

氏 名 北島 弘伸

学位(専攻分野) 博士(情報学)

学位記番号 総研大甲第 1762 号

学位授与の日付 平成27年3月 24 日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 スマートグリッドにおけるオペレーショナルリスク最適化の研究

論文審査委員 主 査 教授 曾根原 登
教授 米田 友洋
教授 合田 憲人
教授 計 宇生
教授 伊庭 健二 明星大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

スマートグリッドにおけるオペレーショナルリスク最適化の研究

スマートグリッドとは、従来型の集中型電源と送電系統との一体運用に加えて、ICT技術の利用により、太陽光発電などの分散型電源や需要家の情報を統合的に活用するような、新しいタイプの電力供給システムである。スマートグリッド構想の主目的は、電力の安定供給と効率的利用であるが、時代的な要請から再生可能電力を含む分散型電源や、デマンドレスポンス(DR)等の節電資源の利用も同時に希求されている。従って、電力供給に関係する意思決定主体が格段に増えることとなり、従来の集中型電源管理の時代と比較すると、その日々の運用上の難しさも増大・多様化している。このような状況下において、スマートグリッドのオペレーショナルリスクを管理するためのICT技術がつよく求められている。

本研究は、スマートグリッドにおいて発生するオペレーショナルリスク上の問題に対して、現代投資理論を基礎とするリスク最適化手法を提案するものである。ここで、リスクの「最小化」ではなく「最適化」としているのは、リスクが必ずしも最小化するべきものではなく、それに対応する収益やメリットとペアで考えつつ、そのバランスを最適化することが重要なためである。提案したリスク最適化手法は、二つのスマートグリッドのオペレーショナルリスク上の問題に適用可能である。その問題の一つは、電力網の需給バランスリスクに直接関係するものであり、もう一つは、配電網の電圧変動リスクへの対処に深く関係する問題になっている。具体的には前者が、気象リスク下のDLC(Direct Load Control: 需要家側機器の直接制御)ポートフォリオ最適化問題であり、後者は、配電網における柱上トランスの接続相を判定する問題である。

DLCポートフォリオ最適化問題では、気象リスク下にある空調機器の広域的な協調節電運転の計画立案に対して、厳密には求解困難な大規模整数二次計画を、二段階の近似解法として定式化し、その初段を現代投資理論のMarkowitzモデルの派生型としてスケラブルなかたちに収めたところに、本研究の新規性がある。また、トランス接続相判定問題については、従来技術として配電系に特殊な電気信号を流す方式や、交流の位相測定技術を利用する方式などが知られているが、これらはいずれも人手による設備の設置・計測が必要とされ、人的・金銭的なコストが高い。これに対して本論文で提案する手法は、スマートメータと配電系の電流・電圧センサのデータを用いた情報処理のみによって実現可能であるため、新規性が高くかつ低コストな方式になっている。ここでは現代投資理論の考え方を、判定精度上最適なデジタルフィルタを導出するために用いている。

本博士論文は7章から構成され、第1章でスマートグリッドの概要や、その周辺に発生するオペレーショナルリスク管理上の諸問題について説明する。次に、本研究で取り組む具体的課題として、DLCにおけるリスク最適化の問題と、配電系の電圧変動リスク問題を抽出し、研究目的を述べる。第2章で本論文の提案手法に関連する既存技術として、現代投資理論のMarkowitzモデルによるポートフォリオ最適化手法及び、本論文後半で取り上げる柱上トランスの接続相判定の既存技術を紹介する。第3章は「気象リスク下のDLCポートフォリオ最適化」と題し、リスクの主要因を外気温予報の誤差におく、空調機器の協調節電運転に関する大規模計画問題を扱う。ここでは具体的な計画策定方式として、初段

