

氏名	ひらいわ ひさゆき 平 岩 久 幸		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成18年3月24日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻		
学位論文題目	擬似負荷モデルを導入した電力システム同定による 広域安定度監視に関する研究		
指導教員	東北大学教授 斎藤 浩海		
論文審査委員	主査 東北大学教授 斎藤 浩海	東北大学教授 一ノ倉 理	
	東北大学教授 濱島 高太郎		

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

将来の電力システムでは、競争的電力市場の活性化と自然エネルギー型分散電源の大量導入により、送配電ネットワーク全体の潮流パターンが不規則に変動することが懸念される。事前予測の困難な潮流変動が発生した場合にも安定して電力を供給するためには、従来のオフラインにおける代表的運転状態の安定度解析に加えて、リアルタイムで広域的に安定度を評価・監視することが重要になるだろう。このような背景の中で電力システムの分野では、実際のシステムからオンラインで収集される送電線潮流や発電機動揺の計測値を利用したリアルタイム安定度解析技術が研究されている。東北大学においても、GPS に基づく多地点同期計測を利用した固有値推定法の基礎的な検討がなされてきた。この方法では、電力システムは送電線をバネ、発電機を質点に置き換えたバネ-質点振動系として同定される。そして、同定されたバネ-質点振動系の動特性を解析することにより、その振動モードとしてシステムの安定度を決定する主要な固有値を推定する。

ただし、この基本的方法には実用上の難点がある。それは、固有値推定のために電力ネットワークに接続される全ての負荷変動と全ての発電機の同期計測値が必要とされる点である。特に無数に存在する負荷変動を全て計測するためには膨大な数の計測装置が必要であり、その設置コストの観点から実システムへの適用は困難といえる。そこで本研究では、この基礎理論を実用的方法論へと発展させることを目的とする。具体的には、負荷変動の計測装置数と発電機の計測装置数の両方を大幅に削減する手法を開発する。

### 第2章 同期計測に基づく固有値推定による安定度監視

GPS 衛星から発信される信号には正確な時刻情報が含まれている。この時刻情報を利用すると、地理的に離れた発電所や変電所においても 150 ナノ秒程度の誤差で有効・無効電力、電圧、周波数、位相角の同期計測値を得られるため、以下に説明する同期計測に基づく固有値推定を実現できる可能性がある。

電力システムでは負荷の微小な変動が常時発生している。この変動は送配電ネットワークを通じて発電機

の電氣的出力を変化させ、その結果、発電機の回転子速度  $\omega$  と内部位相角  $\delta$  が微小に変動している。したがって同期計測装置を変電所と発電所に設置し、電力システムへの入力である負荷変動と応答である  $\delta$  と  $\omega$  の変動を計測すれば、その同期計測データに最小二乗法を適用して電力システムの動特性を同定できる。このシステム同定により、送電線をバネ、発電機を質点に置き換えたバネ-質点系の振動モードとして電力動揺に対応する固有値を推定することができる。この方法は、実際にオンラインで収集可能な計測値のみに基づいているため、リアルタイム安定度監視に適しているといえる。ただし、この固有値推定を実行するためには、全ての負荷変動と全ての発電機を同期計測する必要があるため、その計測装置のコストの観点からは実用的とはいえない。

### 第3章 系統・負荷一体型システム同定による必要計測装置数の削減

第2章で説明した基本的な固有値推定では、全ての負荷変動及び全ての発電機の計測値が必要である。ただし、負荷変動が白色ノイズの特性を持つと仮定すれば、電力システムの入力と応答の無相関な特性に基づいて、発電機の同期計測値のみから固有値を推定できる。そこで本研究では、負荷変動とみなすことのできる実測の有効電力潮流データの白色雑音特性を分析した。その結果、実際の負荷変動は白色雑音ではない可能性のあることが明らかになった。

