抗、 $x_{0(i+1)}$: 配電線 $i+1$ のインダクタンス、 $V_{0(i+1)}$: 母線の $i+1$ 電圧
また、主フィーダの母線 i から分岐しているフィーダがある場合の状態量の関係は次式で表される。

$$P_{0i} = P_{0(i-1)} - r_{0i} \frac{P_{0(i-1)}^2 + Q_{0(i-1)}^2}{V_{0(i-1)}^2} - PL_{0i} - P_{i0} \dots\dots\dots(4)$$

$$Q_{0i} = Q_{0(i-1)} - x_{0i} \frac{P_{0(i-1)}^2 + Q_{0(i-1)}^2}{V_{0(i-1)}^2} - QL_{0i} - Q_{i0} \dots\dots\dots(5)$$

$$V_{0i} = V_{i0} \dots\dots\dots(6)$$

すなわち、分岐するフィーダのある母線では、分岐フィーダに流れる電力潮流を考慮しなければならないこと、主フィーダの i 番目の母線電圧 V_{0i} と、そこから分岐するフィーダの最上流の母線電圧 V_{i0} は等しいことを、それぞれ意味する。

さらに、各フィーダの末端母線から流れ出る有効・無効電力潮流がないことから次の末端条件を満足する必要がある。

$$P_m = 0, \quad Q_m = 0 \dots\dots\dots(7)$$

ただし、 n : フィーダ i の末端母線、 P_m , Q_m : フィーダ i の末端から流れ出る有効、無効電力潮流

(7)式を満足するために、フィーダの最上流母線における状態量を更新することになる⁽¹²⁾。初期の状態から状態量 $Z(P$ と Q の偏差)を更新する方程式は、次式によって表される。

$$Z^{m+1} = Z^m + \Delta Z \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 ni : 反復回数

2.2 分散型電源連系時における DistFlow 法

Fig.1 の系統のある母線に分散型電源が連系した時の状態を Fig.2 に示す。分散型電源が連系されたときの有効、無効電力潮流は以下ようになる。

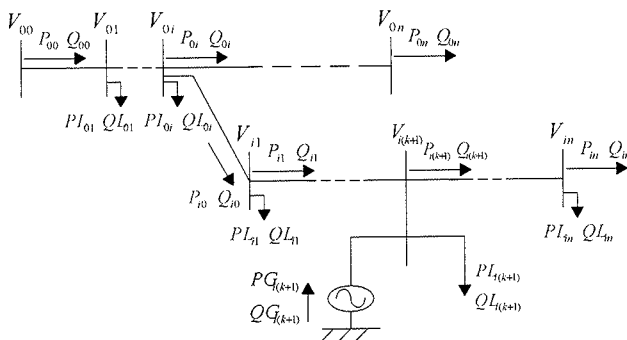


Fig.2 Radial distribution systems with distributed generator

$$P_{i(k+1)} = P_{ik} - r_{i(k+1)} \frac{P_{ik}^2 + Q_{ik}^2}{V_{ik}^2} - PL_{i(k+1)} + PG_{i(k+1)} \dots\dots(9)$$

$$Q_{i(k+1)} = Q_{ik} - x_{i(k+1)} \frac{P_{ik}^2 + Q_{ik}^2}{V_{ik}^2} - QL_{i(k+1)} + QG_{i(k+1)} \quad (10)$$

ただし、 $PG_{i(k+1)}$ ($QG_{i(k+1)}$): 母線 $k+1$ に連系された分散型電源から受ける有効(無効)電力

3. 電圧制御機器

3.1 ステップ式自動電圧調整器

Fig.3 に SVR の概略図を示す。SVR は、電圧が許容値を逸脱する恐れがある場合には、変圧器のタップを切り替えることで電圧を調整する機器である。高圧配電線の途中に設置可能な自由度を有し廉価であるが、タップ切り替えを機械的な接点で行うことから切り替え回数による機器寿命が有る。頻繁なタップ切り替えを避けるため、動作時間に制約があり、急激な電圧変動に追従できない。