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

にポートフォリオ最適化を配した二段階の近似解法を提案する。章末では、提案手法の効果を数値実験によって検証する。また、投資理論における効率的フロンティア分析を DLC の実施計画に適用し、この手法がリスク最適化に対して有用であることを示す。第 4 章では、柱上トランスの接続相判定問題の詳細を述べ、配電系の交流回路を確定する課題として、高度な配電網管理の入口にある重要な課題であることを述べる。第 5 章では、スマートメータで取得する消費電力データと、配電系高圧側で計測される電流データの相関係数を比較することによって接続相を自動判定する方式を提案し、単純なハイパスフィルタを前処理に適用したシミュレーションによって、手法が有望であることを示す。続く第 6 章では、周波数領域情報による相関係数の再定義を行い、ポートフォリオ最適化技術を最適フィルタの導出に適用することを提案する。次に、提案方式の効果を数値実験によって検証し、正答率が大きく向上することを示す。末尾の第 7 章では、結論として本論文の貢献がまとめられ、今後の研究の方向性も提示している。

本研究の主要な成果は、現代投資理論の Markowitz モデルの枠組みを、相関のある確率変数の和の分散を最小化する数的手段として扱い、DLC ポートフォリオ最適化問題と、柱上トランスの接続相判定問題におけるフィルタ最適化に対して適用することにより、スマートグリッドのオペレーショナルリスク管理上の二つの重要な問題を解決可能としたことにある。また、今後の課題の第一は、提案した最適化手法の検証が部分的には実データを使用しているものの、現状では数値実験を含むものであるため、これを完全な実フィールドのデータを用いて検証することである。また、トランス接続相判定問題の研究においては、実在の配電系の接続相を判定して回路を確定した後に、配電網の電圧分布の推定や、逆流問題为解决するための設備計画問題への取り組みを、研究の次のステップとして計画している。

現在世界各地で、スマートシティ(環境配慮型都市)に関連するプロジェクトが進行しており、電機・電力・通信・土木・建築業界の各社が、家庭やビル商業施設で使う電気の需給を街全体で調節し、省エネルギーや再生可能エネルギーの普及による二酸化炭素排出量の削減へつなげる努力が進められている。また、再生可能エネルギーは未だ高コストであり、経済合理性だけから見ると普及がおぼつかないため、各国政府は補助金制度や FIT(Feed-in Tariff: 固定価格買取制度)などの施策によって普及を促進している。このような現状は、再生可能エネルギーの普及に対して、社会全体の協力やコスト負担が不可欠であることを示している。

スマートグリッドはスマートシティ構想の重要な一部であり、再生可能エネルギーの普及を、需給バランスの確保や、供給電圧の安定化等の側面で支えることが期待されている。季節や時間帯によって発電量が変わる再生可能エネルギーは、そのままでは本性的に不安定な電源である。その不安定性のあらわれが、本論文で問題にした需給バランスリスクや電圧変動リスクであり、リスクの主要因は気象条件、節電を含む発電量、電力需要量などの確率の変動である。主に経済学的な分野に起源を持つリスク最適化の枠組みは、このような不確実性下の確率的最適化に対して有効であり、その一端は本論文で示すことができた。今後は、Markowitz モデルを含む様々なリスク管理や数理ファイナンスの手法を、電力網を中心とした社会基盤の安定的、効率的なオペレーションに活かし、データや科学的根拠に基づく社会システムの構築に貢献したいと考えている。

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

本論文は、スマートグリッドにおいて発生するオペレーショナルリスク上の問題に対して、現代投資理論を基礎とするリスク最適化手法を提案するものである。

昨今の大きな社会的課題として、省エネルギーと再生可能エネルギーの普及の問題があるが、スマートグリッドとは、電力網の電源を従来の集中型から再生可能エネルギーを含む分散型に変え、それらの管理に情報技術を援用することによって解決しようと言うコンセプトである。これらの課題解決が期待できる反面、スマートグリッドにおいては、多数化・分散化する電源に関係する意思決定主体が増加するため、電力網は必然的に不安定化し、そのオペレーショナルリスク(日常的な運用上のリスク)も多様化する。

