

電力システムの実時間広域安定度評価に関する研究

2002年3月

熊本大学大学院自然科学研究科

鈴木 直人

目次

第1章 序章	… 1
1.1. 本研究の背景と目的	… 1
1.2. 本論文の内容	… 3
第2章 電力システムにおける動揺様相	… 5
2.1. はじめに	… 5
2.2. 対象とする電力システムの構成および観測点	… 5
2.3. PQVf 観測装置の概要	… 6
2.4. 代表的な観測波形の例	… 7
2.5. PQVf の変動様相	… 8
2.5.1. 日間推移	… 8
2.5.2. 季節による変動様相の相違	… 10
2.5.3. 負荷状態による変動様相の相違	… 11
2.6. PV、Pf 特性	… 14
2.7. 高速フーリエ変換 (FFT) による動揺モードの抽出	… 19
2.8. 有効電力 P に対する FFT 解析	… 23
2.8.1. 動揺モードの日間変動	… 24
2.8.2. 動揺モードの季節による相違	… 25
2.8.3. 動揺モードの負荷状態による相違	… 25
2.8.4. 動揺モードの観測点による相違	… 26
2.9. まとめ	… 27
第3章 ニューラルネットワークによる電力システム動特性の表現	… 31
3.1. はじめに	… 31
3.2. ニューロンのモデル	… 31
3.3. ニューラルネットモデルと学習方法	… 32
3.3.1. フィードバック型ニューラルネットモデル	… 33
3.3.2. Elman ニューラルネットモデル	… 35
3.4. モデルの精度	… 36
3.5. まとめ	… 40

第4章 時間領域における実時間安定度評価手法	… 42
4.1. はじめに	… 42
4.2. 3点比較頂点探索法による安定度評価手法	… 42
4.3. 計算機シミュレーションによる提案手法の有効性の検討	… 46
4.4. アナログシミュレータを用いた動揺モード評価試験	… 47
4.5. アナログシミュレータ試験による提案手法の有効性の検討	… 48
4.6. 実時間3点比較頂点探索法の設計	… 51
4.7. まとめ	… 54
第5章 周波数領域における実時間安定度評価手法	… 55
5.1. はじめに	… 55
5.2. 実電力システムでの変動様相	… 55
5.3. Real Time FFTによる安定度評価手法	… 57
5.4. 系統幹線における動揺モードのオンライン同定	… 63
5.5. 電力システム動揺モードのコヒーレンシ解析	… 67
5.6. まとめ	… 77
第6章 固有値ベースの実時間安定度評価手法	… 79
6.1. はじめに	… 79
6.2. 固有値解析を用いた安定度評価手法	… 79
6.3. 計算機シミュレーションによる提案手法の有効性の検討	… 82
6.4. アナログシミュレータ試験による提案手法の有効性の検討	… 86
6.5. 固有周波数ならびに減衰定数の測定	… 87
6.6. 固有値解析の次数の設定	… 90
6.7. 固有値解析結果	… 93
6.8. 実時間固有値解析の設計	… 95
6.9. マルチエージェントシステム (Multi-Agent System)	… 101
6.10. まとめ	… 103
第7章 総括	… 105
参考文献	… 111
謝辞	… 113

第 1 章 序章

1.1. 本研究の背景と目的

電気エネルギーは国民生活および産業活動に欠くことの出来ないエネルギーであり、生活の快適指向の高まりや社会の高度情報化が進むにつれてその重要性はますます高まってきた。

近年、規制緩和と競争原理の導入などによる構造改革があらゆる分野で進められてきており、電気事業についても 1995 年 12 月の電気事業法の改正により発電市場への競争原理が導入され、御供給電力に関する入札（火力電源の一部入札）や自己託送サービスによる送電線の一部開放が行われている。更に、2000 年 3 月には「部分自由化」を柱とする新電気事業法が施行され、独立電気事業者（IPP: Independent Power Producer）の参入による電力小売市場の部分自由化がスタートし、電力供給市場での本格的な競争が始まっている。

また、地球環境に深刻な影響をおよぼす恐れのある気候変動に対しては、国際的な対応が高まる中、地球温暖化の原因となる二酸化炭素（ CO_2 ）、メタン（ CH_4 ）、亜酸化窒素（ N_2O ）、フロンなどの温室効果ガスの排出規制は年々厳しくなってきた。「日本エネルギー経済研究所」のまとめによると、2100 年のエネルギー需要（最終エネルギー）は 1990 年の 7 倍にあたる 340 億トン（石油換算）に達するとされ、それに伴う二酸化炭素排出量は 280 億トンと見られている。つまり、今よりもなお地球温暖化の原因となる温室効果ガスの排出規制が厳しくなるとされれば、 CO_2 を排出する化石エネルギーによる発電は厳しくなり、それにより発電予備力が殆ど見込めない状態での運用は避けられない状態となってくる。

電力システムの運用は、経済性と信頼性を考慮して広域にわたり連系されている。このような大規模かつ複雑化された電力システムにおいて、安定かつ高品質で不断な電気エネルギー（周波数・電圧の変動が少なく、停電が少ない電気エネルギー）の供給のためには、電力システムの安定度を向上させることが非常に重要となっている。しかしながら、大容量

電源の偏在化や負荷の大都市集中化等の安定度の悪化要因が顕在化し、一方では電気事業の自由化や規制緩和に伴う各種分散電源の電力市場への参入、また地球温暖化の原因となる温室効果ガスの排出規制に伴う地球環境問題により、電力システムは厳しい状況下での運用が避けられない状況にある。このような状況のもとで電力供給信頼度を確保するためには、時々刻々と変動している電力システムの状態を正確に把握し、電力システムが不安定方向へ移行しつつある場合は、電力システムの安定性を維持するための予防制御が必要となっており、電力システムの実時間安定度評価は電力システムの安定運用のために重要な課題の一つとなっている。

電力システムの安定度は、「電力システム内の各要素が微小なじょう乱に対して平衡状態を維持しうる能力、あるいは何らかの原因で一度この平衡状態が大きく崩れた場合には再び平衡状態に回復しうる能力」と解釈でき、それぞれ定態安定度、過渡安定度と分類されている。そして、安定度を解析する場合には、定態安定度に関して動態不安定になる場合を、過渡安定度に関して事故後複数波で脱調に至る場合を想定して検討を行っている。またこれらの安定度に関して、これまで電力システムの安定度解析は、着目する電力システムの運用状態が安定か不安定かの判別を行う事を主とした問題として、安定さの度合（安定限界にどの程度近いかな）を数量的に示す事にはあまり注意を払ってきていない。しかしながら現実を考えると、確かに現在の状態が安定か不安定かを知ることが重要な事なのではあるが、安定度のオンライン監視、安定度を加味した制御や電力システムの計画などのためには、少しでも早く安定度を把握する必要があり安定度余裕指標の確立は不可欠である。これまで、安定さの度合を示す指標としては、 $M_p = (P_{max} - P) / P$ や $M_\delta = \max(\delta_i - \delta_j)$ が利用されてきている。ここで、 P は着目する運用状態での電力、 P_{max} は安定限界極限電力、 δ_i は内部位相角である。これらの指標は表現が簡単で計算も容易であるという利点を有するが、特に対象とする電力システムが大規模・複雑化した際においては、安定さの度合を正確に表現しているとはいえない難いと言う欠点を持っている。

そこでこの欠点を補う手段として、パターン認識法が提案されている。この手法は電力システムの通常の運用状態において観測される諸量（例えば電圧の大きさや位相角、電力潮流など）のうち、安定度に特に関連する観測量により定義される判別式の値の正負により、安定度を判別しようとするものである。その際、安定な場合と不安定な場合とを含むあらかじめ用意された多数の代表的な電力システムの運用状態に対して安定度評価のための評価関数をオフラインの準備計算により決定している。ただし、この場合においても、安定度に特に影響の大きな変数（特徴変数）、学習のために用意する運用状態の選択方法、判別式の精度（オンライン安定度評価の的中率）といった点でまだ問題が残っている。

そこで本論文では、まず実電力システムで観測される有効電力・無効電力・系統電圧・周波数の実測データを基にして、実電力システムで観測される動揺様相について明らかにし、電力システムの実時間安定度評価に関して幾つかの全く新しい独自の手法を提案している。

1.2. 本論文の内容

本論文の構成は7章からなっている。以下に各章の内容についての要約を述べる。

第1章は序章として、本研究に関わる電力システムの広域安定度評価に関する歴史的背景について概略を述べ、広域安定度評価手法の現在の研究状況および抱えている問題点についてまとめ、本研究の目的を示した。

第2章では、実電力システムで観測される有効電力、無効電力、系統電圧、周波数の時間領域および周波数領域での変動様相について詳細に検討を行い、実時間安定度評価で対象とするデータの選定を行っている。また、同時に観測点および観測装置の概要についても述べている。更に、PV特性およびPf特性から勾配 dV/dP および df/dP を算出し、その結果より安定度を評価する手法を提案している。

第3章では、フィードバック型ニューラルネットワーク・Elmanニューラルネットワークという2つのニューラルネットワークを用いて、有

効電力（ P ）および系統電圧（ V ）を参照して、 PV の動特性を表現する方法を提案している。

第 4 章では、電力システムにて観測される有効電力変動を観測値とした時間領域における実時間安定度評価手法を提案し、計算機シミュレーションによる安定度評価試験、アナログシミュレータを用いた実時間安定度評価試験などにより、系統事故後の過渡安定度評価方式として適した方式であることを明らかにした。

第 5 章では、同じく有効電力変動を観測値とした周波数領域での実時間安定度評価手法を提案し、計算機シミュレーションによる安定度評価試験、アナログシミュレータを用いた実時間安定度評価試験により、背景動揺を含めた安定度評価方式としての有用性を明らかにしている。

第 6 章では、電力システムにて観測される有効電力変動により同定される低次等価モデルに対する固有値解析を基にした実時間安定度評価手法を提案し、計算機シミュレーションによる安定度評価試験、アナログシミュレータを用いた実時間安定度評価試験により、背景動揺を対象とした安定度評価方式としての有用性を明らかにしている。

第 7 章は総括として、本研究で得られた成果をまとめるとともに、今後の展望について述べている。

第 2 章 電力システムにおける動揺様相

2.1. はじめに

電力システムは電力需要の増大に伴い広域にわたり連系され、大規模複雑化してきている。また、地球環境問題、電力小売自由化を背景として、発電設備の増強が遅れる傾向にあり電力システムは低い安定度マージンでの運用が避けられない状況となっている。このような状況のもとで電力供給信頼度を確保するためには、時々刻々と変動している電力システムの状態を正確に把握し、電力システムが不安定方向へ移行しつつある場合は、電力システムの安定性を維持するための予防制御が必要となっており、電力システムの実時間安定度評価は電力システムの安定運用のために重要な課題の一つとなっている。

本章では、実電力システムでの有効電力・無効電力・系統電圧・周波数の実測データを基にして、実電力システムで観測される動揺様相について明らかにしている。

2.2. 対象とする電力システムの構成および観測点

現在、図 2.1 に示す電力システムでは、電力システム全系の動揺様相を明確にするための試みとして、図における各黒丸の点、つまり各 500kV 系統変電所にて、有効電力 (P)・無効電力 (Q)・系統電圧 (V)・周波数 (f) の実モニタリングが行われている。また、図中の実線はそれぞれ送電線を示している。図に示す各幹線および連系線における 1999 年 3 月 23 日 12 時から 1999 年 3 月 24 日 12 時まで (春季) と、1999 年 10 月 14 日 0 時から 24 時まで (秋季) の 2 日間の実測データを基にして、種々の検討を行っている。

なお、系統変電所に設置された計測器には、同期計測装置 (GPS: Ground Positioning System) が備わっておらず、そのため計測を行うために計測前にデータの収録用コンピュータの内部時計の調整が行われているものの、調整後に各計測器の内部時計にずれが生じ、実測データ間で完全に同期が取れる状態には至っていない。

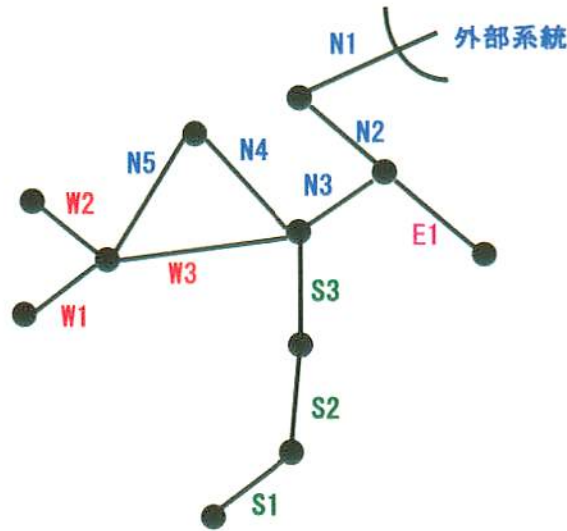


図 2.1 例題系統

2.3. PQVf 観測装置の概要

図 2.1 に示す実電力システムで観測される動揺モードについて明らかにするため、各 500kV 系統変電所には、それぞれ観測装置が設置されており、有効電力 (P)・無効電力 (Q)・系統電圧 (V)・周波数 (f) の実モニタリングが行われている。この観測装置の基本構成を図 2.2 に示す。

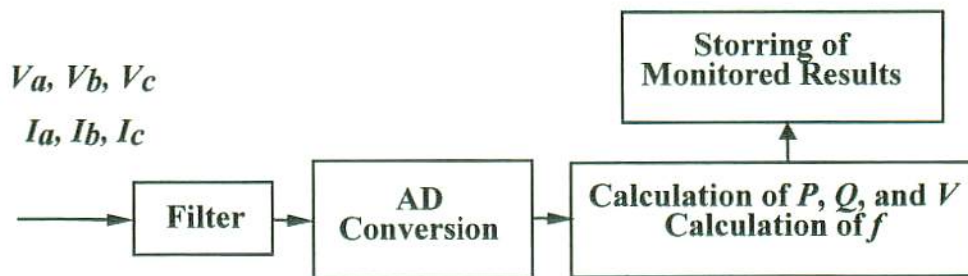


図 2.2 観測装置の基本構成

図のように観測装置では、まず 3 相瞬時電圧および瞬時電流がフィルタリング装置を介してサンプリング周波数 1.92kHz (つまり、60Hz の電力システムの場合は 1 サイクルにつき 32 サンプル) で連続的に計測されている。そして、この瞬時電圧および瞬時電流のデータを基に電圧および電流が式 (2-1) および式 (2-2) より算出される。

$$V = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a & V_b & V_c \end{bmatrix}^T \quad (2-1)$$

$$I = [1 \quad a \quad a^2] [I_a \quad I_b \quad I_c]^T \quad (2-2)$$

更に、式 (2-1) および式 (2-2) より得られた電圧および電流から、式 (2-3) を用いて、複素電力が算出され、その実部である有効電力 P と、虚部である無効電力 Q の各量が決定される。

$$S = P + jQ = VI^* \quad (2-3)$$

なお、周波数 f の測定では、観測される電圧信号のゼロクロス点の情報を用いており、図 2.3 における各黒丸の点、つまり零点をクロスする点の時間情報を用いて式 (2-4) より算出が行われている。

$$f = \frac{1}{t_n - t_{n-1}} \quad (2-4)$$

図 2.3 (a) に示すように、観測される電圧信号に歪みがない場合にはゼロクロス点の情報より正確な周波数の算出が可能となる。しかしながら、実際に実電力システムで観測される電圧信号は、図 2.3 (b) のように雑音などのため歪みが生じており、その影響から正確なゼロクロス点を取る事ができない状況にある。そのため、周波数の算出結果には誤差が含まれる事になる。

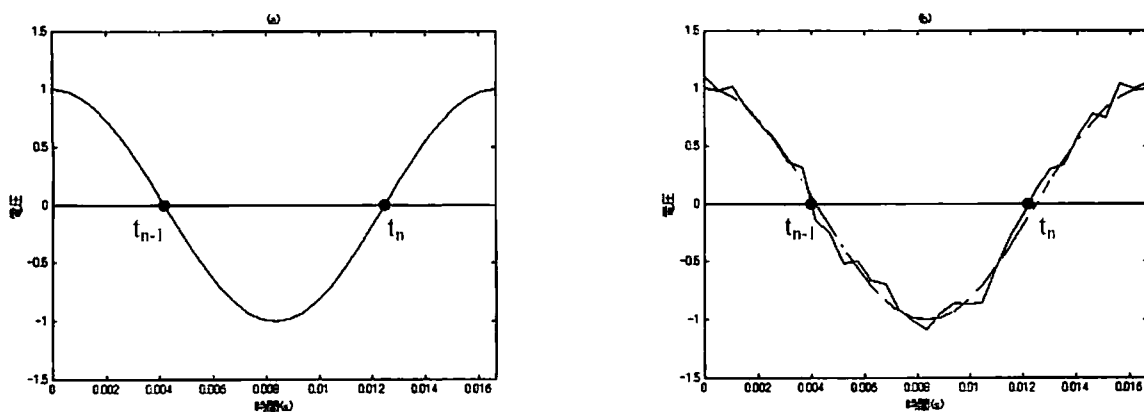


図 2.3 ゼロクロス点 (周波数算出時)

2.4. 代表的な観測波形の例

図 2.4 は図 2.1 に示す電力システムの N1、W1、S2、S3 の各系統変電所で観測された有効電力 (P)・無効電力 (Q)・系統電圧 (V)・周波数 (f)

データの代表例を示している。観測波形を見ても分かるように、系統変電所で観測されるデータは、電力システム内の時々刻々の負荷変動からくる需要と供給とのアンバランスから常時、動揺が確認される事が分かる。また、有効電力 P 、無効電力 Q 、系統電圧 V の各観測データを見ると、どの測定個所においても周期 2~3 秒程度の揺れが観測されている事が分かる。ただし、この周期 2~3 秒の動揺モードの確認のしやすさから見ると、有効電力 P に比べて無効電力 Q 、系統電圧 V はその変動幅が小さいため、歪みやノイズの影響を受け動揺モードがそれらに隠れてしまう可能性がある。

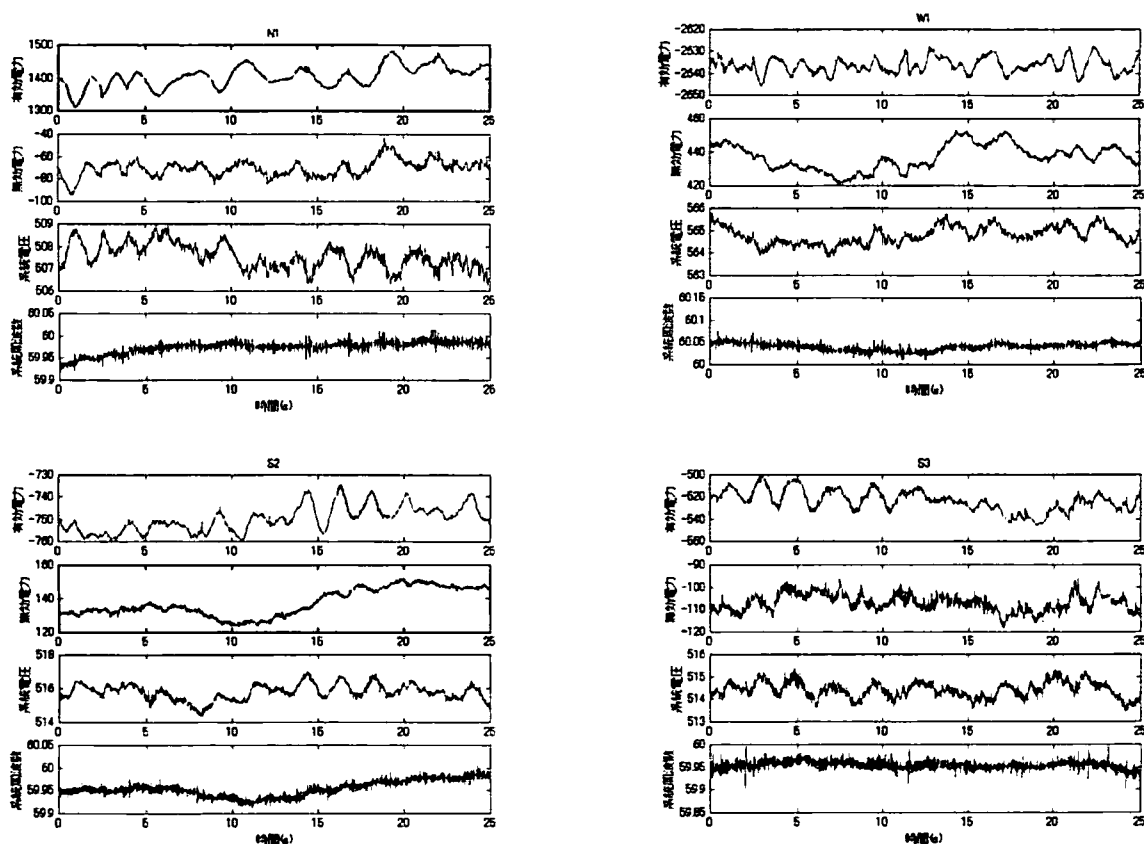


図 2.4 PQVf 観測データの代表例

2.5. PQVf の変動様相

2.5.1. 日間推移

図 2.5 は 1999 年 3 月 23 日 12 時から 1999 年 3 月 24 日 12 時までの 1 日の有効電力 P 、無効電力 Q 、系統電圧 V の時間応答波形を示したものである。周波数 f に関しては、各観測点で差異が見られなかった事から

波形は省略している。この時間応答波形において、有効電力 P の時間応答波形から分かるように西地区においては出力が階段状に変動している事が分かる。これは、この地区に設置された複数の火力発電機が負荷変動に応じて計画的に発電を行っているためである。更に S1 では、時々刻々の負荷変動に関係なく常に一定運転を行っている事が見て取れるが、これは南地区に設置された原子力機の出力を観測しているからである。また、この4つの幹線および連系線 N1 の変動を見てみると、特に連系線のものが他の幹線に比べておよそ8倍程度大きくなっている事が分かる。これは、図 2.1 に示す例題システムの構成から、例題システム内での西地区、東地区、南地区での時々刻々の負荷変動による動揺は幹線を通じて中央で重畳されそれが外部システムと連系線 N1 だけ1つで接続されるためこのように変動が大きくなると考えられる。また、この変動は、この例題システムの持つ動揺のみならず外部システムをも含めた動揺モードも含んでいる。

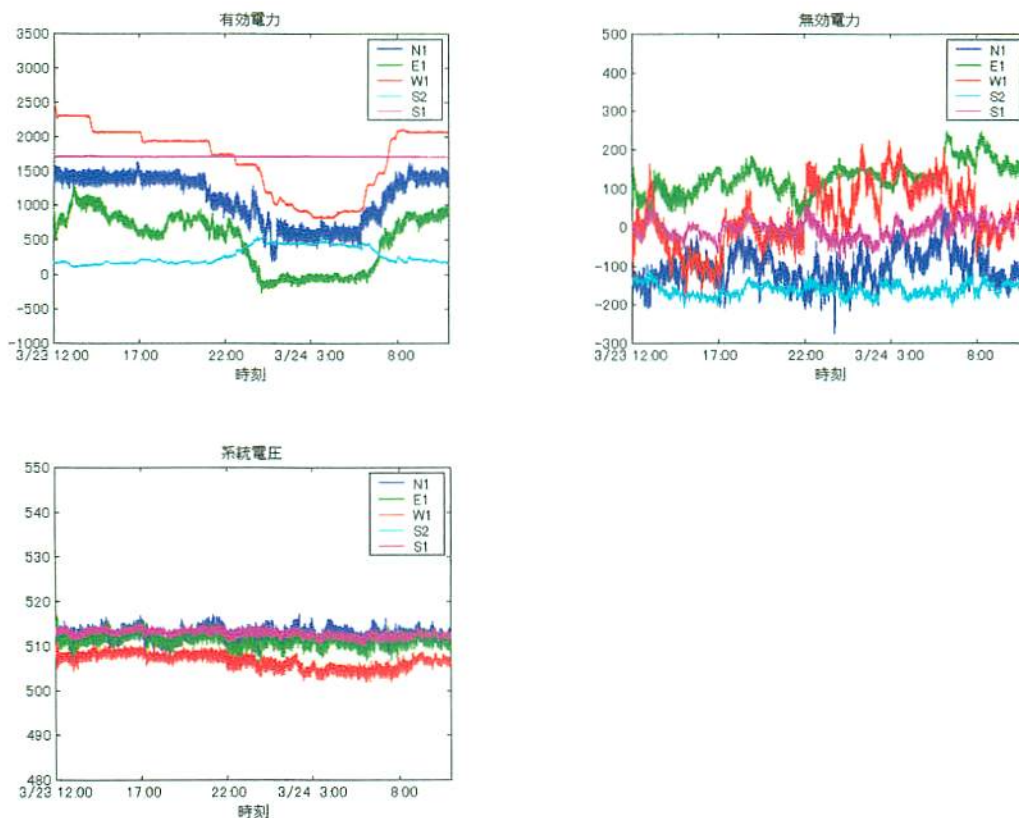


図 2.5 PQV 時間応答波形 (3月23日12時～3月24日12時)

次に、無効電力 Q の時間応答波形を見てみると、有効電力 P のもの比べて 5 つのデータで殆ど差異はみられない事が分かる。更に、系統電圧 V について見てみると、無効電力 Q と同様の事が言える他に、有効電力 P や無効電力 Q の変動と比べてその変動幅がかなり小さくなっている事が分かる。これは、無効電力 Q の調整により、系統電圧 V が適正レベルに維持されているためである。また、周波数 f に関しては各観測点での差異が殆ど見られなかった事から波形は省略している。以上の事より、系統変電所で観測される有効電力 P 、無効電力 Q 、系統電圧 V は時々刻々と変動している事が言え、その変動の様子は有効電力 P に最もよく特徴が現れる事が言えた。

2.5.2. 季節による変動様相の相違

図 2.6 は 1999 年 10 月 14 日 0 時から 24 時までの 1 日の有効電力 P 、無効電力 Q 、系統電圧 V の時間応答波形を示したものである。周波数 f に関しては、各観測点で差異が見られなかった事から波形は省略している。春季および秋季を通じて、有効電力 P を見ると西地区の複数台の火力機は計画的に運転されている様子を見る事ができ、更に南地区の原子力機は負荷変動に関係なく常に一定運転を行っている事が分かる。また、秋季においても春季と同様に連系線 N1 では他の幹線の変動よりもその変動幅が大きくなっている様子を見る事ができる。今回測定したデータに関しては、秋季（1999 年 10 月 14 日（木曜日））に比べて春季（1999 年 3 月 23 日（火曜日）～24 日（水曜日））の方が消費電力が大きい事が図から分かる。しかし、今回のデータではこのような結果となったが、常にこのような結果が得られるとは言えないため、今後夏季および冬季のデータを含めた統計的な検討が必要であると考えられる。

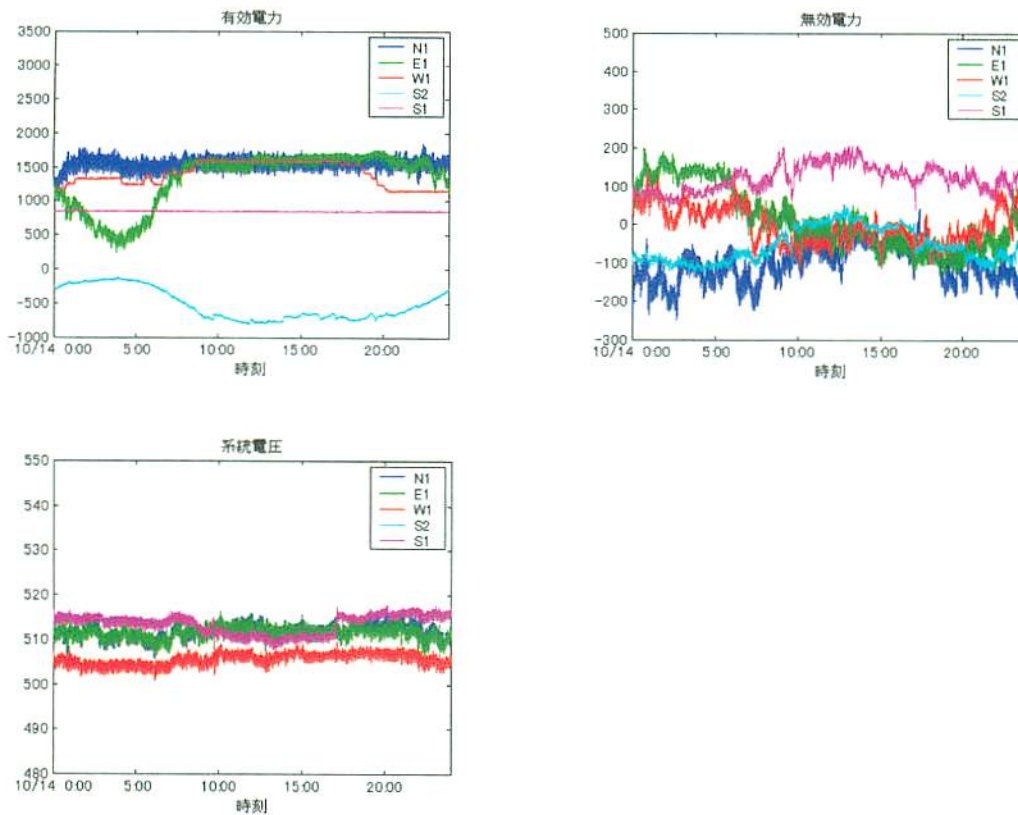


図 2.6 PQV 時間応答波形 (10月14日0時～10月14日24時)

2.5.3. 負荷状態による変動様相の相違

図 2.7～図 2.10 は、それぞれ 1999 年 3 月、1999 年 10 月の重負荷時（13 時から 14 時）および軽負荷時（3 時から 4 時）における有効電力 P、無効電力 Q、系統電圧 V の時間応答波形を示したものである。周波数 f に関しては、各観測点で差異が見られなかったことから波形は省略している。今回用いたデータでは重負荷時と軽負荷時において両者の波形の間に顕著な違いはみられない事が分かった。ただ、短時間では電力システムの状態の変更に伴う大きな電力変動は見られず、時々刻々の負荷変動による周期 2～3 秒程度の揺れのみ見られる事が図より見て取れる。

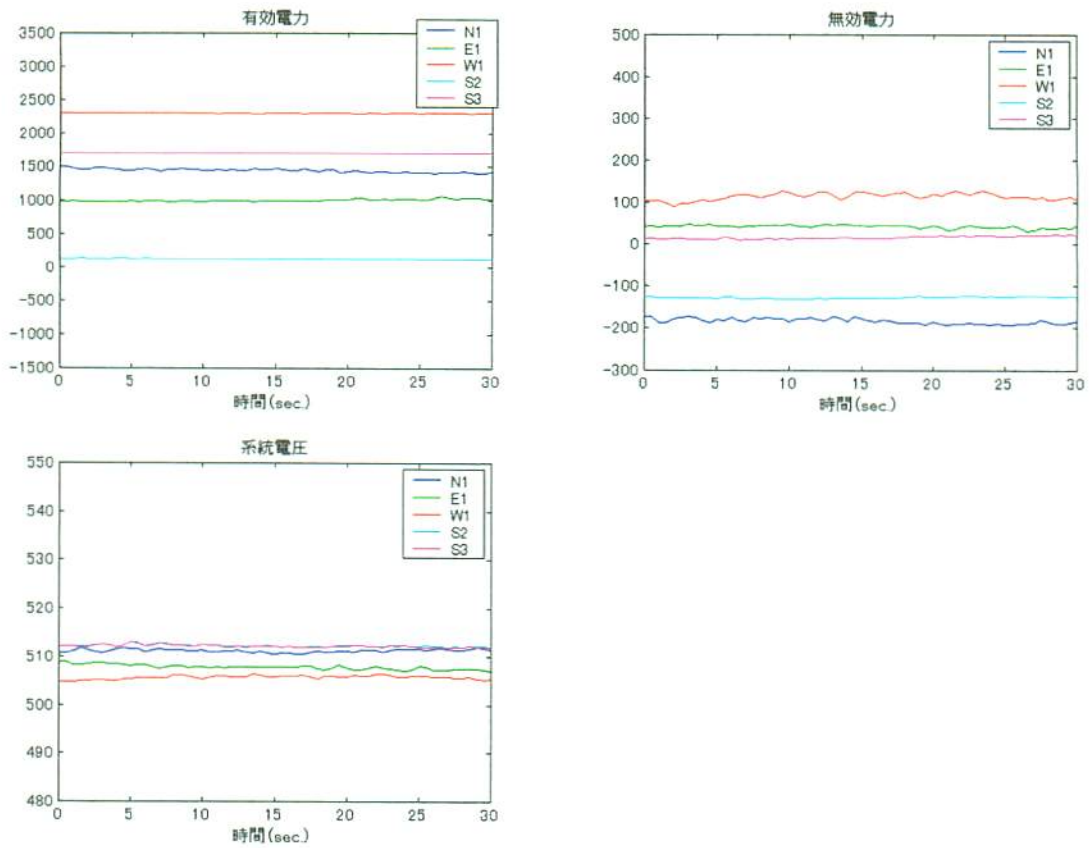


図 2.7 PQV 時間応答波形 (3月23日13時～14時：重負荷時)

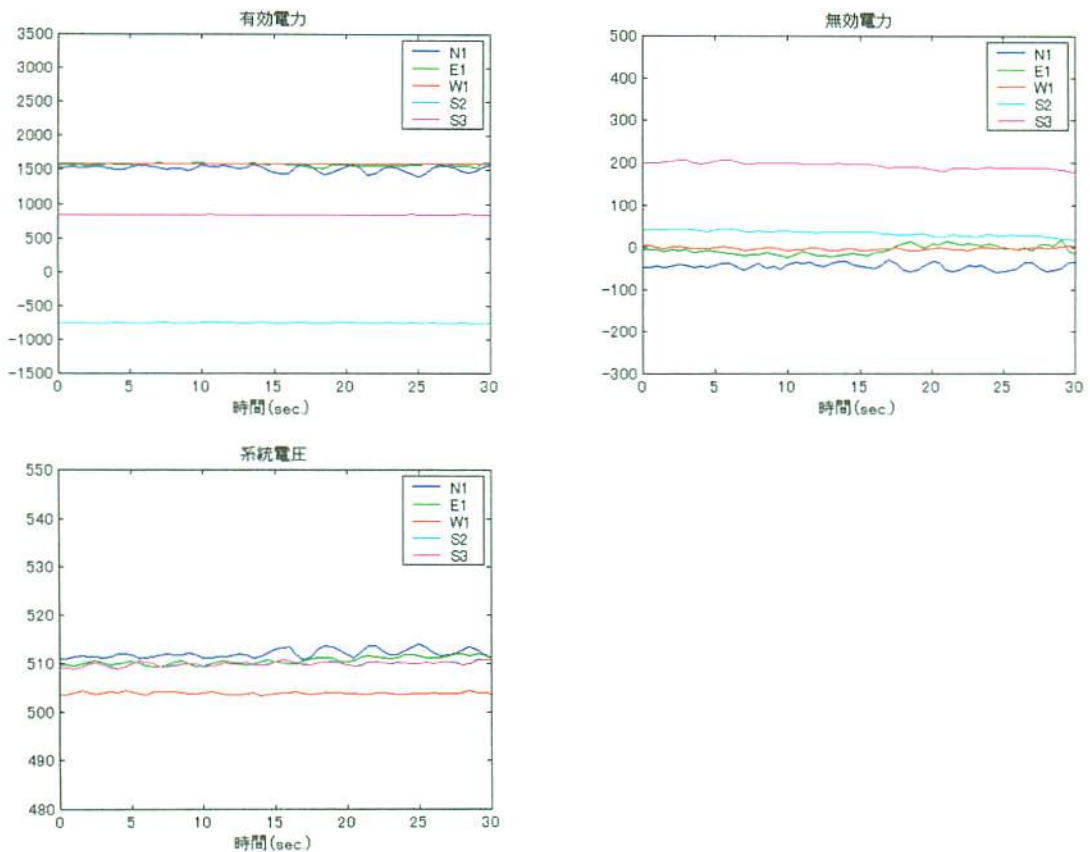


図 2.8 PQVf 時間応答波形 (10月14日13時～14時：重負荷時)

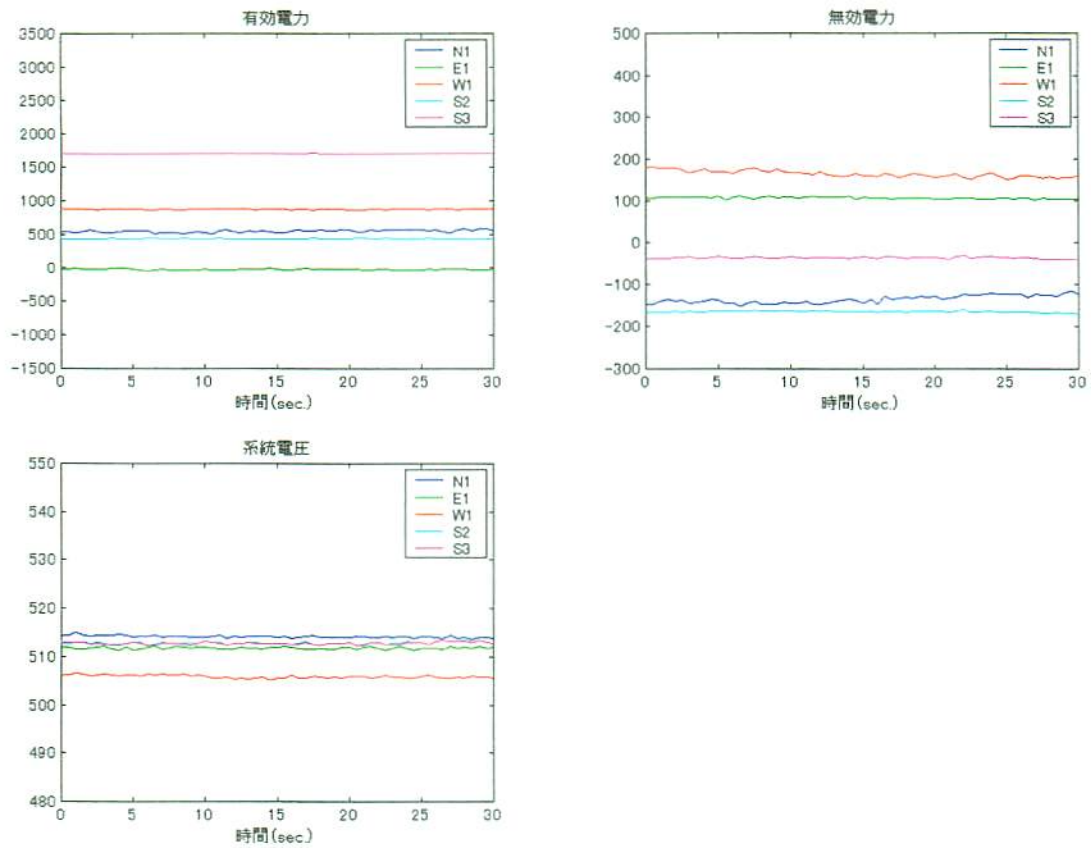


図 2.9 PQVf 時間応答波形 (3月24日3時～4時：軽負荷時)

