

# 博士論文概要

## 論文題目

Studies on Optimal Switches Control Methods for  
Distribution Networks with Distributed Energy  
Resources

分散型エネルギーリソースが連系された  
配電系統における最適開閉器制御手法  
に関する研究

申請者

Yuji	TAKENOBU
竹延	祐二

先進理工学専攻 電気・情報生命研究 A

2018 年 11 月

配電系統では，供給電力の一部が配電線のジュール熱になり，電流の二乗に比例する形で配電損失として失われる。配電線には多数の区分開閉器（以下，開閉器）が設置されており，配電損失の発生量は，電力供給経路を定める開閉器の入・切状態に変化する。省エネルギー化の観点からは，エネルギー的に無駄のない理想的な状態，すなわち，配電損失が最小となる開閉器状態で需要家に給電することが望ましい。一方で，近年，太陽光発電システムをはじめとする分散型電源や，蓄電機能をもつ電気自動車（EV: Electric Vehicle）など，分散型エネルギーリソースの大量の連系要求に伴い，特定の時間帯に発電や電力消費が集中することに起因し，配電系統において適正電圧の逸脱や配電線の過負荷が生じる懸念がある。このような条件下において，開閉器制御に基づき電力供給経路を組み替えて，系統運用上の制約違反を回避することができれば，より多くの分散型エネルギーリソースを連系することができる。脱炭素化やエネルギーの分散化に向けたエネルギーシステムへの移行が世界的に進む中で，多くの分散型エネルギーリソースの連系を可能とすることが望ましい。

分散型エネルギーリソースの配電系統への連系量をできる限り増大させ，その上で配電損失を最小とするためには，開閉器状態を適切に制御しなければならない。これに対して，実規模の配電系統が有する開閉器数は数百に及び，開閉器状態の組合せ数は開閉器数  $n$  に対して  $2^n$  乗通りになる。そのため，候補となる開閉器状態の組合せ数は極めて膨大になり，最適な開閉器状態を計算することが困難となる。従来，数理計画法やメタヒューリスティクスなどの枠組みに基づく開閉器制御の最適化手法が提案されているが，実規模の配電系統にも適用可能で，かつ，実用時間内に厳密解を計算可能な手法は提案されていない。また，配電損失最小化を目的として，これまで多くの開閉器制御の最適化手法が提案されているが，これらの手法はピーク需要の1断面のみを対象としており，時々刻々と変動する電力需要に対して，期間全体を通じて配電損失を最小にできるとは限らない。需要の変動に追従して開閉器状態を更新できればよいが，開閉器の設備寿命を考慮すると頻繁な開閉器切替は現実的ではない。これまで，開閉器の設備寿命を考慮して年間などの期間全体における配電損失を最小化する手法は提案されていない。

さらに，上述の配電系統の開閉器制御に加え，EVなどの需要家のエネルギーリソースを制御することで，配電損失の低減効果や分散型エネルギーリソースの連系量のさらなる向上が期待できる。例えば，EVの充電が集中的に行われる時間帯において，配電系統の要請に応じて，需要家がEVの充電開始時間を分散し，配電線の過負荷を回避することができれば，EVの連系可能容量を増大させることができる。このように，配電系統と需要家の分散型エネルギーリソースが適切に協調して動作するシステムを設計し，これらの制御結果を評価するためには，エネルギーシステムの動的挙動を精緻に表現したシミュレーションモデルが必要と

なる。しかしながら、需要家個々の電力利用の動的挙動を詳細に捉え、それらの需要家に対して面的に電力供給を行う配電システムを大規模詳細に模擬するためのモデリング手法は提案されておらず、モデルそのものも存在していなかった。

