

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560263

研究課題名(和文) LRTとSVRとSVCによる次世代協調電圧制御方式に関する研究

研究課題名(英文)

Research on Coordinate Voltage control Method Using LRT/SVR and SVC

研究代表者

林 泰弘 (HAYASHI YASUHIRO)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40257209

研究成果の概要(和文)：

太陽光発電システム(PV)などの再生可能エネルギー源の配電系統への多数台・大容量連系に対して、電圧制御対象と時間領域が異なる配電系統電圧制御機器であるLRTとSVRとSVCのそれぞれの制御パラメータを一括して同時に最適化することで、定常的電圧変動と過渡的電圧変動の双方を同時に抑制し、再生可能エネルギー源の出力を抑制させずに系統電圧の適正電圧逸脱を回避させる電圧制御手法を系統模擬実験と制御シミュレーションを通して確立した。

研究成果の概要(英文)：

The penetration of distributed generator such as PV systems causes voltage fluctuation and wide voltage gap between voltage rise and voltage drop. These influence occurs exceedance of the proper voltage range in distribution network connected with PV systems. In order to resolve the exceedance of the proper voltage range based on the voltage gap and fluctuation, the author proposed a coordinated voltage control method by LRT, SVR and STATCOM. The proposed method has two functions; the first function (voltage gap reducing function) is to reduce the voltage gap by centralizing control of LRT and SVR, and the other (voltage smoothing function) is to smooth rapid voltage change by autonomous control of STATCOM.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：分散型電源，配電系統，電圧制御，太陽光発電

## 1. 研究開始当初の背景

①LRTによる送出し電圧制御，②SVRによる末端側電圧制御，③SVCによる瞬時電圧制御は，相互に影響を受けるため，これらが最適

に協調制御されなければ，分散型電源の多数台・大容量の系統連系に対して，逆潮流による適正電圧逸脱の回避と太陽光発電システ

ムの出力抑制の回避を達成することは極めて困難である。これまで、従来型 SVR と SVC の自端制御や集中制御の研究はなされているが、電圧を適正範囲内に収めることだけを目標とした簡単な制御方式しか用いられていない。変圧器の長寿命化や電圧余裕の最大化等を踏まえ、LRT と SVR と SVC の協調型次世代電圧制御技術を最適化理論から展開し、異種電圧制御機器の制御パラメータの一括同時最適化を学術的に体系づけようとするものは世界的に見ても未だない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽光発電システム (PV) などの再生可能エネルギー源の配電システムへの多数台・大容量連系に対して、電圧制御対象と時間領域が異なる配電系統電圧制御機器である LRT と SVR と SVC のそれぞれの制御パラメータを一括して同時に最適化することで、定常的電圧変動と過渡的電圧変動の双方を同時に抑制し、再生可能エネルギー源の出力を抑制させずに系統電圧の適正電圧逸脱を回避させる技術を系統模擬実験と制御シミュレーションを通して確立させることである。

## 3. 研究の方法

本研究の方法としては、LRT と SVR と SVC が相互の最適な協調を図りながら、太陽光発電システムなどの再生可能エネルギー源の配電システムへの多数台・大容量連系に対して、配電系統電圧の時間領域と制御エリアを分担する最適協調制御技術を提案し、LRT と SVR と SVC のそれぞれの電圧制御機器の制御パラメータを一括して同時に最適化することで、定常的電圧変動と過渡的電圧変動の双方を同時に抑制し系統電圧の適正電圧逸脱を回避させる技術の確立を、計算機シミュレーションとフリーデザイン配電系統模擬実験設

備を用いた部分的な検証実験を通して実施する。

## 4. 研究成果

主な研究成果としては、太陽光発電などの再生可能エネルギー利用 DG の大量導入に対しても、配電系統電圧制御機器である LRT や SVR や SVC を用いて、配電系統電圧を適正範囲内に収めることが可能な協調制御手法を開発し、その有用性の検証を通して、開発手法を確立させた点にある。以下に、配電系統電圧制御機器の協調制御手法の研究結果の概要を示す。