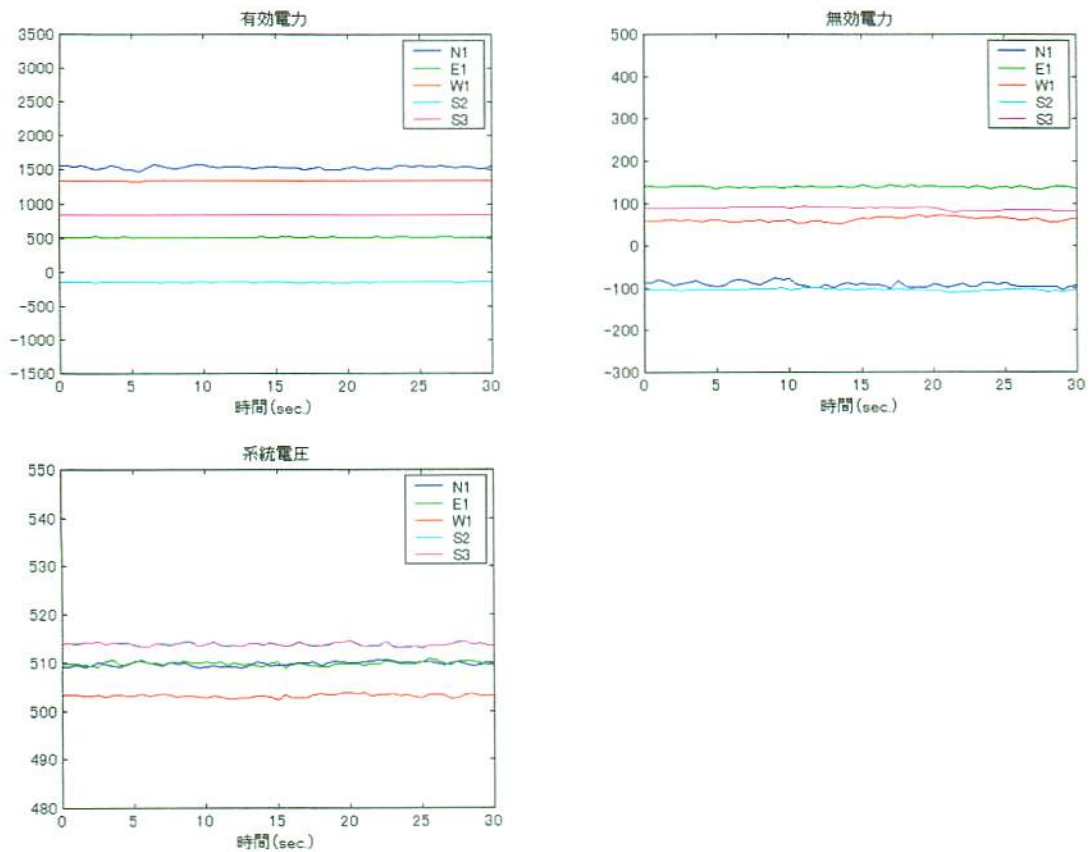


図 2.10 PQVf 時間応答波形 (10月14日3時～4時：軽負荷時)

さてここで、時間領域 有効電力 P 、無効電力 Q 、系統電圧 V 、周波数 f で安定度の解析を行う上で、どのデータを用いるのが最適なのだろうか？時間領域 有効電力 P 、無効電力 Q 、系統電圧 V 、周波数 f での安定度解析を行うにはそれぞれの観測点で動揺モードの様相が視覚的に表れている必要がある。よって、歪みやノイズの影響を受け動揺モードがそれらに隠れてしまう可能性がある無効電力 Q 、系統電圧 V 、また電圧信号の歪みの影響を受けてゼロクロス点では正確に周波数の算出が行えていない周波数 f は不適であり、したがって有効電力 P が最適であると言える。

2.6. PV、Pf 特性

図 2.11 は、PV、Pf の典型的な特性を示している。図中の S 点は安定平衡点を、 U 点は不安定平衡点を示している。また、 C 点は安定限界点を示している。ここで、これらの図に示される PV、Pf カーブより、電力システムが安定状態にある時、つまり動作点が S 点である時には、PV、Pf カーブの勾配 dV/dP および df/dP はほぼ 0 付近の値を取る。また、安定限界点に近づくにつれてそれぞれの勾配は徐々に $-\infty$ 方向へシフトしていくため、これらのカーブにおいて、各勾配を算出する事により電力システムの安定度を評価する事が可能となる。

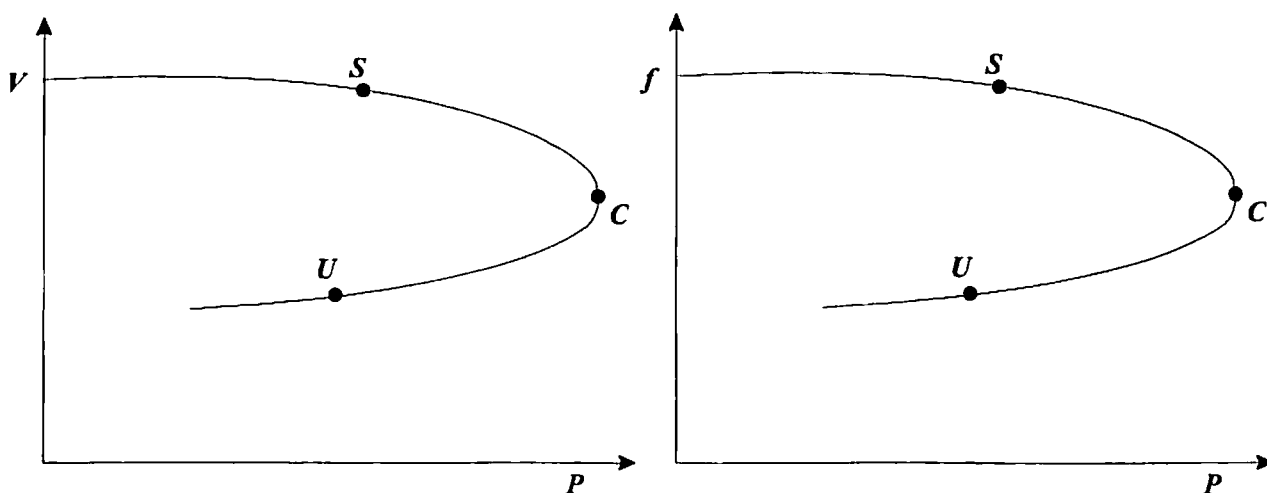


図 2.11 PV 特性および Pf 特性

ここで勾配 dV/dP の算出には、式 (2-5) ~ 式 (2-8) で示す最小二乗法を用いている。ここで、勾配 df/dP の算出の場合は単に系統電圧 V と周波数 f を置き換えればよい。

勾配の算出方法

$$\bar{P} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \bar{V} \quad \left(\text{ただし、} \bar{P} = \begin{bmatrix} P_1 & 1 \\ P_2 & 1 \\ P_3 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ P_n & 1 \end{bmatrix} \quad \bar{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \right) \quad (2-5)$$

式 (2-5) の両辺に左から、 P の転置行列を演算する。

$$\bar{P}^T \cdot \bar{P} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \bar{P}^T \cdot \bar{V} \quad (2-6)$$

式 (2-6) の両辺に左から $\bar{P}^T \cdot \bar{P}$ の逆行列を演算する。

$$\det(\bar{P}^T \cdot \bar{P}) \cdot (\bar{P}^T \cdot \bar{P}) \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \det(\bar{P}^T \cdot \bar{P}) \cdot (\bar{P}^T \cdot \bar{V}) \quad (2-7)$$

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \det(\bar{P}^T \cdot \bar{P}) \cdot (\bar{P}^T \cdot \bar{V}) \quad (2-8)$$

式 (2-8) より勾配を算出する事ができる。

図 2.12 は、図 2.1 の S3 での PV 特性を示したものである。図は、上より勾配 dV/dP 、有効電力 P の変動幅、系統電圧 V の変動幅を示している。有効電力 P および系統電圧 V は、時々刻々の負荷変動により常時、動揺している。しかしながら、その変動幅を見てみると有効電力 P の変動幅に比べて、系統電圧 V の変動幅は非常に小さいという事が分かる。実際には、有効電力 P の変動幅は観測される有効電力の 4~6% であるのに対して、系統電圧 V の変動幅はわずかに 0.4% ほどである。また、同図に示される勾配 dV/dP は、0 から負の間で非常に小さな動揺を示している。よって、現在の動作点が安定限界点とは異なった場所に位置している事を示しており、それよりまだ十分に安定であると分かる。

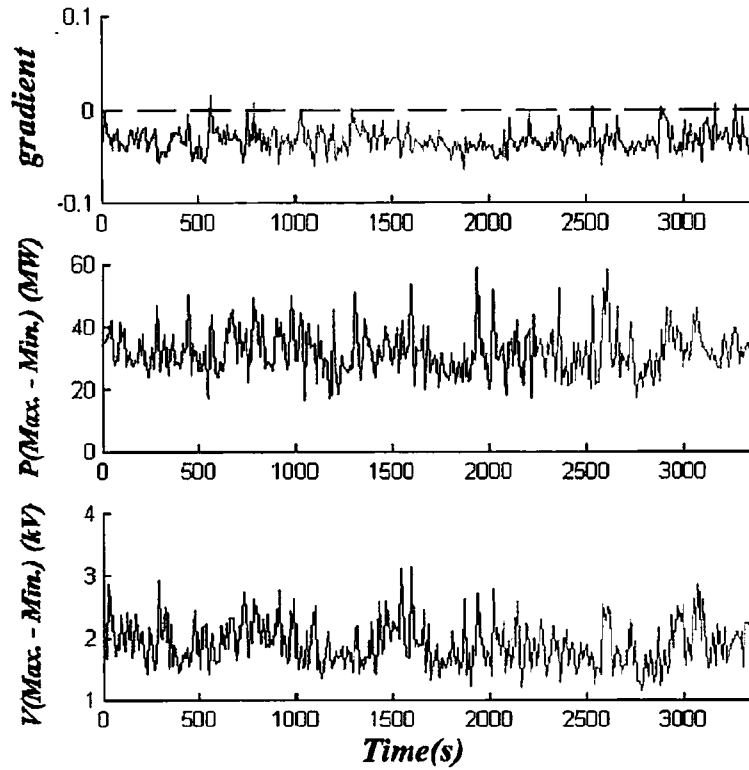


図 2.12 PV 特性（観測点：S3）

図 2.13 は、図 2.1 の S3 での Pf 特性を示したものである。図は、上より勾配 df/dP 、有効電力 P の変動幅、周波数 f の変動幅を示している。図を見ても分かるように、周波数 f の変動幅は 0.1Hz よりも小さい事が分かる。また、同図に示される勾配 df/dP は、0 から負の間で非常に小さな動揺を示している。よって、現在の動作点が安定限界点から離れた場所に位置している事を示しており、それよりまだ十分に安定であると分かる。

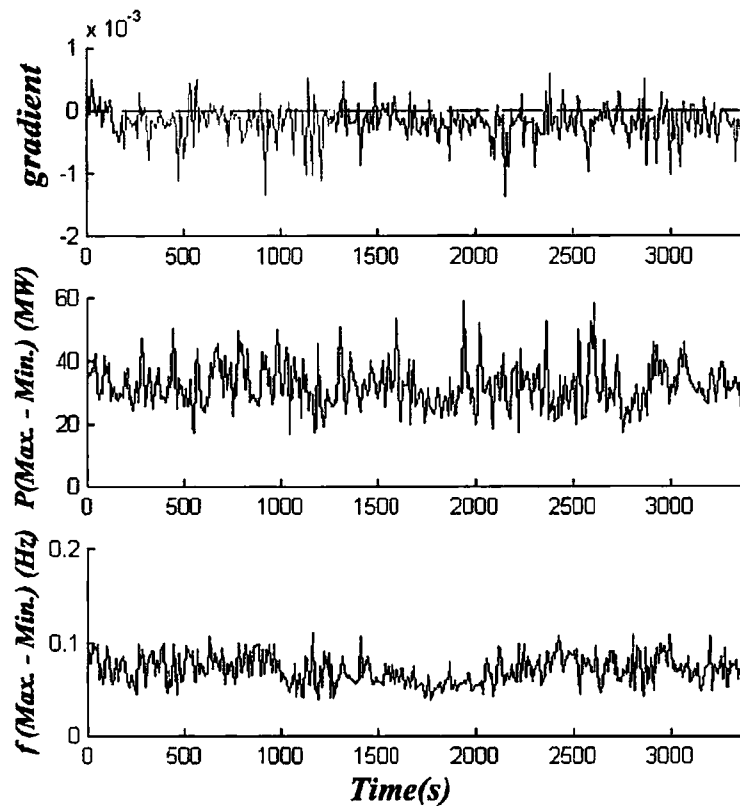


図 2.13 Pf 特性（観測点：S3）

このように適当な時間帯での PV、Pf に対して、それぞれ勾配を算出した場合、どちらの場合においても同じように対象とする電力システムの安定性は確認できた。そこで、次に電力システムの状態が変わった場合においてこの勾配がどのように変動するかについて検討を行う事にする。前の検討で、PV、Pf、どちらの特性でもほぼ同じ結果を得られると分かったため、ここでは PV 特性に絞って、勾配 dV/dP から安定度の検討を行っている。

1999 年 3 月 23、24 日（赤）と 1999 年 10 月 14 日（青）の N1 における 1 時間ごとの勾配 dV/dP の変動様相を図 2.14、表 2.1 に示す。図 2.14、表 2.1 の結果からも分かるように、最小二乗法を用いて算出した勾配がすべて負であるため、現在の動作点が安定限界点とは異なった場所に位置して、十分に安定である事が分かる。また図より勾配 dV/dP は時間帯によって変動しており、夜間に比べて昼間の方が勾配が急である事から夜間に比べて昼間の方が安定度が悪いと言えた。また、春季と秋季という

季節の違いにおいて今回の測定では、春季に比べ秋季の方が安定であるという結果が得られた。

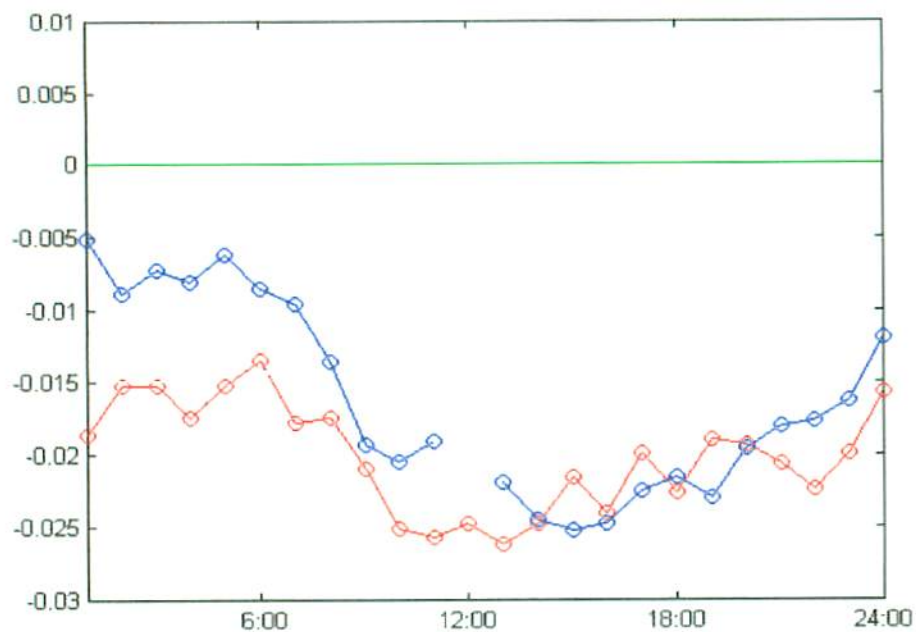


図 2.14 N1 における 1 時間ごとの勾配 dV/dP の変動様相 (1999 年 3 月 23 (赤)、1999 年 10 月 14 日 (青))

表 2.1 N1 における勾配の変動様相（青：最大値、緑：最小値）

日時	平均勾配	日時	平均勾配
1999/3/24 0:00～1:00	-0.0051	1999/10/14 0:00～1:00	-0.01867
1:00～2:00	-0.00889	1:00～2:00	-0.01522
2:00～3:00	-0.00722	2:00～3:00	-0.01525
3:00～4:00	-0.00806	3:00～4:00	-0.01743
4:00～5:00	-0.00624	4:00～5:00	-0.01526
5:00～6:00	-0.00859	5:00～6:00	-0.01341
6:00～7:00	-0.00955	6:00～7:00	-0.01778
7:00～8:00	-0.01359	7:00～8:00	-0.01743
8:00～9:00	-0.01937	8:00～9:00	-0.02098
9:00～10:00	-0.02055	9:00～10:00	-0.02513
10:00～11:00	-0.01904	10:00～11:00	-0.0257
11:00～12:00	—	11:00～12:00	-0.02473
1999/3/23 12:00～13:00	-0.0219	12:00～13:00	-0.02607
13:00～14:00	-0.02449	13:00～14:00	-0.02469
14:00～15:00	-0.02522	14:00～15:00	-0.02157
15:00～16:00	-0.0247	15:00～16:00	-0.02397
16:00～17:00	-0.02247	16:00～17:00	-0.0199
17:00～18:00	-0.02153	17:00～18:00	-0.02258
18:00～19:00	-0.02298	18:00～19:00	-0.01894
19:00～20:00	-0.01957	19:00～20:00	-0.01936
20:00～21:00	-0.01809	20:00～21:00	-0.02062
21:00～22:00	-0.0177	21:00～22:00	-0.02239
22:00～23:00	-0.0163	22:00～23:00	-0.01989
23:00～24:00	-0.01195	23:00～24:00	-0.01573

2.7. 高速フーリエ変換（FFT）による動揺モードの抽出

電力システムに存在する動揺様相（動揺モード）のより詳細な解析は、各観測点で観測される信号に対してFFT解析を行う事で評価する事ができる。まず、観測される有効電力 P、無効電力 Q、系統電圧 V、周波数 f に対して表 2.2 に示す設定で FFT 解析を行う。結果は、図 2.15 に示すように 1 つの図に 1 サンプルごとにシフトさせた全ての FFT 結果を重ね合わせて表示させる。

表 2.2 FFT 解析における各パラメータの設定値

パラメータ	設定値
サンプリング周波数	4Hz
サンプル数	40 (10s)
窓関数	ハミング窓

ここで、サンプリング周波数を 4Hz としているため、サンプリング定理から FFT 結果は 2Hz まで表示可能となるのだが、1.5Hz 以上の動揺モードは他の動揺モードに比べて非常に小さかったため、ここでは FFT 出力の最大周波数を 1.5Hz としている。

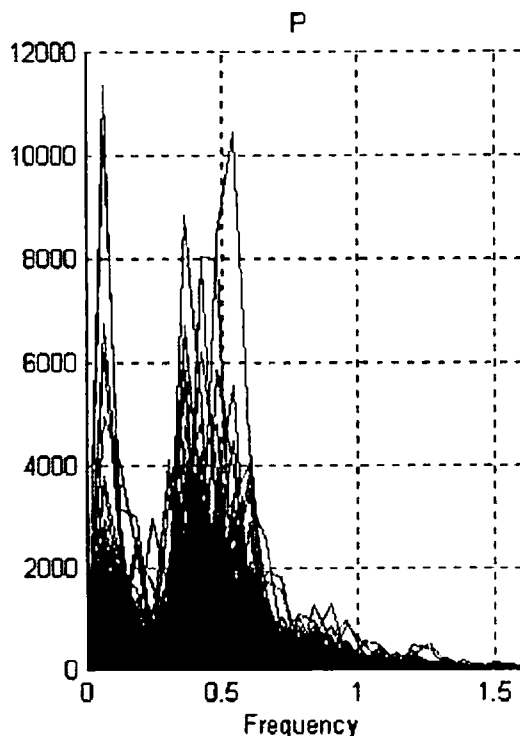


図 2.15 FFT 解析の例

電力システムで観測される動揺モードには、周波数 0.2Hz~0.8Hz の動揺モードである広域動揺モード (Global Mode) と周波数 0.8Hz 以上の動揺モードである局所動揺モード (Local Mode) の 2 つがあり、Global Mode が電力システム全系の安定度に関係している事が知られている。また、図 2.15 では周波数が 0.1Hz に満たないサステインド成分が見られるが、これは例えば負荷の変動によって大型の発電機の投入される時のゆっくりとした動揺モードであり直接、広域安定度に関係はしないためここでは検討の対象外としている。

さてここで、時間領域 PQVf 同様に周波数領域 PQVf においても動揺モードの識別のためにはどのデータを用いるのが最適なのかについて検討を行う必要がある。図 2.16 および図 2.17 は、それぞれ図 2.1 の例題系統

における S3 および S2 で観測された有効電力 P、系統電圧 V に対して FFT 解析を行った結果を示している。

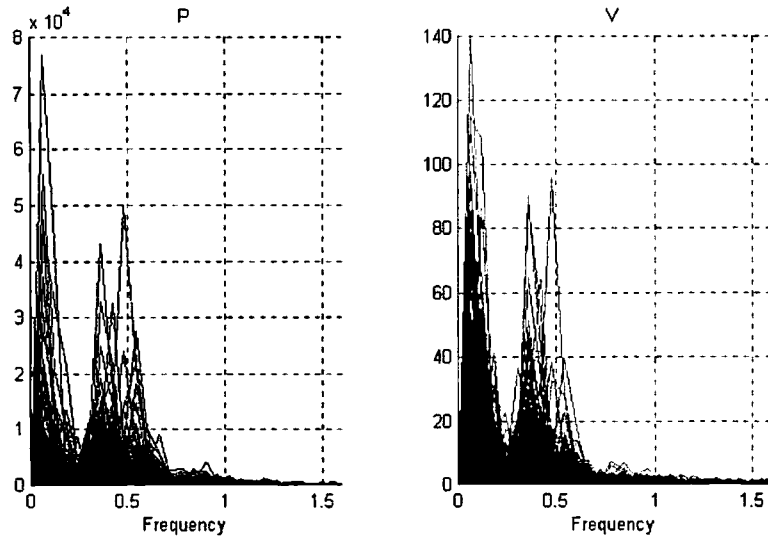


図 2.16 PV に対する FFT 処理結果（観測点：S3）

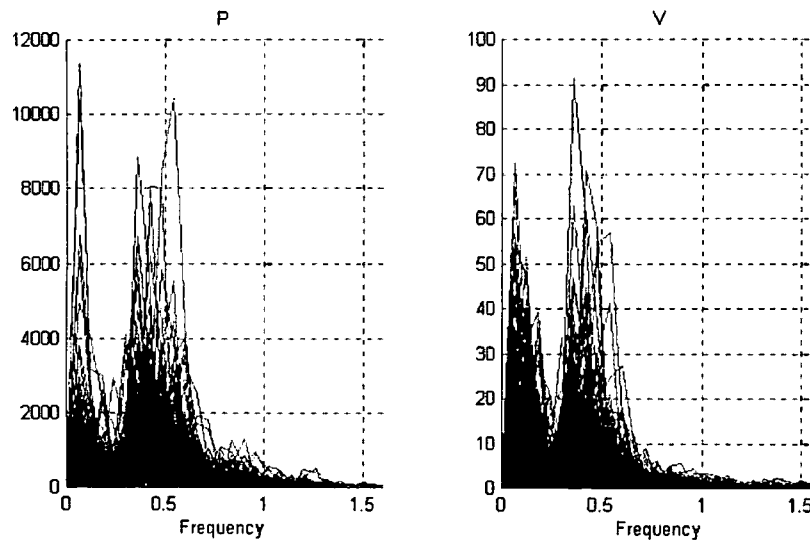


図 2.17 PV に対する FFT 処理結果（観測点：S2）

この 2 つの結果を見ても分かるように有効電力 P、系統電圧 V のいずれのデータを使用した場合においても同様の結果が得られている事が分かる。また、それぞれの結果からも観測時には 0.4Hz の Global Mode が存在していた事が分かる。よって、周波数領域で解析を行う場合において、有効電力 P、系統電圧 V のいずれのデータを用いたとしても正確に判断が可能である事が分かる。更に、図 2.18 および図 2.19 は、それぞれ図 2.1 の例題系統における S3 および S2 で観測された無効電力 Q、系

統電圧 V に対して FFT 解析を行った結果を示している。先ほどの結果とは異なり、無効電力 Q の使用によって観測点 $S2$ では Global Mode が観測しづらくなっている事が分かる。よって、周波数領域で解析を行う際において、無効電力 Q の使用は不適であると判断する事ができる。

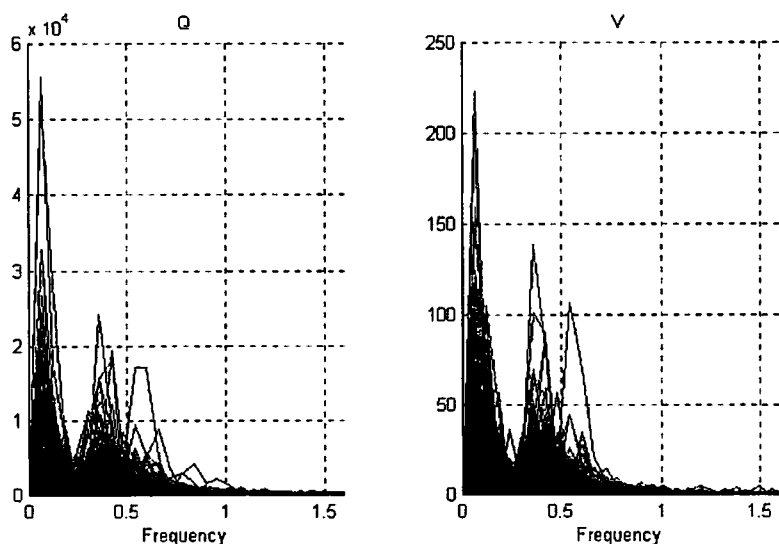


図 2.18 QV に対する FFT 処理結果 (観測点 : S3)

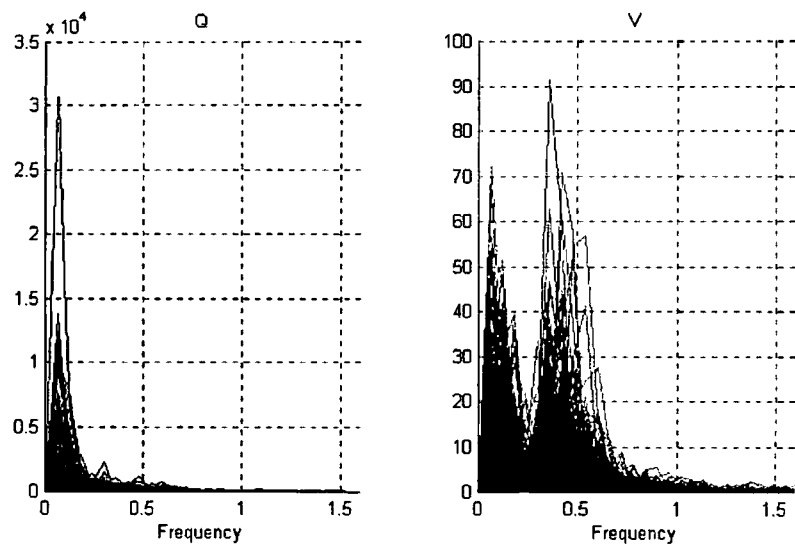


図 2.19 QV に対する FFT 処理結果 (観測点 : S2)

図 2.20 は、図 2.1 の例題系統における $S3$ で観測された有効電力 P 、周波数 f に対して FFT 解析を行った結果を示している。図を見ても分かるように、周波数 f に関して FFT 解析を行った場合、先ほどの無効電力 Q の場合と同様にサステインド成分のみ表れて、Global Mode が観測できていない事が分かる。よって、周波数領域で解析を行う際において、周

波数 f の使用は不適であると判断する事ができる。

以上の事より、周波数領域 $PQVf$ で動揺モードの識別のためには有効電力 P 、あるいは系統電圧 V のいずれかのデータを用いるのが最適であると言える。したがって、以後の検討においては、有効電力 P についてのみ周波数領域での解析を行う事にする。

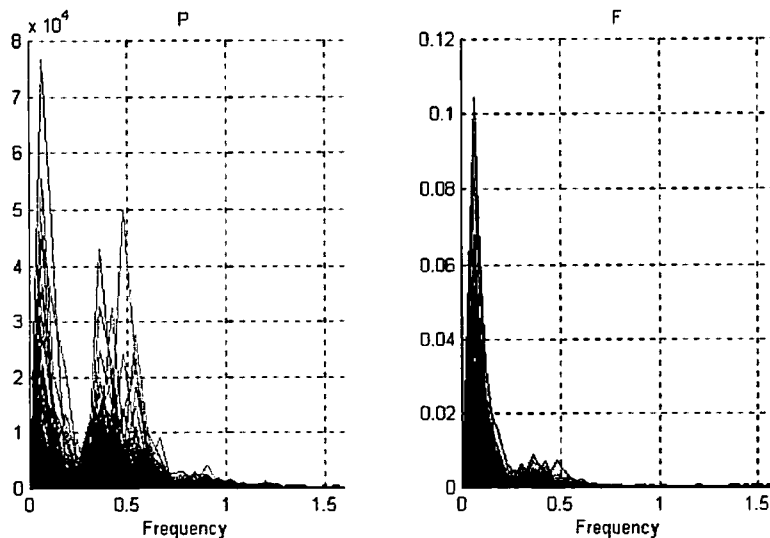


図 2.20 Pf に対する FFT 処理結果 (観測点 : S3)

2.8. 有効電力 P に対する FFT 解析

FFT による周波数領域での動揺モード解析を行うための FFT の各パラメータを表 2.3 に示す。電力システムで観測される動揺モードには、Global Mode と Local Mode の 2 つがあるが、2.6. の FFT 解析で Local Mode は殆ど観測されていない事が分かった。そこで、ここでは特に Global Mode に限定して解析を行う。よって、1Hz 以上の Local Mode および 0.1Hz に満たないサステインド成分に関しては Global Mode 解析時にエリアシングによる影響を少なくするため事前にバンドパスフィルタでそれらの動揺モードを除去した後、サンプリング周波数を 2Hz として解析を行っている。また、1 時間ごとに FFT 処理を行う場合、1 時間で 7200 点のデータを取得できるのであるが、実際に FFT 処理に使用するデータは、サンプル数が 2 の累乗である必要があるため、7200 点を超えない最大の 4096 点 (およそ 34 分) のデータを用いる。更に、窓関数については、エリアシング誤差が小さく、細かな周波数成分まで正確に求める事が要

求されるため、サイドローブが小さいブラックマン・ハリス窓を用いる事にする。

表 2.3 FFT 処理における各パラメータの設定値

パラメータ	設定値
サンプリング周波数	2Hz
サンプル数	4096
窓関数	ブラックマン・ハリス窓

2.8.1. 動揺モードの日間変動

図 2.21 は、1999 年 3 月 23 日 12 時から 1999 年 3 月 24 日 12 時までの観測点 N1 の有効電力 P における周波数の 1 時間ごとの変動推移の一例を示したものである。2.6. の FFT 解析結果とサンプル数が異なるため、Global Mode の周波数成分がより明らかに表れている。図では、いずれの時間帯においてもこの例題系統が持つ 0.35Hz と 0.55Hz の 2 つの広域動揺モードが確認されている事が分かる。ただし、それらの大きさは時間によって異なっている事が分かる。この日においては、14 時から 15 時まで N1 で観測される動揺は大きく、20 時から 21 時では動揺は小さかったと分かる。また、14 時から 15 時までは 20 時から 21 時までと比べて広域動揺モードの比率が大きくなっている事から、N1 付近で住宅負荷ではなく工学負荷などの容量の大きな電動機など大きな潮流変動を伴う負荷変動が他の時間帯に比べて多く起こったのではないかと推測する事ができる。

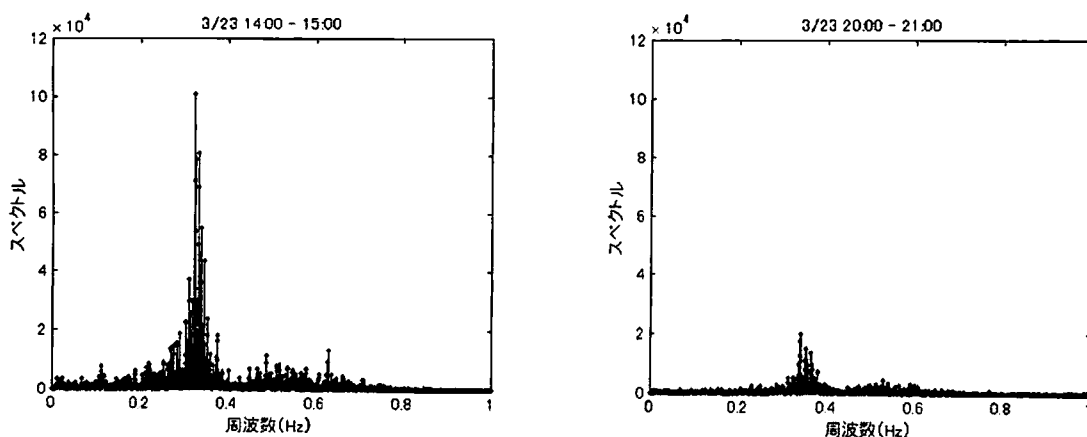


図 2.21 FFT 結果 (3 月 23 日 12 時 ~ 3 月 24 日 11 時 : 観測点 N1)

2.8.2. 動揺モードの季節による相違

図 2.22 は、1999 年 3 月 23 日 12 時から 1999 年 3 月 24 日 12 時までと、1999 年 10 月 14 日 0 時から 24 時までの観測点 N1 の P における周波数の 1 時間ごとの変動の推移の一例を示したものである。図を見ても分かるように、春季、秋季いずれの場合においても 0.35Hz と 0.55Hz の 2 つの Global Mode が確認できる。また、春季と秋季で FFT 処理結果の違いを見てみると、秋季の方が春季に比べて FFT のスペクトルが全体的に高めの設定となっており、じょう乱が大きかったと言える。

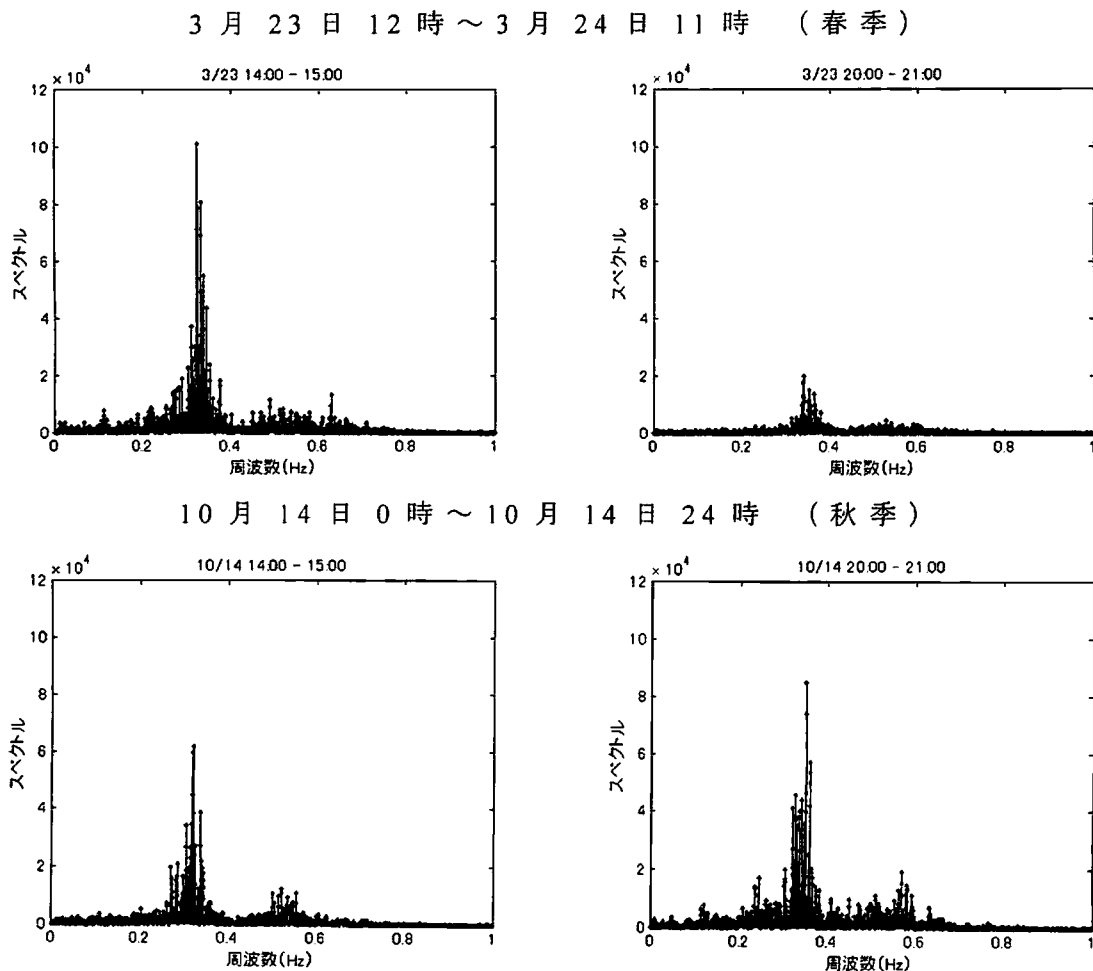


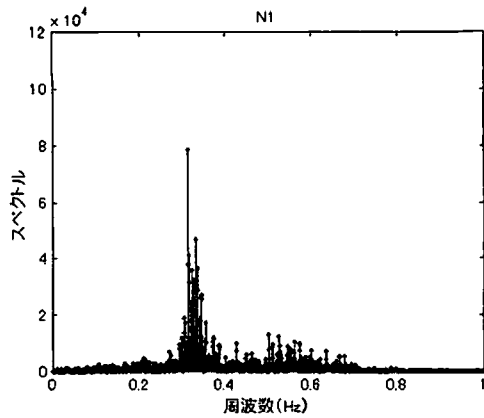
図 2.22 FFT 結果 (観測点 N1)

