A Central VQC Method based on Target Voltage Control for Local Voltage Control Devices

Masahiko Tanimoto Member (Mitsubishi Electric Corp., Tanimoto.Masahiko@dy.MitsubishiElectric.co.jp)

Hironobu Morita Member (Tohoku Electric Power Co., Inc., w940193@tohoku-epco.co.jp)

Osamu Takahashi Member (Tohoku Electric Power Co., Inc., w860333@tohoku-epco.co.jp)

Kunio Sakamoto Member (Tohoku Electric Power Co., Inc., w810331@tohoku-epco.co.jp)

Takahisa Kurokawa Member (Mitsubishi Electric Corp., Kurokawa.Takahisa@da.MitsubishiElectric.co.jp)

Shinta Fukui Senior Member (Mitsubishi Electric Corp., Fukui.Shinta@dr.MitsubishiElectric.co.jp)

Keywords: voltage reactive power control, optimal power flow, central VQC, coordinated control

In the power grid, voltage is controlled continuously in order to keep high quality of electric power, to reduce active power transmission losses, to keep voltage stability, and to improve power system stability. High efficiency in the use of transmission infrastructure and interconnection by non-utility generators are just some of the reasons that will make voltage control an hot topic in the future.

The authors have developed a new central VQC (Voltage Q (reactive power) Control) method that cooperates with local voltage control devices AVQC (Automatic V-Q Controller) for the Tohoku EPCO transmission grid. Each AVQC, located at principal substations or power stations, brings bus voltage close to its target voltage independently from the other devices controlling on-load tap changers and shunt capacitor and reactors. While the target voltage for each bus is predetermined as a scheduled value in the

conventional VQC method, in the developed central VQC method shown in Fig. 1, the target voltage is determined through on-line optimal power flow (OPF) calculation in order to minimize active power transmission losses in the bulk power grid. Efficient voltage control is realized in comparison with the conventional VQC, since the target voltage is optimally updated every few minutes in accordance with the current power grid state.

The central VQC function is operated in conjunction with several functionalities in the energy management system (EMS) at Tohoku EPCO also shown in Fig. 1. Both a state estimator and a reliable and high-speed OPF calculator are indispensable in order to control voltage using this central VQC method. The state estimator outputs the best estimation of the power grid state variables from redundant measurements and network topology data every few minutes. The OPF calculator determines the target voltage for each local device in the current power grid state, such state is calculated based on the estimated data with several functions, such as “economic dispatching control” and “load forecasting”.

This paper presents the newly developed method for a central VQC scheme, the implementation of the method as one of the functions of the EMS at Tohoku EPCO, and its effectiveness verified through bus voltages behaviors of the real Tohoku EPCO power grid state (Fig. 2). On the basis of the results, the voltage control function, employing the developed central VQC method, has been in operation from 2004.

Fig. 1. An overall voltage control system using the developed central VQC method

Fig. 2. Transition of bus voltage and target voltage

個別 VQC 装置への目標電圧指令による中央 VQC 方式

正 員 谷本 昌彦* 正 員 森田 博信**
 正 員 高橋 修** 正 員 坂本 邦夫**
 正 員 黒川 隆久*** 上級会員 福井 伸太***

A Central VQC Method based on Target Voltage Control for Local Voltage Control Devices

Masahiko Tanimoto*, Member, Hironobu Morita**, Member, Osamu Takahashi**, Member,
 Kunio Sakamoto**, Member, Takahisa Kurokawa***, Member, Shinta Fukui***, Senior Member

The authors have developed a new central VQC (Voltage Q(reactive power) Control) method that cooperates with local voltage control devices AVQC (Automatic V-Q Controller). Each AVQC, located at principal substations or power stations, brings bus voltage close to its target voltage independently by controlling the on-load tap changers and shunt capacitors and reactors status. Each target bus voltage is optimally determined through on-line optimal power flow calculation to minimize active power transmission losses in the bulk power grid. Using this central VQC method, efficient voltage control is realized in comparison with the conventional VQC since the target voltage is updated continuously in accordance with the current power grid state. The voltage control function employing the described method has been already implemented into the energy management system at Tohoku EPCO and has been in operation from 2004.

This paper presents the newly developed method for central VQC and its excellent performance through bus voltages behaviors at the real Tohoku EPCO power grid.

