

スマートグリッド時代に向けた配電システムの運用最適化技術

Optimization Technologies for Operation of Complex Distribution Systems toward Smart Grid Era

村井 雅彦

小坂 葉子

兼重 由美子

■MURAI Masahiko

■KOSAKA Yoko

■KANESHIGE Yumiko

近年、配電システムへの再生可能エネルギーの導入が進んでおり、系統電圧の維持、管理が複雑化している。また、配電システムの電力損失は平均3%程度であり、その低減が望まれている。

東芝は、数理最適化技術を適用することにより、複雑化する配電システムの運用を最適化する技術を開発している。この技術により、配電システムの電圧を最適化したり、電力損失を最小化することができ、再生可能エネルギーが大量に導入された場合でも、電力供給の安定性、経済性、及び環境性に貢献することができる。

The introduction of renewable energy sources into distribution systems complicates management of the system voltage and the operation of systems. In addition, as the average power loss of existing distribution systems is about 3%, reduction of power losses is required in order to cut emissions of greenhouse gases discharged by the consumption of fossil fuels.

Toshiba has been engaged in research and development of optimization technologies for the operation of complex distribution systems, applying mathematical optimization techniques. These optimization technologies make it possible to achieve optimal voltage regulation and minimize loss in distribution systems. Furthermore, they can contribute to the realization of stable, economical, and environmentally conscious electric power supply in the forthcoming era of mass adoption of renewable energy sources.

1 まえがき

近年、電力供給は、地球温暖化防止の観点から、化石燃料の消費抑制による温室効果ガスの排出量削減が重要な課題となっており、そのため、下記のような施策が求められている。

- (1) 再生可能エネルギーの導入拡大
- (2) 原子力発電の利用拡大
- (3) 火力発電効率の向上
- (4) 送配電損失の低減

この中で、(1)に対しては、再生可能エネルギーの出力変動に対して、配電システムの電圧を適切に維持、管理しなければならず、そのための機器の導入やその制御技術を確立する必要がある。また、(4)に対しては、基幹系統の送電電圧を上昇させる技術のほか、配電システムの構成を切り替えて配電負荷を適切に分散させる技術が有効であると考えられる。これら配電システムの機器を適切に制御する技術は、スマートグリッド時代にいっそう重要となる。

一方、数理最適化技術は、数学的に表現された制約を満たすものの中で、数学的に定義された関数を最大化、あるいは最小化するものを見つける技術である。一般に、配電システムの電気の流れや電圧、電力損失などは数学的に表現されるため、数理最適化技術の適用は容易であり、その運用を最適化することができる。

東芝は、数理最適化技術を配電システムに適用し、配電システムの

機器を適切に制御する技術を開発している。ここでは、それらの中で、電圧・負荷管理アルゴリズムと電力損失最小化アルゴリズムについて述べる。

2 電圧・負荷管理アルゴリズム

2.1 配電システムの電圧・負荷管理問題

配電システムでは、自動電圧調整器 (SVR: Step Voltage Regulator)、無効電力補償装置 (SVC: Static Var Compensator)、電圧調整装置 (SCC: Self-Control Voltage Compensator)、進相コンデンサ (SC: Static Condenser)などを設置して電圧を調整している(図1)。配電線の線路抵抗により生じる電圧降下が大きくなると、負荷機器へ影響を及ぼすという問題がある。また、電圧降下は配電線末端になるに従い線路電流を大きくし、電力損失(=電圧降下と電流の積)が増大する。そのため、これらの電圧調整機器を設置して配電線の電圧を適正範囲に維持する必要がある。

従来は、これらの電圧調整機器が負荷の大きさに応じて個別に自律的な制御を行い、配電線の適正電圧を維持していた。しかし今後、太陽光発電など分散電源の大量導入が進むことで、分散電源からの逆潮流により電圧が上昇し、適正電圧から逸脱する可能性が出てくる。そこで当社は、配電線全体の電圧が最適となる制御量(表1)を求めるアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムを配電自動化システムに適用すれば、