2.8.3. 動揺モードの負荷状態による相違

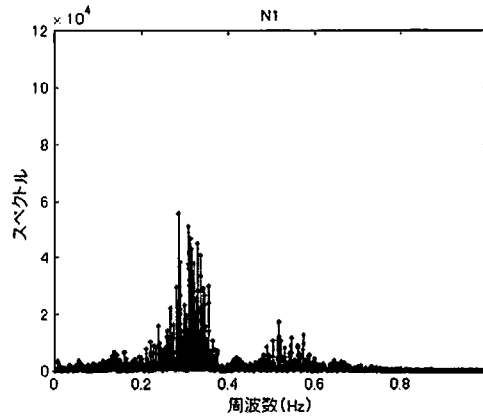
図 2.23 は、1999 年 3 月、1999 年 10 月の重負荷時 (13 時から 14 時) および軽負荷時 (3 時から 4 時) における各観測点の有効電力 P の FFT

出力結果を示したものである。結果より、春季・秋季によって軽負荷および重負荷でスペクトルの大きさに差異は見られない事が分かった。

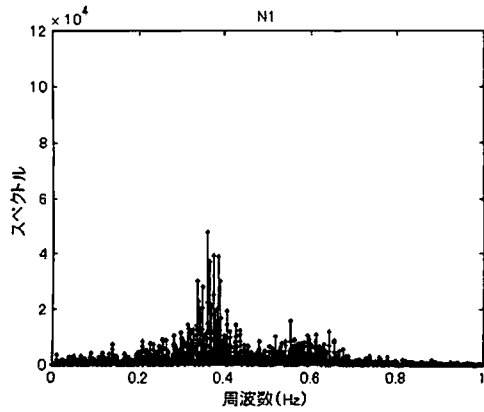
3/23 13:00-14:00 (重負荷時：春)



10/14 13:00-14:00 (重負荷時：秋)



3/24 3:00-4:00 (軽負荷時：春)



10/14 3:00-4:00 (軽負荷時：秋)

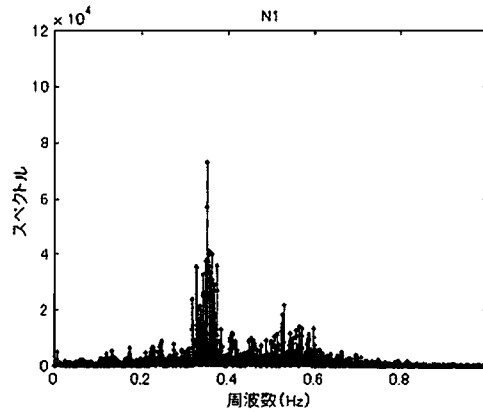


図 2.23 FFT によるパワースペクトル

2.8.4. 動揺モードの観測点による相違

図 2.24 は、1999 年 10 月 14 日 13 時から 1999 年 10 月 14 日 14 時までの各観測点 N1、E1、W1、S2 の FFT 結果を示したものである。図を見ても分かるように、全ての観測点で共通して 0.35Hz の動揺モードと 0.55Hz の動揺モードが確認される事が分かる。また、各動揺モードのスケールを見てみると N1 が最も大きい事が分かり、つまりこの事は N1 で観測されるじょう乱の変動が最も大きい事を示している。更に、地区によっては共通して観測される Global Mode 以外の動揺モードも観測され、これらはその地区固有の動揺モードであると考え事ができ、これらを基にして地区ごとにグループ分けが可能となる。

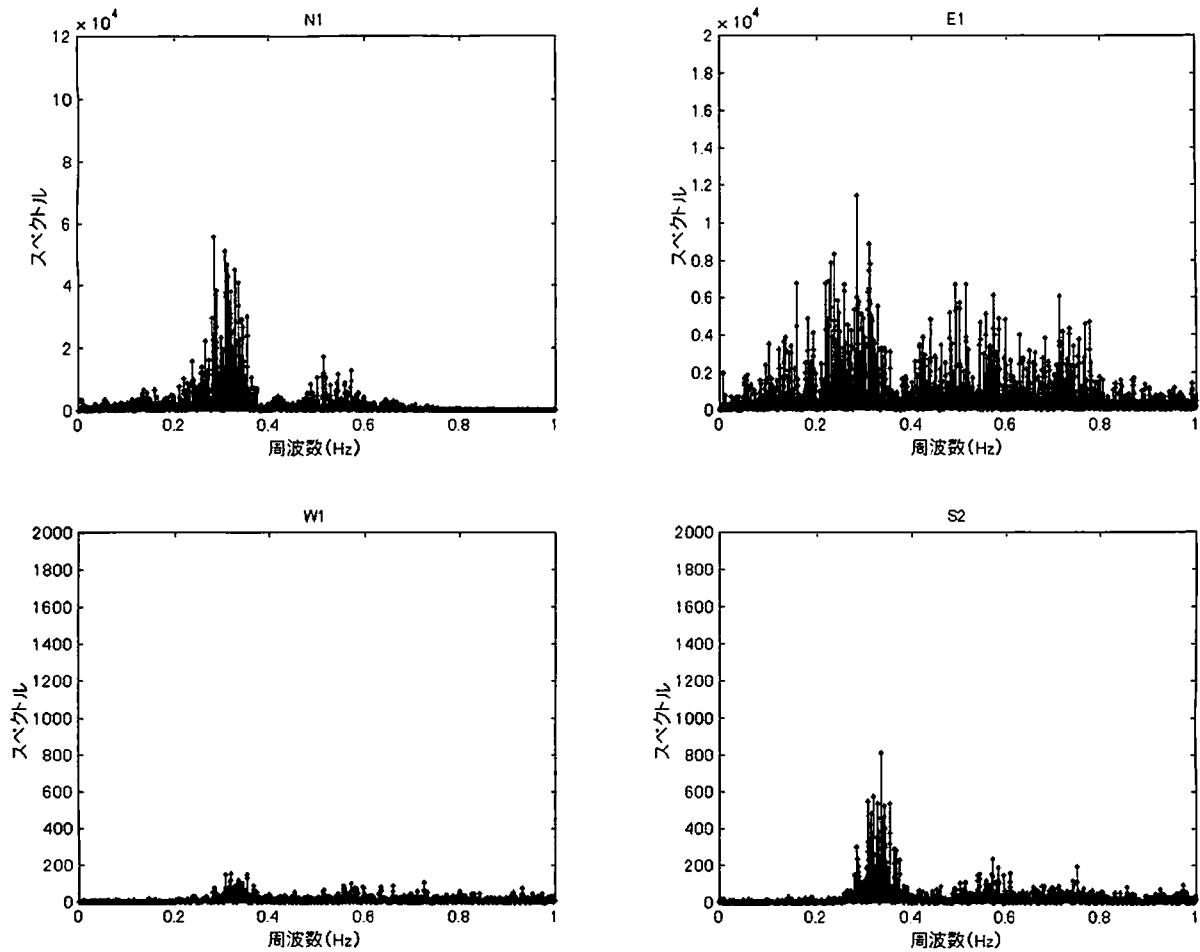


図 2.24 異なる観測点での FFT 結果 (10/14 13:00-14:00)

2.9 まとめ

実電力システムにおいて 500kV 系統変電所で実測された 1999 年 3 月 23 日 12 時から 1999 年 3 月 24 日 12 時まで (春季) と、1999 年 10 月 14 日 0 時から 24 時まで (秋季) の 2 つの 24 時間の有効電力 (P)・無効電力 (Q)・系統電圧 (V)・周波数 (f) の実測データより、実電力システムに存在する動揺様相について検討を行った。

実電力システムにおいて系統変電所で観測されるデータは、系統内の時々刻々の負荷変動からくる需要と供給とのアンバランスから常時、動揺が確認される事が分かった。また、有効電力 (P)、無効電力 (Q)、系統電圧 (V) の各観測データを見ると、どの測定個所においても周期 2 ~ 3 秒程度の揺れが観測されている事が分かった。また、観測時において有効電力 P に比べて無効電力 (Q)、系統電圧 (V) はその変動幅が小

さいため、雑音による歪みの影響を受け動揺モードがそれらに隠れてしまう可能性があった。また、 f においては、雑音などの歪みの影響から正確なゼロクロス点を取る事ができない事が分かった。

時間領域 $PQVf$ の解析は、日間推移、季節による変動様相の相違、負荷状態による変動様相の相違について検討を行った。いずれの検討においても、周波数 f に関しては、各観測点で差異が見られなかった。日間推移の検討では、1日の有効電力 (P)、無効電力 (Q)、系統電圧 (V) の時間的変動の推移から西地区に設置された複数の火力発電機が負荷変動に応じて計画的に発電を行っている他、南地区に設置された原子力機が負荷変動に関係なく常に一定出力で運転している事が分かった。また、4つの幹線および連系線 $N1$ の変動を見てみると、特に連系線のものが他の幹線に比べておよそ8倍程度大きくなっている事が分かった。また、無効電力 Q に関してはどの観測点でも殆ど差異は見られず、系統電圧 V に関しては有効電力 P や無効電力 Q の変動と比べてみてもその変動幅がかなり小さくなっている事が分かった。春季・秋季といった季節による相違を検討してみると、季節に関係なく西地区の複数台の火力機は計画的に運転され、南地区の原子力機は負荷変動に関係なく常に一定運転を行っている事が分かった。また、秋季に比べて春季の方が消費電力が大きい事が分かった。更に、重負荷時および軽負荷時といった負荷状態による推移について検討を行ってみた所、両者に顕著な違いはみられない事が分かった。ただ、短時間では電力システムの状態の変更に伴う大きな電力変動は見られず、時々刻々の負荷変動による周期2~3秒程度の揺れのみ見られる事が分かった。また以上の結果より、時間領域 $PQVf$ の安定度解析を行うにはそれぞれの観測点で動揺モードの様相が視覚的に表れている必要があり、よって、歪みやノイズの影響を受け動揺モードがそれらに隠れてしまう可能性がある無効電力 Q や系統電圧 V 、また電圧信号の歪みの影響を受けてゼロクロス点では正確に周波数の算出が行えていない周波数 f は不適であると言え、したがって有効電力 P が最適であると言えた。更に、時間領域 $PQVf$ では PV 、 Pf 特性についても検討を行った。まず、図 2.1 に示す実電力システムの $S3$ での PV 特性を見

た所、有効電力 P および系統電圧 V は、時々刻々の負荷変動により常時、動揺している事が分かった。しかしながら、その変動幅を見てみると有効電力 P の変動幅に比べて、系統電圧 V の変動幅は非常に小さく、実際に有効電力 P の変動幅は観測される有効電力の 4~6% であるのに対して、系統電圧 V の変動幅はわずかに 0.4% ほどである事が分かった。また、勾配 dV/dP を調べてみると、0 から負の間で非常に小さな動揺を示しており、現在の動作点が安定限界点とは異なった場所に位置し、それより動作点がまだ十分に安定であると分かった。更に、S3 での Pf 特性を見た所、周波数 f の変動幅は 0.1Hz よりも小さい事が分かった。また、勾配 df/dP を調べてみると、0 から負の間で非常に小さな動揺を示している事が分かり、現在の動作点が安定限界点とは異なった場所に位置し、それより動作点がまだ十分に安定であると分かった。更に、季節による勾配 dV/dP の変動様相の相違を見てみると、春季・秋季いずれの場合においても現在の動作点が安定限界点とは異なった場所に位置し、十分に安定である事が分かった。また、勾配 dV/dP は時間帯によって変動しており、夜間に比べて昼間の方が勾配が急である事から夜間に比べて昼間の方が安定度が悪いと言えた。更に、季節の違いにおいて今回の測定では、春季に比べ秋季の方が安定であるという結果が得られた。

周波数領域 $PQVf$ の解析は、まず観測されるデータの内のどのデータを用いるのが最適かについて検討を行った。その結果、無効電力 Q および周波数 f に関しては、観測時にサステインド成分に隠れて Global Mode が確認しづらくなっており不適であると判断できた。有効電力 P および系統電圧 V に関しては、いずれも正確に Global Mode を同定できる事が分かった。よって周波数領域での解析では有効電力 P あるいは系統電圧 V のいずれかのデータを用いればよいと分かり、本論文では有効電力 P を検討対象として、動揺モードの日間変動、動揺モードの季節による相違、動揺モードの負荷状態による相違、動揺モードの観測点による相違について検討を行った。動揺モードの日間変動の検討では、1999年3月23日12時から1999年3月24日12時までの観測点 N1 の有効電力 P における周波数の1時間ごとの変動の推移を見て、いずれの時間帯におい

でも、この例題系統が持つ 0.35Hz と 0.55Hz の 2 つの広域動揺モードが確認されている事が分かった。ただし、それらの大きさは時間によって異なっている事も同時に分かり、この日においては、14時から15時まで N1 で観測される動揺は大きく、20時から21時では動揺は小さかったと分かった。また、14時から15時までは20時から21時までと比べて広域動揺モードの比率が大きくなっている事から、N1 付近で住宅負荷ではなく工学負荷などの容量の大きな電動機などの大きな潮流変動を伴う負荷変動が他の時間帯に比べて多く起こったのではないかと推測する事ができた。春季・秋季といった季節による相違を検討してみると、春季、秋季いずれの場合においても 0.35Hz と 0.55Hz の 2 つの Global Mode が確認できた。また、春季と秋季で FFT 処理結果の違いを見てみると、秋季の方が春季に比べて FFT のスペクトルが全体的に高めの設定となっており、じょう乱が大きかったと言えた。更に、重負荷時および軽負荷時といった負荷状態による相違について検討を行ってみた所、春季・秋季によって軽負荷および重負荷でスペクトルの大きさに差異は見られない事が分かった。また、観測点による相違について検討を行ってみた所、各観測点 N1、E1、W1、S2 の全ての観測点で共通して 0.35Hz の動揺モードと 0.55Hz の動揺モードが確認される事が分かった。また、各動揺モードのスケールを見てみると N1 が最も大きい事が分かった。更に、地区によっては共通して観測される Global Mode 以外の動揺モードも観測され、これらはその地区固有の動揺モードであると考え事ができ、これらを基にして地区ごとにグループ分けが可能となる事が分かった。

第 3 章 ニューラルネットワークによる電力システム動特性の表現

3.1. はじめに

知的工学の一つであるニューラルネットワークを用いる動きは、例えば、負荷予測、セキュリティ強化、事故時の分析、電圧安定性等において年々高まってきている。そのような中、電力システムの正確な安定度評価のためにニューラルネットワーク用いる動きも、年々注目を浴びている。本章では、フィードバック型ニューラルネットワーク・Elman ニューラルネットワークという 2 つのニューラルネットワークを用いて、有効電力 (P) および系統電圧 (V) を参照して、PV の動特性を表現する方法を提案している。提案するニューラルネットワークはいずれも、入力層、中間層、出力層の 3 層構造からなるニューラルネットワークであり、系統電圧 V を入力データとし有効電力 P を出力データとして与えている。また、提案するニューラルネットワークでは、PV の動特性をモデル化するためにニューラルネットワーク内で前者は、出力層から入力層へ、後者は中間層から入力層へそれぞれ遅延時間を持たせてデータのフィードバックをしている。更に、提案するニューラルネットワークでは、実電力システムで計測された PV のデータを用いて学習を行い、PV の動特性を表現するためのモデルを作成し、シミュレーションによりその有効性の検討を行っている。

3.2. ニューロンのモデル

単入力のニューロンは、図 3.1 のように示される。スカラー入力 p には、その強さにスカラーの結合係数 w が掛けられ、積 $w * p$ となる。ここで、重み付けされた入力 $w * p$ は、スカラー出力 a を作成する伝達関数 F の唯一の因数となる。このとき伝達関数のネット入力 n が、伝達関数 F の因数となり出力 a を作成する。また本章では、伝達関数 F に線形伝達関数 (Linear Transfer function)、および双曲線正弦シグモイド伝達関数 (Tan-Sigmoid Transfer Function) を用いている。

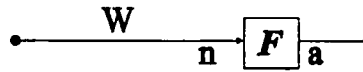


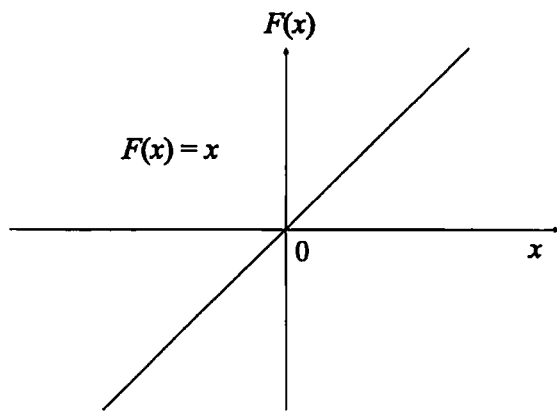
図 3.1 入出力計算

線形伝達関数 (Linear Transfer Function)

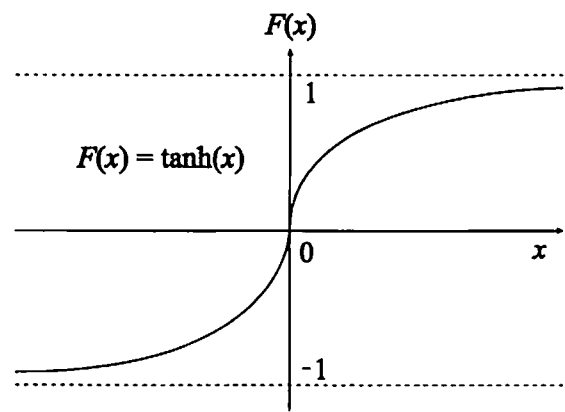
線形伝達関数は、図 3.2(a)に示すように与えられた値を単純に出力する。

双曲線正接シグモイド伝達関数 (Tan-Sigmoid Transfer Function)

双曲線正接シグモイド伝達関数は、図 3.2(b)に示すようにニューロン入力を区間 $(-\infty, +\infty)$ から $(-1, 1)$ に写像する。



(A) 線形伝達関数



(B) 双曲線正接シグモイド伝達関数

図 3.2 伝達関数

3.3. ニューラルネットモデルと学習方法

ニューロンを幾つか結合する事によってニューラルネットのモデルが出来上がる。図 3.3 のように、入力ユニットから出力ユニットまですべて順方向のみに結合されており、フィードバック結合などの相互結合の形態を持たないようなニューラルネットモデルを階層構造ニューラルネットモデル (multi-layered neural network model) と呼んでいる。

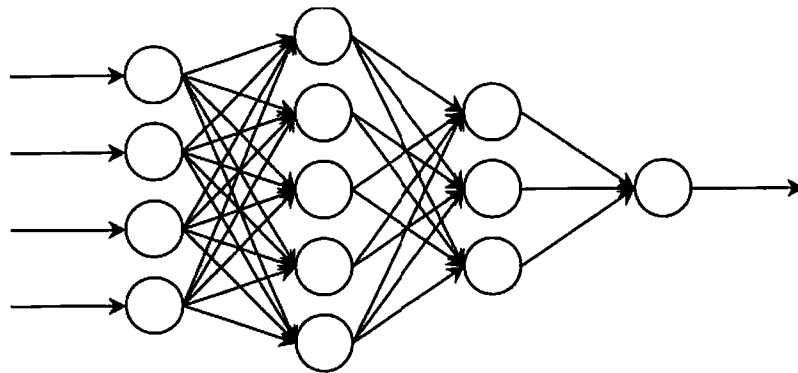


図 3.3 階層構造ニューラルネットモデル

本章では、PV の動特性を表現するためにニューラルネットモデル内にフィードバック構造を有するフィードバック型ニューラルネットワーク・Elman ニューラルネットワークという 2 つのニューラルネットワークを提案している。

3.3.1. フィードバック型ニューラルネットモデル

提案するフィードバック型ニューラルネットモデルの構造を図 3.4 に示す。

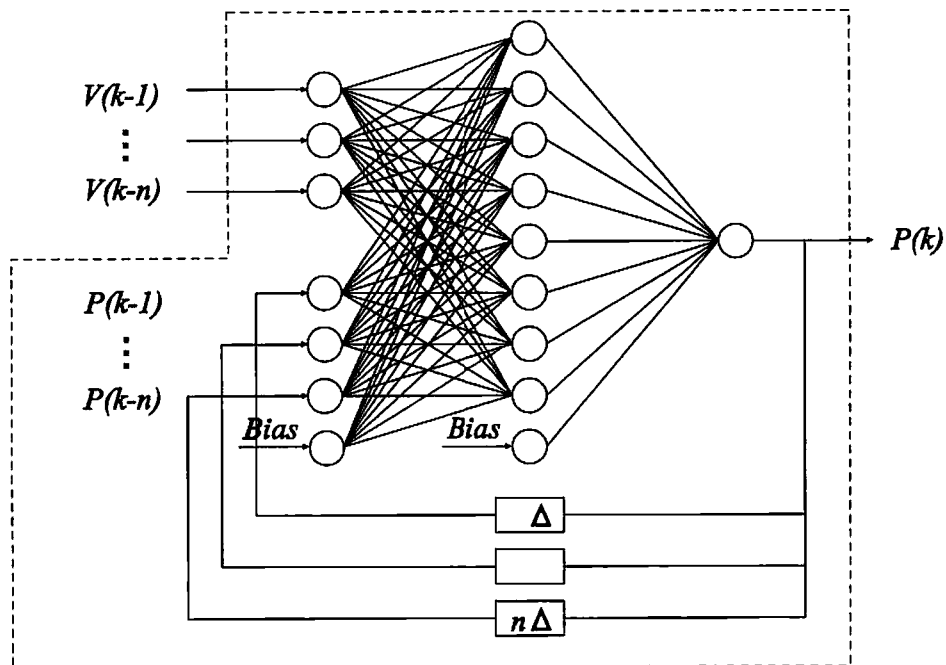


図 3.4 フィードバック型ニューラルネットワーク

図からも分かるように、このニューラルネットワークは入力層・中間層・出力層の 3 層構造をしており、PV の動特性を表現するために出力層

から入力層にかけてフィードバックループを有している。また、各ニューロンの伝達関数には、入力層と出力層に線形伝達関数、中間層に双曲線正接シグモイド伝達関数を用いている。これは、電力システムは非線形要素を数多く含むシステムであり、モデル化を行うにはモデル自体に非線形性を持たせる必要があるためである。更に、入力層と中間層には、学習効率の改善のためにバイアスを用いている。また、ここで得られるニューラルネットワークの PV の動特性は、中間層の入出力関数に非線形のシグモイド関数を用いているため、非線形の差分方程式として与えられる。この提案するフィードバック型ニューラルネットワークの差分方程式を式 (3-1) に示す。

$$P(k) = f(V(k-1), \dots, V(k-n), P^*(k-1), \dots, P^*(k-n)) \quad (3-1)$$

ここで、j 番目の出力 $P^*(j)$ ($j=k-1, \dots, k-n$) は、k 番目の出力 $P(k)$ で与える事ができる。よって、提案するフィードバック型ニューラルネットワークでは、出力 P が全てフィードバックされ入力層に与えられる事から、V のみを入力として与えればよいと分かる。式 (3-2) はフィードバックループの方程式を示している。

$$P(k) = f(V(k-1), \dots, V(k-n), P(k-1), \dots, P(k-n)) \quad (3-2)$$

式 (3-2) の $P(k)$ は、初期値のみを与え、それ以外については、全てシミュレーション結果をフィードバックしたものとなる。このフィードバックループによりシステムの PV の動特性は表現される。

提案するフィードバック型ニューラルネットワークでは、図 2.1 に示す実電力システムの 500kV 系統変電所で観測された PV の実測データを用いて学習を行っている。またここで、学習時においては図 3.4 におけるフィードバックループを考慮せず、図 3.5 に示すフィードフォワード型ニューラルネットワークで学習を行っている。学習には、逆誤差伝搬法 (Back Propagation 法: BP 法) を用いている。BP 法では、ニューラルネットの総誤差関数を最小化するため、各パターンに関する誤差関数の勾配ベクトルを計算し、その逆方向に結合係数を改良するという最急降下法 (steepest descent method) を利用している。更に、学習に用いる PV データに関しては、それぞれを単位法で表し、また、適応学習比およ

びモーメントの使用により学習効率の改善も行っている。このフィードフォワード型ニューラルネットワークで学習を行い各ノードの重みが決定される。また、ここで使用したフィードバック型ニューラルネットワークの各ノードの数は、試行錯誤の結果、入力層 7、中間層 9、出力層 1 としている。

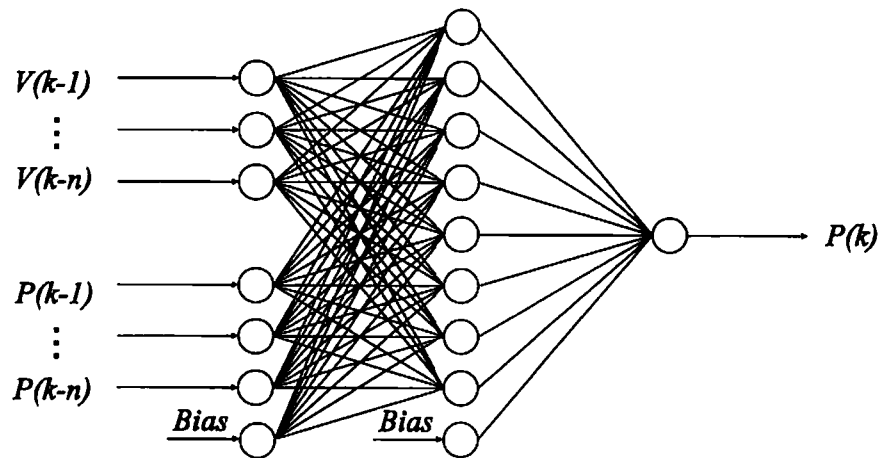


図 3.5 フィードフォワード型ニューラルネットワーク（学習時）

3.3.2. Elman ニューラルネットワークモデル

提案する Elman ニューラルネットワークの構成を図 3.6 に示す。

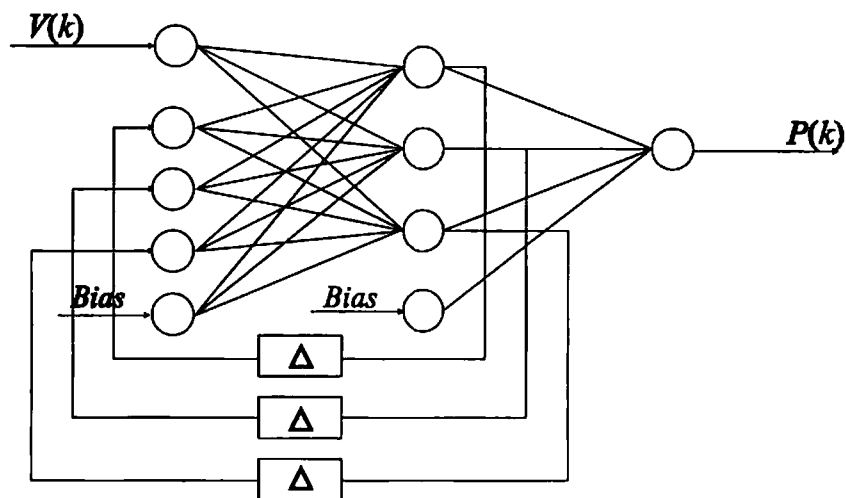


図 3.6 Elman ニューラルネットワーク

図からも分かるように Elman ニューラルネットワークもフィードバック型ニューラルネットワークと同様に入力層・中間層・出力層の 3 層構造をしており、各ニューロンの伝達関数には、入力層と出力層に線形伝

達関数、中間層に双曲線正接シグモイド伝達関数を用いている。ここで、フィードバック型ニューラルネットワークとの決定的な構造の違いは、フィードバックループがフィードバック型ニューラルネットワークの場合は出力層であったのに対して、この Elman ニューラルネットワークでは中間層にある点である事、そして更に、 k 番目の系統電圧 V の情報を用いて k 番目の有効電力 P の値が出力される事である。

この Elman ニューラルネットワークでは、入力層と中間層の間にあるフィードバックループで PV の動特性が表現されている。また、このモデルでは、直接このモデルと PV 実測データを用いて学習が行われる。学習には、フィードバック型ニューラルネットワークで用いた BP 法を用いて、更に、学習に用いる PV データに関しては、それぞれを単位法で表し、また、適応学習比およびモーメンタムの使用により学習効率の改善も行っている。また、ここで使用した Elman ニューラルネットワークの各ノードの数は、試行錯誤の結果、入力層 6、中間層 5、出力層 1 としている。

3.4. モデルの精度

図 2.1 に示す実電力システムにおける各 500kV 系統変電所には、それぞれモニタリング装置が設置されており、 $PQVf$ の実モニタリングが行われている。また、3 相瞬時電圧および瞬時電流がフィルタリング装置を介してサンプリング周波数 1.92kHz（つまり、60Hz の電力システムの場合は 1 サイクルにつき 32 サンプル）で連続的に計測され、 P および V が観測される。

学習後の提案するニューラルネットワークそれぞれに対して、 PV の動特性のモデルの精度について検討を行った。

図 3.7 は、提案するフィードバック型ニューラルネットワークを用いた際のシミュレーション結果と、有効電力観測データ P を表している。図は、横軸に時間、縦軸に有効電力を MW 単位で表記している。図中の赤の実線は観測データを、青の実線は提案するフィードバック型ニューラルネットワークの出力結果を示している。またここで、ニューラルネ

ネットワークの出力の単位が pu であるため、出力後に MW 単位に変換を行っている。この結果より、提案するフィードバック型ニューラルネットワークによる出力が観測データに非常によく似ている事が分かる。よって、提案するフィードバック型ニューラルネットワークにより有効電力 P および系統電圧 V を用いる事で正確な PV の動特性の表現が可能である事が言える。

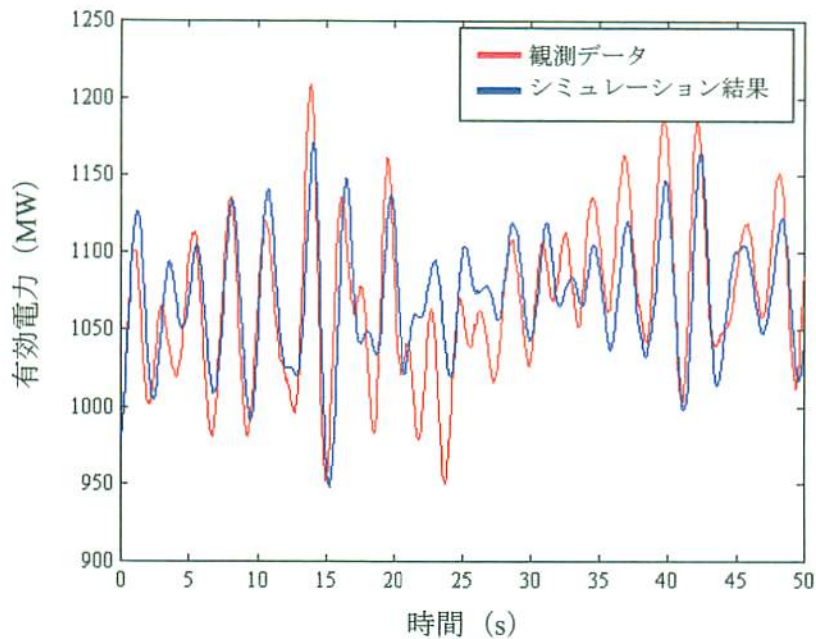


図 3.7 観測データとシミュレーション結果
(フィードバック型ニューラルネットワーク)

図 3.8 は、提案する Elman ニューラルネットワークを用いた際のシミュレーション結果と、観測データ P を表している。図中の赤の実線は観測データを、青の実線は提案する Elman ニューラルネットワークの出力結果を示している。またここで、ニューラルネットワークの出力の単位が pu であるため、出力後に MW 単位に変換を行っている。こちらの場合もフィードバック型ニューラルネットワークの場合と同様に、Elman ニューラルネットワークの出力が観測データに非常によく似ている事が分かる。よって、提案する Elman ニューラルネットワークにより有効電力 P および系統電圧 V を用いる事で正確な PV の動特性の表現が可能で

ある事が言える。

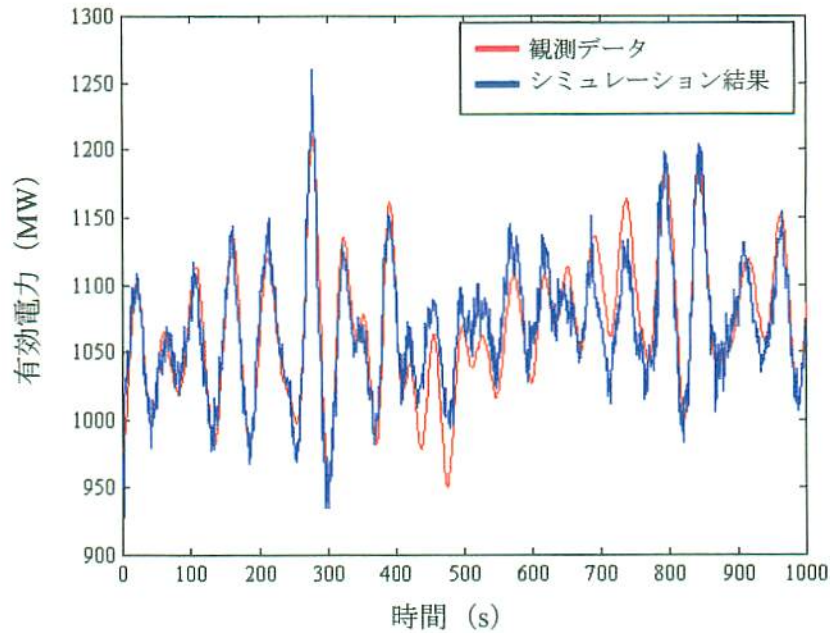


図 3.8 観測データとシミュレーション結果
(Elman ニューラルネットワーク)

表 3.1 は両モデルに対する精度を示したものである。それぞれの提案手法と観測データの間で平均二乗和誤差を取り、誤差の評価を行っている。また、ここでの誤差の単位は MW ではなく、pu である事に注意されたい。

表 3.1 誤差の評価 (平均二乗和誤差)

モデル	誤差
フィードバック型ニューラルネットワーク	$0.5695 \times 10^{-3} (\text{pu})$
Elman ニューラルネットワーク	$0.2535 \times 10^{-3} (\text{pu})$

表 3.1 から分かるように、どちらのモデルについても誤差は非常に小さい事が分かり、よって提案するニューラルネットワークを用いる事により正確に PV の動特性がモデリングされている事が分かる。

次に、図 3.9 に示す観測データに関して検討を行ってみる。図は、横軸に有効電力 P、縦軸に系統電圧 V をとる PV 散布図を示しており、そ

の散布の状況からも分かるように電力システムの状態の異なる2つの状態が存在している。学習は、図中の青の部分でのみ行い、赤の部分では学習は行わないとする。

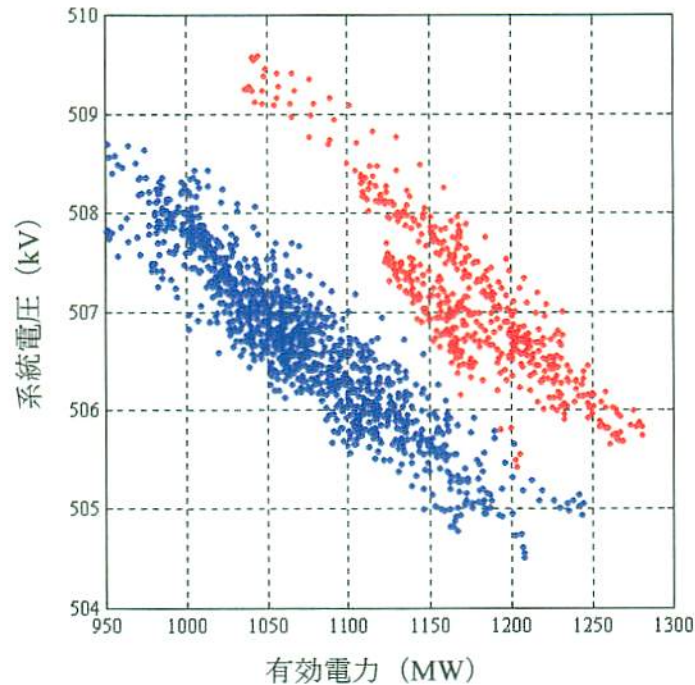


図 3.9 PV 散布図（観測点：N1）

図 3.10 は、図 3.9 の有効電力観測データ P と提案するフィードバック型ニューラルネットワークを用いた際のシミュレーション結果を示している。また、図 3.9 に示す青の部分はちょうど図 3.10 の点線より前のデータであり、図 3.9 の赤の部分は図 3.10 の点線より後のデータである。図からも分かるように学習で用いた点線より前の部分に対しては、フィードバック型ニューラルネットワークを用いる事で正確に PV の動特性が表現されている事が分かるが、動作状態の青から赤への移行後については、変動成分についての表現は正確に行えているものの、定常成分の表現ができていない事が分かる。すなわち、フィードバック型ニューラルネットワークによって出力された有効電力観測データを平行移動した形をしている事が分かる。つまり、今回提案するフィードバック型ニューラルネットワークでは、定常動作点の推移に関しては表現できている

