

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2006-211830

(P2006-211830A)

(43) 公開日 平成18年8月10日(2006.8.10)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
H02J 13/00 (2006.01)	H02J 13/00 301A	5G064
H02J 3/00 (2006.01)	H02J 3/00 K	5G066

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2005-20791 (P2005-20791)  
 (22) 出願日 平成17年1月28日 (2005.1.28)

特許法第30条第1項適用申請有り 2004年8月5日 社団法人電気学会電力・エネルギー部門発行の「平成16年 電気学会 電力・エネルギー部門大会 論文集」に発表

(71) 出願人 504174135  
 国立大学法人九州工業大学  
 福岡県北九州市戸畑区仙水町1番1号

(71) 出願人 504176911  
 国立大学法人大阪大学  
 大阪府吹田市山田丘1番1号

(74) 代理人 100108660  
 弁理士 大川 謙

(72) 発明者 三谷 康範  
 福岡県北九州市戸畑区仙水町1番1号 国立大学法人九州工業大学内

(72) 発明者 渡邊 政幸  
 福岡県北九州市戸畑区仙水町1番1号 国立大学法人九州工業大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電力システムの系統安定度監視方法及びシステム

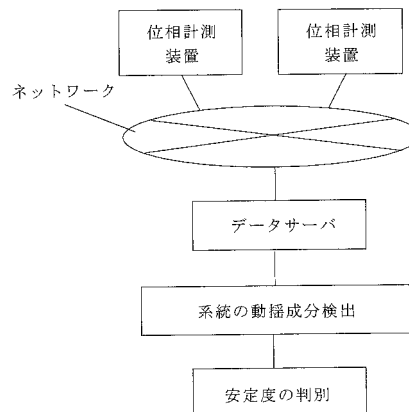
(57) 【要約】

【課題】 遠隔・多地点の情報量を同時刻で計測して、広域的なデータ収集に基づくリアルタイムの監視・制御を実現する。

【解決手段】 本発明は、広域的な複数地点におけるデータ収集に基づきリアルタイムに電力システムの系統安定度を監視する。広域的な複数地点のそれぞれにおいて、一般需要家が用いる商用電源コンセントの電圧からその位相を検出し、この位相情報に時刻情報を付加したデータを、ネットワークを介して、データサーバに送出する。データサーバは、複数地点からのデータを、継続的に取得して、収集し、この取得したデータに基づき、系統の動揺成分を抽出し、抽出した動揺成分に基づき系統の安定度を判別する。

【選択図】 図1

本発明の概略システム構成



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

広域的な複数地点におけるデ - タ収集に基づきリアルタイムに電力系統の系統安定度を監視する方法において、

前記広域的な複数地点のそれぞれにおいて、一般需要家が用いる商用電源コンセントの電圧からその位相を検出し、

この位相情報に時刻情報を付加したデ - タを、ネットワークを介して、デ - タサ - バに送出し、

デ - タサ - バは、前記複数地点からのデ - タを、継続的に取得して、収集し、

次に、取得したデ - タに基づき、系統内で発生する最も周期が長い第 1 モ - ドと次に周期が長い第 2 モ - ドの動揺成分を抽出し、 10

抽出した第 1 モードと第 2 モードの動揺成分に基づき系統の安定度を判別し、

前記安定度の判別は、前記第 1 と第 2 の 2 つのモ - ド間に相互作用が働く連成モデルであることを考慮した 2 自由度系振動モデルを適用し、第 1 と第 2 モ - ドの動揺成分から前記連成モデルの係数を同定し、その結果から固有値を計算することにより行う、  
ことから成る電力系統の系統安定度監視方法。

## 【請求項 2】

前記第 1 と第 2 モードの動揺成分は、前記複数地点から取得したデ - タに、ウェ - ブレット変換を施すことにより抽出する請求項 1 に記載の電力系統の系統安定度監視方法。

## 【請求項 3】

前記連成モデルは、第 1 モードの動揺成分を  $x_1$ 、その 1 階微分を  $x_2$ 、第 2 モードの動揺成分を  $x_3$ 、その 1 階微分を  $x_4$  として、以下のモデル式で表され、 20

$$X_1 (x_1 \text{ の微分}) = x_2$$

$$X_2 (x_2 \text{ の微分}) = a_{1000} \cdot x_1 + a_{0100} \cdot x_2 + a_{0010} \cdot x_3 + a_{0001} \cdot x_4$$

$$X_3 (x_3 \text{ の微分}) = x_4$$

$$X_4 (x_4 \text{ の微分}) = b_{1000} \cdot x_1 + b_{0100} \cdot x_2 + b_{0010} \cdot x_3 + b_{0001} \cdot x_4$$

## 【数 1】

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{1000} & a_{0100} & a_{0010} & a_{0001} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ b_{1000} & b_{0100} & b_{0010} & b_{0001} \end{pmatrix}$$

30

この行列 A から 2 つの共役な複素固有値を導出することで、2 つの振動モ - ドの特徴を調べる請求項 1 に記載の電力系統の系統安定度監視方法。

## 【請求項 4】

広域的な複数地点におけるデ - タ収集に基づきリアルタイムに電力系統の系統安定度を監視するシステムにおいて、

前記広域的な複数地点のそれぞれにおいて、一般需要家が用いる商用電源コンセントの電圧からその位相を検出し、この位相情報に時刻情報を付加したデ - タを送出する位相計測装置と、 40

前記複数地点からのデ - タを、ネットワークを介して、継続的に取得して、収集するデ - タサ - バと、

前記デ - タサ - バが取得したデ - タに基づき、系統内で発生する最も周期が長い第 1 モ - ドと次に周期が長い第 2 モ - ドの動揺成分を抽出する手段と、

抽出した動揺成分に基づき系統の安定度を判別する手段と、を備え、

前記安定度の判別は、前記第 1 と第 2 の 2 つのモ - ド間に相互作用が働く連成モデルであることを考慮した 2 自由度系振動モデルを適用し、第 1 と第 2 モ - ドの動揺成分から前記連成モデルの係数を同定し、その結果から固有値を計算することにより行う、 50