この結果から本研究では、負荷変動が白色雑音特性を有さない場合にも負荷変動の計測値を使用せず、高精度に固有値を推定できる新しい手法を検討した。その手法の概念を図1により説明する。負荷変動が白色雑音ではないということは、負荷がある動特性に従って変動していることを意味する。本手法ではその負荷動特性を表現するために、擬似負荷モデル(図中の破線)と呼ぶ常微分方程式を導入している。この負荷モデルの入力は白色雑音であり、出力として白色雑音特性を持たない負荷変動を表現している。このように負荷変動を表現することで、電力システム(図中の太線)と擬似負荷モデルを一体化した合成システム(図中の一点鎖線)への入力を白色雑音に変形できる。また、合成システムの出力は  $\delta$  と  $\omega$  および  $\omega$  の微分量となる。したがって、発電機の同期計測値のみから合成システムを同定できる。合成システムの固有値は、電力システムの固有値と擬似負荷モデルの固有値に分離されるため、同定した合成システムの固有値から電力システムの固有値を抽出することができる。システム同定に利用する  $\omega$  の微分量の微分階数を増加させることは擬似負荷モデルの次数を増加させることに対応する。このことを利用すると、図1に示しているように  $\omega$  の計測値に微分操作を繰り返して得られる時系列データをシステム同定に用いることで、負荷変動が異なる周波数と減衰特性の成分を数多く含んだ複雑な変動である場合にも、電力システムの固有値を高精度に推定できる。

系統・負荷一体型システム同定法を3機の発電機を含む電力システムモデルに適用する計算機シミュレーションを行った。3機の同期計測デー

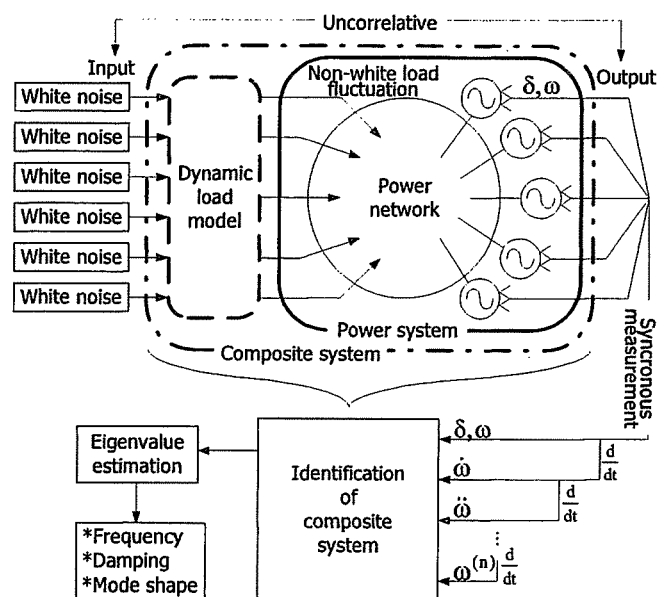


図1 系統・負荷一体型システム同定による固有値推定

タから推定された固有値と、モデル解析により得られた真の固有値を図 2 に示す。図 2 の固有値の中で 0.5Hz 以上の Mode#1 と #2 が、バネ-質点系の動特性に対応する推定対象の電力動揺モードである。この結果は、 $\omega$  の 5 階微分量まで利用すれば、2 つの電力動揺モードを精度良く推定できることを示している。特に、最も減衰性の悪い Mode#1 の推定値は、ほとんど真値と一致している。このように、系統・負荷一体型システム同定法を利用すれば、固有値推定のために負荷変動の計測値は不要になる。

