

戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)
EIG CONCERT-Japan 共同研究
終了報告書 概要

1. 研究課題名：「交流・多端子直流電力システムの性能に関するモジュールウェア・モデリングと評価」(MODULATOR)
2. 研究期間：2018年4月～2022年3月
3. 主な参加研究者名：

日本側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	薄 良彦	准教授	大阪府立大学	研究の立案と遂行, プロジェクトの管理
主たる共同研究者	石亀 篤司	教授	大阪府立大学	研究への助言
主たる共同研究者	舟木 剛	教授	大阪大学	研究への助言
研究参加者	大橋 悠介	大学院生	大阪府立大学	研究の遂行
研究参加者	川本 直輝	大学院生	大阪府立大学	研究の遂行
研究参加者	高道 健史	大学院生	大阪府立大学	研究の遂行
研究期間中の全参加研究者数			7名	

相手側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	D'ARCO Salvatore	Senior Research Scientist	SINTEF Energy Research (Norway)	研究の立案と遂行
研究代表者	STOCK Sebastian	Research Scientist	Fraunhofer IEE (Germany)	研究の立案
主たる共同研究者	BERRERA -CARDENAS Rene	Research Scientist	SINTEF Energy Research (Norway)	研究の遂行
主たる共同研究者	MENDE Denis	Research Scientist	Fraunhofer IEE (Germany)	研究の遂行
研究参加者	BOLSTAD Hans	Senior Project Manager	SINTEF Energy Research (Norway)	プロジェクトの管理
研究参加者	HARMS Yannic	Research Scientist	Fraunhofer IEE (Germany)	研究の遂行
研究期間中の全参加研究者数			10名	

4. 国際共同研究の概要

本研究では、交流送電（AC）と多端子直流送電（MTDC）が混在した電力システムの性能評価のためのモデリング・解析技術の整備に取り組んだ。具体的には、モジュールと称したシステム構成の基本単位の集約により、AC-MTDC システムに生起するダイナミクスをボトムアップに表現・評価する技術の新規提案と有効性検証を、3カ国の研究資源の共有などを通して実施した。また、若手を含む研究者の相互派遣の実施や対面型・オンライン型

ミーティングの定期的開催などを通して、電力システム工学に関する国際共同研究を実施するためのモデルを検討した。

5. 国際共同研究の成果

5-1 国際共同研究の学術成果および実施内容

本研究で得られた学術成果は大きく3点ある。1点目は、日本とノルウェーとの共同研究として、定常運転状態より大きく逸脱した大信号（**large-signal**）領域のダイナミクスに関して、**AC-MTDC** システムのモデリングと解析を実行するためのモジュールウェアの新規技術を開発した。2点目は、1点目の成果と3カ国の共同研究により、大信号領域におけるダイナミクスに関する**AC-MTDC** システムの制御性能を明らかにした。3点目は、ノルウェーとドイツの共同研究として、定常運転状態に近い小信号（**small-signal**）領域のダイナミクスに関する、**AC-MTDC** システムの制御性能評価に資するモジュールウェアの新規技術を開発した。

5-2 国際共同研究による相乗効果

5-1で挙げた3点の学術成果は今回の国際共同研究の相乗効果により初めて達成されてものである。1点目について、日本側の研究実績である大信号領域における**AC** システムのモデリング・解析技術と、ノルウェー側の研究実績である**MTDC** システムのモジュールウェアのモデリング技術とを組み合わせることで、未踏であった**AC-MTDC** システムの安定性解析をモジュールウェアで実行することが可能となった。2点目について、1点目の相乗効果に加えて、ドイツ側のベンチマーキングの実績をベースとすることで、汎用的なベンチマークにより**AC-MTDC** システムの制御性能を明らかにすることが可能となった。最後の3点目について、ノルウェー側の**MTDC** システムの研究実績とドイツ側のシステム最適化に関する研究実績との相乗効果により達成された。以上のように、今回の国際共同研究による相乗効果は学術成果の達成に必要不可欠なものであった。

5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

本研究の学術成果は、次世代の電力システムの形態として世界的に注目を集めている**AC-MTDC** システムの基盤技術に関わるものである。国際共同研究を通して、1カ国の事情に特化しない汎用的技術の提案とその有効性検証を実施できたため、今回の成果は次世代の電力システムの設計への大きな波及効果が期待される。また、今回の国際共同研究において、日本側の大学院生を相手国（ノルウェー）に派遣し、異なる研究環境を実地に経験させることができた。当該学生は、本研究の内容で博士（工学）の学位を取得し、現在は国内の民間企業で活躍している。このような国際経験をベースとした若手技術者の育成は、今後の電力システム工学分野の技術者教育のプロトタイプとなり得るものであり、広く波及することが期待される。