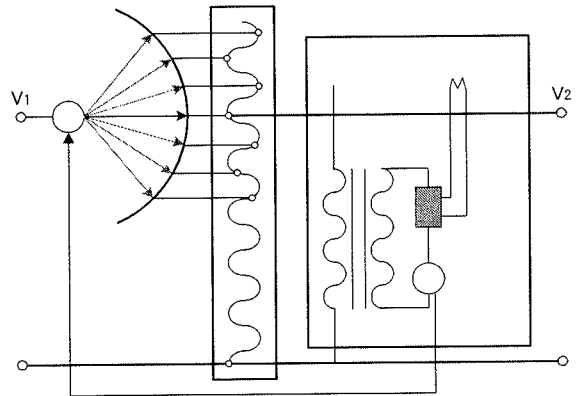
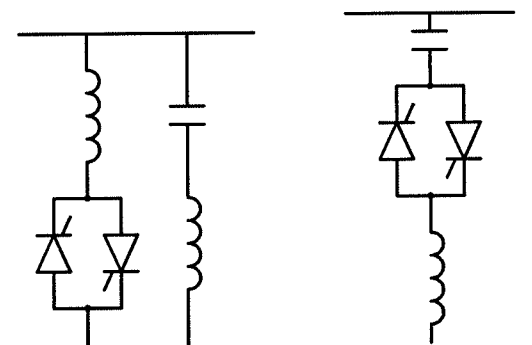


Fig.3 Step Voltage Regulator

3.2 静止型無効電力補償装置

SVC は、無効電力出力を連続的に行う機器であり、電力用コンデンサや分路リアクトル、サイリスタなどの電力用半導体素子から構成される(Fig.4 参照)。重負荷時、軽負荷時に SVC はそれぞれ容量性無効電力補償、誘導性無効電力補償による電圧補償を行う⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。Fig.5 はそのときの SVC による電圧-電流特性を表している。SVC はパワーエレクトロニクスを用いているため、SVR と比較して応答性が高く、急激な電圧変動を抑制可能である。



(a) Constitution of TCR (b) Constitution of TSC

Fig.4 Static Var Compensator

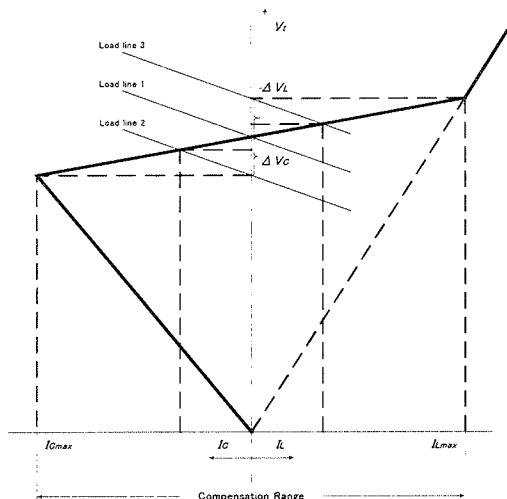


Fig.5 V-I characteristic of SVC

インピーダンスにおける抵抗成分の割合が大きい配電系統では、有効電流による電圧変動分も無効電流で補償しなければならないため、必然的に機器容量が大きくなる。結果、投資対効果の面で SVR に劣るため、使用場面を限定する必要がある。

4. 電圧制御機器の協調動作

前章で述べたように、SVR と SVC による電圧制御手法は相補的な特徴を併せ持つため、両者を協調的に動作させることは電圧制御機器の有効活用、系統の安定運用の面で重要となる。SVC は SVR と比較して応答性が高いことから、協調動作を考慮しないと SVR が補償すべき恒常的な電圧変動を補償し続けてしまい、過渡的な電圧変動に常時対応するためには大容量化が必要となってしまう。そこで、SVC から SVR へと電圧補償分を移行する補償責務の移行を図る。

Fig.6 は SVR と SVC を設置した配電線の、時間推移による SVR と SVC の協調動作とその電圧制御を示したものである。電圧変動により規定値を逸脱した直後①では、SVR はその動作時限制約により動作できず、SVC の動作によって電圧の規定値逸脱の解消を図る。その後、SVR が動作時限に到達した②で、SVR が 1 タップ動作し、これと同時に SVC は SVR1 タップ分の出力を減らす。③以降はこれまでと同様に、SVR の動作時限毎に SVR タップ操作、SVC 出力調整を繰り返す、最終的には SVR のみで電圧の制御を行う様に補償責務を移行させる。以上

