

平成22年6月1日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19500032

研究課題名（和文） 電力系統における汎用回路解析手法の開発

研究課題名（英文） Development of generalized circuit analysis method  
for Electric Power System

研究代表者

長岡 直人（NAGAOKA NAOTO）

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：80180462

研究成果の概要（和文）：安定な電力供給に資するため、雷サージ、電気鉄道、配電系統高調波などを解析するソフトウェアおよび解析モデル構築ツールを開発した。回路解析と電磁界解析プログラムを相互補完的に用いて新たな知見を得ると共に、実機・縮小モデルを用いた実験により精度確認を行った。提案法は実用精度を有すると共に、従来と比して高速な解析が可能となり、本研究の成果は安定かつ高品位な電力供給、安全・安心な社会構築に貢献する。

研究成果の概要（英文）：Numerical simulation programs and modeling methods of lightning surge, electric train system and harmonics on distribution system are developed for a stable power supply. New knowledge is obtained from the results which are complementarily calculated by circuit analysis programs and an electro-magnetic field analysis program. Accuracy of the analyzed results and the developed model is confirmed by field test measurements obtained by actual and scale-down systems. The proposed methods have a practical accuracy and their simulation speeds are faster than those of the conventional methods. The results obtained in this study contribute to construct a safe and secure society.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：ソフトウェア工学・電力工学・シミュレーション・モデリング

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 電気エネルギーは国民の生活から産業活動に至るまで必要不可欠である。特に近年では、あらゆる分野で情報化が進み、電源の影響を強く受ける情報機器を安定動作させるために、停電をおこすことなく安定に電力を

供給することはもちろんのこと、電圧変動低減を始めとする電力品質向上は、重要な電力工学技術者の責務となっている。

(2) 従来発電は専ら電力会社によりなされてきたが、近年は風力発電など必ずしも電力会

社が管理することのない電源が、分散して多数系統に接続されている。また、インバータ等パワーエレクトロニクス技術は省エネルギー化に有効であるが、高調波電流を流出させ電力品質を低下させる。近年これらの負荷も多数分散して設置されている。以上の事項は、エネルギー有効利用に対しては効果的であるが、電力の安定供給を阻み品質低下をもたらす原因が、多様化・分散化する傾向にあることを意味する。

(3) 電力系統は前述のように大容量電力機器から小容量民生機器負荷に至るまで、極めて多種多様な機器からなっており、これらの機器のいずれに異常があっても安定な電力供給が不可能となる。ところが、公共に対する給電を停止し、電力系統安定化のための方策を立てるうえで必要となるデータを採取することは、社会活動を停止させかねず実施は困難である。稀ではあるが、実電力系統で測定を実施する場合においても多地点同時測定が求められることが多々あり、一般に測定系が極めて高価となるに加えて、多大な人的資源も必要となる。以上の観点から、電力系統では実験によってすべての現象を把握することは不可能である。したがって、本研究の主目的である安定な電力供給には、異常現象のシミュレーションが不可欠となる。このため、高い汎用性を有するシミュレーションソフトウェアとその要素となる解析モデルを開発する必要がある。

(4) 回路解析は時間領域法と周波数領域法に大別されるが、我国をはじめ世界各国では、専ら時間領域法による回路解析がなされている。当研究者が所属する研究グループは、電力系統解析の世界標準プログラムである時間領域法解析プログラム EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) の開発を担っており、これまでに米国政府電力庁・ヨーロッパ EMTP ユーザーグループ等各種機関と共同で EMTP の開発・改良に参加することにより、我国をはじめ世界における電力の安定供給に貢献してきた。なお、世界的に見て周波数領域法による解析はあまりなされていないが、これは解析安定性確保が困難とされているためである。しかし、当研究者は周波数領域解析法に関する多くのノウハウを有しており、EMTP 入力互換の周波数領域汎用解析プログラム FTP (Frequency Domain Transients Program) も独自に開発している。一方、従来計算負荷が過重で実施困難であった電磁界解析法も、計算機技術の発展により実用的手法となってきた。当研究者は自ら MATLAB 言語を用いた FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法電磁界解析プログラムを開発している。時間領

