

東日本大震災後の電力システム再構築

Reconstruction of Power System after the Great East Japan Disaster

研究代表者 林 泰弘
(先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授)

1. 研究課題

東日本大震災後、電力不足が大きな問題となり、それを考慮した電気エネルギー技術の開発に注目が集まっている。同時に環境問題や都市問題などを背景に、電気エネルギー分野を中心に、持続可能な街づくりは世界共通の課題になっている。本プロジェクトでは、これらの問題を解決すべく、様々な角度から総合的な研究を行う。特に、①地球環境を考慮した電力システムの計画・運用の研究 ②電気絶縁材料の劣化診断に関する研究 ③CO₂削減を目指した超電導応用電力機器の基盤技術に関する研究 ④太陽光発電システムの運用最適化に関する研究 ⑤次世代エネルギーマネジメントシステム（EMS）技術に関する研究について実施する。

研究課題は、東日本大震災後、非常に重要であるエネルギー問題の中で、特に地球環境考慮下での電力供給の高信頼度化・低コスト化に焦点をあて、総合的に独特な組織の中で、学内・外の技術者が研究する。外部の協力として主要な電力会社、重電機メーカー、電線メーカーが加わる点で、先端の技術開発に寄与できると考えられる。

この研究プロジェクトは、本学が主体となり電力業界各社から構成される産学協同体「電力技術懇談会」（約30社がメンバー）と一体となった研究組織である点に特徴がある。本懇談会と連繫させながら推進し、有用な研究成果を挙げる。また、産学交流の発展のため、約2ヶ月おきに講演会が企画されている。これも含めて総合的に研究に当たる。

2. 主な研究成果

現在、電力システムへの再生可能エネルギーの大量導入が、CO₂による地球環境問題の解決のために進められているが、電力システムは、この再生可能エネルギーの大量導入に適切に対応できるように技術的な整備がなされなくてはならない。そのため、「①地球環境を考慮した電力システムの計画・運用の研究」では、特に、再生可能エネルギー大量導入時の問題の研究を行った。

また、「②電気絶縁材料の劣化診断に関する研究」では、とくに原子力発電所において、事故時に格納容器内部の温度や圧力をモニターするとともに、原子炉を安全に停止させるために、最後までその機能を全うすることが要求される、いわゆる「安全系ケーブル」に使われている、難燃架橋ポリエチレン、架橋ポリエチレン、難燃エチレン・プロピレン・ディエン共重合体（ゴム）、シリコーンゴムに焦点をあて、これらのシート状試料やケーブル状試料が、高温あるいは高温下での放射線照射にさらされたときの劣化挙動を、テラヘルツ領域分光法、

化学発光測定、示差走査熱量測定、複素誘電特性測定、インデンターモデュラスによる表面硬度測定、引張破断伸び測定、等により、実験的に解明した。また、原子炉格納容器電線貫通部について、長期健全性評価確認のために、通常運転時相当の劣化を付与した状態における重大事故（以下「SA」という。）時環境下での絶縁性能の検証を実施した。具体的には、電気ペネに接続されたケーブルについての SA 試験限界条件の検討として、種々の高温・高圧蒸気環境下において、未劣化および熱・放射線同時劣化した前述の安全系ケーブルの電気抵抗測定を実施し、一部のケーブルが化学スプレイを伴う事故時の動作要求に対する十分な絶縁性を保持していないことを確認した。

「③CO₂ 削減を目指した超電導応用電力機器の基盤技術に関する研究」のうち、超電導応用電力機器として、66kV 系統における高温超電導ケーブルの実用化に向けた研究・開発を行った。高温超電導電力ケーブルは、環境にやさしく経済的であり省スペースであることから電力輸送において多くの利点が期待できる。しかし、実用化のためには短絡・地絡事故時における過電流の影響評価や断熱管外部からの侵入熱の低減などが必要不可欠となる。本年度は、実規模ケーブルを対象として短絡事故が発生した時の冷媒（液体窒素）の挙動解析を行った。解析条件は、実規模として想定されている 3 km のケーブルに対して、66 kV 系統最大想定 31.5 kA・2.0 s の短絡事故電流の通電とし、冷媒気化の有無を中心とした冷媒挙動解析・評価を行った。また、短絡事故時に冷媒気化が発生しない条件として、初期冷媒圧力と初期気相体積を対象とし、それらの適正值を求め、実規模超電導ケーブルシステムの設計指針を示した。