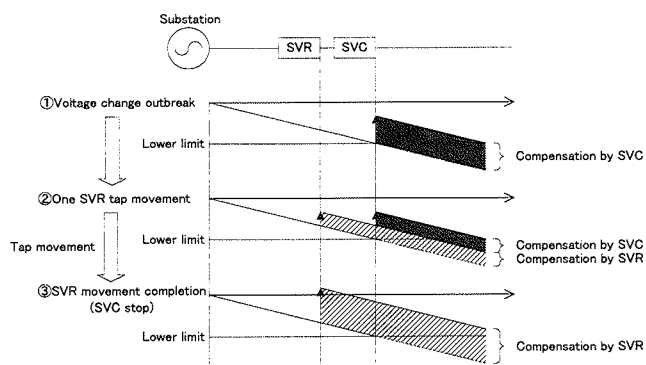


Fig.6 Cooperating work of SVR and SVC

のように SVR のタップ動作と SVC の補償動作は独立しているため、規定値逸脱直後は SVC が、その後段階的に SVR が電圧を補償する協調動作となる。

5. シミュレーション

5.1 シミュレーション条件

本稿では、文献(15)を参考に、Fig.7,8 に示す 32 母線放射状配電系統モデルを用いた。この配電系統モデルは母線番号 0 番を配電用変電所とした放射状を構成し、変電所を除くいずれの母線にも負荷が接続されている系統である。本論文では、協調制御により電圧規定値からの逸脱解消を目的としている。そのため、解析には軽負荷時による電圧の規定値上限逸脱と、重負荷時による規定値下限逸脱の 2 パターンを系統内に想定し、シミュレーションを実施している。Fig.7 は日負荷変動の軽負荷時において分散型電源(DG: Distributed Generator), SVR, SVC を図のように配置し、解析している。さらに、Fig.8 は日負荷変動の重負荷時に対する DG, SVR, SVC の配置図を示したものである。また、いずれの負荷時においても主フィーダおよび母線 1 からの分岐フィーダを住宅地区、母線 2 および 5 からの分岐フィーダを商業地区と仮定している。なお、Fig.9,10 はそれぞれが示す負荷パターンを表している。

本研究において電圧の規定値は上限を 1.045[p.u.]、下限を 0.955[p.u.]としている。電圧の基準値は 6600[V]を単位法で 1.0

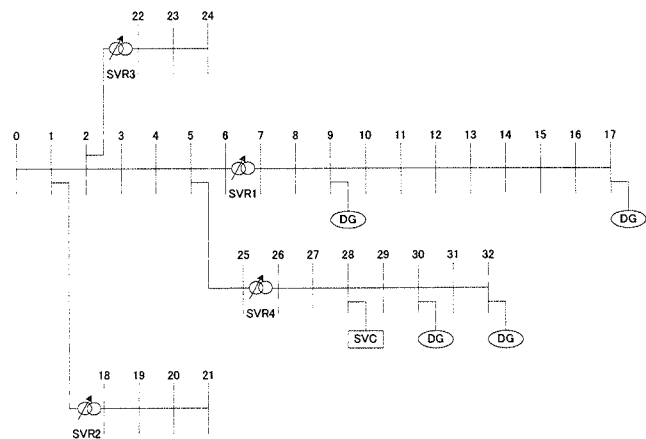


Fig.7 Radial distribution system model (light load)

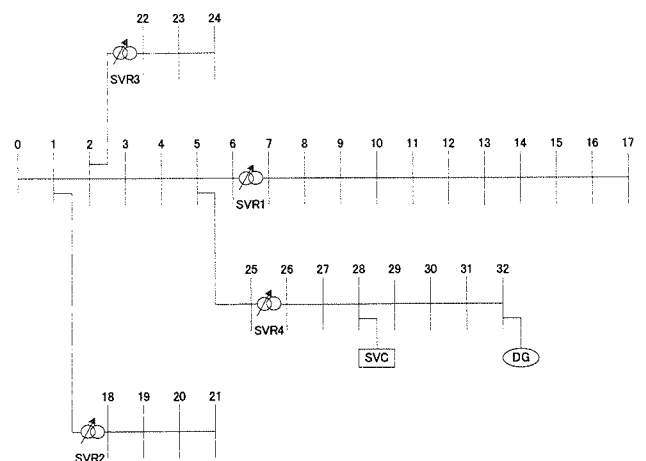


Fig.8 Radial distribution system model (heavy load)