域・周波数領域における回路解析法および FDTD 法による電磁界解析法を相互補完的に用いることにより、解析精度の相互検証に使用し得ると共に、新たな知見を得ることができる環境にある。さらに当研究者は、従来から精力的に実験を行っており、数値解析の検証に不可欠な実測が可能であると共に、実験環境もすでに整っている。

(5) 当研究者は EMTP 研究組織に既に所属しており、研究者ネットワークは確立されている。したかつて、得られた結果を迅速に国内のみならず海外に還元し、研究成果さらに改良するループを有している。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、世界で広く使用され本学も共同開発に参画している汎用回路解析プログラム EMTP、本学独自の FTP、および FDTD 法による電磁界解析プログラムの開発・改良を行う。さらに、シミュレーションモデル構築などに必要な、電力系統に関わる各種数値解析ソフトウェアの開発およびこれらを用いた解析を通して、電力供給障害ならびに電力品質低下の原因を明らかにし、安定かつ高品位な電力供給に貢献することを目的とする。

(2) 研究では実験と理論面およびソフトウェア開発の面から、多面的な電気回路のモデル化を行う。より精密、正確な計算モデルを構築し、さらにそれらの背景にある物理現象の解明がなされれば、今後 EMTP や FTP による回路解析信頼性は格段に向上することになる。結果、より広くかつ高精度の電力系統解析が行われるようになって、事故を未然に防ぎ、社会の安全・安心に貢献できる。また、本研究で開発した解析手法・モデル・プログラムを公開することにより、各国ユーザーから意見を募り、更なる解析手法の改良・開発を行うループを立ち上げ、EMTP を始めとするソフトウェアの汎用性を高める。

(3) 我が国では、国土の特徴から外国と比して風力発電タワーなど高構造物への落雷頻度が高く、シミュレーションによる雷害対策の検討は必須である。電磁界解析法はタワー等の立体構造物の形状を考慮した解が得られるが、計算時間・メモリ容量など多大な計算機資源を必要とする欠点を有する。これに対して回路解析法は構造物を直接表現することはできないが、雷サージに及ぼす各種パラメータの影響など高速に異なる条件で雷サージ計算を実行し得る。実用精度を有しかつ高速なシミュレーションを可能とする回路解析モデルの開発を本研究の目的の1つとする。

(4) 数値シミュレーションには極力高い精度が求められるが、解析手法のみならず、解析モデルにも高い精度が求められる。精度の確認には実機による実測が理想的であるが、風力タワー・ビルを含め大規模な電力系統では困難である。従って、縮小モデルによる実験とならざるを得ないが、縮小化の影響を検討する必要がある。構造体サージ実測では実機・縮小モデルの電磁界解析結果ならびに縮小モデルの実測結果との比較検討より、まず縮小化の影響を検討した後、これらの結果から接地回路を含めた構造体回路モデルを導出し回路解析によっても構造体雷サージ解析がなし得るようにすることを目的とする。

(5) 電力品質を低下させる原因の1つである高調波を低減するには、まず高調波分布を知る必要がある。本研究では、安価に測定が可能な高調波多地点同時測定装置を開発する。さらにこの開発により得られる実験技術を応用することにより、近年問題となっている瞬低・系統電圧ノイズ測定器の開発を行う。なお、これらの測定器は、必ずしも専門家に限らずとも使用できるよう設計する。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究では、電磁界解析、ならびに時間領域・周波数領域回路解析法に基づくプログラムを相互補完的に用い、それぞれの手法では十分な結果が得られなかった分野において、新たな知見を得る。時間領域回路解析では主に EMTP を用い、周波数領域では、回路解析には FTP、モデル構築には独自開発プログラムを採用する。電磁界解析では、独自開発の MATLAB ベースの FDTD 電磁界解析プログラムに改良を加え、これにより構造体落雷時の電磁界・電流分布についてシミュレーションを行う。相互補完的な解析により、雷サージなどの過渡現象解析精度の向上が期待でき、電力供給障害の第一因である雷事故低減が期待される。また、回路モデルが存在しない課題については、FDTD 法電磁界解析により得られた結果より回路モデルを構築し、EMTP 解析により得られた結果との比較から、回路解析モデルに改良を加える。