ことから成る電力系統の系統安定度監視システム。

【請求項5】

前記第1と第2モードの動揺成分を抽出する手段は、前記複数地点から取得したデータに、ウェーブレット変換を施すことにより抽出する請求項4に記載の電力系統の系統安定度監視システム。

【請求項6】

前記連成モデルは、第1モードの動揺成分をx1、その1階微分をx2、第2モードの動揺成分をx3、その1階微分をx4として、以下のモデル式で表され、

$$X1(x1の微分) = x2$$

$$X2(x2の微分) = a1000 \cdot x1 + a0100 \cdot x2 + a0010 \cdot x3 + a0001 \cdot x4 \quad 10$$

$$X3(x3の微分) = x4$$

$$X4(x4の微分) = b1000 \cdot x1 + b0100 \cdot x2 + b0010 \cdot x3 + b0001 \cdot x4$$

【数2】

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a1000 & a0100 & a0010 & a0001 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ b1000 & b0100 & b0010 & b0001 \end{pmatrix}$$

この行列Aから2つの共役な複素固有値を導出することで、2つの振動モードの特徴を調べる請求項4に記載の電力系統の系統安定度監視システム。 20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、広域的な複数地点におけるデータ収集に基づきリアルタイムに電力系統の系統安定度を監視する方法及びシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

電力産業は現在2,000kW以上の大口需要家を対象として、市場が開放され、電力供給者を選択できるようになっている。2005年4月からは50kWまで自由化対象が拡大され、また、複数の電力会社をまたがった電力融通における託送料金が統一化されるため、遠隔地から大都市に向けた小売託送が活発化されることが予想されている。こうした中で、電力を送るための余裕量を的確に把握することが重要である。送電電力限界を決定する要因は、熱容量、系統安定度、電圧安定度などがある。これらの中で、系統安定度はシミュレーション上では検討できるものの、実系統における正確な状態を把握することは困難であった。 30

【0003】

電力系統の広域安定度は、主としてシミュレーションと電力系統安定度理論に基づき、予め余裕を持った値を計算によって算出しておき、この値を上限と設定する方法が取られてきた。この電力系統の広域安定度を求めるためには、系統安定度の中で支配的な長周期電力動揺の安定度余裕を把握することが必要となる。 40

【0004】

電力会社ではデータ収集システムを構築し、自系統の様子は緻密に把握しており、各電力会社の中央給電指令所がこの役割を担っている(例えば、<http://www.tmt-d.co.jp/work/ncs/se0.htm>、及び、<http://www.hts.co.jp/kansi.html>、参照。)。電力系統規模の拡大とともに、電源の容量増大、遠隔地化、偏在化およびこれに伴う送電線の長距離化、重潮流化が進む傾向にある。これらは系統の安定度特性を厳しくする方向に作用するため、系統故障時に発電機脱調から大規模電源脱落や広域停電への発展が懸念される(非特許文献1)。そのため系統の安定度を常時監視し、発電機脱調などを未然に予防、予測するオ 50

ンラインによる評価法は、機器を停止させることなく定常状態から機器のパラメータを推定できる点で有効である(非特許文献2)。特に近年においては、広範囲からデータを収集し、リアルタイムでシステム全体の動的振る舞いを把握することで、システム状態の変化に柔軟に対応できる広域的な制御が重視されており、これまで様々なオンラインによる系統監視手法が提案されてきた(非特許文献1)(非特許文献3)(非特許文献4)。

#### 【0005】

このような広域的なデータ収集に基づくリアルタイムの監視・制御を実現するためには、遠隔・多地点の情報量(位相角、線路潮流など)を同時刻で計測する必要がある(非特許文献5)。しかし、電力会社のエリアを超えた広域監視の例はない。特殊で大がかりな工事を伴うことなく系統状態の計測を行うことが求められる。

【非特許文献1】太田宏次・井上紀宏・伊藤久徳・福島宣夫・小俣和也・森田憲一・小海裕：「オンライン安定度計算による脱調未然防止システム(TSC)の開発」、電学論B、115, 1, pp.75 - 84 (1995 - 1)

【非特許文献2】J. A. Demcko, S. Pillutla, and A. Keyhani: "Measurement of Synchronous Generator Data from Digital Fault Recorders for Tracking of Parameters and Field Degradation Detection", Electric Power Systems Research 39, pp.205 - 213 (1996)

【非特許文献3】柳橋健・今井伸一・庄司寿哉・佐藤正弘・石原祐二：「リアルタイム測定データを用いた動揺推定と脱調予測法の開発」、電学論B、118,10, pp.1186 - 1193 (1998 - 10)

【非特許文献4】鈴木直人・檜山隆・船越節彦：「実時間FFTによる電力システム動揺モードのオンライン同定」、電学論B、120, 2, pp.134 - 140(2000 - 2)

【非特許文献5】齊藤浩海：「電力システムにおける同期計測技術の応用動向」、電学論B、119, 8/9, pp.897 - 900(1999 - 8/9)

【非特許文献6】水町守志：「ミニ特集GPS(衛星測位システム)技術と今後の展開」、計測と制御、36, 8, pp.533 - 562(1997 - 8)

【非特許文献7】今江理人：「全世界測位システム(GPS)とその応用」、電学論B、118, 3, pp.227 - 230(1998 - 3)

【非特許文献8】R. Tsukui, P. Beaumont, T. Tanaka and K. Sekiguchi: "Intranet-Based Protection and Control", IEEE Computer Applications in Power, pp.14 - 17(2001 - 4)

【非特許文献9】三谷康範・佐伯修・北條昌秀・鶴飼裕之：「多地点同期フェーズ量計測に基づく西日本60Hz系統の動特性オンライン観測システム」、電気学会電力技術電力系統技術研究会資料、PE - 02 - 60, PSE - 02 - 70 (2002 - 9)

【非特許文献10】The MathWorks: MATLAB Wavelet Toolbox, Wavelet Toolbox User's guide

【非特許文献11】小林一行：MATLAB ハンドブック、秀和システム(1998)

【非特許文献12】大澤靖治・杉原弘章：「多数の分散電源からなる電力系統の安定化制御に関する考察」、電気学会電力技術電力系統技術研究会資料、PE - 98 - 116, PSE - 98 - 106(1998)