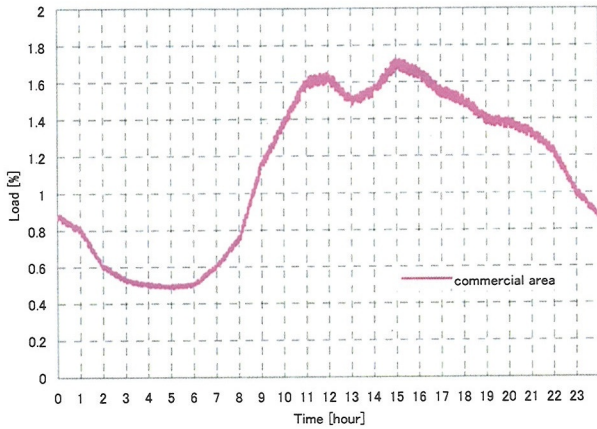


Fig.9 Load curve of commercial area

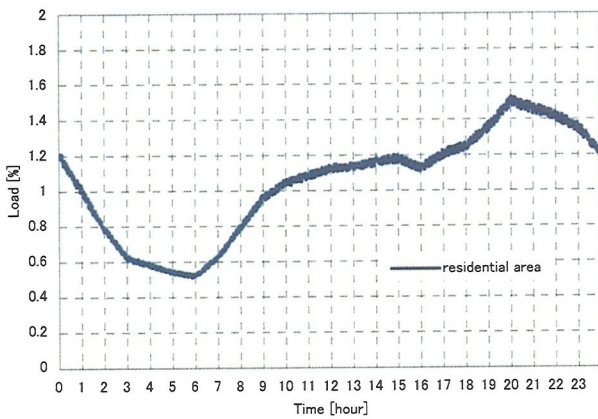


Fig.10 Load curve of residential area

[p.u.]としたものである。また、電圧制御機器であるSVRおよびSVCの動作時限はSVRを10[s]、SVCを0.6[s]とし、SVRは規定値逸脱が生じたフィーダのものを動作するものとする。

(1) 想定する軽負荷時の電圧逸脱状態

Fig.11はFig.7の軽負荷時において母線32が電圧規定値を逸脱したときの分布を表している。この時刻に連系されている分散型電源の出力が負荷で全て消費されず、通常送電方向とは反対の逆送状態となる逆潮流現象が生じ、これにより電圧が上昇し、電圧規定値を逸脱する状態が発生することになる。Fig.12

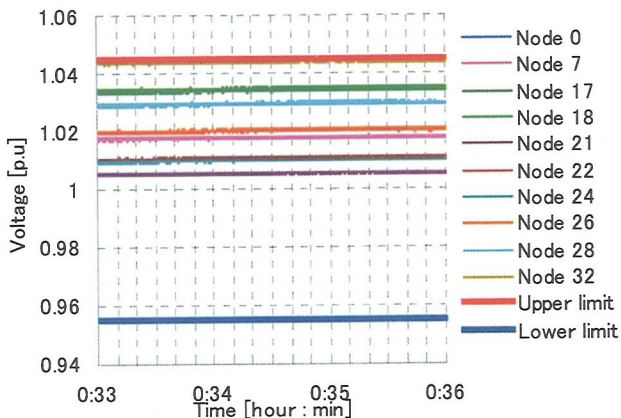


Fig.11 Voltage profile (light load)

は、Fig.11に示した母線32が電圧規定値を逸脱する詳細な時刻(0:34:06~0:34:08)を示したものである。波形から0時34分06.77秒に逆潮流現象により電圧が規定値の上限を逸脱したことがわかる。この様な逸脱状態が秒単位で繰り返されている。