今回の国際共同研究の今後の展望として大きく2点ある。1点目は、継続を計画している共同研究（主に2カ国毎）により検証作業を多様な構成に対して実施し、**AC-MTDC** システムの汎用的技術として高めていく。2点目は、日本の直流送電運用の実績を活かした国際共同研究を立案し、モデリング・解析という主に計画に関わる基盤技術から運用に関わる基盤技術へ研究を展開することにある。この点において、洋上風力発電から**AC-MTDC** システムまでを一気通貫する技術の検討も重要である。

Strategic International Collaborative Research Program (SICORP)
 EIG CONCERT-Japan Joint Research Program
 Executive Summary of Final Report

1. Project title : 「Module-Aware Modeling and Assessment of Performance of Interconnected AC/MTDC Power Grids」 (MODULATOR)
2. Research period : 04/2018 ~ 03/2022
3. Main participants :

Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	SUSUKI Yoshihiko	Associate Professor	Osaka Prefecture University	Conceptualization, investigation, and project management
Co-PI	ISHIGAME Atsushi	Professor	Osaka Prefecture University	Advice
Co-PI	FUNAKI Tsuyoshi	Professor	Osaka University	Advice
Collaborator	OHASHI Yusuke	Graduate Student	Osaka Prefecture University	Investigation
Collaborator	KAWAMOTO Naoki	Graduate Student	Osaka Prefecture University	Investigation
Collaborator	TAKAMICHI Kenji	Graduate Student	Osaka Prefecture University	Investigation
Total number of participants throughout the research period: 7				

Partner-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	D'ARCO Salvatore	Senior Research Scientist	SINTEF Energy Research (Norway)	Conceptualization and investigation
PI	STOCK Sebastian	Research Scientist	Fraunhofer IEE (Germany)	Conceptualization
Co-PI	BERRERA -CARDENAS Rene	Research Scientist	SINTEF Energy Research (Norway)	Investigation
Co-PI	MENDE Denis	Research Scientist	Fraunhofer IEE (Germany)	Investigation
Collaborator	BOLSTAD Hans	Senior Project Manager	SINTEF Energy Research (Norway)	Project management
Collaborator	HARMS Yannic	Research Scientist	Fraunhofer IEE (Germany)	Investigation
Total number of participants throughout the research period: 10				

4. Summary of the international joint research

This joint project aimed at the development of modeling and analysis techniques for performance evaluation of electric power systems with a hybrid structure of Alternating Current (AC) and Multi-Terminal Direct Current (MTDC) transmissions. Specifically, a new technology to represent and evaluate dynamics emerging in AC-MTDC systems in a bottom-up manner by aggregating basic units of the systems' configuration, called modules,

and verified its effectiveness by sharing research resources among the three countries---Norway, Germany, and Japan. In addition, a model for Japan-led international joint research on power system engineering was pursued through the implementation of mutual exchange of researchers including students and regular meetings with face-to-face and online formats.

5. Outcomes of the international joint research

5-1 Scientific outputs and implemented activities of the joint research

This joint research achieves main three scientific outputs. First, in collaboration with Japan and Norway, a new module-based technique for modeling and analysis of AC-MTDC systems with large-signal dynamics, in which the systems' dynamics evolve apart from a steady-state operating condition, was developed. Second, the control performance of the AC-MTDC systems with large-signal dynamics was revealed through the first point mentioned above and a joint work in the three countries. Third, a new module-based technique for evaluating the performance and optimizing the control of AC-MTDC systems with small-signal dynamics, in which the systems' dynamics evolve near the steady-state operation, was developed as a joint work between Norway and Germany.

5-2 Synergistic effects of the joint research

The three scientific outputs listed in 5-1 were first achieved through the synergistic effects of this international joint research. Regarding the first point in 5-1, by combining the Japan-side experience on modeling and analysis for AC systems with large-signal dynamics with the Norway-side on module-based modeling of MTDC systems, it was possible to perform the stability analysis of AC-MTDC systems with large-signal dynamics in a module or bottom-up manner, which had not yet been explored. For the second point, in addition to the synergistic effect of the first point, the German-side experience on benchmarking of electric power systems was effectively utilized to clarify the control performance of AC-MTDC systems. The third point was achieved through the synergy between the Norwegian experience on MTDC systems and the German in system optimization. As described above, the synergistic effects of this international joint research were indispensable for the scientific outputs.

5-3 Scientific, industrial or societal impacts/effects of the outputs

The scientific outputs are related to the fundamental technology of hybrid AC-MTDC systems, which is attracting worldwide attention as a key technology of the next-generation power system. Through the international joint research, we were able to propose a generic technique, in the sense that it is not specific to circumstances of one country, and to verify its effectiveness. The outputs are expected to have a large impact on the design of next-generation power systems. Also, in this joint research, one PhD student in Japan stayed in the partner country (Norway) and had experience of doing research in a different environment. The student successfully obtained a doctoral degree in engineering and is currently working for a private company in Japan. The training of young engineers based on such international experience can serve as a prototype for future education of power systems engineering in Japan.

