

博士論文

広域電力系統における低次線形モデル
を用いた適応型 PSS の構築

指導教官 横山 明彦 教授

東京大学大学院工学系研究科

電気工学専攻 37-37084 杉原 俊雄

内容梗概

現代の電力系統は、広範囲に渡って交流で連系されているが、全ての発電機は同期を保って運転を続ける必要がある。生産と消費の遠隔化や、需要の拡大が続くことにより、系統全体に広域的な長周期・弱制動の動揺現象をもたらさうる定態安定度の問題が現実化してきた。例えばわが国では、数秒周期の電力動揺現象が、西日本において検出されている。広域的な定態安定度の問題は、多くの発電機や送電網などが影響を与え合って起こると考えられており、過渡安定度への対応を主とした方法では対応が難しいといわれている。定態安定度の評価は、固有値解析法などの手法を用いて、古くから行われてきた。しかし、解析には電力系統全体に関する詳細な情報を必要とするため、多数の事業者が独自の戦略で電力系統を利用する電力自由化時代においては、必ずしも現実的な方法ではないといえる。近年では、電力系統全体を詳細にモデル化して分析するかわりに、いくつかの仮定のもとづいて、計測情報を利用して安定度解析を簡便に行う手法が提案されている。固有値解析を、限られた数の発電機を対象とした低次の線形モデルを同定することで行う手法は、GPS を用いた位相計測技術の発達により、低いコストで実現できるようになった。本研究では、発電機の励磁制御装置の一種である PSS を対象に、計測を伴うモデル同定を行い、固有値解析法を用いて PSS の制御パラメータを定態安定度が高まるように操作する適応制御に取り組んだ。従来の研究では多くの場合、パラメータ設計を 1 回だけ行い、設計前と設計後の安定度を比較することで、制御手法の評価を行っている。しかし実際の電力系統では、時々刻々と状況が変化するため、定態安定度の管理は継続して考える必要がある。そこで本研究では、オンラインで計測した情報を利用した、適応制御によるパラメータチューニングを、反復継続して行う。同定を用いた適応制御では、同定から有用な情報が得られる期間に限られるため、パラメータ設計を行うべきかを判定する手法を検討した。本研究で用いる手法では主に、発電機ごとに個別に計測・制御を行うため、複数の発電機でパラメータ設計を並行して実施できる。同定に用いる低次線形モデルの形や、波形に対するフィルタの適用などにおいて、いくつかの工夫を試みた。その結果、同定により動揺波形が観測される期間においては、支配的な動揺モードを適切に把握し、安定度の向上につながるパラメータ設計を実現した。動揺波形が観測できない既に安定な時期においては、不正確な同定により不安定化をもたらすパラメータ設計を防止するための判定アルゴリズムが、適切に動作することを確かめた。

Abstract

In modern electric power system, control areas are interconnected among others. Every generator must be operated keeping the synchronization to maintain stability of the system. Because the distance between generation side and load area is becoming long and the load is growing, small signal stability (steady-state stability) problem has become a great concern in Japan and other nations. The problem may cause the oscillation of power flow in a wide area. For example, the oscillation whose period is several seconds is sometimes observed in western system of Japan. Small signal stability problem in the wide area is caused by interaction among generators and their control systems in the power system. A method for maintaining the transient stability is not suitable to deal with this kind of problem. Power System Stabilizer (PSS) is an excitation voltage controller equipped with generator. PSS can improve the small signal stability when its control parameters are tuned properly. The small signal stability can be analyzed by using eigenvalue analysis of the linearized system of the power system. The real part of the eigenvalue stands for the stability index of the system, and is calculated by using control parameters of generator (including PSS) and other parameters of transmission system, load and so on. Therefore, evaluation of the relationship between PSS parameters and the system stability is possible. However, the conventional eigenvalue analysis requires so much information on power system that it is not practical in the real large-scale power system. In addition, the analysis cannot be used for on-line monitoring of the power system stability. In recent years, some simplified methods using measured information are proposed to evaluate the system stability. Simplified eigenvalue analysis using low-order linear model can easily be implemented for on-line monitoring system because accurate time-stamps are available by using the GPS receivers.

In this research, adaptive tuning of PSS parameters based on the simplified eigenvalue analysis is operated. In the proposed method, parameters in the PSS are tuned repeatedly because the structure of the system and the power demand are continually changed. A simple generator model including PSS control block and elements to be identified is proposed to evaluate the stability of the whole power system. Some elements of the simple generator model can be identified by using measured variables of the power system. Then, eigenvalue sensitivities which indicate the

relationship between PSS parameters and eigenvalues of the system are calculated. Parameters of the PSS are tuned by using linear programming to improve the stability index. The identification and tuning are repeated while the dominant oscillation exists in the system. The parameters of the PSS may sometimes be changed to the wrong values because the simplified model does not always represent the true stability, and the accuracy of identification is limited. The amount of a parameter change at one time is limited strictly to avoid that the stability is lost in a short time. To update the parameters frequently during a long period makes it possible to improve the stability even if the wrong tuning is occasionally done. It is expected to keep the system stable even when the operating condition of the system is changed. Transient stability simulation is carried out for IEEJ WEST10-machine system model, when a random load change is given at each load node to excite oscillatory modes of the system.

The following points have been made clear: (1) It is possible to obtain the dominant oscillatory mode by using the proposed identification method when only one oscillatory eigenvalue is dominant. (2) The stability of the system is improved when the proper dominant mode is detected by the identification. (3) Eigenvalues detected by using low-order linear models shift at random by a large amount when the amplitude of the oscillation of the system is very small. In such case, the stability of the system has already been maintained because the oscillation is not excited by the load demand fluctuation, and the steady-state stability cannot be improved by tuning the PSS parameters. (4) The proposed algorithm to determine whether to update the PSS parameters by using measurement can skip the parameter tuning of the PSS when the system is already stable and the proper oscillatory mode is not detected from the low-order model.

目次

1.	はじめに	10
1.1.	研究の背景	10
1.1.1.	わが国の電力システムの性質	10
1.1.2.	電力自由化に伴い生じる不確実性が定態安定度に与える影響	10
1.1.3.	競争環境下における PSS のパラメータ設計の課題	12
1.2.	関連する研究の動向	12
1.2.1.	計測を用いた脱調予測システムの提案	12
1.2.2.	連成モデルを用いた定態安定度の計測による推定	13
1.2.3.	大きなじょう乱に対応した適応型 PSS	13
1.2.4.	ニューラルネットワークにより構成した PSS	13
1.2.5.	ファジー制御を用いた状況選択型 PSS	14
1.2.6.	ロバスト制御の PSS への応用	14
1.3.	本研究の目的	15
1.4.	内容の構成	16
2.	電力システムの定態安定度と Power System Stabilizer	17
2.1.	安定度の定義	17
2.1.1.	同期化力	17
2.2.	安定度の種類	18
2.2.1.	じょう乱の大小による分類	18
2.2.2.	時間領域による分類	18
2.3.	安定度の評価手法	19
2.3.1.	数値積分法(過渡解析法)	19
2.3.2.	固有値解析法	20
2.3.3.	解析に用いられる標準モデル	21
2.4.	発電機の制御装置	22
2.4.1.	発電機の調速機(GOV)	23
2.4.2.	自動電圧調整装置(AVR)	24
2.4.3.	電力系統安定化装置(PSS)	25
2.5.	設計ガイドラインを用いた従来の PSS パラメータ設定手法	27

2. 6.	固有値解析法を用いた PSS パラメータの設定手法	28
2.6.1.	固有値感度を用いた固有値制御の例	28
3.	低次線形モデルを用いた定態安定度向上策	30
3. 1.	低次線形モデルの目的と要件	30
3. 2.	5 次モデル	31
3. 3.	6 次モデル	33
3. 4.	モデルに含まれる未知数の同定方法	33
3.4.1.	重みつき逐次最小二乗法	34
3.4.2.	離散系モデルにおける同定	34
3.4.3.	連続系モデルへの変換	35
3. 5.	パラメータ設計の反復継続	35
3. 6.	PSS パラメータ更新における3分木法	37
3. 7.	PSSパラメータ更新における固有値感度を用いた線形計画法の詳細	38
3.7.1.	固有値の分類	38
3.7.2.	制約条件の設定	38
4.	シミュレーション環境の構築と基本的なパラメータ設計の検討	40
4. 1.	手法を検証するモデル系統	40
4. 2.	安定限界の状況の模擬	40
4. 3.	負荷変動の添加による支配的モードの誘起	41
4. 4.	シミュレーションの流れ	41
4. 5.	シミュレーション結果の検証手法	41
4.5.1.	動揺波形の観察	42
4.5.2.	固有値の検証	42
4. 6.	安定限界付近におけるパラメータ設計を伴わないシミュレーション事例	42
4.6.1.	シミュレーション条件	42
4.6.2.	各種波形と固有値	43
4. 7.	安定な状態でパラメータ設計を伴わないシミュレーション事例	47
4. 8.	発電機 G10 を 1 台だけパラメータチューニングする場合	50
4.8.1.	5 次モデルから求めた固有値を用いて 3 分木法で設計する場合	50
4.8.2.	5 次モデルから求めた固有値を用いて線形計画法で設計する場合	52
4.8.3.	詳細モデルから直接求めた固有値を用いて 3 分木法で設計する場合	55

4. 9.	全ての発電機 10 台を同時並行で設計する場合	56
4.9.1.	各発電機の 5 次モデルを用いて 3 分木法で設計する場合	57
4.9.2.	各発電機の 5 次モデルを用いて線形計画法で設計する場合	59
4.9.3.	詳細モデルの固有値を直接利用して 3 分木法で設計する場合	61
4. 10.	再度不安定化したときの詳細	63
4.10.1.	1 機の発電機だけを不安定化させる場合	63
4.10.2.	10 機の発電機のパラメータ全てを変更して不安定化させる場合	72
4. 11.	基本的なシミュレーション事例に関するまとめ	80
5.	適応型 PSS に関する検討	83
5. 1.	適応型 PSS の設置位置検討	84
5.1.1.	シミュレーションの設定	84
5.1.2.	西側 5 機を適応型 PSS とする場合	84
5.1.3.	東側 4 機を適応型 PSS とする場合	87
5.1.4.	設置位置検討のまとめ	89
5. 2.	6 次モデルを用いた異なる潮流状態における検討	90
5.2.1.	同定の検証	90
5.2.2.	比較的安定な初期状態での検討	92
5.2.3.	やや厳しい初期条件での検討	94
5.2.4.	6 次モデルを用いた ΔP 型 PSS のチューニングに関するまとめ	97
5. 3.	方形波状の負荷変動に対する検討	99
5.3.1.	シミュレーションの条件	99
5.3.2.	PSS パラメータを固定し同定だけを検討する場合	100
5.3.3.	PSS パラメータを線形計画法によりオンラインで設計する場合	101
5.3.4.	方形波状の負荷を用いた解析に関するまとめ	103
5. 4.	2 機の発電機からなる低次線形モデルの検討	104
5.4.1.	2 機を含む低次モデルの構成	104
5.4.2.	同定の検証	107
5.4.3.	3 分木法による PSS パラメータ設計の検証	113
5.4.4.	線形計画法による PSS パラメータの設計を検証	120
5.4.5.	PSS パラメータが順次変化するときの同定の評価	124
5.4.6.	2 機を用いたモデルの検討に関するまとめ	132
5. 5.	PSS のパラメータを更新するタイミングの検討	133

5.5.1.	4 次の線形モデルのモード検出判定への利用	133
5.5.2.	位相補償パラメータ t_2, t_3 の自由度削減	134
5.5.3.	シミュレーションの設定	134
5.5.4.	PSS パラメータの強制更新による統計量の評価	135
5.5.5.	統計量を用いたパラメータ設計実施判定を伴うシミュレーション	139
5.5.6.	パラメータ更新のタイミングに関するまとめ	142
5.6.	電力系統が連続的に変化する場合のモデル同定	143
5.6.1.	シミュレーションの概要	143
5.6.2.	発電機で得られる物理量の様子	145
5.6.3.	系統の状態がリアルタイムで変化するときの固有値計算に用いる動作点	149
5.6.4.	4 次モデルと詳細モデルから得られる固有値	150
5.6.5.	4 次モデルから得られる固有値のばらつき	151
5.6.6.	動揺振幅の評価	152
5.6.7.	各発電機で同定される固有値	153
5.6.8.	各発電機で得られる固有値のばらつき	154
5.6.9.	発電機 G1 または G10 をペアとした 4 次モデルを各発電機に設置する場合	156
5.6.10.	発電機 1, 10 から見た諸パラメータ	159
5.6.11.	電力系統が連続的に変化する場合のモデル同定に関するまとめ	160
5.7.	系統状態が連続的に変化する場合のオンラインパラメータ設計	162
5.7.1.	シミュレーションの条件	162
5.7.2.	PSS のパラメータを更新しない場合	164
5.7.3.	リアルタイムの詳細固有値を直接改善するように設計する場合	170
5.7.4.	5 次モデルを用いて毎秒設計する場合	172
5.7.5.	4 次モデルから支配的モードが見つかるときに 5 次モデルを用いて設計する場合 176	
5.7.6.	2 次モデルから支配的モードが見つかるときに 5 次モデルを用いて設計する場合 179	
5.7.7.	5 次モデルの固有値が 4 次モデルの固有値に近いときに設計する場合	183
5.7.8.	動揺振幅からパラメータ設計実施を判定する場合	186
5.7.9.	発電機ごとに設けた 4 次モデルの固有値の標準偏差で設計実施を判断する場合 188	
5.7.10.	系統状態が時変となる場合のオンライン設計に関するまとめ	195

5. 8.	WEST30 機系統モデルを用いた解析事例	197
5.8.1.	WEST30 機系統モデル	197
5.8.2.	東向き潮流を少しずつ増加させる場合における同定	198
5.8.3.	詳細モデルの固有値を直接用いた固有値制御	202
5.8.4.	ローカル 4 次モデルによりオンラインパラメータ設計の実施を判定する場合	207
5.8.5.	WEST30 機系統モデルを用いた検討のまとめ	213
6.	おわりに	215
6. 1.	本研究のまとめ	215
6. 2.	将来への展望	217

1. はじめに

1.1. 研究の背景

1.1.1. わが国の電力系統の性質

わが国の電力系統は、国の東側が 50Hz、西側が 60Hz と周波数が異なる。このうち西側の 60Hz 系統は、長さが 1000km 以上に及ぶ典型的なくし形系統¹である。くし形系統では、微小な外乱を受けたときに減衰しにくい動揺現象が発生しやすい。微小な外乱を受けたときの安定性を、定態安定度と言い、西日本の電力系統ではこの定態安定度が必ずしもよくない。西日本の電力系統では 2 秒から 4 秒周期の制動が弱い動揺モード²が存在することが分かっており、電圧の位相変動として実際に観測もされている^[1]。定態安定度が低下した電力系統では、いったん外乱を受けると、系統固有の周期を持つ動揺が誘起され、発電機の出力や周波数などの物理量の変動が続ける。電力系統の安定性が完全に失われると、発電機は同期を失い、エネルギーを伝達できなくなり、運転を続けられなくなる。定態安定度は、発電機や送電網、負荷などからなる、広域的な電力系統全体の性質により決まる。このような動揺現象は、電力システム以外でも起こりうる。一般的に、細長い形をしていて、隣り合う物同士が互いに影響を与え合うシステムは、全体を見た場合に、周期が長い揺れを起こしやすい。そのような揺れは、比較的収まりにくい上に、何が原因で起こっているのかが分かりにくいという、やっかいな性質を持っている。

1.1.2. 電力自由化に伴い生じる不確実性が定態安定度に与える影響

発電機や送電線を増設するなどして、系統を拡充する場合は、システム全体の安定性を考えながら、各所が協力して進める必要がある。これまでは、一般電気事業者などが中心となって、計画的に設備を増強していたため、安定度も適度に管理されていたとされる。ところが、電力自由化が今後さらに進展すると、新規参入者を含めた複数の事業者が、自律分散的に電力系統を運営することになる。個々の事業者が、独自の戦略にもとづいて運営を行うので、システム全体としては、例えば以下の不確実性が生じると予想されている^[2]。

系統の拡充等による長期的な不確実性

送電設備の構成を変更するときの、量や場所やタイミングが、系統全体への配慮に欠けたものとなりうる。とくに、発電設備の設置位置は、定態安定度が電力系統の容量にお

¹ 西日本は、細長い国土に都市が連なっているため、電力系統としては串だんごのような構成になっているため、そう呼ばれる。

² 振動現象の周期と減衰時定数を組み合わせたもの。

ける制約となりやすいわが国においては、慎重に選ぶ必要があるとされる。そのような配慮を怠れば、普段から定態安定度に弱点のある電力系統になってしまう可能性がある。

検査期間の調整などによる短期的な不確実性

発電機や送電線を一時的に停止させて行う保守点検は、系統全体への影響を考慮して、実施期間を決める必要がある。実施期間の調整が不十分になれば、一時的に需給バランスが逼迫したり、送電線容量が不足したりする可能性がある。また、定態安定度にも悪影響が生じうる。

日々の取引等による日々の不確実性

競争環境下では、日々の需要に対する発電機への出力配分が、毎日の市場取引により決められるようになると予想される。発電機の運転計画を立てる上で、系統全体の安定性を考慮しづらくなる可能性がある。また、系統状態が日々の取引の結果により変化するため、将来の系統状態を予測しにくくなると考えられる。

情報取得の困難化

多数の事業者が独立して事業を営むため、系統全体の物理的な特性をモデル化する際に必要となる情報の取得が、困難となりうる³。その結果、系統全体の安定性を定量的に分析する解析が行いにくくなる。

このようなことが心配される背景には、広域電力系統の安定性は、システム全体を見て評価しなければならないのに、電力自由化後は個別的な事業者の事情を優先せざるを得なくなりそうだと予想がある。安定度が確保されていることによる恩恵は、電力系統を利用する全ての人々が受けるものであるが、個々の市場参加者がどれだけ安定度確保に対して尽くすべきかを定量的に考えることは容易ではない。自由化後の電力系統が持つ資源を、どのように利用すべきかについては、送電能力の配分などを中心に幅広く議論されている。このように、電力系統について考えるときは、物理的な側面だけではなく、運営がどう行われるかについて、社会的、ときには政治的な面にまで立ち入って考える場合がある。わが国では、有限責任中間法人「電力系統利用協議会」が中心となって、設備の形成や利用、情報開示などについてルール策定や監視、紛争の処理などを行うことになっている。

³ 情報そのものを誰も把握できない場合と、事業者間で情報提供を拒む場合の両方が考えられる。

1.1.3. 競争環境下における PSS のパラメータ設計の課題

電力系統の定態安定度を高める方法は、多数ある。このうち、PSS(Power System Stabilizer)は、発電機の電気出力や回転速度の偏差を受け取り、励磁を調節する制御装置である^[2]。比較的低いコストで大きな効果が得られるため、多くの発電所に取り付けられている。電気出力偏差を入力とする PSS を持つ発電機の制御の例を図 1 に示す。

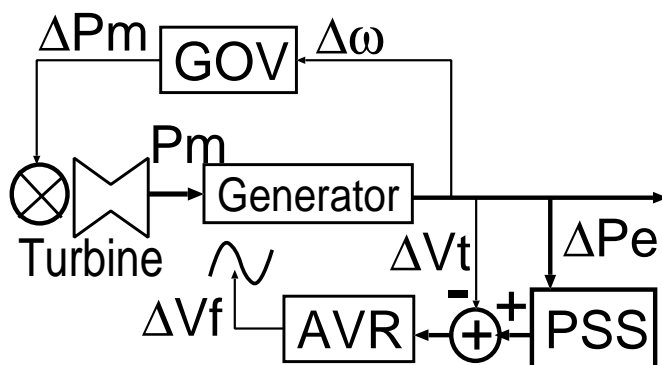


図 1: 発電機の制御装置

安定性を高めるためには、制御装置のパラメータを適切に設定する必要がある。ただし、適切なパラメータは、発電機を設置する電力系統の性質に依存する。電力自由化がさらに進展すると、定態安定度はより厳しくなる可能性があり、系統のモデル化に必要な情報も得にくくなりうる。従って、PSS に設定する制御パラメータを適切に算出できなくなる可能性がある。PSS をはじめとする制御装置のパラメータを、系統の詳しい情報を用いるかわりに、系統の各所で計測した情報を用いて、設計する方法が望まれている。

1.2. 関連する研究の動向

詳細な系統情報が分からない環境で、計測情報を活用して動揺現象を解析する事例は、多くの研究で見られる。

1.2.1. 計測量を用いた脱調予測システムの提案

PMU と呼ばれる、GPS により時刻を同期させて、離れた場所で同時に計測を行う計測装置を用いて、系統の各所で位相情報を同時に計測することで、広域電力系統の脱調を予測する研究である^[3]。系統の詳細な情報が分からなくても、広範囲で計測を行うことで、有用な制御が行える可能性を示した事例である。この研究では、複雑なモデル化を行わずに、発電機内部位相角の比較から直接脱調を判定している。

1.2.2. 連成モデルを用いた定態安定度の計測による推定

西日本の電力系統から 2 台の発電機を選び、電圧の位相などを計測し、4 次の線形モデルに当てはめて同定を行うことで、広域電力系統が持つ主要なモードを推定する研究^[4,5]である。Δω型 PSS を用いたオンライン設計にも取り組んでいる。ただし、パラメータの設計は 1 回限りである。計測情報を低次のモデルに当てはめ、PSS パラメータの設計を行う点は、次の節の事例と類似している。

1.2.3. 大きなじょう乱に対応した適応型 PSS

固有値制御手法は、電力系統の詳細な情報(発電機の定数や系統のインピーダンスなど)が全て分かれば有効な手法であるが、実際の系統では、全てのパラメータを正確に得ることは、たいへん困難である。そこで、電力系統を簡易的に表現する、低い次数の線形モデルを用いた固有値制御手法が提案^[7]された。この手法は、次の 2 つの要素からなる。

- 発電機ごとに、低次の線形モデルを考える。発電機 1 台を 5 次の線形モデルとして表現して、そのモデルの固有値を、その発電機から見た系統全体の安定性とみなして、その発電機の PSS を設計する。
- 低次の線形モデルの性質を、同定により推定する。発電機端での計測を用いることで、発電機や系統に関する詳しい機器データが得られなくても、モデルの係数を一通りに定められる。

この研究では、系統事故などの大きなじょう乱を対象に検討を行っている。じょう乱が大きくなると、波形に非線形性が強く出るので、線形モデルによる理解が難しくなるため、まず制動抵抗により動揺振幅を抑え、次に短期間だけ線形モデルで同定を行い、固有値感度法で PSS のパラメータを更新している。本研究は、この研究の後を引き継いで行われたものである。本研究では、安定化の対象を定態安定度に絞り、振幅は小さいものの継続的な動揺現象を対象として、PSS パラメータを反復継続して調整する点に、主な新規性がある。

1.2.4. ニューラルネットワークにより構成した PSS

神経細胞をまねて、学習を行うアルゴリズムに、ニューラルネットワークがある。PSS の設計への応用も研究されている。ニューラルネットワークを用いて、ΔωとΔPeの両方を入力に用いた適応型 PSS を構築した研究がある。システムの構成図を図 2 に示す。同定

を行う部分と、PSS としての制御を行う部分が、別々のニューラルネットワークになっている。同定を伴う適応制御の形になっているが、一般的な制御ブロックによる構成ではないため、信頼性の検証が難しそうである。

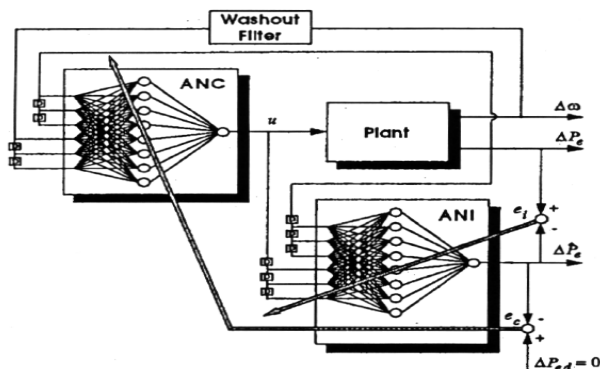


図 2 : ニューラルネットワークによる PSS^[13]

1.2.5. ファジー制御を用いた状況選択型 PSS

ファジー制御とは、あらかじめ分かっている「こんなときは、ああしよう」の形をした知識を多数用意し、実際の状況がどの知識にどれほど当てはまるのかを判断し、それぞれの知識で決められた動作を実行する仕組みである。PSS を対象としたファジー制御の研究も行われている^[4]。発電機がおかれた状況を、図 3 に示すように、電気出力 P_e の動揺における、周波数と強度から判断している。観測される状況ごとに、PSS のパラメータをどうすべきかを、あらかじめ多数インプットしておき、観測データに照らし合わせて選択できるようにして、いろいろな状況に対応可能な PSS を実現する。想定される状況があらかじめ分かっており、現状に適した設定をそれらから選択することが可能な状況では有効な手法であるが、考えられる状況が無数にあり、想定外の状況も起こりうる環境では適用が困難である。

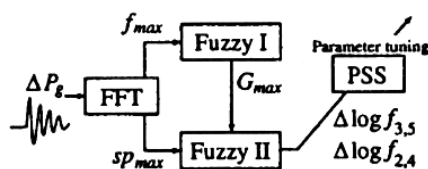


図 3 : ファジー-PSS のモデル^[14]

1.2.6. ロバスト制御の PSS への応用

モデル化したシステムが、実際のシステムといくらか違っている場合でも、ある程度ま

では発散しにくく、性能を果たせる制御装置を作りたい、という思いを、複雑な数式を駆使して体系化した制御理論があり、ロバスト制御と呼ばれる。1台の発電機を持つシステムでは、不確かさを部分を考慮すると、図4に示す形が得られる^[15]。理論的に複雑な制御方式とされるが、最新のCADシステムを活用することで、分野によっては実用的な制御性能を得られる場面もあるとされる。PSSへの応用は、いまだ研究途上にある。

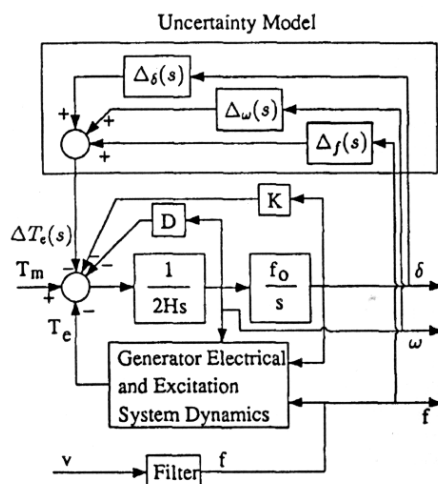


図4: 発電機内部の不確かさを含むモデル^[15]

1.3. 本研究の目的

本研究は、広域電力システムにおける定態安定度の向上を目的とする。電力システムの構成に関する詳細な情報が得られない状況下で、計測情報を用いた適応制御によりPSSのパラメータを逐次設計することで、システムが大きく不安定化するよりも前に不安定化の芽となりうる動揺モードを除去する手法の開発を目指す。具体的には、以下を目指している。

- 持続的な動揺モードが存在する電力システムで、負荷の微小な変動などを情報源として、システムの性質を同定により把握できるようにする。
- 同定して得た低次の線形モデルを用いて、PSSのパラメータを設計し、定態安定度を向上させる。パラメータの設計は、動揺モードが消失するまで反復継続して行う。システム状態が変化するなどして、再度不安定現象が発生したときにも、動揺を検出して継続的に安定化できるようにする。
- 適応制御では、同定が正確に行えない時があり、そのときに不適切なパラメータ設計が行われがちなので、同定が正確に行われたかを把握しながら、パラメータ設計を行うタイミングを選び、適応制御によりかえって不安定化する事態を防止する。

1.4. 内容の構成

第1章では、研究の背景や目的などについて述べた。

第2章では、研究に関する既存の理論について述べる。電力システムの安定性や、発電機の制御装置である PSS、安定度の解析手法などについて述べる。

第3章では、本研究で提案する低次線形モデルを用いた安定性の向上策について述べる。電力システムの定態安定度を把握し改善するための手法について、モデル化や適応制御の手法、シミュレーションの手法について説明する。

第4章では、モデルシステムを用いた同定と PSS パラメータの適応制御について、基本的なシミュレーション事例をふまえて説明する。

第5章では、PSS パラメータの適応制御を対象に行った、さまざまな工夫や検証について、説明する。

第6章は、全体のまとめである。

2. 電力システムの定常安定度と Power System Stabilizer

ここでは、研究対象となる電力システムの安定性について、その定義と意味、評価手法について説明する。次に、定常安定度を高める目的で発電機に設置される制御装置 PSS について説明する。PSS のパラメータと定常安定度の関係についても説明する。

2.1. 安定度の定義

複数の発電機が交流で連系している電力システムでは、発電機が同期を失わずに回転してはじめて、エネルギーを伝達できる。システム事故などのじょう乱が発生した場合、各発電機が同期運転を保ち、安定運転できる度合いを電力システムの安定度⁸⁾という。