(2) 電力系統解析のソフトウェア・モデルには、高い信頼度・精度が要求され、実験によりこれらを検証する必要がある。しかしながら、電力系統は極めて大きなシステムで、特に大学においては実機による実験は不可能である。風力タワー、鉄道き電系など実機による実験は外部機関と共同して実験を行い、実験室では縮小モデルによる実験を行う。接地電極雷サージ応答試験においては、数 m 規模の模擬接地電極をキャンパス内に敷設し、実際の過渡応答特性のデータを採取する。ビ

ル・風力発電タワーなどの構造体実験においては、縮小モデルを実験室内に構築し過渡応答特性のデータを採取する。なお、雷サージ特性縮小実験については、近年開発された絶縁型高速度波形記録装置を用いて実測を行う。なお、この装置を用いても高速度計測にはピックアップ（プローブ）、信号伝送ケーブルにより測定結果が左右され、過渡特性測定誤差が避けられない。そこで測定誤差補正法を確立し、これまで、主にシミュレーション誤差と考えられてきた解析結果と実測結果の差異について、測定誤差の観点からも検討を加える。

(3) これまで開発した高調波多地点同時測定装置に周波数分析機能を付加し、測定装置の汎用性を高めると共に、これを発展させ、ノイズ測定・背後インピーダンス測定装置を開発する。

(4) 世界各国で広く用いられている時間領域法回路解析プログラム EMTP のサポーティングルーチンを開発し、解析を容易とすると共に、EMTP の適用範囲拡大を図る。

### 4. 研究成果

(1) 本研究では、送電鉄塔、風力発電タワー、ビルなどの構造体それぞれの縮小モデルを構築し、これにインパルス電圧を印加あるいは電流を注入して過渡応答特性のデータを採取した。さらに、比較的厳密な解析がなし得ると考えられている FDTD 法電磁界解析により応答を解析した。これらの測定・計算結果に基づき、これまでに開発・提案された各部の数値解析モデルの調査を進めると共に、モデルの見直しを進めた。これより、従来これら構造体の過渡応答は別途求められてきたが、汎用的に求め得る回路解析モデル導出法を提案し、各モデルを構築した。図 1 に示すように、実測との比較より提案回路解析モデルが実用精度を有することを明らかにし、計算負荷の大なる電磁界解析を用いることなく回路解析法により高速に計算が可能であることが明らかとなった。

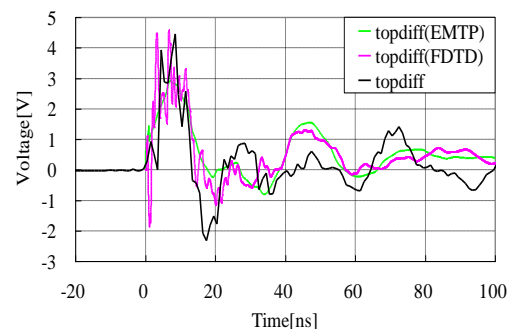


図 1 雷電流による縮小モデル構造体-接地線間電位差 (EMTP, FDTD 解析結果と実測値)

特に、提案ビル構造体回路解析モデルでは、構造体内の電流分布も求め得ることから、電磁界解析では得ることのできない、通信線などビル内に配置された電線の電圧・電流特性など、電気設備回路を含めた雷サージ解析が可能となった。縮小モデルによる構造体雷サージ特性測定法と測定精度について検討を加え、特に縮小実験で問題となる測定回路入力インピーダンス補正法について検討を加えた。これは、後に述べる周波数領域における電力系統背後インピーダンス推定法を応用したもので、雷サージと比して低周波対象の異なる分野の解析法を応用することにより可能となった。

(2) 構造体は一般に接地されるため、構造体の過渡応答は、接地インピーダンスに大きく依存する。従来から本学で実施した測定結果を含め、測定データならびに数値モデルのとりまとめを行い、データベース化した。さらに、本学における縮小モデルによる実験のみならず、外部機関と共同で実風力発電タワー雷撃時の雷電流分布を測定した。これより、図2に示すように、これまでほとんど測定されることのなかった、接地系からの雷電流逆流現象が明らかとなった。そこで、周波数変換法を用いてこの測定により得られた知見を表現し得る接地系回路モデルを構築した。このモデルは、雷害の推定を可能とする高精度かつ簡略なシミュレーションを実行可能とし、信頼性・実用性が高い配電系統設計に適用することができる。さらに、シミュレーションによりこの逆流現象を再現可能となったことより、雷害のメカニズムが明らかになった。例えば、電子機器へ悪影響を及ぼす強電磁界の発生要因が接続接地線電流であることを明らかとし、この接地線を埋設してタワー内電磁界を抑制する手法を提案し、その効果をシミュレーションにより検証した。