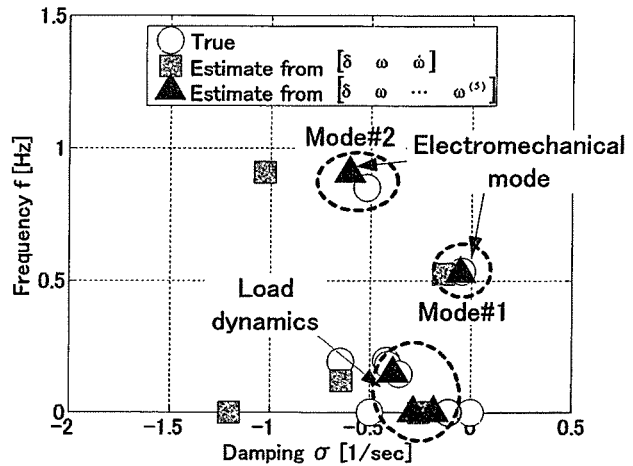


図 2 固有値推定の結果

#### 第4章 支配的長周期モードの推定に適した計測対象発電機の選定

電力システムでは一般に長周期の電力動揺モードが弱制動となり安定度を支配する傾向がある。したがって、安定度監視においては長周期モードに対応する固有値の推定が特に重要であるといえる。ところで、第 3 章で説明した系統・負荷一体型システム同定法では、全ての電力動揺モードの固有値を推定するために、全発電機の同期計測値を利用していた。しかし、長周期モードの固有値のみを推定対象とするならば、一部の発電機の計測値を用いれば十分と考えられる。そこで本章では、長周期モードに対応する固有値の推定に適した計測対象発電機の選定法について論じる。

この発電機選定法では最初に、長周期モードにおいて発電機群がコヒーレントである性質に基づいて、全ての発電機を幾つかのコヒーレントグループに分類する。そして、各グループにおいて代表的に動揺する 1 台の発電機をコヒーレンシーの分析により選定する。この代表発電機が長周期モードの固有値推定に適した計測対象発電機である。このようにして選ばれた代表発電機の計測値を利用すれば、コヒーレントグループ全体の動揺を表す慣性中心を近似することができる。その近似慣性中心のデータに固有値推定法を適用すれば、各グループを 1 台の大容量等価発電機に置き換えた少数発電機の電力システムの動揺モードとして長周期モードの固有値を推定できる。

この計測対象発電機の選定法を 10 機システムモデルに適用した結果、3 機の代表発電機が選ばれた。その代表発電機の同期計測値からコヒーレントグループの動揺データを近似し、推定された固有値を図 3 に示す。0.5Hz 以上の 9 つの電力動揺モードの内、周波数が低く弱制動の Mode#1 と #2 の固有値を精度良く推定できることが確認できる。したがって、このケースでは 7 台の計測装置を削減できたことになる。

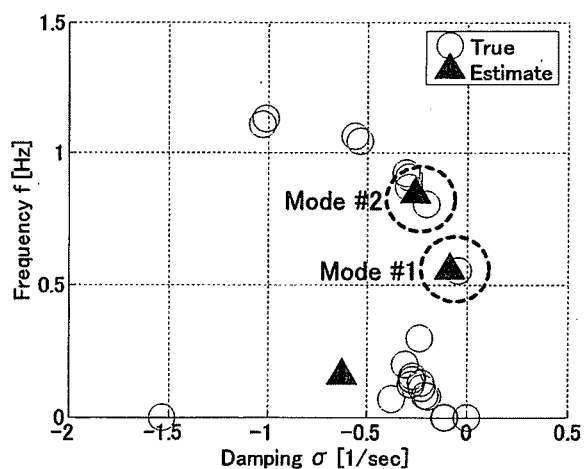


図 3 長周期モード推定の結果

## 第5章 固有値の推定精度に影響を及ぼす要因とその分析

本研究では、実際の電力システムを用いた実験を行うことができないため、固有値推定法の有効性を計算機シミュレーションにより検討している。そして、図2や図3に示すように、開発した手法により固有値を高精度に推定できることを明らかにした。ただしシミュレーションでは、特定の状態の電力システムモデルから得られた120秒の長さの計測値を固有値推定に利用している。したがって、異なる状態の電力システムまたは異なる長さの計測値を利用して固有値推定を行った場合、その精度が悪化する可能性もある。そこで本章では、電力システムの状態を変化させる5つの要因と計測データの長さについて、これらの要因が固有値の推定精度に及ぼす影響を計算機シミュレーションにより分析した。