【非特許文献13】富山克之・佐藤雅一・山地幸司・関田昌弘・後藤益雄：「交直並行送電系統における直流パワモジュレーションによる電力動揺抑制制御」、電学論B、117, 7, pp.938 - 944(1997 - 7)

【非特許文献14】垣本直人：「長距離くし形系統の内部共振による長周期動揺不安定性」、電学論B、115, 3, pp.219 - 226(1995 - 3)

【非特許文献15】渡邊政幸・三谷康範・辻毅一郎：「非線形連成振動モデルを用いた多機くし形系統におけるHopf分岐特性の解析」、電学論B、123, 12, pp.1454 - 1461(2003 - 12)

【非特許文献16】中地域技術研究連絡会・系統研究分科会、西日本研究連絡会：「60Hz連系系統における電力 - 周波数特性の実測」、電学論B、97, 1, pp.45 - 51 (1977 - 1)

10

20

30

40

50

【非特許文献17】小畑嘉造・平井信好・武田捷一：「小擾乱に対する電力系統の安定度判別手法の比較」，情報処理研究会資料，IP-78-69(1978)

【非特許文献18】電力系統モデル標準化調査専門委員会編：「電力系統の標準モデル」，電気学会技術報告第754号(1999)

【非特許文献19】I. J. Perez - Arriaga, G. C. Verghese and F. C. Scheweppe, " Selective modal analysis with applications to electric power system, Part 1: Heuristics Introduction", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 101, No.9, pp.3117 - 3125(1982 - 9)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

10

【0006】

そこで、本発明は、係る問題点を解決するために、遠隔・多地点の情報量を同時刻で計測して、広域的なデ-タ収集に基づくリアルタイムの監視・制御を実現することを目的としている。

【0007】

また、本発明は、電力取引所で系統安定度を把握したり、小売託送を行う事業者が系統安定度を把握することを容易にし、さらに、自家発電電力ネットワークを持つ事業者が安価な系統監視システムを構築することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0008】

20

本発明の電力系統の系統安定度監視方法は、広域的な複数地点におけるデ-タ収集に基づきリアルタイムに電力系統の系統安定度を監視する。広域的な複数地点のそれぞれにおいて、一般需要家が用いる商用電源コンセントの電圧からその位相を検出し、この位相情報に時刻情報を付加したデ-タを、ネットワークを介して、デ-タサーバに送出する。デ-タサーバは、複数地点からのデ-タを、継続的に取得して、収集し、この取得したデ-タに基づき、系統の動揺成分を抽出し、抽出した動揺成分に基づき系統の安定度を判別する。

【0009】

また、本発明の電力系統の系統安定度監視システムは、広域的な複数地点のそれぞれにおいて、一般需要家が用いる商用電源コンセントの電圧からその位相を検出し、この位相情報に時刻情報を付加したデ-タを送出する位相計測装置と、複数地点からのデ-タを、ネットワークを介して、継続的に取得して、収集するデ-タサーバと、このデ-タサーバが取得したデ-タに基づき、系統の動揺成分を抽出する手段と、抽出した動揺成分に基づき系統の安定度を判別する手段と、を備える。

30

【0010】

抽出される動揺成分は、系統内で発生する最も周期が長い第1モードと次に周期が長い第2モードの動揺成分である。安定度の判別は、第1と第2の2つのモード間に働く相互作用を考慮した2自由度系振動モデルを適用し、第1と第2モードの動揺成分から予め用意した連成振動モデルの係数を同定し、その結果から固有値を計算することにより行う。この連成振動モデルは、後述する(3)~(7)式のモデル式で表され、その行列Aから

40

【発明の効果】

【0011】

本発明によれば、需要家コンセント電圧100Vを用いて計測を行い、各地から時刻情報を持ったデ-タを集めて、信号処理によって広域電力系統の安定度余裕を算出することが可能となる。需要家コンセントを用いるために、特別な工事が不要であり、情報ネットワークを介して集めたデ-タの解析技術により監視が可能になった。

【0012】

また、電力取引所で系統安定度を把握したり、小売託送を行う事業者が系統安定度を把握することによって、自家発電電力ネットワークを持つ事業者が安価な系統監視システム

50

を構築することが可能となる。

【0013】

さらに、本発明の適用による事故発生防止への適用を図ることができると共に、広域の停電波及の解明をすることが可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0014】

以下、例示に基づき、本発明を説明する。図1は、本発明を具体化する概略システム構成を例示する図である。位相計測装置は、広域的な複数地点で、同時刻に、位相（及び周波数）を検出する。広域的なデータ収集に基づくリアルタイムの監視・制御を実現するために、遠隔・多地点の位相及び周波数情報を同時刻で計測する必要がある。このために、例えば、GPS(Global Positioning System)（非特許文献6）（非特許文献7）を用いた時刻同期機能を持つ位相計測装置（例えば、（株）東芝製のNCT2000 Type-A：非特許文献8）のような装置を、各地点に設置する。計測されるべき電圧としては、一般需要家が用いる商用電源（100V）コンセントの電圧を用いる。これによって、特殊で大がかりな工事を伴うことなく系統状態の計測が可能となる。

10

【0015】

電圧フェーザ演算は電圧正弦波1周期あたり96サンプルのデータ $V_k$ 、 $k = 1, 2, \dots$ 、96を用い、

【0016】

【数1】

$$\dot{V} = \frac{\sqrt{2}}{96} \left\{ \sum_{k=1}^{96} V_k \sin k\theta + j \sum_{k=1}^{96} V_k \cos k\theta \right\} \quad (1)$$

20

【0017】

を計算し、式(1)の結果を用いて、

【0018】

【数2】

$$\theta_v = \tan^{-1} \left\{ \frac{\Im\{\dot{V}\}}{\Re\{\dot{V}\}} \right\} \quad (2)$$

30

【0019】

を計算することによって位相を求めることができる。また位相を微分することで周波数データに変換することができる。

【0020】

各地点で同時刻に計測された位相及び周波数データは、インタネットのようなネットワークを介してデータサーバで、継続的に取得される。計測のサンプリング点数としては、系統内に見られる1~2Hz程度の電力の動揺を観測でき、かつ“分”のオーダーの周波数変動も観測できる、できるだけ連続したデータを獲得する、といった条件を満たす必要がある。例えば、2/60秒の周期でデータをサンプリングし、各地の位相データを継続的に取得する。