「④太陽光発電システムの運用最適化に関する研究」では、再生可能エネルギーの災害対応に焦点を当て、分散設置の複数の蓄電池併設型太陽光発電（PV）システムの統合制御に関する検討を行った。具体的には、託送料金も考慮に入れたうえで余剰 PV 電力を適切にシステム間で融通することで、経済性、環境性、耐災害性の 3 つの視点でその有効性を明らかにした。特に、負荷量および蓄電池容量に基づき、融通を行う PV システムの最適な組み合わせを導出する方法論について実測データに基づき検討を行い、PV 発電量や負荷量の予測誤差の影響評価と合わせて、開発制御法の実用性を検証した。

「⑤次世代エネルギーマネジメントシステム（EMS）技術に関する研究」では、地球温暖化対策となる風力発電をさらに電力系統に連系できるよう、発電量の急変に対する予測と、予測と組み合わせた蓄エネルギー制御技術開発を NEDO 技術開発機構の委託事業として進めている。本年度は次世代エネルギーマネジメントにおいて重要となる風力発電量の予測精度の向上を目的として、深層学習を実現する基盤技術である Convolutional Neural Network(CNN)を用いた気象場データの特徴量抽出手法に関し、これまでに検討してきた気象場と発電量を出力とする 2 次元 CNN (2D-CNN) に対して、新たに予測対象時刻の前後時間断面における気象場も入力とした 3 次元 CNN (3D-CNN) の開発を行った。東北エリアのウィンドファームを対象に 3D-CNN を適用した評価実験を行い、予測精度が改善されることを検証した。また、蓄エネルギー制御技術開発では、風力発電電力が FIT 期間終了後の市場で取引されることを想定、発電出力の計画値同時同量が必要となる状況に対応した計画値の作成方法を開発した。今年度は、風力発電の予測誤差を線形回帰し、推定予測誤差と実予測誤差の差の分布を考慮することで SOC 調整量を緩和し、想定外の予測誤差にも柔軟に対応できる計画値作成手法を開発し、蓄エネルギー装置として圧縮空気エネルギー貯蔵（CAES）を想定した数値シミュレーションを実施、本手法によりインバランスが削減できることが検証

された。なお、上述の各検証においては、過去の一定期間における風力発電実データ、既存手法による風力発電予測データを利用した。

3. 共同研究者

大木 義路（先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授）
石山 敦士（先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授）
若尾 真治（先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授）
岩本 伸一（理工総研 名誉研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- ・ Y. Ohki and N. Hirai, "Location Attempt of a Degraded Portion in a Long Polymer-Insulated Cable", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 25, pp. 2461-2466, 2018.
- ・ Y. Ohki and N. Hirai, "Detection of Abnormality Occurring Over the Whole Cable Length by Frequency Domain Reflectometry", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 25, pp. 2467-2469, 2018
- ・ T. Minakawa, M. Ikeda, N. Hirai, and Y. Ohki, "Insulation Performance of Safety-related Cables for Nuclear Power Plants under Simulated Severe Accident Conditions," IEEE Transactions on Fundamentals and Materials, Vol. 139, No. 2, pp. 54-59, 2019
- ・ T. Ogishima, C. Kuroda, N. Hirai and Y. Ohki, "Identification and Quantification of Phenol-type Antioxidants in Low-density Polyethylene by Broadband Far-infrared Spectroscopy", Polymer Testing, Vol. 76, pp. 10-18, 2019
- ・ Yokoo, Y., Takeda, N., Horita, D., Agatsuma, K., Ishiyama, A., Wang, X., Takagi, T. & Yagi, M., "Safety Verification of a 275-kV HTS Cable System under Short-Circuit Current Accidents", IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 28, 4, 5400205, 2018.
- ・ Daichi Horita, Koh Agatsuma, Atsushi Ishiyama, Takato Masuda, Toshiya Morimura, Tomoo Mimura, "Comparison between Simulation and Experimental Results of Liquid Nitrogen Coolant Distribution in a 66-kV 40-m Model HTS Power Cable System Experiencing Short-Circuit Accidents", IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 29, 5, 8662691, 2019.
- ・ Kazutoshi Higashiyama, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, "Feature Extraction of NWP Data for Wind Power Forecasting Using 3D-Convolutional Neural Networks" Energy Procedia, Vol.155, pp.350-358(presented in IRES 2018) Nov. 2018
- ・ Yu Fujimoto, Yuka Takahashi, Yasuhiro Hayashi, "Alerting to Rare Large-Scale Ramp Events in Wind Power Generation" IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol.10, No.1, pp.55-65 Jan. 2019