2.1.1. 同期化力

通常の電力システムが安定度を保っている背景には、複数の発電機が互いの位相差を自然に保とうとする働きである、同期化力の存在がある。図 5 に示す発電機 1 台と、理想的な電圧源からなる 1 機無限大母線システムを例に考えると、発電機の出力は、

$$P_e = \frac{E_G E_S}{X_G + X_E} \sin(\delta) \quad (\text{数式 1})$$

となることが分かっている。Es と Eg の周波数が一致しないと、 δ が変化し続けるため、エネルギーを正常に伝達できなくなる。

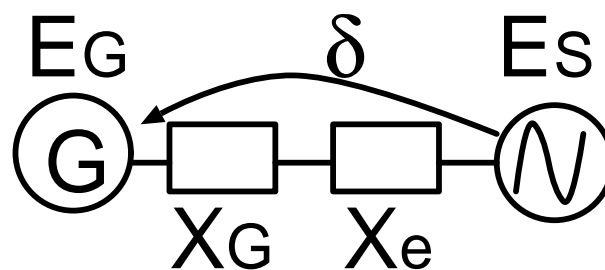


図 5: 模式的な電力システムによる同期化力の説明

発電機では、タービンから受け取る機械的なエネルギーと、電力システムに送り出す電気エネルギーの差は、回転子が持つ運動エネルギーとして蓄えられるため、なるべく両者のバランスが取れていることが、回転速度を一定に保つ上で望ましい。電力システムを 1 つの発電機と、他の発電機全体を意味する無限大母線を用いて図 1 に示すように単純化して考えると、無限大母線 E_S に対する発電機の位相角 δ が 90 度未満のときは、次の性質が成り立つ。

- 他の発電機と比べて回転数が上がりそうになると、位相差 δ が増加し、電気出力が上昇するので、減速を促す。
- 他の発電機と比べて回転数が下がりそうになると、位相差 δ が減少し、電気出力が低下するので、加速を促す。

このような、多くの発電機が互いに離れた場所にあっても、全ての発電機が自然に回転数を合わせようとする性質を、同期化力と呼び、電力系統の安定性を保つ上で大きな役割を果たしている。電力系統の安定性は、上記の同期化力に加えて、各種制御装置の性質や、送電網のインピーダンス、潮流の大きさ、発電機や送電網で発生する事故など、さまざまな影響を受けて決まる。

2.2. 安定度の種類

電力系統の安定度は、電力系統にじょう乱が加わることで失われやすい。じょう乱の大小や、現象が継続する時間により、安定度は以下に分類されている^[8]。

2.2.1. じょう乱の大小による分類

- **過渡安定度**は、地絡・短絡・断線などの急激な事故が発生しても、再び安定状態を回復して送電できる度合いを言う。大きな事故が起きたときに、自然に復旧するかを問題にする。
- **定態安定度**は、極めて緩やかな負荷変化などのじょう乱を生じてても、安定に送電しうる度合いを言う。微小なノイズなどが起こす、電力系統に普段から存在する小さな振動が、次第に大きくなってしまわないかを問題にする。

2.2.2. 時間領域による分類

- **過渡領域安定度**は、2 から 3 秒以内の短い時間のできごとを考える。発電機が動揺をはじめてから、1 つめの波形までに、不安定化するかどうかが決まるような事例を考える場合が多い。
- **中間領域安定度**は、2 から 10 数秒程度の不安定現象を対象とする。発電機が動揺する波形が、何度か繰り返しながら不安定化しうる事例を考える。
- **定態領域安定度**は、さらに長い時間をかけて不安定化しうる現象を考える。持続的に起きている振動を対象とする場合もある。

安定度の向上策は、対象となる安定度の種類に応じて複数存在する。PSS は、定態安定度向上を目指す制御装置である。本研究では、常在する動揺現象を抑制の対象とする、定態領域安定度が主な検討対象となる。

2.3. 安定度の評価手法

何かが変動したとき、その変動は別の場所へ伝わっていく。伝わった先から、何も戻ってこなければ、最初に起きた変動による影響は、すぐになくなる。しかし、変動による影響が別の場所に伝わり、さらに後になってその影響がもとの場所に戻ってくるようになると、戻ってきた影響が再び次の影響をうむ場合がある。場合によっては、何も外乱を与えなくても影響が次第に大きくなる場合があり、そのような状態を不安定と呼んでいる。

このように、安定度が問題となる系では、何か変化が起こると、その変化がどこかに伝わり、さらに伝わった影響が元の場所に帰ってくるような相互関係を持っている。電力システムは、多数の発電機や送電網、負荷などがひとつの系に連結されており、とりわけ複雑な相互関係を持っていると考えられている。

電力システムの安定度を評価する手法には、実際の電力システムや縮小した実験装置を用いて波形の安定性を観察するアナログシミュレーションと、計算機内で数式モデル化された電力システムの挙動を分析するデジタルシミュレーションがある。アナログシミュレーションは、定式化できない複雑な現象も再現しうるが、多くの機材と人員を必要とするため、多大な費用と時間がかかる。本研究では、新しい発想を比較的簡便に評価できるデジタルシミュレーションを行う。デジタルシミュレーションには、時間とともに変化する物理量を順次シミュレーションする数値積分法や、線形化されたモデルを用いて安定性を直接評価する固有値解析法などがある。

2.3.1. 数値積分法(過渡解析法)

電力システムモデルに関する方程式を、状態量の時間微分の形に書き出し、時間方向に少しずつ積分を行うことで、物理量の波形を直接算出する方法である^[9]。波形が発散的であれば不安定、収束的であれば安定であると分かる。数式には、例えば以下の種類がある。

- 発電機は、基本となる Park の式、制動巻線の式、回転体の運動方程式(動揺方程式)、PSS や AVR や GOV など制御装置の式を持つ。
- 送電網は、一定のアドミタンスを持つ集合として、線形な数式として扱われる場合が多い。
- 負荷は、本研究では一定のアドミタンスであるとみなした。

時間で積分できるようにするために、数式は、以下の形で表す必要がある。

$$\frac{d(\text{状態量})}{dt} = \text{数式}(\text{状態量}) \quad (\text{数式 2})$$

なお、この形式の微分方程式は状態量ごとに存在する。右辺の数式は複数の状態量を持つ場合があり、非線形でもよい。本研究では提案手法を、実際の電力系統で適用するかわりに、数値積分法を用いたシミュレータの中で実装することで、手法の有効性を検証する。

2.3.2. 固有値解析法

電力系統全体を、線形な状態方程式とみなして、時間軸上の波形を求めずに、系の安定性と、振動現象の時定数と周期を、直接算出する方法である⁹⁾。電力系統を線形なモデルとして扱う方法は、大きな事故よりも微小なじょう乱に対する性質である定態安定度を考えるときに適している。本研究では、定態安定度を解析しながら向上させようとする制御アルゴリズムを提案している。まず、数値積分法では非線形でもよかった数式を、動作点付近で全て線形化し、以下の形にする。動作点とは、状態量の平衡点であるが、状態量が常に変化を続ける場合は、瞬時値で代用する場合もある。

$$\frac{d(\text{状態量})}{dt} = \text{線形の数式}(\text{状態量}) \quad (\text{数式 3})$$

次に、全ての数式を、行列を用いた状態方程式にまとめる。考える状態量全てをまとめて \bar{x} とすると、全ての状態方程式は、行列 A を伴う以下の 1 つの式に集約される。

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A\bar{x} \quad (\text{数式 4})$$

行列 A は、線形モデルの関係式に関する、全ての係数を持つ。行列 A の固有値から、線形モデル全体としての安定性を、定量的に算出できる。固有値と固有ベクトルを組み合わせると、状態方程式の各状態量を、以下の式で表せる。ただし、 λ_k を固有値、各固有値に対応する固有ベクトルを \bar{v}_k 、対応する係数を c_k とする。

$$\bar{x}(t) = \sum_k c_k \bar{v}_k e^{\lambda_k t} \quad (\text{数式 5})$$

複素数である固有値を $a+jb$ と置くと、 $e^{\lambda t} = e^{at} e^{jbt}$ であるから、以下のことが言える。

- 固有値の実部 a は、系の安定性を意味する。正であれば振幅が拡大し発散するため不安定、0 であれば定常的な動揺となり安定限界、負であれば収束するため安定となる。負となる場合は、実部の絶対値が動揺現象の時定数に対応する。 $(-1/a)$ が、時定数(秒)である。
- 固有値の虚部 b は動揺現象の周期に対応する。 $(2\pi/b)$ が、動揺の周期(秒)である。虚部 b が完全に 0 の場合は、この固有値による波形は振動的とはならない。

行列 A からは、複数の固有値が得られる。振動的な固有値のうちで、実部が最も大きい固有値を「支配的な固有値」として、安定性を代表する指標として用いる。なお、この線形微分方程式を用いて数値積分を行うことで、各状態量の波形を算出することも可能である。ただし、線形化した数式であるため、状態量が動作点を大きく離れると、不正確になる。

2.3.3. 解析に用いられる標準モデル

複雑で大規模な実際の電力系統を全て詳細にモデル化することは、極めて困難であると考えられており、実際には近似的なモデルを利用するが多い。どのような近似モデルであれば、実際の電力系統に近い性質となるかについては、学会などで検討が進められてきた。電力系統を対象にした新しい制御のアイデアを提案するためには、アイデアを評価する必要があるが、電力システムそのものを用いて評価を行うことは、電力システムを利用する人々に迷惑をかけるので、難しい。一方で、実機を用いた実験にはたいへんな物量が必要となり現実的でない場合も多い。多くの場合、コンピュータシミュレーションを用いて評価することからはじめるが、研究ごとに用いるモデルが異なっていると、結果の差が提案手法による違いなのか、用いたシステムモデルの違いなのか分かりにくく、評価が難しくなってしまう。わが国では電気学会が、発電機を 10 台または 30 台用いて、西日本の 60Hz 系統または東日本の 50Hz 系統全体を表現する標準モデルを作成した。無数に存在する発電機や送配電網や負荷を、構成要素を発電機・送電線・負荷の形に保った上で、要素の数を減らして表現している点を特徴とする。広域的に起こりやすい動揺モードの周期などが、

実際の電力系統が持つ特性となるべく近くなるように作られている。なお、電力会社をはじめとする電気事業者は、電気学会が提案するモデルよりも、さらに詳細な系統モデルを持ち、日々の業務や訓練に利用しているが、その情報はテロ対策などの観点から、表には出てこない場合が多いとされる。

本研究では、電気学会作成の標準モデル系統を過渡解析シミュレーションの対象とする。数値積分法では、標準モデルをほぼそのままの形で用いる。ただし、市販の解析ツールを利用せず、教科書⁹⁾を元に作成した独自の解析プログラム(D4 システム)を用いたため、Y法などの市販のツールと比べ、いくつか相違点がある。本研究の固有値解析シミュレーションでは、過渡解析に用いるモデルをなるべくそのまま線形化してできる、状態方程式を利用する。この状態方程式は、発電機 1 台あたり 12 または 13 の状態変数を持つ。実際の電力系統の代用として用いる過渡解析用のモデルをそのまま線形化しているため、過渡解析法で求めた動揺波形と、線形化したモデルから求めた固有値の性質は、よく一致する。本研究では、この方法で求めた固有値を、「詳細なモデルから求めた固有値」として、定態安定度を検算する目的で用いる。線形化の対象となる電力系統で、発電機の出力や各負荷の消費量、送電線の接続状況などの系統状態が大きく変化すると、各種状態量の変化や動作点の移動などにより、線形化後のモデルも変化する。安定度が時間とともに変化する状況を調べるときは、線形なモデルを最新の系統状態を用いて繰り返し更新して、固有値の変化として把握できるようにする。

これからの研究では、それぞれのモデルは表 1 に示す役割を持つ。従って、正確に言えば、電力系統そのものを安定化させる技術というよりは、電力系統を模擬する非線形な詳細モデルを安定化する技術を目指していることになる。非線形な詳細モデルは、実際の電力システムの代用として広く利用されており、このような解析的な研究は、一般的である。

表 1：研究で用いる詳細なモデルとその役割

モデル	役割
非線形な詳細モデル	電力系統そのものであるとして、数値積分法を用いて波形データを生成するために用いる。
線形な詳細モデル	非線形な詳細モデルを線形化したものであり、電力系統の定態安定度を正確に表すことができるとして、固有値解析に用いる。

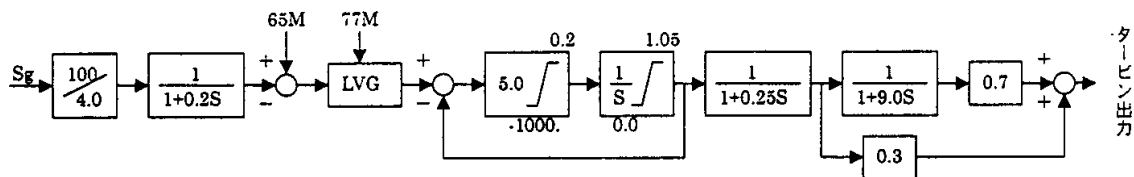
2.4. 発電機の制御装置

発電機には、同期化力のように、自然に安定性を保つ働きがある。しかし、系統の複雑

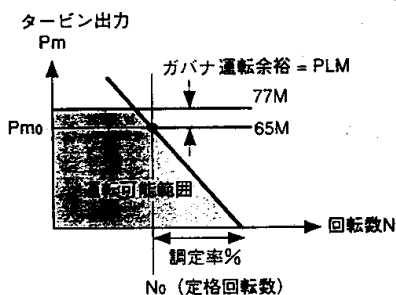
化により、それだけでは不十分となっており、制御装置を設けて安定性を高めている。それぞれの制御装置は、物理的、あるいは電氣的な働きをするが、ブロック線図などを用いて動作を定量的に表現できる。

2.4.1. 発電機の調速機(GOV)

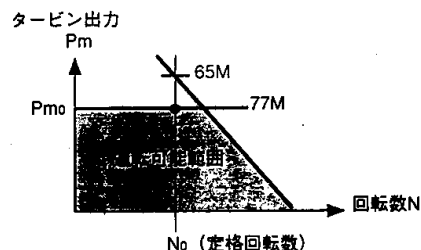
回転数を基準値に保とうとする働きを持つ。回転数の偏差を入力とし、発電機への機械入力偏差を出力する。機械入力は、蒸気(火力)や水量(水力)を調整することで変化させる。なお、「調速機」という用語は、分野によっては速度の異常を検知する装置を意味する場合もある。この論文では、回転速度を適切に維持するための制御装置を意味するので、注意が必要である。装置は機械だけではなく、電氣的な制御部を持つ場合も多い。電気学会 WEST10 機系統モデルなどで用いられている調速機のモデル^[11]を図 6 に示す。回転数と出力の関係を決めるガバナ特性のグラフがあったり、複数のリミッタを介して比例・積分などの演算を行っていたりしており、比較的複雑な構成になっている。



(a) 火力・原子力機用モデル (LPT=1)



付図1.3 ガバナフリー(G.F.)運転



付図1.4 ロードリミット(L.L.)運転

図 6: 電気学会モデルにおける GOV の構成^[11]

本研究では、教科書による簡素なモデル^[9]を採用し、GOV を図 7 のように単純な一次遅れとして実装している。

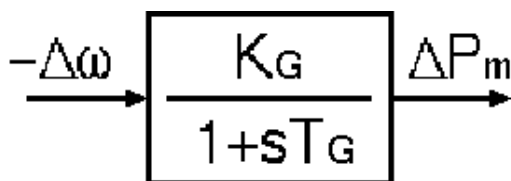
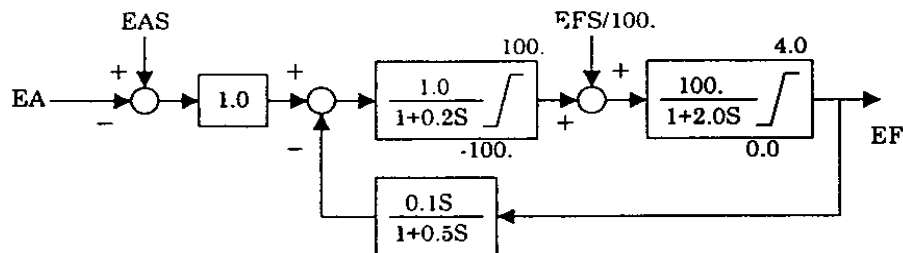


図 7: 本研究で用いる GOV のブロック^[9]

電気学会によるモデルと比べ単純になっているため、実際の電力系統に設置されている発電機の GOV と異なる挙動をする可能性もある。ただし、みだりに複雑なモデルを用いて取り組むと、シミュレーション環境の構築が煩雑となり、解析が困難となるのでやむを得ない。定態安定度を小さなじょう乱に対して考える本研究では、リミッタが働くような事象までは考慮しないので、単純化したモデルであっても、ある程度は有意な解析が行えると考えられる。職業としてこのような研究を行う環境では、専用の電力系統解析ツールを活用して、最初から用意されているやや複雑な解析モデルを拡張する形で、提案手法の検討が行われるようである。

2.4.2. 自動電圧調整装置(AVR)

発電機の電圧を一定に保つための装置である。端子電圧の偏差を入力とし、励磁電圧の偏差を出力とする。系統事故発生時は、地絡などによる電圧変動に対応して、急速に励磁を上げて脱調を防止する働きがあり、過渡安定度の向上に貢献するが、ゲインを高くする必要があるため逆に、定態安定度をある程度犠牲にする。電気学会 WEST10 機系統モデルなどで用いられている AVR のモデル^[11]を図 8 に示す。



(a) 回転形励磁機用モデル (LAT = 1)

図 8: AVR のモデル^[11]

本研究で作成したシミュレータは、より簡易化した AVR を用いている。そのブロック線図^[9]を図 9 に示す。本来の AVR と比べ、ひじょうに単純である。リミッタを持たないので、大きな外乱に対しては実用的でないが、本研究では比較的小さなじょう乱だけを解析の対象とするので、問題にはならないと考えられる。

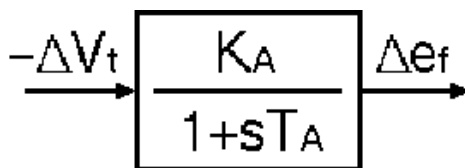
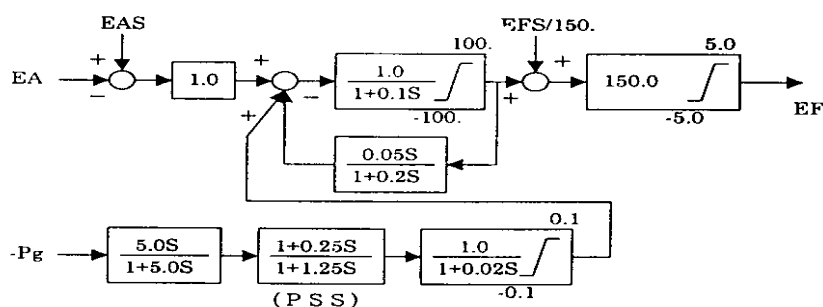


図 9: 本研究で用いる AVR のブロック^[9]

2.4.3. 電力系統安定化装置(PSS)

励磁に追加的な制御を行い、定態安定度向上を目指す制御装置である。発電機の電気出力または回転速度偏差を入力とし、いくつかの制御ブロックを経た後、AVRの入力部に追加的な信号を加える。電気出力偏差を入力とするものを、 ΔP 型、回転速度偏差を入力とするものを $\Delta \omega$ 型という。 $\Delta \omega$ 型のほうが、より長い周期の動揺に適しているとされる。 ΔP 型と $\Delta \omega$ 型を、一台の発電機で併用する場合もある。電気学会が作成した模式的な ΔP 型PSSのモデルでは、AVRの部分を含めて図10の構成となっている。本研究では、電気学会のモデルに従い、PSSを図11に示す構成としている。この論文では、PSSの制御ブロックの中に書き込まれた変数(パラメータ)は、図中では大文字のアルファベットと数値で表記しているが、本文などでは小文字のアルファベットと数値で表記している場所がある。例えば、K8, T2, T3のような表記と、k8, t2, t3のような表記が併存する。この場合、大文字と小文字が違っていても区別せずに、同じ変数を意味するものとする。



(b) ΔP 形PSS付サイリスタ励磁機用モデル (LAT=102)

- (注1) サイリスタ励磁機用モデル (LAT=2) に ΔP 型PSSを付加した形をLAT=102と称する。
- (注2) 無負荷定格端子電圧時(EA=1.0)の界磁電圧EFを1.0 [pu]とする。

EA : 端子電圧 EF : 界磁電圧
EAS : 端子電圧設定値 EFS : 界磁電圧設定値 Pg : 発電機出力

図10: PSSの一例[11]

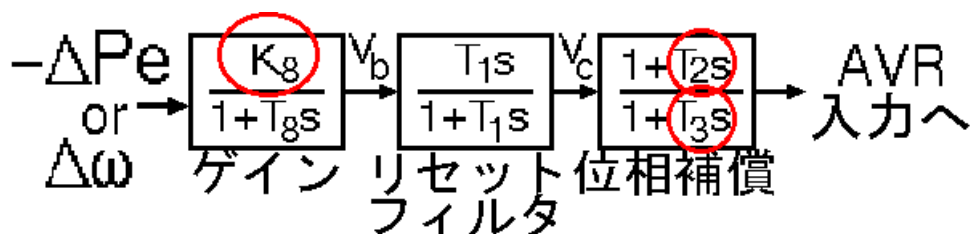


図11: PSSの制御ブロックの構成[7]

ΔP 型の制御ブロックは、ゲインと位相補償、リセットフィルタなどからなる。 $\Delta \omega$ 型は、

ΔP 型と比べ入力の位相が約 90 度遅くなるので、位相補償を 2 段直列につなぎ、そのうちの 1 段を進み補償とする場合がある。本研究では、この PSS のパラメータを適切に調整することで、定態安定度を向上させることを目的としている。3 種類あるブロックは、それぞれ表 2 に示す役割を持っている。

表 2 : 研究で用いるモデルとその役割

ブロック	説明
ゲイン	入力された信号を定数倍して出力する。パラメータ k_s を大きくすると、出力が大きくなるので PSS の働きが強くなる。ただし、大きければ大きいほどよいというわけではない。大きすぎると、発振して不安定化する。 T_s は一次遅れの時定数だが、制御装置全体の遅れを代表するような意図で設定されており、本研究ではリアルタイムに操作することは控える。
リセットフィルタ	直流分を打ち消すためのフィルタで、ハイパスフィルタの一種とも言える。入力値の動作点が移動したときに、直流分を排除して、短期的な動揺成分だけを出力に反映させるために用いる。パラメータ t_1 は、数秒の定数である。PSS は、直流的な偏差に対しては効果が低い。本研究ではリアルタイムに操作することは控える。
位相補償	波形の位相を進めたり遅れさせたりする。ただし進める場合は、波形の位相が見た目上進んで見えるだけであり、入力が入る前から出力が得られるわけではない。位相をどのように操作するかにより、出力が入力に帰ってくることによりできるループの特性が大きく変わるため、安定度に大きく影響する。パラメータ t_2 と t_3 は、 $t_2 > t_3$ のとき進み、 $t_2 < t_3$ のとき遅れとなる。

本研究では主に、 ΔP 型の PSS を対象に、位相補償の t_2 、 t_3 とゲインの k_s を、適応制御により操作する。PSS の出力は、励磁の電圧に影響する。励磁は、端子電圧に影響を与えるが、端子電圧が電気出力に影響を与えるため、電気出力や回転子速度を一定に保つ制御の操作対象にもできる。PSS を含めて制御装置は、電力系統の一部として機能する。制御装置のパラメータは、発電機 1 台だけに限らず、系統全体の安定度に影響する。PSS が設置された発電機単独では安定であっても、電力系統とのやりとりが重なると不安定となる場合がある。一般的な PSS には、出力にリミッタが取り付けられているが、本研究ではリミッタが作動しない程度の小さな動揺を対象とするため、リミッタを用いない。

2.5. 設計ガイドラインを用いた従来の PSS パラメータ設定手法

PSS のパラメータを決める上でのガイドラインが、米国 GE 社などにより提案されている^[2]。PSS を含む発電機を、図 12 に示すように単純化して考えたモデルをもとに考える。

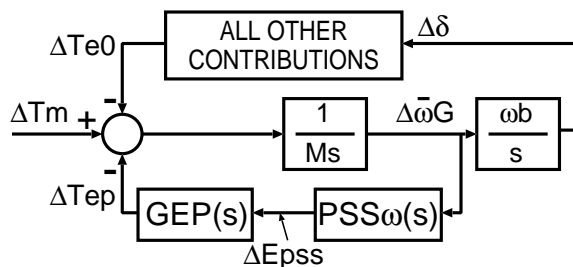


図 12：単純化された発電機モデル^[2]

位相補償のブロックは、主に考える周波数 f_c と、どれくらい補償するかの比 t_1/t_2 によって、性能が変わる。 f_c と t_1, t_2 には次の関係がある。

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{t_1 t_2}} \quad (\text{数式 6})$$

PSS の入力からトルクまでの位相遅れが、90 度を下回る周波数帯域を、可能な限り広く取るのが、よいという。PSS の特性はすぐに分かるが、PSS の出力がトルクに伝わるまでの発電機特性 GEP(図 3)は、同定により明らかにする必要がある。

GEP は、AVR の閉ループによく比例することが分かっているので、AVR の電圧指令から、端子電圧の出力までの伝達関数を調べて推定する。そのために、電圧指令値付近に信号を注入して、測定を行う。GEP が推定できれば、PSS につける位相補償の性能は、図 13 のように見積もられる。

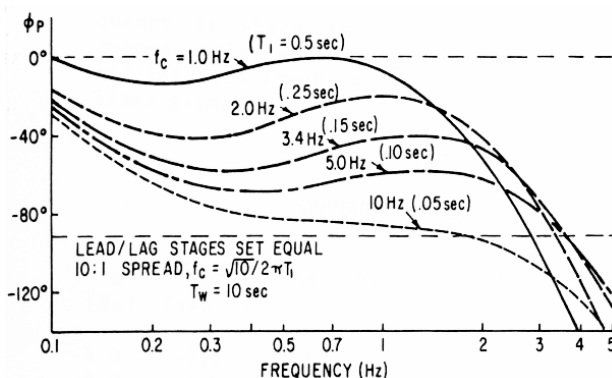


図 13： f_c を変えながら位相補償の特性を解析した事例^[2]

PSS のゲインを上げ過ぎると、不安定になる。不安定となるゲインの 3 分の 1 くらいが、よいゲインだとされる。どれほどゲインを上げれば不安定になるかは、実際に PSS の設定値を少しずつ変化させて、状況を観察するフィールドワークを行うことで分かる。なお、

モデル中の”ALL OTHER CONTRIBUTIONS”をどうするかにより、考える系統の規模が決まるが、多くの場合は一機無限大系統として、発電機それ自身の安定度を向上させることを目的としているようである。

2.6. 固有値解析法を用いた PSS パラメータの設定手法

固有値解析法により得られる固有値は、電力系統の安定性を、定量的に示している。固有値解析に用いられる情報には、発電機の各種制御装置に関するものも含まれる。制御装置のパラメータを幾通りにも変えて、固有値の計算をくり返せば、安定性が最も高くなる制御パラメータの組み合わせを探索できる。この考え方を、固有値制御手法^[6]という。この手法では、実際に PSS のパラメータを上げ下げしながら検討を行うのではなく、計算上の仮定としてパラメータの変動を扱っている。実際の PSS パラメータを微小に動かし、系統の安定性の変化を直接計測しながら適応制御を行う手法も提案されている^[16]が、調整のために加える変化が原因となって、不安定化する可能性もある。固有値制御手法は広く知られており、詳細な電力系統モデルの情報と、固有値解析用のソフトウェア(S 法など)を用いれば、各地域の電力系統に適した制御パラメータが得られるようになっている。固有値解析法を用いたパラメータ設計では、どの方向に PSS のパラメータを操作すると、系統がより安定になるかが、線形モデルと実際の電力系統で一致することを前提としている。この前提を満たすためには、線形モデルが PSS の部分を含めて、本来の電力系統に近い性質を持っている必要がある。

2.6.1. 固有値感度を用いた固有値制御の例

制御装置の個々のパラメータと、固有値の、微小変化時における変化の比を、固有値感度という。個々のパラメータを単位量動かしたときの、固有値の変化量を定量的に見積もる。安定性の最適化に必要なパラメータ移動量の組を、定量的に求められる利点がある。以下の状態方程式において、

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A\bar{x} \quad (\text{数式 7})$$

行列 A の個々の固有値を λ_j 、制御装置の各パラメータを α_i 、行列 A の固有値 λ_j に対応する左固有ベクトルを \bar{v}_j 、右固有ベクトルを \bar{u}_j とすると、 α_i に対する固有値 λ_j の感度 S_{ij} は、以下のように書ける。

$$\frac{\partial \lambda_j}{\partial \alpha_i} \equiv S_{ij} = \bar{v}_j \frac{\partial A}{\partial \alpha_i} \bar{u}_j \quad (\text{数式 8})$$

電力系統モデルは、複数の動揺モードを持つため、固有値を改善するアルゴリズムでは、最も実部が大きい固有値以外も考慮する必要がある。本研究では、線形計画問題として、振動的な固有値の実部移動量の和を、負方向に最も大きくすることを以下の目的関数として用いる場合がある。ただし、 k は改善が必要な固有値の添字である。

$$\sum_i \left(\sum_k \text{Re}(S_{ik}) \right) \Delta \alpha_i \rightarrow \min \quad (\text{数式 9})$$

制約条件には、各 PSS パラメータの上下限值と、各 PSS パラメータが一度に移動可能な幅がある。

$$|\Delta \alpha_i| \leq \Delta \alpha_{i_MAX} \quad (\text{数式 10})$$

$$\alpha_{i_LOW} \leq \alpha_i + \Delta \alpha_i \leq \alpha_{i_HIGH} \quad (\text{数式 11})$$

基本的には、最適な値を一度に求める方法であるが、一度にパラメータを大きく進めてしまうと、動作点から大きく外れてしまうため、最初に考えた固有値の感度が大きく変わってしまうなどして、最適な値にならない可能性がある。対応策として、パラメータが移動可能な幅を制限して、固有値感度の算出とパラメータの移動を何度か繰り返して行う手法が提案されている^[6]。本研究では、この固有値感度を用いた手法を一部で用いる。