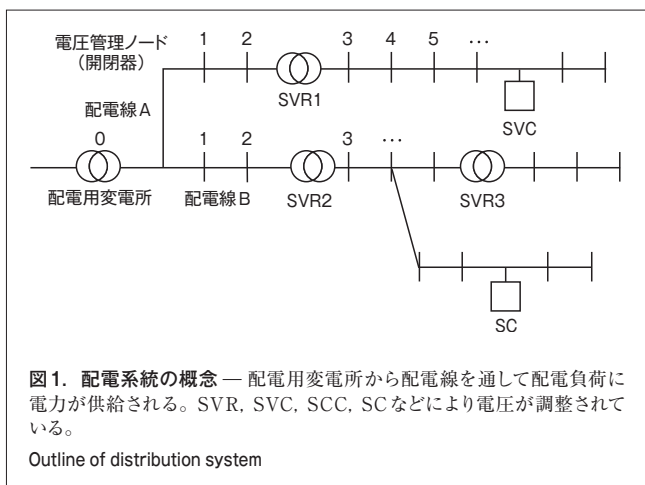


図1. 配電系統の概念 — 配電用変電所から配電線を通して配電負荷に電力が供給される。SVR, SVC, SCC, SCなどにより電圧が調整されている。

Outline of distribution system

表1. 電圧調整機器と制御量

Voltage regulation devices and control variables

電圧調整機器	制御量
SVR	タップ
SVC	注入無効電力
SCC	入切
SC	入切

電圧調整機器が協調して配電線全体の電圧を最適に制御することが期待できる。

2.2 アルゴリズムの概要

配電系統の電圧の最適状態を、電圧管理ノード（各開閉器設置箇所）の電圧と目標電圧との差異が最小になることと定義する。配電線（6.6 kV）の目標電圧は、低圧側電圧が 101 ± 6 V の範囲となるように定められる。これは、 V_i を電圧管理ノード i の電圧、 V_{ri} を電圧管理ノード i の目標電圧としたとき、式(1)で表される評価関数を最小化する問題となる。

$$\sum_i (V_i - V_{ri})^2 \quad (1)$$

電圧調整機器のSVR, SC, 及びSCCの制御量は離散変数, SVCの制御量は連続変数であり, 制約条件は電力潮流方程式であるため, 問題は混合整数非線形計画問題として定式化された最適潮流計算となる。この問題は, 制約式を逐次線形近似することで, 逐次混合整数二次計画法として解くことができる。

計算フローを図2に示す。各電圧管理ノードの初期値は, 潮流計算を用いて求める⁽¹⁾。逐次最適化では, 電力潮流方程式を近似した式を解いているので, 最適化計算結果を用いて潮流計算を行い, その結果を初期値として再び最適化計算を繰り返し, 収束計算を行う。

2.3 性能検証

プロトタイププログラムを作成し, 実配電線データを対象に

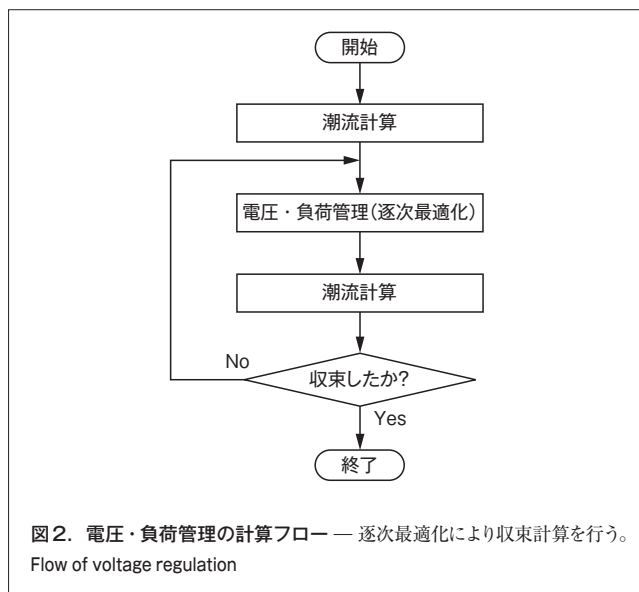


図2. 電圧・負荷管理の計算フロー — 逐次最適化により収束計算を行う。Flow of voltage regulation

アルゴリズムの性能検証を行った。SVRが2か所, SCが1か所に設置されている系統の検証結果を一例として示す。潮流計算を行って得られた電圧管理ノードの電圧初期値と, 開発したアルゴリズムで得られた最適解を比較して図3に示す。最適解は初期値に比べ目標電圧に近づいていることがわかる。また, 電圧調整機器に対する制御の組合せごとに潮流計算を行って得られた電圧を評価した結果, 表2に示すように, 最適解は評価関数値がもっとも小さいケースと一致し, アルゴリズムが高い性能を持つことを確認した。