### (1) LRT と SVC の協調制御アルゴリズムの開発

太陽光発電システム出力による頻度の高い瞬時電圧逸脱を回避するために、LRT との制御分担を考慮した SVC による瞬時電圧制御手法を提案し、更に、高速制御性と定格容量の 2 つの観点から多面的に見て最適な SVC の制御パラメータをパレート最適解の概念に基づき決定する手法を提案した。また、LRT と SVC を設置した配電系統モデルを用いて、LRT だけを制御した場合と LRT と SVC を協調制御した場合の数値計算結果の比較を行った。本手法を用いて、緩やかな電圧変動に対しては LRT で制御し、急な電圧変動に対しては SVC で制御を行うことで、太陽光発電システム出力による頻度の高い瞬時電圧逸脱を回避できることが確認できた。さらに、1 台の SVC 模擬装置を購入して、既存のフリーデザイン配電系統模擬実験設備に接続し、これに、先進最適化理論にもとづく制御パラメータの最適化技術を実装し、SVC の制御パラメータの最適化の効果を様々な実験を通して検証しながら、制御パラメータの最適化技術を確立させた。

## (2) LRTとSVRの最適制御パラメータの同時決定手法の開発

変圧器タップ切り替えによる電圧制御機器であるLRTとSVRの最適制御パラメータの同時決定手法を開発した。開発するLRTとSVRの制御パラメータの同時決定手法では、LRTの4つの制御パラメータ ( $I_{MIN}$ ,  $V_{MIN}$ ,  $I_{MAX}$ ,  $V_{MAX}$ ), SVRの2つの制御パラメータ ( $Z_{REF}$ ,  $V_{REF}$ ), LRTとSVRの各不感帯幅 ( $\epsilon_{LRT}$ ,  $\epsilon_{SVR}$ ) を状態変数として設定し、最適化手法PSOを用いて状態変数の最適化を行う。タップ切替回数と電圧余裕を目的関数として定義することで、LRTとSVRの制御パラメータと不感帯幅を同時に決定することが可能である。開発手法の妥当性を検証し、手法の計算ロジックを確立するために、LRTとSVRが設置された太陽光発電システム連系配電システムモデルを計算機内に構築し、その配電システムモデル上で、膨大な計算機シミュレーションを実施した。LRTとSVRの最適制御パラメータを決定する手法は、鳥や魚などの生物の群れがえさを探す振舞いを模擬した先進的非線形最適化手法であるPSOに基づいており、これまで経験的知識や試行錯誤で決定していた制御パラメータをシステムティックに決定することが可能である。

LRTとSVRの最適制御パラメータの同時決定手法を計算機シミュレーションにより開発した後は、分散型電源模擬装置が連系されたフリーデザイン配電システム模擬実験設備において、分散型電源により急峻な電圧変動が起こって適正電圧範囲を逸脱した状態を再現し、これに、先進最適化理論にもとづく制御パラメータの最適化技術を実装したLRTとSVRを設置・動作させる実験を行った。制御パラメータの最適化の効果を様々な実験を通して検証しながら、制御パラメータの最適化技術を確立させた。

## (3) LRT/SVR と SVC の協調制御手法の開発

開発したLRTやSVRによる電圧制御手法では分散型電源 (DG) や負荷などによる急峻な電圧変動があった場合には、系統の地点電圧が適正電圧範囲を逸脱してしまう恐れがあり、静止型無効電力補償装置 (以下、SVC) を配電系統に設置して瞬時に無効電力を出し入れすることにより、地点電圧を高速に制御することが必要となってくる。

そこで、出力変動の激しい再生可能エネルギー利用 DG の今後の連系台数増大を見据えた、LRT/SVR との制御分担を考慮した SVC の協調型電圧制御法を提案した。提案した電圧制御法は、SVC の制御に不感帯を設けることにより、緩やかな電圧変動に対してはLRT/SVR に対応させ、LRT/SVR では対応できない短時間の急峻な電圧逸脱のみをSVCで効率的に制御可能である。本制御法により、LRT/SVR の長寿命化と SVC の設置コスト低減化が可能となった。一方で、SVC の必要最小限の定格容量と高速制御性に優れた最適な制御パラメータを決定する手法を提案した。提案手法は、まず、SVC の必要最小限の定格容量を最適化手法を用いて決定し、その上で高速制御性に優れた SVC の制御パラメータを再度最適化手法を用いて段階的に決定していく手法である。本手法により、SVC を新規に設置する際に、その設置コストをできる限り抑え、かつ、高速な電圧制御が可能となった。また、提案手法の有用性について検証するため、DG の連系による連系地点近傍での急峻な電圧変動により地点電圧が適正電圧範囲を逸脱してしまうことを想定し、配電システムモデルを用いて数値計算を行った。この場合の SVC の定格容量ならびに制御パラメータを決定し、LRT と SVC との分担制御による電圧