3. 低次線形モデルを用いた定態安定度向上策

ここでは、本研究で取り組む低次線形モデルを用いた PSS パラメータのオンライン設計について、考え方を詳しく説明する。

3.1. 低次線形モデルの目的と要件

固有値制御手法による PSS パラメータの設計は、以下の図 14 に示す流れになっている。

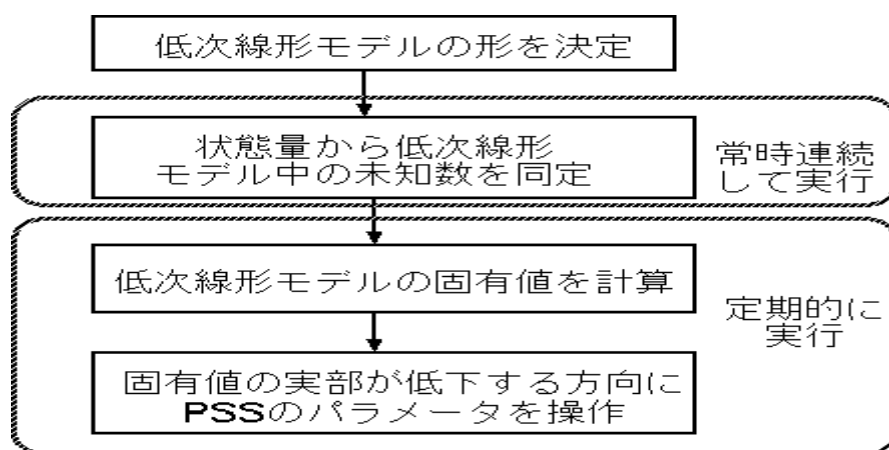


図 14:固有値制御手法によるパラメータ設計の流れ

PSS パラメータの設計は、電力系統の性質を反映することが期待される低次の線形モデルを用いて行われる。この低次モデルの安定性を高めることが、電力系統全体の定態安定度を高めることにつながると仮定する。過渡解析シミュレーションで用いるモデルをそのまま詳細に線形化したモデルをパラメータ設計に用いれば、ほぼ確実に定態安定度の向上を実現できることが知られている。ところが、実際の電力系統では、広域電力系統の性質を評価できるような大規模系統を正確にモデル化することは難しい。必要な情報が少なくてすむように考えた低次の線形モデルを、詳細なモデルのかわりに用いる。このような低次の線形モデルには、以下の性質が求められる。

- モデルの固有値が、実際の系統の安定性を再現すること
- モデルの構成要素の値を現実的な方法で取得できること
- 設計対象となる制御装置を、設計対象となるパラメータを含めて持っていること
- 設計対象となるパラメータの微小変動に対して安定度が変動する方向が、実際の電力系統とよく一致すること

実際の設計アルゴリズムでは、4つめの性質を用いてパラメータの移動方向を決めている。設計対象となる制御装置がモデルに含まれる必要があるのは、制御装置のパラメータを変化させたときの安定性の変化を、モデルの固有値の変化として計算したいからである。PSSのパラメータをオンラインでチューニングする目的で用いる低次の線形モデルとして、発電機ごとに個別にモデル化を行う、5次と6次の低次線形モデルを考えた。次数の違いは、PSSに設置する位相補償の段数の違いによるものである。

3.2. 5次モデル

PSSの制御ブロックと、PSSの出力部分から入力部分までの関係を、可能な限り簡単な形で示したモデルである^[7]。図15に示すように、設計対象の制御装置のブロックをそのまま示す部分と、制御装置の出力から入力までの関係を最低限の関係式で表した部分からなる。モデルの状態量には、PSSの入出力で用いられる、発電機の電気出力偏差と回転子速度偏差が含まれる。PSSの出力が、電気出力や回転子の偏差に影響を与えるとみなし、その影響分を同定により定めることで、PSSを流れる信号に関する閉じたモデルを構成している。モデルの状態方程式を図16に示す。同定すべき未知数は、 A_{11} から B_2 までの6つである。同定する未知数は、数が多くなるとそれぞれの値が一通りに定まりにくくなり、同定が収束しにくくなる。従って同定の収束性からは、未知数の数は必要最低限にしたほうがよい。一方で、モデルの構造を電力システムにより近づけるためには、次数を高くし、未知数を増やしたほうがよいとも考えられる。

このモデルは、発電機1台ごとに個別に構築できる。同定する状態量は、広域モードの影響も受けて変化するため、発電機1台ぶんのモデルであっても、広域モードが得られる場合もある。モデル化のイメージを、図17に示す。

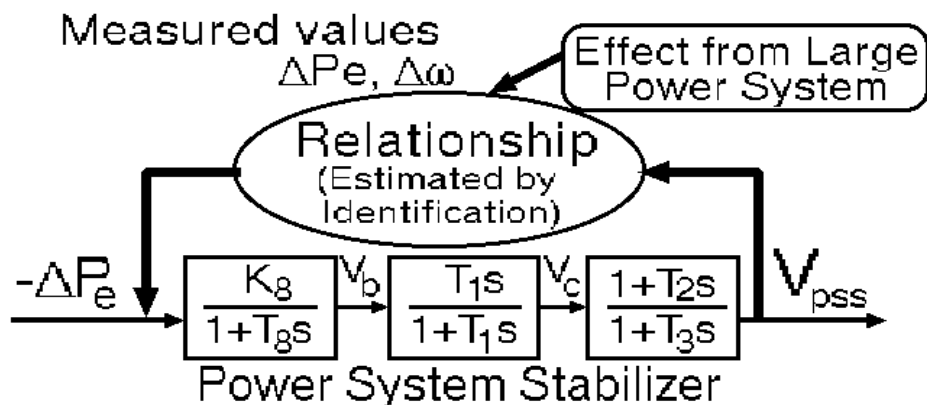


図 15: 5 次の線形モデルの概要

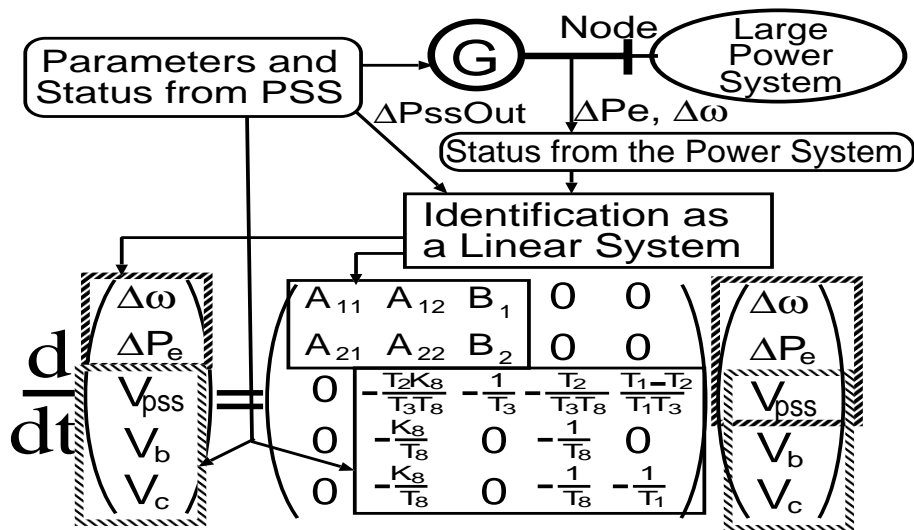


図 16: 5次モデル(ΔPe型 PSS)の詳細

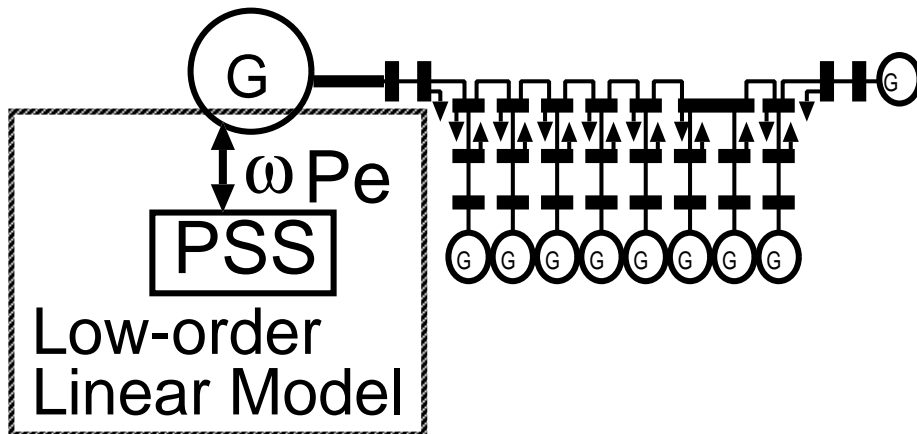


図 17: 低次線形モデルのイメージ

同定により求める部分は、波形から推定した相互関係に過ぎないため、求めた関係が物理的に正しいかを保証することはできない。同定により求める部分の数式は、安定性に大きな影響を与えると考えられる回転体の運動方程式などを、近似的に表す形を取りように作り、本来の安定性を示す性質がなるべく失われないことを期待する。ΔPeは、制御装置が適切に働いていれば、今回のシミュレータでは0を中心に動くため、2機とは別に特定の発電機を基準点として用いなくても、1機ぶんのデータだけで同定ができる、という利点がある。発電機の電氣的な位相角Δδを状態変数として利用する場合は、Δδを0に戻す時差の制御が必ずしも十分行われていないため、δの基準値を得るために、特定の発電機のδ、または発電機全体の平均的なδを、別途算出する必要がある。ΔPeは、ΔωやΔδと比べれば、短い周期の変動成分を強く持つ性質がある。長周期の動揺を対象とする場合は、フィルタなどで高周波成分を取り除いたほうが、動揺をよりはっきり観察できる。

3.3. 6次モデル

PSS の位相補償を図 18 に示すように 2 段とすると、PSS が持つ状態量が 1 つ増えるため、モデルは 6 次となる。位相補償のブロックを増やすことで、補償可能な位相の範囲が広がる一方で、パラメータの設定によっては発電機単独で不安定化しやすくなる問題もある。図 19 は、発電機の電気出力偏差を入力とする PSS を用いる場合のモデルである。

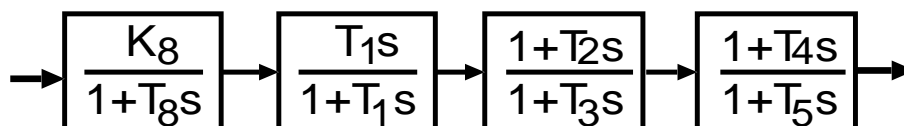


図 18: 位相補償を 1 段増やした様子

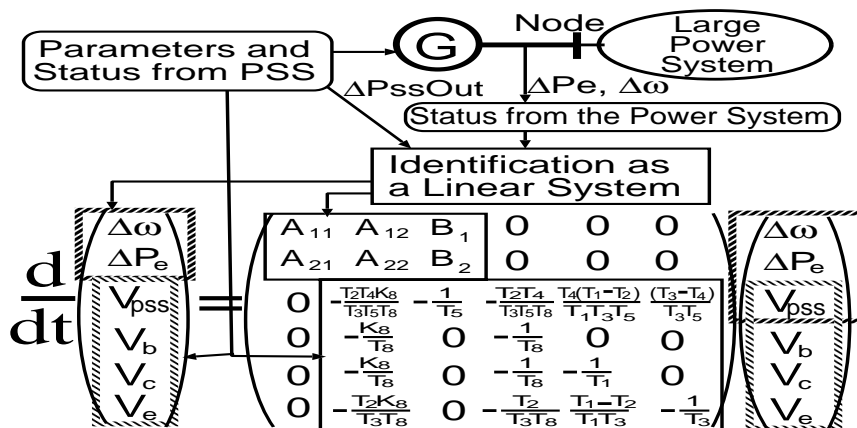


図 19: 位相補償 2 段 (ΔP_e 型 PSS) の 6 次モデル

同定すべき未知数の個数は、発電機あたりで 6 つのままである。

そのほか、 $\Delta \omega$ 型 PSS を設計の対象とするモデルや、複数の発電機が 1 つのモデルに含まれる場合も考えられるが、必要に応じて別途紹介する。

3.4. モデルに含まれる未知数の同定方法

線形モデルが行列 A に持つ具体的な値は本来、発電機や送電網の特性を線形化して求められる。一方低次線形モデルでは、機器の仕様などの情報は未知であるとして用いず、状態変数に相当する物理量を計測し、同定により定める。同定は、対象となる状態量を継続して計測して行く。なお、モデルのうち PSS のブロックからなる部分は、PSS の制御パラメータを既知であるとみなし、一通りに定めることができる。

3.4.1. 重みつき逐次最小二乗法

低次線形モデルの同定では，重みつき逐次最小二乗法^[10]と呼ばれるアルゴリズムを用いる。このアルゴリズムは，入出力波形から，互いの関係を係数として求める手法であり，(1)新しい計測量が得られるたびに関係が少しずつ更新される(2)より新しい計測量ほど優先して扱われる，などの性質がある。具体的には，以下の形で定式化されている。

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\xi(k)}{\lambda + \xi^T(k)\Gamma(k-1)\xi(k)} (\xi^T(k)\hat{\theta}(k-1) - y(k)) \\ \Gamma(k) &= \frac{1}{\lambda} (\Gamma(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\xi(k)\xi^T(k)\Gamma(k-1)}{\lambda + \xi^T(k)\Gamma(k-1)\xi(k)}) \end{aligned} \quad (\text{数式 12})$$

ただし， θ は求めるモデル， ξ はモデルの入力列， y はモデルの出力値， λ は重み係数， Γ は計算の経過を代入する行列である。重み係数 λ は0から1の範囲にあり，1に近づけるほど長い期間の波形を使って未知数を求める。

同定は，観測したい動揺現象とかけ離れた周波数のノイズが多く含まれると，正しく実行されなくなりうるので，本研究では，同定に用いる波形は全て，同じ特性のローパスフィルタと washout フィルタに通した後の波形を用いる。

3.4.2. 離散系モデルにおける同定

この同定手法を用いて，出力値を入力値の1時点後の値として扱う離散時間モデルに当てはめ，低次線形モデルの同定を行う^[7]。例えば， ΔPe 型 PSS を用いた5次モデルでの同定では，以下の関係式の未知数を求めることになる。(ここでは，小文字の a と b は離散系における変数，大文字の A と B は連続系の変数を意味しており，互いに異なる変数である。)

$$\begin{pmatrix} \Delta\omega_{(k+1)} \\ \Delta P_{e(k+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\omega_{(k)} \\ \Delta P_{e(k)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} V_{PSS(k)} \quad (\text{数式 13})$$

ただし，以下の対応があるとする。

$$A_d = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad B_d = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (\text{数式 14})$$

ここで求めるのは、 \mathbf{a} からなる行列 \mathbf{A}_d と、 \mathbf{b} からなる \mathbf{B}_d である。計測量が到着するたびに、これらの未知数は更新される。なお、本研究では、計測対象となる角速度偏差、電気出力偏差がともに、平常時から小さく動揺していると想定している。この仮定は、実際の系統にはたえずノイズが存在し、動揺現象を誘起する原因となっていることによる。系統事故のような大きなじょう乱が発生すると、電力系統は非線形領域まで動揺するため、その挙動は線形モデルに当てはまらなくなる。定態安定度の低下による動揺現象は、最初は小さな振幅の動揺として現れるため、線形な領域で対応が可能である。動揺の振幅が非線形な領域に至る前であれば、線形モデルを用いて広域動揺現象を把握し、対処できると考えられる。

3.4.3. 連続系モデルへの変換

安定性を考える固有値解析は、連続系のモデルを用いて行う。同定で用いた離散系モデルは、以下の機械的な計算により、連続系モデルに変換できる^[7]。

$$\begin{aligned} A_c &= \frac{1}{T} \log(A_d) & \text{(数式 15)} \\ B_c &= (A_d - I)^{-1} A_c B_d \end{aligned}$$

ただし、 I は基本行列、 T は離散系でのサンプリング刻み時間である。また、以下の対応があるとする。

$$A_c = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \quad B_c = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} \quad \text{(数式 16)}$$

これらの値を、低次線形モデルに流し込み、PSS のブロックから決まる部分と組み合わせ、低次線形モデルを完成させ、その固有値を求めることで、系統の安定性を評価する。

3.5. パラメータ設計の反復継続

低次線形モデルの固有値は、モデルが持つ状態方程式の行列に含まれる値により決まる。行列には、同定の結果と PSS パラメータの両方が含まれており、同定を進めたり、PSS のパラメータを変更したりすると、モデルの固有値が変化する。固有値が移動するイメージを、図 20 に示す。PSS のパラメータを更新するときは、低次線形モデルの固有値のうち、

実部が最も大きいもの(支配的な固有値)の実部を、より小さくすることを目指す。実部が最も大きい(安定性が低い)固有値が、電力系統としての安定度を代表するからである。ただし、値がゼロの固有値は、特に影響しない。

電力系統全体を詳細に記述したモデルから、固有値を別途求めると、電力系統全体の真の安定度が分かる(ただし、このモデルは実際の電力系統では得られず、適応制御のアルゴリズムからは見えないものであり、検算の目的に限り用いるものである)。詳細なモデルから得られる支配的な固有値が、PSSのパラメータを更新することで、低次線形モデルの固有値と同じ方向へ変化する場合は、低次モデルとしての安定化を、電力系統全体の安定化につなげることができる。

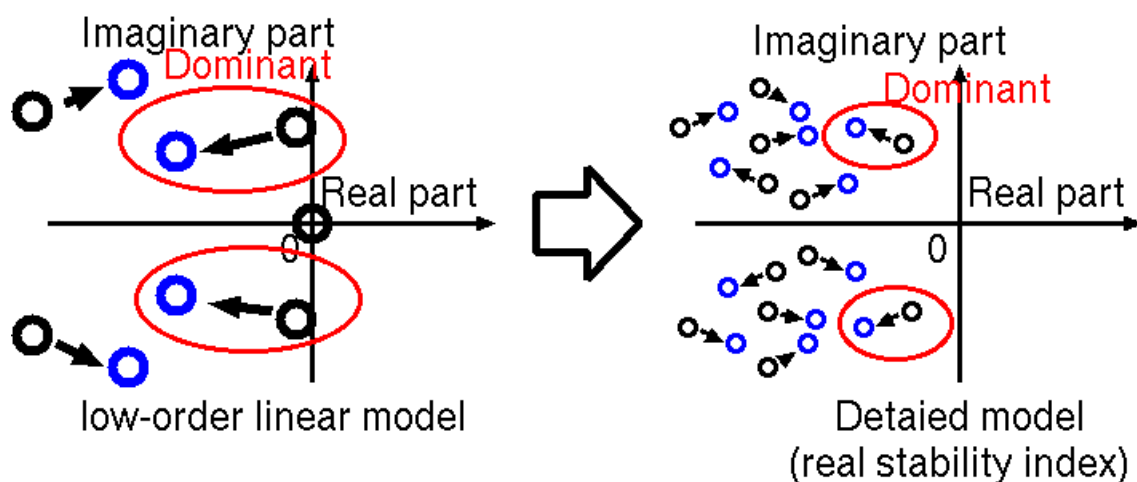


図 20 : 固有値が改善するイメージを模式化したもの

モデルには、複数の固有値が存在しうるため、パラメータ設計により、最も支配的となる固有値が別の固有値に切り替わる場合も、考えられる。

本研究では、モデルの同定と PSS のパラメータの設計を、反復継続して行うことを意図している。同定では、パラメータ設計を行う観点では、次の 2 点が明らかになる。

- 現状における定態安定度(固有値)
- パラメータを微小に変化させた場合の安定度の変化(固有値感度)

後者の情報を用いれば、実際にパラメータを更新する前に、どの方向にパラメータを移動させれば、安定度がどう変化するかを予想できる。ところが、得られる情報には、次のような問題点があることも分かっている。

- PSS のパラメータを更新すると、低次モデルの固有値が変化し、波形から観察される動揺モードから離れた値になる。
- 他の発電機で PSS パラメータなどを更新すると、モデルの、同定により求める部分が増える。
- 電力システムでは、時々刻々と需給状態や系統構成が変化するため、低次化したモデルは変化を続けている。
- 同定はいつも正確に行えるとは限らず、ときには誤った結果が得られる場合もある。

このため、本研究では、パラメータの移動を行った後も、同定を継続して、定期的(主に 1 秒ごと)に PSS のパラメータを操作し続けている。結果的に、試行錯誤的に安定性がより高くなる状態を探し求める動作をすることになる。

3.6. PSS パラメータ更新における3分木法

PSS のパラメータを更新するとき、固有値感度を用いた方法では、パラメータを 1 回操作するたびに、調整対象となる 3 つのパラメータそれぞれに対して、移動させる量の割り当てを固有値感度の大きさに従い配分していた。一方で、パラメータの調整を長時間にわたって何度も繰り返して行う場合は、パラメータの移動 1 回あたりの移動量を固定しても、パラメータは系統を安定化可能な値の領域に到着できると考えられる。そこで本研究では新たに、図 21 に示すように、単位時間ごとにあらかじめ定めた単位幅だけパラメータを「上げる場合」「下げる場合」「動かさない場合」の 3 通りに対してそれぞれ固有値を計算し、最も安定性が高まる方向にパラメータを遷移させる「3分木法」の利用を提案する。線形計画法と 3分木法の比較も行う。安定性の評価は、「振動的な固有値のうちで、最も実部が大きいもの」の実部の値で評価する。なお、パラメータごとに、一度の操作で移動可能な幅を決める必要がある。この幅は、値が変化する最大の速さを決めるものであり、本研究では試行錯誤的に手動で定めている。

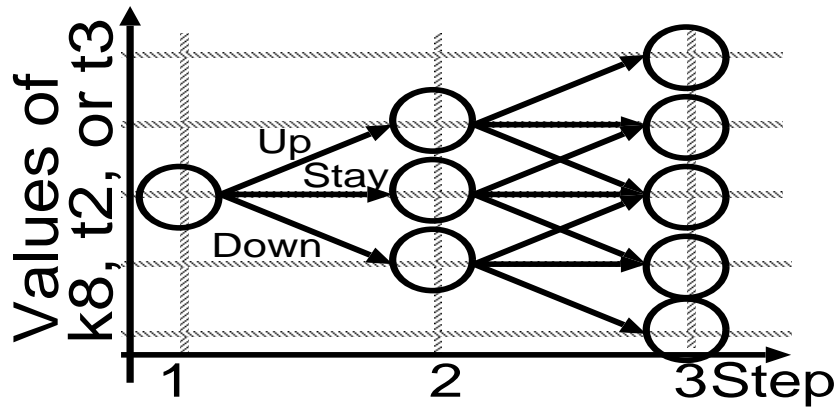


図 21: 3 分木法の模式図

3.7. PSSパラメータ更新における固有値感度を用いた線形計画法の詳細

3.7.1. 固有値の分類

線形計画法により，固有値実部の最小化を目指す目的関数は，以下のように書けた。

$$\sum_i \left(\sum_k \operatorname{Re}(S_{ik}) \right) \Delta \alpha_i \rightarrow \min \quad (\text{数式 9 を再掲})$$

ただし，全ての固有値が目的関数の対象となるわけではない。本研究で固有値感度法を用いる場合は，固有値を以下の 3 種類に分類している。

- **目的関数になる固有値** 虚部が 0.1 から 315 の範囲にあるもの。約 20ms から 63 秒までの周期を持つ動揺モードが，対象となる。
- **制約の対象になる固有値** 目的関数になる固有値以外のうち，絶対値が 0.001 をこえるの固有値が対象になる。
- **ゼロ固有値** 大きさが 0.001 以下の固有値が対象になる。

目的関数で，添字 k の対象となるのは，目的関数になる固有値として分類されたものだけである。本研究で用いる 5 次モデルでは，多くの場合 1 組の振動的な固有値が得られるため，その固有値が対象となる。

3.7.2. 制約条件の設定

2.6.1 節で説明した線形計画法を用いたパラメータ設計では，PSS パラメータの組 $a(k8, t2, t3)$ が，一度の最適化計算で移動可能な幅をまず，制約条件として設定する必要がある。

$$|\Delta \alpha_i| \leq \Delta \alpha_{i_MAX} \quad (\text{数式 17})$$

この制約条件を厳しく設定する場合は、制約条件となる幅が事実上、パラメータの更新1回当たりにおける、パラメータの移動量に対応する。従って、移動可能な幅は、パラメータが変数値の空間を進む方向を決める面を持つ。

本研究では、固有値感度が大きい(パラメータを同じだけ動かした時の、固有値改善幅が大きい)パラメータほど優先して操作する方法を用いる。この方法では、改善が必要な固有値を対象に、感度の絶対値を PSS パラメータごとに合計し、その合計値を移動可能幅に比例配分する。ただし、移動可能幅を用いたベクトルの大きさを、例えば 0.10 など定数として固定する。

ところが、この制約を用いて実際にパラメータ設計をシミュレーションすると、ゲイン k_g ばかりが大きく変化し、安定性に悪影響を与えることが分かった。このようになる背景には、感度の大きさが、パラメータの単位の取り方に大きく依存することがあげられる。例えば、あるパラメータの基準量を 10 倍の量にすれば、そのパラメータに対する傾きは 10 倍に見えてしまう。そこで、固有値感度を考える上でのゲイン k_g の基準量を変更できるようにした。新たな基準量 k_{g_base} を用いて表現した k_g を k_g^* とするとき、

$$k_g = (k_{g_base}) \times k_g^* \quad (\text{数式 18})$$

となる。本研究では試行錯誤の上、 k_{g_base} を主に 0.3 としている。

次に、PSS パラメータそれぞれに対して、上限値と下限値の制約を設定する。

$$\alpha_{i_LOW} \leq \alpha_i + \Delta\alpha_i \leq \alpha_{i_HIGH} \quad (\text{数式 19})$$

それぞれの固有値実部に対する制約もある。目的関数となる固有値に対して、安定量の合計値の最大化を目指すと、一部の固有値がかえって不安定になる可能性がある。そこで、それぞれの固有値で、実部の値が制限値を超えないように、個別に制約条件を設定する。

$$\text{Re}(\lambda_j + \sum_i (S_{ij} \Delta\alpha_i)) \leq \text{制限値} \quad (\text{数式 20})$$

ただし、 λ_j は現在の固有値、 S_{ij} は固有値感度、 $\Delta\alpha_i$ は各パラメータの変化量である。制限値は、現在の固有値が持つ実部のうち、最大の値としている。ただし、目的関数となる固有値では特別に、目的関数となる固有値の中だけで最大となる実部を、制限値とする。なお、ゼロ固有値はこれらの処理の対象とはしない。

4. シミュレーション環境の構築と基本的なパラメータ設計の検討

低次線形モデルを用いた固有値制御手法による定態安定度向上策を、微小な外乱が常在する広域電力系統に対して適用する、という提案は、実際の電力系統で試すことが難しいため、計算機シミュレーションにより、その効果を検証する。ここでは、不安定現象を再現するための電力系統モデルを用意し、系統の状態を同定によって推定し、PSS のパラメータを適応制御により更新する、基本的なシミュレーションの事例について説明する。

4.1. 手法を検証するモデル系統

シミュレーションの対象となる電力系統には、西日本特有の性質である、長周期で弱制動のモードを持つ電気学会 WEST10 機系統(図 22)^[11]を用いる。

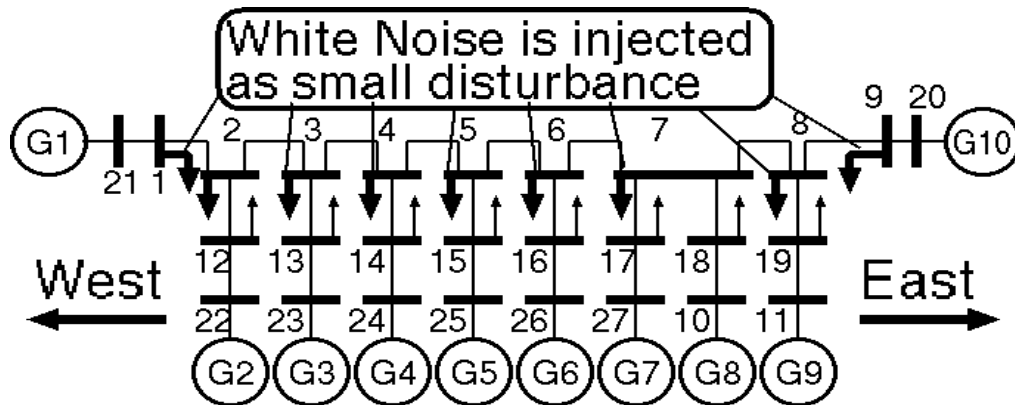


図 22: 電気学会 WEST10 機系統モデル^[11]

この系統モデルは、西日本全体の電力系統を、発電機 10 機からなる縮約モデルとして模擬したもので、電気学会により作られた。典型的なくし形系統となっており、数秒周期の動揺モードを持つように作られている。西日本では全体として、西側から東側へ向かって潮流が流れる傾向がある。この潮流を増やしすぎると、安定性が低下する。

4.2. 安定限界の状況の模擬

本研究では、同定により支配的なモードを把握するため、微小な外乱から持続的なモードが誘起されやすい環境でなければ、提案手法は有効となりにくい。提案手法が役立つと想定される状況として、定態安定度を安定限界近くとなるようにする。定態安定度を限界付近に設定するために、例えば、西側の発電機 1 の出力を上げ、東側の負荷 9 の消費を増やし、東向きの潮流を増加させる。