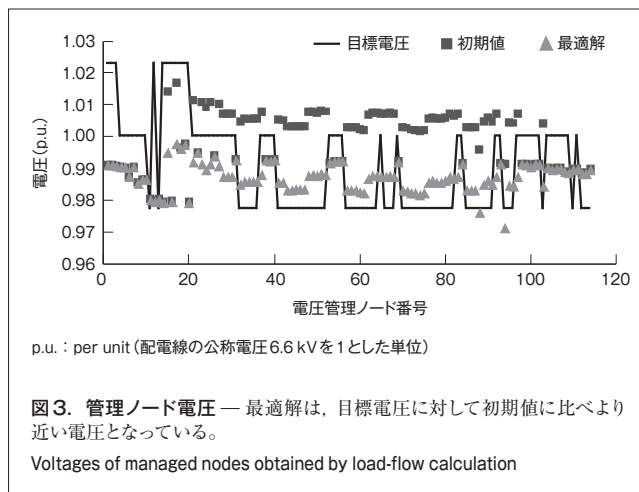


図3. 管理ノード電圧 — 最適解は, 目標電圧に対して初期値に比べより近い電圧となっている。

Voltages of managed nodes obtained by load-flow calculation

表2. 最適化計算結果

Optimization results

ケース	SVR1タップ	SVR2タップ	SC1状態	評価関数値	順位
最適解	5	5	入	0.0217	1
初期値	6	5	入	0.0551	10

3 電力損失最小化アルゴリズム

3.1 配電システムの電力損失最小化問題

一般に、配電システムの電力損失は、配電線の抵抗と、配電線を流れる電流の二乗に比例する。このため、同じ負荷に対して電力損失を少なくするためには、電力の供給経路を変更し、各配電線の電流を適切に分散させて均一化する必要がある。

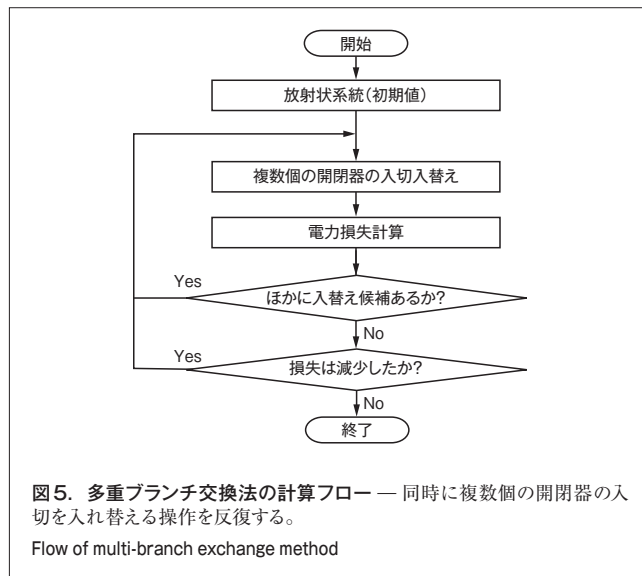
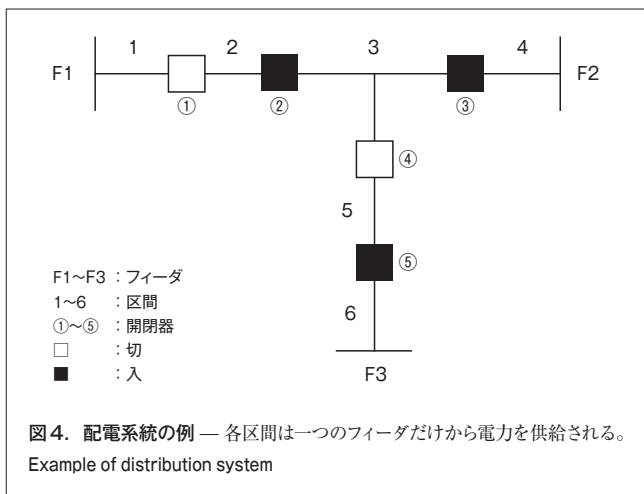
配電システムは、網状のシステムを開閉器で区分して放射状になるように運用しており、事故時などに停電区間が最小となるよう開閉器を切り替え、電力の供給経路を変更している。この配電システムの開閉器の切替を、電力損失が小さくなるように行う。

