

博士論文概要

論文題目

電力系統の事故時および平常時の
周波数変動解析に関する研究

Studies on Power System Frequency
Dynamics Analysis under Emergency and
Normal Conditions

申請者

井上	俊雄
Toshio	INOUE

わが国ではエネルギーの安定供給とコストの低減の観点からエネルギー政策の見直しが行われ、現在、安定供給の確保、電気料金の最大限抑制、需要家の選択肢や事業者の事業機会の拡大を目的として電力システム改革が進められている。一方、低炭素社会の実現に向けて再生可能エネルギー導入促進のために固定価格買取制度が導入された結果、電力系統の安定運用に影響を与える自然変動電源である太陽光発電の導入が急増している。

このように電気事業を取り巻く環境は大きく変化しているが、その根底にあるのは電力系統の供給信頼性の確保であることには何らの変化もない。電力系統の供給信頼性の確保の考え方は長期的および短期的な側面から整理されている。長期的には電力需要に見合う十分な発電設備の確保ならびに安定かつ効率的に電力輸送ができる流通設備の確保である。短期的には電力系統の安定運用の確保であり、平常時の電力品質の維持ならびに事故時の系統セキュリティ維持（系統安定度、周波数、電圧の維持）を可能とする電力系統の安定運用の確保である。

本研究の対象は、上記の電力系統の安定運用の確保のうち、周波数の維持である。電力系統の周波数の維持を実現するには、それを支える基盤的な研究開発が必要であり、しかも、電源構成の変化、電源特性や電源運用の変化などの電力系統の特性変化に対応できる研究成果であることが要求されるため、過去の研究成果がそのまま適用され続けることが必ずしもできるわけではない。

本研究は、事故時および平常時における周波数変動シミュレーション解析に関する研究であり、本研究の位置づけなどを明記した第1章の序論に引き続き、第2章から第6章の概要は次の通りである。

事故時の電力系統の周波数異常（大幅な周波数変動）を予測して対策を講じるためには火力プラントの出力応動を解析することが重要である。このため、第2章と第3章では、周波数変動解析用火力プラントモデルとして開発した、近年の火力プラントの主流である貫流プラントモデル、コンバインドサイクルプラントモデルのそれぞれの概要について述べている。開発したこれらのモデルを使用することによって事故時の周波数変動解析で特に重要となる時間領域（事故発生から1～2分間程度）のプラント出力応動を解析することを可能としている。開発モデルは電力各社の周波数安定化制御システムの制御定数の設定に活用され、送電線ルート遮断などの事故時の周波数異常の抑制の面で電力の安定供給に大きく貢献している。

まず、第2章では事故時の周波数変動解析用に開発した貫流火力プラントモデルの概要を述べている。開発モデルの特徴は汽力火力の主流である超臨界圧変圧貫流火力のプラント制御系（ボイラー・タービン協調制御）の制御動作、ボイラー主蒸気圧力の変化や変圧運転の影響を表現している点にある。これにより従来のタービン・ガバナ系のみを表現したモデルでは解析が困難であった周波数変動

時の貫流火力プラントの特徴的な出力応動の解析を可能としている。プラント制御系の構成と制御動作や変圧設定については我が国で商用運転中の主な火力ユニットのプラント制御系の調査結果に基づいている。開発モデルで使用する定数のうち、プラント制御系モデルの定数は実機データに基づいて設定可能であるが、主蒸気圧力の応動時定数など実機試験結果に基づいて設定すべき定数については、実機試験波形と開発モデルによるシミュレーション波形の比較等を通じて得られた推奨値を提示している。

開発モデルによる解析例では事故時の周波数上昇時や低下時の貫流火力プラントの典型的な出力応動特性を示している。さらに周波数変動模擬試験時の実機応動と開発モデルによる解析結果の対比を通じて、周波数変動時の貫流火力の出力応動に関してはタービン・ガバナ系の応動に加えてプラント制御系の動作、主蒸気圧力の変化や変圧運転の影響が大きく、これらの影響は従来モデルでは表現できないことを明示している。