系統全体が十分に安定なときは、同定から動揺モードを見つけることが困難であり、適応制御が正しく行える可能性が低い。このような状況では、適応制御を行わず待機したほうが、合理的である。十分に安定な期間への対応については、後の章で詳しく述べる。

4.3. 負荷変動の添加による支配的モードの誘起

本研究では、低次線形モデルの未知数の部分を、同定により決める。同定を行うためには、モデルの入出力関係を把握可能な動揺現象が観測される必要がある。本研究では、負荷の変動が動揺現象を誘起すると考え、負荷の消費量にホワイトノイズの波形を添加することで、負荷変動を模擬した。数値積分法のシミュレーションでは、負荷変動の添加は、定インピーダンスとみなしている負荷のインピーダンスの値を、こまめに変更することで実装した。負荷変動で想定する波形としては、大きな負荷がオンとオフを数秒おきに繰り返す方形波状の波形を想定することもできる。実際の電力系統では製鉄所等に、電力系統全体に影響を与えるような大きな負荷が存在する。

4.4. シミュレーションの流れ

この研究で行うシミュレーションは主に、以下の流れで行われる。

- あらかじめ、重潮流状態を作るなどして定態安定度を安定限界付近に設定しておく。
- 一部の負荷ノードに微小な変動を加え、支配的な動揺モードが誘起されやすくする。
- 各発電機の低次線形モデルで同定を行い、モデル内の未知数を決める。
- 低次線形モデルで固有値解析を行い、系統の安定度を推定する。
- 固有値解析の結果から、PSS パラメータのチューニングを行う。

負荷変動の添加とモデルの同定は、同時並行で常時続けて行う。固有値解析は、反復継続して行う。更新 1 回あたりのパラメータの移動量を小さくとどめ、例えば毎秒繰り返す。同定は、ときに誤った結果を与える場合もあるので、ときどき誤った設計が行われても、全体として適切な設計が行われる場合が多数であれば、後で安定度を回復する機会を持つことが可能となる。

4.5. シミュレーション結果の検証手法

低次線形モデルに対して同定を正しく行えたかや、PSS に対してオンライン設計を適切に行えたかを、検証する必要がある。検証では、実際の電力系統を観測することでは得ら

れない，デジタルシミュレーションの内部的な情報を利用し，検算する場合もある。

4.5.1. 動揺波形の観察

数値積分法のシミュレーションにより算出された各種物理量の動揺波形からは，安定性の定性的な検証ができる。また，PSS パラメータの変化からは，適応制御によるパラメータ操作の履歴が分かる。

4.5.2. 固有値の検証

低次線形モデルで算出した固有値が，シミュレーションに用いている詳細な系統モデルから直接計算して求めた，支配的な固有値を反映したものになっているかを調べることで，同定が適切に行われたかを検証できる。PSS のパラメータを更新するたびに，詳細な系統モデルから固有値を計算し，その変化の様子を調べることで，パラメータの設計がシステムの安定性を実際に向上させたかを検証できる。また，低次線形モデルを用いて PSS のパラメータを設計した場合の，パラメータの遷移を，詳細モデルの固有値を評価して設計した場合の遷移と比べると，設計が理想的に行われた場合との比較ができる。

4.6. 安定限界付近におけるパラメータ設計を伴わないシミュレーション事例

支配的なモードの誘起と同定を検証する目的で，同定だけをシミュレーションする。PSS のパラメータは，操作しない。

4.6.1. シミュレーション条件

WEST10 機系統モデルの昼間断面において，定態安定度を限界付近とするために，発電機 1 の出力と負荷ノード 9 の消費を，それぞれ 0.5[p.u.] (1p.u.=1000MW)高めた。10 台ある発電機全てに PSS を設置した。そのパラメータを表 3 に示す。詳細モデルから求めた支配的固有値は， $+0.00153 \pm j3.49$ (動揺の周期は 1.80 秒)である。

表 3: PSS パラメータの設定値

k8	t2[sec]	t3[sec]	t8[sec]	t1[sec]
1.0	0.25	1.25	0.02	5.0

負荷ノード 1 から 9 までに，負荷の消費量の変動として，平均の大きさが 0.06[p.u.](1p.u.=1000MVA)のホワイトノイズを加え，系統固有の動揺モードを誘起する。シミュレーション

開始後 1 秒の時点から、負荷へ外乱を加えながら同定を行い、低次線形モデルから固有値を毎秒算出した。

4.6.2. 各種波形と固有値

各発電機の電気出力・回転速度(電氣的な角速度)・PSS の出力・回転子の位相角を、それぞれ図 23 に示す。いずれも、安定限界付近にあるため、振動的となっている。シミュレーションの初期段階では、固有値の実部が正であることから動揺振幅の拡大がみられるが、30 秒以降は振幅が飽和的になっている。PSS の出力値は高々 ± 0.008 [p.u.]であり、図 10 に示した電気学会のモデルが持つリミッタの ± 0.1 を大幅に下回っている。従って、この程度の動揺現象への対策を考える場合は、現状のリミッタを考えない線形モデルでも、対応ができると考えられる。

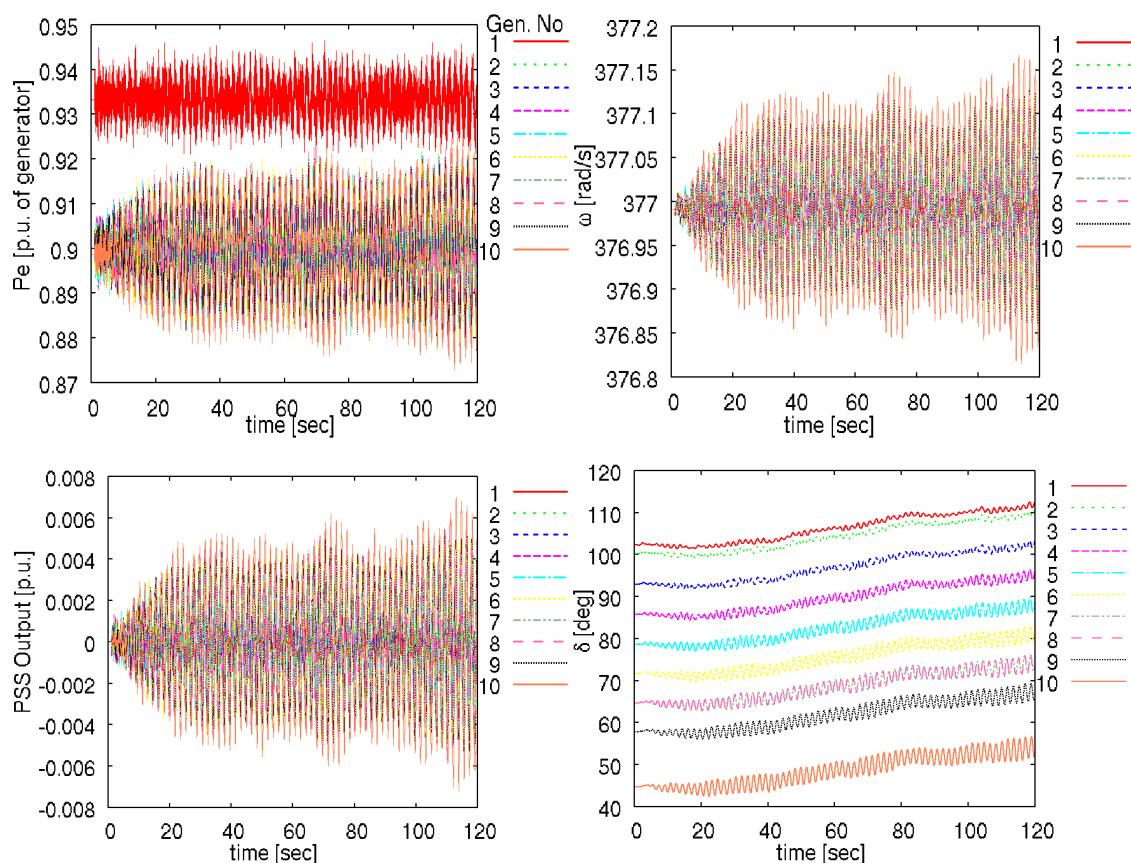


図 23: 各発電機から得られる物理量

波形をより詳しく見るために、80 秒から 84 秒までの区間を拡大して図 24 に示す。波形からは、約 2 秒弱の周期を持つ動揺が読み取られる。西側に位置する番号の小さい発電機

よりも、東側に位置する番号が大きい発電機のほうが、動揺の振幅が大きく、位相が遅れている。電気出力(P_e)は、回転速度(ω)や位相角(δ)と比較して、大きなノイズ成分を持っている。電気出力は加速度に関係するため、その時間積分が回転速度と関係し、回転速度を時間積分すると位相角になることから分かるように、これらの物理量は互いに積分的な関係を持つ。積分は、ローパスフィルタの性質を持つため、回転速度や位相角では、周波数の高いノイズ成分が除去されているといえる。PSS の出力値は、電気出力の偏差をもとに作られるため、比較的大きなノイズを持つが、PSS 自身が一次遅れなどのブロックを持つため、ややノイズが抑えられた波形となっている。

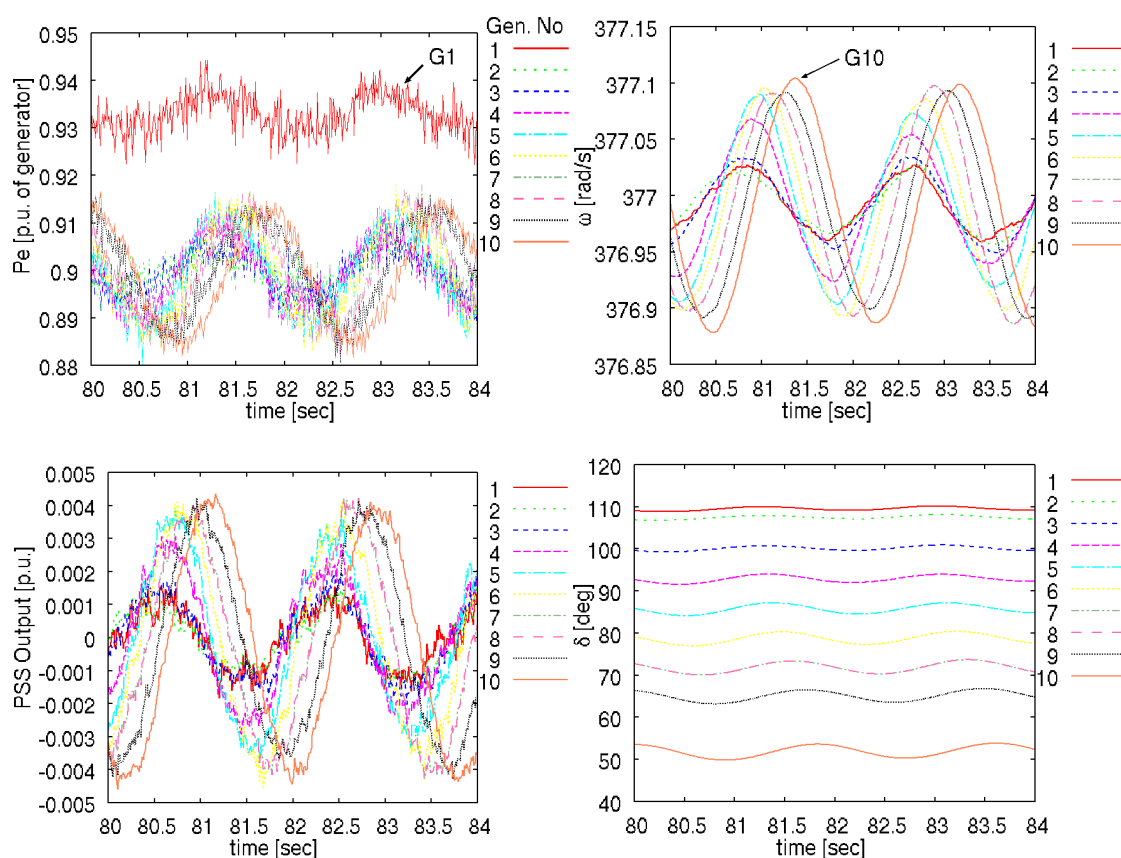


図 24: 波形を 80s からの 4 秒間について拡大したもの

実際の同定では、数秒周期の成分を優先して取り込む目的で、上記の波形(ただし時刻 0 の値からの相対値)に、4.0Hz の LPF と 5.0Hz の wash-out フィルタをかけたものを用いる。フィルタ適用後の波形を図 25 に示す。値が 0 を中心とした変動となり、周波数の高いノイズが除去されている。フィルタを適用する前と比べ、位相にやや変化が見られる。フィルタの適用は、フィルタが必要と考えられる電気出力だけでなく、同定に用いる全ての

波形に適用する必要がある。最も動揺が大きい発電機 10 における、同定により得た低次モデルの未知数を図 26 に示す。B₂ は、他の発電機と比べてとくに大きくなっている。必ずしも特定の値に収束しているわけではないが、値は傾向を持って分布している。

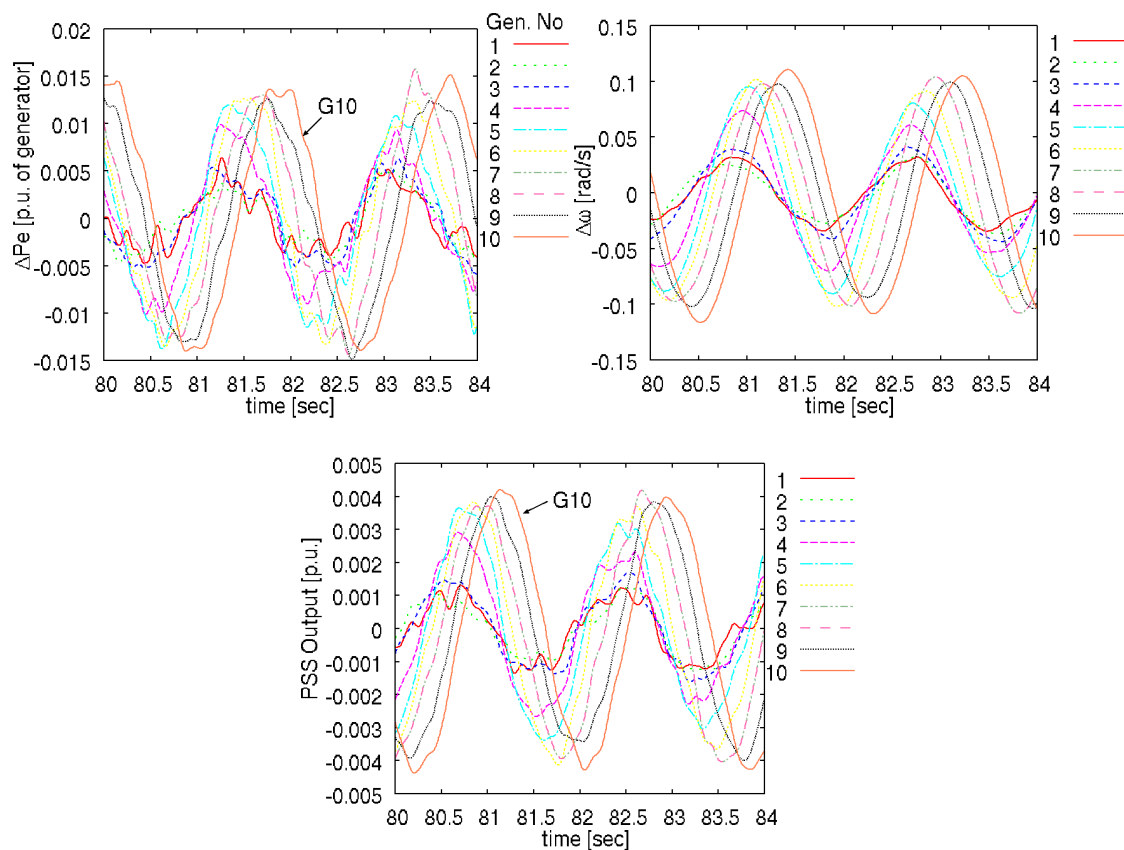


図 25: 波形に LPF と Wash-out フィルタを適用したもの

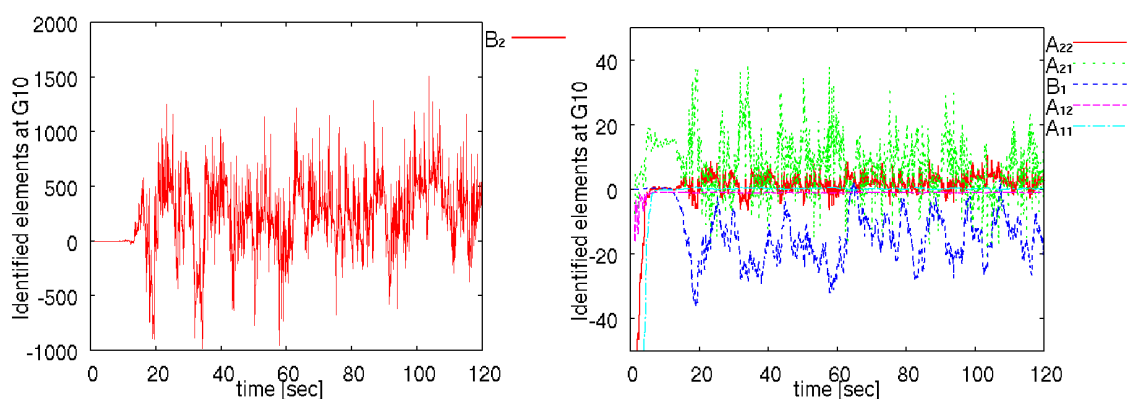


図 26: G10 における同定された 6 つの未知数

各発電機に設定した 5 次の低次線形モデルで同定した固有値を、図 27 に示す。ただし、”DR””DI”は詳細モデルから直接計算した支配的な固有値であり、同定によらない真の支配的なモードを意味する。プロットされている点は、5 次モデルから得られた固有値のうち、

支配的なものを 1 つ選んで、実部と虚部に分けて示したものである。一般的に固有値のプロットでは、複素平面上に値を並べる場合が多いが、本研究では時間とともに変化する様子を示す必要があるので、実部・虚部を分け、それぞれを時間に対してプロットする珍しいやり方をしている。実部は、10 秒程度で 0 付近に収束した。ただし、動揺の振幅が比較的小さい G1 などでは、負方向への誤差が大きくなっている。虚部は、振動的な値は複素共役な値を持つが、そのうち虚部が正となるものをプロットしている。詳細モデルから求めた値とほぼ同じ値を出す場合と、遠く離れた 0 付近を示す場合に分かれている。固有値を算出するタイミングによって、支配的な動揺の周期を得られたり得られなかったりする。

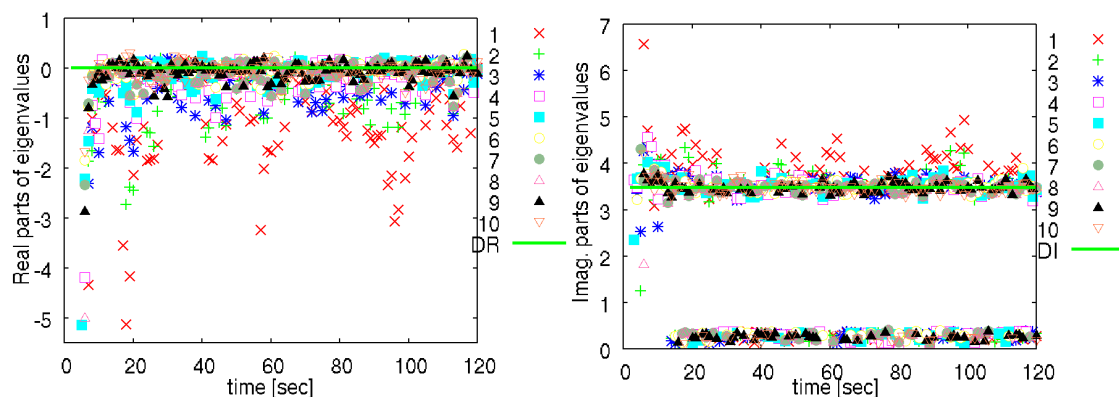


図 27:各発電機の 5 次の線形モデルで求めた固有値

シミュレーション開始 25 秒の時点において、発電機 G10 の PSS パラメータを広い範囲で操作し、そのときの支配的固有値実部の値を詳しく調べた。詳細モデルから直接算出した支配的固有値の実部と、発電機 G10 の 5 次モデルから求めた固有値実部を、図 28 に示す。ただし、位相補償パラメータの自由度を 1 とする目的で、 t_2 と t_3 の和が 1.5[秒]となる場合に限ってプロットしている。詳細モデルから直接求めた固有値のプロットは、発電機 G10 の PSS がもたらす安定度への効果を示している。PSS のパラメータを操作することで、定態安定度の指標である支配的な固有値を、図示した範囲で操作できることが分かる。最も谷になっている部分が、発電機 G10 だけを単独で設計する場合の理想的なパラメータ値である。5 次モデルから求めた固有値のプロットは、同定により得られた低次モデルが、系の安定性をどうとらえているかを意味する。次数の低いモデルであるため、同定を行ったパラメータ値付近の傾向(グラフの傾きの符号)が合っていることだけを期待している。グラフの傾きは支配的な固有値に対するパラメータの感度を意味し、PSS パラメータを操作するときの方向や移動量を決める目的で用いられる。図 28 では、 $(k_8, t_2)=(1.0, 0.25)$ の付

近においては、傾きの符号が詳細モデルのグラフと共通しており、同定の目的が果たされていることが分かる。

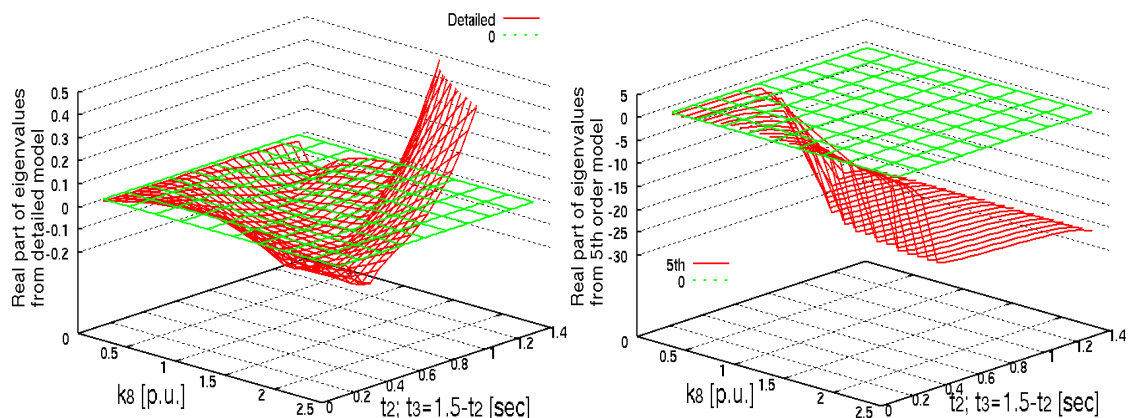
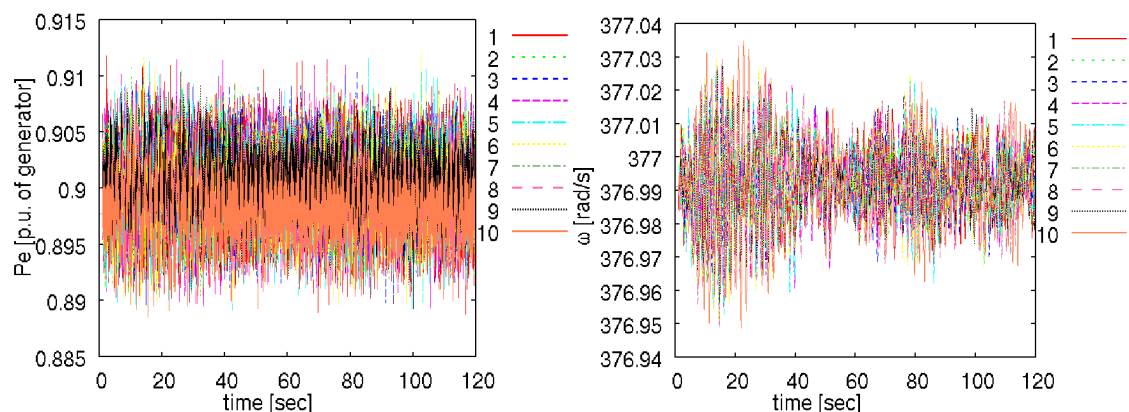


図 28 : 時刻 25 秒における発電機 G10 のパラメータと支配的固有値実部の関係

4.7. 安定な状態でパラメータ設計を伴わないシミュレーション事例

次に、定態安定度が安定な状況となるように、発電機 1 と負荷 9 の発電・消費量を元に戻した。シミュレーション開始時にモデル全体で支配的となる固有値(詳細モデルから直接算出)は、 $-0.0741 \pm j3.51$ (動揺周期は 1.79 秒)と、定態安定である。この状態で 4.6 節と同様に負荷変動を加え、同定を行った。まず、各発電機で観測された物理量を図 29 に示す。図 23 と比較して、動揺の振幅が小さくなっている。



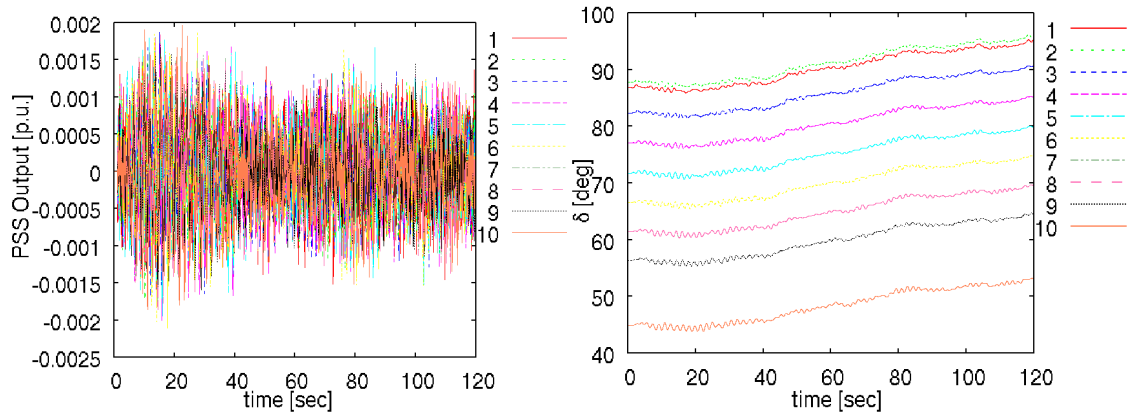


図 29 : 各発電機における物理量

波形の一部を拡大して、図 30 に示す。図 24 と比べ、電気出力と PSS の出力では、動揺が見にくい。動揺モードが誘起されにくく、負荷に加えたノイズに埋もれているからである。回転子速度のプロットでは、動揺の波形が見られる。ただし、図 24 と比べれば、波形にひずみが大きく、振幅が小さい。位相角 δ の動揺振幅も、小さくなっている。