図4は簡単な放射状の配電システムの例である。F1～F3の三つのフィーダ（配電線）から配電システム内に電力が供給されており、このシステムは、①～⑤の五つの開閉器により1～6の六つの区間に区分されている。そして、開閉器①、④を切、②、③、⑤を入とすることで放射状の構成となり、各区間が一つのフィーダだけから電力供給される状態となる。

電力損失を最小化するもっとも単純な方法は、開閉器のすべての入切の組合せに対し、放射状のシステム構成となるものの中から電力損失のもっとも小さいものを選択する方法である。しかし、実際の配電システムでは開閉器の数が多く、入切の組合せが膨大となるため実用的ではない。そこで、以下のようなアルゴリズムにより電力損失を最小化する。

3.2 アルゴリズムの概要

開発した電力損失最小化アルゴリズムは、現在得られている放射状のシステム構成から、電力損失が小さくなるように複数の開閉器の入切の状態を入れ替える操作を繰り返すものであり、多重ブランチ交換法と呼ぶ(図5)²⁾。従来は、一度に一つの開閉器の入切状態を入れ替えていたが、複数の開閉器の状態を効率よく入れ替える技術を開発した。これにより、従来に比べて電力損失のより少ないシステム構成が得られるようになった。



3.3 性能検証

表3に示す配電システムを対象として、開発した多重ブランチ交換法アルゴリズムの性能を検証した。検証は、同時に2個の開閉器を操作する二重ブランチ交換法に対して行い、従来のブランチ交換法と比較した。

最適化計算結果と反復回数に対する電力損失の変化のようすを図6に示す。二重ブランチ交換法では、従来のブランチ交換法と比較して、より損失の小さいシステム構成が得られていることがわかる。また、計算時間は増加しているものの、このシステム規模であれば、5秒以下と実用上十分な時間で計算できることがわかる。

3.4 配電自動化システムへの組み込み

開発したアルゴリズムを、配電自動化システムに組み込み、実運用上どのような効果が得られるかを確認した。

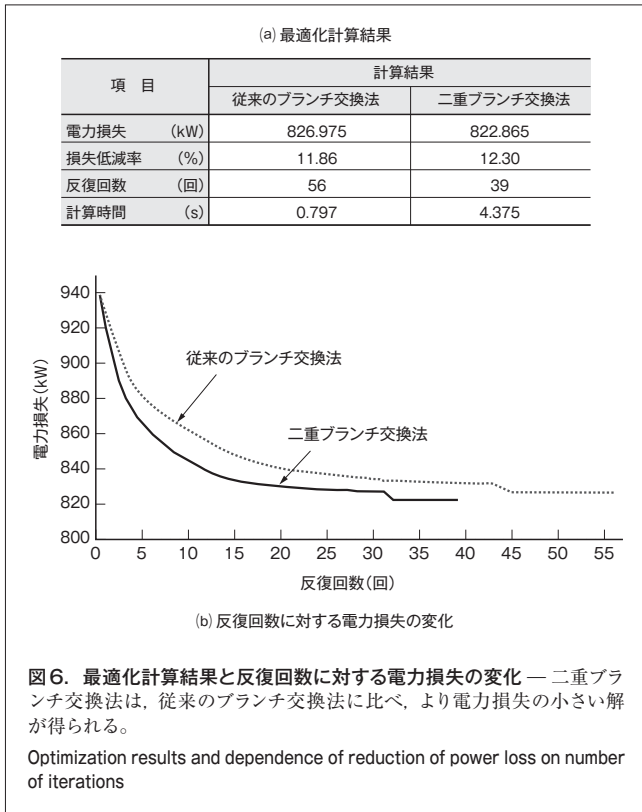
3.4.1 配電自動化システムにおける損失最小化の用途

損失最小システムとは、あるシステム断面において電力損失が最小となるシステムであるが、配電システムは事故や操作などによりシステム状態が刻々と変化するため、常に損失最小となるシステムでオンラインの運用を行うのは難しいと考えられる。

