

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開」  
研究課題「汎用的な実証基盤体系を利用したシナリオ対応型分散協調 EMS 実現手法の創出」

## 研究終了報告書

研究期間 2015年4月～2020年3月

研究代表者：林 泰弘  
(早稲田大学理工学術院  
先進理工学部 教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本研究では太陽光発電(PV)、蓄電池、燃料電池、ヒートポンプ給湯機(HPWH)、車載蓄電池を搭載した次世代自動車(EV)などの次世代エネルギー機器が多様な形で設置され自律分散的に制御される住宅のEMS(HEMS)、商業・オフィスビル等におけるEMS(BEMS)、及びこのような需要家への面的な電力安定供給を効率的に担う中央制御型の配電システムのEMS(GEMS)を主な対象とした次世代協調型EMS実現手法の創出を実施してきた。研究推進にあたっては次のような4項目に着眼して実施してきている。

- (A) 協調EMS実証基盤の開発
- (B) 次世代EMS実現手法の開発
- (C) 協調EMS実証基盤を用いた統合協調EMS実現手法の開発と評価
- (D) 開発EMS実現手法の実証試験

研究項目(A)の実施にあたっては、早大林サブグループ(SG)が中心となり、東京電力パワーグリッド・中部電力・関西電力との協働により実際の配電系統の情報に基づく配電系統解析のための計算機シミュレーションモデルの精緻化を進め、また開発EMS手法の実用性評価のための模擬シミュレータ(CREST-ANSWER)を始めとする統合EMS評価基盤プラットフォームの集約整備を実施してきた。また、阪大下田SG、千葉大入江SGと林SGが中心となり、上記のような評価を実施する上でエネルギーマネジメントの対象となる尤もらしい電力需要や気象由来の太陽光発電の変動などについて、想定される様々なシナリオを議論しながら評価に用いるための多様な電力変動プロファイルの生成を実施してきた。

研究項目(B)では、将来的な社会実装を見据えたEMS実現手法の研究開発を目的とし、電力分野のみならず、建築学、経済学、情報工学、通信工学、気象科学、制御工学、機械工学などの様々な分野の専門家によって構成される早大林SG、東工大石井SG、東大馬場SG、名大稲垣SG、東大大橋グループ、慶應大大森グループなどが強みとして持つ各分野の専門知識と技術を活かしながら、多様な観点からEMSの方法論や設計にまつわる研究開発を実施してきた。

また、研究項目(C)では、各SGが持つ専門知識と技術を活かしながら、研究代表者のリーダーシップの下で研究項目(B)で得られた開発成果や知見を融合することで分散協調EMSにまつわる方法論の練成を行い、研究項目(A)において開発された評価用プラットフォームを活用する形で方法論の多面的評価を実施し、その内容を開発にフィードバックして用いる形で分散協調EMSの方法論の研究開発を推進してきた。

研究項目(D)は研究当初は予定していなかった項目となるが、本プロジェクトの推進過程で得られた成果を、社会実装を見据えて展開していくために、開発技術に関する実証試験を行ってきたものとなる。本項目では特に林SGが開発してきた成果の一部である「配電損失最小化手法」に着目し、東京電力パワーグリッドと協働の下でパイロット的に実証対象となる配電系統を複数個選定し、対象配電系統に対して適用を行う技術実証を行った。ここで行われた実証は、世界的にも類を見ない実配電系統における損失最小構成運用の実証試験となっており、本プロジェクトにおいて実施された開発成果であるEMS技術が実社会に対して実装可能であり、しかも引き続き継続的な活用展開に資するというを示した。

### (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

#### 1.

概要：配電系統上で実施される電圧制御に着目し、系統内のセンサ情報が改ざんされた場

合に引き起こされる制御系の異常な振舞いを解析し、その検知のための対策手法を考案した。実系統の情報に基づいて構築された配電系統モデルを用いた検証により、情報の改ざんによる電圧逸脱リスクや PV 発電の出力抑制に対して与える影響の定量評価、攻撃の検知可能性の議論を行った。IEEE Transactions on Smart Grid に掲載された本成果は配電系統におけるサイバーセキュリティを議論する先駆的な取り組みとなり、高い注目を浴びている。