40

【0021】

次に、取得したデータに基づき、系統の動揺成分を検出する。これは、揺らぎデータにウェーブレット変換を施すことにより系統の動揺成分を抽出する。例えば、西日本60Hz系統での系統擾乱発生時の動揺波形において、くし形系統で発生する最も周期が長い第1モード（長周期動揺）と次に周期が長い第2モードを検出する。

【0022】

このことより0.5~0.8Hzに存在する動揺は、くし形系統で最も周波数の低い長周期動

50

揺よりも周波数が高く、系統の両端が中央に対して同方向に動揺していることから、系統の中央と両端が互いに逆位相に動揺する第2モード(非特許文献12)であると考えられる。

#### 【0023】

次に、この検出した長周期動揺に基づき、安定度を判別する。電力動揺の特徴は、第1と第2の2つのモード間には相互作用が働くモデルであることを考慮した2自由度系振動モデルを適用することで調べることができる。抽出した系統動揺データから予め用意した連成振動モデルの係数を同定し、その結果から固有値を計算し、安定度を監視することができる。2自由度系振動モデルを構築することによって、定常状態からでも電力動揺の特性係数を固有値により算出することができる。

10

#### 【実施例】

#### 【0024】

上述のGPS(Global Positioning System)を用いた時刻同期機能を持つ位相計測装置(株)東芝製のNCT2000 Type-Aを日本の各地の大学に設置した。設置した位相計測装置(Phasor Measurement Unit、PMU)の設置箇所を図2に示す。西日本60Hz系統に8箇所、東日本50Hz系統に2箇所、PMUを設置している。計測のサンプリング点数としては、毎時50分から10分ならびに20分から40分に2/60秒の周期でデータをサンプリングし、各地の位相データを継続的に取得している。毎時10分から20分ならびに40分から50分は各計測器に蓄積されたデータをサーバに収集するための時間として設けており、各地のデータはインターネットを経由して九州工業大学、名古屋工業大学のデータサーバに継続的に取得されている。

20

#### 【0025】

(西日本60Hz系統における系統擾乱発生時の電力動揺特性)

図3に2003年8月24日18時50分から19時10分の九州工業大学の周波数変動を示す。この日の19時2分頃、福岡県北九州市近郊の苅田にある火力発電所の発電機(34.7万kWで運転中)が、機器の異常発生のために緊急停止した(九州電力ホームページプレスリリースより)。この停止は発電機の定期検査などのあらかじめ予期されていた停止と異なり不測の事態であったため、時刻約758秒において系統周波数が急激に低下していることが確認できる。

#### 【0026】

まず大局的な周波数変動を調べるため、各地域の周波数変動データに対してSymlet型マザ-Wavelet関数を用いた離散ウェーブレット変換による周波数分解を行った。ウェーブレット変換は1つの信号にオリジナル(マザ-)ウェーブレットのシフト及びスケリングすることで、任意の波形の局所的な特性に分解して表現することが可能である(非特許文献10)。

30

#### 【0027】

図4に0.8Hz以下の周波数成分を抽出し、比較したものを示す。この図より時刻約758秒を経過した時点で、発電機停止による周波数低下の影響が最初に九州工業大学に現れており、その後各地の周波数が大きく変動し電力動揺が発生していることが確認できる。そこでこの電力動揺を抽出するため、徳島大学を基準とした場合の各大学の位相差情報から離散ウェーブレット変換により0.2~0.8(Hz)の動揺成分を抽出し、比較したものを図5に示す。この図より系統擾乱発生後、電力動揺モードが顕著に現れていることが確認できる。

40

#### 【0028】

この動揺成分の特徴を調べるために、事故直後である時刻758秒から150秒間の宮崎大学-名古屋工業大学、宮崎大学-徳島大学の位相差情報(0.2~0.8Hz)に対してFFT解析を行い、その周波数成分を調べた結果を図6に示す。図6(a)より、系統の両端付近に位置する2大学の位相差情報には約0.4Hzの動揺成分が顕著に現れている。また図6(b)より、系統の両端と中央付近に位置する2大学の位相差情報には、約0.4Hzの他に0.5Hz以上の周波数領域に動揺成分が確認できる。

50

## 【0029】

そこで宮崎大学 - 徳島大学、名古屋工業大学 - 徳島大学間の0.2~0.8Hzの位相差情報を0.5Hzを境界とする成分に分離するため、20分間の位相差データを小区間(200秒間隔)に分割し、各小区間は定常であると仮定することでFFTによるフィルタリング処理を試みた。FFTによるフィルタは、FFT処理をした後その周波数に対応した箇所のみを取り出し、不必要な周波数領域に0のデータを入れてもう一度逆FFT処理を施し、実数部のみを取り出す方法で、不必要な周波数成分を完全にカットした時間応答波形が得られる。

## 【0030】

またこの方法での周波数カットでは、除去しない周波数帯域の位相情報もそのまま保存される(非特許文献11)。この方法を用いて名古屋工業大学 - 徳島大学、宮崎大学 - 徳島大学間の位相差情報から0.2~0.5Hzの動揺成分を抽出し、比較したものを図7に、0.5~0.8Hzの動揺成分を図8に示す。図7の動揺成分の特徴としては、系統の両端が互いに逆位相に動揺していることが分かる。くし形系統のモード解析においては、各モードにおける固有ベクトルの要素のうち、発電機の角速度偏差または位相角に対応する要素はそれぞれ位相が0°か180°であるので、両端が自由な弦振動になる。特に最も周期の長い動揺モードは系統両端で逆位相に動揺するモードである(非特許文献12)。以上のことより、図7の動揺成分は系統全体で現れる第1モード(長周期動揺)であることが分かる。また図8より、0.5~0.8Hzに含まれる動揺波形は系統の両端が互いに同位相に動揺する傾向があることが分かる。

10

## 【0031】

このことより0.5~0.8Hzに存在する動揺は、くし形系統で最も周波数の低い長周期動揺よりも周波数が高く、系統の両端が中央に対して同方向に動揺していることから、系統の中央と両端が互いに逆位相に動揺する第2モード(非特許文献12)であると考えられる。