キーワード：電圧無効電力制御，最適潮流計算，中央 VQC，協調制御

Keywords: voltage reactive power control, optimal power flow, central vqc, coordinated control

1. はじめに

電力システムの運用において，需要家電圧や系統電圧の適正範囲維持による電力の品質向上，送電損失の軽減，電圧安定性の維持，安定度の向上などを目的として電圧の調整が行われている。今後，送変電設備のさらなる効率的な運用が求められていることに加え，パワエレ機器などの定電力負荷の増加，さらには，多様な電気事業者の電力系統への接続などにより，電圧の制御はこれまでも増して重要になっている。

これまでに基幹系統の電圧無効電力制御（VQC；Voltage Q (reactive power) Control）を行うために，種々の方式が提案されているが⁽¹⁾⁽²⁾，これらは

- (1) 変電所や発電所に設置されたローカル電圧制御装置（以下，AVQC (Automatic V-Q Controller) 装置）により局所情報を用いて制御を行う個別 VQC 方式
- (2) 中央給電指令所（以下，中給）などにおいて系統全体にわたる最適化計算を行い，その結果に基づき制御を行う中央 VQC 方式

に大別することができる。東北電力ではこれまで個別 VQC 方式による電圧制御を行ってきたが，さらなる効率的な電圧制御を行うために，既設の AVQC 装置を活かした中央 VQC 方式を開発した。本中央 VQC 方式では，送電損失の低減を図るため，中給において最適な系統状態を計算し，中給から AVQC 装置に対して目標電圧指令を行う。この中給から指令された目標電圧に応じて，AVQC 装置が自電気所の電圧を，変圧器タップのタップ位置（以下，タップ）や調相設備（SC：Shunt Capacitor/SR：Shunt Reactor）の投入/開放状態を切り替えて制御することで，系統全体の電圧を安定に制御することができる。

本中央 VQC 方式は東北電力中給システムの電圧制御機

* 三菱電機（株）先端技術総合研究所
 〒661-8661 尼崎市塚口本町 8-1-1
 Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corp.
 8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661-8661

** 東北電力（株）
 〒980-8550 仙台市青葉区本町 1 丁目 7 番 1 号
 Tohoku Electric Power Co., Inc.
 7-1, Honcho, 1-chome, Aoba-ku, Sendai 980-8550

*** 三菱電機（株）系統変電システム製作所
 〒100-8310 東京都千代田区丸の内 2-7-3
 Transmission & Distribution Systems Center, Mitsubishi Electric Corp.
 2-7-3, Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8310

能に実装されており、シミュレーションによりその効果を確認してきたが⁽³⁾⁽⁴⁾、さらに実運用に向けて連動試験を実施した。本稿では、開発した方式およびそのシステム構成について紹介するとともに、連動試験の結果として本方式により、系統電圧が適正に制御できていることを示す

なお、本方式を用いた電圧制御機能は、2004年12月より実運用を開始している。

2. 従来のVQC方式

〈2・1〉 個別VQC方式 個別VQC方式は、主な変電所・発電所に設置されたAVQC装置により、個別に電圧を目標値近傍に制御することで系統全体の電圧を制御する方式である。あらかじめ、系統運用計画などを基にAVQC装置ごとに目標電圧スケジュールを定めておき、これに対して電圧や無効電力潮流などの自電気所で計測した情報と比較し、タップ切替や調相設備の投入/開放の制御を行う(図1)。

AVQC装置による制御は、

- 取り扱うデータが局所情報のみであり、演算量が少ないため、負荷急変時などにも、すばやい動作が可能
- あらかじめスケジュールとして設定された目標電圧値に近づくように制御するため、実際の系統と想定系統との状態の違いにより、全体として必ずしも効率的にならない場合がある

などの特徴がある。

〈2・2〉 中央VQC方式 中央VQC方式は、制御装置に対して、中給などで計算した最適潮流計算(OPF: Optimal Power Flow)の結果に基づく指令を行うことで、系統全体の電圧を総合的に制御するものである。OPF計算で最適化を行う問題は、一般に次のように書ける。

$$\left. \begin{array}{ll} \min & f(x) \\ \text{subject to} & g_i(x) \leq 0 \quad (i = 0, \dots, m) \\ & h_j(x) = 0 \quad (j = 0, \dots, n) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

図1 AVQC装置の制御動作原理

Fig. 1. A voltage control principle of local voltage control device (AVQC).