## 2.

概要： 予測・運用・制御の枠組みに基づき需要家 EMS(HEMS), 及び電力系統 EMS(GEMS) の実現手法の開発を行い、配電系統から需要家までの電氣的挙動を再現・評価するシミュレーションモデルに基づき、複数 EMS の相互作用なども考慮した上で、提案する分散 EMS が PV 出力の過度な抑制を削減し、設置設備の有効利用に資することが検証された。IEEE Transactions on Smart Grid に掲載された本成果は主体の異なる EMS 間の相互影響を具体的に議論するという観点で、予測・運用・制御というフローに基づく分散 EMS の1つの有力な設計指針を提示するものとなる。

## 3.

概要： PV 出力抑制の軽減を目的として低圧配電系統下の周辺 EV 所有者の充電時間シフトを対象としたセカンドプライス・シールドビッド・オークション方式を活用した需要家 EV の充電管理の手法の提案を行った。充電時間シフトを行う際の需要家の自主性や、出力抑制削減に貢献した EV 所有者が系統貢献の観点から受けられる対価の公平性などを経済的な行動原理の活用により担保する本提案は、IEEE Transactions on Sustainable Energy に掲載され、今後の PV・EV のさらなる普及の下で PV 発電の出力抑制回避のための経済的な解決策を提示する独創的なものと言える。

### < 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

## 1.

概要： 開発した区分開閉器の制御に基づく配電損失最小化の方法論の有用性を検証するため、東京電力パワーグリッドとの協働により、実配電系統を対象とした実証評価を実施した。実系統の配電損失を区分開閉器の制御に基づき削減するためには、系統上で取得されるセンサ情報に基づき天文学的な数の構成候補の中から適切な開閉器状態を導出する必要があり、実規模系統に対する適用がこれまで検討されていなかった。本実証は世界的にも類を見ない実配電系統における損失最小構成運用の実証試験となり、開発成果である EMS 技術が実系統に対して実装可能で配電損失の削減をもたらし得ることが示された。

## 2.

概要： 将来想定される都市の環境変化の中で、様々な EMS 技術の効果やその相互作用の影響を定量的に見積もることを可能とするため、東京電力パワーグリッド・関西電力・中部電力の三社との協働で実世界の計測データに基づき構築されたシミュレーションモデルを活用した汎用的な都市規模 EMS 技術の評価アプローチを開発した。この成果は、これまで難しかった分散協調 EMS 技術の実社会への導入価値の多角的・定量的な議論を可能にし、新たなシステム最適化技術開発や技術普及促進に向けた判断指標を学術的中立な観点から提示する枠組みとなることが期待され、Proceedings of the IEEE に掲載された。

## 3.

概要： 配電系統における電圧維持高度化を目的とした GEMS 技術と、EV・PV 付設住宅におけるモデル予測型 HEMS 技術の情報交換による協調連携の検討を行い、配電系統の電圧制約を妨げない範囲で PV 発電電力売電量を決定し電気代を最小化するような車載蓄電池の充放電協調制御の枠組みを開発し、その実装評価を行った。EV・PV の局所的な導入が進んだ

状況下において発生し得る問題点, 及び, 予測に基づく最適化技術の応用効果の定量的な評価を示したという意味で大きな意義を持つ成果だと言える. この成果は IEEE Transactions on Smart Grid に掲載された.

<代表的な論文>

● Y. Isozaki, S. Yoshizawa, Y. Fujimoto, H. Ishii, I. Ono, T. Onoda, and Y. Hayashi, “Detection of Cyber Attacks Against Voltage Control in Distribution Power Grids with PVs,” IEEE Transactions on Smart Grid, 7(4), 1824–1835 (2016), DOI: 10.1109/TSG.2015.2427380  
概要: 本論文では, 配電系統における変電所で行われる電圧制御に着目し, 系統内のセンサ情報が改ざんされた場合に引き起こされる制御系の異常な振る舞いを解析し, その検知のための対策を考案した. 検証は, 実データに基づいて小規模な配電系統モデル上で数値シミュレーションを通じて行った. 特に情報改ざんにより, 系統の一部で電圧逸脱が起こり得ること, および簡便な検知アルゴリズムにより大半の攻撃が検知可能であることを示した. また, PV 発電の出力抑制に対する影響評価も行った.