20

## 【0032】

発電機停止約1時間後の2003年8月24日19時50分~20時10分における名古屋工業大学 - 徳島大学、宮崎大学 - 徳島大学間の位相差情報から0.2~0.5Hzの動揺成分を抽出し、比較したものを図9に、0.5~0.8Hzの動揺成分を図10に示す。これらの図より、定常状態のような負荷の微小変動時においても、0.2~0.8Hzの周波数領域においては2つの動揺モードが支配的であることが分かる。

30

## 【0033】

(2自由度系振動モデルの構築)

系統全体で発生する第1モード(長周期動揺)は系統両端の発電機群が関連するモードであり、系統が左右に分かれて動揺し、中央が節となる。第2モードは系統中央と両端の発電機群が関連しており(非特許文献13)、系統の中央と両端が動揺し、節の数は2である(非特許文献14)。またこれらの動揺成分は、0.2~0.8Hzの周波数領域に含まれていることが上述のことより明らかとなった。そこで、この2つのモード間には相互作用が働く連成モデルであることを考慮した(非特許文献15)、2自由度系振動モデルを考える。名古屋工業大学 - 宮崎大学間の位相差情報から、離散ウェーブレット変換により抽出された0.2~0.8Hzの動揺成分を $x_1$ 、その1階微分を $x_2$ 、徳島大学 - 宮崎大学間の位相差(0.2~0.8Hz)を $x_3$ 、その1階微分を $x_4$ とするとモデル式は以下のように示すことができる。 $X_1 \sim X_4$ は、それぞれ $x_1 \sim x_4$ の微分を示している。

40

## 【0034】

$$X_1 = x_2 \quad (3)$$

$$X_2 = a_{1000} \cdot x_1 + a_{0100} \cdot x_2 + a_{0010} \cdot x_3 + a_{0001} \cdot x_4 \quad (4)$$

$$X_3 = x_4 \quad (5)$$

$$X_4 = b_{1000} \cdot x_1 + b_{0100} \cdot x_2 + b_{0010} \cdot x_3 + b_{0001} \cdot x_4 \quad (6)$$

位相計測によって直接観測される信号は $x_1$ 、 $x_3$ である。これらを微分すると $X_1$ 、 $X_3$ すなわち、 $x_2$ 、 $x_4$ が得られる。さらに $x_2$ 、 $x_4$ を微分して $X_2$ 、 $X_4$ が得られると $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ の時間データすべてが得られる。

50



(3) ~ (6) 式における線形部は

【 0 0 3 5 】

【 数 3 】

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{1000} & a_{0100} & a_{0010} & a_{0001} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ b_{1000} & b_{0100} & b_{0010} & b_{0001} \end{pmatrix} \quad (7)$$

10

【 0 0 3 6 】

である。最小二乗法を用いて(3) ~ (6) 式より行列A を求め、この行列A から2 つの共役な複素固有値を導出することで、2 つの振動モードの特徴を調べることができる。

【 0 0 3 7 】

なお、不安定モードとして第1モードと第2モードを有する場合を例として説明したが、不安定モードの数が2よりも多い場合にはモデルを拡張して同じ形の多次数のモデルを用いれば、式(3), (4), (5), (6)を拡張しただけで同じ理論展開が可能となる。

【 0 0 3 8 】

( WEST30 機系統を対象とした解析例 )

図1-1 に示す電気学会WEST30 機系統モデル(非特許文献18) を用いて、位相差の揺らぎ情報から2自由度系振動モデルの評価を行った。潮流条件としては昼間断面潮流を設定し、負荷特性は定電流特性とした。この時、図1-2 に示すような負荷を微小変動させることでおこる位相差の揺らぎ情報を用いて、2自由度系振動モデルを評価した。負荷変動の箇所として負荷が大きい上位3箇所を選定している。また2自由度系振動モデルを用いた解析を行うために、寄与率(19)を用いて2つの不安定モードに対して寄与の大きい発電機を選定した。

20

【 0 0 3 9 】

その結果、第1モードに最も寄与する発電機はG1 とG20、第2モードに最も寄与する発電機はG1、G9、G20 であり、G20 を基準として発電機G1、G9 の2機の発電機について2自由度系振動モデルを構成した。なお、解析には汎用の電力系統シミュレーションソフトウェアEUROSTAG を用いた。

30

【 0 0 4 0 】

図1-2 の負荷変動により生じる位相差の揺らぎ情報を(3) ~ (6) 式のモデルに適用することで導出した固有値と、WEST30 機系統モデルの固有値を比較したものを図1-3 に示す。なおWEST30 機系統モデルの固有値は、EUROSTAGの固有値計算機能を用いて求め、周期の長いものから順に第1モード、第2モードとしている。図1-3 より、2自由度系振動モデルから求められた固有値と、WEST30 機系統モデルの固有値が近似な値を示していることが分かる。

【 0 0 4 1 】

( 電力動揺の特性係数の同定 )

2003年8月24日18時50分 ~ 19時10分の名古屋工業大学 - 宮崎大学、徳島大学 - 宮崎大学の位相差情報を(3) ~ (6)式に適用し固有値を導出した。この時、デ - タ長(時間)を変化させながら固有値を求めた結果を図1-5、図1-6 に示す。図1-5 は固有値の実部を示しており、固有値実部の正負によって安定、不安定の判別が可能であり、その大きさによって安定の度合いが分かる。また図1-6 は固有値の虚部を示しており、動揺の固有角周波数に相当する。図1-5、図1-6 よりデ - タ長が約200秒でほぼ一定値に達していることが分かる。

40

【 0 0 4 2 】

そこで200秒間は定常状態であると考え、200秒おきに固有値を導出した結果を図1-4 に示す。この図1-4 から、各値がほぼ一定に算出されており、また固有値の虚部にあたる