と言える。

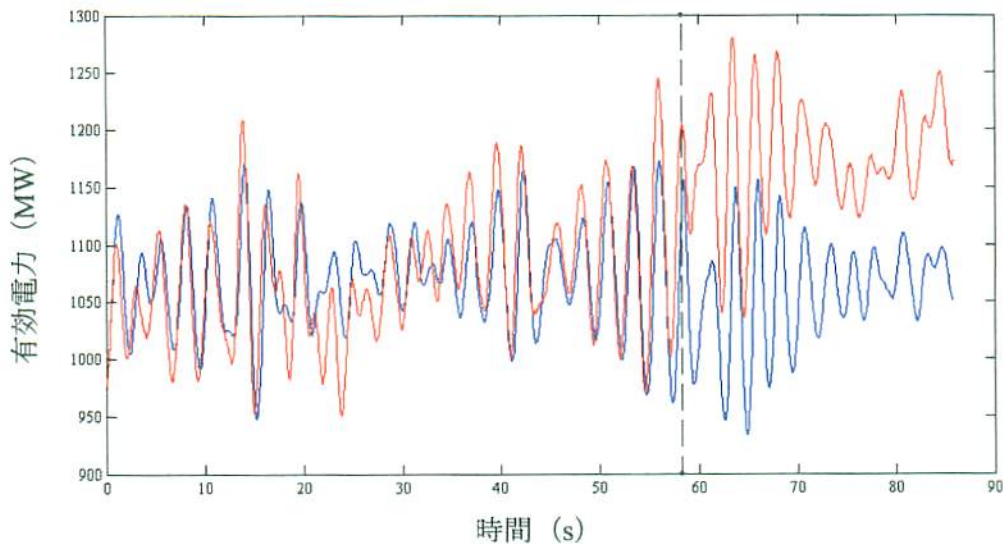


図 3.10 観測データ (赤) とシミュレーション結果 (青)
(フィードバック型ニューラルネットワーク)

3.5. まとめ

PVの動特性を表現するモデルの作成のために、フィードバック型ニューラルネットワークとElmanニューラルネットワークの2種類のニューラルネットワークの提案を行った。

提案するフィードバック型ニューラルネットワークを用いた場合において、その出力が有効電力観測データPに非常によく似ている事が分かり、その事から提案するフィードバック型ニューラルネットワークにより有効電力Pおよび系統電圧Vを用いる事で正確なPVの動特性の表現が可能である事が言えた。

提案するElmanニューラルネットワークを用いた場合において、その出力が有効電力観測データPに非常によく似ている事が分かり、その事から提案するElmanニューラルネットワークにより有効電力Pおよび系統電圧Vを用いる事で正確なPVの動特性の表現が可能である事が言えた。

更に、フィードバック型ニューラルネットワークとElmanニューラル

ネットワークそれぞれのニューラルネットワークの精度に関して、提案手法と観測データの間で平均二乗和誤差を取り、pu値で誤差の評価を行った所、どちらのモデルについても誤差は非常に小さい事が分かり、よって提案するニューラルネットワークを用いる事により正確にPVの動特性がモデリングされている事が分かった。

次に、状態がある時点で変化する電力システムに対して、提案手法で正確にPVの動特性の表現が可能かどうかについて実電力システムのデータを用いて検討を行った。検討では、状態が変更される前の有効電力Pと系統電圧Vのデータを用いてニューラルネットワークの学習を行っており、状態変更後のデータは学習に用いていない。その結果、提案するフィードバック型ニューラルネットワークを用いた場合において、学習で用いた部分に対しては、フィードバック型ニューラルネットワークを用いる事でうまくPVの動特性が表現されたが、動作状態が変更してからはうまくPVの動特性が表現されていない事が分かった。しかしながら、動作状態の変更に対しても、変動成分についての表現は正確に行えている事が分かり、よって今回提案するフィードバック型ニューラルネットワークでは、定常動作点の推移に関して、PVの動特性を表現できると言えた。

第 4 章 時間領域における実時間安定度評価手法

4.1. はじめに

電力システム内に何らかの事故が発生すると電力システム内に動揺が生じ過渡状態を経て、電力システムが安定であればこの動揺は減衰し、定常状態に戻る事ができる。しかしながら、電力システムの状態が不安定な状態にある場合では、事故発生後の過渡状態においてその動揺は次第と大きくなり最悪の場合、発電機は脱調する事になる。ここでは事故後複数波で脱調に至る場合を解析の対象として、提案する安定度評価方式の有効性を計算機シミュレーションおよびアナログシミュレータ試験により明らかにしている。

4.2. 3点比較頂点探索法による安定度評価手法

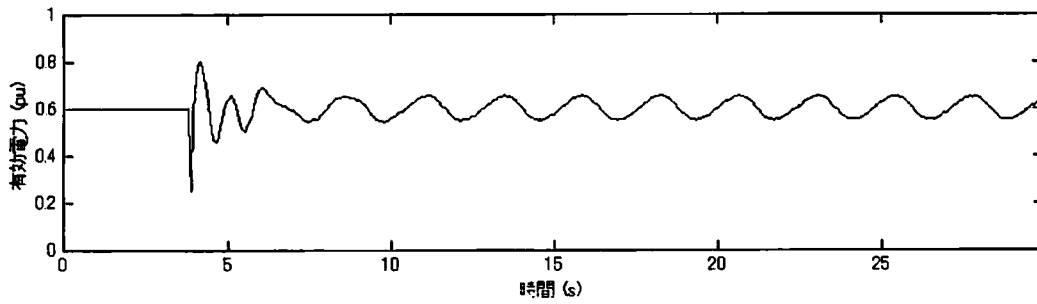
図 4.1(a)は送電線電力の観測波形の時間応答波形の例を示している。通常、送電線に何らかの外乱が発生した時に生じる電力の観測波形は、図からも分かるように単一モードではなく、種々の波形の合成波である。また、図 4.1 (b) を見ても分かるように、含まれる主な動揺モードは局所的な動揺モードである Local Mode (0.8~2.0 Hz) と、広域にわたる動揺モードである Global Mode (0.2~0.8 Hz) の 2 つである事が分かる。つまり、観測される動揺モードの信号は、これら 2 つの動揺モードの合成波とみなす事ができ、有効電力動揺 (複合動揺モード) は、例えば式 (4-1) のように表現する事ができる。

$$y = \left| A \cdot e^{-\alpha_1 t} \cdot \sin(2\pi f_1 t) + (1-A) \cdot e^{-\alpha_2 t} \cdot \sin(2\pi f_2 t + \varphi) \right| \quad (4-1)$$

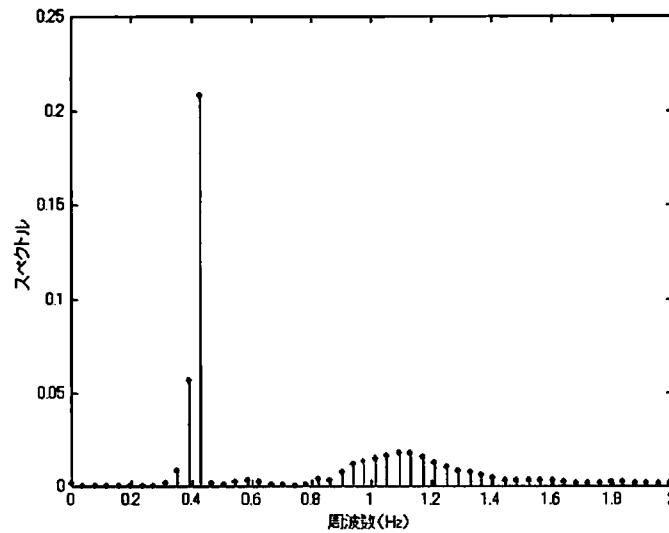
ただし、A : Global Mode の含有率、 φ : 位相差

α_1 : 減衰定数 (Global Mode)、 f_1 : 周波数 (Global Mode)

α_2 : 減衰定数 (Local Mode)、 f_2 : 周波数 (Local Mode)



(a) 時間応答波形



(b) FFT 結果

図 4.1 電力システムで観測される有効電力動揺の例

3点比較頂点探索法では、周波数帯域の異なる2つの Global Mode、Local Mode に対してローパスフィルタ、ハイパスフィルタを用いて分解を行い、動揺モードごとに減衰定数および周波数を逐次同定している。

3点比較頂点探索方法のフローチャートを図 4.2 に示す。ローパスフィルタおよびハイパスフィルタにより分解された Global Mode および Local Mode のそれぞれの信号の正の部分のみを、data としてメモリに格納する。格納された data は図 4.2 の手順 (3点比較頂点探索方法: $\alpha_{i-1} < \alpha_i > \alpha_{i+1}$) によりそれぞれ逐次頂点探索を行い $n > 0$ において頂点の値が決定した時点で波形処理が行われ減衰定数および周波数が決定する。ここで、図 4.2 に示すしきい値 (LTH) とは頂点探索を行う時のフィルタ

リング後の波形のわずかな揺れを除くためのものである。また同時に、Global Mode と Local Mode とではわずかにその構成が違っている。Local Mode の場合においてのみ事故直後の数波のピーク点が予測値をはるかに上回るためそのピーク点を計算しないためにしきい値 (UTH) を設けている。このしきい値を超えた場合、電力システムに何らかの外乱が発生したと判断する事ができ、波形観測用のトリガとして使用する事ができる。

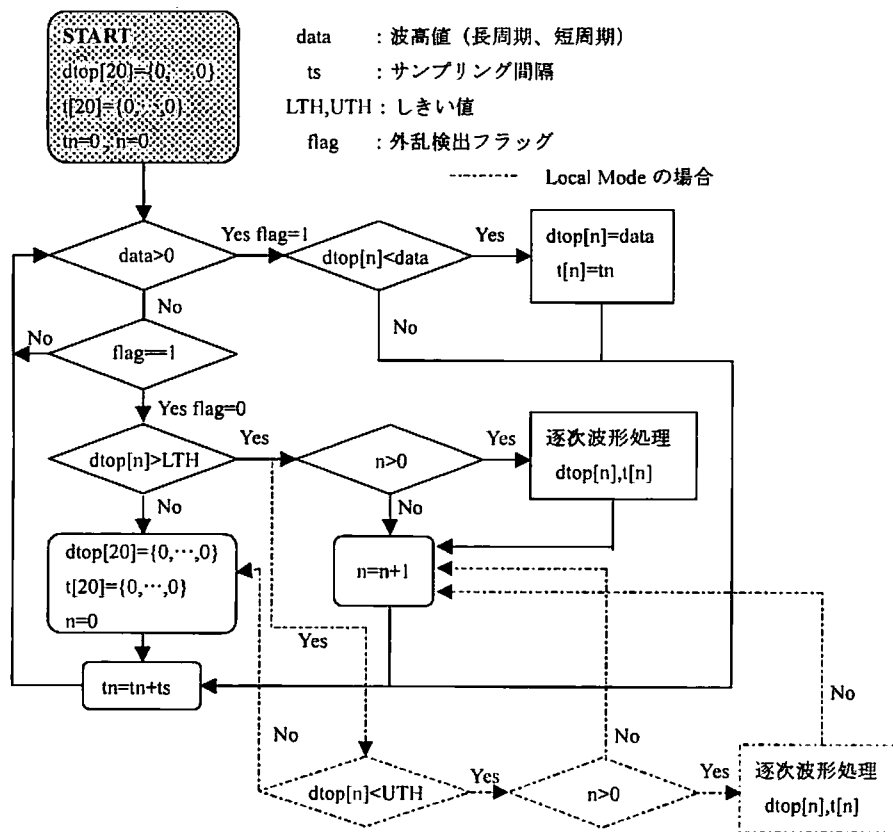


図 4.2 3 点比較頂点探索法のフローチャート

このように、3 点比較頂点探索法により逐次波形処理を行う事で、各動揺モードごとの減衰定数、および周波数を求めている。例えば、減衰定数が負の場合、出力 y は振動を繰り返し定常状態となり、0 の場合は持続振動を繰り返し、また正の場合においては振動発散していく。つまり、この減衰定数が 0 または正の状態にある時に電力システムは不安定と判断する事ができ、よって、この減衰定数を実時間で観測する事で安

定度評価は可能である事が言える。

(i) Global Mode の同定

Global Mode において、ローパスフィルタ処理により低周波成分のみを抽出した際に事故発生後の第 1 波 (図 4.3 の点 A) は短周期モードの影響もあり低めの出力となる。そのため 2 番目以降の頂点のデータを用いて逐次、3 点比較頂点探索法により波形処理を行う。(式 (4-2))

$$\alpha = \frac{\ln(dtop(n+1)) - \ln(dtop(n))}{t(n+1) - t(n)} \quad (n=1,2,3,4,\dots) \quad (4-2)$$

$$frequency = \frac{1}{t(n+1) - t(n)}$$

(ただし、 $dtop(n)$ および $t(n)$ は $n+1$ 番目の頂点の値およびその時間)

(ii) Local Mode の同定

Local Mode においては、ハイパスフィルタ処理により高周波成分のみを抽出した際に事故後に最初に閾値内に現れる 1 番目の頂点 (図 4.3 の点 a) を基準としその後 2 番目以降の頂点のデータを用いて逐次波形処理を行う。(式 (4-3))

$$\alpha = \frac{\ln(dtop(n)) - \ln(dtop(0))}{t(n) - t(0)} \quad (n=1,2,3,4,\dots) \quad (4-3)$$

$$frequency = \frac{n}{t(n) - t(0)}$$

(ただし、 $dtop(n)$ および $t(n)$ は $n+1$ 番目の頂点の値およびその時間)

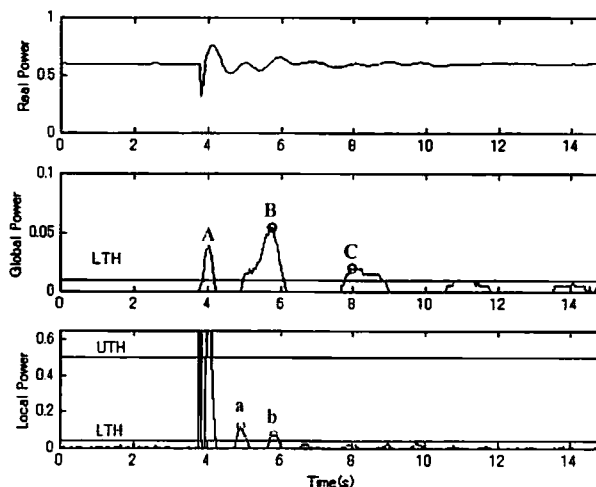


図 4.3 3 点比較頂点探索結果

4.3. 計算機シミュレーションによる提案手法の有効性の検討

本論文で提案する3点比較頂点探索法の有効性を検証するために、式(4-1)で減衰定数および周波数を指定し事故後に観測される動揺に類似した擬似信号を作成し、この信号に含まれる複合動揺モードの提案手法による正確な同定が可能であるかどうかの検討を行った。表4.1および図4.4はその時の擬似信号のパラメータ値、および時間応答波形を示したものである。

表 4.1 擬似信号の各パラメータ

設定項目	設定値	設定項目	設定値
A	0.2	φ	0
α_1	-0.01	α_2	-0.5
f_1	0.33	f_2	1.4

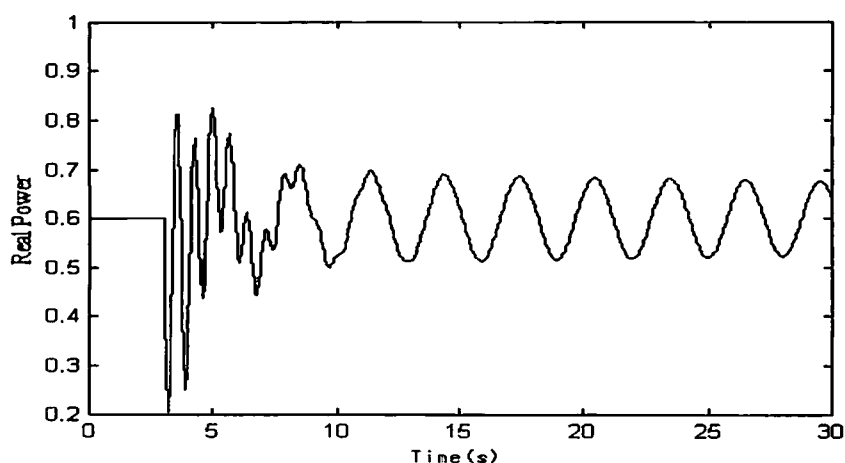


図 4.4 擬似信号の時間応答波形（設定 表 4.1 参照）

図 4.2 に示すフローチャート通りに処理を行い擬似有効電力信号を用いて3点比較頂点探索法により安定度評価を行った結果を表 4.2 に示す。この結果を見ても分かるように3点比較頂点探索法により同定した減衰定数および周波数の値は表 4.1 で設定した各パラメータとほぼ等しいことから本論文の提案手法が事故後複数波で脱調に至る場合の安定度評価に有効である事が確認できた。

表 4.2 3点比較頂点探索法を用いた安定度評価結果

	周波数		減衰定数	
	計算値	設定値	計算値	設定値
Global Mode	0.324	0.330	-0.0098	-0.010
Local Mode	1.42	1.40	-0.50	-0.50

4.4. アナログシミュレータを用いた動揺モード評価試験

図 4.5 に、例題として用いたくし形 4 機無限大母線系統を示す。この例題系統を九州電力総合研究所にあるアナログシミュレータ装置上に作成し、提案手法の有効性の検討を行っている。この例題系統には周期 1 秒程度の Local Mode と周期 3 秒程度の Global Mode が存在しており、Global Mode において電力システムは不安定となる事が分かっている。また、例題系統において Unit2 から Unit4 の出力設定値を固定し、Unit1 の出力を可変とする事で軽負荷、重負荷といった仮想的な電力システムの状態を作る事が可能である。また、Unit3 と Unit4 の間の 2 回線のうち片側 1 回線に系統幹線で起こる事故のうち最も過酷な事故である 3 相地絡事故を想定し、事故時のシミュレーションを行っている。なお、事故回線は事故後 4 サイクル（継電器動作時間 2 サイクル+遮断器動作時間 2 サイクル）で電力システムより切り離されるものとしている。

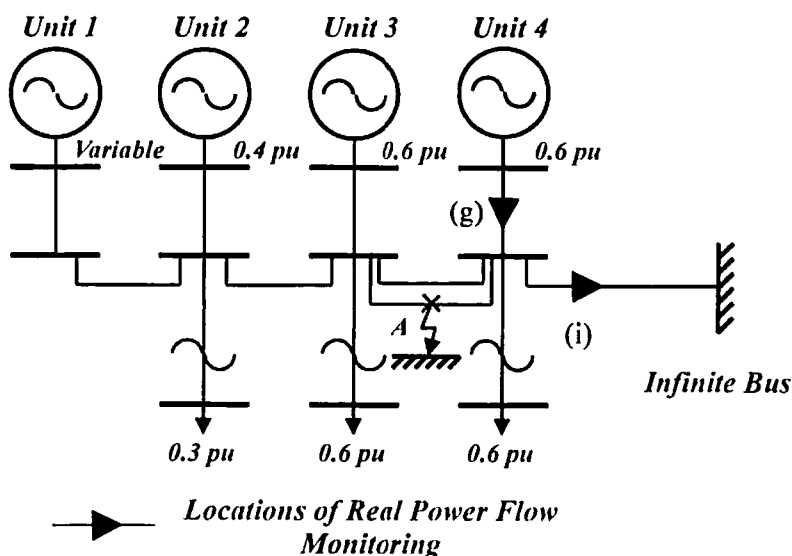


図 4.5 くし形 4 機無限大母線系統

4.5. アナログシミュレータ試験による提案手法の有効性の検討

図 4.5 の Unit1 の出力を様々に与えて例題系統を安定および不安定の状態にし、観測点 (i) および観測点 (g) で観測される有効電力信号に提案手法を適用し、安定度評価が可能であるかどうかについて検証を行っている。アナログシミュレータ試験により安定時および不安定時における 3 点比較頂点探索法で安定度評価を行った結果を表 4.3 および図 4.6 に示す。この結果を見ても分かるように全ての場合において Unit1 の出力を高め設定し電力システムの状態を悪化させた場合、つまり不安定時において、減衰定数が 0 および負になっている事から、3 点比較頂点探索法によって動揺の減衰特性が評価できている事が分かる。また、観測点 (g) のみ観測される 1.1Hz 付近の動揺モードとは異なり、観測点 (i) および観測点 (g) で共に 0.3~0.4Hz 付近の動揺モードが確認されている事からこの動揺モードが例題系統の広域動揺モードであると考えられる事ができる。更に、PSS の設置によって電力システムの状態はよくなるという事も結果より明確である。よって、提案手法が事故後複数波で脱調に至る場合の安定度評価に妥当である事が確認できた。

表 4.3 3点比較頂点探索法による安定度評価結果

(a) 全ての Unit の PSS を ON にした場合

Unit1 [pu]	観測点 (g)				観測点 (i)			
	Global Mode		Local Mode		Global Mode		Local Mode	
	freq.	dump.	freq.	dump.	freq.	dump.	freq.	dump.
0.30	0.350	-0.363	1.110	-0.396	0.400	-0.517	—	—
0.35	0.351	-0.355	1.110	-0.392	0.400	-0.515	—	—
0.40	0.357	-0.290	1.110	-0.382	0.388	-0.418	—	—
0.45	0.476	-0.437	1.050	-0.445	0.372	-0.315	—	—
0.50	0.444	-0.450	1.110	-0.523	0.351	-0.205	—	—
0.55	0.345	-0.239	1.110	-0.279	0.339	-0.130	—	—
0.60	0.316	0.013	1.180	-0.095	0.317	0.015	—	—

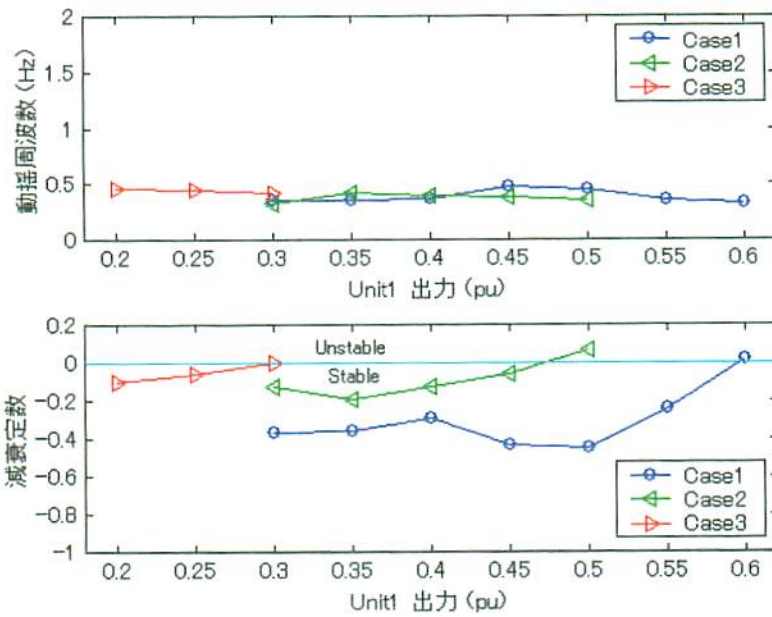
(b) Unit4 のみ PSS を OFF にした場合

Unit1 [pu]	観測点 (g)				観測点 (i)			
	Global Mode		Local Mode		Global Mode		Local Mode	
	freq.	dump.	freq.	dump.	freq.	dump.	freq.	dump.
0.30	0.328	-0.123	0.598	-0.298	0.383	-0.265	—	—
0.35	0.420	-0.192	0.967	-0.447	0.384	-0.200	—	—
0.40	0.395	-0.128	1.180	-0.467	0.374	-0.119	—	—
0.45	0.371	-0.055	1.110	-0.374	0.362	-0.039	—	—
0.50	0.343	0.063	1.180	-0.226	0.348	0.052	—	—

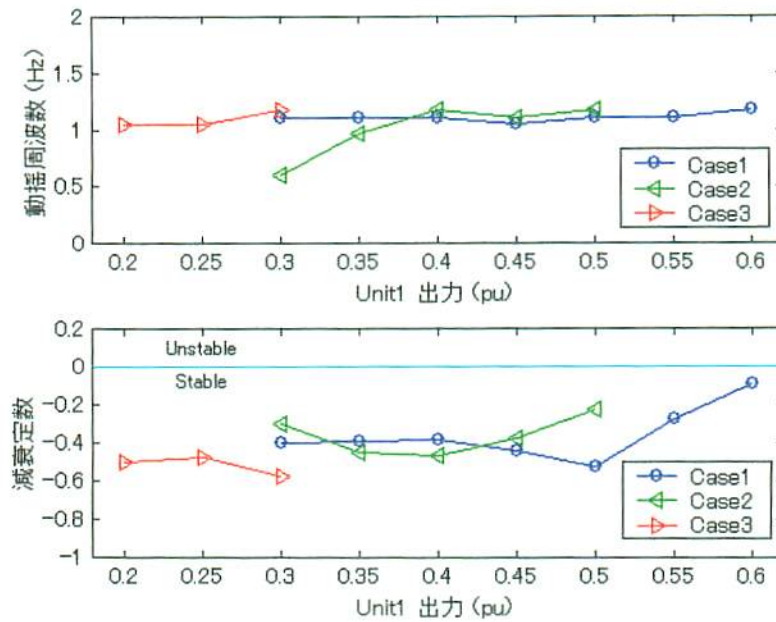
(c) Unit1、Unit4 のみ PSS を OFF にした場合

Unit1 [pu]	観測点 (g)				観測点 (i)			
	Global Mode		Local Mode		Global Mode		Local Mode	
	freq.	dump.	freq.	dump.	freq.	dump.	freq.	dump.
0.20	0.468	-0.102	1.050	-0.500	0.437	-0.121	—	—
0.25	0.448	-0.061	1.050	-0.477	0.429	-0.058	—	—
0.30	0.417	0.000	1.180	-0.576	0.418	0.004	—	—

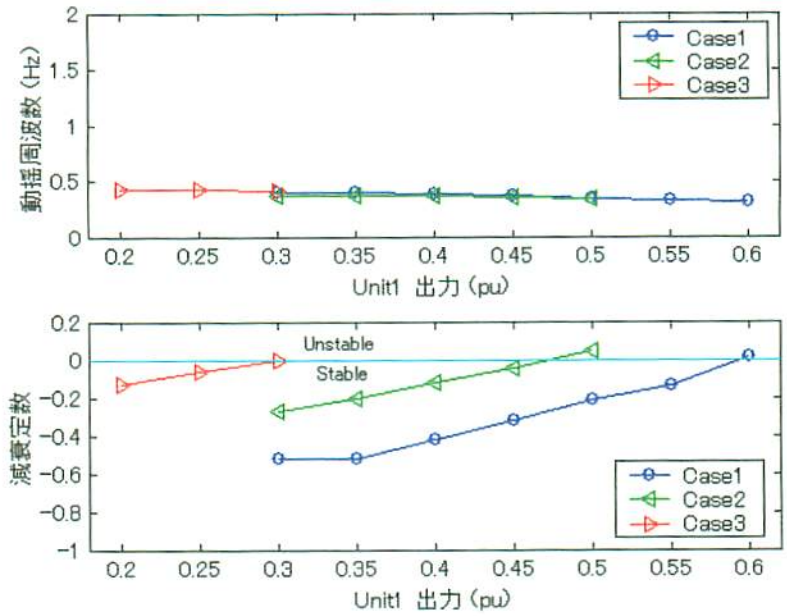
freq. (周波数) dump. (減衰定数)



(a) 観測点 (g) Global Mode



(b) 観測点 (g) Local Mode



(c) 観測点 (i) Global Mode

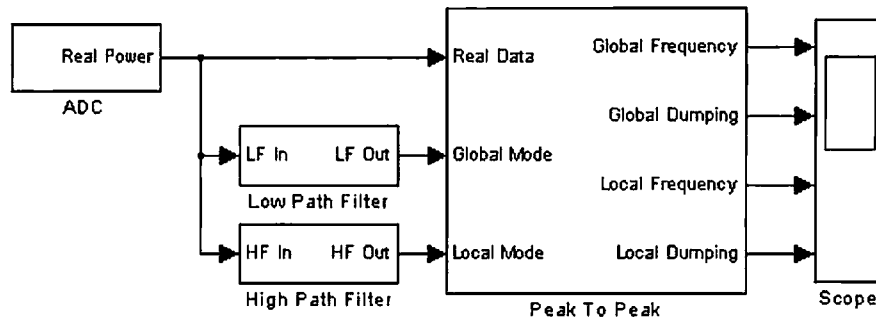
- Case1: 全ての Unit の PSS を ON にした場合
- Case2: Unit4 のみ PSS を OFF にした場合
- Case3: Unit1、Unit4 のみ PSS を OFF にした場合

図 4.6 3点比較頂点探索法による安定度評価結果

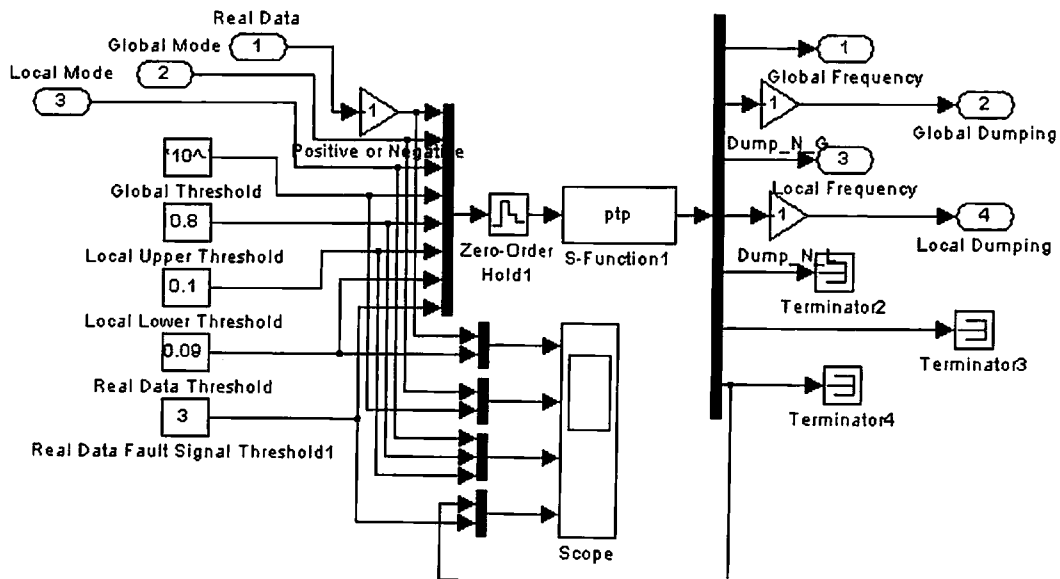
4.6. 実時間 3点比較頂点探索法の設計

MATLAB/Simulink および、dSPACE 社の提供する DSP Board の使用により提案手法の実時間処理が可能となる。図 4.7(a)は、MATLAB/Simulink により作成した 3点比較頂点探索法のブロック図を示したものである。図中の Peak to Peak ブロックは、3点比較頂点探索法により Global Mode と Local Mode の周波数および減衰定数を算出するブロックであり、Low Pass Filter および High Pass Filter は、それぞれ Global Mode および Local Mode に分解するブロックである。更に、ADC では DSP Block の AD 変換部から有効電力信号が取り込まれる。また、Peak to Peak ブロック内部は図 4.7(b) に示すように S-function で書かれた ptp 関数ブロック (3

点比較頂点探索法アルゴリズム)と閾値を指定する Constant ブロックからなっている。このように、ブロック図を作成し、Real Time Workshop を用いて C コードを作成しビルドする事で MATLAB/Simulink 上に作成したプログラムを DSP Board 上で実時間で実行する事が可能となる。図 4.8 は、dSPACE 社の提供する Control desk でモニタリングパネルを作成したものである。図を見ても分かるように、現時点での (Local Mode は消滅し、Global Mode のみ存在している) 状態をうまく同定できている事が分かる。更に、①、②からこのシミュレーション時間にかかる時間は、指定したサンプリング時間よりも短い事から実時間で実行できている事が分かる。

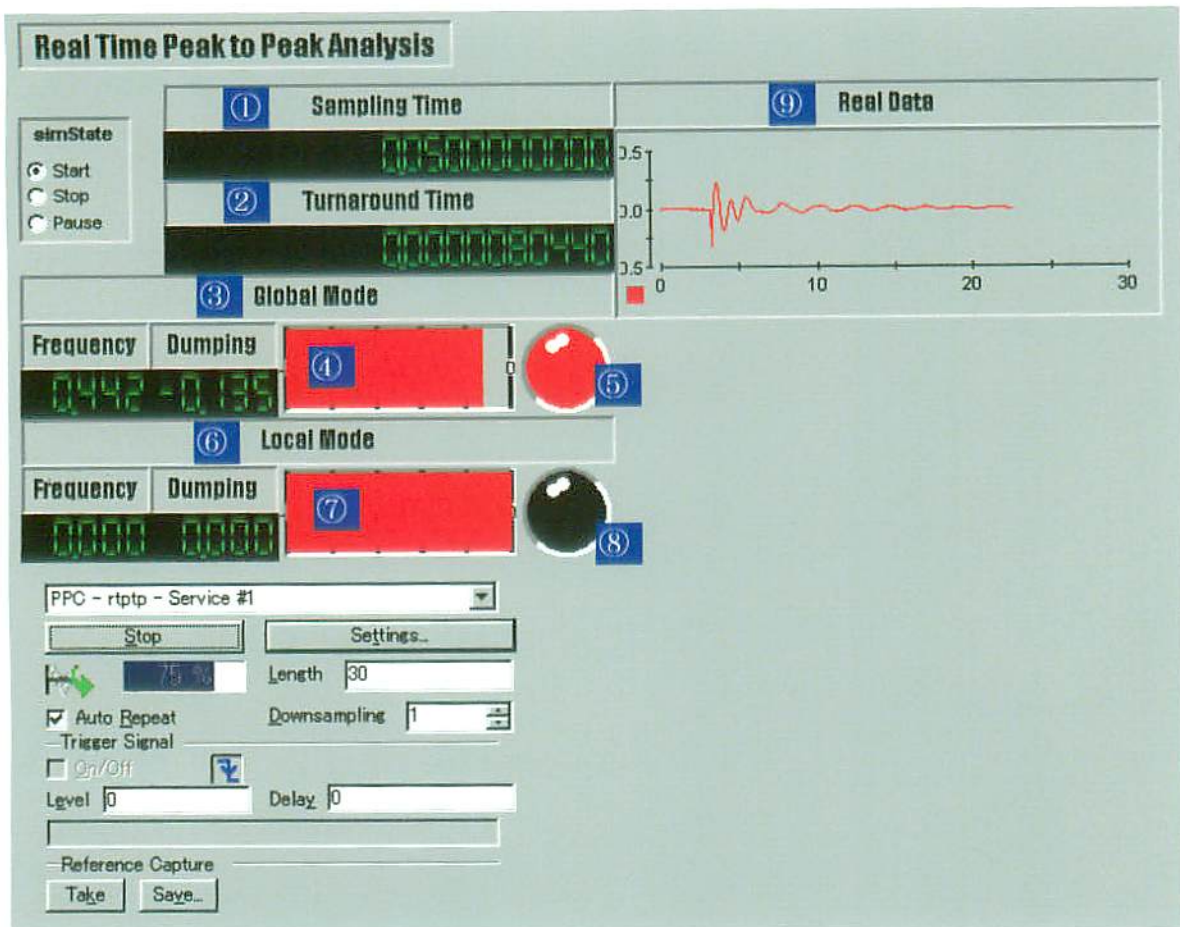


(a) Model Root



(b) Peak to Peak

図 4.7 3 点比較頂点探索法のブロック図



番号	備考
①	シミュレーションのサンプリング時間
②	1回のシミュレーションにかかる時間
③	Global Modeの周波数、減衰定数の算出結果
④	Global Modeの減衰定数のバー表示（最小-1、最大0）
⑤	Global Mode検出シグナル（検出時は赤）
⑥	Local Modeの周波数、減衰定数の算出結果
⑦	Local Modeの減衰定数のバー表示（最小-1、最大0）
⑧	Local Mode検出シグナル（検出時は赤）
⑨	有効電力データ

図 4.8 Control desk

4.7. まとめ

本章では、電力システムを不安定方向へと移行させる要因の一つである事故後複数波で脱調に至る場合について3点比較頂点探索法を提案し、計算機シミュレーションによる有効性の検討およびアナログシミュレータ試験による有効性の検討の2つを行った。まず計算機シミュレーションによる有効性の検討では、既知のパラメータを入力信号として同定を行った結果、減衰定数および周波数の各パラメータは設定した既知のパラメータとほぼ等しい事が分かり、提案手法の有効性が確認された。更に、アナログシミュレータ試験により、提案手法の有効性の検討を行った結果、提案手法により同定した減衰定数がUnit1の出力を低めと設定した時には負の値を持ち、Unit1の出力を高めに設定した時にはほぼ0に近い値を持つ事が分かった。つまり、Unit1の出力を上昇させる事で、電力システムの状態が悪化したという事を正確に評価できている事が言えた。よって、本手法が事故後複数波で脱調に至る場合の解析に有効である事が言えた。更に今回検討に用いた例題系統では0.3~0.4Hz付近にGlobal Modeが存在する事が分かった。また、MATLAB/Simulinkおよび、dSPACE社の提供するDSP Boardの使用により提案手法の実時間処理が可能となった。