本論文では、上述の課題を解決するために、分散型エネルギーリソースの連系要求を最大限可能とした上で、配電損失を最小とするための一連のシステム運用に必要とされる最適開閉器制御手法の提案と、配電システムと需要家のエネルギーリソースの協調制御を多角的に評価可能とする大規模詳細な配電システムのモデリング手法を提案する。具体的には、1) 分散型エネルギーリソースの中でも特に分散型電源に着目し、分散型電源の連系可能容量を最大とする、実規模の配電システムにも適用可能な最適開閉器制御の厳密解法の提案、2) 開閉器の設備寿命を考慮した上で年間の配電損失を最小とする最適開閉器制御手法の提案、3) 大規模詳細な配電システムのモデリング手法の提案を行う。以下、章を追って本論文の概要を述べる。

1章では、序論として本論文の背景および目的について述べる。

2章では、分散型電源の連系可能容量の最大化を目的として、分散型電源の最適配置・容量を同時に考慮しながら開閉器状態を最適化する厳密解法を提案する。提案手法は、実行可能な全ての開閉器状態の組合せと分散型電源の連系可能容量の膨大な解空間を小さく表現し、小さな解空間の上で解を探索することで、効率的に最適解を得る。さらに、提案手法は実行可能な全ての解を保持するため、網羅的な解の探索を可能とし、同一の評価値をもつ複数の最適解が存在する場合、それら全てを列挙することができる。複数の最適解を提示することで、システム運用者は運用目的にあった解を選択することが可能となる。解空間を小さく表現するために、提案手法は、重み付きの組合せ集合を圧縮して表現可能なデータ構造であるゼロサプレス型二分決定グラフベクトル表現 (ZDDV: Zero-suppressed Binary Decision Diagram Vector) を利用する。分散型電源の連系可能容量を重み、開閉器状態の組合せの候補群を組合せ集合と捉えれば、これらは重み付きの組合せ集合として ZDDV で表現することができる。提案手法では、複数の木構造から構成される配電システムにおいて、取り得る木の数のうち電気的な運用制約を満たす木の数は小さくなるという性質と、ZDDV の効率的な算術演算を利用して、電気的に有効な全ての木について重みを計算し、配電システムを構成する取り得る木の組合せについて木の重みの和を実用時間内に計算することで、実行可能な解空間を表現した ZDDV を構築し、ZDDV 上で効率的に最適解を探索する。数値実験では、235 個の開閉器をもつ配電システムの標準解析モデルに対して、提案手法は  $1.49 \times 10^{18}$  個の全ての最適解を 17.1 時間以内に決定した。

3章では、与えられた開閉器切替の上限回数に基づき、年間の配電損失を最小とする開閉器状態と切替時期を決定する手法を提案する。年間の配電損失最小化は、開閉器状態の組合せに加え、切替時期の組合せも決定する極めて複雑な組合せの最適化問題である。提案手法では、開閉器状態の最適化について、配電損失

を独立に計算することができ、配電系統全体の配電損失に与える相互影響の範囲を理論的に保証することのできる部分領域に着目する。具体的には、部分領域における最適な開閉器状態の結合が実行可能であるならば、配電系統全体としても最適であるという性質を利用する。一般的に、部分領域内の開閉器数は少ないので、高速に最適な開閉器状態を探索することができる。一方、切替時期の最適化については、対象時期に開閉器を切り替えることで得られる配電損失削減量の上界値を見積もり、これに基づく分枝限定法によって効率的に最適切替時期の探索を行う。数値実験では、468個の開閉器をもつ配電系統の標準解析モデルを対象に、日単位の切替時期の候補（365日間）を想定して、提案手法の有効性を検証した。年間における開閉器切替の上限回数を6回として、単一の需要断面を対象に開閉器状態を最適化する従来手法を年間の配電損失最小化に直接適用した場合、推定される計算時間が約1,776時間であったのに対して、提案手法は22.2時間以内に全ての最適化計算を終了した。また、等間隔の時期に開閉器状態を切り替える季節切替の運用と比較して、最適時期に開閉器状態を切り替えることで、開閉器制御による配電損失削減効果が2.1倍向上することを明らかにした。