$f(x)$: 評価関数(送電損失, 基準電圧偏差など)

$g(x)$: 不等式制約条件

- ・ 母線電圧上下限制約
- ・ 発電機無効電力出力上下限制約
- ・ 連系線無効電力潮流上下限制約

$h(x)$: 等式制約条件

- ・ 潮流方程式

ここで、制御変数 x は変圧器タップ位置、調相設備の投入/開放状態であり、これらは離散値であるため、この問題は組み合わせ最適化問題となる。また、電圧問題であることからOPF計算は、交流法に基づくことになる。このOPFを解く場合、求解の安定化のために逐次線形化し線形計画法を用いて制御出力を計算することが多い⁽¹⁾。

また、ここで、計算により得られた最適な系統状態を直接制御によりそのまま実現する場合には、

- データの処理量が多く、OPF計算に時間がかかるために、秒オーダーでの制御は難しい、
- 負荷急変時などに制御遅れが発生しやすい、
- 系統状態の変化に対して、OPF計算による最適系統の電圧分布自体は大きく変わらないが、それを実現する機器状態が異なる場合がある。このため、頻繁な機器動作が発生し、結果的に系統電圧の変動が生じる可能性がある、

といった課題がある。

中央VQC方式による電圧制御を実現するためには、(1) 収集したテレメータ値から系統状態を同定する状態推定計算、(2) 高速かつ安定に最適解を得るOPF計算エンジン、(3) 中給と動作する装置間の情報伝送路の整備、が条件となる。特に、上述のように式1の最適化問題は交流法に基づくOPF計算となることから、これをオンラインで実施するためには、状態推定計算によってその時点の系統状態を高い精度で得る必要がある。

3. 開発した中央VQC方式

〈3・1〉 AVQC装置との協調 東北電力の中給システムでは、状態推定計算機能が実装されており⁽⁵⁾、これまでの検証において、その精度が十分高いことを確認している。また高速・安定に最適解を求めるOPF計算機能⁽⁶⁾も実装されており、中央VQC方式による電圧制御実現のための条件が整備されたしかしながら、タップや調相設備を中央から直接的に制御する方法では、前章で述べた課題を解決することは難しい。一方、東北電力では、これまで個別VQC方式を採用してきたことから、主要な超高圧変電所および発電所には、前章で述べたAVQC装置やPSVR(Power System Voltage Regulator)装置がすでに設置されている(以下、PSVR装置についてもAVQC装置に含めて考えることとする)。

そこで、今回開発した中央VQC方式は、これらの既設装置を活用し、系統全体の効率的な制御を実現する。具体

的には、本方式では OPF 計算結果に基づくタップや調相設備への直接的な制御ではなく、AVQC 装置への目標電圧指令を行うことで、次のように系統全体を階層的に制御する。

(1) 中給における OPF 計算によって、需給変動に対応した最適な系統状態を求め、このときの電圧値（最適電圧分布）を AVQC 装置の目標電圧として指令する。

(2) タップや調相設備への制御出力は、中給から指令された目標電圧に従い、従来通り、AVQC 装置が行う。

これにより、各電気所の電圧を、中給において OPF 計算で得られた系統全体にとって最適な値に近づけることができる。また、各電気所において目標電圧からの急激な電圧変動があった場合にも、個別に AVQC 装置が制御することによる迅速な対応が可能であり、中給で集中管理した場合に生じやすい制御遅れを避けることができる。

〈3・2〉計算周期と先行制御 前節で述べたように、本中央 VQC 方式では、各母線電圧の変動については AVQC 装置が制御するため、時々刻々の状態変更に対応する必要はない。すなわち、中給の主な役割は 1 日の大きな流れの中で生じる系統の緩やかな変化や突発的に生じる大きな変化に対応して、目標電圧指令を通して系統全体の最適電圧分布を与えることである。そこで本中央 VQC 方式による電圧制御機能の設計においては、目標電圧の計算・指令周期を 9 分間隔に設定した。