次に、第3章では、事故時の周波数変動解析用に開発したコンバインドサイクルプラントモデルの概要を述べている。開発モデルの特徴は、従来モデルとは大きく異なり、周波数変動時のガスタービンの出力応動に大きな影響を及ぼすプラント制御系の動作やガスタービン排ガス温度の変化を表現している点にある。プラント制御系の構成や動作はメーカー間の差異が大きいためメーカー個別にモデル化する必要があるが、一例として代表的なプラント制御系のモデル例を示している。また、開発モデルの解析精度は実機の周波数変動試験結果との対比等を通じて検証している。

開発モデルはその後の我が国の電力各社の新設コンバインドサイクルプラント個別の周波数変動解析用モデル開発のベースとなったもので、それらの個別モデルは電力各社において事故時の周波数安定化システムで使用され、各社の系統安定運用に大きく寄与している。

一方、近年、再生可能エネルギーの電力系統への連系拡大が進められており、特に太陽光発電の系統連系が急速かつ大幅に拡大している。太陽光発電は天候依存で出力が変動する、いわゆる自然変動電源であり、その系統への連系拡大によって生じる、平常時の電力系統の負荷周波数制御（LFC）への影響が懸念されている。このため、電力会社各社ではLFCの制御性能や所要調整力の評価のためのLFCシミュレーション解析の精度向上や制御性能の向上に対する要求が高まっている。これに対応した研究として、第4章、第5章では平常時の周波数変動解析に関する研究成果を述べている。

まず、第4章では、LFC解析の精度向上を目指し、LFC調整力の主体である火力貫流プラントのLFC解析用に開発したプラントモデルの概要を述べている。LFC解析では従来からタービン・ガバナ系のみを表現したモデルが使用されてい

るが、第 2 章で示したように従来モデルは周波数変動時の貫流火力プラントの出力応動を解析できないため、LFC 解析の精度低下の原因となっている。これを解決するため、開発モデルは事故時変動解析用に開発した貫流火力プラントモデル（第 2 章）を平常時の周波数変動に限定して簡素化することで精度を維持しつつ、中央給電指令所からの出力要求（LFC 指令）に対する緩やかな出力変化を追加することで、LFC 解析に必要とされる数時間に亘る周波数変動解析の精度向上と効率的な実施を可能としている。

LFC 運転時の実機の出力応動との対比を通じて、開発モデルでは実機の応動を表現できているが従来モデルは表現できないことを明示している。開発モデルは電力各社において周波数品質の維持に向けた LFC 解析において活用されると期待される。また、開発モデルを使用して構築した実規模系統用の LFC 解析ツールの概要を述べるとともに、実測結果との対比を通じた検証によって同ツールの有用性を示している。

第 5 章では LFC の制御性能の向上を目指して、現用の LFC の制御ロジックでは活用できなかった出力応動の無駄時間遅れが大きい石炭火力機を LFC で活用するための制御方法を提案し、その有用性をシミュレーションで示している。中央給電指令所では数十年前に確立された LFC 制御ロジックが現在もほぼそのまま踏襲されており、近年の火力プラントで見られるボイラー制御や燃料種別に起因した、LFC 指令（発電機へ出力調整指令）に対する出力応動の無駄時間遅れには対応できていない。このため、無駄時間遅れが大きい石炭火力を LFC に活用することが困難であり、石炭火力機の比率が大きくなる深夜帯などでは LFC の制御性能の低下が懸念されている。

提案方式を中央給電指令所の LFC 制御ロジックに適用することで、出力応動の遅れの大きい石炭火力機の活用できるだけでなく、出力応動の即応性の高い揚水機の負担軽減など、LFC 発電機の出力応動特性に応じた LFC 調整力の効率的な活用が可能となる。提案方式を中央給電指令所に実装している電力会社もある。

第 6 章では、LFC シミュレーション解析手法の高度化として、電力系統の需要変化時の LFC 解析と VQC（電圧・無効電力制御）解析を同期安定度まで考慮して同時にシミュレーション解析する手法、いわゆる長時間解析手法を提案している。提案手法の特徴は、新しい数値積分手法（2 段対角型陰的ルンゲクッタ）を電力系統の長時間解析に適した手法として見出して評価・採用したことである。同積分手法は台形法と同等の精度を有し、しかも、数値積分の時間刻みを延伸した場合も台形法異なり数値振動が発生しないという優れた特徴を有している。