4章では、実在する配電系統の情報、衛星観測される日射量の面的分布の推移情報、需要家の消費電力推移情報のデータに基づいて、任意の評価対象地域の建物用途や電力需要傾向の特性を反映した1配電用変電所規模の配電系統を、各箇所に関連される需要家1軒単位の電力利用の推移までを2.5分単位で詳細にモデリングする手法を提案する。具体的には、配電系統の構成単位である木構造の粒度で多様な配電系統モデルを複数構築し、建物用途と階数で特徴づけられる対象地域の需要特性を再現する木単位の配電系統モデルの集まりと、開閉器を接続点とするそれらのモデル間の接続関係を決定することで、全体の配電系統を形成する。次に、配電線の線路長と配電用変電所を中心として樹枝状に配電線が広がる電力設備の特徴を用いて、配電系統各地点の経緯度情報を決定し、配電系統と衛星日射情報に対応づけることにより、想定する太陽光発電システムの配置・容量に応じた発電電力の模擬を可能とする。数値実験では、東京都の実在都市を対象に、10,549軒の住宅を含み、開閉器や電圧制御機器などの主要な電力設備を具備した、4.8 km×5.5 km規模の配電系統モデルを構築した。構築した配電系統モデルを用いて、配電系統の要請に基づき、需要家がEVの充電開始時間を分散させる協調制御手法を導入することで、EVの連系可能容量がどの程度向上するかを評価した。その結果、それぞれの需要家が単独でEV充電を開始する場合と比較して、配電系統と需要家保有のEVとの協調制御は、EV充電の集中的な電力利用による電圧逸脱を回避し、EVの導入数の割合を20%から60%に増加させることを明らかにした。

5章では、本論文をまとめ、今後の展望について述べる。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 竹延 祐二

印

(2018年 11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	
○	1. <u>Yuji Takenobu</u> , Norihito Yasuda, Shin-ichi Minato, Yasuhiro Hayashi, “Scalable Enumeration Approach for Maximizing Hosting Capacity of Distributed Generation”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 105, pp. 867-876, Feb. 2019（掲載決定）
○	2. Yasuhiro Hayashi, Yu Fujimoto, Hideo Ishii, <u>Yuji Takenobu</u> , Hiroshi Kikusato, Shinya Yoshizawa, Yoshiharu Amano, Shin-ichi Tanabe, Yohei Yamaguchi, Yoshiyuki Shimoda, Jun Yoshinaga, Masato Watanabe, Shunsuke Sasaki, Takeshi Koike, Hans-Arno Jacobsen, Kevin Tomsovic, “Versatile Modeling Platform for Cooperative Energy Management Systems in Smart Cities”, Proceedings of the IEEE, vol. 106, no. 4, pp. 594-612, Apr. 2018
○	3. <u>Yuji Takenobu</u> , Norihito Yasuda, Shunsuke Kawano, Shin-ichi Minato, Yasuhiro Hayashi, “Evaluation of Annual Energy Loss Reduction Based on Reconfiguration Scheduling”, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 3, pp. 1986-1996, May 2018
	4. Takeru Inoue, Norihito Yasuda, Shunsuke Kawano, <u>Yuji Takenobu</u> , Shin-ichi Minato, Yasuhiro Hayashi, “Distribution Network Verification for Secure Restoration by Enumerating All Critical Failures”, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 2, pp. 843–852, Mar. 2015
Proceedings	
	1. <u>Yuji Takenobu</u> , Satoru Akagi, Hideo Ishii, Yasuhiro Hayashi, Jens Boemer, Deepak Ramasubramanian, Parag Mitra, Anish Gaikwad, Ben York, “Evaluation of Dynamic Voltage Responses of Distributed Energy Resources in Distribution Systems”, Proceedings of 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PES GM), Aug. 2018
	2. Shingo Uchiyama, <u>Yuji Takenobu</u> , Jun Yoshinaga, Yasuhiro Hayashi, Masato Watanabe, Ryota Yamamoto, “Evaluation of Energy-Loss Minimum Operation Using Real Measurements and Network Data”, Proceedings of 2017 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT-Asia), Dec. 2017
	3. Ryusuke Konishi, <u>Yuji Takenobu</u> , Masaki Takahashi, Yasuhiro Hayashi, “Optimal Allocation of Photovoltaic Systems and Energy Storage Systems Considering Constraints of Both Transmission and Distribution Systems”, Proceedings of 2017 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT-NA), Apr. 2017
	4. <u>Yuji Takenobu</u> , Shunsuke Kawano, Yasuhiro Hayashi, Norihito Yasuda, Shin-ichi Minato, “Maximizing Hosting Capacity of Distributed Generation by Network Reconfiguration in Distribution System”, Proceedings of 19th Power Systems Computation Conference (PSCC), Jun. 2016
	5. <u>Yuji Takenobu</u> , Shunsuke Kawano, Yasuhiro Hayashi, Norihito Yasuda, Shin-ichi Minato, “Determination Method of the Configuration Optimization Minimizing Yearly Loss”, Proceedings of 20th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Jun. 2014

