

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 岩本 伸一
(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、太陽光発電大量導入時の、電力システムの変電所更新計画に関する研究、電力システムの発電機・蓄電池協調負荷周波数に関する研究、を行った。再生可能エネルギーの大量導入により、火力発電の出力を下げる必要が出てくるが、過渡安定度に関して、時間領域等面積法による過渡安定度高速スクリーニング手法も開発した。

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、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、インデントモデュラスによる表面硬度測定等を行って、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、全てのケーブルが事故時の動作要求に対する十分な絶縁性を保持していることを確認した。

「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」では、275kV 系統における高温超電導ケーブルの短絡事故時の振舞いについて解析・評価を行った。高温超電導ケーブルに関する先行研究において、一度短絡事故が発生するとケーブルから放出される熱により、冷媒である液体窒素の温度はケーブルの下流部に沿って徐々に上昇していくことが確認された。そこで本研究では 275kV 系統用 REBCO 高温超電導ケーブルを対象として、絶縁層が厚く、複流路型であるという特徴を考慮して、短絡電流通過時におけるケーブル内の温度及び冷媒である液体窒素の挙動を解析・評価するための計算機プログラムの開発を行った。そして先行研究で実施された 20m 超電導モデルケーブルの試験結果を、開発してきたプログラムで解析することにより、実験値との比較を通してプログラムの妥当性の検証を行うとともに、実験における温度圧力分布の振る舞いを明らかにした。加えて、実規模級長尺ケーブルを想定した解析・評価を行い、長尺化に伴って必要となる課題やその対応策などを検討した。

「④太陽光発電システムの運用最適化に関する研究」では、昨年度に引き続き、配電系統における実負荷電流の予測手法に関する検討に取り組んだ。配電系統への太陽光発電（PV）システムの大量連系に伴い、系統運用のための必須情報である実負荷電流の把握が困難となる。今年度は、JIT モデリングに基づく実負荷電流予測において、特に、精度改善手法の開発に焦点をあてた。具体的には、JIT モデリングにおける入力の詳細化や、支配的な高圧需要家の契約高から想定される最大電流値に応じて予測値を補正する方法について検討を行い、実測データとの比較に基づき開発手法の有効性を明らかにした。

「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の開発を行い、抽出した特徴量を活用することで、次元縮約を行わない場合や従来手法である PCA(Principal Component Analysis)と比較して精度が改善されることを検証した。また、CNN による特徴抽出結果の可視化を行い、本抽出器が風力発電量予測に重要な特徴量を能動的に抽出できていることを確認した。また、蓄エネルギー制御技術開発では、予測を用いた出力の急変を蓄エネ設備による緩和だけで行う方式について、実証設備に搭載しての検証を行い、アルゴリズムの有効性を確認した。また、風力発電電力が FIT 期間終了後には市場で売買されることを想定すると、発電出力の計画値同時同量達成が必要となるが、この状況に対応した計画値の作成方法