● Y. Hayashi, Y. Fujimoto, H. Ishii, Y. Takenobu, H. Kikusato, S. Yoshizawa, Y. Amano, S. Tanabe, Y. Yamaguchi, Y. Shimoda, J. Yoshinaga, M. Watanabe, S. Sasaki, T. Koike, H.-A. Jacobsen, K. Tomovic, “Versatile Modeling Platform for Cooperative Energy Management Systems in Smart Cities,” Proceedings of the IEEE, 106(4), 594–612 (2018), DOI: 10.1109/JPROC.2018.2809468

概要: 本論文では, 都市規模の分散協調 EMS 技術の相互作用を考慮し, 導入技術に対する都市のエネルギー視点での持続可能性を定量評価するための汎用的な評価の手法を提案した. 提案手法は, 実世界の電力需要家の電力消費推移の特性を都市規模で反映し, 東京電力パワーグリッド・中部電力・関西電力が運用する配電線データに基づいて構築した配電系統モデルから構成される評価プラットフォームを活用することで, 住宅・ビルなどにおいて EMS 技術が分散的に導入された時の相互作用・協調効果を定量的に評価することを可能にする. 本論文では, 開発プラットフォームを用いた都市規模の分散協調 EMS 技術の多角的評価の事例を示し, 本技術がスマートシティの実現において重要な役割を果たすエネルギー管理の持続可能性を議論するための核心的な技術基盤となることを述べた.

● H. Kikusato, Y. Fujimoto, S. Hanada, D. Isogawa, S. Yoshizawa, H. Ohashi, Y. Hayashi, “Electric Vehicle Charging Management Using Auction Mechanism for Reducing PV Curtailment in Distribution Systems,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, 11(3), 1394–1403 (2020), DOI: 10.1109/TSTE.2019.2926998

概要: 配電系統に連系された住宅用 PV 発電設備は, 系統への電力逆潮流によって誘発される電圧の過剰な上昇を防止するため, パワーコンディショナによる出力抑制機能を一般に有する. 抑制が発生している時間帯に EV の充電のような消費行動を需要家が実施すると, 自宅に設置された PV 発電の抑制が回避できると共に, 同一配電線に連系される周辺の需要家宅で発生している PV 出力抑制も軽減され得る. 本論文は EV 所有者が PV 出力抑制を目的として充電時間をシフトする際の自主性や, 系統貢献に対する対価の公平性などを考慮した, セカンドプライス・シールドビッド・オークション方式を活用した需要家 EV の充電管理手法の提案を行った.

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 早大林グループ

研究代表者: 林 泰弘 (早稲田大学理工学術院先進理工学部 教授)

研究項目: 汎用的な実証基盤体系を利用したシナリオ対応型分散協調 EMS 実現手法の創出

- ・ 協調 EMS 基盤の開発
  - 社会システムのロードマップを考慮した協調 EMS 手法評価のためのシナリオ検討
  - シミュレーションに基づく需要・再生可能エネルギーの電力変動プロファイル群の生成
  - 協調 EMS 手法の導入価値の多角的定量評価のための計算機シミュレーションモデルの拡張構築
  - 協調 EMS 手法の実用性評価のための模擬シミュレータの拡張構築
- ・ 次世代 EMS の方法論の開発
  - H/B/M/GEMS の予測・運用・制御一貫型分散協調 EMS 手法の開発
  - 衛星観測情報を利用したエネルギー管理手法の開発と有用性の検証
  - 次世代自動車・PV 付設住宅における H/GEMS 協調運用手法の開発
  - 配電系統におけるサイバー攻撃の影響評価と対策手法の開発
  - HPWH 付設住宅における H/GEMS 協調運用手法の開発
  - 開閉器制御に基づく配電系統構成決定手法の開発
- ・ 協調 EMS 実証基盤を用いた統合協調 EMS 実現手法の開発と評価
  - 次世代 EMS 手法の統合による協調 EMS 実現手法の開発
  - 計算機シミュレーションに基づく統合協調 EMS 実現手法の多角的定量評価
  - 模擬シミュレータに基づく統合協調 EMS 実現手法の実用性評価
- ・ 開発 EMS 実現手法の実証試験
  - IT センサ開閉器が実装された実配電ネットワークにおける配電損失最小化手法の実証

#### ② 東大大橋グループ

主たる共同研究者: 大橋 弘 (東京大学大学院経済学研究科 教授)