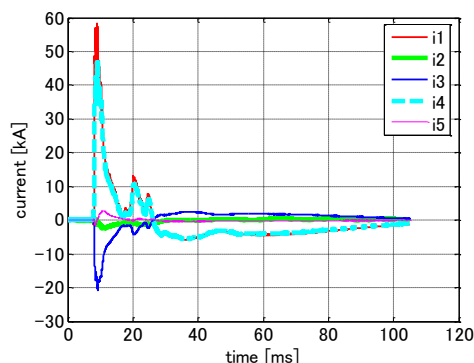


図2 風力発電タワー落雷時の接地回路電流分布 ( $i_1$ :タワー電流,  $i_3$ :逆流電流)

(3) 電力品質の低下や電力供給障害を引き起こす、配電系統における高調波を多地点かつ

同時に測定できる図3に示す安価な可搬型測定器を開発・改良し、大学キャンパス内あるいはその近傍で測定を行った。開発測定器は実用精度を有すると共に、ラジオ放送を利用した時刻同期回路有している。本機はマイクロコンピュータと民生用部品からなっているため安価で、多数の測定器を要する多地点同時測定に適する。さらにこの高調波測定器を基にして、瞬時電圧低下などの異常現象・ノイズを測定するプロトタイプ測定器を開発し、実用化が可能であることを確認した。なお、このプロトタイプ機はFPGAと民生用デジタル録音用素子を用いており、コストを抑えながらも高速動作を可能としている。

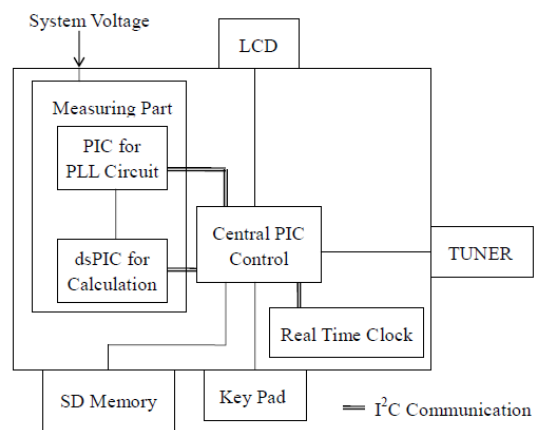


図3 多地点同時測定に適したラジオ放送時刻同期型高調波測定装置

(4) 前項の配電系統高調波多地点同時測定装置を発展させ、背後インピーダンス測定装置を製作した。本装置は図4に示すように、コンセントなど配電線末端に異なるコンデンサを接続したときの過渡電圧変動を、数値フーリエ変換した後演算処理することにより背後インピーダンスの周波数応答を求めるもので、系統を停電させることなく活線測定が可能となる。