There are two major future prospects for this international joint research. The first is, through continuing the joint research (mainly between two countries in this joint project), to conduct verification of the developed techniques on various configurations and to enhance the AC-MTDC system as a general and acceptable technology. The second is to make a plan of international joint research, partly utilizing Japan's experience in the operation of DC transmissions, and to expand the research from basic technologies mainly related to planning (design stage), such as modeling and analysis, to those related to control (that is, operation stage).

国際共同研究における主要な研究成果リスト

1. 論文発表等

*原著論文 (相手側研究チームとの共著論文) 発表件数 : 計 2 件

・査読有り : 発表件数 : 計 2 件

1. Y. Susuki, N. Kawamoto, Y. Ohashi, A. Ishigame, T. Funaki, and S. D'Arco, "A modular approach to large-signal modeling of an interconnected AC/MTDC system," *Proc. 2020 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe*, **2020**, 945-949 DOI: 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248890
2. N. Kawamoto, Y. Susuki, S. D'Arco, A. Ishigame, D. Mende, and D.S. Stock, "Load margin for short-term voltage stability of an interconnected AC/MTDC system," *Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*, **2021**, 12(4), 711-717 DOI:10.1587/nolta.12.711

・査読無し : 発表件数 : 計 0 件
該当なし

*原著論文 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの論文) : 発表件数 : 計 2 件

・査読有り : 発表件数 : 計 2 件

1. N. Kawamoto, Y. Susuki, and A. Ishigame, "Estimation of stability region for an interconnected AC/multi-terminal DC grid," *Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*, **2020**, 11(4), 610-623 DOI: 10.1587/nolta.11.610
2. K. Takamichi, Y. Susuki, M. Netto, and A. Ishigame, "A mode-in-state contribution factor based on Koopman operator and its application to power system analysis," *Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE*, **2022**, 13(2), 409-414 DOI: 10.1587/nolta.13.409

・査読無し : 発表件数 : 計 0 件
該当なし

*その他の著作物 (相手側研究チームとの共著総説、書籍など) : 発表件数 : 計 0 件

該当なし

*その他の著作物 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの総説、書籍など) : 発表件数 : 計 1 件

1. 川本直輝, 交流・多端子直流システムの電圧および過渡安定性に関する研究, 大阪府立大学博士論文, **2021**, DOI:10.24729/00017349

2. 学会発表

*口頭発表 (相手側研究チームとの連名発表)

発表件数 : 計 2 件 (うち招待講演 : 0 件)

*口頭発表 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表)

発表件数 : 計 5 件 (うち招待講演 : 0 件)

*ポスター発表 (相手側研究チームとの連名発表)

発表件数 : 計 1 件

*ポスター発表 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表)

発表件数 : 計 0 件

3. 主催したワークショップ・セミナー・シンポジウム等の開催

1. Public Seminar (舟木剛教授・大阪大学), 主催者: MODULATOR プロジェクト, SINTEF Energy Research, トロンヘイム, ノルウェー, 2019年12月13日, 参加人数20名程
2. Digital Workshop on Analysis and Operation of Future Hybrid AC/DC Transmission Systems, 主催者: MODULATOR プロジェクト, オンライン, 2022年3月23日, 登録人数50名程

4. 研究交流の実績（主要な実績）

【合同ミーティング】

- 2018年5月28日: キックオフミーティング (2カ国: 日本, ノルウェー), 大阪府立大学, 大阪, 日本
- 2018年6月15日: キックオフミーティング (2カ国: ノルウェー, ドイツ), SINTEF Energy Research, トロンヘイム, ノルウェー
- 2018年11月28日~12月2日: ミーティング (2カ国: 日本, ノルウェー), SINTEF Energy Research, トロンヘイム, ノルウェー
- 2019年6月24, 26日: ミーティング (3カ国), 大阪府立大学, 大阪, 日本
- 2019年9月23~27日: ミーティング (3カ国), Fraunhofer IEE, カッセル, ドイツ
- 2019年12月12~13日: ミーティング (2カ国: 日本, ノルウェー), SINTEF Energy Research, トロンヘイム, ノルウェー
- 3カ国のチームメンバーを交えて Teams ミーティングを月1回開催した。

【学生・研究者の派遣, 受入】

- 2018年10月~12月: 日本から学生1名が, 3ヶ月間相手側研究機関 (ノルウェー SINTEF Energy Research) に滞在し, 共同研究に従事した。
- 2019年6月: 相手国側研究員2名 (ドイツ Fraunhofer IEE) を日本側研究機関に10日間受け入れ, 共同研究を実施した。
- 2019年8月: 相手国側研究員2名 (ドイツ Fraunhofer IEE) が相手側研究機関 (ノルウェー SINTEF Energy Research) に2週間滞在し, 共同研究に従事した。

5. 特許出願

研究期間累積出願件数: 0 件

6. 受賞・新聞報道等

該当なし

7. その他

該当なし