制御効果について示し、従来の制御法との比較検討を行い、定量的に提案手法の妥当性を示すことができた。

上記の(1)～(3)で得られた研究成果は、学術論文誌や国内外の学会で積極的に発表し、我が国の配電系統の次世代電圧制御をけん引する位置づけとなったと自己評価している。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- (1) Y. Hanai, J. Matsuki and Y. Hayashi, Voltage Control for a Loop Distribution System with Renewable Energy Sources, The International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), 査読有, 2011
- (2) Y. Miyamoto, Y. Hayashi, Evaluation of improved generation efficiency through residential PV voltage control of a clustered residential grid- interconnected PV, Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 査読有, 2010 IEEE PES, 2010, pp. 1-8
- (3) 酒井重和, 林 泰弘, 川崎章司, 松木純也, 馬場旬平, 横山明彦, 北條昌秀, 若尾真治, 森健二郎, 不破由晃, 分散型電源連系課題解決支援システム (ANSWER) の構築と分散型電源と配電ネットワークとの協調運用形態の実験検証, 電気学会論文誌B, 査読有, Vol. 130, No. 5, 2010, pp.473-483
- (4) 花井悠二, 林 泰弘, 松木純也, 再生可能エネルギー電源が連系された配電系統のループ化と集中型電圧制御の適用効果の実験的検証, 電気学会論文誌 B, 査読有, Vol.130, No.11, 2010, pp.932-940
- (5) 川崎章司, 林 泰弘, 松木純也, 山口益弘, LRT との制御分担を考慮した SVC の協調型電圧制御法および SVC の定格容量と制御パラメータの決定手法, 電気学会論文誌 B, 査読有, Vol.130, No.11, 2010, pp. 963-971
- (6) Y. Hayashi, M. Kurihara, Y. Hanai, J. Matsuki, Voltage Estimation and Control of Distribution System Using Measured Data from IT-Switches, Proc. of International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2009) (CD-ROM), 査読有, 2009
- (7) S. Kawasaki, Y. Hayashi, J. Matsuki, M. Yamaguchi, Y. Hanai, Cooperative Voltage Control by LRT and STATCOM in Distribution System, Proc. of International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2009) (CD-ROM), 査読有, 2009
- (8) Y.Hanai, Y.Hayashi, J.Matsuki, Y. Fuwa, K.Mori, Parameter Determination Method of Distribution Voltage Regulators

Considering Tap Change, Proc. of International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2009) (CD-ROM), 査読有, 2009

[学会発表] (計 23 件)

- (1) 酒井重和, 金本憲明, 林泰弘, 川崎章司, 松木純也: 「太陽光発電システム群の多目的力率制御手法」, 電気学会電力系統技術研究会, PSE-10-001, pp.1-5, (2010)
- (2) 花井悠二, 林泰弘, 松木純也: 「事故区間分離を考慮したループ配電系統の電圧制御に関する検討」, 平成 22 年電気学会電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, PE-10-021, PSE-10-020, SPC-10-044 (2010)
- (3) 栗原雅典, 花井悠二, 松木純也, 林泰弘: 「センサ開閉器からの計測情報を利用した配電系統の集中型(LRT・SVR)電圧制御手法」, 平成 22 年電気学会電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, PE-10-022, PSE-10-021, SPC-10-045 (2010)
- (4) 川崎章司, 松木純也, 山口益弘, 林泰弘: 「LRT との制御分担を考慮した SVC の瞬時電圧制御法および SVC の定格容量と制御パラメータの決定手法」, 平成 22 年電気学会電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, PE-10-023, PSE-10-022, SPC-10-046 (2010)
- (5) 金本憲明, 川崎章司, 松木純也, 林泰弘: 「LRT と太陽光発電システム群の力率制御による協調型電圧制御法」, 平成 22 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会 PE-10-078/PSE-10-077 (2010)
- (6) 小西啓佑, 林泰弘: 「PV の大量導入における複数台 SVC の最適設置箇所に関する研究」, 平成 22 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会 PE-10-0082/PSE-10-081 (2010)
- (7) 高橋修平, 林泰弘: 「センサ開閉器区間情報を用いた電圧推定に基づく LRT と SVR による複数フィードの集中型電圧制御手法」, 平成 22 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会 PE-10-193/PSE-10-192 (2010)
- (8) 高橋尚之, 林泰弘: 「PV 大量連系配電系統における不感帯可変 SVC による電圧制御」, 平成 22 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会 PE-10-195/PSE-10-194 (2010)
- (9) 高橋尚之, 林泰弘, 花井悠二, 川崎章司, 森健二郎・不破由晃: 「複数台 SVC による系統電圧制御効果の評価」, 平成 22 年電気学会電力・エネルギー部門大会, P15 (2010)
- (10) 酒井重和, 金本憲明, 林 泰弘, 川崎章司, 松木純也: 「太陽光発電システム群