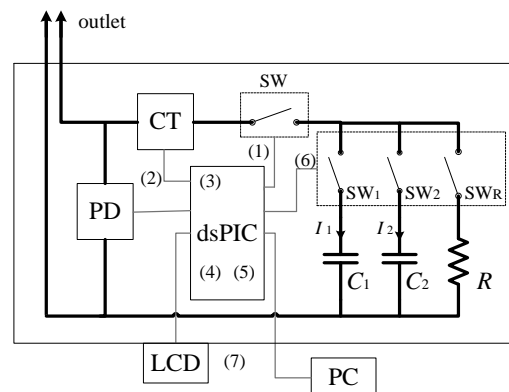


図4 背後インピーダンス測定装置

この背後インピーダンスから等価回路モデルを合成することにより、高調波解析から開閉サージ解析に至るまで、幅広くシミュレーションに応用することができる。

(5) 鉄道き電系と電力系統との最も大きな差異は、負荷が時間によって移動することである。図5に示すように、直流き電系においては、線路を時変抵抗で表わし、この値を制御系モデルで変更することにより、負荷の移動をEMTPで表現可能とした。さらに、電力系統で広く用いられている手法を応用して、鉄道き電系の架線・レールのインダクタンス、キャパシタンス定数計算プログラムを開発した。この定数を知ることにより、鉄道き電系においても、電力系統解析で培った技術を利用して高精度き電系解析を実行し得る。外部機関と共同で実施した実測との比較より、得られた定数はき電系の電圧変動のみならず地絡などの事故シミュレーションに適用し得、安定な鉄道運行に必須のき電系設備設計に有用であることが明らかとなった。直流電気鉄道は電力系統から大容量交直変換器を介して電力の供給を受けているが、この変換器は電力系統の中で大きな高調波発生源である。提案き電系モデルは、この直流き電系高調波解析にも有用であることが明らかとなった。

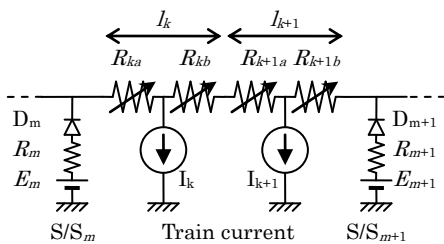


図5 列車移動を考慮したき電系モデル

(6) 前項で確立した鉄道き電系のシミュレーション技術を応用して、電気鉄道の電圧安定化、回生ブレーキの有効活用に貢献する電力補完装置のシミュレーションを実施し装置設計に応用した。



図6 鉄道用電力補完装置

実測結果との比較から、提案解析法は実用精度を有することまた実システムの設計に有用であることが明らかとなった。開発した補完装置は実用化され(図6)、き電回路の電圧変動抑制に効果的であることが確認されている。

(7) 前項の電力補完装置の蓄電媒体にはリチウムイオン電池が採用されている。本研究では、リチウムイオン電池の過渡特性を表現し得る等価回路を実測結果から導出し、先の電力補完装置のシミュレーションに応用した。また、蓄電媒体に電気二重層キャパシタ(EDLC)の採用も提案され実用化されている。本研究では、このEDLCの非線形電圧電流特性を測定し、これより汎用回路解析プログラムEMTPに導入し得る図7に示すモデルを開発した。なお、電池・EDLC特性測定のソフトウェアの開発も行った。これにより、いかなる蓄電媒体を有する電力補完装置であっても開発したき電回路モデルと組み合わせることにより、電力補完装置のシミュレーションが可能となった。これにより、補完装置の最適容量、最適配置など、実験では検討することが困難なパラメータが明らかになり、本研究結果は補完装置の実用設計に採用された。

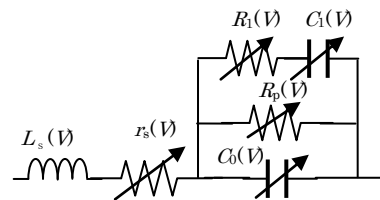


図7 非線形EDLCモデル

(8) これまでに開発した、大規模回路のデータ入力が容易であるJava記述EMTPデータ入力エディタに改良を加えた。ヘルプシステムを増強し、可搬性に乏しい印刷マニュアルがなくともデータ入力を可能とし、ノートPCでもEMTPが容易に運用可能となった。

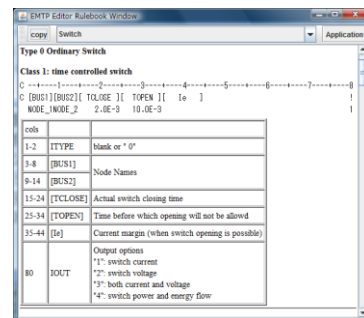


図9 EMTP エディタヘルプ画面

また、本研究で開発した構造体や鉄道き電系の定数計算プログラムは EMTP 入力データを出力する機能を有しており、定数計算後直ちに解析を進めることができる。

(9) 以上本研究で開発した各解析ソフトウェアおよび数値解析モデルは、実用精度を有すると共に高速な解析を可能とした。これに加えデータ作成の容易さにも配慮しているため、計算時間のみならず技術者の占有時間を短縮した。これは、信頼性が高いシステム設計に貢献する。シミュレーションの高信頼性化・高精度化を含めた本研究の結果は、電力供給障害ならびに電力品質低下の原因を明らかにし、安定かつ高品位な電力供給に貢献すると考えられる。なお、安定な電力供給は電力・鉄道・建築・情報をはじめとする各種産業界に貢献するのみならず、安心・安全な国民生活を担保するものである。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 18 件)