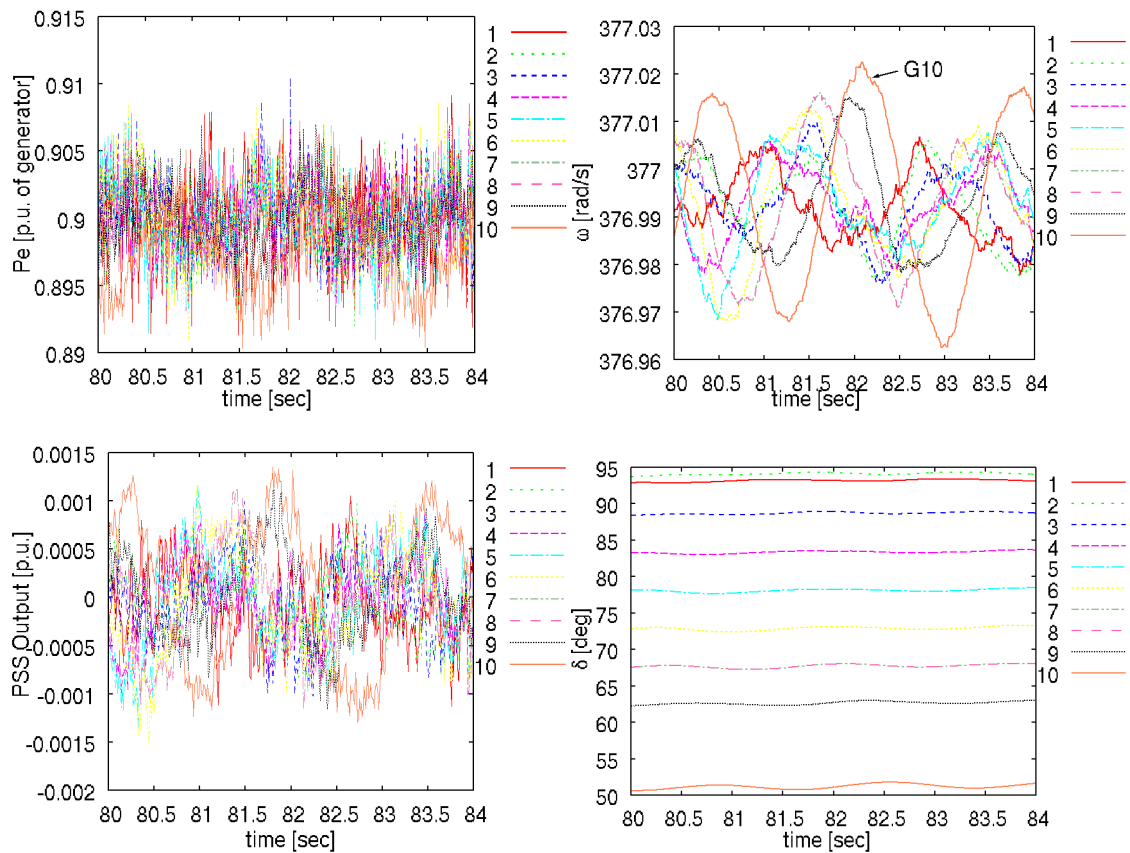


図 30 : 物理量の波形を 4 秒間拡大したもの

次に、最も動揺振幅が大きいと考えられる発電機 10 で得られた、5 次モデルの未知数を図 31 示す。図 26 と比べ、見た目上は収束性に違いは見られない。

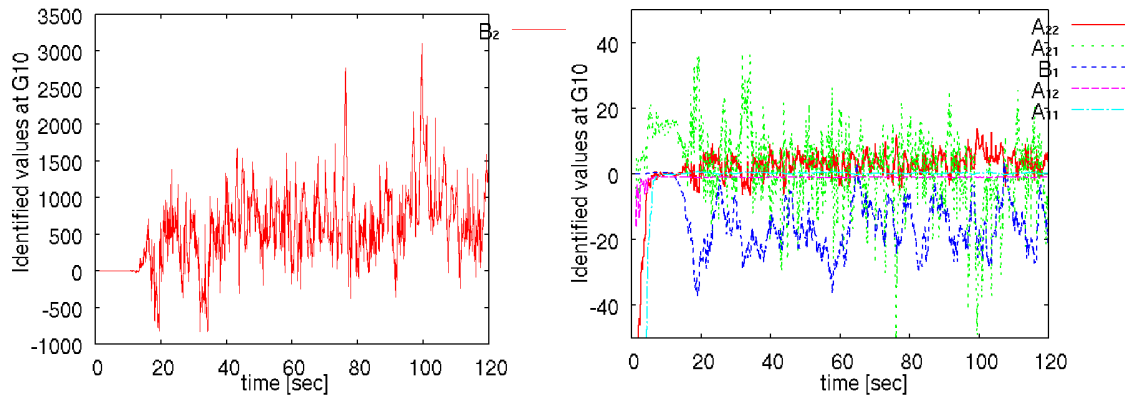


図 31：発電機 G10 で得られた 6 つの未知数

次に、各発電機に設けた 5 次モデルで同定して得た固有値を図 32 に示す。図 27 と比べ、明らかにばらつきが大きくなっている。詳細モデルから直接求めた固有値と比較すると、実部は負方向、虚部は正方向に偏って検出されている。このように、電力系統が定常安定なときは、定常不安定なときと比べ、支配的な動揺が波形に現れにくいいため、同定が不正確になることが分かった。この性質は、安定時にオンライン設計が不正確になりがちなことと、不安定モードの存在を固有値のばらつきから推定する手法を説明可能とするものであり、後の章で活用されることになる。

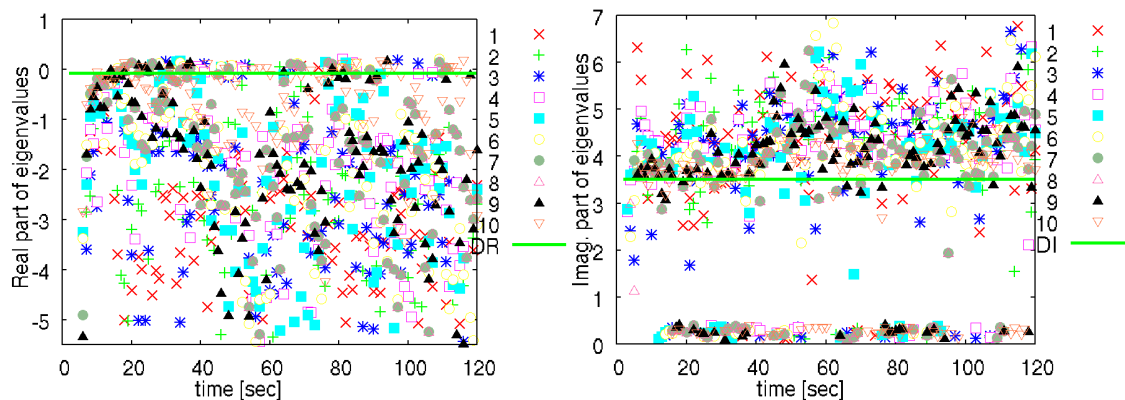


図 32：各発電機の 5 次モデルで求めた固有値

時刻 25 の時点で、発電機 G10 を対象に、PSS パラメータと支配的固有値実部の関係を詳細に調べ、図 33 の結果を得た。同定の精度が低下していると考えられるが、偶然なのか 5 次モデルから求めた固有値実部は前回の図 28 と近い傾向を示している。結果的に、 $(k_8, t_2) = (1.0, 0.25)$ の地点では、 k_8, t_2 をともに高める場合により安定化するという点で、詳細モデルから求めた固有値と、5 次モデルから求めた固有値の性質が一致している。

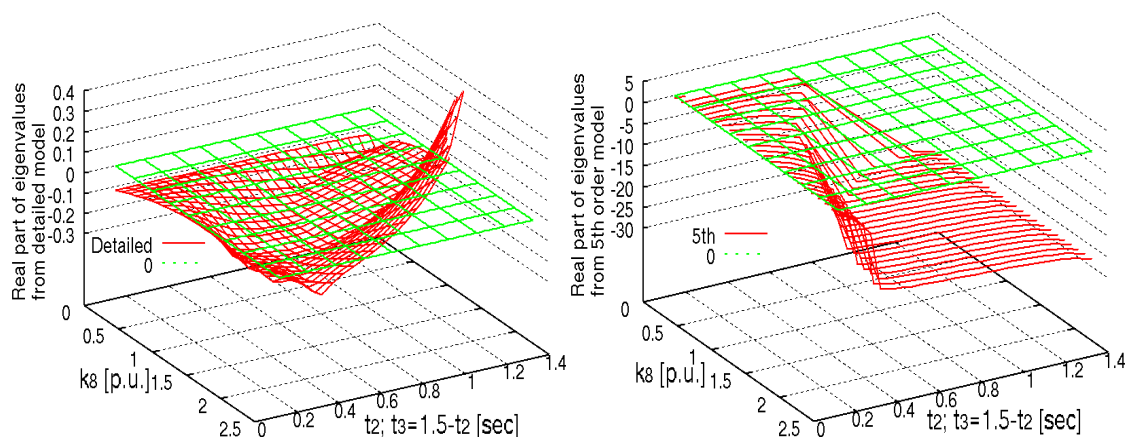


図 33 : 時刻 25 秒における発電機 G10 のパラメータと支配的固有値実部の関係

4.8. 発電機 G10 を 1 台だけパラメータチューニングする場合

次に、発電機 1 台を選び、PSS のパラメータを反復・継続して更新する。更新する方法としては、発電機に設定した 5 次モデルで求めた固有値を用いて 3 分木法・線形計画法のアルゴリズムで適応制御を行う場合と、詳細なモデルから直接求めた固有値が改善するようにパラメータを更新するオフラインの従来法を用いる。設計対象の発電機は、動揺の振幅が最も大きく、発電機単体の容量も大きく設定されている発電機 G10 を選んだ。4.6 節の定態不安定な初期条件を用いて、シミュレーション開始 25 秒の時点から毎秒、PSS のパラメータ(k_8, t_2, t_3)を更新した。シミュレーション開始後すぐにパラメータを更新しない理由は、動揺モードの同定に必要な時間を考慮したためである。

4.8.1. 5 次モデルから求めた固有値を用いて 3 分木法で設計する場合

まず、5 次モデルから求めた固有値を利用して、3 分木法を用いて発電機 G10 の PSS パラメータを調整する。調整は、1 秒に 1 回ずつ行う。1 回に調整可能な幅は、 $(k_8, t_2, t_3) = (0.05, 0.05, 0.05)$ とした。調整は、シミュレーション開始の 25 秒後から可能とした。まず、各発電機から得られた動揺波形を図 34 に示す。電気出力と回転速度では、40 秒付近までに動揺現象がいったんおさまるが、PSS の出力が大きくなりすぎている。60 秒台から、発電機

G10 が原因となって、振動発散する。

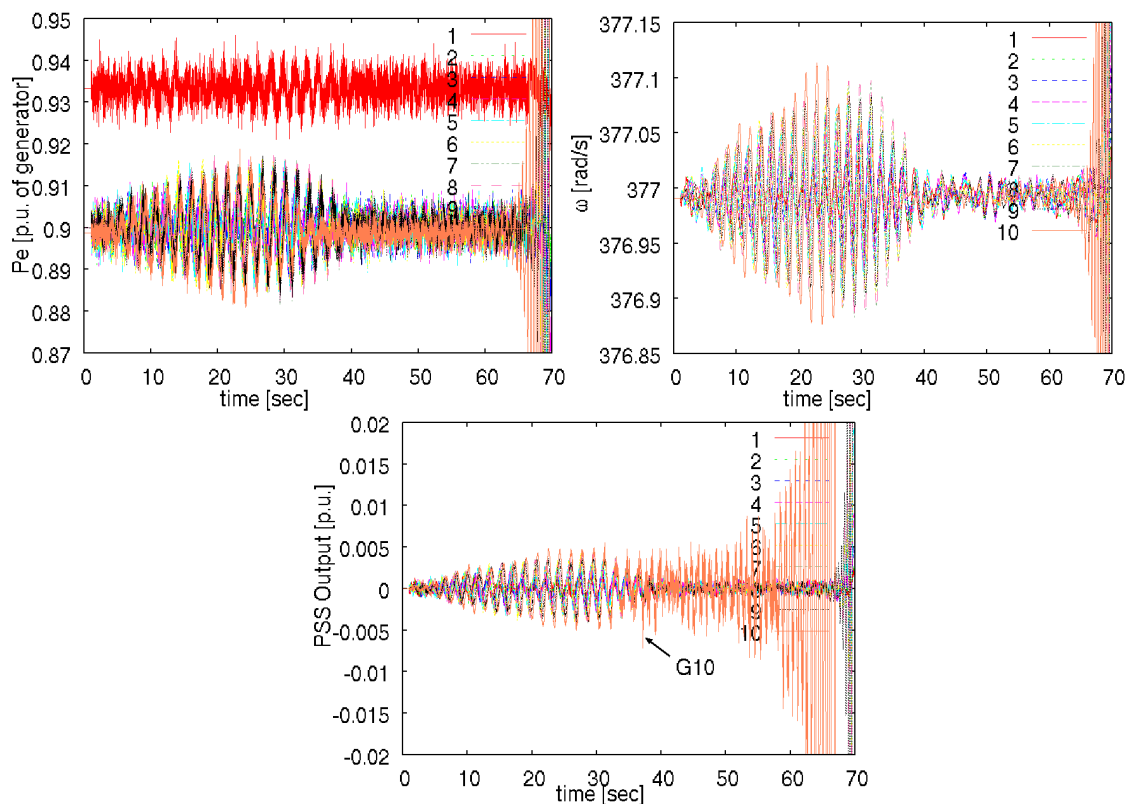


図 34 : 各発電機の電気出力・回転速度・PSS 出力

発電機 G10 における PSS パラメータの変化を図 35 に示す。最初は、ゲイン(k8)は上昇、位相補償(t2, t3)は遅れの補償を打ち消すように変化するが、安定化した 40 秒付近でいったん変化が止まる。50 秒付近から再び変化が起こり、ゲインは上昇、位相補償は進み補償となる。その後系統は不安定化するが、パラメータの変化は変わらず続いている。

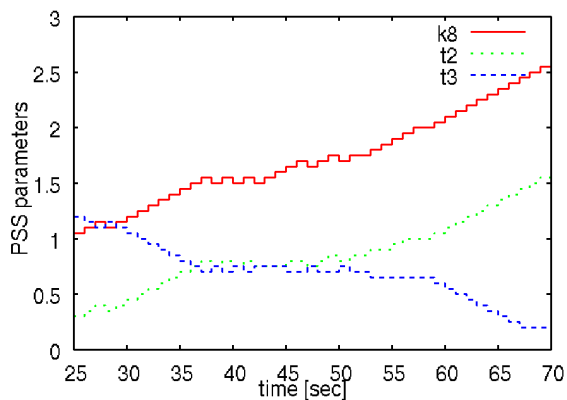


図 35 : 発電機 G10 における PSS パラメータの推移

次に、発電機 10 の 5 次モデルで得られた 6 つの未知数を図 36 に示す。シミュレーション末期に A_{21} が比較的大きく上昇している。発電機 10 の 5 次モデルから算出した固有値と、詳細なモデルから直接算出した支配的な固有値を比較すると、5 次モデルから得られた固有値は、動揺波形が比較的強く観測されていた 30 秒台までは正確に支配的モードをとらえているが、その後はそれほど正しく追従できていないことが分かる。詳細モデルから求めた固有値虚部が 40 秒の手前で大きく変化したのは、支配的となる動揺モードがこの時刻で切り替わり、より周期の短いモードが支配的となったことによるものである。虚部が 3.5 付近となるモードは、支配的ではなくなった後も存在する。ただし、最も不安定な固有値ではなくなっている。支配的な固有値が別の固有値に切り替わる付近では、動揺波形が複雑になる。従って、同定により特定のモードをとらえることが難しくなる。

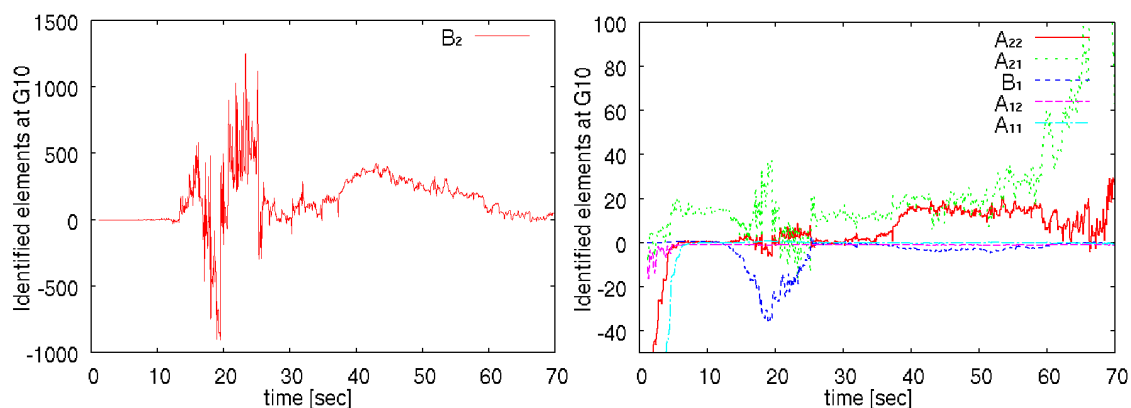


図 36：発電機 G10 における同定から得られた 5 次モデルの未知数

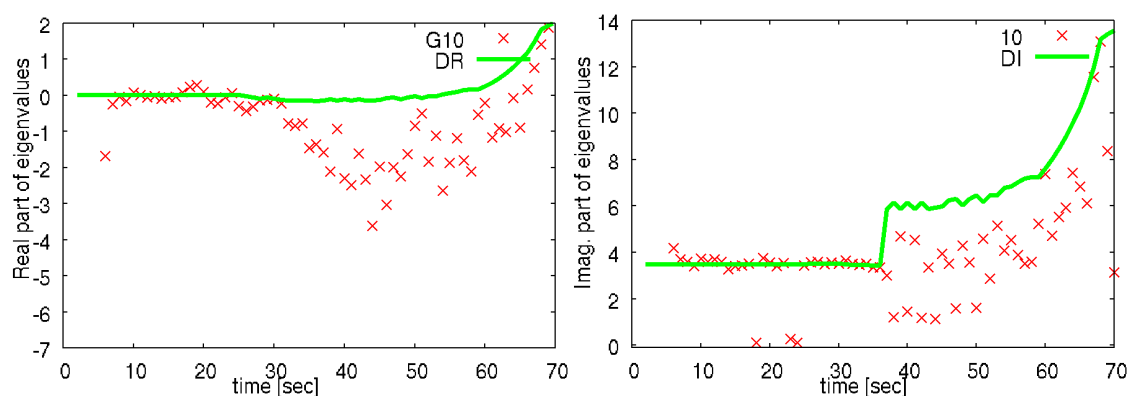


図 37：発電機 G10 における 5 次モデルで算出された固有値の推移

4.8.2. 5 次モデルから求めた固有値を用いて線形計画法で設計する場合

次に、発電機 10 の 5 次モデルを用いて算出した固有値感度を用いて、線形計画法による

パラメータ設計を行った。前節と同様に、シミュレーション開始 25 秒から、1 秒に 1 回パラメータ(k8, t2, t3)を更新する。シミュレーション結果について、各発電機で得られた物理量を図 38 に示す。40 秒付近で同様がおさまり、定態安定度が回復しており、その後も動揺現象の再発がなく、落ち着いている。PSS の出力波形では、発電機 G10 でゲインと位相補償を更新したことが影響して、出力の振幅が大きくなっている。発電機 G10 における PSS パラメータの推移を図 39 に示す。ゲイン(k8)は、少しずつ上昇している。位相補償(t2, t3)は、補償を打ち消す動きを最初に行ったのち、進みも遅れも補償しない状態を保ちながら、t2, t3 がともに小さくなっている。図 40 に示す発電機 G10 で同定した未知数は、システム全体が発散的にならなかったためか、図 36 と比べれば、シミュレーション末期も変化が落ち着いている。発電機 G10 の 5 次モデルから求めた固有値を図 41 に示す。動揺が波形に現れていた 40 秒付近までは、詳細モデルから直接算出した固有値(“DR”“DI”)と、5 次モデルで求めた固有値が近くなっている。その後、5 次モデルで求めた固有値は、大きくばらつき、詳細モデルから求めた固有値と比べ、実部・虚部とも負方向に偏っている。

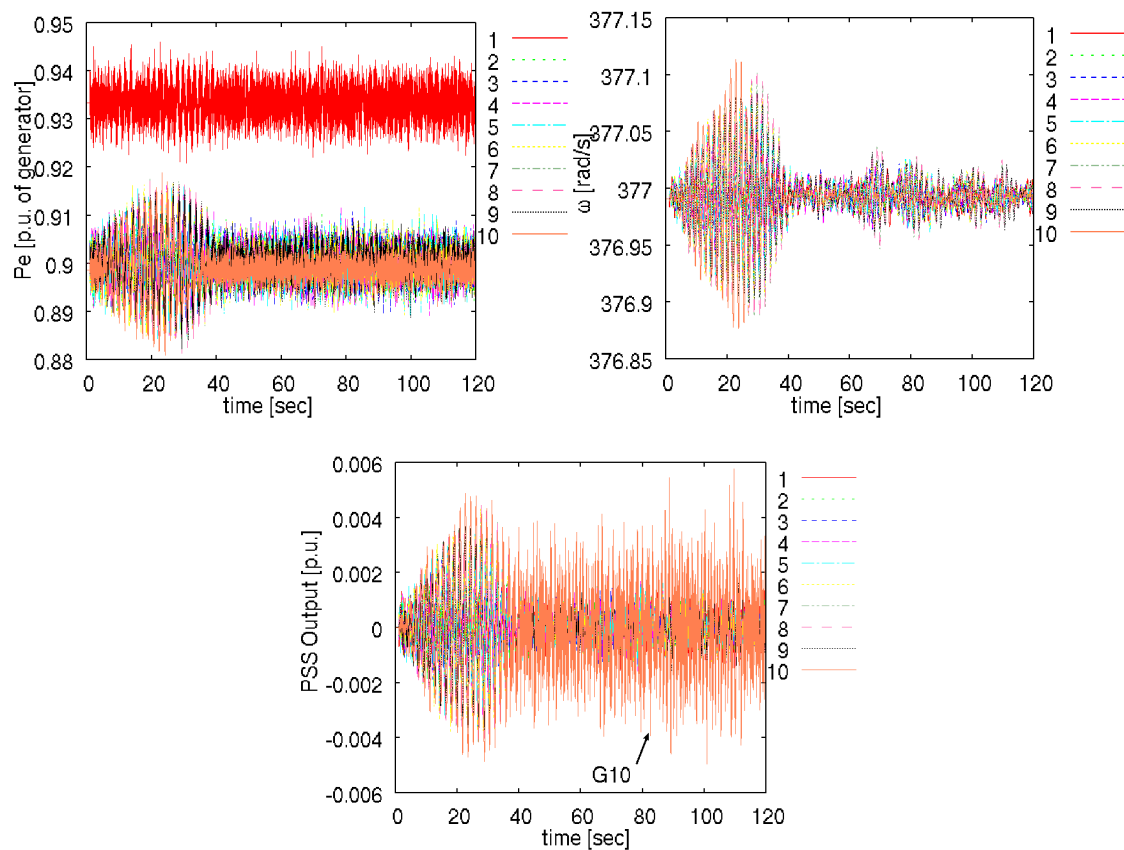


図 38 : 各発電機における物理量

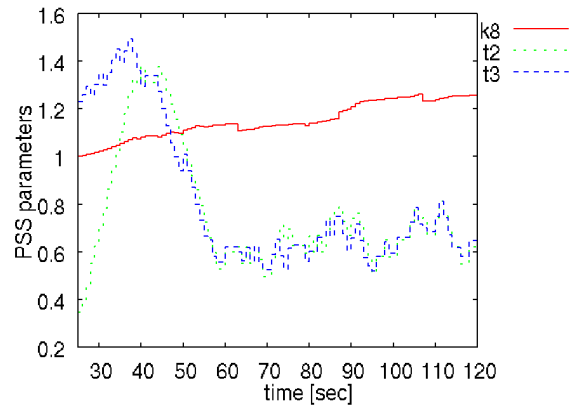


図 39：発電機 G10 における PSS パラメータの推移

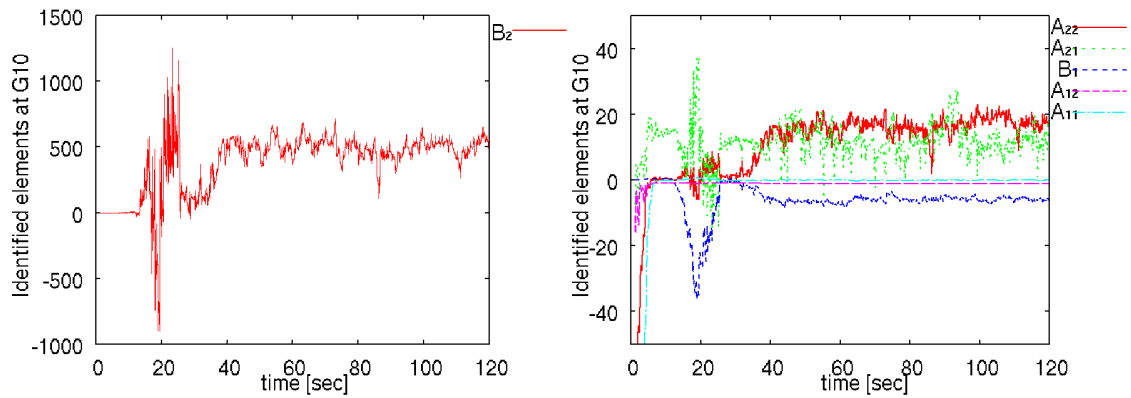


図 40：発電機 G10 における 5 次モデルの同定された未知数

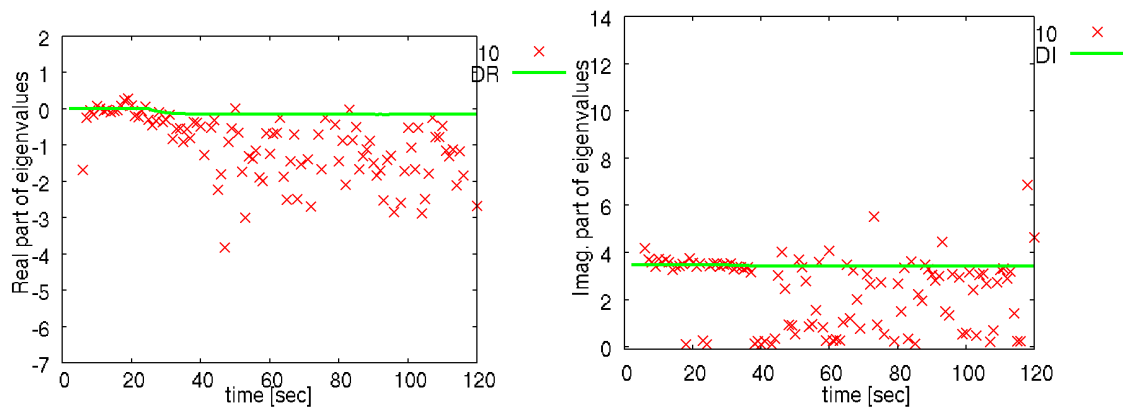
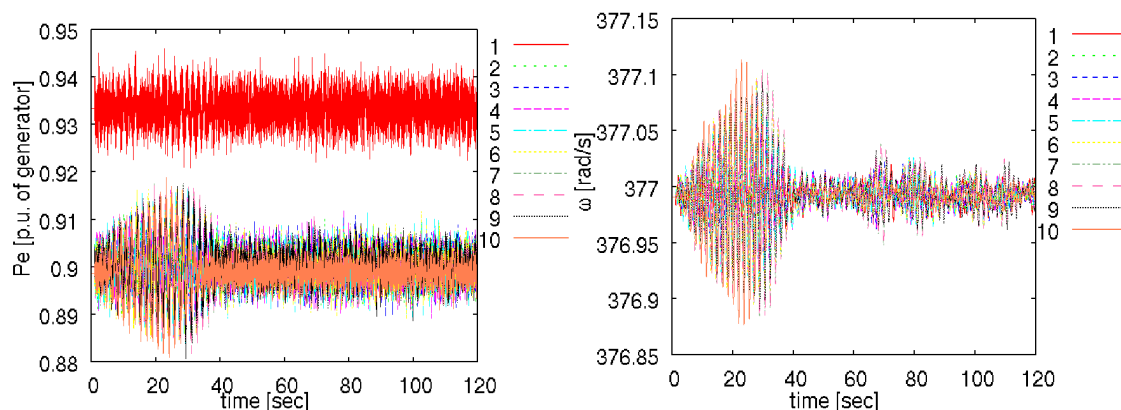


図 41：発電機 G10 における 5 次モデルで算出された固有値

4.8.3. 詳細モデルから直接求めた固有値を用いて 3 分木法で設計する場合

次に、パラメータ設計アルゴリズムが詳細モデルの情報を把握できる状況を仮定し、詳細なモデルから算出した固有値を直接 3 分木法に当てはめて、発電機 G10 の PSS パラメータ(k8, t2, t3)を調整した。調整の幅は、(k8, t2, t3)=(0.05, 0.05, 0.05)とした。理想的な設計が行われる場合を検算する目的で行うものであり、オンラインによる適応制御ではない点に注意が必要である。理想的な設計を、シミュレーション開始 25 秒の時点から毎秒 1 回ずつ繰り返して行った。シミュレーション結果のうち、各発電機における物理量を図 42 に示す。前節の線形計画法によるシミュレーション結果である図 38 に、比較的近い結果となった。PSS の出力はやはり、発電機 G10 で高くなっていることから、シミュレーション開始時の状況では、PSS の働きが不足していたことが分かる。発電機 G10 における PSS パラメータの推移を図 43 に示す。ゲインと位相補償とともに、30 秒前半で収束した。ゲインが 1.5 付近で、位相補償は進みも遅れも行わない状況が、この動揺に対しては最も適切な設定であるといえる。前節のシミュレーション結果である図 39 は、位相補償を補償なしとして、ゲインを少し上げている点が今回の結果と類似しており、結果的に理想的な設計と近い結果をもたらしたようである。詳細モデルから算出した支配的な固有値の推移を図 44 に示す。実部は、理想的な改善となった。虚部からは、実部収束後は、1 秒程度の周期を持つ別の動揺モードと、支配的な固有値が激しく入れ替わっていることが分かる。このようになる理由としては、虚部が 3.5 付近のモードと 5.9 付近のモードが、実部がほぼ等しい状態で存在し、設計を 1 回行うたびに、最も実部が大きくなるモードが入れ替わっていることがあげられる。最も実部が大きい固有値を、抑制の対象としてパラメータ設計を行えば、別の固有値と実部が等しくなる点に収束することは、自然な結果であると考えられる。従って、設計が理想的にうまくいったときは、異なる周期を持つ複数の動揺モードが、それぞれ同じくらい誘起されやすい状態にたどりつく可能性が高いといえる。