また、既設の AVQC 装置は、図 1 に示したように目標電圧からの偏差（厳密には不感帯からの逸脱量）の積分量を計算して機器に対して制御出力を送る。よって、たとえ目標電圧を変更しても、電圧がその目標電圧近傍に制御されるまでには時間遅れが生じる。例えば、昼のような負荷急変時において所望の目標電圧近傍に系統電圧を制御するには、この時間遅れを考慮してあらかじめ目標電圧を先行的に設定しておく必要がある（現状の AVQC 装置に設定されたスケジュール値でも 10 分程度の時間遅れが考慮されている）。そこで、本中央 VQC 方式では、OPF 計算を 1 時点先、すなわち 9 分先の予測系統に対して行い、これに基づく指令を行う。これにより、計算から 9 分後の仕上りの電圧分布が最適な分布に近づくことが期待できる。なお、万一の系統事故などにより大きな電圧違反が検出された場合は、9 分先ではなく、当該時点の系統断面に対して OPF 計算を行い、AVQC 装置への臨時目標電圧指令を行う機能を有している（目標電圧臨時指令機能）。

なお、本中央 VQC 方式では、予測系統に対する制御を実施することや、OPF 計算結果のタップや調相設備の状態をそのまま実現するものではないことから、9 分先の仕上りの系統状態がまさに最適な状態になっているとは限らない。しかし、最適な目標電圧分布自体は系統状態の変化に対しても比較的安定しているため（負荷状態が変わっても電圧の制御目標が大きく変動するわけではない）、AVQC 装置により系統電圧に大きな衝撃を与えることなく、最適な電圧分布近傍へ連続的に制御を行うことができる。

〈3・3〉最適目標電圧計算 本節では、9 分先予測系統

における最適な系統状態を求める OPF 計算について述べる。OPF 計算の目的関数を (2) 式に示す。

$$\min f(x) = w_1 P_L(x) + w_2 \sum (v_i - \bar{v}_i)^2 \dots\dots\dots (2)$$

$v_i, \bar{v}_i$: 中給制御対象外 AVQC 装置の制御対象母線電圧および目標電圧（スケジュール値）

w_1, w_2 : 重み係数

ここで、変数 x は系統内の電圧制御機器の状態、すなわち AVQC 装置により制御される変圧器タップの位置および調相設備の入切状態、PSVR の発電機端子電圧である。よって、この問題は組み合わせ最適化問題となるが、本 OPF では、まず、変数 x のうち、離散値である変圧器タップの位置および調相設備の入切状態を、連続値の変圧器タップ比および調相の投入量とし、これらの変数に対する感度行列を用いた 2 次計画問題を解く。次にこの解を初期解として離散化し、組み合わせ最適化問題として問題空間探索法に基づく近傍探索を行い、最適解を求める⁶⁾。なお、予測系統における有効電力に関する変数（発電機有効電力出力や位相変圧器タップ位置）は、中給の他の機能（需給制御機能や位相変圧器制御機能）において決定された値を引き継いでおり、本 OPF 計算の中では固定値として扱う。

(2) 式で示した目的関数の第 1 項 $P_L(x)$ は系統全体の送電損失であり、これを低減することが本中央 VQC 方式による電圧制御の主たる目的である。第 2 項は、中給からの制御対象外 AVQC 装置による制御の影響を考慮するための項である。中給の制御対象でない AVQC 装置では、従来通り、スケジュール値として与えられた目標電圧に基づく個別制御を行うために、これらの AVQC 装置により制御される母線の電圧はスケジュール値近傍となる。(2) 式の第 2 項を目的関数として加えることで、計算結果として得られる最適系統の電圧値を当該スケジュール電圧近傍とし、実際の仕上がり電圧と最適系統の電圧分布の違いを小さくし、最適系統の実現性を高めている。なお、重み係数 w_1, w_2 は、送電損失の低減効果と AVQC 装置制御対象母線電圧の電圧変化のバランスを勘案して試験を通じて決定した。

OPF 計算に与える制約条件は、等式制約として潮流方程式、また、不等式制約として、系統監視機能で設定された (1) 母線電圧監視値の上下限制約、(2) 発電機の無効電力出力上下限制約、(3) 連系線無効電力潮流の上下限制約、に加え、(4) 運用者設定による目標電圧の指令範囲制約、を電圧の上下限制約として与え、指令値が運用者の設定値以上に変化しないようにした。なお、系統状態によってはこれらの制約条件を課した場合に、実行可能解がなくなる場合が生じるが、この場合は電圧の上下限制約を緩和して計算を進める。

〈3・4〉全体システム構成 本中央 VQC 方式による電圧制御機能は、中給システムの他の機能と密に連係して動作する⁷⁾。関連する主な機能について以下に示す（図 2）。

(1) 系統監視機能 電圧、発電機無効電力、潮流等のテレメータを監視する数値監視、CB 状態等の SV 情報

図2 中央VQC方式による電圧制御全体図

Fig. 2. An overall voltage control system using the developed central VQC method.