- の多目的力率制御手法」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PSE-10-001 (2010)
- (11) 高橋修平, 林 泰弘, 花井悠二: 「センサ開閉器計測情報に基づいた複数フィードの電圧推定・制御手法」, 平成 22 年電気学会電力・エネルギー部門大会, P17 (2010)
- (12) 韓国電気学会電力エネルギー部門大会招待講演(KIEE PES) Yasuhiro Hayashi, Active Network Systems with Energy Resources, (2009)
- (13) 川崎章司, 松木純也, 山口益弘, 林 泰弘: 「配電系統における SVC の定格容量と制御パラメータ決定手法」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-09-90/PSE-09-98 (2009)
- (14) 栗原雅典, 花井悠二, 林 泰弘, 松木純也: 「センサ開閉器から得られる計測情報を活用した配電系統の集中型(LRT・SVR)電圧制御手法の実験的検証」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-09-92/PSE-09-100 (2009)
- (15) 花井悠二, 林 泰弘, 松木純也: 「再生可能エネルギー源が連系されたループ配電系統の電圧制御に関する検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-09-94/PSE-09-102 (2009)
- (16) 酒井重和, 林 泰弘, 川崎章司, 松木純也, 馬場旬平, 横山明彦, 北條昌秀, 若尾真治, 森健二郎, 不破由晃: 「自然エネルギー利用型分散型電源と配電ネットワークとの協調運用形態の検証実験」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-09-166/PSE-09-174 (2009)
- (17) 酒井重和, 金本憲明, 林 泰弘, 川崎章司, 松木純也: 「太陽光発電システム群の総有効電力出力最大化を目的とした力率制御手法」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-09-170/PSE-09-178 (2009)
- (18) 栗原雅典, 花井悠二, 林 泰弘, 松木純也: 「配電系統の電圧推定手法を適用した送出し電圧制御の実験的検証」, 電気学会全国大会,6-015 (2009)
- (19) 酒井重和, 林 泰弘, 川崎章司, 松木純也, 金本憲明: 「太陽光発電システム群の多目的力率制御のANSWERによる検証実験」, 電気学会全国大会,6-019 (2009)
- (20) 川崎章司, 林 泰弘, 松木純也, 山口益弘, 吉川尚志, 花井悠二, 馬場旬平: 「LRTとSTATCOMによる協調電圧制御のANSWERを用いた検証実験」, 電気学会全国大会,6-261 (2009)
- (21) 花井悠二, 林 泰弘, 松木純也, 不破由晃, 森 健二郎: 「タップ切替回数と電圧プロフィールに基づいた電圧制御器 (LRT,

- SVR) の不感帯幅の決定」, 電気学会全国大会,6-267 (2009)
- (22) 花井悠二, 松木純也, 林 泰弘: 「配電系統に設置される複数台SVC の協調整定に関する検討」, 電気学会電力・エネルギー部門大会,P15 (2009)
- (23) 酒井重和, 川崎章司, 松木純也, 金本憲明, 林 泰弘: 「ANSWER による太陽光発電システム群の力率制御手法の検証実験」, 電気学会電力・エネルギー部門大会,P16 (2009)

〔図書〕(計 1 件)  
林泰弘, 他, 日本電気協会, スマートグリッド学, 2010 年

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.eb.waseda.ac.jp/hayashi/professor.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 泰弘 (HAYASHI YASUHIRO)  
早稲田大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 40257209