4.2 総説・著書

特になし。

4.3 講演

1. NEDO 講演会「スマートコミュニティ 2018」

日 時：平成 30 年 6 月 13 日

会 場：東京国際フォーラム

演 題：日本の電力系統の課題と将来展望

講演者：早稲田大学 理工学術院 名誉教授 岩本 伸一

2. IEEE PES GTD Asia 2019, Panel: Power Quality

Bangkok, Thailand, March 21, 2019

Frequency Problems for Large-scale Renewable Energy Introduction in Japan

Shinichi IWAMOTO, Professor Emeritus, Waseda University, JAPAN

4.4 受賞・表彰

受賞者：

林 泰弘、2018 年早稲田大学リサーチアワード

大木義路、2018 年早稲田大学リサーチアワード

兌 瀟偉、平成 30 年電気学会電力・エネルギー部門大会実行委員会 YPC 奨励賞

4.5 学会および社会的活動

- ・ Daichi Horita, Koh Agatsuma, Atsushi Ishiyama, Takato Masuda, Toshiya Morimura, Tomoo Mimura, "Simulations of Temperature and Pressure of Liquid Nitrogen coolant in 66kV 40m model HTS Power Cable systems with Short-circuit Current Accidents Compared with Experimental Results ", 2018 IEEE Applied Superconductivity Conference, 2018.
- ・ Yusuke Yokoo, Natsuko Takeda, Daichi Horita, Koh Agatsuma, Atsushi Ishiyama, Xudong Wang, Tomohiro Takagi, and Masashi Yagi, "Safety verification of 275kV HTS Cable System in Short-current Accidents", European Conference on Applied Superconductivity, 2017
- ・ Koura, N. & Wakao, S., Prediction of PV output transition based on stochastic evaluation IEEE IEEM 2018– 2018 International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM18-P-103, 2018 Dec 18, Bangkok Thailand
 - ・ Matsunaga, J. & Wakao, S., Residential Load Prediction Based on Load Data of Other Residential Communities, IEEE IEEM2018– 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management, IEEM18-P-1035, 2018 Dec 18, Bangkok Thailand
 - ・ Oda, M. & Wakao, S., Energy management in PV power generation system with storage battery by means of next day PV output prediction, IEEE IEEM 2018– 2018 IEEE

International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM18-P-1036, 2018 Dec 18, Bangkok Thailand

- ・ Kazutoshi Higashiyama, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, "A Comparative Study of Regional Wind Power Forecasting: Direct Approach and Aggregating Approach" Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition, Jun. 2018

- ・ Masakazu Ito, Yu Fujimoto, Masataka Mitsuoka, Hideo Ishii, Yasuhiro Hayashi, "State-of-Charge Target Control for Energy Storage System for Imbalance and Wind Curtailment Reduction in Electricity Market" Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition, Jun. 2018

- ・ Aki Kikuchi, Masakazu Ito, Yasuhiro Hayashi, "Scheduling Method of Wind Power Generation for Electricity Market using State-of-Charge Transition and Forecast Error" The International Conference on Electrical Engineering, Jun. 2018

- ・ Yu Fujimoto, Kazutoshi Higashiyama, Yasuhiro Hayashi, "Japan's R&D Project of Ramp Forecasting Technology: A Machine Learning Scheme for Ramp Forecast" 17th Wind Integration Workshop, Oct. 2018

- ・ Masakazu Ito, Aki Kikuchi, Yu Fujimoto, Masataka Mitsuoka, Hideo Ishii, Yasuhiro Hayashi, "Experimental Results of a Wind Power Plant Scheduling Method Considering State-of-Charge Transition for an Electricity Market with the Compressed Air Energy Storage System" 17th Wind Integration Workshop, Oct. 2018

- ・ Aki Kikuchi, Masakazu Ito, Yasuhiro Hayashi, "Bid Determination Method for an Electricity Market with State-of-Charge Maintenance of a Compressed Air Energy Storage System Using the Prediction Interval of Wind Power Output" 13th International Renewable Energy Storage Conference, Mar. 2019

5. 研究活動の課題と展望

環境問題や東日本大震災後に顕著に現れた電力不足は喫緊の課題である。本プロジェクトでは再生可能エネルギー大量導入時の電力系統問題、材料の劣化診断、超伝導、発電量予測、エネルギーマネジメントの5つに焦点を当て、幅の広い総合的な研究アプローチを開始した。本年度実施した研究成果をベースに、世界共通の課題となっている環境問題や都市問題などの電気エネルギー分野を対象とした研究開発を進め、「電力技術懇談会」と連繋させながらこれらの問題の解決を目指す。