第 5 章 周波数領域における実時間安定度評価手法

5.1. はじめに

本章では電力システムの安定度をオンラインで評価するために、FFT を基にした周波数領域での動揺モードの同定手法を提案している。電力システムで観測される有効電力潮流には、電力システムに存在する複数の動揺モードが含まれており、その動揺モードを同定する事で電力システムの安定性を評価する事が可能となる。本論文では、この電力システムの安定性評価をオンラインで実行するためのシステム開発を主たる目的としている。そこでオンラインでの動揺モード同定のために、実時間で FFT 処理を連続的に行う方式（以下、Real Time FFT）を提案し、個々の動揺の時間的な推移、すなわち、個々の動揺の大きさおよびその周波数の時間的な推移のオンラインでの観測を可能としている。更に、ファジィ推論を用いた複合動揺モードの分解手法を提案し、複合動揺モードに含まれる個々の動揺を対象とした安定性の評価を可能としている。なお本章では、提案手法の有効性について検証するために、擬似信号および、実電力システムでの有効電力潮流観測データを基にして、開発した Real Time FFT で実時間シミュレーションを実施している。

また、本手法で得られるファジィ推論による複合動揺モード分解結果を基に、対象とした実電力システムの各地区における有効電力潮流の動揺様相の類似度(コヒーレンシ: Coherency)の解析を行い、実電力システムにおける動揺様相を明らかにするとともに、広域安定度評価のための観測装置の最適設置点の選定手法についても検討を行っている。

5.2. 実電力システムでの変動様相

図 5.1 は、図 2.1 の実電力システムで観測される安定時のじょう乱の時間応答波形の例を示したものである。この有効電力潮流データに対して、第 4 章で提案した 3 点比較頂点探索法を適用すると図中の②では安定と評価しても、①では不安定と評価してしまい、誤った結果が出力される事となる。つまりこの事から、3 点比較頂点探索法では事故後不安

定となる場合の安定度評価は可能であっても、動態不安定となる場合の解析は不可能である事が分かる。そこで、この動態不安定となる場合の解析に対して新たに別の手法を提案する必要がある。

さて、ここで図 5.1 は時間領域で見るとランダムに変動する波形としか映らないのであるが、これを周波数領域で見ると図 5.2 のようにある特定の周波数成分が多く含まれた複合動揺モードである事が分かる。この事から、実電力システムで動態不安定時の解析を行うには時間領域で解析を行うのではなく周波数領域で解析を行った方が望ましいと思われ、本章では周波数領域において現在広く周波数解析に用いられる FFT に新たに時間軸を設け、3次元化する事によって対象とする有効電力動揺内に存在する Local Mode および、Global Mode を Real Time で観測する手法を提案している。この手法を用いる事により、動態不安定となる場合の非周期的な信号に対しても、その信号内に含まれる全ての動揺モードを同定する事が可能となり、そのスペクトルの大きさの変動から電力システム内に悪影響を及ぼす動揺モードの特定や安定度評価が可能である事が予測される。

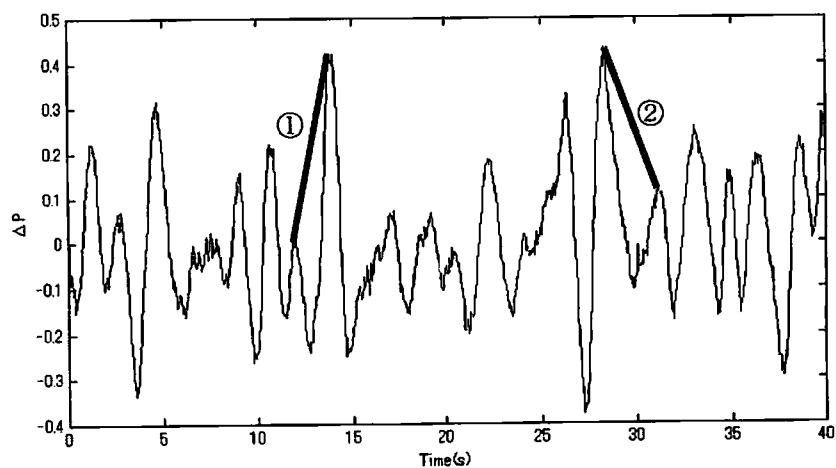


図 5.1 有効電力実測データ (N1)

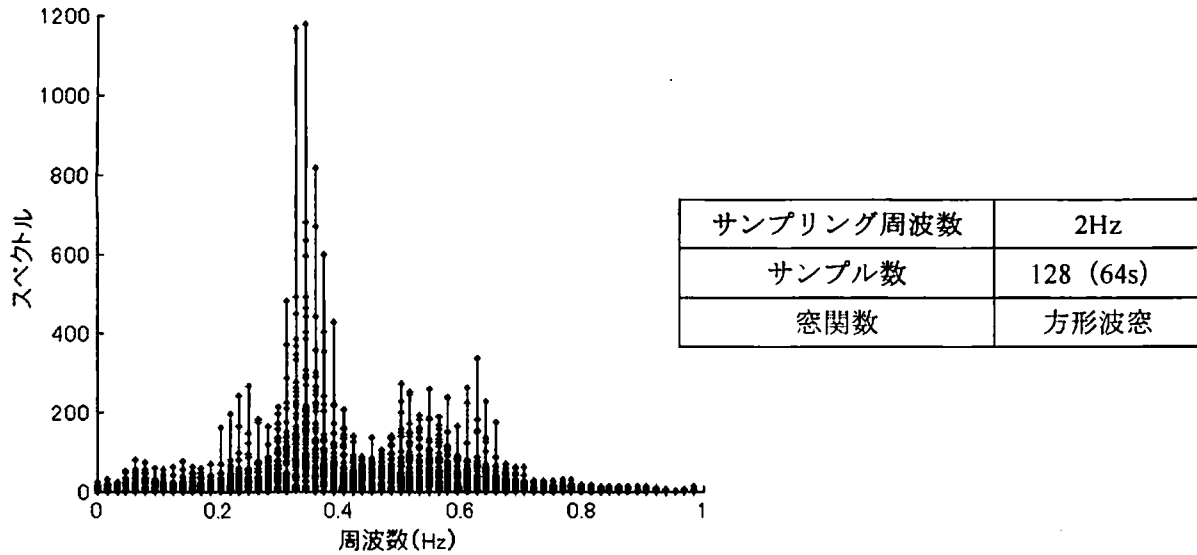


図 5.2 有効電力 FFT 処理結果 (N1)

5.3. Real Time FFT による安定度評価手法

提案する Real Time FFT は、現在広く一般的に周波数解析に用いられる FFT に新たに時間軸を設け、3次元化する事によって対象とする有効電力動揺内に存在する個々の動揺モードの時間的な推移、すなわち、個々の動揺の大きさおよびその周波数の実時間での観測を実時間で行うものである。更に、FFT に使用する Window の効果ならびにファジィ推論を用いた複合動揺モードの分解手法を提案し、個々の動揺を対象とした動揺モードの評価を可能としている。本章では、擬似信号および実電力システムでの有効電力潮流観測データを基にして実時間シミュレーションを行い提案手法の有効性を検証している。

提案する Real Time FFT では、図 5.3 に示すように DSP ボードの使用によって実時間処理を行う事が可能となっている。まず、この DSP ボード上の AD 変換インターフェースより外部信号（有効電力潮流信号）が DSP ボード上に連続的に指定したサンプリング周波数にて取り込まれ、Reset Filter によってサステインド成分（電力システム内の緩やかな需要電力変動に応じた周期 10 秒以上の緩やかな有効電力潮流の変動成分）とフリッジ分（電力システムの安定度評価の対象となる周波数が例えば

0.3Hz 以上の成分) を分離するためのフィルタリング処理が行われる。このフィルタリング処理により抽出されたフリンジ成分は次に Matrix 作成ブロックへと渡され、FFT 処理が可能ないように行列に変換される。そして、その後 Window Function(窓関数)ブロックを経て、Real Time FFT 処理ブロックへと渡され、最終的にファジィ推論による動揺モード分解ブロックへと渡り安定度評価を行っている。

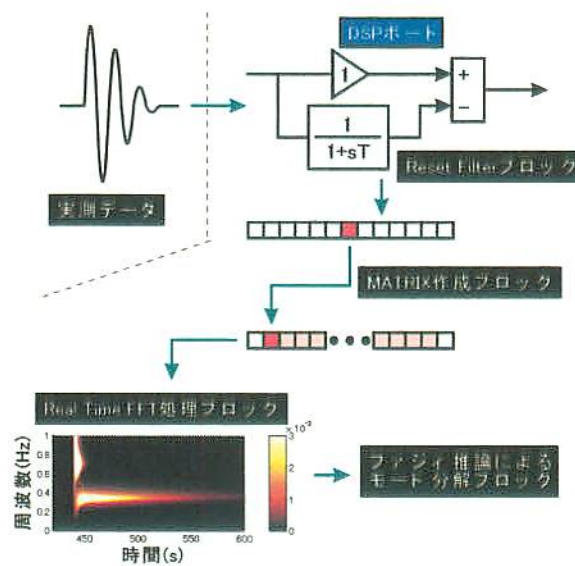


図 5.3 Real Time FFT 処理

一般に、FFTを行う際の問題点として連続信号を離散化する事による、無関係信号の周波数成分の混入からくる「エリアシング誤差」、無限信号内の一部の有限サンプリングによる「Window 誤差」、そしてこの Real Time FFT 特有の出力結果の「同時性」が考えられる。エリアシング誤差ならびに、Window 誤差に関しては一般的によく知られているためここでは説明を省略し、ここでは Real Time FFT 特有の出力結果の同時性についてのみ説明を行う。方形波窓のようにある一定の時間重みのかかった時間窓を用いて FFT 処理を行う場合、得られる FFT 処理結果は時間窓中の動揺の相対的な評価しか得る事ができない。更に、Real Time FFT 処理を行う信号中の瞬間的な動揺モードの変動に対して、その動揺モードを見落とさないようにするためには、入力データの現時点での動揺をとらえる、つまり FFT 処理における同時性の改善を行う必要がでてくる。

また、本論文で対象とする系統幹線における有効電力潮流は時々刻々と変動しているため、電力システムの安定度に何らかの影響を及ぼしているかもしれない動揺モードの変動に対してその動揺モードを逸早く察知し、見落とさないようにするためには、入力データの現時点での動揺をとらえる事が重要となってくる。よって、Real Time FFTにおける窓関数を設計する際に、この同時性を第一に考え最適と思われる窓関数を選択する必要がある。ここでは、表 5.1 に示す各種窓関数を用いて、同時性について検討を行い Real Time FFT 処理に用いる窓関数の選択を行っている。

表 5.1 窓関数とその特徴

窓関数	特徴
方形波窓 (rectangular window)	メインローブが急峻であるがサイドローブの最大値が大きくなってしまう
ハミング窓 (Hamming window)	メインローブも比較的急峻で、サイドローブの最大値が小さい
ブラックマン・ハリス窓 (Blackman-Harris window)	時間長を長くできる際に、小さな周波数成分まで正確に求められる
Forgetting Factor 窓 (Forgetting Factor window)	FFT における同時性の改善のため作成した、オリジナルの窓関数

更に、この表 5.1 にでてくる Forgetting Factor 窓とは、式 (5-1)、図 5.4 に示すように現在の情報が優先されるように現在から過去へと時間重みを考慮した窓関数の事である。つまり、Real Time FFT 処理における同時性改善のために独自に提案した窓関数の事を言う。

$$w_n(n) = \begin{cases} 1, & (0 < n < M) \\ 0, & (n \leq 0, M \leq n) \end{cases}$$

(Log関数)

$$w_f(n) = w_n(n) \cdot \exp\left(-\frac{1}{7.5}(M-n)\right), \quad \left(0 \leq n \leq \frac{M}{16}\right) \quad (5-1)$$

(ハミング窓)

$$w_f(n) = w_n(n) \cdot e^{-\frac{1}{M} \cdot \alpha \cdot (2M-n)}, \quad \left(\frac{M}{16} < n \leq M\right)$$

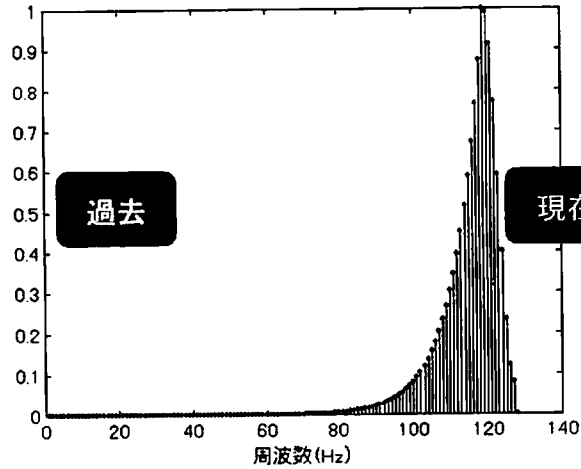


図 5.4 Forgetting Factor 窓

本研究で行った同時性の評価方法について説明する。図 5.5 のようなある時刻で式 (5-2) の疑似信号を注入し、そのデータを用いて各窓関数で Real Time FFT 処理を行う。当然、疑似信号は無限に続く持続振動であるため、あるところで Real Time FFT 処理結果のスペクトルは図 5.5 のように飽和する。この時の信号注入からスペクトルが飽和にいたるまでの時間を求め、それが短ければ短いほど同時性が良いと判断する。

$$Y = \sin(2\pi f_1 t) + 0.5 \sin(2\pi f_2 t) \quad (5-2)$$

$$(f_1 = 0.1 [Hz], f_2 = 0.5 [Hz])$$

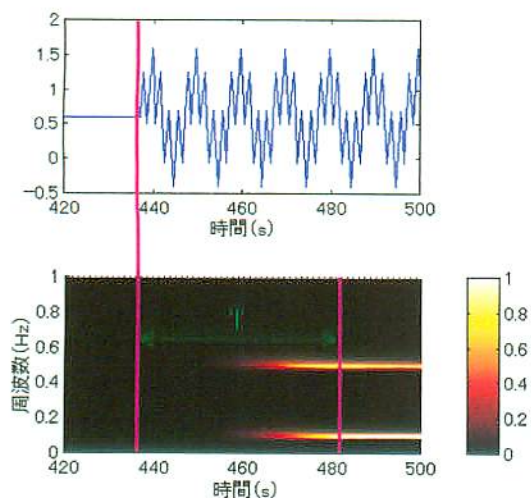
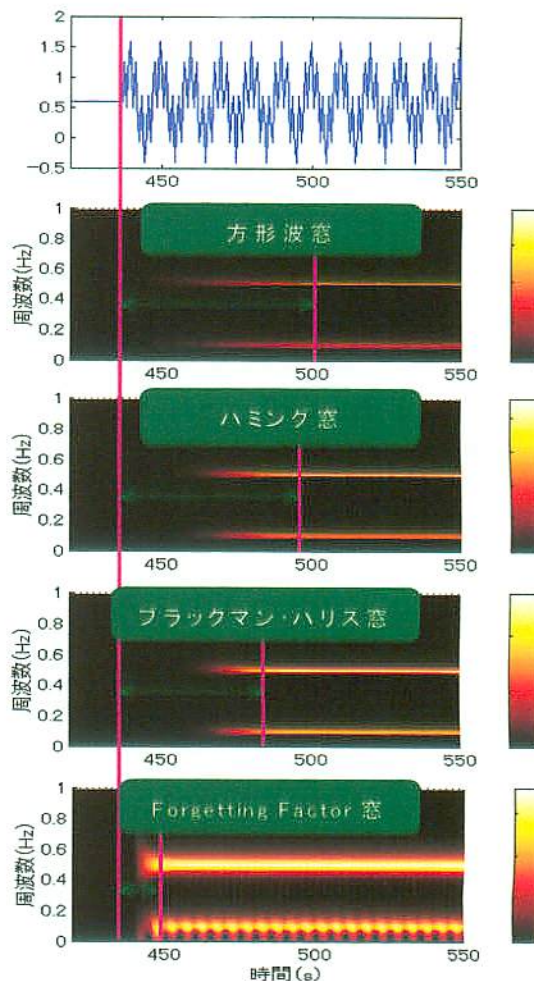


図 5.5 同時性についての検討

表 5.2 同時性の評価結果

窓関数	T (s)
方形波窓	65
ハミング窓	60
ブラックマン・ハリス窓	45
Forgetting Factor window	10



サンプリング周波数	2Hz
サンプル数	128 (64s)

図 5.6 同時性の評価結果

この時、表 5.2、図 5.6 から分かるように同時性のみを評価の対象とした場合、Forgetting Factor 窓が最も良い事が分かる。しかしながら、図 5.6 を見ても分かるように Forgetting Factor 窓を用いる事によって得られる Real Time FFT 処理結果は確かに同時性の面で優れてはいるものの、その反面サステインド成分においてスペクトルが大きく波打ったり、メインローブが急峻ではなく鈍っている事が分かる。そこで、Real Time FFT 処理結果の精度改善を行う事が必要とされ、ここでは Reset Filter の時定数を変更しサステインド成分 (0Hz~0.2Hz) を除去して、フリッジ成分 (0.2Hz~0.8Hz) のみを取り出したり、更にはファジィ推論による動揺モード分解し、安定度評価を行っている。

有効電力動揺には複数の動揺モードが含まれており、各動揺モードは電力システムの状態により変化する事になる。ここでは、ファジィ推論により、複合動揺モードを個々の動揺モードへと分解する手法を提案している。更に動揺モード分解後の結果を基にして個々の動揺モードを対象とした実時間での安定度評価の可能性について検討を行っている。このファジィ推論による複合動揺モード分解の手順を以下に示す。

ファジィ推論による複合動揺モード分解手順

ステップ 1: 有効電力潮流の長期観測データに対する FFT 処理結果から電力システム内に存在する主要な動揺モードを抽出する。ここで FFT 処理の対象として長期観測データを用いる理由は、対象としている系統幹線における有効電力潮流に現れる動揺モードが需要電力の変動、電力システムの運用状態に応じて時々刻々と変動しているため、数秒といった短い時間での観測データでは必ずしもすべての動揺モードを抽出する事ができないと考えられるためである。そのため、十分に長い観測データ（例えば数時間の長期観測データ）を対象として FFT 処理を行う事により電力システムに存在する主要な動揺モードを抽出している。また、このとき FFT 処理に用いる窓関数は、メインローブが緩やかな場合であっても窓長が十分に長い場合急峻なメインローブを持つ事になる。そのため、この場合はなるべくサイドローブが少ない窓関数が望ましいので、ブラックマン・ハリス窓を用いる事にする。

ステップ 2: 複合動揺モードを個々の動揺モードに分解するためのファジィ推論に用いる台形型メンバーシップ関数を定義する。この台形型メンバーシップ関数の決定に際しては、まずステップ 1 の結果より、台形型メンバーシップ関数の個数およびその中心周波数の決定を行う。更に、台形型メンバーシップ関数の上底幅の決定を行う。またここで、隣接するメンバーシップ関数は図 5.7 に示すように重なっており、各周波数において総和は 1 となっている。

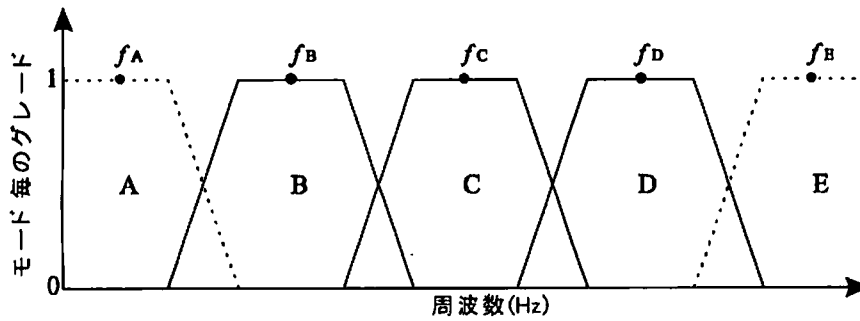


図 5.7 台形型メンバーシップ関数

ステップ 3: 実時間 FFT 処理結果と、ステップ 2 で定義した個々の台形型メンバーシップ関数により式 (5-3) を用いて、特定の中心周波数を持つ動揺モードごとに、その変動の大きさを評価するための評価値 (F_i) を算出する。

$$F_i = \int RTFFT(f) \cdot MF_i(f) df \quad (5-3)$$

$MF_i(f)$: 周波数 f における i 番目の中心周波数に対して定義された台形型メンバーシップ関数の値

$RTFFT(f)$: 実時間 FFT 処理により得られた周波数のパワースペクトラムの大きさ

5.4. 系統幹線における動揺モードのオンライン同定

ここでは、図 2.1 に示す例題系統における 500kV 幹線にて実測された連系線、および幹線における有効電力潮流データを対象として、提案する実時間 FFT 処理を行った結果について検討し、提案する実時間 FFT 処理により、動揺モードのオンライン同定が可能である事を明らかにしている。系統幹線にて観測した有効電力潮流の観測信号に対してフィルタリング処理を行った後の時間応答波形の代表例を図 5.8 に示す。

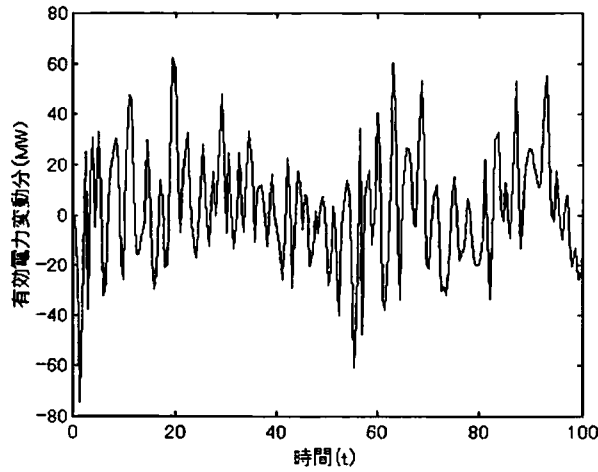


図 5.8 連系線における有効電力のFRINGE成分
(フィルタリング処理後)

この図からも分かるように、電力システム内に常時存在する負荷変動のため幹線の有効電力潮流は時々刻々と変動している事が分かる。次に、FRINGE成分抽出のためのフィルタリング処理後の連系線、および幹線での有効電力潮流の長期実測データに対してFFT処理を行う。そのFFT処理結果をそれぞれ図5.9に示す。

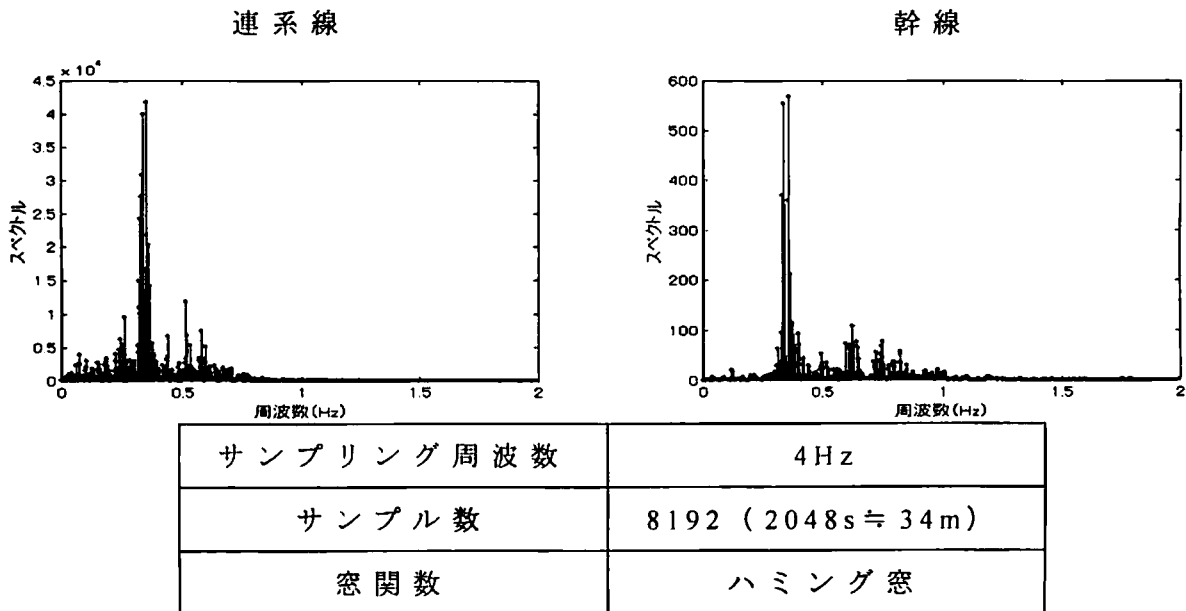


図 5.9 連系線および幹線での長期観測データに対するFFT処理結果

図から明らかなように、ともに0.35 Hzおよび0.55 Hz付近に主要な動揺モードが確認される。前者は全系の動揺モードであり、後者は電力

システム内の地区間の動揺モードである。また、ここで長期観測データを用いた FFT 処理結果からも分かるように観測されるデータ中に、周波数 1.0 Hz を超える周波数の動揺モードがほとんど確認されていない事からサンプリング周波数を現在の 0.25 s から 0.5 s へと変化させても得られる結果はほとんど変わらない事が言える。よって、以後はサンプリング時間を 0.5 s として検討を行うものとする。この結果を基にしてファジィ推論による動揺モード分解で使用する台形型メンバーシップ関数を図 5.10、表 5.3 のように決定する。

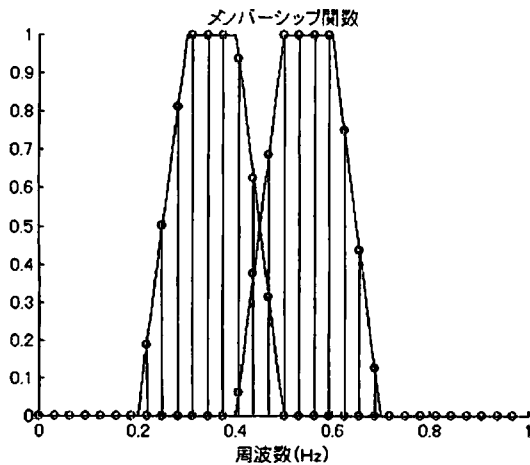


図 5.10 メンバーシップ関数

表 5.3 メンバーシップ関数

中心周波数	0.35 Hz
上底	[0.30 0.40]
下底	[0.20 0.50]
中心周波数	0.55 Hz
上底	[0.50 0.60]
下底	[0.40 0.70]

連系線および幹線での有効電力の観測信号に対するこのファジィ推論による動揺モード分解結果を、それぞれ図 5.11 に示す。この結果を見ても分かるように、電力システム内部の幹線での有効電力変動は連系線での有効電力変動に比べて小さい事が分かる。また、0.35 Hz および 0.55 Hz を中心周波数とする各動揺モードとも、その評価値は時々刻々と変動しているものの単調に増加傾向を示す箇所が見当たらない事から、安定であると言える。また、数箇所では評価値に急峻な変動部分が見られるがこれは電力システム内に大きな負荷変動が起こったためであると考えられる。更に、図より動揺モードの大きくなる時刻は、連系線および幹線でほぼ同じ時刻である事からこの動揺モードが電力システム全体に対する動揺モードである事が分かる。

連系線

幹線

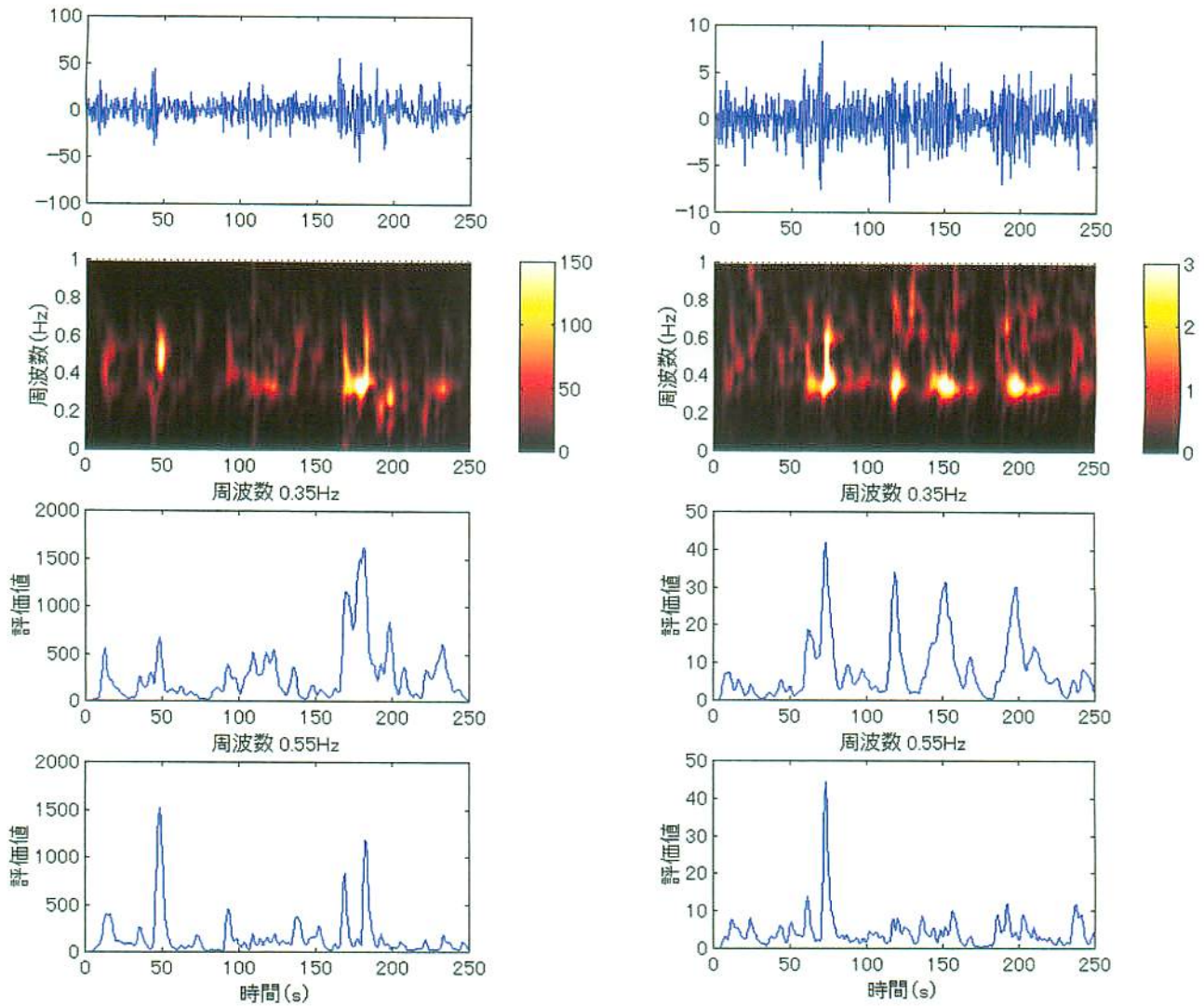


図 5.11 ファジィ推論による動揺モード分解結果

図上から、

フィルタリング処理後の有効電力信号

Real Time FFT 処理結果

ファジィ推論による動揺モード分解結果 (0.35 Hz)

ファジィ推論による動揺モード分解結果 (0.55 Hz)

5.5. 電力システム動揺モードのコヒーレンシ解析

第2章の周波数領域 PQVf の解析において、図 2.1 に示す実電力システムでは全ての観測点で共通して 0.35Hz の動揺モードと 0.55Hz の動揺モードが確認される事が分かった。そこでここでは、実電力システムの各観測点で観測されるデータにどのような類似性が見られるかについて検討を行う。

図 5.12 は、1999 年 10 月 14 日の重負荷時の有効電力潮流観測データを基にして、北部幹線 N1、南部幹線 S2、東部幹線 E1、西部幹線 W1 のそれぞれの幹線で観測される複合動揺モードに対して、ファジィ推論による動揺モード分解を行い、その結果を示したものである。図中、上段には FFT 処理結果をカラーマップにより表示し、下段にはファジィ推論により 0.35Hz および 0.55Hz を中心周波数とする動揺モードを抽出した結果を表示している。図から明らかにこれらの幹線においては、ほぼ同時刻に 0.35Hz の動揺が大きくなる点(A~L)が観測されている。これらの動揺モードの中心周波数が 0.35 Hz である事から、この動揺モードが対象とする電力システムの全系の動揺モードであると考えられる。また、中心周波数 0.55 Hz の動揺については各幹線での顕著な類似性は見られない。また、図にも示されるように中心周波数 0.35Hz および 0.55Hz の動揺成分の抽出結果を表示する場合に、各幹線ごとに縦軸のスケールを同一に設定しており、これによりこれらの動揺の相対的な関係を見る事ができる。図より、幹線 N1 では 0.55Hz の動揺は 0.35Hz の動揺に比較して顕著に観測されていない事が分かる。また、幹線 E1 および W1 ではこの 0.55Hz の動揺の含有率が高い事も分かる。これらの点より考えて、中心周波数 0.55Hz の動揺は対象とする電力システムにおける地区固有の、あるいは地区間の動揺モードであると考えられる。

なお、図において、幹線 W1 での観測結果には他の幹線での観測結果と比較して数十秒の時間のずれが確認できる。これは、観測装置の内部時計の時間設定のずれに起因していると考えられる。将来、GPS の導入による同期計測が可能となればこの種の問題は容易に解決される。

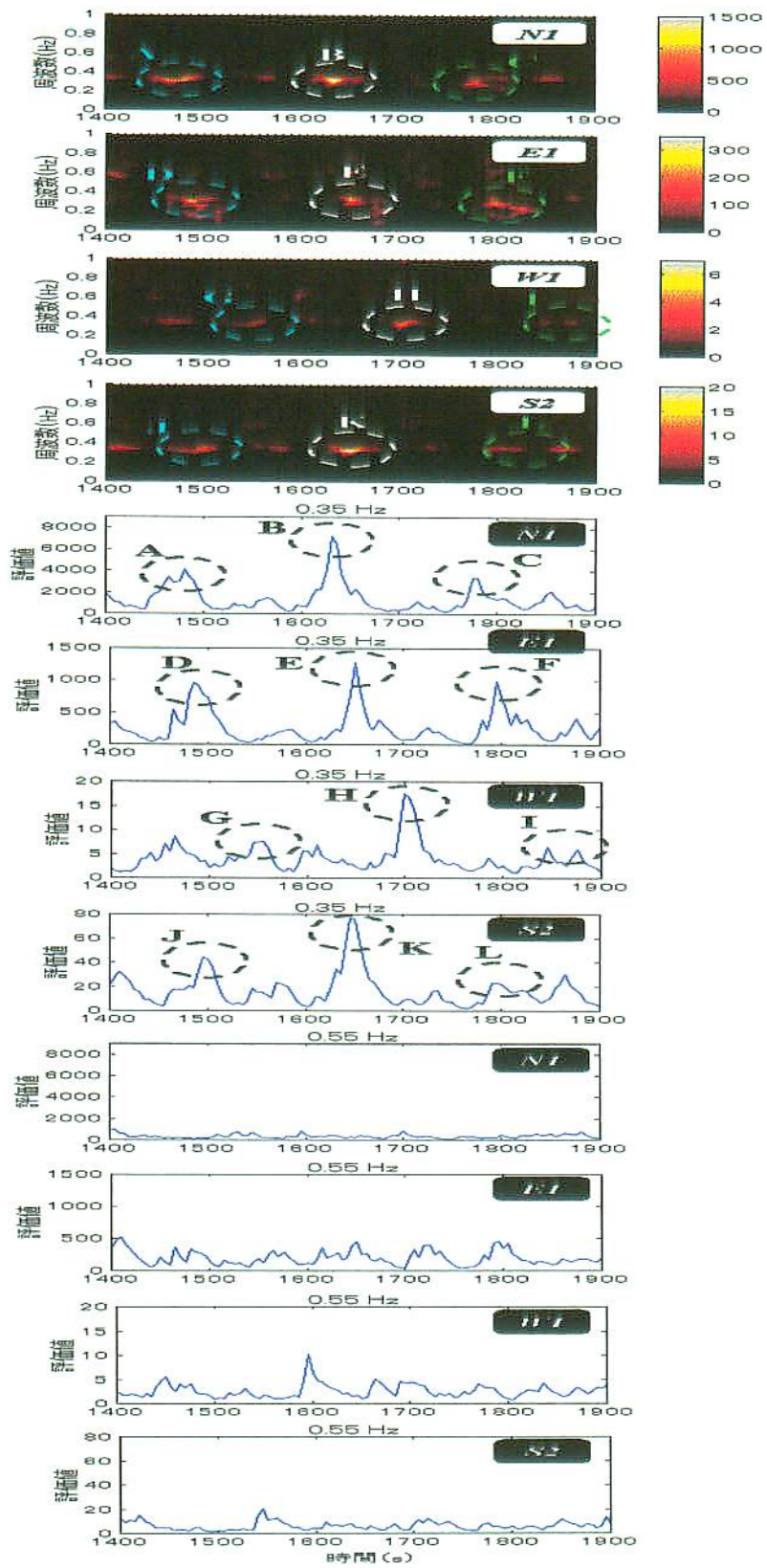


図 5.12 ファジィ推論による動揺モード分解結果

春季および秋季の重負荷時および軽負荷時における北部幹線 N1 および西部幹線 W1 で観測した有効電力潮流実測データを基にして動揺モードの解析を行った結果を図 5.13～図 5.16 に示す。図は、上から順にカラーマップによる Real Time FFT 処理結果、中心周波数 0.35Hz の動揺モードのファジィ推論による抽出結果、中心周波数 0.55Hz の動揺モードのファジィ推論による抽出結果を示している。これらの結果からも分かるように、時々刻々の負荷変動によってスペクトルおよび抽出された各動揺の大きさが変動している事が分かる。また、重負荷時と軽負荷時を比較すると、北部幹線 N1、西部幹線 W1 とも重負荷時に地区固有の動揺モードである 0.55Hz の動揺が大きくなる傾向が見られる。しかしながら、0.35 Hz の動揺モードについては、各幹線とも春と秋の季節による相違、また重負荷時と軽負荷時の負荷状態による相違は見られない事が分かる。これは、春季と秋季が季節的に似ているため電力システム全体の動揺モードである 0.35 Hz の動揺様相に大きな相違がなかったためと考えられる。