50

固有角周波数 ( $2.5(\text{rad/s}) \approx 0.4(\text{Hz})$ 、 $3.4(\text{rad/s}) \approx 0.54(\text{Hz})$ ) と図 6 (b) の FFT による周波数特性が一致していることも確認できる。この時の最小二乗法により求められた係数の精度を調べるため、(4) 式の左辺にある  $X_2$  ( $x_1$  の 2 階微分値) と右辺の各係数と各位相差の積の総和を比較したものを図 17 に、(6) 式の  $X_4$  ( $x_3$  の 2 階微分値) と右辺の各係数と各位相差の積の総和を比較したものを図 18 に示す。これらの図より、それぞれの変動傾向が非常によく一致しており、最小二乗法により適切に係数が導出されていることが分かる。

#### 【0043】

図 19、図 20 に夏季 (2003 年 8 月 23 日 ~ 8 月 29 日) と秋季 (2003 年 10 月 11 日 ~ 10 月 17 日) における第 1 モードと第 2 モードの固有値の変動を示す。図 19 は固有値の実部、図 20 は固有値の虚部を示している。図 19 より、第 1 モードは電力需要の増加と共に安定度は低下し、午後にピークを迎え、深夜から明け方の負荷が少ない時間帯には安定度が回復する様子が確認できる。また休日においては、土曜日と比較して日曜日の方が変動は小さく安定していることが分かる。第 2 モードは休日には大きな変化が見られないが、平日には第 1 モードと同じく、負荷が大きな時間帯に安定度の低下が観測される。季節による違いを比較した場合、第 1 モードは電力需要が多い夏期においては比較的負荷が軽い秋期と比較して、全体的に安定度が低下していることが確認できる。

#### 【0044】

図 20 より、第 1 モード、第 2 モード共に電力需要が多く、接続している発電機の総容量が大きい時には周期が長くなり、電力需要の少ないときには周期が短くなる特性 (非特許文献 16) が現れている。これは第 1 モード、第 2 モードが系統間の慣性の動揺であり、電力需要が多い、すなわち接続されている同期機の数が多くなることにより等価的な慣性が大きくなり、その結果動揺周期が長くなる特性 (非特許文献 17) を示していると考えられる。

#### 【0045】

2002 年 12 月 29 日から 2003 年 1 月 4 日までの、第 1 モードと第 2 モードの固有値の実部を図 21 に、固有値の虚部を図 22 に示す。これらの図より、普段と比較して電力需要が少なく負荷変動が小さい年末年始には、一日を通して平坦な特性が得られていることが分かる。

#### 【0046】

以上のように、西日本 60Hz 系統で発生する電力動揺 (第 1 モード、第 2 モード) に対し、2 自由度系振動モデルを適用することで電力動揺の特徴を調べた。解析結果より、適用モデルの係数行列の固有値から電力動揺の特性係数を求めることができた。電力動揺の特性係数の抽出は、電力系統の安定度をモニタリングする手段の 1 つとして適用できると考えられる。以上の方法を用いることで、弱減衰性の第 1 モード (長周期動揺) とその第 1 モードとモード間の相互作用を生じる第 2 モードの安定度監視が可能であると考えられる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0047】

【図 1】本発明を具体化する概略システム構成を例示する図である。

【図 2】PMU の配置を示す図である。

【図 3】九州工業大学の周波数変動を示す図である。

【図 4】各地の周波数変動を示す図である。

【図 5】各地の電力動揺を示す図である。

【図 6】電力動揺波形に対する FFT 解析を示す図である。

【図 7】第 1 モードの動揺波形を示す図である。

【図 8】第 2 モードの動揺波形を示す図である。

【図 9】第 1 モードの動揺波形を示す図である。

【図 10】第 2 モードの動揺波形を示す図である。

【図 11】WEST30 機系統モデルを示す図である。

10

20

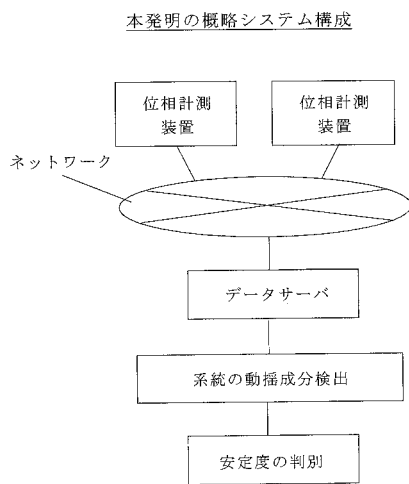
30

40

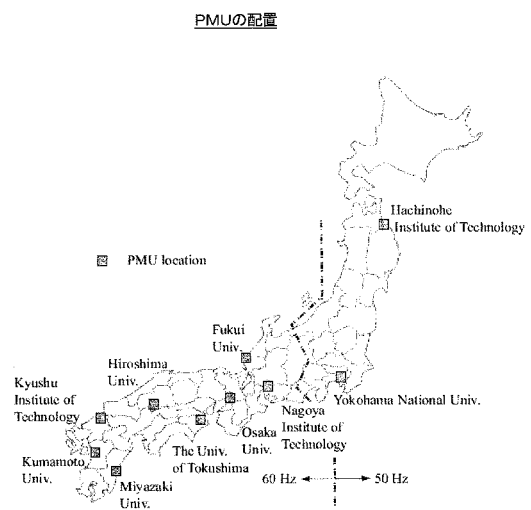
50

- 【図12】 負荷変動を表す表である。
- 【図13】 固有値の比較を表す表である。
- 【図14】 第1モードおよび第2モードの固有値を表す表である。
- 【図15】 固有値の評価を示す図である。
- 【図16】 固有値の評価を示す図である。
- 【図17】 X2と推定値の比較を示す図である。
- 【図18】 X4と推定値の比較を示す図である。
- 【図19】 第1モードと第2モードの実部を示す図である。
- 【図20】 第1モードと第2モードの虚部を示す図である。
- 【図21】 第1モードと第2モードの実部を示す図である。
- 【図22】 第1モードと第2モードの虚部を示す図である。