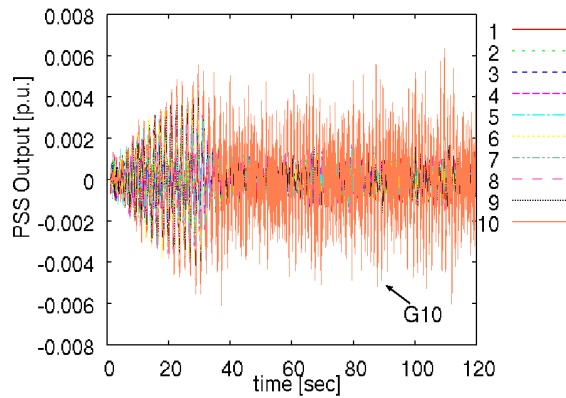


図 42：各発電機の物理量

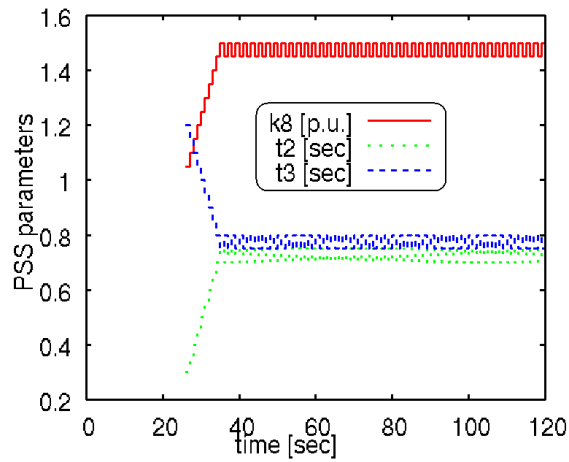


図 43：発電機 10 における PSS パラメータの推移

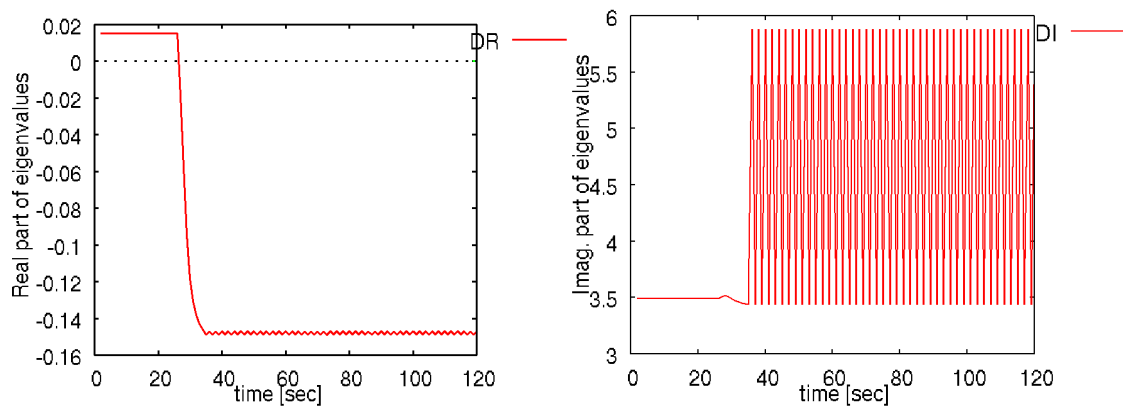


図 44：詳細モデルから直接算出した支配的な固有値の推移

4.9. 全ての発電機 10 台を同時並行で設計する場合

次に、電気学会 WEST10 機系統モデルの全発電機を対象に、同時並行にパラメータ設計を行うシミュレーションを行った。1 機だけを設計した前節と同様に、発電機に設定した 5

次モデルを用いて、3分木法・線形計画法で設計する場合と、詳細モデルを直接用いて3分木法で設計する場合について調べた。

4.9.1. 各発電機の5次モデルを用いて3分木法で設計する場合

まず、各発電機の5次モデルから得られた固有値を用いて、3分木法でパラメータを設計した。前回の4.8.1節で行った設計では、ゲインが速く上がりすぎた面があったため、一度の設計で移動可能な量を $(k8, t2, t3)=(0.01, 0.05, 0.05)$ とし、 $k8$ の変化をこれまでの5分の1に制限した。シミュレーション開始25秒の時点から、全発電機でパラメータを毎秒1回ずつ変更しながら適応制御の性質を調べた。各発電機で得られた物理量を図45に示す。30秒からの数十秒間は安定だったが、およそ90秒付近で発散した。

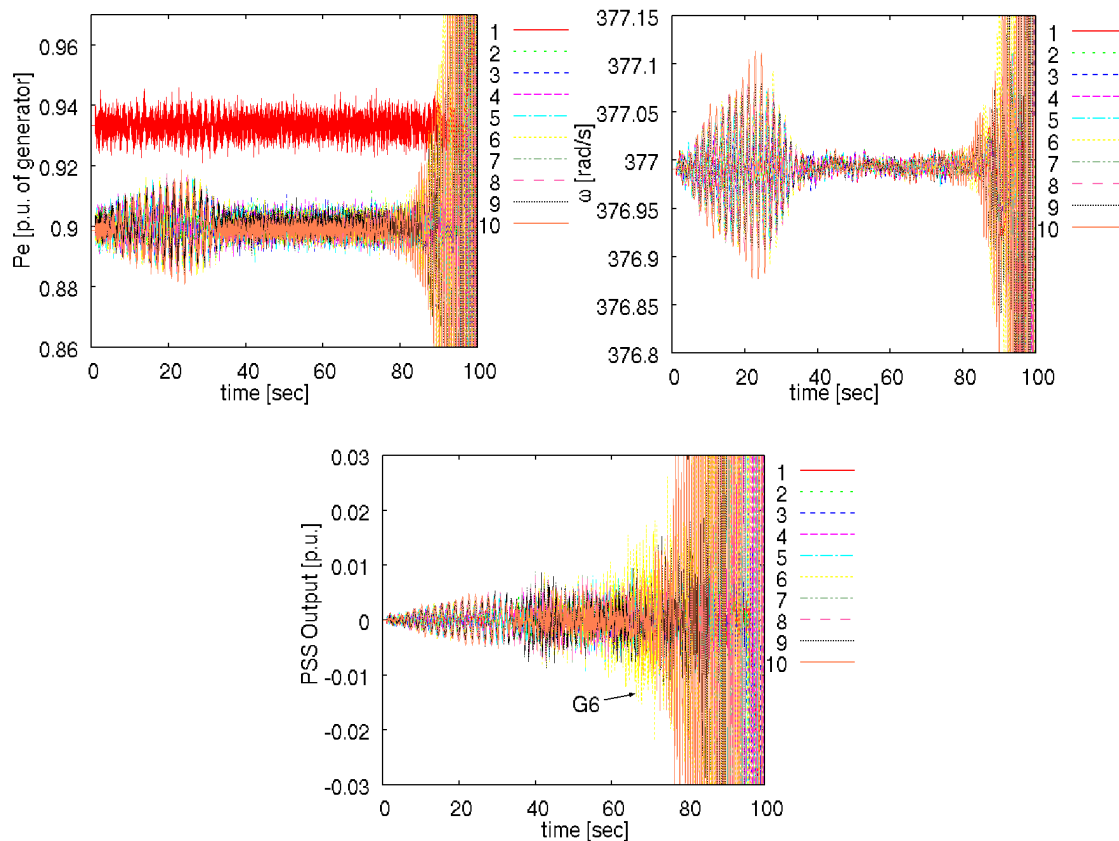


図 45：各発電機で得られた物理量

次に、各発電機のPSSパラメータの変化を、図46に示す。ゲイン $k8$ は、上昇した発電機と、それほど変化しなかった発電機に分かれた。位相補償は、70秒付近までは「進み・遅れともなし」となるように変化したが、その後は発電機1,2,3を除いて進み補償となり、

安定性の低下に結びついたようである。各発電機の 5 次モデルで算出された固有値を図 47 に示す。30 秒付近まで支配的だった虚部が 4 付近のモードに対して、40 秒付近までは追従している。その後は虚部が 1 程度と 6 程度のモードが交互に支配的となり、最後に虚部が 12 程度の短周期動揺が拡大して発散に至っている。頻繁に支配的な動揺周期が切り替わる状況では、支配的な動揺モードをとらえることは困難である。

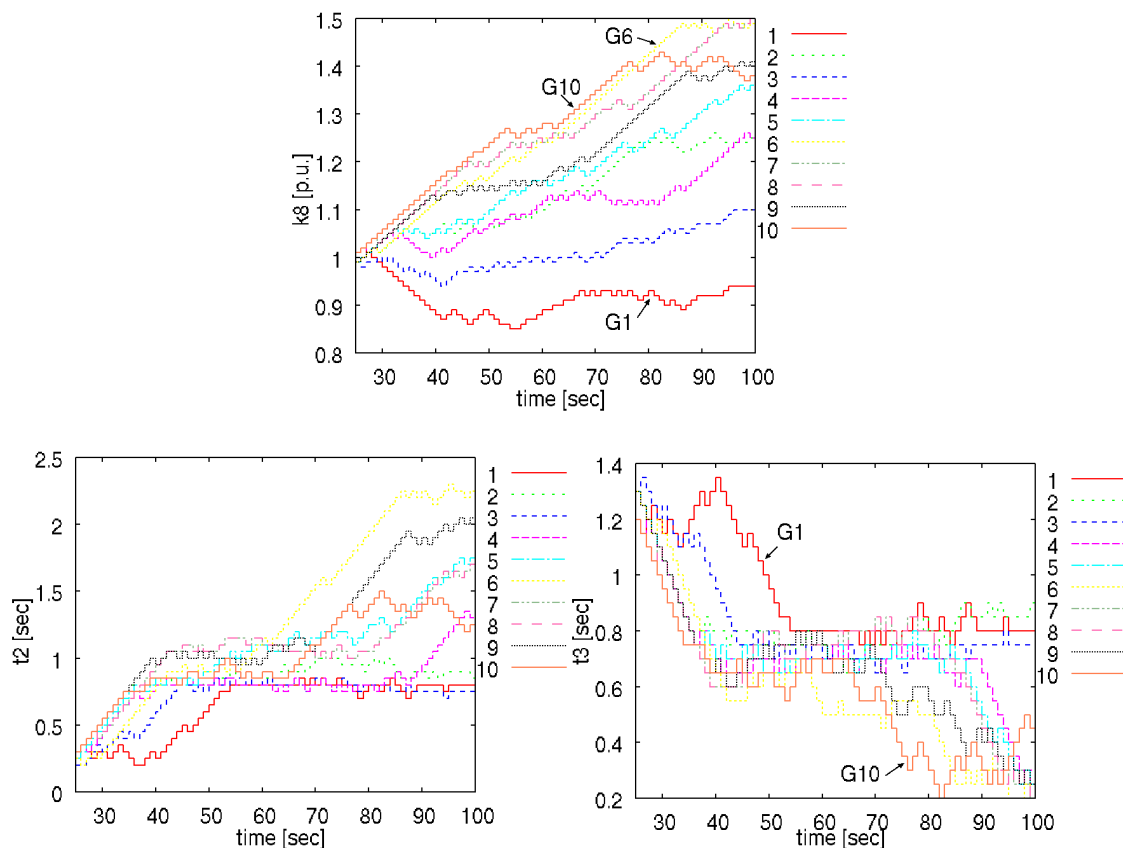


図 46 : 各発電機における PSS パラメータの推移

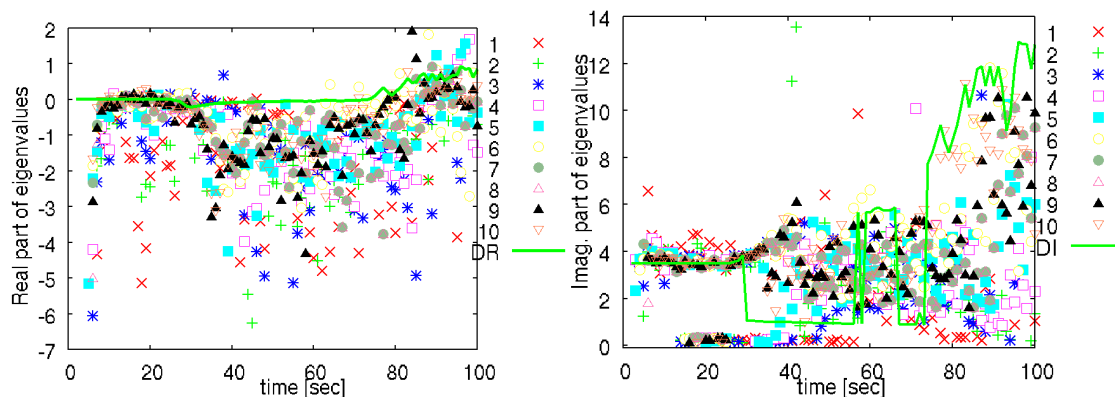


図 47 : 各発電機における 5 次モデルで得られた固有値と詳細モデルの支配的固有値

4.9.2. 各発電機の 5 次モデルを用いて線形計画法で設計する場合

次に、各発電機の 5 次モデルを用いて算出した固有値感度を利用して、線形計画法で各発電機の PSS パラメータを調整した。シミュレーション開始 25 秒の時点から、全ての発電機でパラメータ(k8, t2, t3)の値を、毎秒 1 回ずつ更新した。

各発電機の物理量を図 48 に示す。40 秒前後で電気出力と回転速度の動揺が消滅し、その後も不安定化せずにシミュレーションを終えている。図 49 に示した PSS パラメータの推移によると、パラメータは同定に用いた波形に動揺現象が見られたかどうかに関係なく変化を続けている。ゲインは単調に上昇を続け、位相補償はまず t2 と t3 の値が等しくなるまで変化し、次に両者の値を等しく保ったままで上下している。図 50 における各発電機の 5 次モデルから得た固有値からは、動揺現象が見られた間は、その動揺周期に対応する固有値を同定できていたことが分かる。動揺が収束した後は、実部・虚部ともに大きくばらついた状態が続いている。

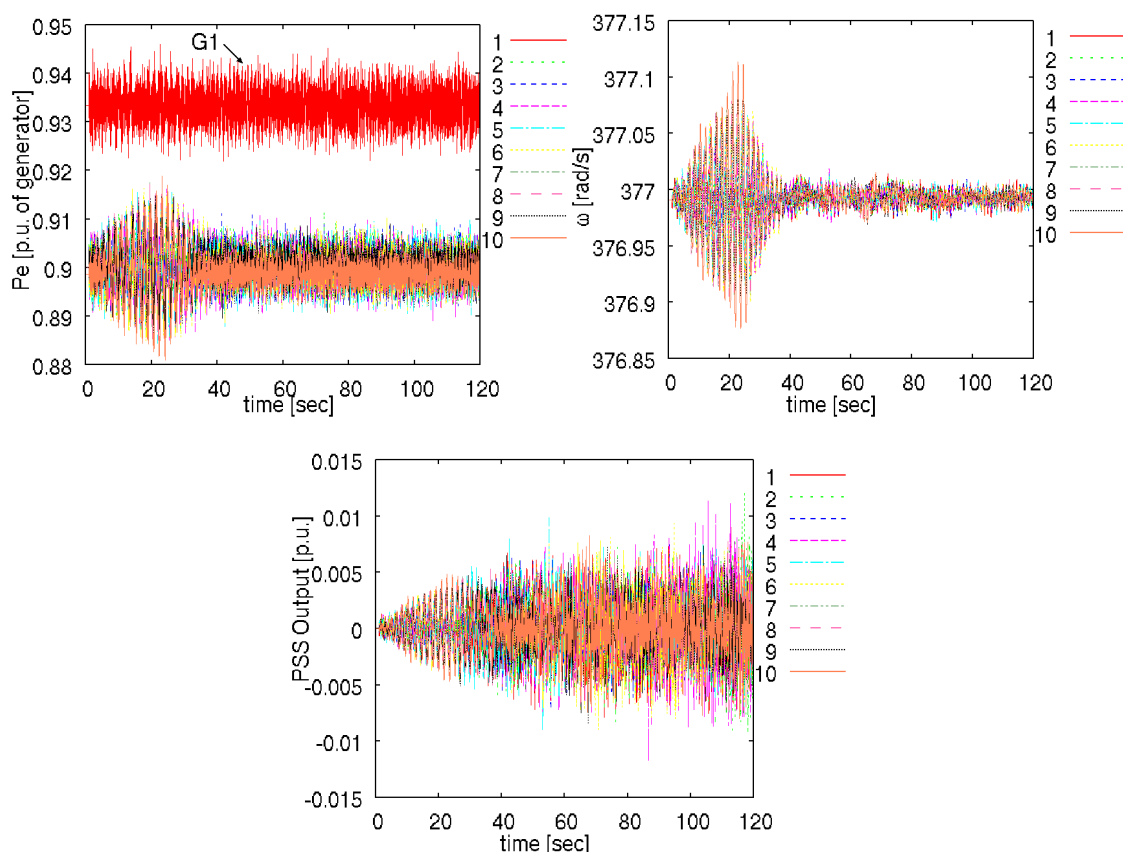


図 48：各発電機における電気出力・回転速度・PSS 出力

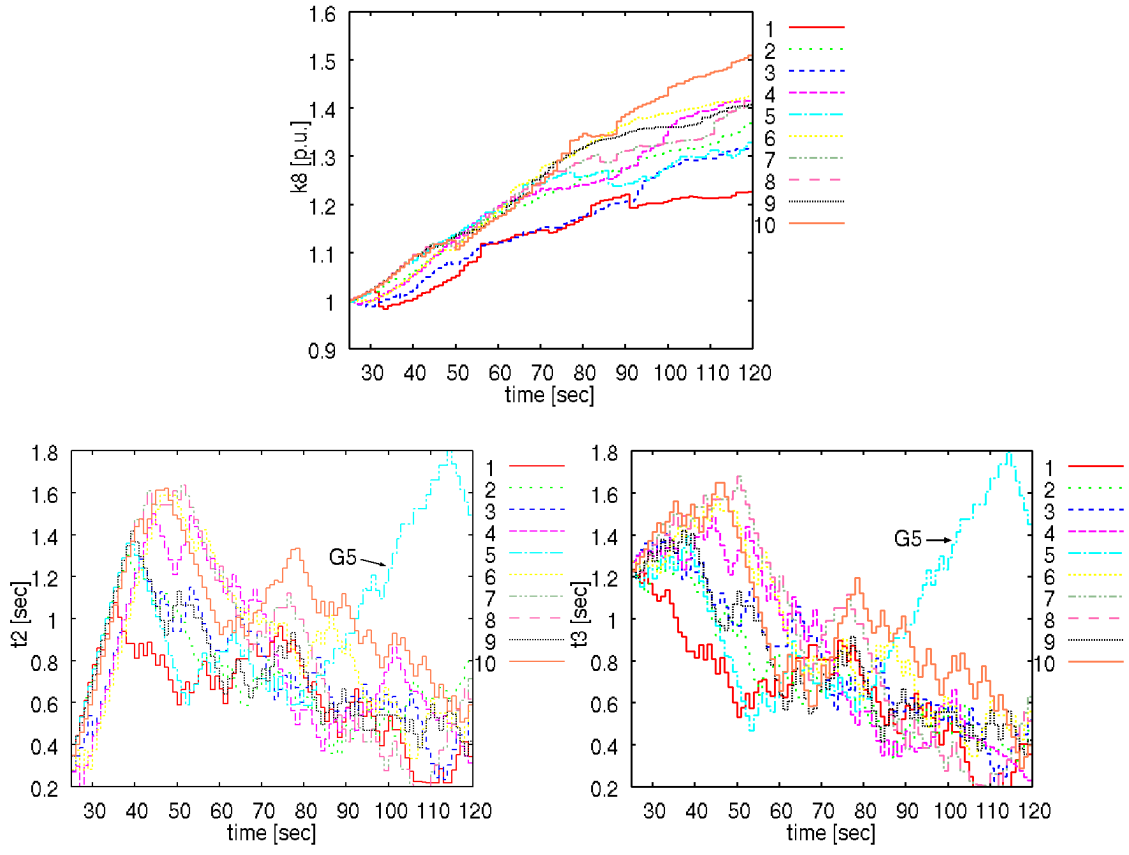


図 49 : 各発電機における PSS パラメータの変化

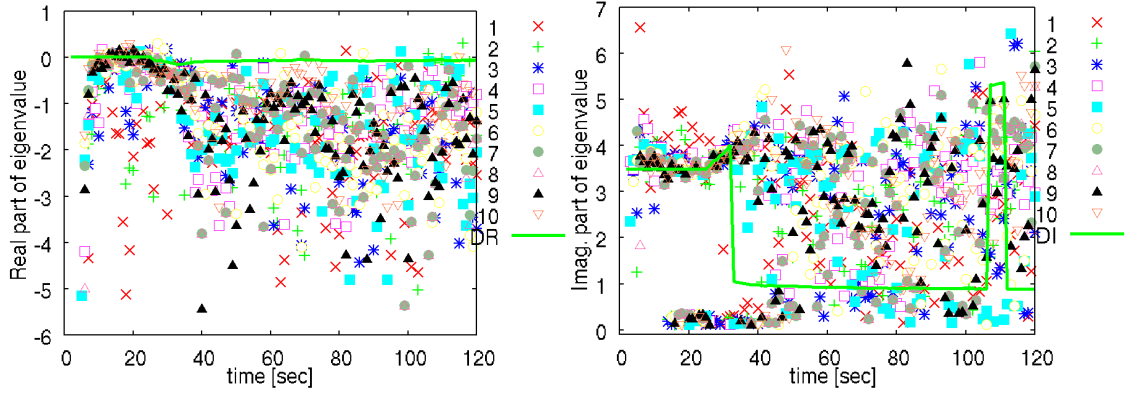
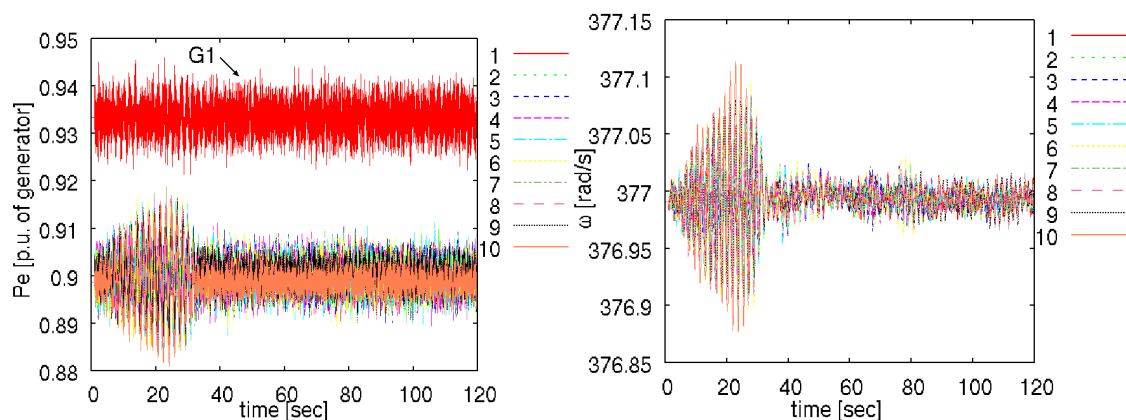


図 50 : 各発電機の 5 次モデルと詳細モデルにおける固有値の推移

4.9.3. 詳細モデルの固有値を直接利用して3分木法で設計する場合

次に、シミュレーションに用いている詳細なモデルから直接算出した支配的な固有値を、3分木法によるPSSのパラメータ設計に利用した場合について調べた。全ての発電機のPSSを、パラメータ設計の対象とした。この方法は、詳細なモデルが最初から分かっていることを前提にしているため、適応制御ではないが、線形モデルが電力システムの安定度を完全に把握できた場合における、理想的な設計の結果を得ることができる。

発電機の電気出力・回転子速度・PSSの出力を図51に示す。25秒のパラメータ操作開始後すぐに動揺現象が解消し、その後は負荷変動による変動だけが観測されている。線形計画法で適応制御を行った図48と比較的近い結果になっている。次に、PSSパラメータが変化の様子を図52に示す。ゲイン k_8 、位相補償 t_2 、 t_3 ともに、発電機ごとにまちまちの変化をしている。位相補償は、全体としては遅れの状態を保ちながら、発電機G10などにおいては補償量を下げないように変化している。値が必ずしも収束的ではなく、上下を繰り返すパラメータも多い。1台だけを設計したときには、理想的な解や局所解に収束しやすかったものの、10機を同時に設計する場合は、独立に操作する変数が30と多いため、30の変数全てが収束するような解を見つけることが難しくなったと考えられる。詳細なモデルから直接算出した固有値を図53に示す。実部を見ると、速やかに安定化したのち、やや上下を続けていることが分かる。虚部を見ると、いくつかの周期を持つ固有値が頻繁に入れ替わっていることが分かる。120ある固有値の中で、最も不安定なもの(実部が大きいもの)の実部を最小化することを目指すすと、実部がほぼ同じとなるもう一つのモードとのトレードオフが発生したところで収束することになる。このような状況では、複数の動揺周期が同時に存在するため、見た目に分かりにくい動揺波形が発生しやすく、次数が限られた低次モデルでの同定は、そう簡単ではないと考えられる。ただし、今回のシミュレーションでは、どの固有値も安定な領域にあるため、動揺はほとんど発生していない。



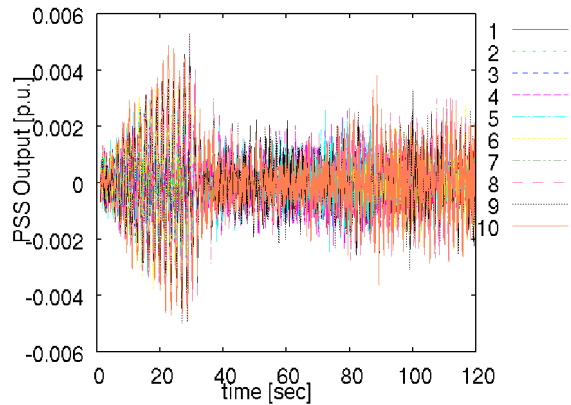


図 51：理想的な設計を仮定した場合の各発電機の電気出力・回転速度・PSS 出力

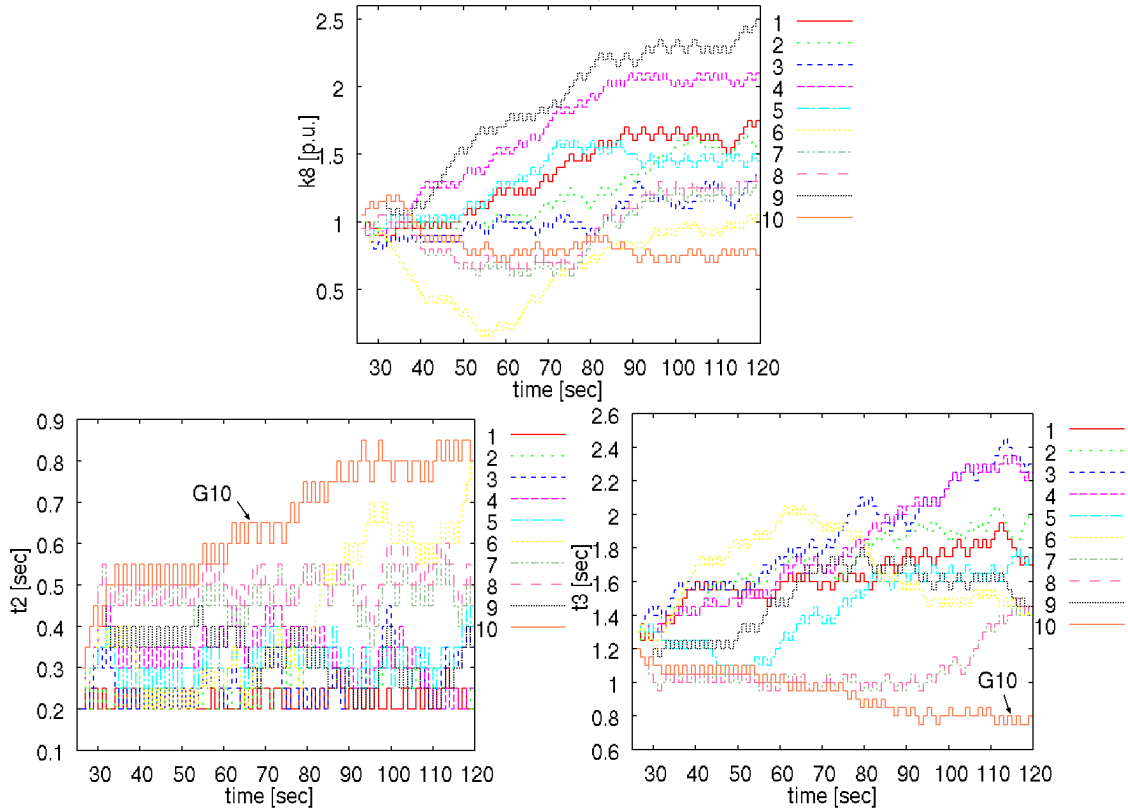


図 52：理想的な設計を仮定した場合の各発電機の PSS パラメータの推移

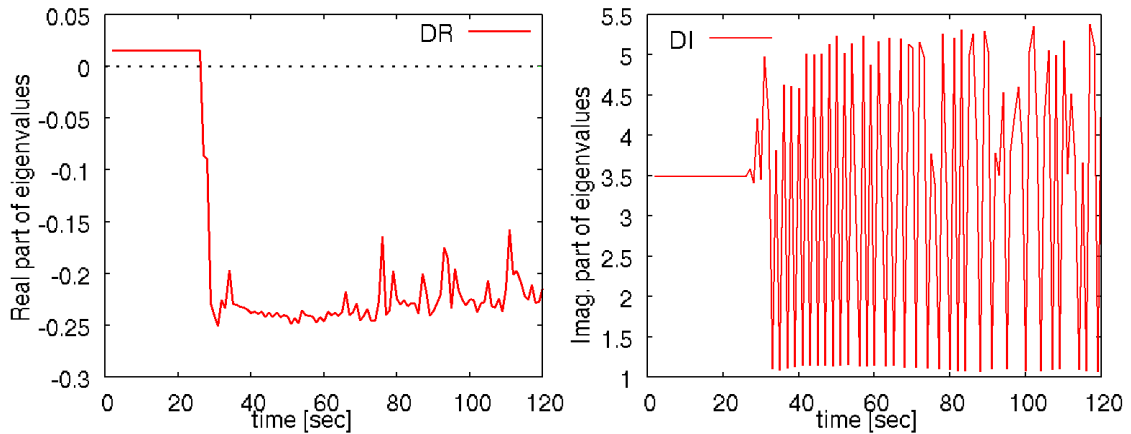


図 53：理想的な設計を仮定した場合の詳細モデルで算出した支配的固有値

4.10. 再度不安定化したときの詳細

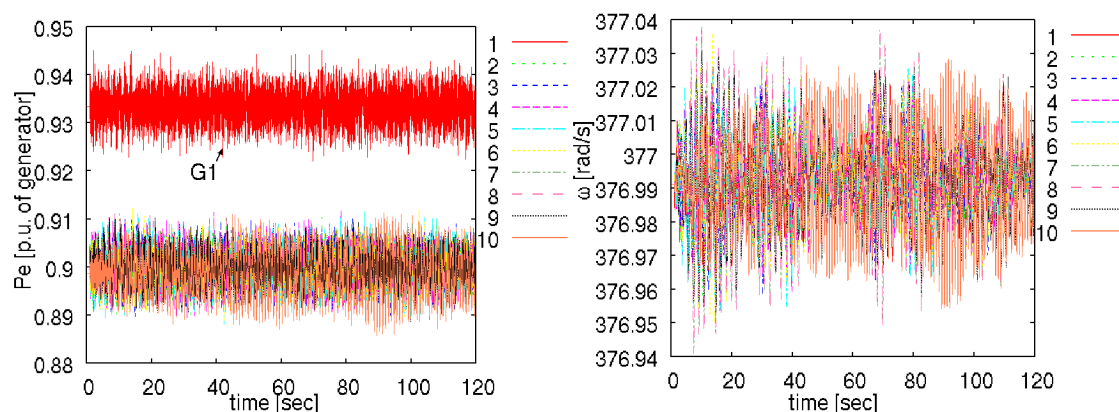
PSS のパラメータを更新した場合に、シミュレーション開始数十秒後に、動揺現象が再度発生して、不安定化する事例がみられた。本来、パラメータの設計を継続していれば、不安定化したときに動揺が観測され、再度安定化されることが期待されるが、実際には安定度が急激に悪化して発散している。再度不安定になるときは、シミュレーション開始時の安定限界付近だった状況と比べ、動揺の周期が短いという特徴がある。短周期の動揺現象が支配的となる状況を再現し、同定とパラメータ設計を行うことで、動揺の性質が固有値として反映されるか、およびパラメータ設計による安定化が可能かについて調べた。