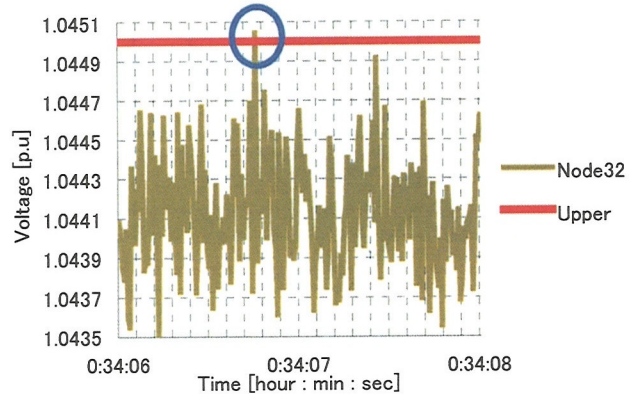


Fig.12 Voltage transition of every time (light load)

(2) 想定する重負荷時の電圧逸脱状態

Fig.13はFig.8の重負荷時において規定値を逸脱したときの電圧の分布を表している。重負荷時のシミュレーションではFig.8で示すように分岐フィーダの末端に連系された分散型電源が14時43分00秒に解列され、それに伴い急激な電圧変動が生じ、電圧を下降させ、規定値を逸脱する状態を想定する。Fig.14はFig.13の逸脱時刻(14:42:59~14:43:01)を拡大したものである。波形より分散型電源を解列した時刻には母線32において電圧が規定電圧の下限値を逸脱し、この状態を継続することになる。

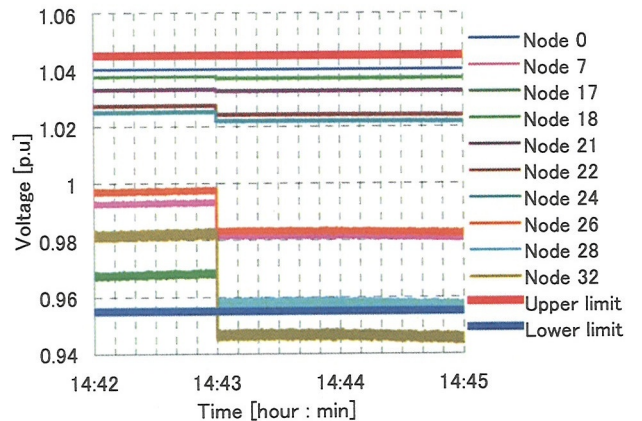


Fig.13 Voltage profile (heavy load)

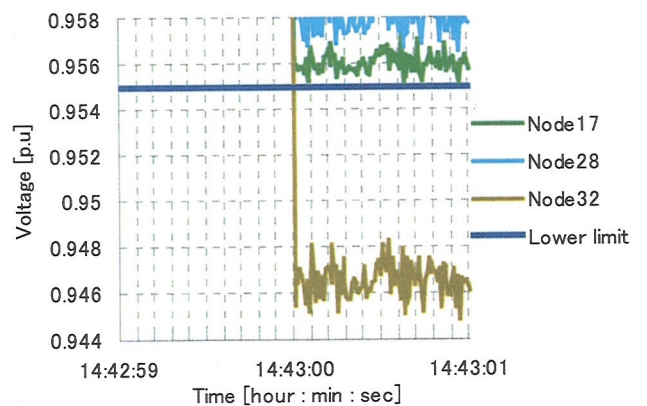


Fig.14 Voltage profile which expanded (heavy load)

5.2 シミュレーション結果

本節では、想定した(1),(2)の条件に対してシミュレーションを実行した結果について考察する。Fig.15は(1)の軽負荷時に対して既存のSVRおよびSVCを動作させ、規定値逸脱の解消を図ったときの電圧分布を示したものである。この操作の初期段階で、まずSVCの動作時間に基づいて早期に逸脱電圧を解消するために規定値を逸脱した時刻から0.6[s]後にSVCを動作し、規定値逸脱の解消を図っている。これにより、SVCによる制御が可能であることがわかる。次に、使用容量によって高価となるSVCのコスト削減を図るために10[s]後にSVR4を1タップ動作し、それと同時にSVR4の1タップ分の出力に相当するSVCの容量を減らしている。同様な操作を繰り返し、順次SVCの補償責務をSVRに移行させ、SVC使用に対するコスト削減を図る制御が実施されることになる。これら電圧制御機器の動作手順の詳細は表1に示している。その際、SVC容量削減とSVR4の1タップ分は同等の出力調節であることから、これらの動作を実行したときにSVRの負荷側にある母線26の電圧が、一定の値を示すことになる。このことから、これらの動作が適正に実現できていることがわかる。