を監視する2値監視、伝送系の監視等を行う電圧制御機能では、目標電圧指令によって監視値違反が発生しないように、本機能で設定された監視値をOPF計算の制約条件として設定する。

(2) 状態推定機能、母線負荷予測機能 現在断面の状態推定計算を行うとともに、この状態推定計算結果を用いて、将来断面の母線負荷予測を行う母線負荷予測機能は、現在時点の状態推定結果と、蓄積した過去の状態推定結果の統計データを用いて将来の各母線の負荷値を予測する。電圧制御機能では9分先予測系統の母線負荷値として本機能の計算結果を設定する。

(3) 需給制御機能⁽⁸⁾ 発電コストを低減するように発電機の出力指令を行う。特に、本中給のEDC機能は将来の需要予測に応じた多断面の経済負荷配分計算を行い、発電機の指令値を計算する。電圧制御機能では9分先予測系統の発電機想定出力として本機能の計算結果を設定する。

(4) 位相変圧器制御機能 送電損失低減を目的として、位相調整器および位相調整変圧器のタップ位置をOPF計算により計算し、これに基づき制御する。電圧制御機能では9分先予測系統の位相変圧器タップ位置として本機能の計算結果を設定する。

(5) 系統運用計画機能 年間、月間、週間、翌日の将来時点の系統運用計画を立案する電圧制御機能では、翌日系統運用計画機能により求められた各AVQC装置の目標電圧データを引き継ぐことが可能となっており、立案された計画に基づいた計算・制御を実行することができる。

〈3・5〉 中給システム電圧制御機能概要 中給システムの電圧制御機能はこれまで述べたOPF計算に基づく目標電圧指令機能の他に、以下の機能を持つ。

(1) 運用者による目標電圧指令機能 中給から制御可能状態となっているAVQC装置に対して目標電圧を指令するAVQC装置ごとに、OPF計算結果に基づく目標電圧の他、系統運用計画にて立案したスケジュール値、AVQC装置ローカルに設定されたスケジュール値、中給運用者の指定値を運用者の設定切り替えにより、指令できる。

(2) 各制御対象母線の電圧値および目標電圧表示機能 AVQC装置のスイッチ状態の表示、AVQC装置制御対象母線の現在電圧および目標電圧の表示、監視を行う電圧違反発生時は系統監視機能と連動し、画面上に違反レベルに応じた表示を行い、運用者に通知する。

(3) 基幹系統の電圧分布表示機能 500kV、275kV系統の電圧の現在値、OPF計算結果による電圧の分布をグラフ表示する。

(4) AVQC装置の諸定数データ管理機能 AVQC装置に設定されたスケジュールや不感帯、積分時間等のパラメータを設定・管理する。

(5) 制御装置動作記録機能 各発・変電所のタップおよび調相設備の入切の動作回数を記録する。

(6) 目標電圧臨時指令機能 系統監視機能により、大きな電圧違反が検出された場合、9分間隔の制御タイミングに拘らず、OPF計算を行い、擾乱後の状態に対する目標電圧指令を行い、系統の安定化を図る。

4. 実系統による連動試験検証

本中央VQC方式における、系統状態に応じた目標電圧指令や送電損失の低減効果といった有効性については、すでにOPF計算により得られる電圧分布の検証、および、訓練シミュレータを用いた検証を通して確認してきた⁽³⁾⁽⁴⁾。そこで、本中央VQC方式による電圧制御が正しく行われ、実際に運用可能であることを確認するために、2004年9月に、1週間にわたって実際の東北電力系統に対して本方式により制御する、連動試験運転を行った。

実施した試験条件として、東北電力の275kV系統の発・変電所のうち、他社系統との連系箇所を除き、すでに中給との情報伝送路の整備が完了した13箇所のAVQC設備(内、発電所に設置されているもの4設備)を中給からの制御対象とし、他のAVQC設備およびPSVR設備については、スケジュール値に基づく個別制御とした。