【図1】

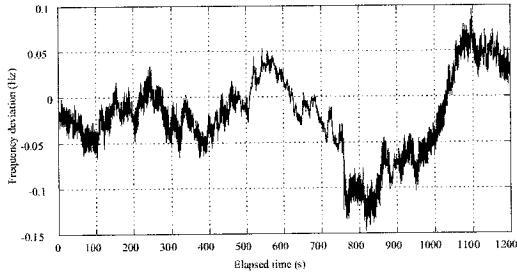


【図2】



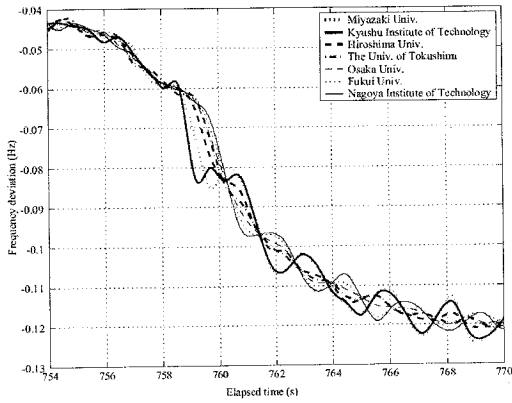
【 図 3 】

九州工業大学の周波数変動



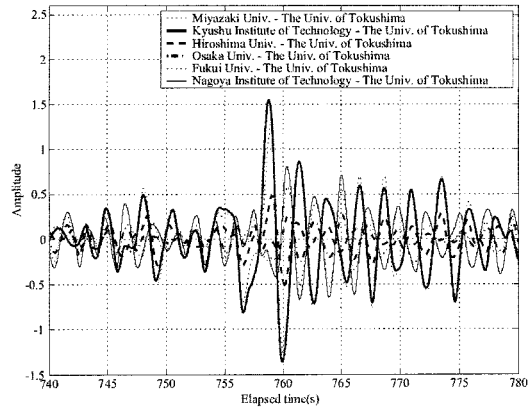
【 図 4 】

各地の周波数変動



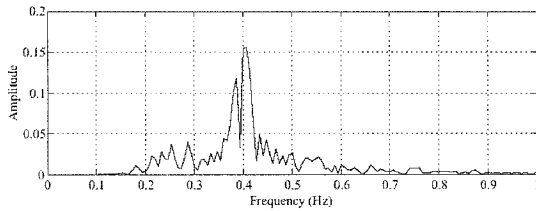
【 図 5 】

各地の電力動揺

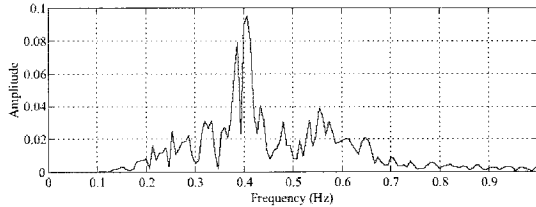


【 図 6 】

電力動揺波形に対するFFT解析



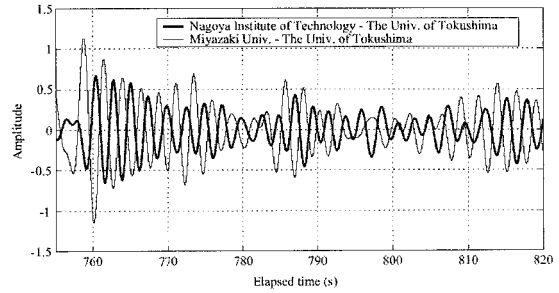
(a) Miyazaki University - Nagoya Institute of Technology



(b) Miyazaki University - The University of Tokushima

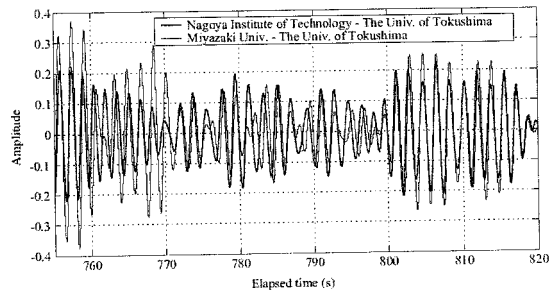
【 図 7 】

第1モードの動揺波形

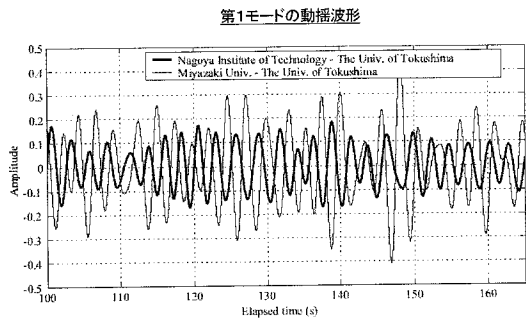


【 図 8 】

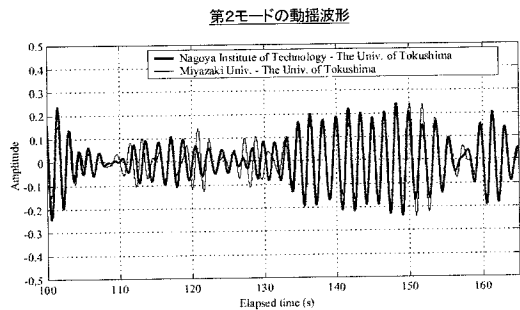
第2モードの動揺波形



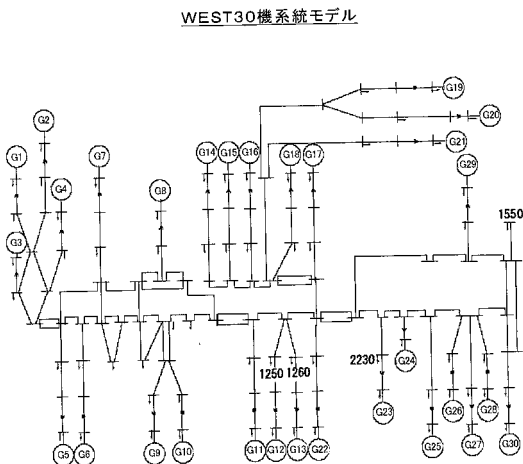
【 図 9 】



【 図 10 】



【 図 11 】



【 図 12 】

負荷変動

elapsed time(s)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
node	2230	2230	1250	1250	2230	2230	1260	1260	2230	2230
load variation(%)	0.1 ↑	0.1 ↓	0.1 ↑	0.1 ↓	0.1 ↑	0.1 ↓	0.1 ↑	0.1 ↓	0.1 ↑	0.1 ↓

