

## 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  
(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 ③CO<sub>2</sub>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、CO<sub>2</sub>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発電機制約を考慮した系統電圧・無効電力制御に関する研究、系統の慣性定数を考慮した発電機・蓄電池協調負荷周波数に関する研究、再生可能エネルギー導入時における送電線更新手法に関する研究、を行った。また、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、テイラー展開を用いた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、走査型プローブ顕微鏡およびインデントモデュラスによる表面硬度測定を行って、実験的に解明した。また、原子力発電所で使用されている電気ケーブルに適用できる非破壊劣化位置標定法として、我々が開発している周波数領域反射測定法では、同軸ケーブルであれば長さ 1km 程度まで位置標定可能なことを確認した。

「③CO<sub>2</sub>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。超電導ケーブルの実用化に向けた課題の一つとして、短絡事故時の発熱に対する冷媒である液体窒素の挙動解析に基づく温度・圧力上昇への対応が挙げられている。一度短絡事故が発生し、短絡電流が流入することにより超電導状態が破れると、超電導ケーブル内の温度が急激に上昇する。また、冷媒もケーブル内のジュール熱により温度上昇が起こる。したがって超電導ケーブル実用化に向けて、事故後に操作可能なレベルに戻るまでの温度・圧力分布の時間変化を推定・評価することが重要であると考えられる。本年度は 40m 高温超電導モデルケーブルでの模擬試験結果を用いて開発してきた解析プログラムの妥当性を確認した。その後、実規模 3km での短絡事故時の冷媒の挙動解析を行うことで 66kV の実系統に超電導ケーブルが投入された場合の安全性評価を行った。実規模 (3km) の長尺ケーブルを解析するにあたっては、事故発生前の初期状態(通電電流通過時)の冷媒の温度を導き出す際、AC ロス、誘電損失、ジョイント部の損失を考慮しなければならないことを確認した。短絡事故発生後は、最大想定短絡電流である 31.5kA・2.0s が流れた場合では、ケーブル出口部の冷媒が飽和温度に達してしまうことが分かった。遮断機を想定した 31.5kA・0.1s では冷媒の温度は事故前と比べて 1K 程度しか上昇しないため、安全に復旧できることが確認できた。また、31.5kA・0.8s 以下であれば飽和温度に達しないことが分かった。31.5kA・2.0s 流れた場合でも 400m 以下の超電導ケーブルであれば飽和温度に達しない安全設計であることを示した。

「④太陽光発電システムの運用最適化に関する研究」では、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。近年、太陽光発電 (PV) システムが配電系統に大量に連系され、計測される系統電流は配電系統に連系される電気機器等に由来する実負荷電流と PV システムからの逆潮流に伴う電流の合算値となることから、配電系統の実負荷電流を把握することが困難となっている。以上を背景とし、今後の PV システム運用への活用も視野に入れ、契約高情報が既知の配電線を対象に過去に蓄積した実負荷電流のデータベースに基づき、新たな配電線の契約高情報からその実負荷電流を予測することを試み、実測データとの比較に基づき開発手法の妥当性を明らかにした。

「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長時間先の予測については、従来の手法と比較して精度が改善されることを検証した。また、発電量予測結果から出力の急変 (ランプ) を予測する手法として、ランプ発生の頻度が低い事に起因するデータの不均衡性へ対処する手法として Error Bootstrap Over

Sampling 法 (EBOS) を開発し、不均衡データ対策を行わない場合と比較して高い精度改善効果があることを検証した。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加え、更に風力発電機の出力抑制を組み合わせる手法の開発を行い、同一の系統連系要件で蓄エネルギー設備の所要容量の計算を行い、所要容量が削減されることを検証した。また、風力発電電力が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、翌日計画作成時の SoC 値及び計画作成当日の発電量予測誤差を考慮する手法を開発した。風力発電量予測値をそのまま計画値とする場合、また、翌日計画作成時の SoC のみを考慮する場合と比較して、年間計画逸脱量に大きな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