Fig.16は(2)の重負荷時に対して軽負荷時と同様に規定値逸脱の解消を図ったときの電圧分布を示したものである。まず、初期段階ではSVCを規定値逸脱から0.6[s]後に動作し、逸脱の解消が図られている。その後、10[s]間隔のSVR4のタップ動作を3回繰り返し、SVCの補償責務を順次SVRに移行することになる。しかし、重負荷時において実行される分散型電源の解列は、分散型電源の連系されていた母線5からの分岐フィーダだけでなく、他フィーダに対しても分散型電源解列の影響を与えることになる。その結果、主フィーダの末端母線17において再び

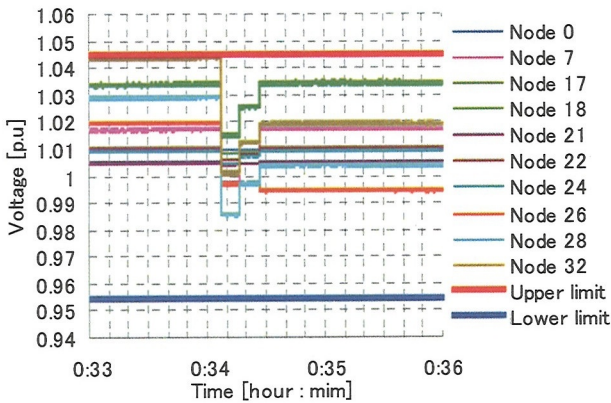


Fig.15 Voltage profile during cooperation work (light load)

Table.1 Movement Process (light load)

	Time[h:m:s]	Remarks	Value
1	0:34:06.77	Deviation	-
2	0:34:07.37	SVC	-2410
3	0:34:17.00	SVR4	0.9875
4	0:34:17.00	SVC	-1130
5	0:34:27.00	SVR4	0.9750
6	0:34:27.00	SVC	0

Time[]は動作時刻を、Remarkは動作機器を、ValueはSVRであればタップ比を、SVCであれば容量(kvar)をそれぞれ意味している。また、SVRの数字は動作したSVR番号を示している。

電圧が規定値逸脱(14:43:44.84)を生じることとなった。そのため、再度電圧の規定値逸脱解消を図るために0.6[s]後にSVCを動作し、電圧逸脱解消が実行される。その後、これまでと同様に主フィーダにあるSVR1が1タップ動作し、SVCを停止させる。これら電圧制御機器の動作手順の詳細は、表2に示されている。

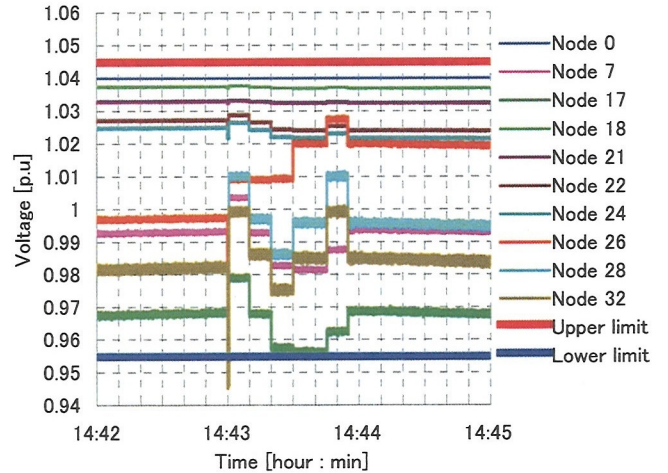


Fig.16 Voltage profile during cooperation work (heavy load)

Table.2 Movement Process (heavy load)