また、目標電圧指令条件として、従来の制御で用いていたスケジュール電圧を指令値の基準とし、この指令基準値から1kVもしくは2kVの範囲内となるように設定した。図3に指令範囲を1kVとした場合の平日1日間の275kV発・変電所の電圧指令値および母線電圧値の推移例を示す。同様に、翌日(平日)に指令範囲を2kVに変更した場合の結果を図4に示す。また、図5および図6にそれぞれの場合のタップ、調相設備の制御動作履歴を示す。

この結果、昼間帯においては、送電損失低減のため、元のスケジュール値より高い目標電圧値を指令送出するとともに、系統電圧が当該指令値に近づくように推移している

図 3 制御対象母線電圧推移
(指令範囲：スケジュール値 ± 1 kV)
Fig. 3. Transition of bus voltage
(Target voltage range: schedule ± 1 kV).

図 4 制御対象母線電圧推移
(指令範囲：スケジュール値 ± 2 kV)
Fig. 4. Transition of bus voltage
(Target voltage range: schedule ± 2 kV).

図 5 調相設備、タップ動作推移 (B S/S)
(指令範囲：スケジュール値 ± 1 kV)
Fig. 5. Transition of SC, SR and Tap at B S/S
(Target voltage range: schedule ± 1 kV).

図 6 調相設備、タップ動作推移 (B S/S)
(指令範囲：スケジュール値 ± 2 kV)
Fig. 6. Transition of SC, SR and Tap at B S/S
(Target voltage range: schedule ± 2 kV).

ことが分かる。また、夜間帯においては、負荷が軽いことによる電圧上昇傾向に対して、A P/S で制御対象母線電圧を低めにすることで、系統全体の電圧を抑える方向に制御しているとともに、B S/S の 154 kV 母線においても、電圧を目標値近傍に制御できていることが分かる。

また、指令範囲を 1 kV とした場合に比べ、2 kV とした場合の方が、制御できる範囲が広いことから、当然ながら

目標電圧の変更回数が増える傾向となるが、2 kV 設定の範囲では、制御機器の動作回数には大きな影響を及ぼしていない。このパラメータをどの程度まで広げることが運用上妥当かについては、今後の運用に基づいて決定されていくものと考えられる。

なお、本期間を通じて、OPF 計算の制御対象母線であるかどうかにかかわらず、系統運用者による監視対象母線に

に対する電圧違反や系統擾乱は発生しなかった。

5. あとがき

既設 AVQC 装置を活用し、AVQC 装置に対して OPF 計算で得られる目標電圧を指令することで、系統全体の電圧を安定に制御しつつ、送電損失低減を図る新しい中央 VQC 方式について述べたまた、実系統に対して連動試験を実施し、その結果、本方式によって系統全体の電圧を安定に制御できることを確認した。

本方式による電圧制御機能は東北電力の中給システムに実装されており、本検証結果に基づき、最終調整の後に、2004 年 12 月より実運用に入っている。今後も、既設 AVQC 装置と中給間の情報伝送路を整備し、本方式による制御対象を順次増やしていく予定である。

(平成 17 年 7 月 28 日受付, 平成 18 年 2 月 6 日再受付)