電気学会モデル系統を対象にした解析例を通じて、提案手法が同期安定度を精度よく解析できること、需給変化時の LFC と VQC を統合した解析を効率的に実施できことを示している。提案手法の今後の活用が多いに期待される。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 井上 俊雄

(2015年 11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>○(1) A Model of Fossil Fueled Plant with Once-through Boiler for Power System Frequency Simulation Studies, IEEE Transaction on Power System, Vol. 15, No. 4, November 2000, <u>T. Inoue</u>, H. Taniguchi, Y. Ikeguchi</p> <p>○(2) 電力系統動特性解析のためのコンバインドサイクルプラントモデルの開発, 電学論 B, 119 巻 7 号, 平成 11 年 8 月, <u>井上</u>, 須藤, 竹内, 三谷, 中地</p> <p>○(3) 電力系統長時間動特性解析に適した数値積分手法の検討, 電学論 B, 113 巻 12 号, H5 年 12 月, <u>井上</u>, 谷口, 市川</p>
国際学会	<p>○(1) Development of Load Frequency Control Simulation Tool, 2010 CIGRE Session, Aug., 2010, <u>T. Inoue</u>, H. Amano, K. Hanamoto, W. Wayama, Y. Ichikawa</p> <p>○(2) Load Frequency Control Logic to Utilize Generators with Long Time Delay in MW Response, 8th IASTED International Conference, Power and Energy Systems, June, 2008, <u>T. Inoue</u>, H. Amano</p> <p>○(3) Dynamic Simulations of Electric Power Systems under Long-term Change in System Generation and Loads, 7th IASTED International Conference, Power and Energy Systems, Aug., 2007, <u>T. Inoue</u></p> <p>○(4) A Thermal Power Plant Model for Dynamic Simulation of Load Frequency Control, IEEE PES 2006 Power Systems Conference & Exposition, Oct., 2006, <u>T. Inoue</u>, H. Amano</p> <p>(5) A Study on Dynamic Behavior of Coal-fired Thermal Power Plant during Significant System Frequency Rise after System Separation, IEEE General Meeting 2011, K. Yamashita, R. Minami, <u>T. Inoue</u>, et.al</p> <p>(6) Thermal Power Plant Models for Power System Frequency Simulations, IERE South Asia Symposium, November 2005, <u>T. Inoue</u>, H. Amano</p> <p>(7) Modeling of Combined-Cycle Power Plants for Power System Studies, IEEE PES General Meeting, July 2003, CIGRE Task Force C4-02-25 (申請者を含む連名)</p> <p>(8) Suppression of Low-frequency Inter-area Power Swing by Utilizing Turbine Governor System in a Once-through Thermal Plant, CIGRE London Symposium, June 1999, <u>T. Inoue</u>, H. Taniguchi, M. Abe, H. Ando</p> <p>(9) Large Frequency Disturbances: Analysis and Modeling Needs, IEEE PES 1999 Winter Meeting, February 1999, CIGRE Task Force 38-02-14 (申請者を含む連名)</p>