	Time[h:m:s]	Remarks	Value
1	14:43:00.10	Deviation	-
2	14:43:00.61	SVC	3110
3	14:43:10.00	SVR4	1.0125
4	14:43:10.00	SVC	1500
5	14:43:20.00	SVR4	1.0250
6	14:43:20.00	SVC	160
7	14:43:30.00	SVR4	1.0375
8	14:43:30.00	SVC	0
9	14:43:44.84	Deviation	-
10	14:43:45.44	SVC	780
11	14:43:55.00	SVR1	1.0125
12	14:43:55.00	SVC	0

6. まとめ

本論文では、分散型電源の連系に伴うより高度な電力品質管理について、電圧管理機器であるSVRとSVCに着目し、それらの協調動作について紹介した。本稿では、電圧の規定値逸脱に対しSVRとSVCの動作時限、補償責務に着目した協調動作を行ったが、規定値逸脱の期間や電圧の変動率などを考慮することで、各機器の動作基準を明確化し、動作させることを考えていきたい。また、配電用変電所送り出し電圧、他の電圧管理機器の導入なども検討していく予定である。

参考文献

- (1) 深津尚明・炭谷一郎・佐藤達則・前川英洋・甲斐隆章：「配電系統高速電圧制御への直列型電圧補償装置の開発」, 平成12年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.36 pp.249-257

- (2) 湧田直樹・原亮一・大山力：「区分開閉器活用による分散型電源導入可能領域の増加」, 平成 16 年電気学会電力技術・系統技術合同研究会, PSE-04-86 pp.1-7 (2004-8)
- (3) 窪田善之・元治崇：「電力密度モデルを用いた SVR の最適配置決定の解析的検討」, 電学論 B, 126 巻 2 号, pp.193-201 (2006-2)
- (4) 仲成規・元治崇・由良俊樹・高山信一・福山良和：「分散電源の連系を考慮した電圧制御機器の協調制御方式の基礎検討」, 平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.281 pp.719-720
- (5) 近藤潤次・安芸裕久・山口浩・村田晃伸・石井格：「分散型電源を含む配電系統の電圧調節法に関する考察」, 電学論 B, 124 巻 12 号, pp.1432-1438 (2004-12)
- (6) 近藤太郎・馬場旬平・横山明彦：「太陽光発電が多数導入された配電系統の FACTS 機器を用いた電圧制御」, 電学論 B, 126 巻 3 号, pp.347-358 (2006-3)
- (7) 長谷川巧・青木秀憲・水谷芳史：「遺伝的アルゴリズムによる SVR の最適配置」, 東海大学電子情報学部紀要 Vol.5 No.2, 2005, (2006-3)
- (8) 大貫悟志・長谷川巧・青木秀憲：「遺伝的アルゴリズムによる SVR および SVC の協調的最適配置」, 平成 18 年電気学会電力技術・系統技術合同研究会, PSE-06-25 pp.7-12 (2006-8)
- (9) M.E.Baran & F.F.Wu : “Optimal capacitor placement on radial distribution systems” , IEEE Trans. Power Delivery, 14, No1, 725 (1989-1)
- (10) 佐々木博司・牛尾政幸・造賀芳文・久保川淳司・北川稔：「配電系統への燃料電池の最適配置計画に関する研究」, 電学論 B, 114 巻 5 号, pp491-497 (1994-5)
- (11) 福山良和・中西要祐：「並列処理を用いた放射状系統高速潮流計算」, 電学論 B, 116 巻 1 号, pp.20-26 (1996-1)
- (12) 森啓之・飯村吉典：「2 層近傍タブサーチによる分散電源を考慮した配電系統拡張計画」, 電学論 B, 123 巻 10 号, pp.1142-1148(2003-10)
- (13) 浅井崇・壺岐浩幸・瓜生芳久：「離散型無効電力補償設備の動的最適制御法の検討」, 平成 17 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.11 pp.13-18 (2005-8)
- (14) “電力工学ハンドブック”, 朝倉書店, 2005
- (15) M.E.Baran & F.F.Wu : “ Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing” , IEEE Trans. Power Delivery, Vol.4, No.2, pp.1401-1407 (1989-4)