- ・Tomoyuki Izutsu, Daisuke Odaka, Marina Komatsu, Yoshimichi Ohki, Maya Mizuno, Yoshiaki Nakamura, and Naofumi Chiwata, "A New Method for Estimating the Content of Vinyl Acetate in Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 3, pp. 1260-1265, 2016.
- ・Junya Takihana, Marina Komatsu, and Yoshimichi Ohki, "Estimation of Gel Fraction of Polyethylene Cross-linked with Silane by Far-infrared Absorption Spectroscopy", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 3, pp. 1500-1505, 2016.
- ・Maki Miyamoto, Naoto Tomite, and Yoshimichi Ohki, "Comparison of Gamma-ray Resistance between Dicyclopentadiene Resin and Epoxy Resin", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 4, pp. 2270-2277, 2016.8
- ・T. Yasui, Y. Sato, K. Agatsuma, A. Ishiyama, X. Wang, M. Ohya, T. Masuda, and S. Honjo, "Temperature and pressure simulation of a 1.5-km HTS power cable cooled by subcooled LN2 with a fault current," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 26, no. 3, Apr. 2016, 5402005.
- ・山寄朋秀, 若尾真治, 伊藤広和, 佐野常世, "配電系統における実負荷電流予測信頼区間推定", 電気学会論文誌 B, Vol.136, No.12, pp. 848-857, 2016 年 12 月.

#### 4.2 総説・著書

(執筆分担) Yoshimichi Ohki, *Tayloring of Nanocomposite Dielectrics. From Fundamentals to Devices and Applications*, Pan Stanford, January 2017.

#### 4.3 招待講演

Yoshimichi Ohki, “A Novel Fault Location Method for Polymer-Insulated Cables”, International Workshop on Next Generation Power Equipment, September 24th, 2016, Empark Grand Hotel, Xi'an, China

#### 4.4 受賞・表彰

受賞者：大木義路、2016年早稲田大学リサーチアワード

林 泰弘、2016年早稲田大学リサーチアワード

#### 4.5 学会および社会的活動

・ Yu Kurita, Yukimasa Moriya, Hiroto Kakisaka, Shinichi Iwamoto (Waseda University), “A Novel LFC Scheme using Storage Battery Control and Generator Feed-Forward Control for Large-Scale Wind Power Penetration”, IEEE TENCON 2016, Nov.2016.

・ Toshiiko Suzuki, Ayano Ishikawa, Tomoyuki Gomi, Shinichi Iwamoto (Waseda University), Shingo Sakaeda, Yukihiro Onoue (CHUBU Electric Power Co.,Inc.), “A Power System Operations Planning Method considering Generator Outputs and System Voltages under Large-scale PV Penetration”, IEEE TENCON 2016, Nov.2016.

・ Takuya Omi, Hiroto Kakisaka, Tomomi Sadakawa, Shinichi Iwamoto (Waseda University), “Multi-Swing Transient Stability Step-out Prediction using Online Anomaly Detection”, IEEE TENCON 2016, Nov.2016.

・ N. Kumekawa, H. Honma, S. Wakao, “Prediction Interval Estimation of 10 second Fluctuation of PV Output with Just-In-Time Modeling,” The 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (the 43rd IEEE PVSC), Portland, Jun. 2016.

・ T. Arai, S. Wakao, “Computational Analysis of Battery Operation in Photovoltaic System with Varying Charging and Discharging Rates,” The 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (the 43rd IEEE PVSC), Portland, Jun. 2016.

・ Masakazu Ito, Yu Fujimoto, Masataka Mitsuoka, Hideo Ishii, Yasuhiro Hayashi, Control Methods for an Energy Storage System when Wind Power Output Deviate Grid Code, The International Conference on Electrical Engineering Okinawa, Jul.2016.

・ Yuka Takahashi, Yu Fujimoto, Yasuhiro Hayashi, Forecast of Infrequent Wind Power Ramps Based on Data Sampling Strategy, 11th International Renewable Energy Storage Conference, Dusseldorf, Germany, Mar. 2017.

### 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。