国内学会	<p>(1) 実測との対比による定数調整が容易なコンバインドサイクルプラントモデル, 電気学会 B 部門大会, 平成 22 年 9 月, 倉本, 天野, <u>井上</u></p> <p>(2) 電力系統動特性解析用コンバインドサイクルプラントモデルの実機応動との対比(続々報), 電気学会 H21 全国大会 6-156, H21 年 3 月, 山下, 天野, <u>井上</u>, 他 3 名</p> <p>(3) 需給制御と電圧・無効電力制御の統合的解析手法ー需給変化時の長時間動特性解析プログラムの開発ー, 電気学会 H17 全国大会 6-151, H17 年 3 月, <u>井上</u></p> <p>(4) LFC シミュレーション用火力プラントモデルの開発, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 平成 15 年 9 月, 天野, 川口, <u>井上</u></p> <p>(5) LFC シミュレーション用火力プラントモデルの開発, 電気学会 B 部門大会, 平成 15 年 8 月, 川口, 天野, <u>井上</u></p> <p>(6) 負荷周波数制御シミュレーションモデルの開発, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, 平成 15 年 9 月, 川口, <u>井上</u>, 山下, 山田, 水野, 上田</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
(7)	負荷周波数制御シミュレーションモデルの開発, 電気学会 B 部門大会, 平成 15 年 8 月, 山下, 山田, 金尾, 水野, <u>井上</u> , 川口
(8)	電力系統長時間動特性解析に適した積分解法の検討ー 2 段対角型陰的ルンゲクッタ法ー, 電気学会 H12 全国大会 6-093, H12 年 3 月, <u>井上</u> , 谷口
(9)	電力系統動特性解析用コンバインドサイクルプラントモデルの実機応動との対比 (続報), 電気学会 H13 年全国大会, H13 年 3 月, <u>井上</u> , 松浦, 山本, 古田, 渡部
(10)	電力系統動特性解析用大容量火力プラントモデルの実機応動との対比, 電気学会 H13 年全国大会, H13 年 3 月, 天野, <u>井上</u> , 他 2 名
(11)	電力系統動特性解析用コンバインドサイクルプラントモデルの実機応動との対比, 電気学会 H11 年全国大会, H11 年 3 月, <u>井上</u> , 須藤, 竹内, 中地
(12)	電力系統動特性解析のための複合サイクルプラントモデルの開発, 電気学会電力技術・電力系統合同研究会, 平成 10 年 10 月, <u>井上</u> , 須藤, 竹内, 三谷, 中地
(13)	火力プラントのガバナ系制御による長周期電力動揺抑制性能の評価, 電気学会 H10 年電力・エネルギー部門大会, 平成 10 年 8 月, <u>井上</u> , 谷口, 安部, 安藤
(14)	実測結果に基づく系統周波数特性の推定手法の開発, 電気学会電力技術研究会, H7 年 10 月, <u>井上</u> , 谷口, 吉田, 草間
(15)	電力系統長時間動特性解析のための基本プログラムの開発, 電気学会 H7 年電力・エネルギー部門大会, H7 年 8 月, <u>井上</u> , 谷口
(16)	ガバナ, プラント応動を考慮した系統周波数変動の簡易解析手法, 電気学会 H5 年全国大会, H5 年 3 月, <u>井上</u> , 谷口, 三浦, 草間
(17)	電力系統動特性解析のための火力プラントモデル, 電気学会電力技術研究会, H4 年 10 月, <u>井上</u> , 谷口
(18)	電力系統長時間動特性解析の高速化, 電気学会 H3 年電力・エネルギー部門大会, H3 年 8 月, <u>井上</u> , 谷口, 市川
総説	電力土木技術者のための電力系統概説 (第 4 回)ー需給計画と周波数制御ー, 電力土木, (1) No.316, 2005 年 3 月, <u>井上</u> (2) 電力系統の周波数制御から見た火力機の出力応動特性, 電学論 B, 124 巻 3 号, H16 年 3 月, <u>井上</u> (3) Modeling of gas turbines and steam turbines in combined cycle power plant, Task Force C4-02-25, CIGRE Technical Brochure, December 2003 (申請者を含む連名) (4) Analysis and modeling needs of power systems under major frequency disturbances, Task Force 38-02-14, CIGRE Technical Brochure, June 1999 (同上)
電中研研究報告	発電機の出力応動特性に応じた負荷周波数制御分担ー応動遅れの大きい発電機を活用する制御ロジックの提案ー, 電中研研究報告 R05021, H18 年 6 月, <u>井上</u> , 天野 (2) 需給制御と電圧・無効電力制御の統合的解析手法ー需給変化時の長時間電力系統動特性解析のため基本プログラムの開発ー, 電中研研究報告 T03046, H16 年 4 月, <u>井上</u> , 他 (3) 負荷周波数制御シミュレーション用火力プラントモデルの開発, 電中研研究報告 T03044, H16 年 4 月, 天野, 川口, <u>井上</u> (4) 電力系統長時間動特性シミュレーション手法ー系統電圧特性に着目した基本プログラムの開発ー, 電中研研究報告 T01051, H14 年 4 月, <u>井上</u> , 田中, 熊野 (5) 電力系統動特性解析のためのコンバインドサイクルプラントモデルの開発, 電中研研究報告 T97072, H10 年 6 月, <u>井上</u> , 三谷, 竹内 (6) 火力プラントのガバナ系制御による長周期電力動揺抑制能力の評価, 電中研研究報告, H10 年, <u>井上</u> , 谷口, 安藤, 安部