一般に、配電システムの運用では、日々行われる設備の更新工事のためのシステム切替え（作業計画）のほかに、夏期、冬期、中

表3. 評価システムの規模
Sizes of evaluation systems

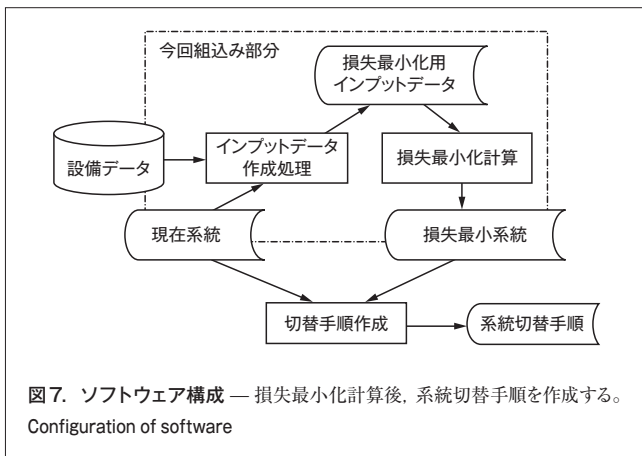
項目	規模
総開閉器数	1,506台
うち常時入開閉器数	218台
区間数	1,332区間
電力損失	938.2371 kW



間期など負荷配分が変わるタイミングで、系統構成をある程度長期的に切り替える系統変更を行うことがある。この場合、電力損失の大小は運用コストに影響を及ぼすことと、事故時などは運用コストより電力供給が優先されるため、損失最小化機能の用途は、オンライン運用でなく、系統切替えのようなオフライン運用であると想定した。

3.4.2 損失最小化計算処理の組み込み 配電自動化システムに損失最小化計算を組み込んだ部分のソフトウェア構成を図7に示す。

組み込んだ損失最小化計算処理と組み込みに関して見直した処理の概要を以下に述べる。



(1) インputデータ作成処理 配電自動化システムの設備データ、現在系統状態、及び配電線電流などから、以下の損失最小化計算inputデータを作成する。

- (a) ノードブランチ 変電所以下の系統のつながり
- (b) 区間負荷 計算要求時の配電線電流値を標準区間負荷の比率で案分したデータ
- (c) 配電線抵抗 各区間の抵抗データ

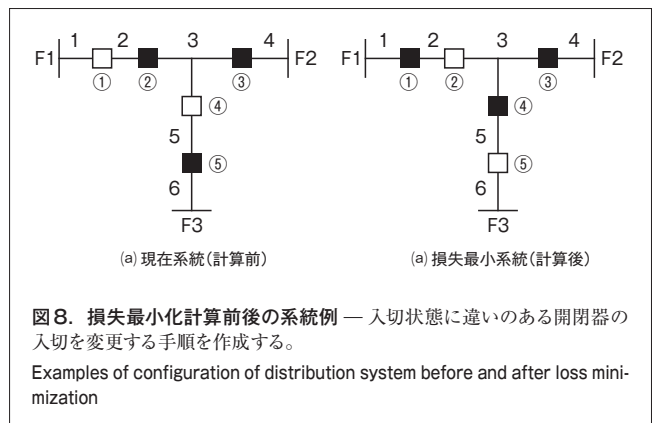
(2) 損失最小化計算処理 損失最小系統の状態(開閉器の入切状態)と、その系統での電力損失を出力する。

