

博士論文審査報告書

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

2016年 7月

東日本大震災後、我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、電力システム改革が進められている。電力システム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等の導入が急増し、電気事業を取り巻く環境は大きく変化している。新しい環境下でも、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）を可能とする電力システムの安定運用の確保は非常に重要である。これを解決するためには、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技術の研究が最重要課題の一つである。電力システムの周波数変動シミュレーション解析は、系統事故時の周波数異常に対する周波数安定化制御の策定、ならびに平常時の周波数品質維持のための周波数制御の実施において、重要な役割を果たしており、電力システムの安定運用と周波数品質を支える解析として不可欠な存在である。周波数変動は、電源と負荷のバランスで決まり、その変動のシミュレーション解析では、特に電源の特性、すなわち、周波数変動に対する発電出力応動が重要である。また、各種電源の中でも、電力システムの主要電源である火力プラントの発電出力応動が最も重要である。そのために、本論文では、事故時周波数変動解析用貫流火力プラントモデルの開発、事故時周波数変動解析用コンバインドサイクルガスタービンプラントモデルの開発、負荷周波数制御解析用貫流プラントモデルの開発、出力応動遅れの大きい発電機を活用する負荷周波数制御の制御ロジックの提案、そして負荷周波数制御シミュレーションの高度化手法の提案を行っている。

第1章は序論であり、電力システムの事故時ならびに平常時の周波数問題について概説し、本研究の位置づけを説明している。

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。開発モデルでは、汽力火力として近年主流となっている大容量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）の周波数変動時における基本的な制御動作、主蒸気変圧運転の影響が表現できている。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た。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。開発モデルの使用定数のうち、プラント制御系については実機データに基づいて設定可能であるが、ボイラー各部の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値を提示している。また、開発モデルを用いたシミュレーション解析により、事故時の周波数上昇時や低下時の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、周波数変動時の大容量貫流火力の出力応動においては、タービン・ガバナ系の動作に加えてプラント制御系の動作や変圧運転の影響が大きく、それらは従来モデルでは表現できないことを明示した。

第3章では、発電効率面や建設工期面の優位性から電力系統への導入が拡大してきている、コンバインドサイクル火力機の事故時の周波数変動解析用のプラントモデルを開発しその概要を述べている。開発モデルでは、従来モデルとは大きく異なり、周波数変動時の出力応動に大きな影響を及ぼすプラント制御系の応動やガスタービン排ガス温度の変化が表現できている。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火力機の周波数変動解析用のモデル開発のベースとなり、それらの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寄与した。

第4章では、負荷周波数制御解析の精度向上を目指し、負荷周波数制御調整力の主体である火力貫流プラントの負荷周波数制御解析用にプラントモデルを開発しその概要を述べている。負荷周波数制御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、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、負荷周波数制御解析の精度低下の原因となっていた。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を平常時の周波数変動に限定して簡素化すると共に、中央給電指令所からの出力要求に対する緩やかな出力変化を追加することで、負荷周波数制御解析に必要な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た。負荷周波数制御運転時の実機の出力応動との対比を通じて、従来モデルでは実機の応動を表現できないが、開発モデルでは表現できることを明示した。また、開発モデルを使用した実規模系統用の負荷周波数制御解析ツールでの結果と実測結果との対比を通じて同モデルの有用性を示している。

第5章では負荷周波数制御の制御性能の向上を目指して、これまでの負荷周波数制御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負荷周波数制御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た。中央給電指令所では、数十年前に確立された負荷周波数制御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、負荷周波数制御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。本方式を中央給電指令所の負荷周波数制御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、出力応動特性に応じた負荷周波数制御発電機の負荷周波数制御調整力の効率的な活用が可能となることが示された。

第 6 章では、負荷周波数制御シミュレーション手法の高度化として、需要変化時の負荷周波数制御解析と電圧・無効電力制御解析を同期安定度まで含め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。その手法の根幹は、電力系統の長時間解析に適した新しい数値積分手法（2 段対角型陰的ルンゲクッタ）を見出して適用したことである。その積分手法は台形法と同等の精度を有し、数値積分の時間刻みを延伸した場合も数値振動が発生しないという優れた特徴を有する。電気学会モデル系統を対象にした解析例を通じて、需給変化時の負荷周波数制御と電圧・無効電力制御を統合した解析を効率的に実施できることを明らかにした。

以上を要するに、本論文は電力系統の事故時および平常時の周波数変動解析に関して、事故時周波数変動解析用火力プラントモデルの開発、平常時周波数変動解析用火力プラントモデルの開発、出力応動遅れの大きい発電機を活用する負荷周波数制御ロジックの提案、そして負荷周波数制御シミュレーションの高度化手法の提案を行った。本論文で得られた成果は、これからの電力の安定供給に大きく貢献すると共に、電力システム工学の発展に寄与するものである。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2016 年 6 月

審査員

主査 早稲田大学教授 工学博士 早稲田大学 岩本 伸一

早稲田大学教授 工学博士 早稲田大学 石山 敦士

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 若尾 真治

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 林 泰弘