4.10.1. 1機の発電機だけを不安定化させる場合

まず、発電機 G10 の PSS パラメータを $(k_8, t_2, t_3)=(1.8, 1.2, 0.8)$ とすることで系統全体を不安定とし、詳細なモデルから直接計算した支配的な固有値を $+0.104 \pm j6.96$ (動揺周期は 0.903 秒) とした。4.8 節において、発電機 1 台だけでパラメータを設計し、不安定化が始まった時点の状態を模擬している。

4.10.1.1. PSS パラメータを固定し同定を行う場合

この状態で PSS のパラメータを固定し、各発電機の低次線形モデルで同定を行った。各発電機の物理量を図 54 に示す。また、一部を拡大して図 55 に示す。発電機 G10 だけが、およそ 1 秒弱の周期を持って、大きく動揺している。一方で、他の発電機の物理量は、これまでのシミュレーション開始時点と同じように、およそ 2 秒の周期で動揺している。



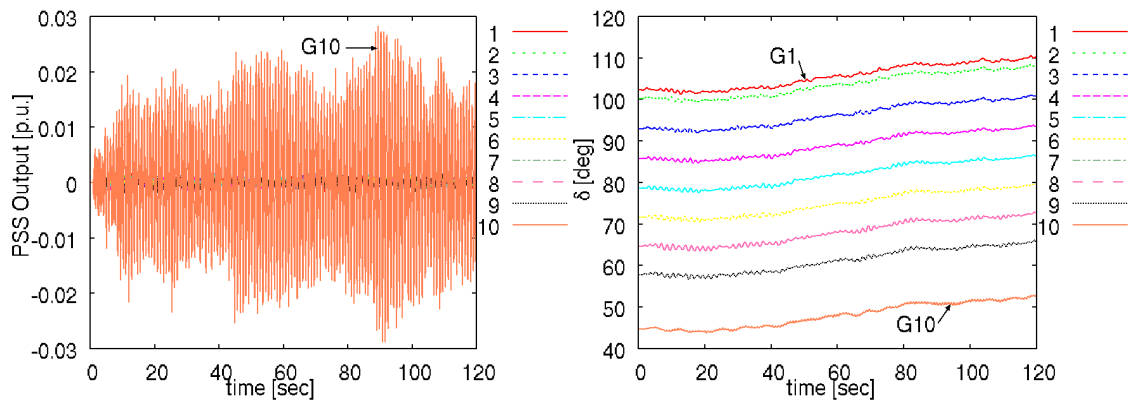


図 54 : 各発電機における物理量

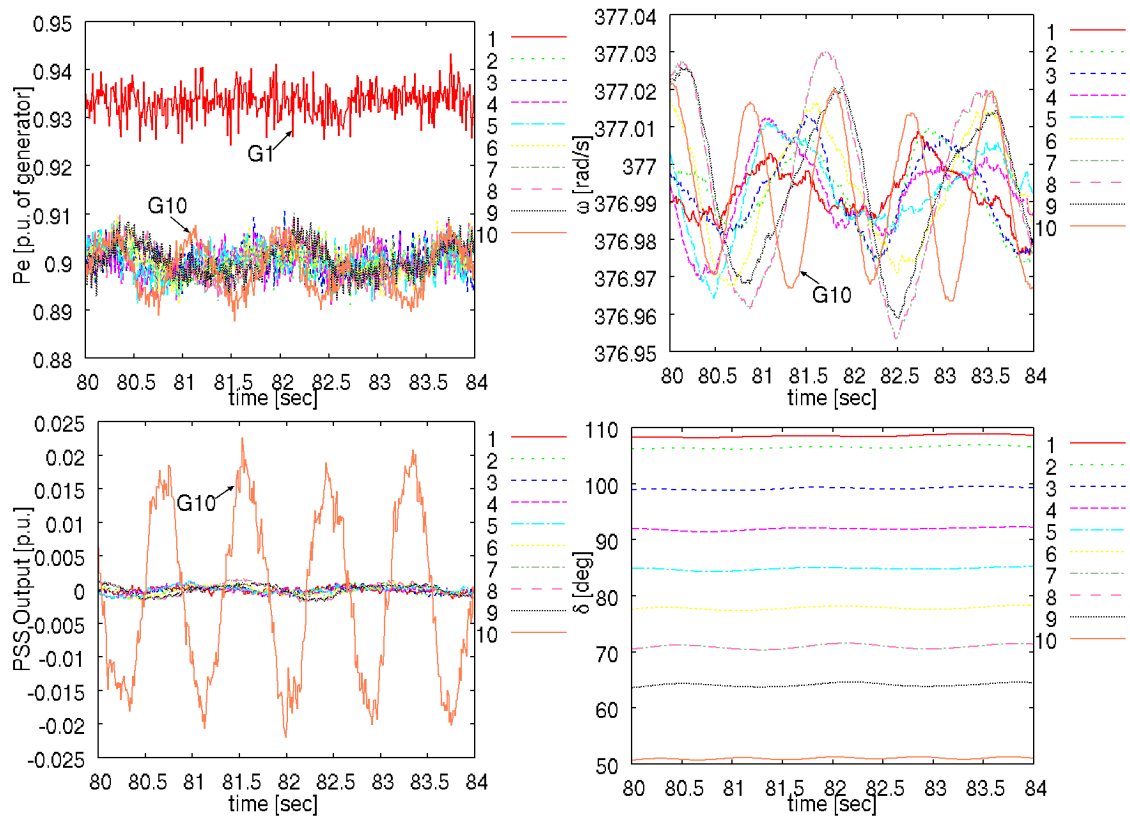


図 55 : 時刻 80 秒付近における各発電機の物理量

次に、各発電機の低次線形モデル(5次モデル)で算出した固有値を図 56 に示す。実部は、最も強く振動した発電機 G10 が、他の発電機と比べ、詳細モデルから算出した値に近くなっている。虚部は、動揺周期が 2 種類に分かれたにもかかわらず、発電機ごとの違いはほとんど見られない。また、支配的な動揺周期が 1 秒弱である発電機 10 では、虚部が 4 付近となり、本来の 7 から大きく離れている。一方で図 27 と比べれば、虚部の値はわずかに高くなっており、動揺周期が短くなったことを反映している。後に出てくる 5.4.1.5 節に示す 2 次のモデルを用いて同定を行うと、図 57 に示す結果を得る。こちらは、発電機ごとの動

揺周期を正確に反映した結果となっている。ただし、2次モデルは、パラメータ設計に直接
用いることができない。

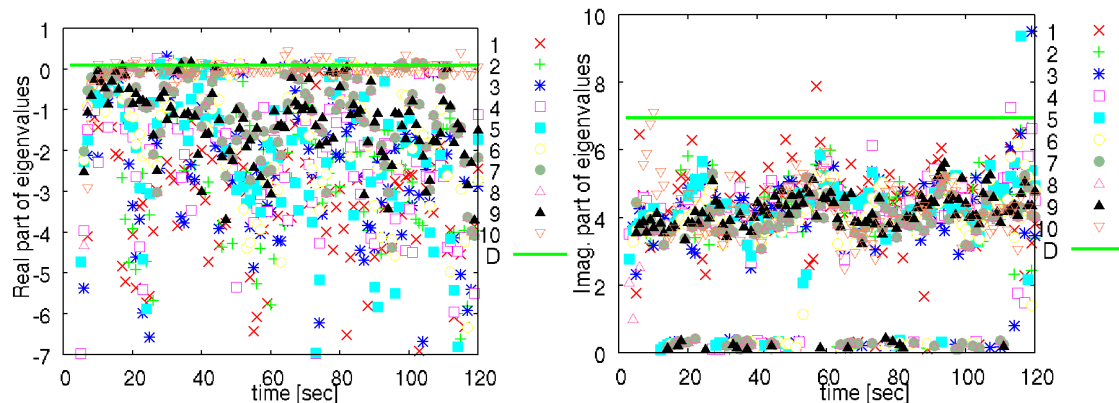


図 56 : 各発電機に設定した 5 次モデルによる同定から得られた固有値

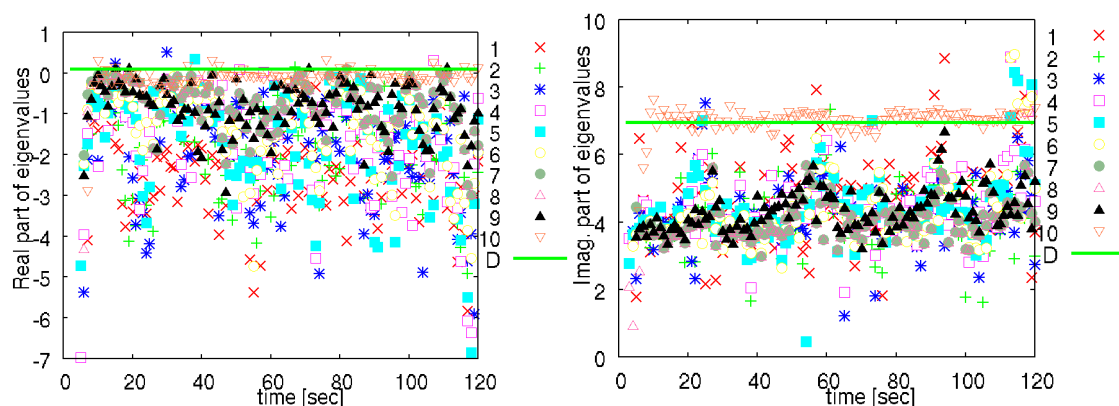


図 57 : 各発電機の 2 次モデルによる同定から得られた固有値

4.10.1.2. 3 分木法でパラメータを更新する場合

次に、発電機 G10 だけを対象に、オンラインで 3 分木法によるパラメータ設計を行う場合について調べた。25 秒の時点からパラメータの更新を可能とした。発電機の各物理量を図 58 に、PSS のパラメータを図 59 に、オンラインパラメータ設計に用いた低次モデル(5 次)で得られた固有値を図 60 に、それぞれ示す。すぐに安定度が失われ、動揺が拡大して発散した。安定性が一方的に低下する特徴がある。同定により得た固有値は、不安定化が顕著になってからは、発電機 G10 では実部・虚部とも、本来の動揺モードへ近づいていくが、その間も PSS のパラメータは、安定度を低下させる方向に変化を続けている。2 次の線形モデルで同定を行った結果を参考までに図 61 に示す。発電機 G10 は、実部・虚部ともに 35 秒付近までは、詳細なモデルから直接算出した固有値に近い値を持ち、動揺現象を

正しく把握している。その後は波形が著しく非線形になったためか、精度が低下している。

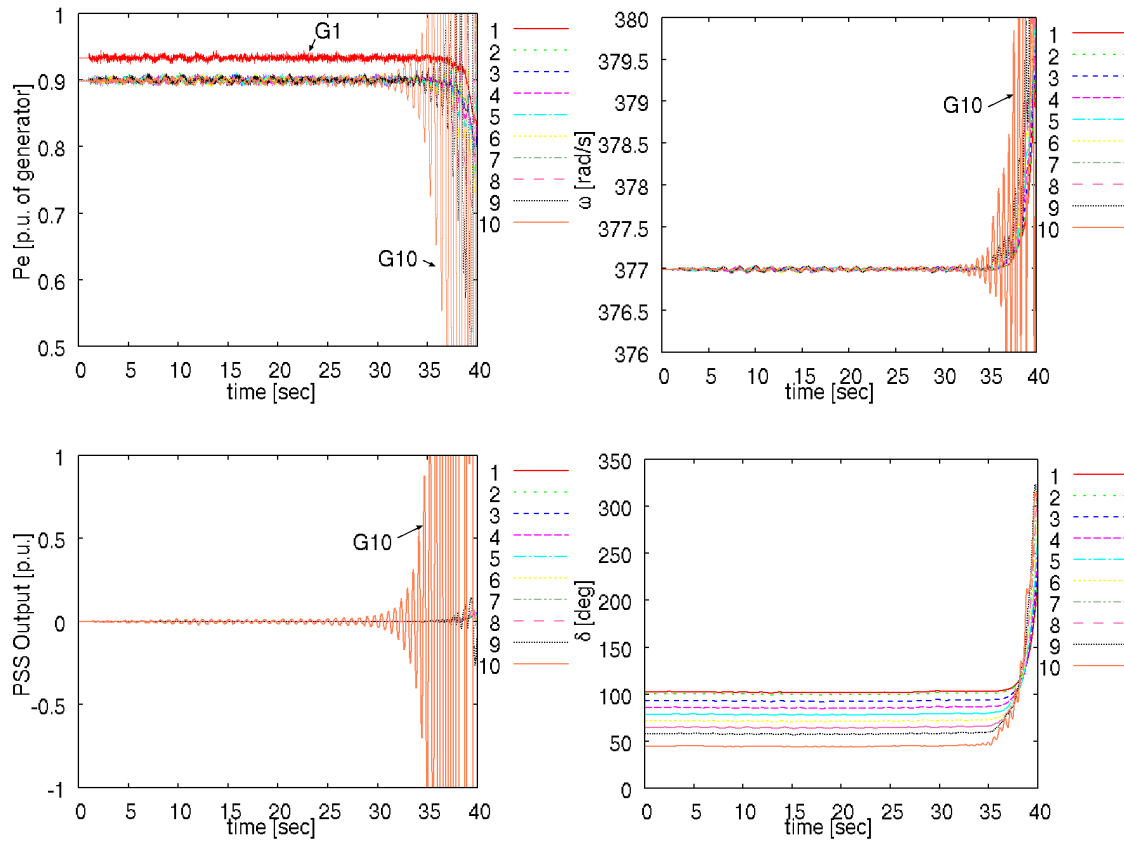


図 58 : 各発電機における物理量

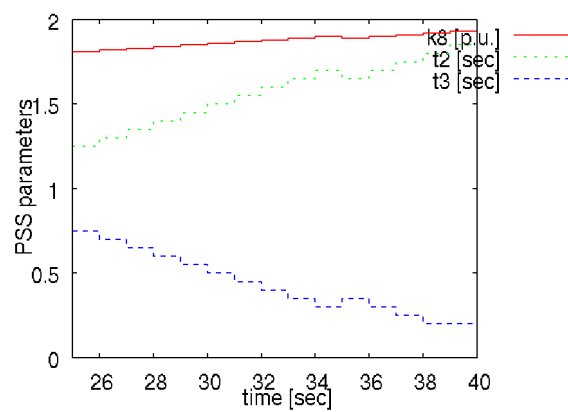


図 59 : 発電機 G10 における P S S パラメータの推移

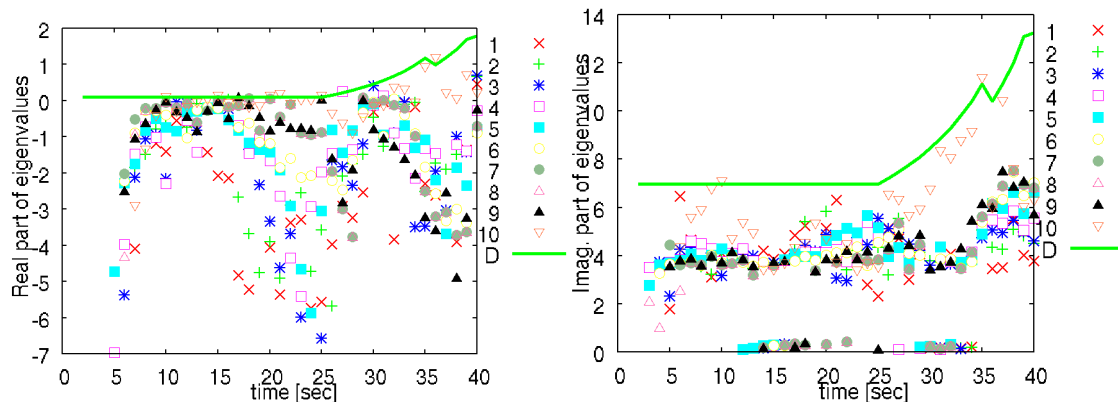


図 60：オンラインパラメータ設計に用いた 5 次モデルから得られた固有値

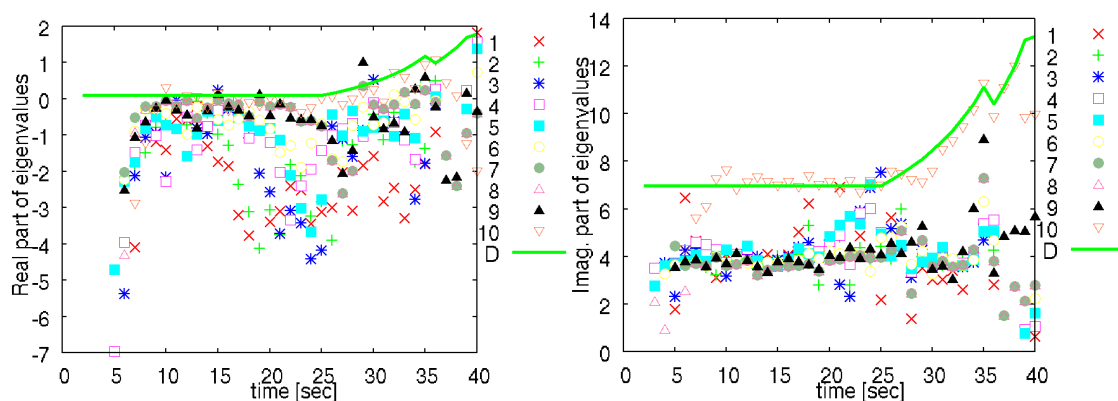


図 61：同定専用の 2 次モデルから得られた固有値

4.10.1.3. 線形計画法でパラメータを更新する場合

前節と同じ初期条件で、シミュレーション開始 25 秒の時点から、線形計画法を用いてオンラインパラメータ設計を行った。各発電機における物理量を図 62 に、設計対象とした発電機 G10 における PSS パラメータの推移を図 63 に、固有値制御に用いた低次モデル(5 次)で得られた固有値を図 64 に、それぞれ示す。動揺波形を見る限りでは、一方的に不安定化して発散しているようである。位相補償パラメータが t_2 , t_3 ともに低下するが、進み補償を続けながら、システムを不安定化させている。参考までに、2 次のモデルで同定して得た固有値を図 65 に示す。40 秒付近までは、拡大傾向にある動揺現象の性質を正しくとらえている。

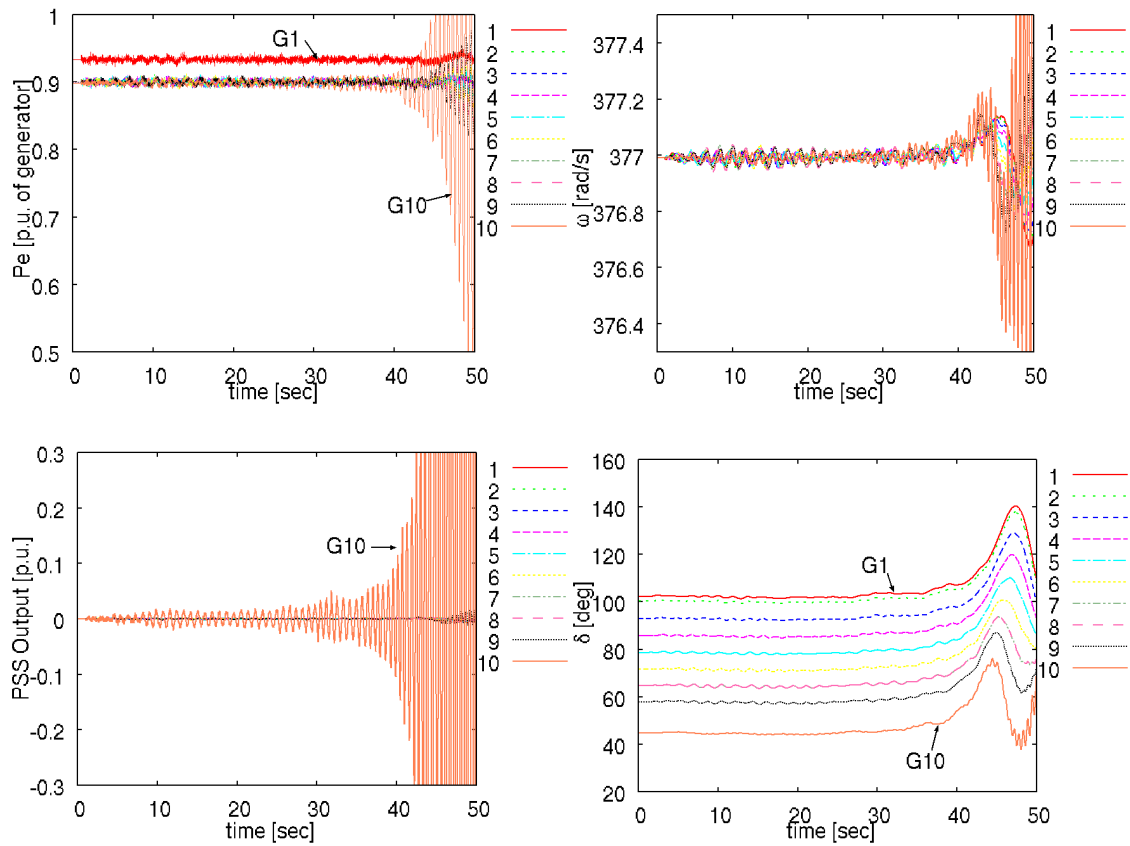


図 62 : 各発電機端における物理量

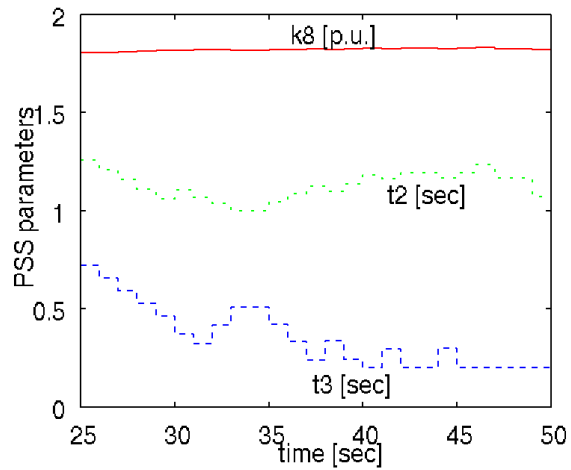


図 63 : 発電機 G10 における P S S パラメータの推移

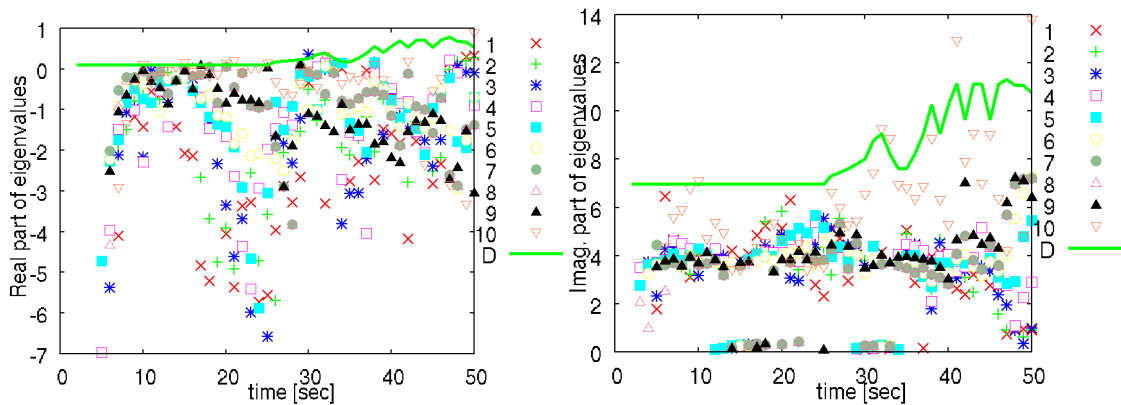


図 64：各発電機に設定した 5 次モデルで算出された固有値

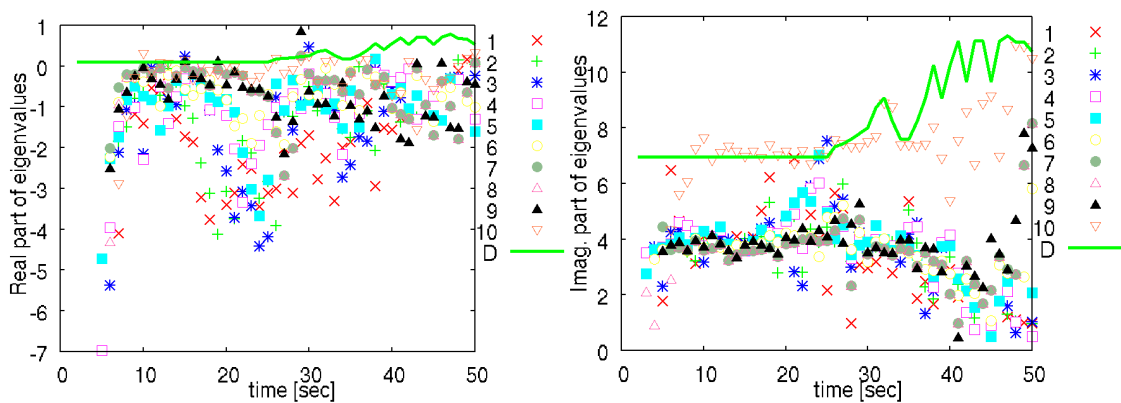


図 65：同定専用の 2 次モデルを用いて算出された固有値

4.10.1.4. 詳細モデルから算出した固有値を直接利用してパラメータを更新する場合

次に、不安定な状態から、発電機 G10 に対して、理想的なパラメータ設計が行われた場合について調べた。詳細なモデルから直接算出した固有値を用いて、最も不安定な固有値の実部が改善する方向に、PSS のパラメータを移動させる 3 分木法のアルゴリズムで、個々のパラメータを操作した。オンラインでの適応制御ではないので、毎秒少しずつパラメータを変える必要はないが、比較のためシミュレーション開始 25 秒の時点から、オンライン設計の 3 分木法で設定した幅と同じだけ、パラメータを毎秒移動させる流れでシミュレーションを行った。各発電機で得られた物理量を図 66 に示す。発電機 G10 の PSS 出力が、パラメータの変更を行ってからは小さくなっている。発電機 G10 の PSS パラメータを図 67 に示す。位相補償を遅れとすることで、周期の短い動揺を微分的に強く出す動作が改められ、系統全体が安定化されている。各発電機の 5 次モデルと 2 次モデルで同定を行って得られた固有値を、図 68 と図 69 に示す。5 次モデルは、必ずしも動揺周期を反映していな