重負荷時（春季）

軽負荷時（春季）

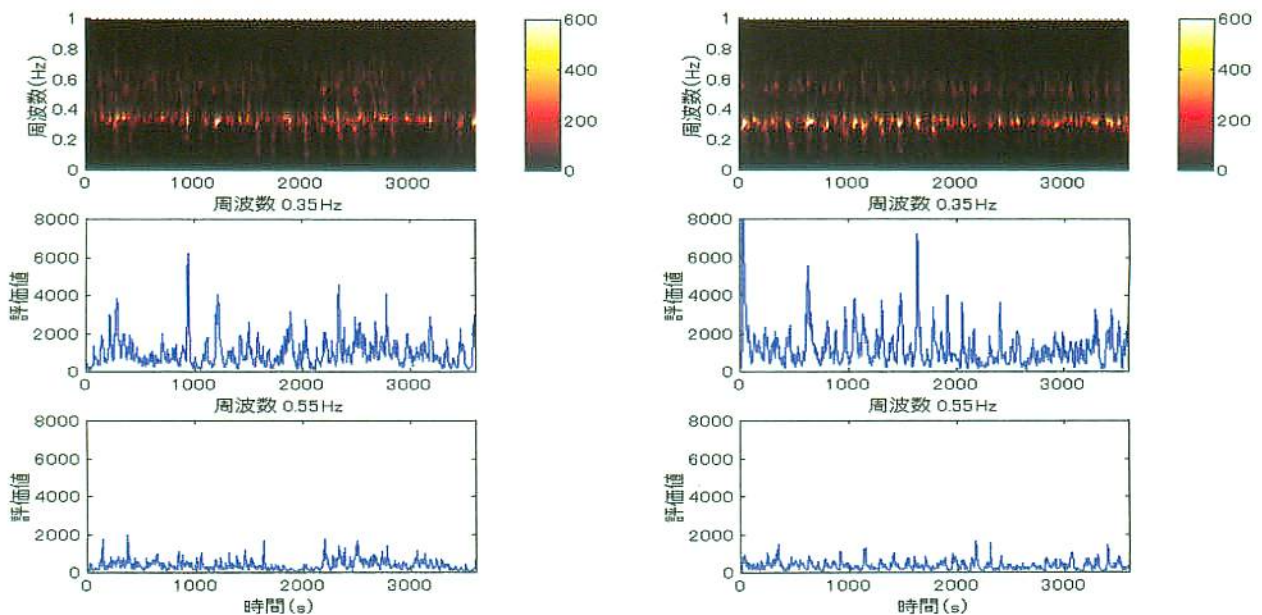


図 5.13 幹線 N1 での動揺モードの観測結果

重負荷時（春季）

軽負荷時（春季）

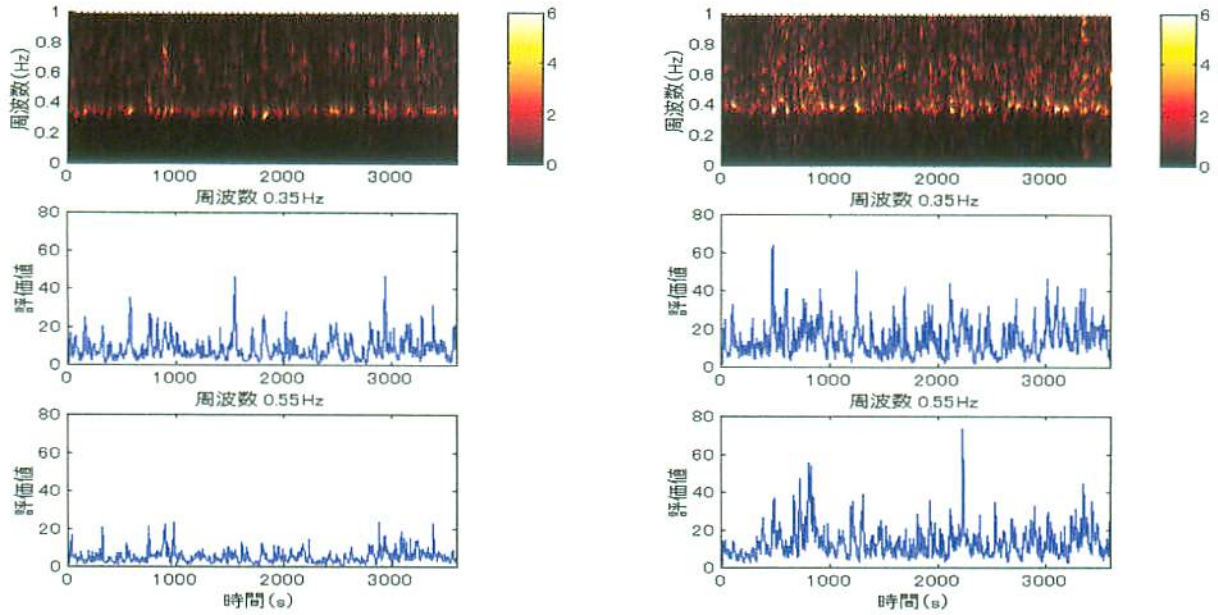


図 5.14 幹線 W1 での動揺モードの観測結果

重負荷時（秋季）

軽負荷時（秋季）

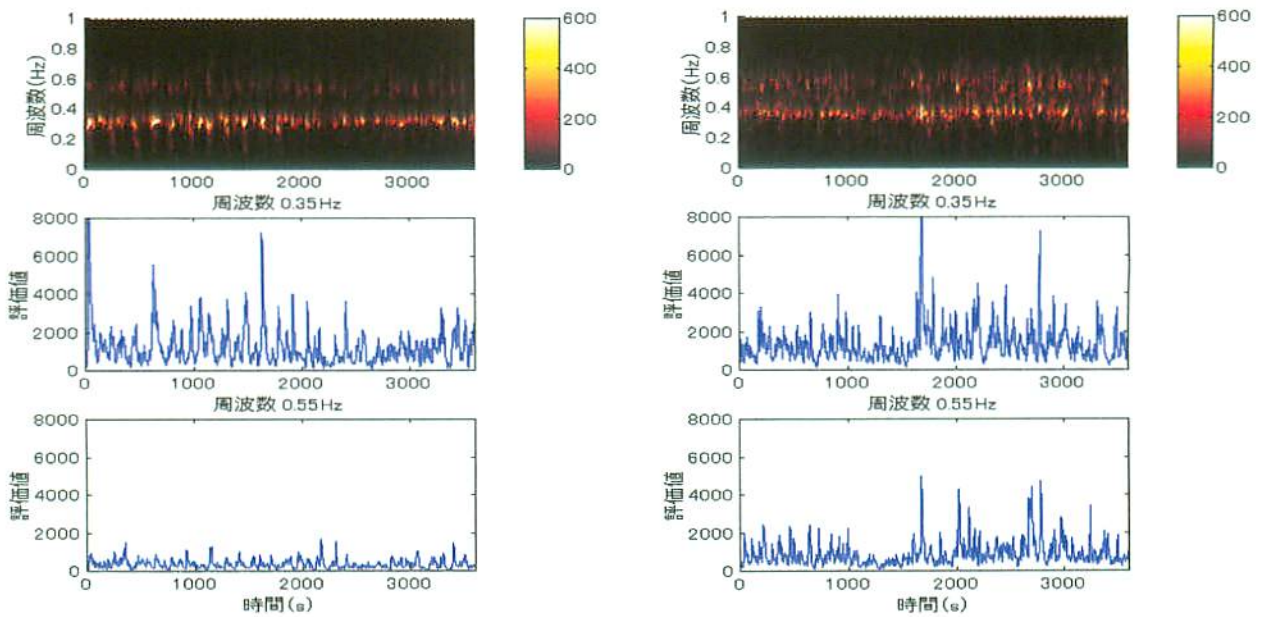


図 5.15 幹線 N1 での動揺モードの観測結果

重負荷時（秋季）

軽負荷時（秋季）

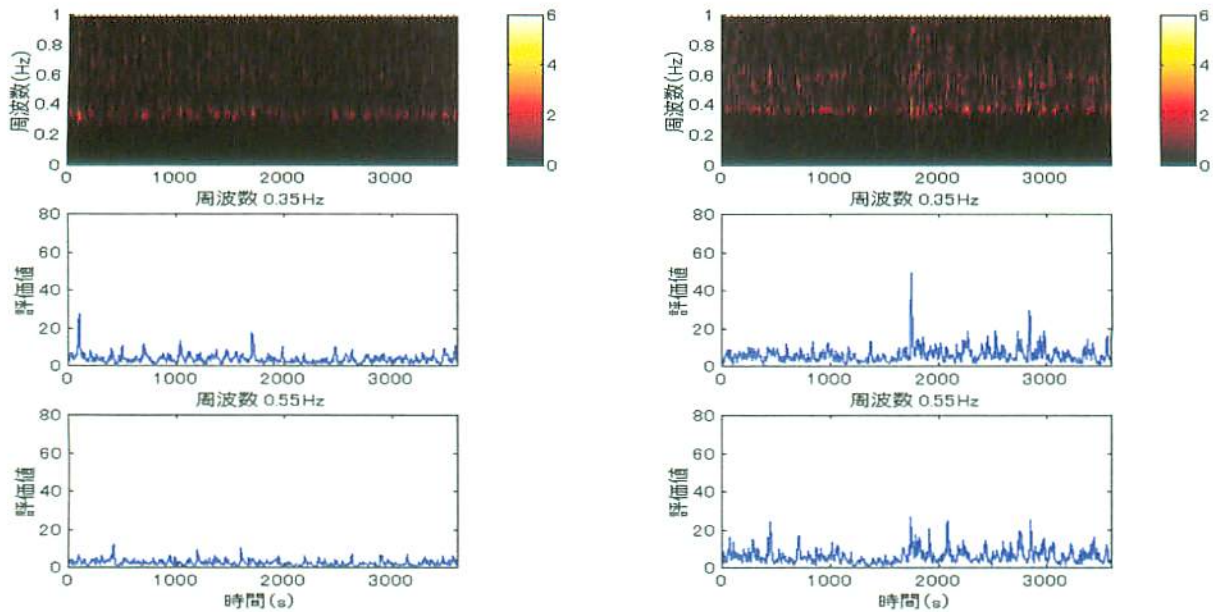
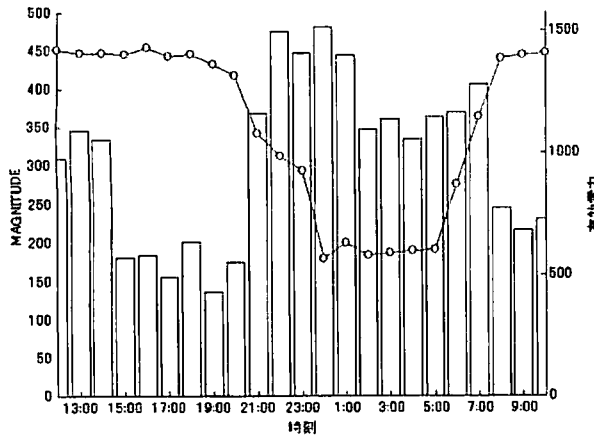


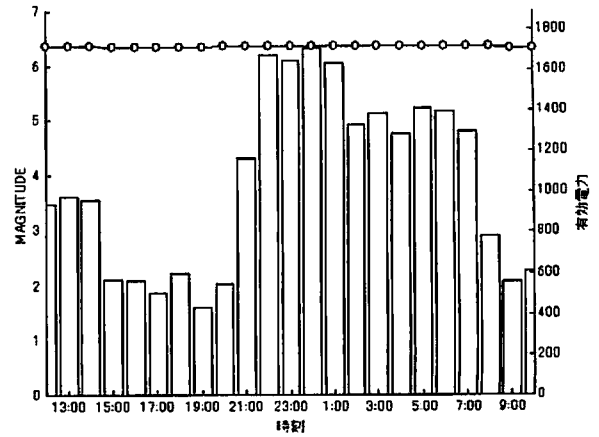
図 5.16 幹線 W1 での動揺モードの観測結果

図 5.12 にも示されているように、対象とする電力システム内の各幹線で観測される中心周波数 0.35 Hz の全系の動揺モードについては、その変動状況に類似性が認められる。そこで、1999 年 3 月 23 日 12 時から 1999 年 3 月 24 日 11 時までの有効電力潮流実測データにより、幹線 N1、S1、W1、E1 における中心周波数 0.35 Hz の動揺成分をファジィ推論により抽出した後、1 時間毎にその変動の大きさの平均値を算出している。その結果を図 5.17 に示す。図からも分かるように幹線 E1 を除く幹線 N1、S1、W1 では昼間の重負荷時に比べ夜間の軽負荷時に中心周波数 0.35 Hz の動揺の変動が大きくなっている事が分かる。これは、時々刻々の負荷変動（計画運転の対象とならない負荷変動）に 1 日 24 時間を通して大きな相違がないと考えれば、これらの変動の幹線潮流に対する割合は軽負荷時ほど高くなるため、軽負荷時において、このように中心周波数 0.35 Hz の動揺に大きな変動が観測されていると考えられる。また、これら N1、S1、W1 の幹線においては中心周波数 0.35 Hz の有効電力潮流の変動様相が非常に類似している事も見てとれる。

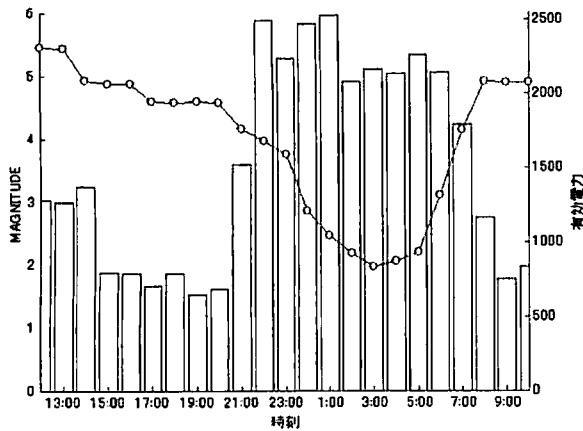
幹線 N1



幹線 S1



幹線 W1



幹線 E1

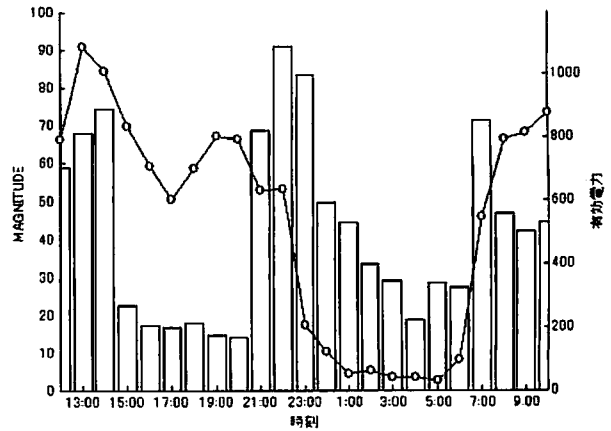


図 5.17 潮流状況と 0.35Hz の動揺との関係

以上の事からも、系統幹線で観測される有効電力潮流の変動様相には類似性が見られる事が確認された。よって、ここでは春季と秋季の重負荷時および軽負荷時にすべての幹線で観測された有効電力潮流の実測データに対して、中心周波数 0.35Hz の動揺を抽出し、詳細な各幹線における変動様相の類似度すなわちコヒーレンシ解析を行う。コヒーレンシ解析手順、および類似度の高いものから順次グループ化していくための手順を以下に示す。

解析手順

Step 1. 各幹線での観測データに対して図 5.18 に示すようにファジィ推論により 0.35Hz の動揺モードを抽出し、さらに 1 分毎にその大きさの平

均値を算出する。

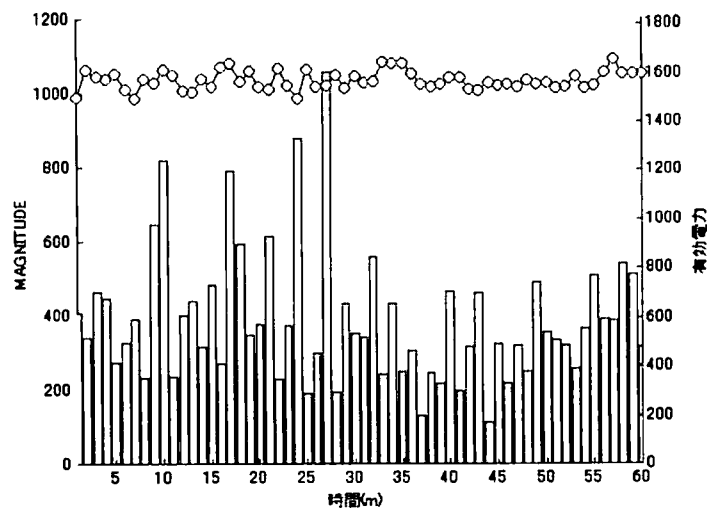


図 5.18 潮流状況と 0.35Hz の動揺との関係
(秋季の重負荷時 幹線 : N1)

Step 2. 各幹線での 0.35Hz の動揺の 1 時間毎の平均値のスケールを統一するため各幹線での最大変動値で規格化する。

Step 3. 式 (5-4) により幹線 n と幹線 m のコヒーレンシを定義し、その評価値を算出する。

$$Coherency[n, m] = \sum_{N=1}^{60} (Fout(Mode, n, N) - Fout(Mode, m, N))^2 \quad (5-4)$$

ただし、 $Fout(Mode, n, N)$ は幹線 n における時刻 N における 0.35Hz の動揺 $Mode(Hz)$ の平均値であり、規格化されている。

Step 4. コヒーレンシの評価値が最小である組み合わせを探索し、順次、そのグループ化を行う。この時、すでにグループ化されている幹線とまだグループ化されていない幹線のコヒーレンシは次式で定義している。すなわち、グループに含まれる全ての幹線とその他の幹線との間のコヒーレンシの評価値のうち最大のものでグループ化された幹線とその他の幹線との類似度を定義している。

$$Fout(Mode, nm, N) = \max(Fout(Mode, n, N), Fout(Mode, m, N)) \quad (5-5)$$

ただし、 $\max(Fout1, Fout2)$ は $Fout1$ 、 $Fout2$ の大きい方の値となる。

Step 5. Step 3 および Step 4 の手順を繰り返す。

ここで、参考のために、表 5.4 に、例として幹線 N1, E1, W1, S1 での観測データを用いてコヒーレンシ解析を行い類似性の高いものからそのグループ化を進めて行った結果を示す。

表 5.4 コヒーレンシ解析によるグループ化手順

	N1	E1	W1	S1
N1	0	40.95	32.34	38.18
E1	40.95	0	23.10	41.67
W1	32.34	23.10	0	34.75
S1	38.18	41.67	34.75	0



	N1	E1	W1	S1
N1	0	40.95	32.34	38.18
E1	40.95	0	23.10	41.67
W1	32.34	23.10	0	34.75
S1	38.18	41.67	34.75	0

これより、そのコヒーレンシ評価値が最小である幹線 E1 と幹線 W1 がグループ化されることになる。



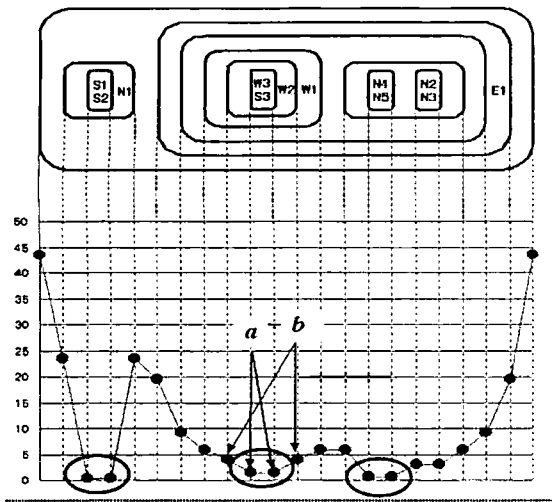
	N1	S1	E1W1
N1	0	38.18	40.95
S1	38.18	0	41.67
E1W1	40.95	41.67	0

次いで、幹線 N1 と幹線 S1 がグループ化される。



	E1W1	N1S1
E1W1	0	41.67
N1S1	41.67	0

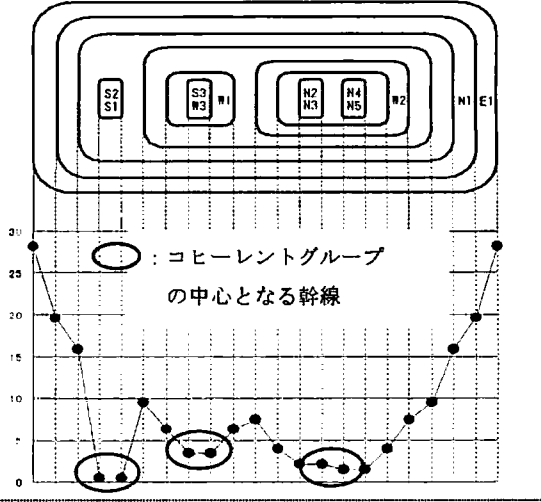
グループ(E1,W1)とグループ(N1, S1)の間のコヒーレンシ評価値は、この場合 41.67 となる。



結合順序

1. S1-S2 2. N4-N5 3. W3-S3 4. N2-N3 5. (W3-S3)-W2
6. (N2-N3)-(N4-N5) 7. ((W3-S3)-W2)-W1
8. (((W3-S3)-W2)-W1)-(N2-N3)-(N4-N5)
9. (((W3-S3)-W2)-W1)-(N2-N3)-(N4-N5)-E1 10. (S1-S2)-N1
11. (((W3-S3)-W2)-W1)-(N2-N3)-(N4-N5)-E1)-(S1-S2)-N1

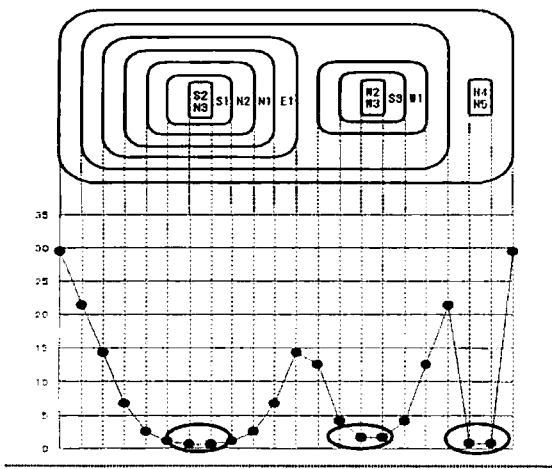
1999年3月23日(春季) 重負荷時



結合順序

1. S1-S2 2. N4-N5 3. N2-N3 4. W3-S3
5. (N4-N5)-(N2-N3) 6. (W3-S3)-W1 7. (((N4-N5)-(N2-N3))-W2
8. ((W3-S3)-W1)-(((N4-N5)-(N2-N3))-W2)
9. (((W3-S3)-W1)-(((N4-N5)-(N2-N3))-W2))-(S1-S2)
10. (((W3-S3)-W1)-(((N4-N5)-(N2-N3))-W2))-(S1-S2)-N1
11. (((W3-S3)-W1)-(((N4-N5)-(N2-N3))-W2))-(S1-S2)-N1-E1

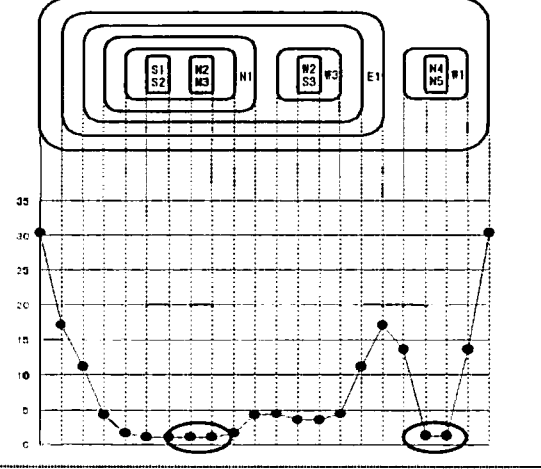
1999年3月23日(春季) 軽負荷時



結合順序

1. N3-S2 2. N4-N5 3. (N3-S2)-S1 4. W2-W3
5. ((N3-S2)-S1)-N2 6. (W2-W3)-S3 7. (((N3-S2)-S1)-N2)-N1
8. ((W2-W3)-S3)-W1 9. (((N3-S2)-S1)-N2)-N1-E1
10. (((W2-W3)-S3)-W1)-(((N3-S2)-S1)-N2)-N1-E1
11. (((W2-W3)-S3)-W1)-(((N3-S2)-S1)-N2)-N1-E1)-(N4-N5)

1999年10月14日(秋季) 重負荷時



結合順序

1. N2-N3 2. S1-S2 3. N4-N5 4. (N2-N3)-(S1-S2)
5. W2-S3 6. ((N2-N3)-(S1-S2))-N1 7. (W2-S3)-W3
8. (((N2-N3)-(S1-S2))-N1)-((W2-S3)-W3)
9. (N4-N5)-W1
10. (((N2-N3)-(S1-S2))-N1)-((W2-S3)-W3)-E1
11. ((N4-N5)-W1)-(((N2-N3)-(S1-S2))-N1)-((W2-S3)-W3)-E1

1999年10月14日(秋季) 軽負荷時

図 5.19 コヒーレンシ解析結果

図 5.19 にコヒーレンシ解析により、0.35Hz の動揺の類似度の高い幹線よりグループ化を行った結果を示す。図より、春季と秋季の重負荷時および軽負荷時において対象とする電力システムの各幹線における 0.35Hz の動揺成分の類似度によりグループ化を行った結果、対象とする電力システムにおける 0.35Hz の動揺成分に関しては、他の幹線との類似度が低い幹線 E1 を除いて、3 のグループ化が可能である事が分かった。すなわち、図 5.20 のように北部、西部、南部、東部の 4 つの地区に分類する事ができた。また、当然の結果ではあるが、グループ化における結合順序を見れば分かるように観測点が接近している場合には一般的に動揺様相の類似度は高く、観測点が離れるにしたがって類似度が低くなっていく事が分かる。この結果より、地理的な広がりを持つ電力システムの広域的な安定度を正確に評価するためには、電力システム内の複数の個所での有効電力潮流の観測が必要であると言える。また、その際すべての系統幹線での観測は必要ではなく、例えば、図 5.19 に示される各コヒーレントグループの中心となっている幹線 S1 および S2 のいずれか、幹線 N4 および N5 のいずれか、幹線 W2、W3 および S3 のいずれか、幹線 E1 において有効電力潮流の観測を行えば十分であると言える。これにより、電力システムの広域的な実時間安定度評価の過程が単純化される事になる。また、ここで得られた結果は、対象とする電力システムに複数の安定化装置を設置する際の最適設置点の選定、また、電力システム内に設置される各種安定化装置の制御パラメータの最適調整に関して有用な情報を提供すると言える。

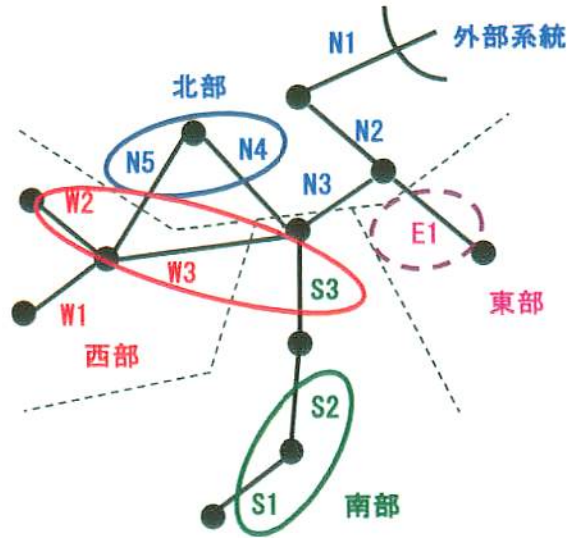


図 5.20 コヒーレンシ解析によるグループ化

5.6. まとめ

本章では、電力システムを不安定方向へと移行させる要因の一つである動態不安定となる場合について計算機シミュレーションによる有効性の検討および実電力システムの幹線での有効電力潮流観測データによる有効性の検討の2つを行った。その結果、提案する Real Time FFT を用いる事により、電力システムにおける動揺モードの時間的変動を実時間で視覚的に容易に捕らえる事が可能となった。また、ファジィ推論を用いて、複合動揺モードを個々の動揺に分解する事により個々の動揺モードの安定性評価が可能である事を明らかにした。しかしながら、Real Time FFT を用いて安定度評価を行うには個々の動揺モードに対して安定および不安定と判断するための閾値について検討する必要がある事がわかった。よって、ファジィ推論による動揺モード分解後の結果を基にして電力システムの安定度を数値的に評価するための指標についての検討、電力システム内の複数箇所での有効電力潮流の同時観測データを基にした電力システム全体の総合的な安定度評価手法の検討などを進める事により、実時間安定度評価システムの開発を進めていく必要がある事が分かった。

次にコヒーレンシ解析では、電力システム内の幹線における有効電力

潮流変動の実測値を基にしたFFT処理から特定できる0.35 Hzと0.55 Hzの2つの動揺モードのうち0.35 Hzの動揺モードが対象とした電力システムにおける全系動揺モードである事が明らかとなった。また、この0.35 Hzの動揺の大きさに関しては、重負荷時に比べて軽負荷時の方が大きい事が分かった。更に、コヒーレンシ解析により、動揺様相の類似性の評価を行う事により、対象とする電力システムにおいて観測された幹線潮流の動揺をグループ化できる事が分かった。これにより、電力システムの広域安定度を実時間で評価するための適切な観測点の選定が可能となった。また、ここで得られた結果は、対象とする電力システムに複数の安定化装置を設置する際の最適設置点の選定、更には電力システム内に設置される各種安定化装置の制御パラメータの最適調整に関して有用な情報を提供できる事が分かった。今後は、選定された観測点における有効電力潮流の観測値より電力システム全体の広域的安定性を実時間で評価する手法について、更に詳細な検討を進める予定である。また、各種系統安定化装置の最適設置点の選定手法ならびに調整手法についても検討を始める予定である。

第 6 章 固有値ベースの実時間安定度評価手法

6.1. はじめに

電力システム内の時々刻々の負荷変動によるじょう乱の事を背景動揺と呼んでいる。本章では、電力システムの定態安定度を評価するために、この背景動揺を利用して、システムの入出力応答からその固有値を求める手法を提案している。また、提案する安定度評価方式の有効性を計算機シミュレーションおよびアナログシミュレータ試験により明らかにしている。

6.2. 固有値解析を用いた安定度評価手法

本論文での安定度評価の対象の一つである事故後複数波で脱調する場合においては第 4 章の 3 点比較頂点探索法を用いる事で実時間で正確に安定度を評価する事が可能となった。しかしながら、もう一つの対象である動態不安定となる場合においては、PV 特性および Pf 特性から得られる勾配により安定度を評価する手法、Real Time FFT による安定度評価手法を提案してきたが、いずれの場合も正確に安定度を評価できていない。そこで、この動態不安定となる場合の解析のために新たな手法を提案している。

本質的に電力システムは非線形要素を多く含んだ巨大なシステムである。一般的にそのようなシステムに対して安定度評価を行うには、安定平衡点まわりで線形モデルを作成し固有値解析を行って定態安定性を調べる方法がある。対象とするシステムの固有値を解析するには、そのシステムへの入出力データを基に状態方程式を作成し特性多項式の根を計算すればよい。

電力システムの規模の拡大によって、電力システム全体に波及する広域動揺モードは徐々に大きくなってきている。第 5 章では、広域動揺モードのコヒーレンシ解析を行い、図 2.1 に示す実電力システムは大きく分けると 4 つの地区に分類する事が可能である事が分かった。そして、これらの地区はそれぞれ他の地区と 500kV 系統幹線にて連系されており、

これら区分した地区をそれぞれ個別のシステムと考えれば全ての地区に関して、例えば S1 と S3 のように対象システムへの入力データと出力データを考える事が可能であり、この入出力データを基に離散系の状態方程式を作成し特性方程式を解く事で、図 2.1 における南部地区の固有値を知る事ができる。それは、他の地区においても全く同様に入力および出力のデータの個所を指定すればその内部の対象システムの固有値を知る事ができる。また、この手法は取り扱うデータが入出力データだけで良い事から、今後実時間でも十分に安定度を評価する事が可能である事が予測される。図 6.1 は、対象システム (Study System) へある外部システム I (External System I) から信号 P1 が入力され、そしてある外部システム II (External System II) へ信号 P2 が出力される、言わば例として用いた南部地区と同じシステムを簡略的にモデル化したものである。

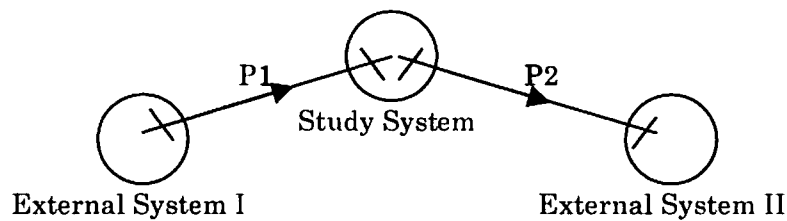


図 6.1 参照システム

この図における対象システムは、電力システムと同様に非線形要素を含むシステムを考える。このモデルの固有値を知るには、今まで述べてきたように式 (6-1) の状態方程式を作成し、特性方程式 (6-2) を解く必要がある。

$$P_2 = a_0 \cdot P_1 + a_1 \cdot z^{-1} \cdot P_1 + \dots + a_n \cdot z^{-n} \cdot P_1 + b_1 \cdot z^{-1} \cdot P_2 + \dots + b_n \cdot z^{-n} \cdot P_2$$

$$P_2 = \frac{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + \dots + a_n \cdot z^{-n}}{1 - b_1 \cdot z^{-1} - \dots - b_n \cdot z^{-n}} \cdot P_1 \quad (6-1)$$

$$1 - b_1 \cdot z^{-1} - \dots - b_n \cdot z^{-n} = 0 \quad (6-2)$$

ここで、 z^{-1} (backward shift operator) は、1 サンプル前の信号に戻す Z 演算子を示している。更に、 n は固有値解析の次数を示しており、本

論文では、1つの実数解と $(n-1)/2$ 組の共役な複素解を持つ固有値と特定し奇数次として解析を行っている。また、対象システムの次数はシステムによって異なっている。この次数の設定方法については、ここでは詳しく説明を行わず後の解析で説明を付加する。離散系の固有値解析で得られる固有値は、例えば図 6.2 に示す Z 平面内において単位円内に全ての固有値が存在する場合には対象システムは安定であり、また逆に外部に1つでも固有値が存在する場合には対象システムは不安定であり、言わば固有値を知る事でシステムの安定性を知る事ができる。

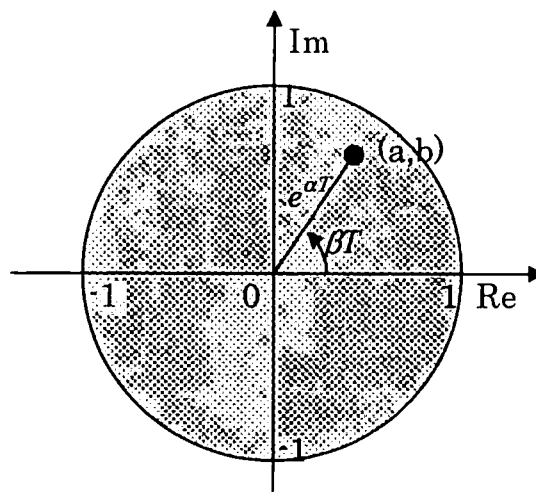


図 6.2 Z 平面

よって安定度評価を行うには、システムの固有値を知り Z 平面上で固有値が全て単位円内に存在するかどうかを見ればよいのであるが、これまで我々は3点比較頂点探索法で時間領域の安定度評価を行う際に特に動揺モードの周波数および減衰定数に着目してきた。その事もふまえて、ここではあえて離散系の固有値を用いて安定度評価は行わずに、離散系から連続系の固有値へ式(6-3)を用いて変換し、対象システムの固有周波数および減衰定数から安定度評価を行う事にする。

$$z = a + jb = e^{sT} \quad (s = \alpha + j\beta) \quad (6-3)$$

ここで、 T はサンプリング時間を示している。このサンプリング時間はサンプリング定理によって、観測される動揺モードによって変更する必要がある。例えば f Hz の動揺モードが観測信号に含まれる場合において

その動揺モードの固有値解析を行うには、最低でもその2倍の周波数、つまり $2f$ Hz でサンプリングしなければならない。よってサンプリング時間の設定は、対象システムの持つ固有周波数に依存するため、一意に決定されない事に注意する必要がある。式(6-3)で離散系から連続系へ固有値を変換した後、更に式(6-4)および式(6-5)により、連続系の固有値からそれぞれ固有周波数(f)および減衰定数(α)の算出を行う。

$$\beta T = 2\pi f T = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$f = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)}{2\pi T} \tag{6-4}$$

$$e^{\alpha T} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\alpha = \frac{\ln(\sqrt{a^2 + b^2})}{T} \tag{6-5}$$