- ① M. Nagao, N. Nagaoka, Y. Baba and A. Ametani, FDTD Electromagnetic Analysis of a Wind Turbine Generator Tower Struck by Lightning, 電気学会論文誌 B, 査読有, Vol. 129, 2009, pp. 1181-1186
- ② 長尾 光紘, 長岡 直人, 馬場 吉弘, 雨谷 昭弘, FDTD 法を用いた風力発電タワー雷撃時の電流分布解析, 電気学会論文誌 B, 査読有, Vol. 128, 2008, pp. 1393-1400
- ③ N. Nagaoka, H. Morita, Y. Baba, A. Ametani, Numerical Simulations of Lightning Surge Responses in a Seismic Isolated Building by FDTD and EMTP, 電気学会論文誌 B, 査読有, Vol. 128, 2008, pp. 473-478
- ④ 三木 貫, 小西 和紀, 森本 光滋, 長岡 直人, 雨谷 昭弘, 共振電流を利用した低圧配電系統背後インピーダンスの推定, 電気学会論文誌 B, 査読有, Vol. 128, 2008, pp. 599-608

[学会発表] 計 (52) 件

- ① N. Nagaoka, T. Kusuda, Y. Iwakura, and A. Ametani, Induced Voltages to Wires Installed within a Building due to Direct Lightning, International Conference on Power Systems Transients, 4, June, 2009, Int. Community House (Kyoto, Japan)
- ② N. Nagaoka, S. Fujiyama, H. Nonoyama, and A. Ametani, Parameter Estimation of a Nonlinear EDLC Model for EMTP Simulation, International Conference

on Power Systems Transients, 4, June, 2009, Int. Community House (Kyoto, Japan)

- ③ Niwa T., Nagaoka N., Mori N., Ametani A., Umeda S., A Control Method of Charging and Discharging Lithium-Ion Battery to Prolong Its Lifetime in Power Compensator for DC Railway System, Proc. University Power Engineering Conference, 1-4 Sep. 2008, Padova, Italy
- ④ Hirai T., Ohnishi A., Nagaoka N., Mori N., Ametani A., Umeda S., Automatic Equivalent-Circuit Estimation System for Lithium-Ion Battery, Proc. University Power Engineering Conference, 1-4 Sep. 2008, Padova, Italy
- ⑤ 長岡 直人, 馬場 吉弘, 雨谷 昭弘, 森田 祐志, 東 竜也, 山本 達也, 風力発電タワー雷撃時の電流分布特性測定, 平成 19 年電気学会 B 部門大会, no. 456, 2007 年 9 月 13 日, 八戸工業大学
- ⑥ K. Morimoto, K. Konishi, T. Miki, N. Nagaoka, A. Ametani, Harmonic source identification by simultaneous-multipoint harmonic and measurements, Proc. UPEC 2007, pp. 322-327, Brighton, UK, 4-6 Sept. 2007
- ⑦ Sadakiyo, M., Nagaoka, N., Ametani, A., Umeda, S., Nakamura, Y., Ishii, J., An optimal operating point control of lithium-ion battery in a power compensator for DC railway system, Proc. UPEC 2007, pp. 681-686, Brighton, UK, 4-6 Sept. 2007
- ⑧ T. Niwa, N. Nagaoka, A. Ametani, Efficiency Improvement of Compensators for Railway System in Parallel Operation, Int. Conf. Elect. Eng., 11. July, 2007, Hong Kong
- ⑨ N. Nagaoka, A. Ametani, S. Umeda and Y. Nakamura, Numerical Simulation of Feeding Line of DC Railway using EMTP, Int. Conf. Elect. Eng., 11. July, 2007, Hong Kong

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

長岡 直人 (NAGAOKA NAOTO)  
同志社大学・理工学部・教授  
研究者番号: 80186462

##### (2) 研究分担者

なし。

##### (3) 連携研究者

なし。