文 献

- (1) 「電力系統の電圧・無効電力制御」, 電気学会技術報告, No.743 (1999)
- (2) M. Tanimoto, Y. Izui, K. Iba, N. Fukuta, K. Deno, and T. Sasaki: "An Autonomous Distributed VQC Method based on Q-TBC", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.6, pp.815-822 (2000-6) (in Japanese)
谷本昌彦・泉井良夫・伊庭健二・福田尚人・出野賢一・佐々木鉄於: 「Q-TBC (Q Tie-Line Bias Control) 方式による自律分散型電圧・無効電力制御」, 電学論 B, **120**, 6, pp.815-822 (2000-6)
- (3) M. Tamura, O. Takahashi, E. Tsukada, M. Tanimoto, and J. Ohtani: "Development on a Central VQC Method based upon Setting Target Voltage for Local Control Equipment", 2003 National Convention Record IEE Japan, No.6-104, pp.175-176 (2003-3) (in Japanese)
田村光成・高橋 修・塚田英一・谷本昌彦・大谷純一: 「目標電圧指令に基づく階層型中央 VQC 方式の開発」, 平成 15 年電気学会全国大会, No.6-104, pp.175-176 (2003-3)
- (4) M. Tanimoto, M. Matsumoto, O. Takahashi, E. Tsukada, and J. Ohtani: "Applying a Central VQC Method based upon Setting Target Voltage for Local Voltage Control Device", The Papers of Joint Technical Meeting on PE and PSE, IEE Japan, PE-03-121/PSE-03-132 (2003) (in Japanese)
谷本昌彦・松本光裕・高橋 修・塚田英一・大谷純一: 「目標電圧指令に基づく階層型中央 VQC 方式の適用」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研資, PE-03-121/PSE-03-132 (2003)
- (5) O. Takahashi, T. Ishihara, O. Ishioka, M. Usui, S. Fujiwara, and T. Kurokawa: "Online Security Monitoring for the next Energy Management System of Tohoku EPCO", The Papers of Technical Meeting on PSE IEE Japan, PSE-02-5 (2002) (in Japanese)
高橋 修・石原 徹・石岡 修・臼井正洋・藤原修平・黒川隆久: 「次期中央給電指令所システムにおけるオンライン信頼度監視機能について」, 電気学会電力系統技術研資, PSE-02-5 (2002)
- (6) M. Tamura, O. Takahashi, T. Ishihara, N. Itaya, and S. Nakamura: "Development of Fast Optimal Load Flow Algorithm", The Papers of Joint Technical Meeting on PE and PSE, IEE Japan, PE-02-135/PSE-02-145 (2002) (in Japanese)
田村光成・高橋 修・石原 徹・板屋伸彦・中村静香: 「高速最適潮流計算アルゴリズムの開発」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研資, PE-02-135/PSE-02-145 (2002)
- (7) O. Takahashi, T. Ishihara, O. Ishioka, S. Itou, T. Kurokawa, J. Ohtani, and K. Dan: "The Next Energy Management System of Tohoku EPCO", Proc. of the 12th Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, Vol.A, pp.580-581 (2000-8) (in Japanese)
高橋 修・石原 徹・石岡 修・伊東進治・黒川隆久・大谷純一・団幸太郎: 「次期中央給電指令所システムの概要」, 平成 13 年電気学会 B 部門大会, A 分冊, pp.580-581 (2000-8)
- (8) Y. Kojima, S. Nakamura, K. Abe, O. Takahashi, E. Tsukada, and T. Kurokawa: "Development of EDC Considering Cooperation with AFC", *IEEEJ Trans. PE*, Vol.125, No.2, pp.170-176 (2005-2) (in Japanese)
小島康弘・中村静香・阿部公哉・高橋 修・塚田英一・黒川隆久: 「AFC との協調制御を考慮した EDC の実用化」, 電学論 B, **125**, 2, pp.170-176 (2005-2)

谷 本 昌 彦 (正員) 1969 年 11 月 12 日生。1994 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程終了。同年 4 月三菱電機 (株) 入社。先端技術総合研究所にて、主として電力系統の制御・最適化, 電力自由化システムの設計などに従事。IEEE 会員。

森 田 博 信 (正員) 1968 年 8 月 8 日生。1994 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程終了。同年 4 月東北電力 (株) 入社。主として電力系統の制御・解析に関する業務に従事。

高 橋 修 (正員) 1963 年 11 月 8 日生。1986 年 3 月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年 4 月東北電力 (株) 入社。主として電力系統制御システムの開発に関する業務に従事。

坂 本 邦 夫 (正員) 1958 年 3 月 30 日生。1981 年 3 月東北大学工学部電子工学科卒業。同年 4 月東北電力 (株) 入社。主として電力系統の計画に関する業務に従事。

黒 川 隆 久 (正員) 1963 年 12 月 15 日生。1987 年 3 月北海道大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月三菱電機 (株) 入社。主として電力系統制御システムの開発に従事。

福 井 伸 太 (上級会員) 1958 年 1 月 17 日生。1980 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月三菱電機 (株) 入社。現在、同社系統変電技術センターにおいて電力システムの解析, 運用, 制御に関する研究開発に従事。工学博士。IEEE Fellow。CIGRE 会員。