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	<ol style="list-style-type: none"> <li data-bbox="304 371 1469 479">1. 阿美咲良, <u>竹延祐二</u>, 内山慎距, 宮崎輝, 林泰弘, 山本良太, 安居昂紀, 「PV 導入系統における電力損失最小化を目的とした年間運用計画の評価」, 平成 30 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 徳島, 2018 年 9 月</li> <li data-bbox="304 517 1469 624">2. 内山慎距, <u>竹延祐二</u>, 阿美咲良, 宮崎輝, 林泰弘, 山本良太, 安居昂紀, 「センサ開閉器の実測情報に基づく系統構成切替による配電損失削減効果の評価」, 平成 30 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 徳島, 2018 年 9 月</li> <li data-bbox="304 663 1469 770">3. 内山慎吾, <u>竹延祐二</u>, 吉永淳, 林泰弘, 渡辺雅人, 山本良太, 「複数配電系統を対象にした電力損失最小化運用の年間評価」, 平成 30 年電気学会全国大会, 福岡, 2018 年 3 月</li> <li data-bbox="304 808 1469 916">4. <u>竹延祐二</u>, 藤本悠, 林泰弘, 上林由香, 山口容平, 下田吉之, 「地域特性を考慮した機器別住宅エネルギー需要推定に基づく配電系統評価手法」, 平成 30 年電気学会全国大会, 福岡, 2018 年 3 月</li> <li data-bbox="304 954 1469 1104">5. 上林由果, 山口容平, 松岡綾子, 下田吉之, <u>竹延祐二</u>, 藤本悠, 林泰弘, 「国勢調査及び生活時間データに基づく小地域単位の住宅エネルギー需要シミュレーション」, エネルギー・資源学会 第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 千代田, 2018 年 1 月</li> <li data-bbox="304 1142 1469 1249">6. 内山慎吾, <u>竹延祐二</u>, 吉永淳, 林泰弘, 渡辺雅人, 山本良太, 「実配電系統情報と実測情報に基づく電力損失最小化運用の年間評価」, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 中野, 2017 年 9 月</li> <li data-bbox="304 1288 1469 1438">7. <u>Yuji Takenobu</u>, Satoru Akagi, Hantao Cui, Hideo Ishii, Kevin Tomsovic, Yasuhiro Hayashi, 「Transient Stability Analysis, Considering Reactive Power Support of Smart Inverters in Distribution Networks」, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 中野, 2017 年 9 月</li> <li data-bbox="304 1476 1469 1583">8. 内山慎距, <u>竹延祐二</u>, 吉永淳, 林泰弘, 渡辺雅人, 山本良太, 「実配電系統を対象にした電力損失最小化運用の定量的評価」, 平成 29 年電気学会全国大会, 富山, 2017 年 3 月</li> <li data-bbox="304 1621 1469 1771">9. 