本論文で提案されたリスク最適化手法は、このようなスマートグリッドにおける二つオペレーショナルリスク上の問題に適用可能なものとなっている。その一つは、気象リスク下の DLC(Direct Load Control: 需要家側機器の直接制御)ポートフォリオ最適化問題であり、もう一つは、配電網における柱上トランスの接続相を情報処理によって判定する問題である。DLC ポートフォリオ最適化問題では、気象リスク下にある空調機器の広域的な調節電運転の計画立案に対して、厳密には求解困難な大規模整数二次計画を、二段階の近似解法として定式化し、その初段を現代投資理論の Markowitz モデルの派生型としてスケラブルなかたちに収めたところに本研究の新規性がある。また、トランス接続相判定問題については、従来技術として配電系に特殊な電気信号を流す方式や、交流の位相測定技術を利用する方式が知られているが、これらはいずれも人手による測定を必要とし、コストも高い。これに比して提案手法は、スマートメータと配電系の電流・電圧センサのデータを用いた情報処理のみによって実現可能であるため、新規性が高くかつ低コストな方式となっている。ここでは、現代投資理論の考え方が、判定精度上最適なデジタルフィルタを導出するために用いられている。

本博士論文は7章から構成され、第1章でスマートグリッドの現状やその周辺に発生する諸問題、既存技術・研究が概観され、第2章で本論文の最適化手法の淵源となった現代投資理論の Markowitz モデルによるポートフォリオ最適化手法などが紹介されている。第3章は「気象リスク下の DLC ポートフォリオ最適化」と題し、不確実性の主因を外気温予報の誤差におく、空調機器の節電運転に関する大規模計画問題に対して、初段にポートフォリオ最適化を配した二段階の近似解法を提案している。提案手法の効果は数値実験によって検証され、良好な結果を得ている。第4章では、柱上トランスの接続相判定問題の詳細を述べ、配電系の交流回路を確定するにはトランス接続相の判定が必須であり、高度な配電網管理の実フィールド適用の入口にある重要な課題であると主張する。第5章では、スマートメータで取得する消費電力データと、配電系高圧側で計測される電流データの相関係数を比較することによって接続相を自動判定する方式を提案し、単純なハイパスフィルタを前処理に適用したシミュレーションによって、手法が有望であることを示している。続く第6章では、周波数領域情報による相関係数の再定義を行うことによって、ポートフォリオ最適化技術を最適フィルタの導出に適用することを可能とし、このフィルタを用い

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

た接続相判定では、数値実験ながら 100%近い正答率を達成している。末尾の第 7 章では、結論として本論文の貢献と考察がまとめられ、今後の研究課題も提示している。

本論文が提示したリスク最適化関連の手法は、電力分野での応用を意図して考案されたものではあるが、その背景にある数理モデルと最適化手法は、かなりの汎用性を持っており、より広い分野に適用できる可能性を秘めている。例えば、DLC ポートフォリオ最適化手法は、様々な予測誤差要因を含む大規模システムを対象にした資源配分の問題に利用できる可能性がある。また、トランス接続相の判定における最適フィルタの導出方式は、非常にノイズの多い環境における、信号間の微弱な相関の検出手段として有望であると考えられる。

本研究には、査読付きジャーナル論文 1 件、査読付き国際会議発表 1 件、国内会議発表 1 件の学術的貢献があり、特に関連特許は 8 件(国内 6 件、海外 2 件)と、豊富な実績を有している。また、取り組まれている課題は、省エネルギーや再生可能エネルギーの普及と言う現在の社会的課題に即したものであり、スマートグリッドの安定的運用の実現を通して、その課題解決に資するものになっている。特に、日本全国の配電網に数百万オーダーで存在する柱上トランス接続相の自動判定技術については、太陽光発電の大量稼働等に対処する配電系管理高度化の一環として実用化が推進されており、これが現実化すれば、人的負担の軽減や配電系管理コストの削減と言う観点で、大きな社会的インパクトがあるものと考えられる。

よって、本論文は情報学分野における学術的貢献および、電力の効率的・安定的利用の推進と言う観点における高い社会的貢献を有する研究として、十分に博士の学位論文として合格と認められる。