【 図 13 】

固有値の比較

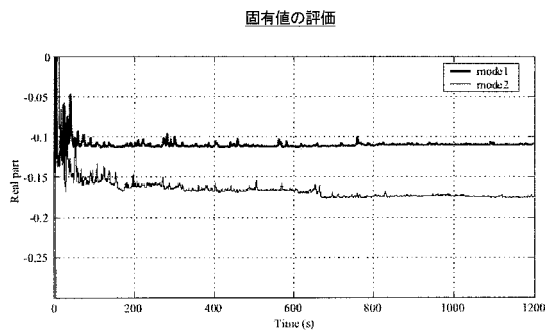
	WEST30	two degree of freedom model
mode1	-0.02±j1.69	-0.03±j1.72
mode2	-0.08±j3.81	-0.08±j3.74

【 図 14 】

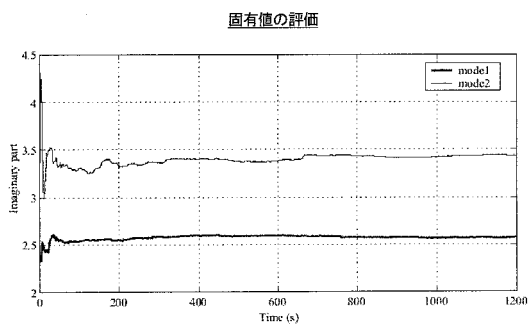
第1モードおよび第2モードの固有値

elapsed time(s)	mode1	mode2
0~200	-0.11±j2.54	-0.16±j3.35
200~400	-0.11±j2.62	-0.17±j3.40
400~600	-0.11±j2.59	-0.16±j3.45
600~800	-0.11±j2.52	-0.17±j3.49
800~1000	-0.11±j2.52	-0.17±j3.42
1000~1200	-0.11±j2.60	-0.17±j3.50

【 図 15 】

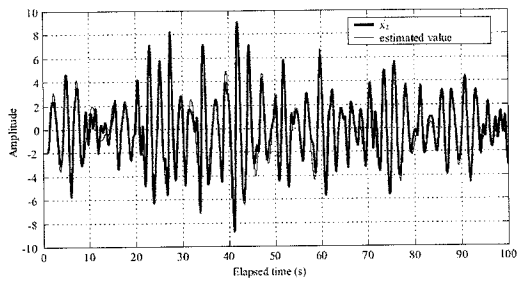


【 図 16 】



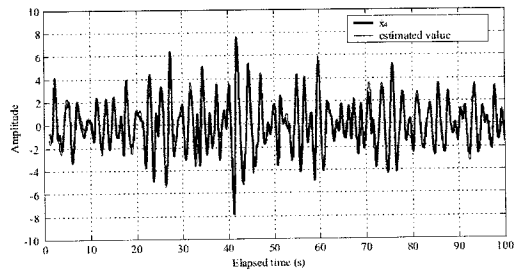
【 図 17 】

$X_2$  と推定値の比較



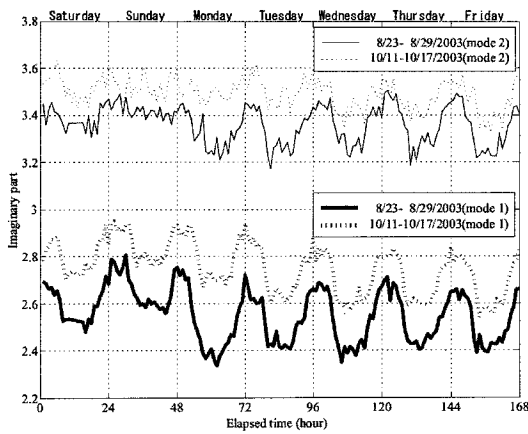
【 図 18 】

$X_4$  と推定値の比較



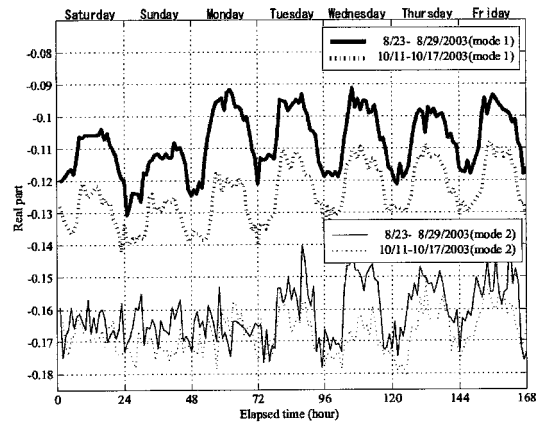
【 図 20 】

第1モードと第2モードの虚部



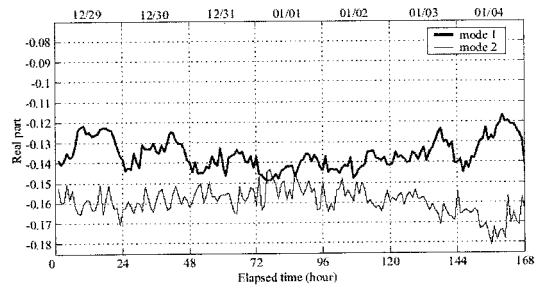
【 図 19 】

第1モードと第2モードの実部



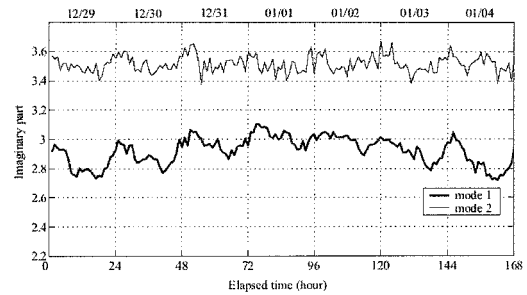
【 図 21 】

第1モードと第2モードの実部



【 図 22 】

第1モードと第2モードの虚部



---

フロントページの続き

(72)発明者 辻 毅一郎

大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内

(72)発明者 橋口 卓平

大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内

Fターム(参考) 5G064 AA04 AB05 AC03 BA07 DA03

5G066 AA09 AE07 AE09