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
(7)	電力系統長時間動特性解析プログラムの開発- 火力プラントモデルを含めた解析機能の検証-、電中研研究報告、H7年、 <u>井上</u> 、谷口
(8)	電力系統長時間動特性解析プログラムの開発- 基本プログラムの開発-、電中研研究報告、H5年、 <u>井上</u> 、田中、市川
(9)	電力系統動特性解析のための火力プラントモデルとその標準定数、電中研研究報告 T91007、H3年、 <u>井上</u> 、谷口
(10)	電力系統長時間動特性解析の高速化- トラペゾイダル法の改良-、電中研研究報告、H2年、 <u>井上</u> 、谷口、市川
その他 論文	(学位論文に直接関係のない) (1) Numerical Integration by the 2-Stage Diagonally Implicit Runge-Kutta Method for Electromagnetic Transient Simulations, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 24, No. 1, January. 2009, T. Noda, K. Takenaka, <u>T. Inoue</u> (2) 非線形解析理論を用いた制御系設計手法の開発- 振動発散の抑制に有効な PSS 定数設定法-、電学論 B, 127 巻 6 号, 平成 19 年 6 月, 天野, <u>井上</u> (3) Nonlinear Stability Indices of Power Swing Oscillation Using Normal Form Analysis, IEEE PES Transaction on Power Systems, Vol. 21, No. 2, May, 2006, H. Amano, T. Kumano, <u>T. Inoue</u> (4) Nuclear Plant Model for Medium-to Long-term Power System Stability Studies, IEEE Transaction on Power System, January 1995, <u>T. Inoue</u> , T. Ichikawa, P. Kundur, P. Hirsch (5) 多機くし形系統における内部共振の解析への非線形動揺安定性指標の適用, 電学論 B, 125 巻 7 号, H17 年 7 月, 天野, 熊野, <u>井上</u> (6) 多機系統における非線形を考慮した動揺安定性指標の提案, 電学論 B, 124 巻 2 号, H16 年 2 月, 天野, 熊野, <u>井上</u> , 谷口 (7) 時系列データを用いた電力系統の特性同定手法- 小規模単独系統の周波数変動特性の同定-, 電学論誌 B, 124 巻 1 号, H16 年 1 月, 七原, 山下, <u>井上</u> , 伊良皆, 安里 (8) Light Water Reactor Plant Modeling for Power System Dynamics Simulation, IEEE Transaction on Power System, February 1988, T. Ichikawa, <u>T. Inoue</u> (9) Estimation of Power System Inertia Constant and Capacity of Spinning-reserve Support Generators Using Measured Frequency Transients, IEEE Transaction on Power System, January 1997, <u>T. Inoue</u> , H. Taniguchi, K. Yoshida, Y. Ikeguchi
国際学会(1)	Proposal of a Modified Algebraic Approach to Evaluate Required Capacity for Load Frequency Control (LFC) under a Large Penetration of Solar Photovoltaic Generations, 2012 CIGRE Session, Aug., 2012, M. Kuramoto, M. Nagata, <u>T. Inoue</u> (2) A New PSS Parameter Design Using Nonlinear Stability Analysis, IEEE PES General Meeting 2007, June 2007, H. Amano, <u>T. Inoue</u> (3) Nuclear Plant Dynamics under Power System Disturbances, 韓国電気学会 1988 大会 International Session, <u>T. Inoue</u> , T. Ichikawa
国内学会(1)	PV 大量導入が LFC へ与える影響に関するシミュレーション検討, 電気学会電力技術研究会, H24 年 9 月, 天野, 西田, 大城, 川上, <u>井上</u>
総説	(1) 大規模系統解析のためのツールとシミュレータ, 電気学会誌, 2012 年 12 月 (12 月号特集記事), Vol.132, No.12, <u>井上</u> (2) 電力土木技術者のための電力系統概説 (第 3 回) - 電力系統の運用と制御の概要 -, 電力土木, No.315, 2005 年 1 月, <u>井上</u>