1つ目の要因は振動性負荷の周期と減衰性である。この要因については、振動性負荷の周期と推定対象の電力動揺モードの周期が近接している場合に、その固有値の推定精度が少し悪化するケースがあることが分かった。2つ目の要因は負荷の電圧・周波数特性である。負荷特性により生じる電力システムと負荷変動の間の相互作用が系統・負荷一体型システム同定の精度を悪化させることが懸念されたが、現実的な負荷特性は固有値の推定精度に影響を与えないことが明らかになった。3つ目の要因は負荷周波数制御である。この検討では、負荷周波数制御が固有値の推定結果に影響を及ぼさないことと、負荷脱落という大じょう乱が発生した場合にも固有値が高精度に推定されることが明らかになった。4つ目の要因は推定される固有値の減衰特性である。固有値の減衰性が悪い場合はその推定精度は高く、減衰性が良い場合には推定値に誤差を生じやすいことが分かった。5つ目の要因は潮流状態の違いである。昼間と夜間の潮流状態、原子力発電の一部が停止した潮流状態において固有値の推定精度に大差はなかった。最後の要因は固有値推定に利用する計測データの長さである。計測データを長くするほど固有値の推定精度は向上する。しかし、運転状態が刻々と変化する電力システムにおいて長い計測データを利用することは、過去の運転状態の固有値を推定する結果となる。したがって、推定精度と推定値の新しさの間のトレードオフを考慮してデータ長を決定する必要がある。

## 第6章 結論

本研究ではリアルタイム広域安定度評価・監視の実現を目的として、多地点同期計測技術を活用した固有値推定法を検討した。この固有値推定法の実用化に向けての大きな課題は、全ての負荷変動と全ての発電機を計測するために膨大な数の計測装置を必要とすることである。本研究ではこの課題に取り組み、負荷変動に含まれる性質の不明な動特性を擬似負荷モデルと呼ぶ常微分方程式として表現する方法を考案した。この擬似負荷モデルを導入した系統・負荷一体型システム同定法を利用すれば、発電機の同期計測値の微分量から高精度に固有値を推定できる。本研究では、この負荷変動計測の不要化のための手法に加えて、発電機の計測装置を削減する方法も検討した。この方法を利用すれば、発電機群のコヒーレンシーに基づいて支配的な長周期モードの推定に適した計測対象発電機を選定できる。この計測対象発電機を選定法と系統・負荷一体型システム同定法を併用すれば、少数の発電機の同期計測値のみから支配的な長周期電力動揺モードを推定可能である。これらの方法に基づいてリアルタイム固有値推定が実現された電力システムでは、固有値推定と従来のシミュレーション解析を組み合わせた新しい安定度評価・監視が行なわれることになろう。

# 論文審査結果の要旨

現代社会の基盤である電力システムを高信頼度で運用するためには、その安定度をリアルタイムで監視することが望まれる。著者は、複数の発電機から同時刻に計測された回転速度と位相角の時系列データを用いて、全系の安定度を表す固有値を推定するための基礎手法を開発した。本論文はこれらの成果をまとめたものであり、全編6章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、GPSを用いた同期計測による固有値推定法の基礎を説明している。この推定法は、常時の微小負荷変動を入力、発電機回転子の動揺を出力と捉え、電力システムを多入力多出力の動的線形システムとして同定することに基づいている。詳細な電力システムモデルのシミュレーションから、本固有値推定法の妥当性を明らかにしている。

第3章では、固有値推定に必要な同期計測装置の台数を大幅に削減できる新しいシステム同定法を論じている。前章で述べているシステム同定法は、すべての発電機と負荷の計測を必要とするため、実用上問題がある。そこで著者は、白色雑音入力の動的線形システムとして負荷を表現した擬似負荷モデルを新たに導入し、電力システムと負荷を一体化してシステム同定を行う方法を考案した。この方法により、負荷を全く計測せずに発電機の計測値のみから固有値を推定できることを理論的に明らかにした。これは同期計測によるリアルタイム広域安定度監視の実用化に極めて有用な成果である。

第4章では、弱制動電力動揺モードの固有値推定に適した計測対象発電機の選定法を論じている。この選定法は、全発電機が長周期電力動揺に関して複数のコヒーレントグループに分類される性質を利用しており、グループ毎に一台の発電機のみを計測すれば十分であることを電力システムモデルのシミュレーションから明らかにしている。これは計測装置台数のさらなる削減の可能性を示唆している。

第5章では、負荷の電圧特性など固有値の推定精度に影響を及ぼし得る6つの要因について論じている。電力システムモデルのシミュレーションによる検討の結果、計測データの長さを除く他の要因は、推定精度にほとんど影響を及ぼさないことが明らかになった。これは考案した固有値推定法の実用性を示す重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、同期計測技術に基づいた新しい電力システム同定理論を考案し、その広域安定度監視への適用可能性を明らかにしたものであり、電力システム工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。