として、時間前市場（売買の1時間前ゲートクローズ）での取引を前提に、計画値作成時刻での SOC 値から計画値運用開始時刻の SOC を推定し、推定された SOC が目標値に近づくよう計画値を作成する手法を開発した。本手法は風力発電量予測値をそのまま計画値とする場合、また、計画値作成時刻の SOC 値と目標 SOC 値のみを使用して計画値を作成する場合と比較して、年間計画逸脱量に削減効果があ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）
林 泰弘（先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- ・ J. Kobayashi, Y. Koyanagi, and S. Iwamoto, “A Fast Screening Method for Transient Stability Considering Multi-Swing Step-Out Using Pattern Recognition with Machine Learning and Clustering”, IEEJ Transactions on Power and Energy, 137, 8, p. 559-565, 2017
- ・ Yoshimichi Ohki and Naoshi Hirai, “Successful Detection of Insulation Degradation in Cables by Frequency Domain Reflectometry”, Proceedings of the 18th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, pp. 77-85, 2017.8
- ・ Yoshimichi Ohki, Naoshi Hirai, Daomin Min, Liuqing Yang, and Shentao Li, “Degradation of Silicone Rubber Analyzed by Instrumental Analyses and Dielectric Spectroscopy”, Proceedings of the 18th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, pp. 107-116, 2017.8
- ・ Shugo Hanada, Maki Miyamoto, Naoshi Hirai, Liuqing Yang, and Yoshimichi Ohki, “Experimental Investigation of the Degradation Mechanism of Silicone Rubber Exposed to Heat and Gamma Rays”, High Voltage, Vol. 2, No. 2, pp. 92-101, 2017
- ・ Y. Yokoo, T. Yasui, N. Takeda, K. Agatsuma, A. Ishiyama, X. Wang, M. Yagi, and T. Takagi, “Temperature Simulation of a 20 m HTS Power Model Cable System in a Fault Current for 275 kV Transmission Lines”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 27, 4, 7828107, 2017
- ・ 糸川奈穂, 本間隼人, 若尾真治, 「翌日 PV 発電出力における 10 秒単位変動の信頼区間推定」電気学会論文誌 B（電力・エネルギー部門誌）138 巻 1 号, p. 5-13 (2018)
- ・ Yuka Takahashi, Yu Fujimoto, and Yasuhiro Hayashi, “Forecast of Infrequent Wind Power Ramps Based on Data Sampling Strategy” Energy Procedia, Vol.135, pp.496-503 Oct. 2017

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

Liuqing Yang, Yoshimichi Ohki, Naoshi Hirai, and Shentao Li, “Degradation Behavior and Mechanisms of Several Polymeric Insulating Materials Exposed to Heat and Radiation”, 2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, Rupnagar, India, pp. 98-103, (2017.11.17)

4.4 受賞・表彰

受賞者：

大木義路、2017 年早稲田大学リサーチアワード

林 泰弘、2017 年早稲田大学リサーチアワード

東山和寿、藤本悠、林泰弘、平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会 YPC 優秀発表賞

4.5 学会および社会的活動

- ・ Yuta Mori, Yasukuni Nagakawa, Yuta Aihara, and Shinichi Iwamoto, “Study on Upgrade and Renewal of Transformers Using Safety-First Model of the Optimal Portfolio Selection”, IEEE TENCON 2017, Nov. 2017

- ・ Takato Otani, Ryu Tanabe, Yui Koyanagi, and Shinichi Iwamoto, “Cooperative Load Frequency Control of Generator and Battery Using a Recurrent Neural Network”, IEEE TENCON 2017, Nov. 2017

- ・ Tomomi Sadakawa, Ako Sato, Ryu Tanabe, and Shinichi Iwamoto, “Transient Stability Evaluation by the Time Domain Equal-Area Criterion Using the Taylor Series Expansion”, IEEE TENCON 2017, Nov. 2017

- ・ 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

- ・ M. Oda, and S. Wakao, “Storage Battery Management in Photovoltaic Systems Based on Prediction Interval Estimation of Electric Power Demand”, PVSEC 27 - The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Nov. 16, 2017, Otsu Japan

- ・ N. Koura, and S. Wakao, “Transition Pattern Analysis of PV Output Based on Prediction Interval Estimation”, PVSEC 27 - The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Nov. 16, 2017, Otsu Japan

- ・ Masakazu Ito, Yu Fujimoto, Masataka Mitsuoka, Hideo Ishii, and Yasuhiro Hayashi, "An Evaluation of a Control Method of Energy Storage Systems for Scheduled Generation by Wind Power Systems for an Electricity Market under a Grid Code Defining Maximum Change of Wind Power Output in a Time Interval," WVEC2017, Jun. 2017

- ・ Kazutoshi Higashiyama, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, "Feature Extraction of Numerical Weather Prediction, Results Toward Reliable Wind Power Prediction", IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe, Sep. 2017

・ Kazutoshi Higashiyama, Yu Fujimoto, and Yasuhiro Hayashi, "Feature Extraction of NWP Data for Wind Power Forecast by Using 3D-Convolutional Neural Network", 12th International Renewable Energy Storage Conference, Mar. 2018

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電力系統運用・計画、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」と連携させながらこれらの問題の解決を目指す。