(3) 切替手順作成処理 損失最小化計算要求時の系統状態(現在系統)と、損失最小系統の状態を比較し、現在系統から損失最小系統に移行するための切替手順を作成する。このとき、系統が停電とならないようループ切替手順を作成する。ループ切替手順の作成方法の一例を図8に示す損失最小化計算前後の系統列に基づき述べる。

図8の例で、現在系統と損失最小系統で入切状態に違いがある開閉器は、①、②、④、⑤の4台である。損失最小系統への移行手順として、まず、現在系統で切の開閉器①を入状態にする。次に、損失最小系統で切状態の開閉器のうち、①の投入によりループとなっている、F1からF2への供給経路上の開閉器②を切状態にする。残りの二つの開閉器(④、⑤)についても同様にループ切替手順を作成する。

このようにして作成した、①投入→②開放→④投入→⑤開放の4手順が、現在系統から損失最小系統へのループ切替手順となる。

3.4.3 手順作成を考慮した制約事項 実配電システムには、遠隔制御可能な開閉器と現場での操作が必要な手動開閉器とがあり、操作に要する時間が大きく異なる。損失最小化計算の対象範囲によっては、系統切替えの範囲(地理的な範囲)も広範囲に及ぶ可能性があり、その場合、操作員の移動時間などを考えると、手動開閉器による操作はできるだけ少ないほうがよい。このため、損失最小化計算のinput



データに開閉器の遠隔制御又は手動の種別を計算条件として追加し、遠隔制御開閉器だけを対象とした損失最小化計算を行うことができるようにした。また、計算過程の系統で操作対象の開閉器を選択するときに、配電線が過負荷状態とならないようにするための過負荷制約について、計算アルゴリズムを開発し、計算要求時の条件として与えられるようにした。

3.4.4 配電自動化システムでの実行結果 実配電システムでの運用を想定し、表4(a)に示す計算条件で損失最小系統への切替手順を作成した。

計算結果を表4(b)に示す。作成した切替手順数及び手順作成処理時間ともに、配電自動化システムでの実運用に十分適用可能な値であると言える。

表4. 計算条件と計算結果
Calculation assumptions and results for transition to loss minimization system

(a) 計算条件

項目	計算条件
総開閉器数	5,890台
うち遠隔制御開閉器数	1,572台
対象開閉器	遠隔制御開閉器だけ
過負荷制約	あり

(b) 計算結果

項目	計算結果
切替手順数	174
手順作成処理時間*1	1.0 min
操作時間(計算)*2	1 h 27 min

*1 : コンピュータのCPUはIntel® Celeron®(注1)(2.4 GHz)、メモリは1 Gバイト
*2 : 遠隔制御開閉器1台当たりの操作時間を0.5 minとした

4 あとがき

ここでは、配電システムの運用における電圧・負荷管理問題及び電力損失最小化問題に対して、数理最適化技術を適用することにより、配電システムを最適に運用できるようになることを述べた。

これらの技術は、再生可能エネルギーが電力系統に大量に導入されるスマートグリッド時代に、より重要になると考えられる。今後、実際の配電システムへの適用を推進し、その安定運用に貢献していきたい。

(注1) Intel, Intel Celeronは、米国及びその他の国における米国Intel Corporation又は子会社の登録商標又は商標。

文献

- (1) 田能村 顕一, ほか. 計測情報を利用した配電系統の電圧・潮流分布状態計算法. 電気学会論文誌B. **125**, 10, 2005, p.948 - 956.
- (2) 村井 雅彦, ほか. 多重ブランチ交換による配電系統損失最小化. 電気学会論文誌B. **128**, 10, 2008, p.1235 - 1242.



村井 雅彦 MURAI Masahiko

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 制御システム開発部主査。エネルギーシステムの計画、運用、制御に関する研究・開発に従事。電気学会、計測自動制御学会、日本OR学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



小坂 葉子 KOSAKA Yoko

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電力ソリューション・配電システム開発部主務。電力系統の運用、監視、制御、解析に関する研究・開発に従事。電気学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



兼重 由美子 KANESHIGE Yumiko

電力流通・産業システム社 府中事業所 電力系統システム部主査。電力系統監視制御システムの開発に従事。電気学会会員。Fuchu Complex