6.3. 計算機シミュレーションによる提案手法の有効性の検討

ここでは、提案手法によって対象システムの持つ固有周波数および減衰定数の同定が可能かどうかについて検討を行う。図6.3は、計算機シミュレーションによる提案手法の有効性の検討に用いた例題システムを示している。

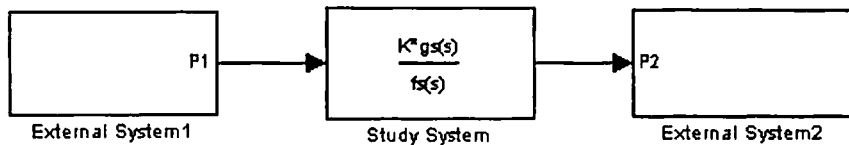


図 6.3 計算機シミュレーションに用いる例題システム

対象システムへは、外部システム1から信号P1を入力する。図6.4はその入力信号P1の時間応答波形を示したものである。

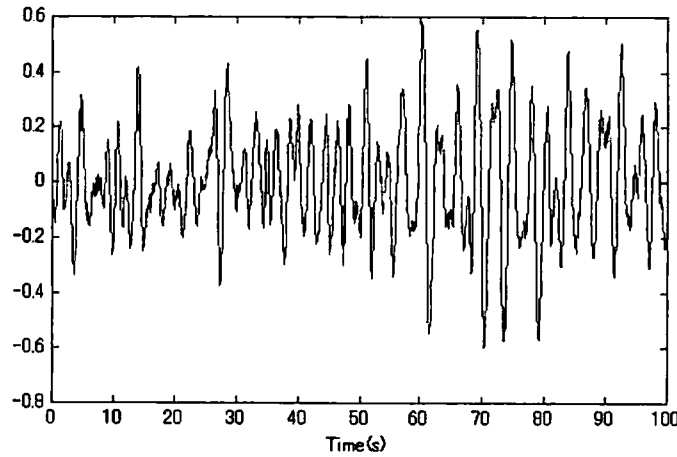


図 6.4 背景動揺

この信号は、図を見ても分かるように連続的な非周期信号であるのだが、単に独自に作成したランダム信号と言うわけではなくこの信号自体は図 2.1 の実電力システムの連系線 N1 で観測されたデータを用いて作成したものである。この連系線での実測データを用いる理由は、最終的に我々がこの安定度評価システムを実電力システムで実時間での運用を見越しているためである。まず、安定度評価の対象システムに式 (6-6) に示す伝達関数を与える。

$$P2(t) = \frac{K \cdot g_s(s)}{f_s(s)} P1(t) \quad (6-6)$$

この時、与える伝達関数の特性方程式 $f_s(s)$ には、1 つの実数解と 2 組の共役な複素解を持つ 5 次の固有値を与える。また、ゲイン K および零点をあらわす $g_s(s)$ には、零点が固有値とキャンセルしないようにする以外は特に制限はなく、これらは対象とするシステムがより複雑になった場合においても固有値解析が可能かどうかを評価するために付加したものである。更に、予め対象システムの持つ固有周波数は 0~1Hz までの範囲とし、固有値解析の際のサンプリング時間はサンプリング定理より 0.5s とし、解析に用いたデータ長は 500s としている。このような初期条件の基で、対象システムに外部システム I から入力される信号 P1、また対象システムから外部システム II へ出力される信号 P2 のデータを用いて固有値解析を行う。この時、固有値解析から得られる固有周波数およ

び減衰定数が予め与えたそれらと等しいかどうかを比較して提案手法の有効性の検討を行う。図 6.5 は対象システムに固有周波数 0.3、0.7Hz、減衰定数 -0.1、0.005、 $K=1$ 、 $g_s(s)=1$ を与えて、実際のシステムの応答波形と、固有値解析で同定したモデルの入力信号 P1 に対する応答を比較した結果である。

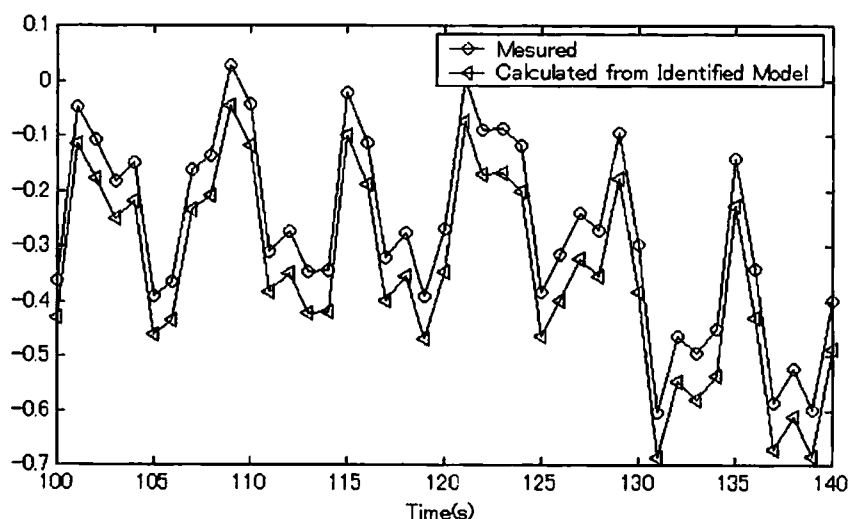


図 6.5 観測波形と固有値解析により同定したモデルの出力波形の比較

図を見ても明らかなように、両者は非常によく類似している事から固有値解析でうまく対象システムの同定が行えている事が分かる。更に、図 6.6 は離散系の固有値を Z 平面上に配置した結果を示したものである。

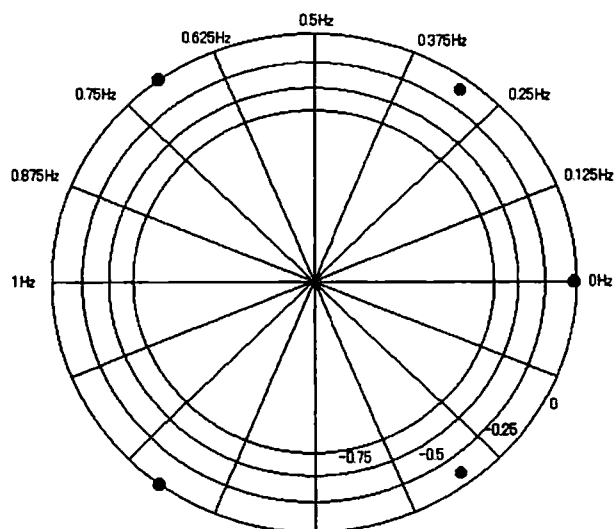


図 6.6 固有値解析結果 (Z 平面)

ここで、図中の第 1、第 2 象限に書かれた周波数、および第 4 象限に書かれている数値はそれぞれ固有周波数および減衰定数を示している。この結果を見ても分かるように、対象システムに予め与えた固有周波数および減衰定数は、固有値解析によってうまく同定できている事が分かる。また、表 6.1 は各 Case における伝達関数の固有周波数および減衰定数の設定値と固有値解析による同定結果を示したものである。

表 6.1 各 Case における伝達関数の設定値と固有値解析での同定結果

	K	$g_r(s)$	周波数		減衰定数	
			設定値	計算値	設定値	計算値
Case1	1	1	0.3	0.3	-0.1	-0.1
			0.7	0.7	0.005	0.00498
Case2	1	1	0.3	0.3	0	-4.59×10^{-6}
			0.7	0.7	0.005	0.00498
Case3	1	1	0.2	0.2	-0.1	-0.1
			0.7	0.7	0.005	-0.00498
Case4	1	s+1	0.3	0.3	-0.1	-0.0996
			0.7	0.7	0.005	0.00496
Case5	1	s+1	0.3	0.3	0	1.37×10^{-5}
			0.7	0.7	0.005	0.00496
Case6	1	s+1	0.2	0.2	-0.1	-0.0989
			0.7	0.7	0.005	0.00496
Case7	2	s+1	0.3	0.3	-0.1	-0.0996
			0.7	0.7	0.005	0.00496

これらの結果を見ても分かるように、全ての Case において対象システムへ設定した固有周波数および減衰定数を、固有値解析によってうまく同定できている事が分かる。また、ゲイン K および $g_s(s)$ を与えた場合においても、結果には影響はなく、この事からも固有値解析がこれから解析を進める複雑なシステムにおいても十分に有効である事が期待できる。

6.4. アナログシミュレータ試験による提案手法の有効性の検討

図 6.7 に、例題として用いたくし形 4 機無限大母線システムを示す。この例題システムを九州電力総合研究所にあるアナログシミュレータ装置上に作成し、提案手法の有効性の検討を行っている。図 6.7 に示す例題システムは、図 6.1 の参照システムと同様に外部システム I と対象システム、および外部システム II の 3 つのシステムから構成されている。外部システム I では、固有値解析の際に図 6.4 に示す背景動揺を電流アンプを通して、対象システムへ入力する。このように、外部システム I から背景動揺を注入する事によって、外部システム II (無限大母線) へは、対象システムの持つ動揺モードが重畳されるため、観測点 1 と観測点 2 の有効電力を提案手法に適用する事により対象システムの固有値を知る事ができ、安定度評価が可能となる。また、例題システムにおいて Unit2 から Unit4 の発電機出力はそれぞれ 0.4pu、0.6pu、0.6pu に固定とし、負荷母線に接続される負荷もそれぞれ 0.3pu、0.6pu、0.6pu と固定としている。ただし、Unit1 の出力に関しては、電力システムの状態を様々に与えるため可変としている。例えば、Unit1 の出力が低く設定されている時には電力システムの状態は安定であり、逆に Unit1 の出力が高く設定されている時には電力システムの状態は不安定と言える。更に、対象システムの Unit1 と Unit4 には、電力システム安定化装置 (PSS) が設置されており、ここでは表 6.2 に示す PSS 設置状況の基で実験を行っている。

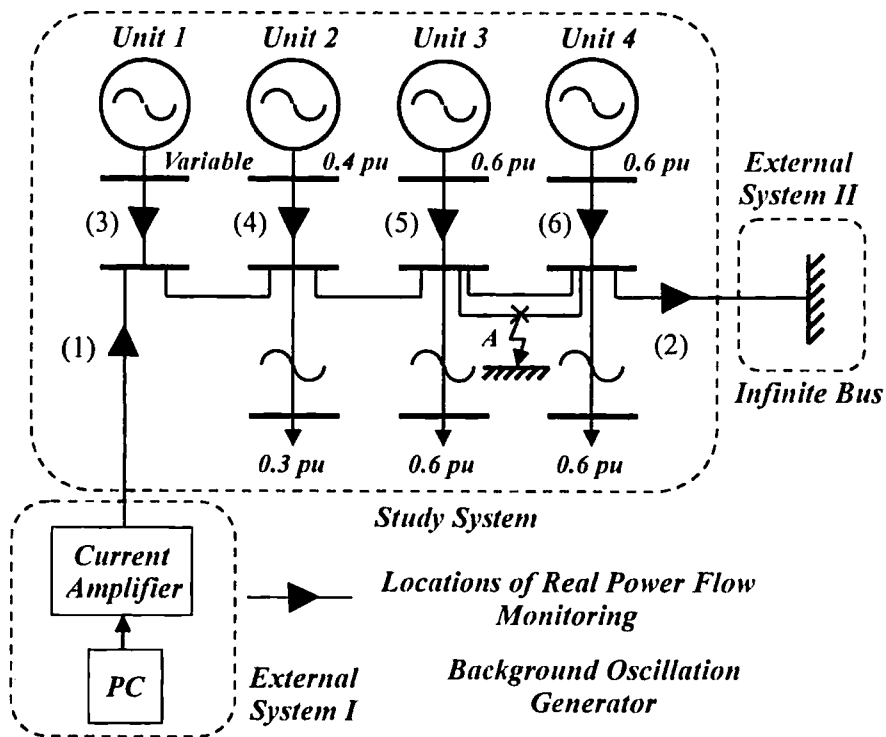


図 6.7 くし型 4機無限大母線系統

表 6.2 PSS 設置状況

	Unit1	Unit2	Unit3	Unit4
Case1	Pn2	—	—	Pn1
Case2	Pn2	—	—	—
Case3	—	—	—	Pn1

6.5. 固有周波数ならびに減衰定数の測定

ここでは、図 6.7 に示す例題系統の Unit3 と Unit4 の間の 2 回線のうち、片側 1 回線に 3 相地絡事故を発生させ、事故発生後の観測点 2 の有効電力データより FFT および頂点探索法を行い固有周波数、減衰定数の測定を行う。通常、対象システムは外部システム I から背景動揺が注入されなければ、対象システム内部での負荷変動は零であるため観測点 2 での電力動揺は確認されない。電力動揺が確認されなければ、当然、対象システムの持つ固有周波数を測定する事ができない。そのため、A 点に 3 相地絡事故を発生させる。この A 点の 3 相地絡事故シミュレーション

ンでは、事故発生後 4 サイクルで事故回線の両端の遮断器が反応し事故回線の遮断を行う。更に 4 サイクル後に事故回線は再閉路され、事故前の 2 回線状態へ戻る。その電力動揺の時間応答波形の例を図 6.8 に示す。

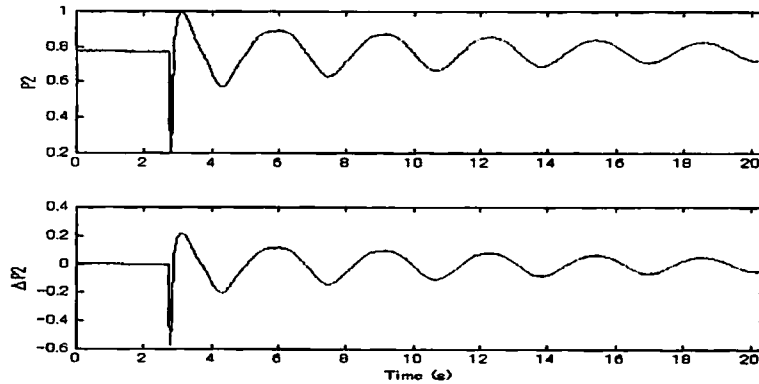


図 6.8 3 相地絡事故時の有効電力応答例（観測点 2）

つまりは、事故発生から 8 サイクル（0.16s）以降での有効電力の過渡応答より対象システムの持つ固有周波数および減衰定数を求める。図 6.9 は、Unit1 の出力を 0.62pu とした時の Case1 における有効電力の FFT 処理結果を示したものである。

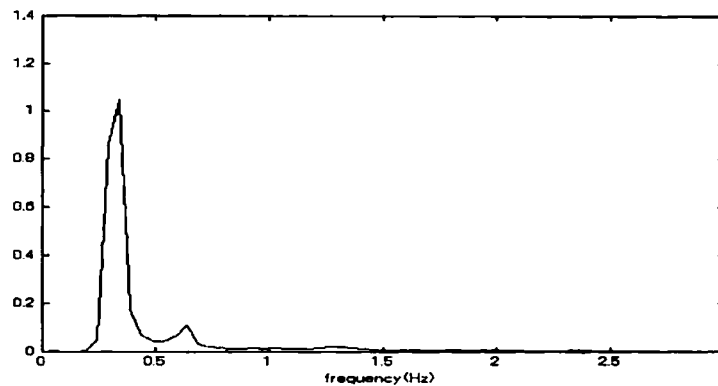


図 6.9 有効電力時間応答波形と FFT 出力結果の例（観測点 2）

図からも明らかなように、0.4Hz 付近と 0.7Hz 付近に 2 つの Global Mode（広域動揺モード）が確認される。この時、Local Mode（局所動揺モード）は Global Mode に比べてスペクトルの大きさが低めの設定となっており、結果にはほとんど現れていない。よって、ここでの固有周波数の測定は Global Mode に限定する事にする。しかしここで、観測される主要な固有周波数は 0.4Hz 付近と 0.7Hz 付近にあると分かったの

であるが、Unit1 の出力を低く設定した場合には、A 点に発生させる事故による電力動揺は、事故後速やかに減少してしまうため FFT 結果で、0.4Hz の動揺モードに 0.7Hz の動揺モードが隠れてしまい、うまく周波数の特定ができない。そのため、ここでの固有周波数の測定では 0.4Hz 付近の動揺モードのみ解析を行う。まず、FFT による固有周波数の測定では、サンプリング時間を 0.1s として 0.4Hz 付近の固有周波数の測定を行った。また、3 点比較頂点探索法では、前段処理として 0.4Hz 付近の動揺モードを帯域通過フィルタで取り出し、フィルタリング後の結果より固有周波数および減衰定数の測定を行った。表 6.3 および表 6.4 はそれぞれの測定結果を示したものである。

表 6.3 FFT による固有周波数の測定

Unit1 出力	Case1	Case2	Case3
0.3	0.395Hz	0.434Hz	0.449Hz
0.32	0.402Hz	0.434Hz	0.445Hz
0.34	0.355Hz	0.43Hz	0.441Hz
0.36	0.363Hz	0.426Hz	0.438Hz
0.38	0.371Hz	0.422Hz	0.434Hz
0.4	0.367Hz	0.418Hz	0.43Hz
0.42	0.363Hz	0.414Hz	0.422Hz
0.44	0.375Hz	—	0.414Hz
0.46	0.355Hz	—	0.406Hz
0.48	0.359Hz	—	0.398Hz
0.5	0.344Hz	—	0.391Hz
0.52	0.344Hz	—	0.379Hz
0.54	0.336Hz	—	—
0.56	0.328Hz	—	—
0.58	0.324Hz	—	—
0.6	0.316Hz	—	—
0.62	0.316Hz	—	—

表 6.4 3点比較頂点探索法による固有周波数および減衰定数の測定

Unit1 出力	Case1 周波数(減衰定 数)	Case2 周波数(減衰定 数)	Case3 周波数(減衰定 数)
0.3	0.345Hz(-0.601)	0.433Hz(-0.127)	0.446Hz(-0.243)
0.32	0.347Hz(-0.575)	0.432Hz(-0.11)	0.443Hz(-0.228)
0.34	0.347Hz(-0.536)	0.429Hz(-0.0897)	0.439Hz(-0.217)
0.36	0.347Hz(-0.515)	0.425Hz(-0.0701)	0.436Hz(-0.201)
0.38	0.347Hz(-0.466)	0.421Hz(-0.0479)	0.431Hz(-0.181)
0.4	0.35Hz(-0.447)	0.417Hz(-0.028)	0.425Hz(-0.164)
0.42	0.35Hz(-0.43)	0.413Hz(-0.00661)	0.42Hz(-0.144)
0.44	0.35Hz(-0.392)	—	0.413Hz(-0.121)
0.46	0.352Hz(-0.365)	—	0.406Hz(-0.0963)
0.48	0.347Hz(-0.332)	—	0.397Hz(-0.0726)
0.5	0.344Hz(-0.298)	—	0.389Hz(-0.0471)
0.52	0.339Hz(-0.256)	—	0.38Hz(-0.0208)
0.54	0.332Hz(-0.211)	—	—
0.56	0.325Hz(-0.152)	—	—
0.58	0.32Hz(-0.121)	—	—
0.6	0.313Hz(-0.0729)	—	—
0.62	0.313Hz(-0.0756)	—	—

6.6. 固有値解析の次数の設定

6.5.により図 6.7の持つ主要な固有周波数は 0.4Hzと 0.7Hzの2つである事が分かった。よって、固有値解析を行う場合のサンプリング時間はサンプリング定理より 0.5sとすれば十分である事が分かる。サンプリング時間を 0.5sとする事で、1Hz以上の動揺モードのエリアシング誤差が問題となるかもしれないが、図 6.9のFFT処理結果を見る限りでは 0.4Hzおよび 0.7Hzの動揺モードに比べて、その他の動揺モードは無視できるほど低めの設定となっているため、1Hz以上の動揺モードを帯域通過フ

フィルタによりカットは行っていない。また、固有値解析を行うには固有値の次数を決定する必要がある。これまでの結果から、対象システムを最も低い次数で表すには、0.4Hzと0.7Hzの2つの主要な固有周波数が確認されていることから5次と決定してもよいのであるが、ここでは次にあげる手法により次数の決定を行う。まず、図6.7の例題システムに外部システム1より背景動揺を注入する。背景動揺を注入する事により、対象システムのもつ動揺モードが背景動揺に重畳され、観測点2で観測される。この時、観測点1の観測データP1と観測点2の観測データP2を用いて、固有値解析の次数を1、3、5、7、9、11として、それぞれ固有値解析を行い、それぞれで対象システムのモデル化を行う。続いて、固有値解析よりモデル化を行ったシステムに入力信号P1を与え、その応答P2'を得る。その結果を式(6-7)で評価し誤差Eの値より最適な固有値の次数の決定を行う。ここで、Mはサンプル数を表している。

$$E = \frac{\sum_{m=1}^M |P_2 - P_2'|}{M} \quad (6-7)$$

図6.10は、固有値解析の各次数における誤差を示したものである。

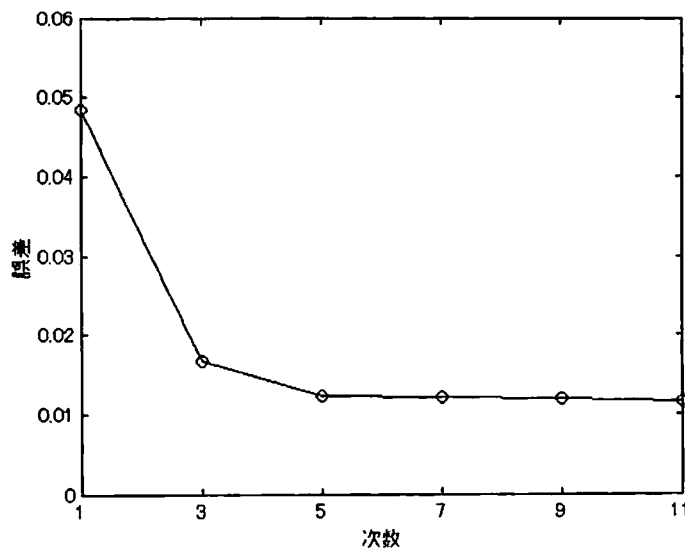


図 6.10 固有値解析の各次数における誤差

この図を見ても分かるように、次数を1、3、5と上げていく事で徐々に誤差は小さくなっている事が分かる。しかしながら、5次を超えると誤差はそれまでと比べて徐々にしか減少しない。ここで5次以降でも誤差は徐々に減少している原因としては、1つはデータのサンプリング方法に原因がある。0.5sでサンプリングを行う際に前段処理として帯域通過フィルタで1Hz以上の動揺モードのカットを行っていないため、わずかではあるが1Hz以上の動揺モードがエリアシング誤差として現れてしまったと考えられる。また、2つ目の理由として図6.7の対象システムは小規模な電力システムのモデルなのであるが、小規模であっても非線形要素は数多く存在する。つまりは、それらすべてを把握するには到底5次といった低次で表現する事は不可能であるため、簡略化したために起こった誤差であると考えられる事ができる。そのため、固有値解析の次数は5次以降でも徐々にではあるが減少していく。ただし、電力システムの安定度の観点からすればすべての動揺モードを把握する必要はなく、特に関係のある動揺モードに着目すればよい。それが言わば0.4Hzと0.7Hzの動揺モードであり、それら2つの動揺モードは、図6.11の固有値解析結果の例からも5次とする事で十分である事が分かる。

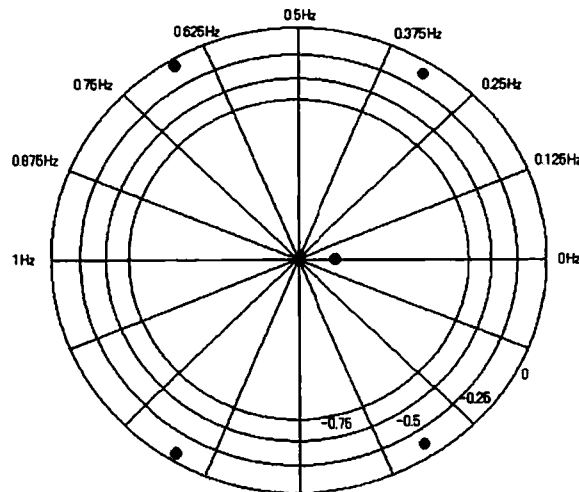


図 6.11 5次での固有値解析結果の例 (Z平面)

6.7. 固有値解析結果

サンプリング時間 0.5s、固有値解析の次数を 5 次として、表 6.2 のすべての Case について固有値解析を行い、固有周波数ならびに減衰定数の測定を行った。図 6.12 は Unit1 の出力を徐々に上げていった場合の固有値を各 Case ごとにすべて同一 Z 平面内にプロットしたものである。

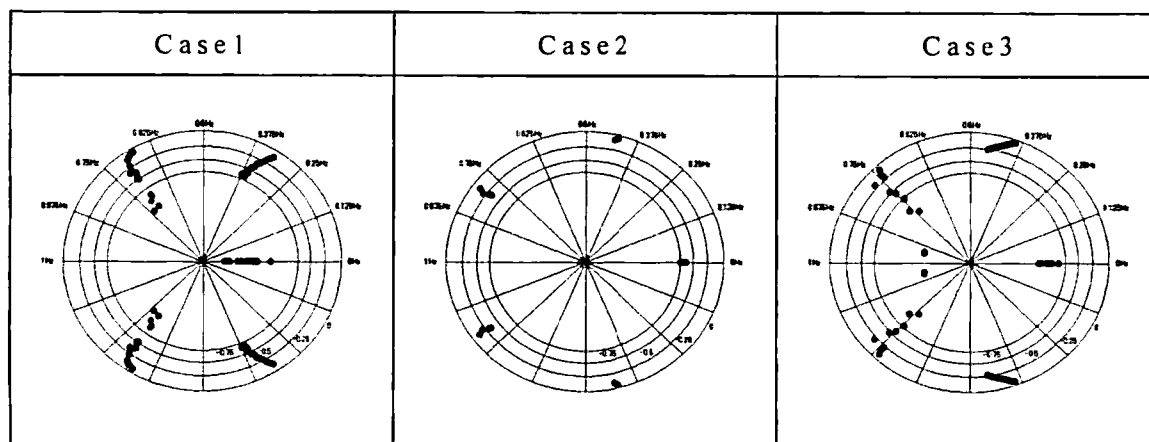


図 6.12 各 Case における Z 平面での固有値分布

Z 平面内に 5 個所の点の集合が見られるが、それは次数を 5 次としていたためである。また、これらの点は Unit1 の出力を徐々に上げていく事で中心から徐々に遠ざかっていく。更に、図を見ても分かるように、0.4Hz 付近と 0.7Hz 付近に動揺モードが確認される。図 6.13 は 0.4Hz の動揺モードについて提案方式により固有周波数および減衰定数の同定を行った結果を示したものである。ここで、0.7Hz 付近の動揺モードについて、同定を行っていないのは 6.5. で固有周波数と減衰定数の測定が行えなかったため比較できないためである。図を見ても明らかなように、固有値解析により得られる結果は FFT ならびに 3 点比較頂点探索法により得られた結果と非常によく類似している事が分かる。また、減衰定数を見てみると、Unit1 の出力を徐々に上げていく事で減衰定数の値は徐々に 0 に近づいており、安定度は悪化していると分かる。この結果より、固有値解析により同定した減衰定数に着目する事で対象システムの安定度評価を行う事が可能であり、本提案手法の有効性が明らかとなった。

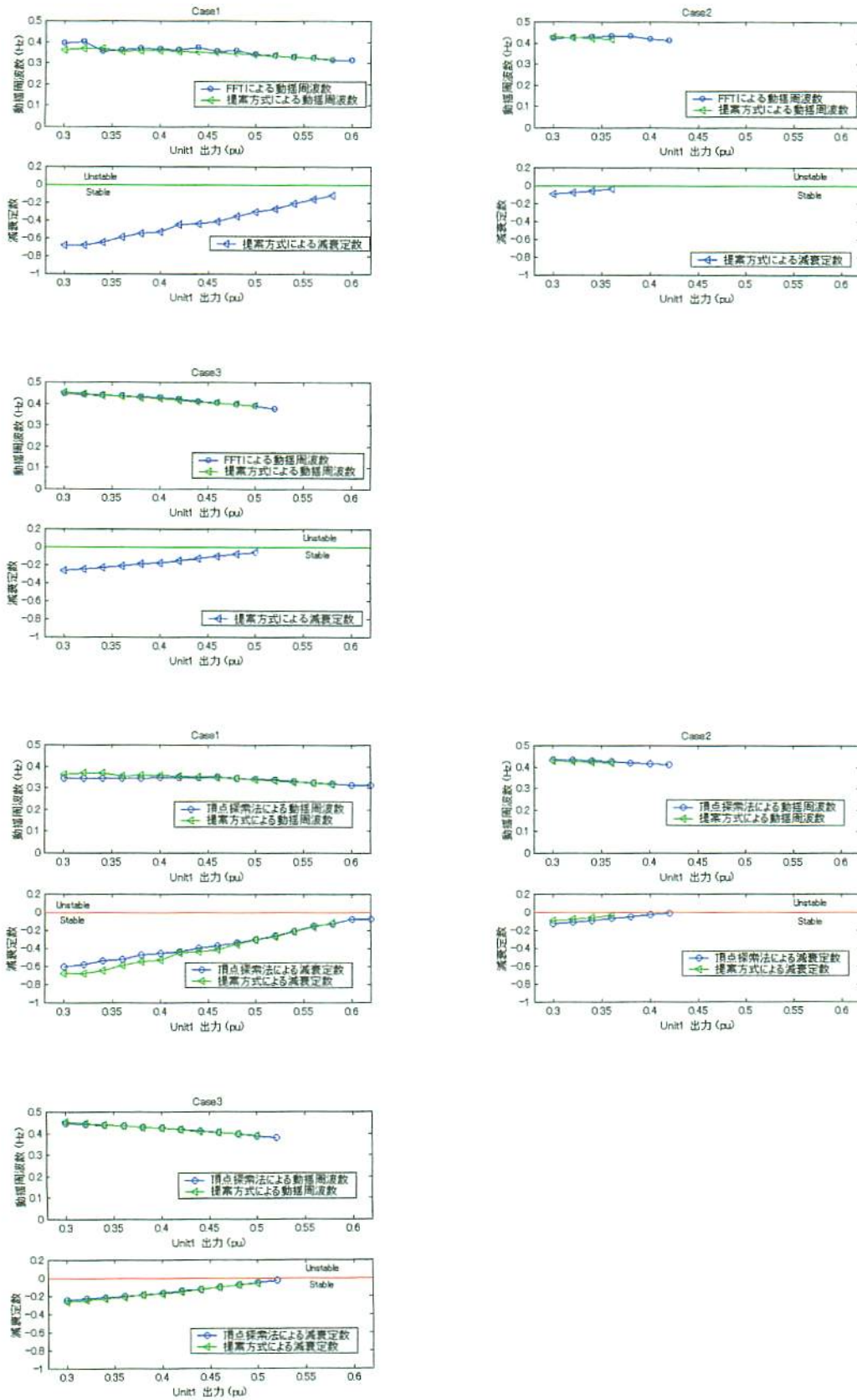


図 6.13 提案方式による固有周波数および減衰定数の同定結果(0.4Hz)

6.8. 実時間固有値解析の設計

ここでは、提案する固有値解析による安定度評価を実時間で行うための方法およびその実時間固有値解析を用いた計算機シミュレーション結果およびアナログシミュレータ試験結果により有効性の検討を行う。

これまでの結果より、固有値解析による安定度評価手法は対象システムの定態安定度を知る上で、システムの固有周波数および減衰定数という非常に有用な情報を提供する手段である事が分かった。しかしながら、ここで得られる結果はいずれも、予め取得したデータを用いてオフラインで処理を行い、安定度評価を行ったもので、時々刻々と変動する電力システムの安定度を知るには、このオフライン処理をオンライン処理へと移行する必要がある。よって、ここでは提案手法をオンラインで行う実時間固有値解析について説明を行う。オフライン処理をオンライン処理へ移行するには、実行速度が最も大きな鍵を握ってくる。これまでに、オフラインで固有値解析を行う際に我々は、固有値解析の次数とサンプリング時間について検討を行ってきた。まず、固有値解析の次数については、電力システムの状態に応じて複雑であればあるほど次数は高く、また単純であれば次数は低くなるのは当然の事であり、その次数を設定する際に独自の評価関数を用いた同定方法によって次数の決定を行った。また、サンプリング時間に関しては、観測される広域動揺モードが全て1Hz以内であったためサンプリング定理によりサンプリング時間は0.5sとしているが、サンプリング時間をそれだけ長めに設定している目的としては、最終的にこの実時間処理を見越したためである。よって、これも予め電力システム内の広域動揺モードを事前に調べておき、その動揺モードが同定できるように最大長でのサンプリング時間を決定する必要がある。また、単にサンプリング時間を0.5sとすると1Hzを超える動揺モードが低い周波数成分にエリアシング誤差として現れてくる事が考えられ、それらは固有値解析結果に悪影響を与えてくる事が考えられる。そこで、固有値解析の前段処理としてこれらの周波数成分をフィルタにより除去している。さて、ここでオフラインでの固有値解析とは異なり、オンラインでの固有値解析を行う場合には新たにバッファサイズを考慮

する必要がでてくる。このバッファサイズとは、実際に固有値解析に用いるデータをスプールしておく事が可能なデータの数であり、データ数を多く取れば取るほど結果の信頼性は高くなる。しかしながら、多くとりすぎる事で計算時間がかかりすぎオーバーフローする事も考えられるのでバッファサイズについては後程、検討を行う。

図 6.14 は MATLAB/Simulink を用いて設計した実時間固有値解析ブロックを示したものである。また表 6.5 は、各ブロックの処理内容を示している。このように設計した実時間固有値解析プログラムを Simulink 上でコンパイルする事で、DSP Board 上で実時間での運用が可能となる。DSP Board の AD 変換インターフェースより、外部から P1、P2 の信号が入力され、図 6.15 のように解析結果は随時 dSPACE 社の提供する Control desk 上に表示される。

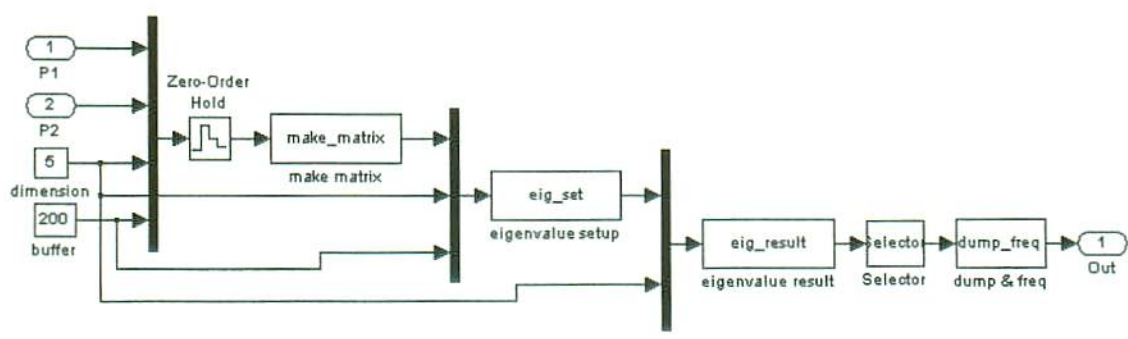


図 6.14 実時間固有値解析の処理過程

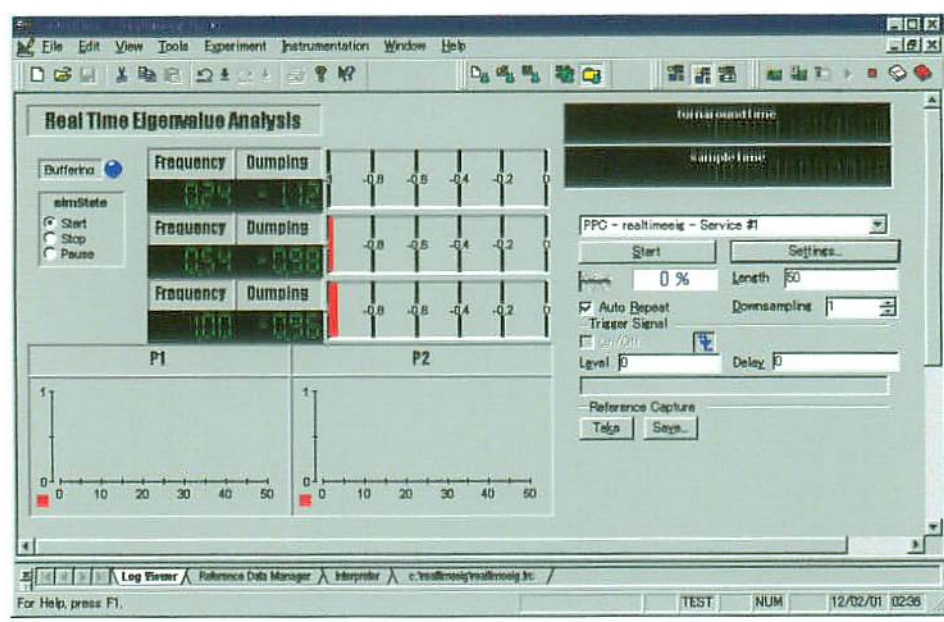


図 6.15 Control desk

表 6.5 各ブロックの処理内容

P1	External System I からの Study System への入力
P2	Study System から External System II への出力
dimension	実時間固有値解析の次元
buffer	バッファサイズを指定
Zero-Order Hold	指定したサンプリングレートで動作するサンプルアンドホールド関数。設定値は 0.5s。
make_matrix (S function)	P1、P2、dimension、buffer のデータを基に固有値解析の行列を作成
eig_set (S function)	ガウスの消去法を用いて差分方程式の係数を算出
eig_result (S function)	DKA 法を用いて特性方程式の解（固有値）を算出
selector	入力要素から、減衰定数および固有周波数の算出に必要なデータを選択
dump_freq (S function)	eig_result より得られた離散系の固有値から、連続系の固有周波数、減衰定数へ変換