研究項目: 協調 EMS 実現のための分散電源・デマンドレスポンスの経済分析

- ・ 次世代 EMS の方法論の開発
  - 協調 EMS 実現のための分散電源・デマンドレスポンスの経済分析
- ・ 協調 EMS 実証基盤を用いた統合協調 EMS 実現手法の開発と評価
  - 次世代 EMS 手法の統合による協調 EMS 実現手法の開発
  - 計算機シミュレーションに基づく統合協調 EMS 実現手法の多角的定量評価
  - 模擬シミュレータに基づく統合協調 EMS 実現手法の実用性評価

#### ③ 慶應大大森グループ

主たる共同研究者: 大森 浩充 (慶應義塾大学理工学部 教授)

研究項目: 配電系統における蓄電・PV 設備の分散協調制御

- ・ 次世代 EMS の方法論の開発
  - 配電系統における蓄電・PV 設備の分散協調制御手法の開発
- ・ 協調 EMS 実証基盤を用いた統合協調 EMS 実現手法の開発と評価
  - 次世代 EMS 手法の統合による協調 EMS 実現手法の開発
  - 計算機シミュレーションに基づく統合協調 EMS 実現手法の多角的定量評価
  - 模擬シミュレータに基づく統合協調 EMS 実現手法の実用性評価

## (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

早稲田大学では、本プロジェクトでの活動を基盤の一環として、学内の重点領域研究機構の支援を受けて立ち上がった「先進グリッド技術研究所」を研究組織の最上部とし、その下部組織として学外共同研究を踏まえたテーマ別の複数のコンソーシアムを立ち上げ、多数の企業の参画を得ながら、研究活動や情報交換、人材交流などを積極的に進めてきた。また、HEMS、デマンドレスポンスサーバーシステムなどと並行して本プロジェクトにおいて開発を進めてきた配電系統模擬システムなどからなる「EMS 新宿実証センター」を形成し、日本を代表する複数企業と共にこれらの設備を利用した実証などを実施してきている。このような産業界・省庁とのネットワーク連携を軸に、先進グリッド技術研究所を中心とした研究所に加え、電力、ガス、通信、ゼネコン、ハウスメーカー、デベロッパー、メーカー等、様々な分野の民間企業（41社）により構成された「スマート社会技術融合研究機構」を2014年7月に早稲田大学に設立し、より大きな産官学連携の枠組みを作りながら研究活動を実施してきた。

加えて国際的な研究連携の一環として、林 SG、大森 G より複数名の博士後期課程の学生の継続的な研究滞在を伴うテネシー大学(米国)との共同研究、及び若手研究者の研究滞在を伴うミュンヘン工科大学(ドイツ)との共同研究を実施してきた。研究員派遣のみならず、テネシー大学の Dr. Kevin Tomsovic, Dr. Chien-fei Chen, Dr. Fangxing Li らの来日訪問講演や研究打合せ、ミュンヘン工科大学の Dr. Hans-Arno Jacobsen, Dr. Jose Rivera らの来日打合せなどもこれまで実施しており、海外研究機関との研究連携を活発に実施してきた。また、本プロジェクトにまつわる活動の一貫として、慶應義塾大学大森 G では、マライ大学(マレーシア) Dr. Jafferi Jamaludin に2018年10月～2019年9月の1年間、慶應義塾訪問講師の職位を与え、需給予測・太陽熱発電・動的電力価格決定などの現地の課題意識に対応するためのシミュレータ構築を行い、これまでに国際学会発表論文2件、および国際学術誌論文1件の研究成果を上げている。

また、研究実施の中でデマンドレスポンスなどを含む需要家モデルを考慮するための大森 G、大橋 G の研究連携の中で、新電力事業における電力調達ポートフォリオの中長期意思決定支援ツールの開発と、蓄電池の経済的価値の分析と導入基準の策定に関する検討を行い、丸紅株式会社を交えた共同研究契約締結を行い研究連携を進めてきた。

また、早大林 G は本プロジェクトで実施開発してきた配電系統の電力損失最小構成導出のための方法論の応用をめぐって東京電力パワーグリッド株式会社と、テナントビルのエネルギーディスアグリゲーション技術の応用をめぐって株式会社大成建設と、それぞれ研究連携を行ってきている。