渋谷彩音, <u>竹延祐二</u>, 丸山由香, 吉永淳, 藤本悠, 田辺新一, 林泰弘, 山口容平, 下田吉之, 渡辺雅人, 佐々木俊介, 小池健, 「EMS 技術評価のための都市規模解析モデルの構築 -その 2 都市構成を考慮した需要家情報と配電線情報の特徴量解析-」, 平成 29 年電気学会全国大会, 富山, 2017 年 3 月</li> <li data-bbox="304 1809 1469 1960">10. <u>竹延祐二</u>, 渋谷彩音, 丸山由香, 吉永淳, 藤本悠, 田辺新一, 林泰弘, 山口容平, 下田吉之, 渡辺雅人, 佐々木俊介, 小池健, 「EMS 技術評価のための都市規模解析モデルの構築-その 3 座標情報付き大規模配電システムの構成-」, 平成 29 年電気学会全国大会, 富山, 2017 年 3 月</li> </ol>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<p>11. 山口容平, 下田吉之, <u>竹延祐二</u>, 渋谷彩音, 丸山由香, 吉永淳, 藤本悠, 田辺新一, 林泰弘, 渡辺雅人, 佐々木俊介, 小池健, 「EMS 技術評価のための都市規模解析モデルの構築 -その1 代表日配電負荷・需要家契約電力に基づく需要家の想定-」, 平成 29 年電気学会全国大会, 富山, 2017 年 3 月</p> <p>12. <u>竹延祐二</u>, 安田宜仁, 河野俊介, 湊真一, 林泰弘, 「ZDD ベクタを用いた運用制約付き分散型電源連系可能容量最適化」, 平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 北九州, 2016 年 9 月</p> <p>13. 安田宜仁, <u>竹延祐二</u>, 林泰弘, 湊真一, 「停電量最小な復旧構成の厳密求解」, 平成 28 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 北九州, 2016 年 9 月</p> <p>14. 小西隆介, 高橋正樹, <u>竹延祐二</u>, 林泰弘, 「送配電系統における太陽光発電と電力貯蔵装置の最適導入量決定問題」, 平成 28 年電気学会全国大会, 仙台, 2016 年 3 月</p> <p>15. <u>竹延祐二</u>, 河野俊介, 林泰弘, 安田宜仁, 湊真一, 「大規模配電網における分散型電源連系可能最大容量の厳密解法」, 平成 28 年電気学会全国大会, 仙台, 2016 年 3 月</p> <p>16. 安田宜仁, 湊真一, <u>竹延祐二</u>, 林泰弘, 「配電損失最小化問題のスケラブルな厳密解法」, 平成 28 年電気学会全国大会, 仙台, 2016 年 3 月</p> <p>17. 吉永 淳, <u>竹延祐二</u>, 芳澤信哉, 林泰弘, 石橋一成, 渡辺雅人, 佐々木俊介, 小池健, 「Grid EMS 手法の多面的評価を目的とする配電ネットワークの標準解析モデルの構築」, 平成 28 年電気学会全国大会, 仙台, 2016 年 3 月</p> <p>18. <u>竹延祐二</u>, 安田宜仁, 河野俊介, 湊真一, 林泰弘, 「系統構成を考慮した分散型電源の連系可能最大容量の決定手法」, 平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 名古屋, 2015 年 8 月</p> <p>19. 安田宜仁, <u>竹延祐二</u>, 河野俊介, 林泰弘, 湊真一, 「網羅的な実行可能構成の列挙に基づく年間配電エネルギー損失最小化」, 平成 27 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 名古屋, 2015 年 8 月</p> <p>20. <u>竹延祐二</u>, 河野俊介, 林泰弘, 安田宜仁, 湊真一, 「分枝限定法を用いた系統構成切替による年間の配電損失最小化手法」, 平成 26 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 堺, 2014 年 9 月</p> <p>21. <u>竹延祐二</u>, 河野俊介, 林泰弘, 安田宜仁, 湊真一, 「系統構成切替による年間の配電損失最小化手法」, 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 京田辺, 2014 年 9 月</p> <p>22. <u>竹延祐二</u>, 河野俊介, 林泰弘, 安田宜仁, 湊真一, 「年間の配電損失最小構成の決定手法」, 平成 26 年電気学会全国大会, 松山, 2014 年 3 月</p>