さてここで、サンプリング時間について考えてみる事にする。先ほども述べたように実時間処理を行うためには、この固有値解析の一連の処理はサンプリング時間 0.5s 内に終了している必要がある。図 6.15 の turnaround Time は、この固有値解析にかかる時間を示している。今この時間はおよそ 0.00001s である事から、サンプリング時間 0.5s は十分に満たしており、この処理はサンプリング時間内にその一連の処理を終了する事ができており、実時間での運用は可能である事が分かる。

さて、次に考慮しなければならなかったバッファサイズについて考える事にする。図 6.16 は、各バッファサイズにおける固有値解析結果を示したものである。また、ここで固有値解析の対象となるシステムはこの時間内に電力システムの構成ならびに電力システムの状態は変更していない。つまり、状態が変更しなければ当然システムの持つ固有値も変化

しないという事になる。図を見ると分かるように、バッファサイズの大きさに固有周波数には大きな差異は見られないものの、減衰定数においては解析結果が大きく違っている。また、バッファサイズを大きく取る事で減衰定数の変動は徐々になくなり、バッファサイズを200とする事で変動はほぼなくなる結果を得た。解析中に電力システムの状態が変動しない対象システムでは当然固有値解析結果も不変である必要があり、つまり、固有周波数および減衰定数が変動する事は理に反していると言える。よって、その事からバッファサイズを200とする事が最も望ましいと言える。また、先ほどの図 5.19 に表示されている処理時間は、バッファサイズを200とした時の処理時間を示している。

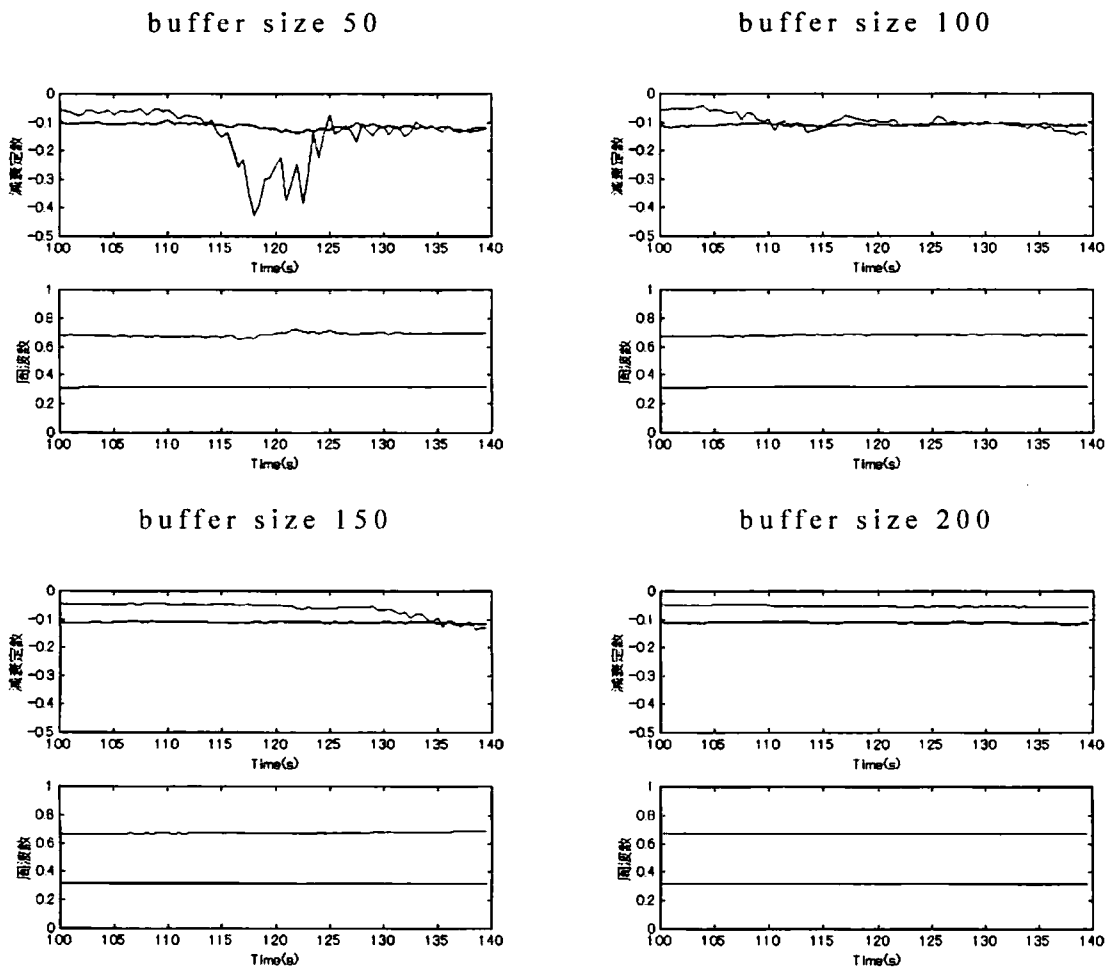


図 6.16 各バッファサイズにおける固有値解析結果

以上の事から、サンプリング時間を 0.5s、バッファサイズを 200 とする事で、電力システムの構成および電力システムの状態の変動しない対

対象システムの定常安定度を正確に評価する事が可能である事が分かった。定常安定度評価を実時間で行えるだけでも本手法は十分に有効であるのだが、更に考慮すべき点がある。それは、電力システムの状態の変動するシステムに対して正確に安定度評価が可能かどうかという点である。実電力システムにおいては、時々刻々の負荷変動によって常時電力システムの状態は変動している。つまり実電力システムを対象としてこの安定度評価手法の適用を考えるには、電力システムの状態が変更した場合でも正確に安定度を評価する必要がある。そこで、対象システムの電力システムの状態が変動する場合において、提案手法が正確に安定度評価可能かについて図 6.7 のアナログシミュレータを用いて実験を行った。電力システムの構成は、全 Unit に全て PSS を設置した場合で試験を行う。この時、先ほどの実験とは異なり、Unit1 の出力は図 6.17 のように変動するものとする。更に、図 6.17 の各点を表 6.6 のように与え、出力上げ指令、下げ指令、Unit1 の出力を変更する事で電力システムの状態の安定および不安定の度合いの変更を行っている。

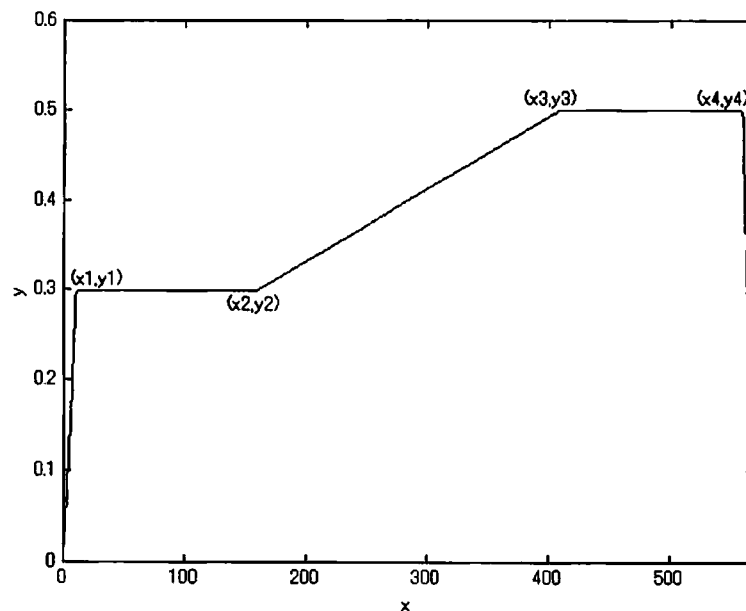


図 6.17 Unit1 の出力変動

表 6.6 各ケースにおける Unit1 の出力

		1	2	3	4
Case1	x	10	160	410	560
	y	0.3	0.3	0.5	0.5
(備考) 0.3pu から 0.5pu へ上げ指令					
Case2	x	10	160	410	560
	y	0.3	0.3	0.50	0.50
(備考) 0.5pu から 0.3pu へ下げ指令					
Case3	x	10	160	410	560
	y	0.55	0.55	0.3	0.3
(備考) 0.3pu から 0.55pu へ上げ指令					
Case4	x	10	160	410	560
	y	0.55	0.55	0.3	0.3
(備考) 0.55pu から 0.3pu へ下げ指令					

図 6.18 は、それぞれ各ケースにおける周波数 0.3Hz の動揺モードの固有値解析結果を示したものである。図は、上から Unit1 の出力、実時間固有値解析での減衰定数同定結果、オフライン固有値解析での減衰定数同定結果を示している。また固有値解析では、それぞれ 0.5s でサンプリングし、バッファサイズが 200 点であるため、バッファリングのために必要な時間は 100 秒であり、つまり 100 秒を過ぎてから結果は出力される事となる。更に、実時間処理とオフライン処理を両方出力しているのは実時間処理での同定結果が正しいかどうかを見極めるためである。この図を見ても分かるように、実時間処理およびオフライン処理ともに解析結果は一致しており、この事は計算がオーバーフローする事なくサンプリング時間内に実時間処理が完了している事を示している。また図からも分かるように、Unit1 の出力を上昇、または下降させる事によって、減衰定数の値は増加および減少している。つまり Unit1 の出力を上げるといふ動作は電力システムの状態を悪化させるという事であり、減衰定数が 0 に近づく、増加の傾向を示している事は減衰が徐々に悪くなって

いる事を示しており、つまりは正確に安定度評価が行えている事を示している。よって、本手法は電力システムの状態が変わるシステムにおいても実時間で正確に定態安定度の評価が可能である事が分かった。

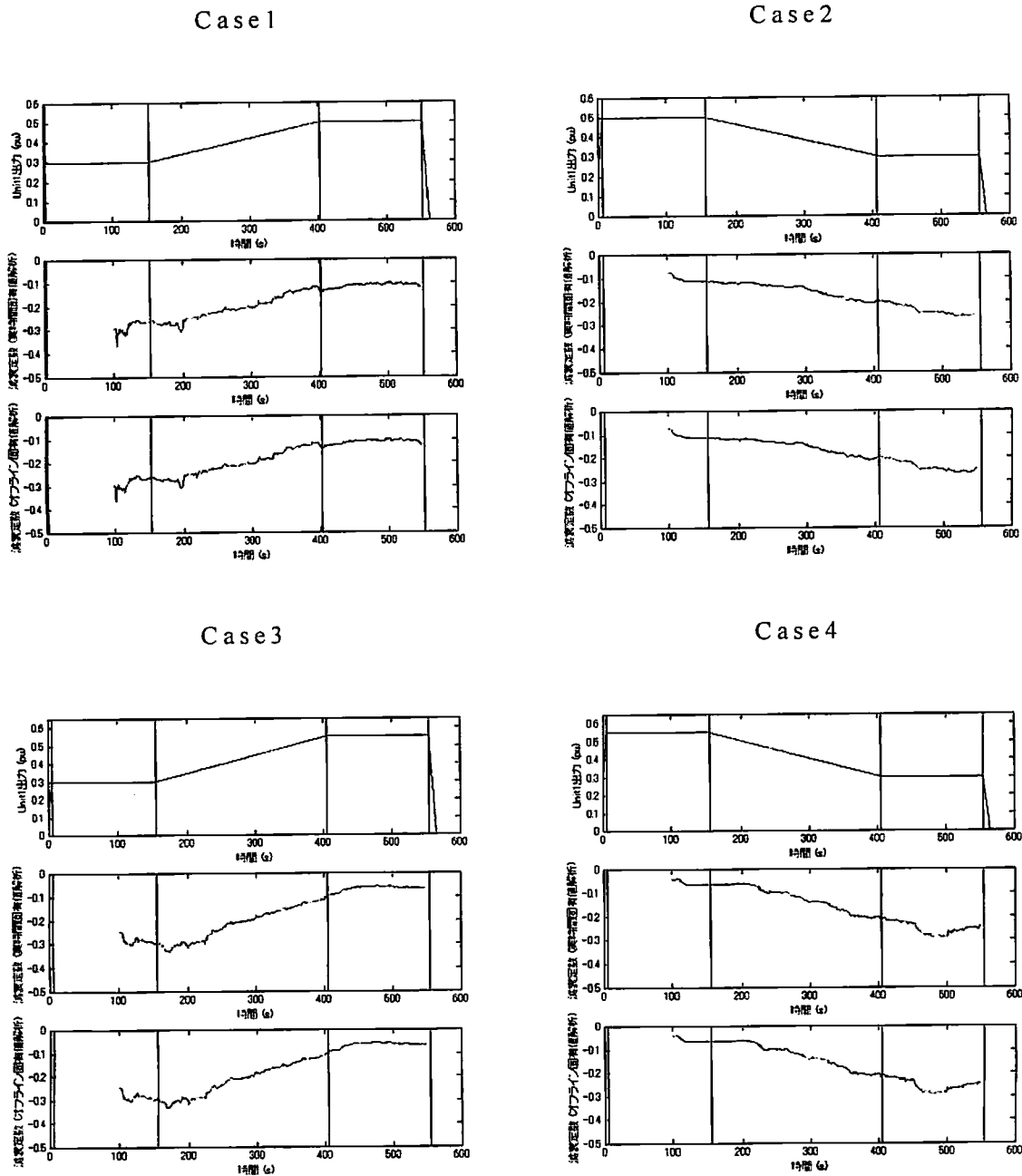


図 6.18 各ケースにおける固有値解析結果

6.9. マルチエージェントシステム (Multi-Agent System)

IT 事業の強化が盛んに行われている現在、電力システムの広域安定度評価に関してもネットワーク回線を利用する動きは今後も、拡大してい

くものと思われる。図 6.19 は、情報ネットワークを利用したマルチエージェントシステムを図にしたものである。

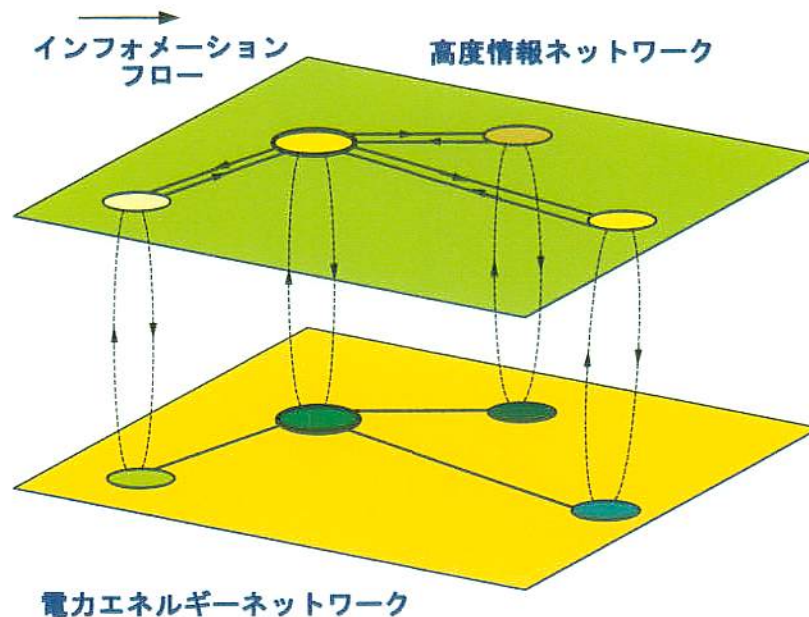


図 6.19 マルチエージェントシステム

図中の電力エネルギーネットワークとは、図 2.1 に示すような系統変電所および幹線・連系線からなる電力システムを指しており、丸で示される系統変電所ごとは地理的な広がりを持っている。また、前述したように図 2.1 に示す例題系統では電力システム全系の安定度を評価するため各 500kV 系統変電所にて、有効電力・無効電力・系統電圧・周波数の観測が行われている。更に、各系統変電所はそれぞれ専用の情報ネットワークケーブルで接続されており、ちょうど図のように電力エネルギーネットワークと同じように情報ネットワークも構築されている。電力システムにおいて、ある地区の安定度を解析するのではなく、広域安定度を解析する場合においては、各地区でどのような事が起こっているかを知るために実時間で各地区の情報あるいは安定度を知っておく必要がある。つまり、各地区より情報ネットワークを通じて送信されるデータあるいは安定度解析結果がある地区のみ不安定と判断した場合にはそれは、局所的な不安定現象でありその地区でのみ安定に電力を供給するための制御を行えばよいという事になる。また、それとは逆に全ての地区から

不安定という信号が送信された場合においては、それは局所的ではなく広域的な不安定現象であり、その場合はどの位置でどのような制御をすべきかを考え広域安定化制御 (Wide Area Stabilization Control) を行う必要がある。今後、我々が実現を目指す広域安定度モニタリング装置 (Wide Area Monitoring System) は、まさしくこのように情報ネットワークを利用したものである。つまり、ある対象システムの定態安定度を知らするために対象システムへの入力信号と対象システムからの出力信号を基に安定度解析を行う実時間固有値解析はその1つである。

本論文では、電力システムを不安定へと移行させる原因である「事故後複数波で脱調に至る場合」および「動態不安定となる場合」の2つに対してそれぞれ3点比較頂点探索法、実時間固有値解析法という全く新しい独自の手法を提案し、どちらの場合においても実時間で正確に安定度を把握する事が可能となった。今後は、これら2つの手法を統合し総合評価する安定度モニタリング装置を作成し、実電力システムへの設置を行い、オンラインで安定度評価が可能であるかどうかの実証試験を行う予定である。

6.10. まとめ

本章では、安定度解析の対象となるシステムに外部システムより注入される有効電力潮流と対象システムから出力される有効電力潮流から固有値解析を行い安定度を評価する手法を提案し、計算機シミュレーションならびにアナログシミュレータ試験を通じてその有効性の検討を行った。まず、計算機シミュレーションによる有効性の検討では、既知の対象システムを与えて、外部システムより背景動揺を注入し、その注入信号と対象システムの出力より固有値解析を行う事で対象システムの固有値のパラメータ同定が行え、有効性が確認された。更に、アナログシミュレータ試験でも、電力システムの構成、ならびに電力システムの状態の異なる様々な状態に対して固有値解析を行った結果、予めFFT解析ならびに3点比較頂点探索法より得られた固有周波数と減衰定数とほぼ同じ値を得る事ができ、有効性が確認できた。また、DSP Boardを使用す

る事によってこの固有値解析を実時間で処理する事が可能となった。そして、その実時間固有値解析システムを用いて電力システムの状態が変動するシステムの安定度を観測した所、電力システムの状態が悪化させた場合、あるいは良くさせた場合のいずれに対してもその時の電力システムの状態を正確に評価する事が可能である事が分かった。動態不安定となる場合の解析、つまり定態安定性の評価手法はまだまだ研究段階であり、本提案手法はそのような点から見ても大きな前進と言える。

第 7 章 総括

本研究では、計算機シミュレーション、アナログシミュレータ試験結果、500kV 系統幹線で観測された実測データを用いて電力システムの実時間安定度評価手法の提案を行ってきた。

近年、電力システムの規模の拡大や複雑化、および発電設備の増強の遅れ、更には地球環境問題・電力自由化を背景として、低い安定度マージンでの運用は避けられない状況にある。このような状況において電力システムの安定度を実時間で正確に把握し、電力システムが不安定方向へと移行しつつある場合には何らかの対策によって電力システムを安定化する事は重要な課題の一つと言える。また本論文では、電力システムを不安定にする要因、つまり電力システムの実時間安定度評価の対象として、2つの事象を考えている。1つは、電力システム内に何らかの事故が発生しその事故が原因となり事故後複数波で脱調となる場合、またもう1つは定常状態において電力システム内に介在するじょう乱の影響で安定動作点を逸脱し電力システム全系が不安定となる、つまり動態不安定となる場合の2つである。これらについて、我々は、幾つかの全く新しい独自の手法を提案している。更に、安定度解析だけではなく実測データを用いて電力システムで観測される動揺モードの解析についても詳細に検討を行っている。以下に、本研究によって得られた結論を各章別の要約して述べる。

第 2 章「電力システムにおける動揺様相」では、実電力システムにおいて 500kV 系統変電所で実測された 1999 年 3 月 23 日 12 時から 1999 年 3 月 24 日 12 時まで(春季)と、1999 年 10 月 14 日 0 時から 24 時まで(秋季)の 2 つの 24 時間の有効電力 (P)・無効電力 (Q)・系統電圧 (V)・周波数 (f) の実測データより、実電力システムに存在する動揺様相について検討を行った。

時間領域 PQVf の解析は、日間推移、季節による変動様相の相違、負荷状態による変動様相の相違について検討を行った。日間推移の検討では、1 日の有効電力 (P)、無効電力 (Q)、系統電圧 (V) の時間的変動

の推移から西地区に設置された複数の火力発電機が負荷変動に応じて計画的に発電を行っている他、南地区に設置された原子力機が負荷変動に関係なく常に一定出力で運転している事が分かった。また、4つの幹線および連系線 N1 の変動を見てみると、特に連系線のものが他の幹線に比べておよそ8倍程度大きくなっている事が分かった。春季・秋季といった季節による相違を検討してみると、季節に関係なく西地区の複数台の火力機は計画的に運転され、南地区の原子力機は負荷変動に関係なく常に一定運転を行っている事が分かった。また、秋季に比べて春季の方が消費電力が大きい事が分かった。更に、重負荷時および軽負荷時といった負荷状態による推移について検討を行ってみた所、両者に顕著な違いはみられない事が分かった。また以上の結果より、時間領域 PQVf での安定度解析を行うにはそれぞれの観測点で動揺モードの様相が視覚的に表れている必要があり、よって有効電力 P が最適であると言えた。更に、時間領域 PQVf では PV、Pf 特性についても検討を行った。勾配 dV/dP および勾配 df/dP を調べてみると、0 から負の間で非常に小さな動揺を示しており、現在の動作点が安定限界点とは異なった場所に位置し、それより動作点がまだ十分に安定であると分かった。

周波数領域 PQVf の解析は、まず観測されるデータの内どのデータを用いるのが最適かについて検討を行った。有効電力 P および系統電圧 V に関して、いずれも正確に Global Mode を同定できる事が分かり、よって周波数領域での解析では有効電力 P あるいは系統電圧 V のいずれかのデータを用いればよいといえ、本論文では有効電力 P を検討対象とする事にした。そこで、有効電力 P に対する FFT 解析は、動揺モードの日間変動、動揺モードの季節による相違、動揺モードの負荷状態による相違、動揺モードの観測点による相違について検討を行った。動揺モードの日間変動の検討では、1999年3月23日12時から1999年3月24日12時までの観測点 N1 の有効電力 P における周波数の1時間ごとの変動の推移を見て、いずれの時間帯においても、この例題系統が持つ 0.35Hz と 0.55Hz の2つの広域動揺モードが確認されている事が分かった。ただし、それらの大きさは時間によって異なっている事も同時に分かり、この日

においては、14時から15時までN1で観測される動揺は大きく、20時から21時では動揺は小さかったと分かった。また、14時から15時までは20時から21時までと比べて広域動揺モードの比率が大きくなっている事から、N1付近で住宅負荷ではなく工学負荷などの容量の大きな電動機など大きな潮流変動を伴う負荷変動が他の時間帯に比べて多く起こったのではないかと推測する事ができた。春季・秋季といった季節による相違を検討してみると、春季、秋季いずれの場合においても0.35Hzと0.55Hzの2つのGlobal Modeが確認できた。また、春季と秋季でFFT処理結果の違いを見てみると、秋季の方が春季に比べてFFTのスペクトルが全体的に高めの設定となっており、じょう乱が大きかったと言えた。更に、重負荷時および軽負荷時といった負荷状態による相違について検討を行ってみた所、春季・秋季によって軽負荷および重負荷でスペクトルの大きさに差異は見られない事が分かった。また、観測点による相違について検討を行ってみた所、各観測点N1、E1、W1、S2の全ての観測点で共通して0.35Hzの動揺モードと0.55Hzの動揺モードが確認される事が分かった。更に、地区によっては共通して観測されるGlobal Mode以外の動揺モードも観測され、これらはその地区固有の動揺モードであると考えられる事ができ、これらを基にして地区ごとにグループ分けが可能となる事が分かった。

第3章「ニューラルネットワークによる電力システム動特性の表現」では、PVの動特性を表現するモデルの作成のために、フィードバック型ニューラルネットワークとElmanニューラルネットワークの2種類のニューラルネットワークの提案を行った。

提案するフィードバック型ニューラルネットワークを用いた場合において、その出力が有効電力観測データPに非常によく似ている事が分かり、その事から提案するフィードバック型ニューラルネットワークにより有効電力Pおよび系統電圧Vを用いる事で正確なPVの動特性の表現が可能である事が言えた。

提案するElmanニューラルネットワークを用いた場合において、その出力が有効電力観測データPに非常によく似ている事が分かり、その事

から提案する Elman ニューラルネットワークにより有効電力 P および系統電圧 V を用いる事で正確な PV の動特性の表現が可能である事が言えた。更に、フィードバック型ニューラルネットワークと Elman ニューラルネットワーク、それぞれのニューラルネットワークの精度に関して、提案手法と観測データの間で平均二乗和誤差を取り、 pu 値で誤差の評価を行った所、どちらのモデルについても誤差は非常に小さい事が分かり、よって提案するニューラルネットワークを用いる事により正確に PV の動特性がモデリングされている事が分かった。

しかしながら、状態がある時点で変化する電力システムに対して、提案手法で正確に PV の動特性の表現が可能かどうかについて実電力システムのデータを用いて検討を行った所、提案するフィードバック型ニューラルネットワークを用いた場合において、学習で用いた部分に対しては、フィードバック型ニューラルネットワークを用いる事でうまく PV の動特性が表現されたが、動作状態が変更してからはうまく PV の動特性が表現されていない事が分かった。ただし、動作状態の変更に対しても、変動成分についての表現は正確に行えている事が分かり、よって今回提案するフィードバック型ニューラルネットワークでは、定常動作点の推移に関して、PV の動特性を表現できると言える。

第 4 章「時間領域における実時間安定度評価手法」では、電力システムを不安定方向へと移行させる要因の一つである事故後複数波で脱調に至る場合について 3 点比較頂点探索法を提案し、計算機シミュレーションによる有効性の検討およびアナログシミュレータ試験による有効性の検討の 2 つを行った。

既知のパラメータを入力信号として 3 点比較頂点探索法で同定を行った結果、減衰定数および周波数の各パラメータは設定した既知のパラメータとほぼ等しい事が分かり、提案手法の有効性が確認された。更に、アナログシミュレータ試験により、提案手法の有効性の検討を行った結果、提案手法により同定した減衰定数が $Unit1$ の出力を低めと設定した時には負の値を持ち、 $Unit1$ の出力を高めに設定した時にはほぼ 0 に近い値を持つ事が分かった。つまり、 $Unit1$ の出力を上昇させる事で、電

力システムの状態が悪化したという事を正確に評価できており、本手法が事故後複数波で脱調に至る場合の解析に有効である事が言えた。また、MATLAB/Simulink および、dSPACE 社の提供する DSP Board の使用により提案手法の実時間処理が可能となっている。

第5章「周波数領域における実時間安定度評価手法」では、電力システムを不安定方向へと移行させる要因の一つである動態不安定となる場合について計算機シミュレーションによる有効性の検討および実電力システムの幹線での有効電力潮流観測データによる有効性の検討の2つを行った。

提案する Real Time FFT を用いる事により、電力システムにおける動揺モードの時間的変動を実時間で視覚的に容易に捕らえる事が可能となり、ファジィ推論を用いて、複合動揺モードを個々の動揺に分解する事により個々の動揺モードの安定性の評価が可能である事を明らかにした。しかしながら、Real Time FFT を用いて安定度評価を行うには個々の動揺モードに対して安定および不安定と判断するための閾値について検討する必要がある事が分かり、よってファジィ推論による動揺モード分解後の結果を基にして電力システムの安定度を数値的に評価するための指標についての検討、電力システム内の複数箇所での有効電力潮流の同時観測データを基にした電力システム全体の総合的な安定度評価手法の検討などを進める事により、実時間安定度評価システムの開発を進めていく必要がある事が分かった。

コヒーレンシ解析では、電力システム内の幹線における有効電力潮流変動の実測値を基にした FFT 処理から特定できる 0.35 Hz と 0.55 Hz の2つの動揺モードのうち 0.35 Hz の動揺モードが対象とした電力システムにおける全系動揺モードである事が明らかとなった。このコヒーレンシ解析により、動揺様相の類似性の評価を行う事により、対象とする電力システムにおいて観測された幹線潮流の動揺をグループ化でき、この事より電力システムの広域安定度を実時間で評価するための適切な観測点の選定が可能となった。また、ここで得られた結果は、対象とする電力システムに複数の安定化装置を設置する際の最適設置点の選定、更には

電力システム内に設置される各種安定化装置の制御パラメータの最適調整に関して有用な情報を提供できる事が分かった。

第6章「固有値ベース」では、安定度解析の対象となるシステムに外部システムより注入される有効電力潮流と対象システムから出力される有効電力潮流から固有値解析を行い安定度を評価する手法を提案し、計算機シミュレーションならびにアナログシミュレータ試験を通じてその有効性の検討を行った。

計算機シミュレーションによる有効性の検討では、既知の対象システムを与えて、外部システムより背景動揺を注入し、その注入信号と対象システムの出力より固有値解析を行う事で対象システムの固有値のパラメータ同定が行え、有効性が確認された。更に、アナログシミュレータ試験でも、電力システムの構成、ならびに電力システムの状態の異なる様々な状態に対して固有値解析を行った結果、予めFFT解析ならびに3点比較頂点探索法より得られた固有周波数と減衰定数とほぼ同じ値を得る事ができ、有効性が確認できた。また、DSP Boardを使用する事によってこの固有値解析を実時間で処理する事が可能となった。そして、その実時間固有値解析システムを用いて電力システムの状態が変動するシステムの安定度を観測した所、電力システムの状態が悪化させた場合、あるいは良くさせた場合のいずれに対してもその時の電力システムの状態を正確に評価する事が可能である事が分かった。

なお、本研究の発展として、提案する2つの手法を統合化し、実時間で事故後複数波で脱調に至る場合、動態不安定となる場合の2つの事象に対し、総合評価するオンラインモニタリング装置の実現を考え、更にはその装置の実電力システムへの設置が期待される。

参考文献

- (1) 佐和 隆光 : "回帰分析" 朝倉書店 1979 年
- (2) 関根 泰次、林 宗明、芹澤 康夫 : "電力系統工学" コロナ社 1995 年
- (3) 美多 勉 : "デジタル制御理論" 昭光堂 1994 年
- (4) 合原 一幸 : "ニューロ・ファジィ・カオス" オーム社 1993 年
- (5) Colin R. Reeves : "モダンヒューリスティックス 組合せ最適化の先端手法" 日刊工業新聞社 1997 年
- (6) 馬場 則夫、小島 史男、小澤 誠一 : "ニューラルネットの基礎と応用" 共立出版 1994 年
- (7) 芦野 隆一、山本 鎮男 : "ウェーブレット解析 - 誕生・発展・応用" 共立出版 1997 年
- (8) 足立 修一 : "制御のためのシステム同定" 東京電機大学出版局 1996 年
- (9) 佐川 雅彦、貴家 仁志 : "高速フーリエ変換とその応用" 昭光堂 1993 年
- (10) T.W.ケルナー : "フーリエ解析大全(上)" 朝倉書店 1996 年
- (11) T.W.ケルナー : "フーリエ解析大全(下)" 朝倉書店 1996 年
- (12) 日野 幹雄 : "スペクトル解析" 朝倉書店 1985 年
- (13) 辻井 重男、鎌田 一雄 : "デジタル信号処理" 昭晃堂 1997 年
- (14) 谷萩 隆嗣 : "デジタル信号処理と基礎理論" コロナ社 1996 年
- (15) ロベルト ヴィーフ : "Z 変換の理論と応用" ブレイン図書出版株式会社 1991 年
- (16) 小国 力 : "MATLAB グラフィック集" 朝倉書店 1997 年
- (17) 芦野 隆一、Remi Vaillancourt : "はやわかり MATLAB" 共立出版 1997 年
- (18) 小国 力 : "MATLAB と利用の実際 - 現代の応用数学と CG -" サイエンス社 1995 年
- (19) 小池 慎一 : "C による科学技術計算 - 複素数の扱いから FFT プログラミングまで - "
CQ 出版株式会社 1987 年
- (20) B.W.カーニハン、D.M.リッチー : "プログラミング言語 C 第 2 版" 共立出版株式会社 1989 年
- (21) 大野 豊、磯田 和男 : "新版 数値計算ハンドブック" オーム社 1990 年
- (22) T.R.マッカーラ : "計算機のための数値計算法概論" サイエンス社 1972 年
- (23) 太田 洋二郎 : 卒業論文 "連系線電力潮流からみた電力系統安定度の評価" 1998 年
- (24) 濱田 高史 : 卒業論文 "電力システムのオンライン実時間安定度評価" 1999 年
- (25) 鈴木 直人 : 修士論文 "電力システムのオンライン安定度評価に関する研究" 1999 年
- (26) 齋藤 貴幸 : 卒業論文 "周波数領域における電力システム動揺モードの解析" 2000 年
- (27) 小島 大介 : 卒業論文 "時間領域における広域電力系統安定度評価システムの開発" 2001 年
- (28) T. Hiyama, N. Suzuki, T. Funakoshi : "PQVf Monitoring at 500 kV Substations", IPEC'99(International Power Engineering Conference), Vol. 1, pp.101-104
- (29) N. Suzuki, T. Hiyama, T. Funakoshi : "Artificial Neural Network Based Modeling of on 500 kV Transmission Line", IPEC'99(International Power Engineering Conference), Vol. 2, pp.810-813

- (30) T. Hiyama, N. Suzuki, T. Kita, T. Funakoshi : "Development of Real Time Stability Monitoring System for Power System Operation", IEEE PES 1999 Winter Meeting, Vol 1, pp.525-530
- (31) T. Hiyama, N. Suzuki : "Real Time Modal Analysis of Power System Oscillations", ISCAS'2000(IEEE International Symposium on Circuits and Systems), Vol. VI, pp.225-228
- (32) T. Hiyama, N. Suzuki, T. Funakoshi : "On-line Identification of Power System Oscillation Modes By Using Real Time FFT", IEEE PES 2000 Winter Meeting, CD-ROM
- (33) 鈴木 直人、檜山 隆、舟越 節彦 : "周波数領域における電力システム動揺モードのコヒーレンシ解析" 平成 12 年電気学会 電力・エネルギー部門大会、論文 I、No.43
- (34) 鈴木 直人、檜山 隆、舟越 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" 平成 12 年電気学会論文誌 2 月号、pp.134-140
- (35) 鈴木 直人、檜山 隆、舟越 節彦 : "系統幹線における有効電力潮流変動を基にした実時間安定度評価" 平成 11 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会、PE-99-167 PSE-99-164
- (36) T. Hiyama, N. Suzuki, D. Kojima, T. Funakoshi : "Background Oscillation Based Real Time Stability Evaluation", IEEE PES 2002 Winter Meeting, 採択済
- (37) T. Hiyama, N. Suzuki, and T. Funakoshi : "On-line Coherency Monitoring of Power System Oscillations", IEEE PES 2000 Summer Meeting, Vol. III, pp.1839-1844
- (38) 鈴木 直人、檜山 隆、舟越 節彦 : "周波数領域における電力システム動揺モードの解析" 平成 12 年電気学会全国大会、6-086
- (39) 鈴木 直人、檜山 隆、喜多 敏博、舟越 節彦 : "Real Time FFT による電力システム動揺モードのオンライン同定" 平成 11 年平成 11 年電気学会全国大会、No.1416
- (40) 鈴木 直人、檜山 隆、舟越 節彦 : "実時間 FFT とファジィ推論を基にした電力システムの実時間安定度評価" 電気学会 電力・エネルギー部門大会、論文 II、No.196
- (41) 鈴木 直人、檜山 隆、舟越 節彦 : "有効電力潮流および系統電圧からみた電力系統安定度の評価" 電気学会 電力・エネルギー部門大会、論文 II
- (42) 鈴木 直人、吉牟田 芳樹、檜山 隆、喜多 敏博、長嶋 洋 : "アナログシミュレータを用いた電力システムのオンライン安定度評価" 平成 10 年電気学会全国大会、No.1281
- (43) 鈴木 直人、吉牟田 芳樹、檜山 隆、安藤 浩昭 : "ニューラルネットワークを用いた電力システムのオンライン安定度評価の基礎的検討(その 2)" 平成 9 年電気学会九州支部大会

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始熱心な御指導・御鞭撻を賜りました熊本大学大学院自然科学研究科システム情報科学専攻エネルギーシステム講座 檜山 隆 教授に心より感謝致します。

本論文をまとめるにあたり、御討論・御教示頂いた熊本大学大学院自然科学研究科システム情報科学専攻エネルギーシステム講座 秋山 秀典 教授、蛭原 建治 教授、宮原 邦幸 教授、同知能情報工学講座 川路 茂保 教授に謹んで感謝の意を表します。

また、研究を進めるにあたって、熊本大学工学部 電気システム工学科 電気エネルギーシステム講座 宮内 肇 助教授、喜多 敏博 助手、九州電力株式会社総合研究所 舟越 節彦氏に、有益かつ貴重な御助言・御指導を頂き、心から謝意を表します。

なお、研究留学中に「分散・複合型電力供給システムの特性解析とその実験的評価」の研究を遂行するにあたって、終始熱心な御指導・御鞭撻を賜りましたアメリカ合衆国 クラークソン大学電気計算機工学科電力品質研究室 Thomas H. Ortmeier 教授に心より感謝致します。

最後になりましたが、本論文の執筆並びに本研究を進めていく上で、共に頑張ってきた小島 大介氏、大津 和樹氏、ならびに多大なご協力を頂きました電力システム研究室の皆様感謝申し上げます。

本研究は、以上に挙げた方々の御助力のもとにはじめて完遂し得たものであります。ここに記して心からの感謝の意を表します。

2002年 3月

鈴木 直人