いが、2次モデルの発電機 G10 では、詳細モデルにおいて支配的な固有値をたどっている。

このような結果から、PSS の位相補償パラメータを「遅れ」に変更すれば系統全体が安定化するものの、適応制御ではそれができていないことが分かった。

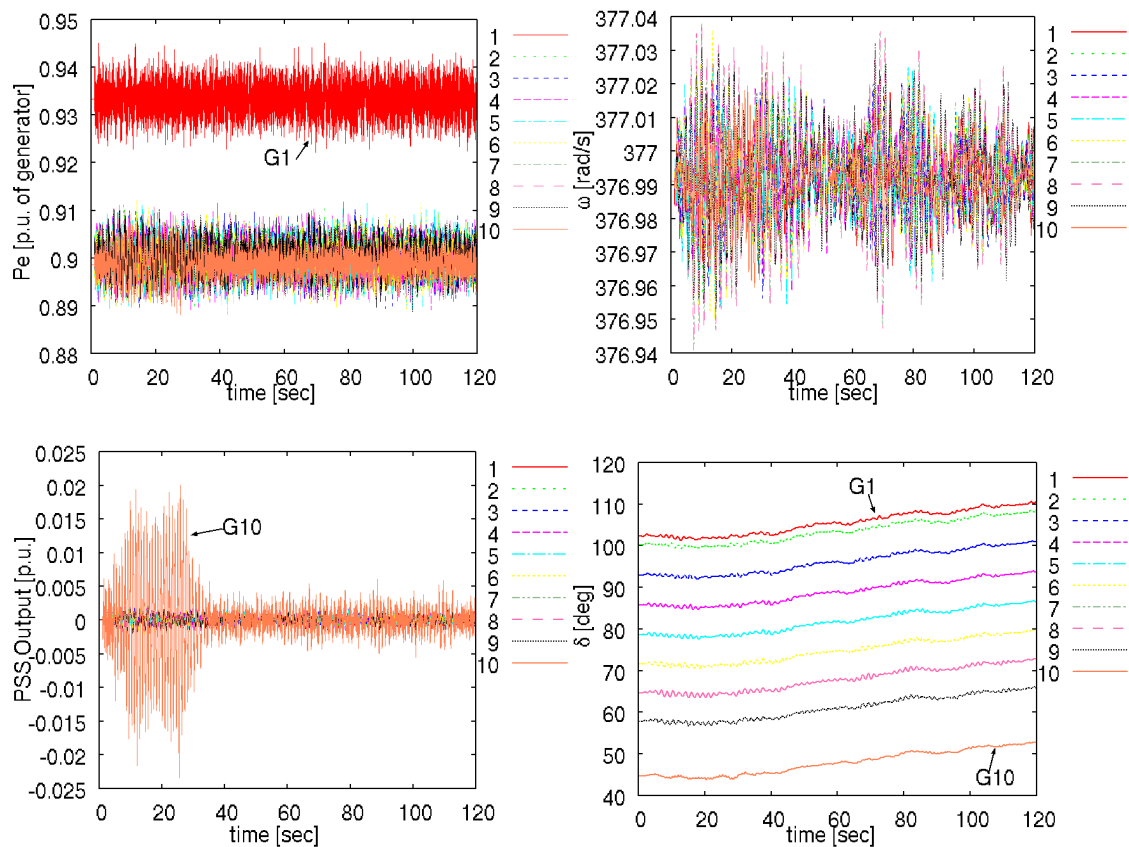


図 66：各発電機における物理量

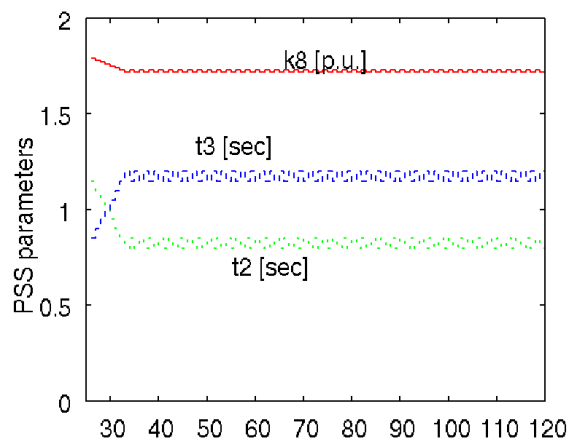


図 67：発電機 G10 における PSS パラメータの推移

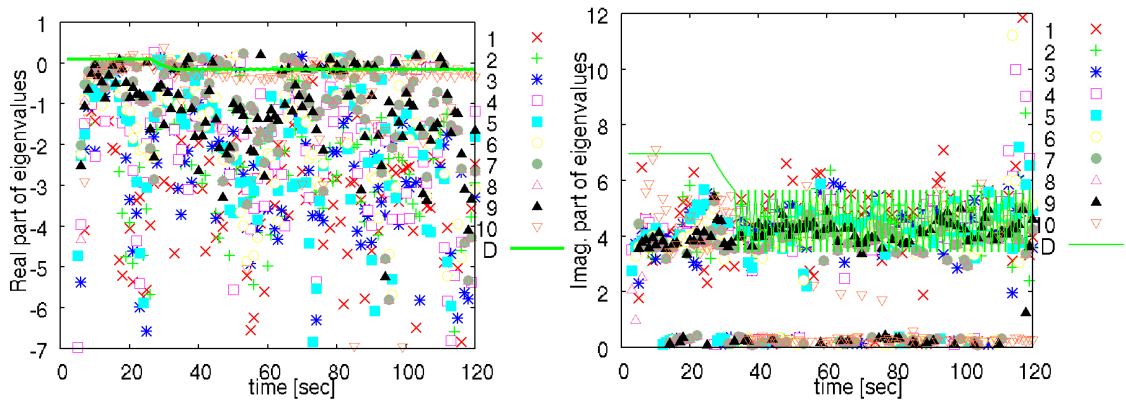


図 68 : 各発電機の低次モデル(5次)から得た固有値(参考)

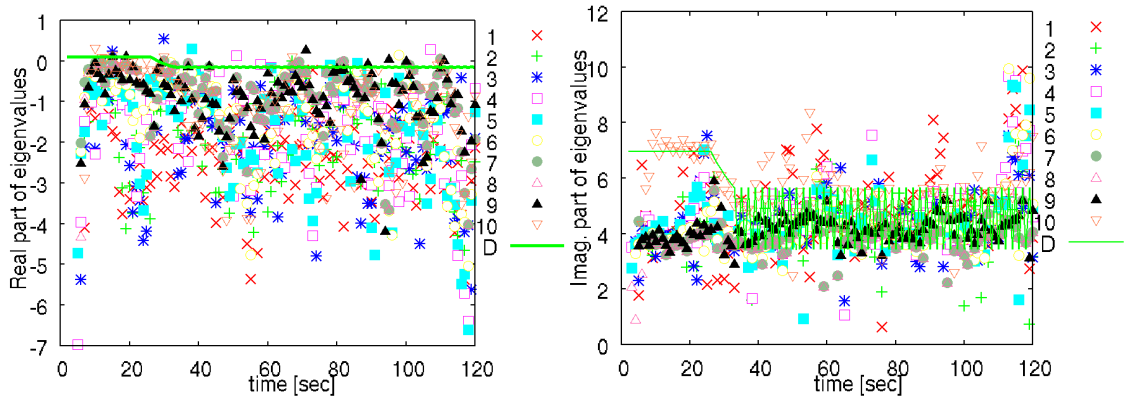


図 69 : 同定専用の2次モデルで得られた固有値(参考)

PSS パラメータの更新を開始する直前にあたるシミュレーション開始 25 秒の時点において、発電機 G10 の PSS パラメータと、支配的固有値実部との関係を調べた。詳細なモデルから直接求めた固有値実部と、発電機 G10 の 5 次モデルから求めた固有値実部について、図 70 に示す。パラメータが $(k_8, t_2) = (1.8, 1.2)$ の点について見ると、詳細モデルでは k_8, t_2 とも下げた方が安定化するが、5 次モデルからはゲインを上げ続けたほうが安定化するような形が出ており、食い違っている。このため、詳細モデルから G10 の PSS パラメータを直接設計すれば安定化するが、5 次モデルから設計すると不安定化するのである。

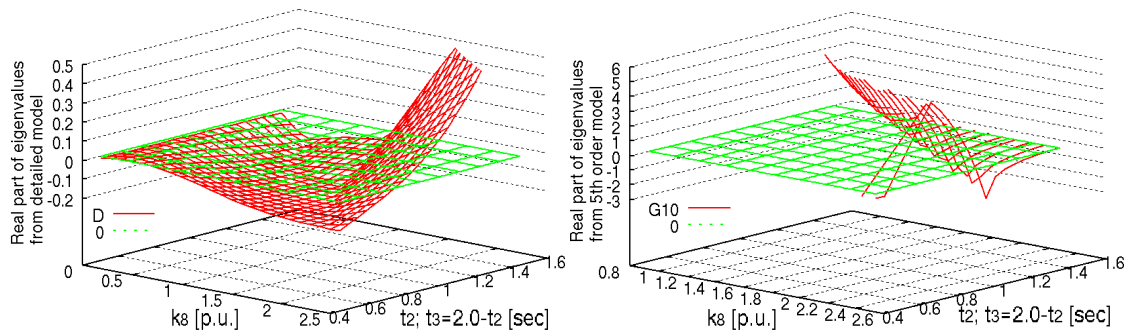


図 70 : 25 秒における発電機 G10 の PSS パラメータと支配的固有値実部との関係

4.10.2. 10機の発電機のパラメータ全てを変更して不安定化させる場合

次に、10機全てのPSSパラメータを設計して不安定化した事例を模擬するために、全ての発電機のPSSパラメータを変更した。ゲインが上昇、位相補償が進み方向に変化する傾向があったため、全ての発電機のパラメータを $(k_8, t_2, t_3)=(1.6, 1.1, 0.9)$ とした。詳細なモデルから直接算出した支配的な固有値は、 $+0.0911 \pm j5.85$ (動揺周期は1.07秒)である。

4.10.2.1. 波形の同定だけを行う場合

まず、PSSのパラメータを固定して、長時間同定を行った。各発電機から得られた物理量を図71に示す。一部を拡大した図72からは、全ての発電機が同じ1秒周期で動揺していることが分かる。各発電機に設置した5次の線形モデルによる同定から算出された固有値を図73に示す。虚部については、本来の6付近ではなく、4付近に集中している。2次のモデルを用いて同定を行うと、図74に示す固有値が得られた。詳細なモデルから直接算出した支配的な固有値と、ほぼ同じ値を示している。

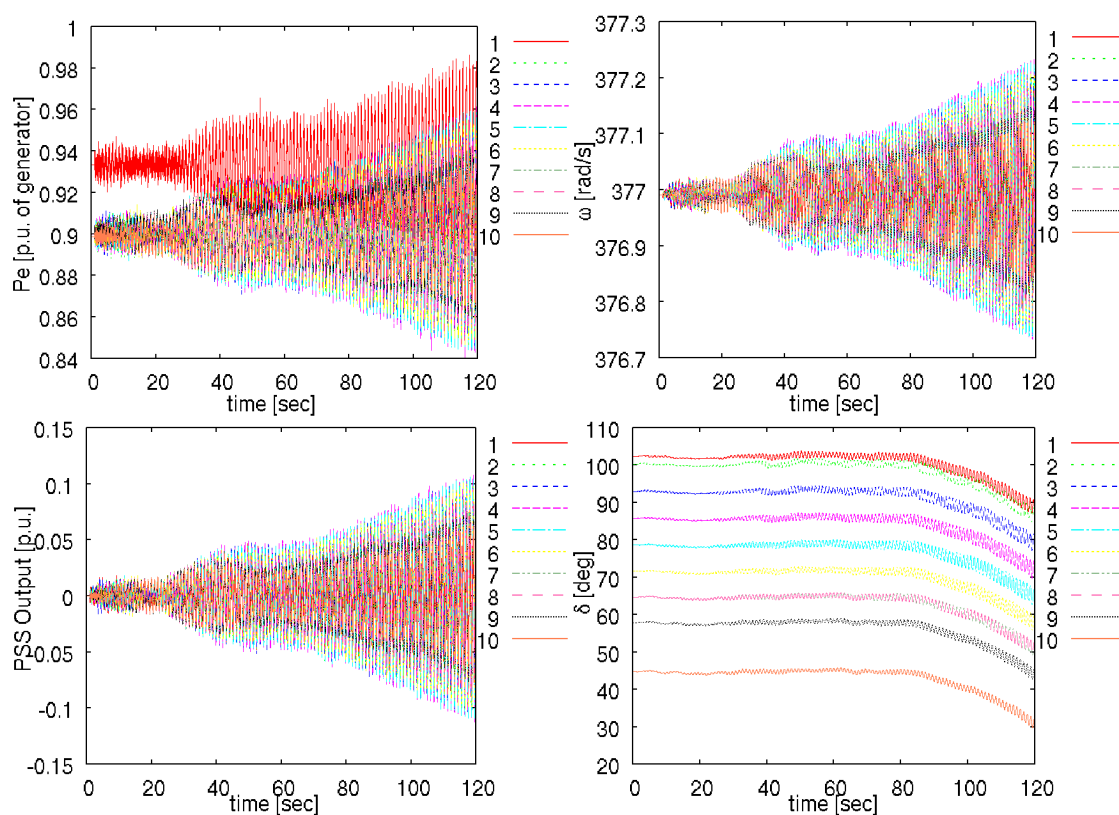


図 71：各発電機端子における物理量

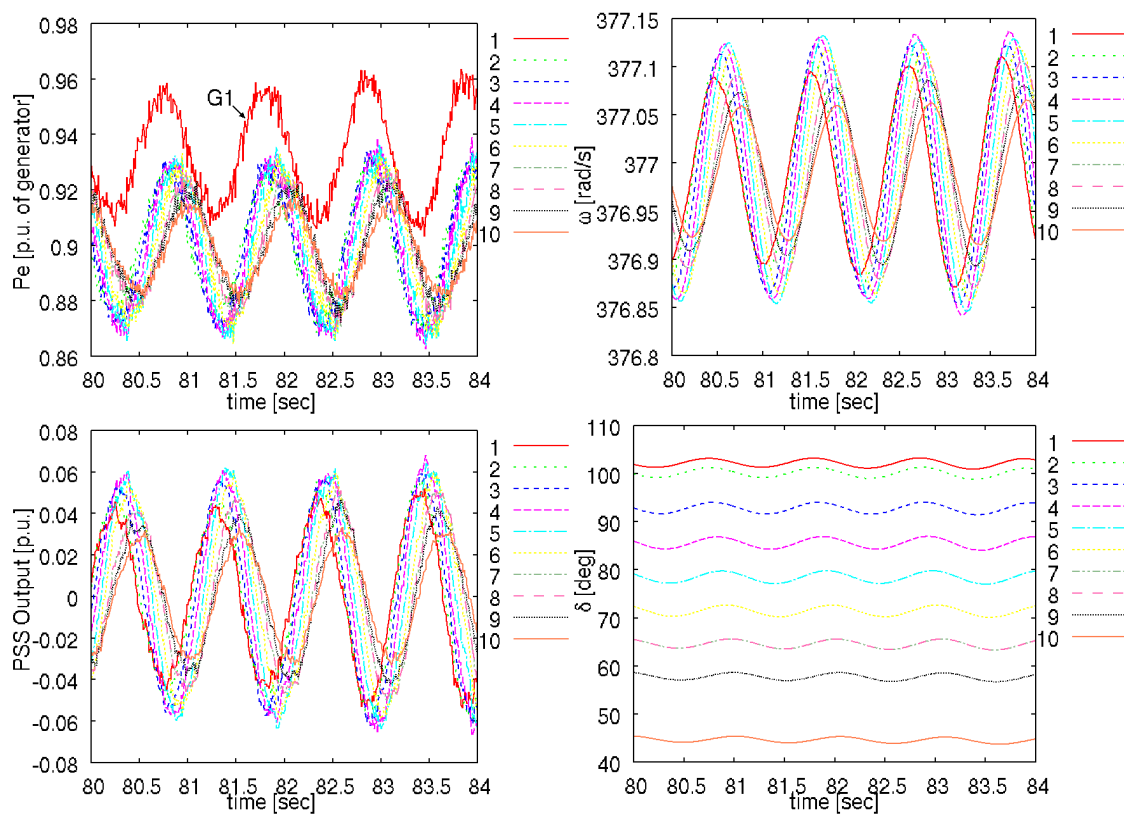


図 72：各発電機端子における物理量を 80 秒付近で拡大したもの

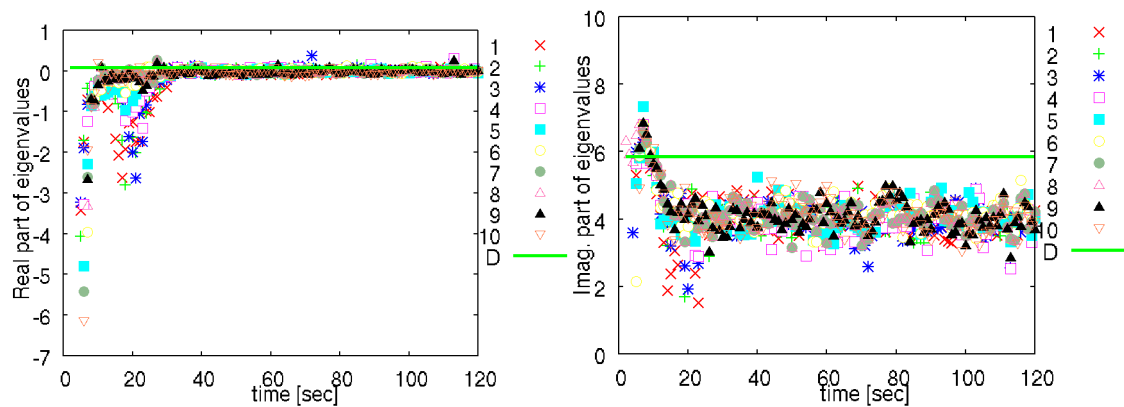


図 73：同定に利用する 5 次の線形モデルから得られた固有値

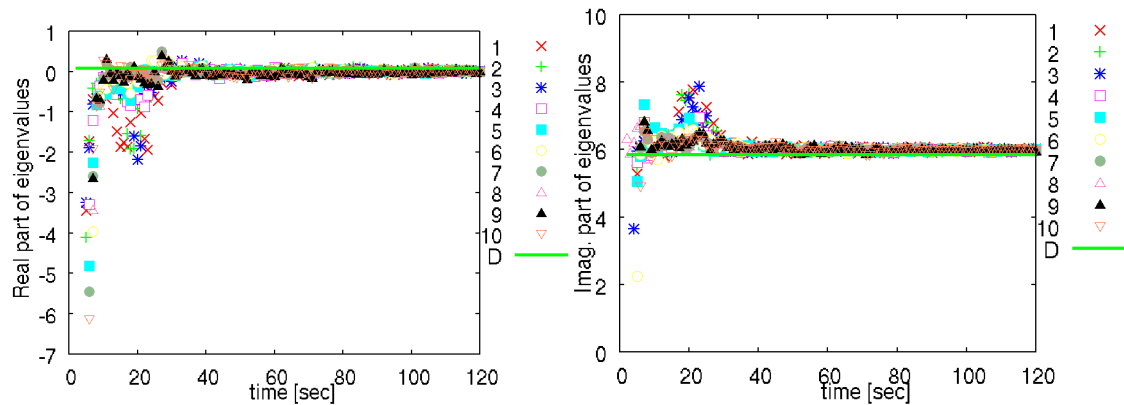


図 74：同定に用いる 2 次の線形モデルから得られた固有値

4.10.2.2. 3分木法でパラメータを更新する場合

次に、各発電機で3分木法を用いてオンラインパラメータ設計を行った場合について調べた。シミュレーション開始25秒の時点からパラメータの更新を開始し、以後毎秒1回ずつ更新を続けた。各発電機における物理量を図75に示す。およそ40秒で発散している。図76に示すPSSパラメータによると、ゲインは全て上昇、位相補償は全て補償を最大限進める方向に動いている。各発電機で同定された固有値を、オンライン設計に利用した5次モデルについては図77、2次モデルについては図78に、それぞれ示す。どちらのモデルで同定した場合でも、詳細モデルから算出した最も支配的な固有値に追従する。動揺振幅が小さいうちは、2次モデルで同定した場合のほうが、虚部において動揺周期をより正しくとらえている。

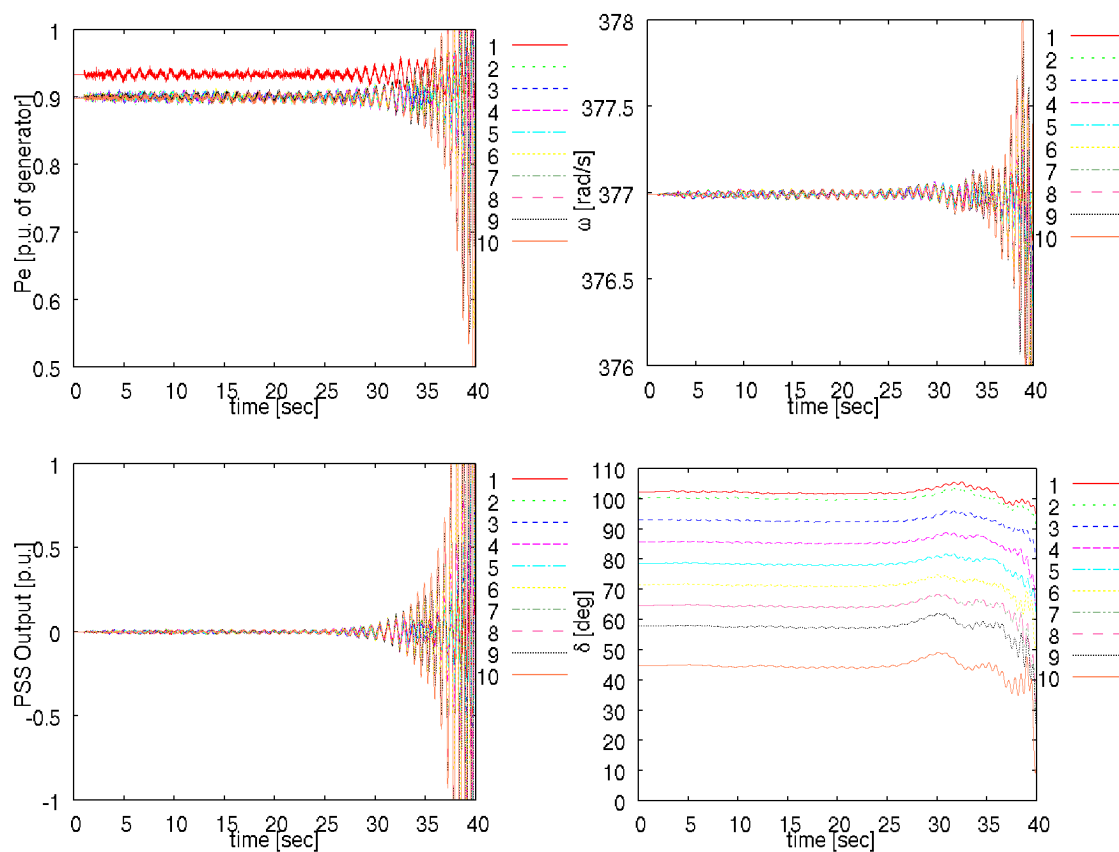


図 75 : 各発電機の端子で得られた物理量

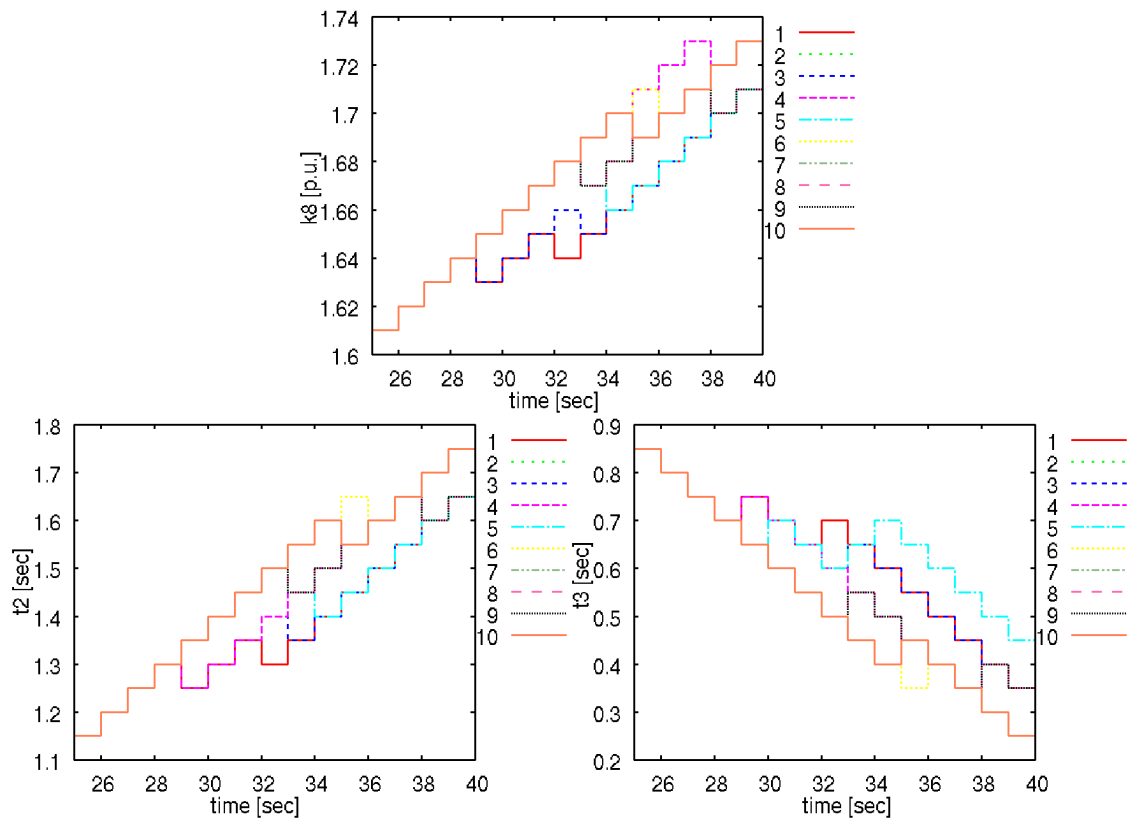


図 76 : 各発電機における PSS パラメータの推移

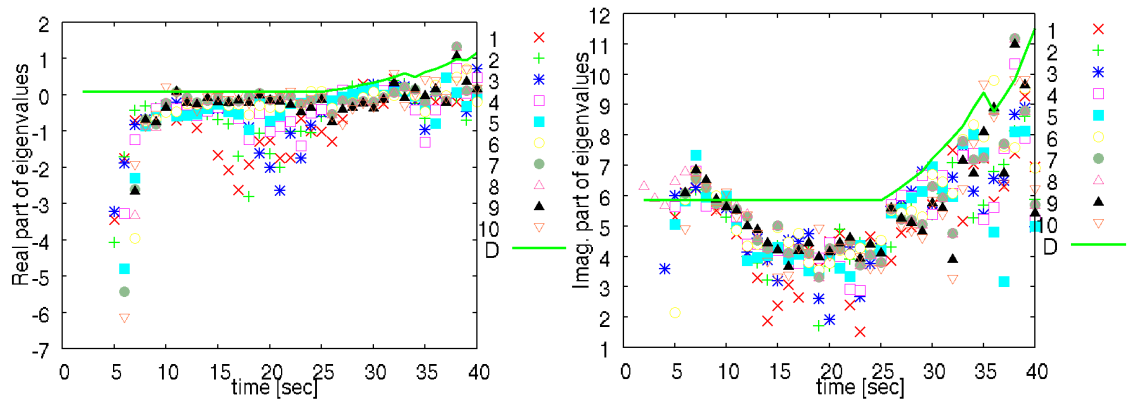


図 77 : 各発電機に置いた 5 次モデルから算出された固有値

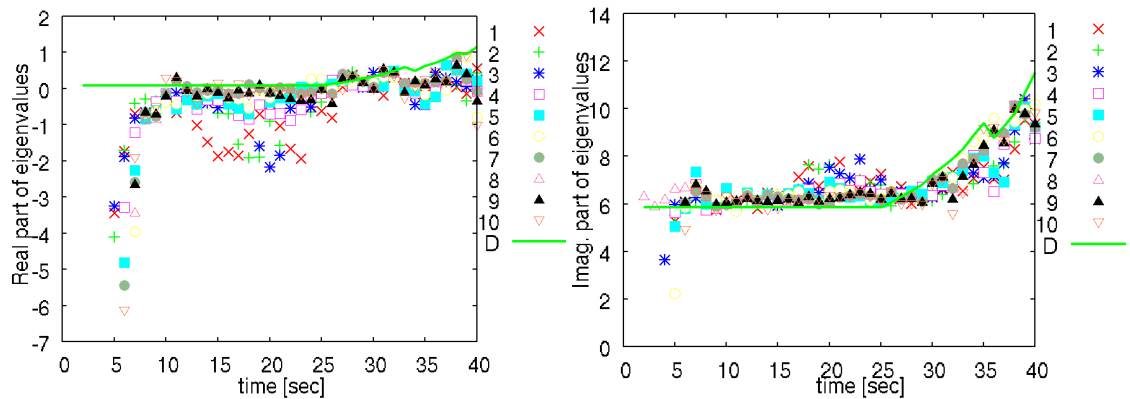


図 78 : 各発電機の 2 次モデルから算出された固有値(参考)

4.10.2.3. 線形計画法でパラメータを更新する場合

次に、パラメータを設計する方法を線形計画法に切り替えて、再びシミュレーションを行った。各発電機における物理量を図 79 に、各発電機の PSS におけるパラメータの推移を図 80 に、パラメータ設計に用いた 5 次のモデルから得られた固有値を図 81 に、それぞれ示す。また、2 次のモデルから求めた固有値を参考までに図 82 に示す。パラメータ設計開始後すぐに安定性が低下し、一方的に不安定化が進んで発散した。パラメータを操作する方向を誤っていると考えられる。ゲインを上昇させ、位相補償を進み方向に操作する傾向は、前節の 3 分木法による設計と共通している。

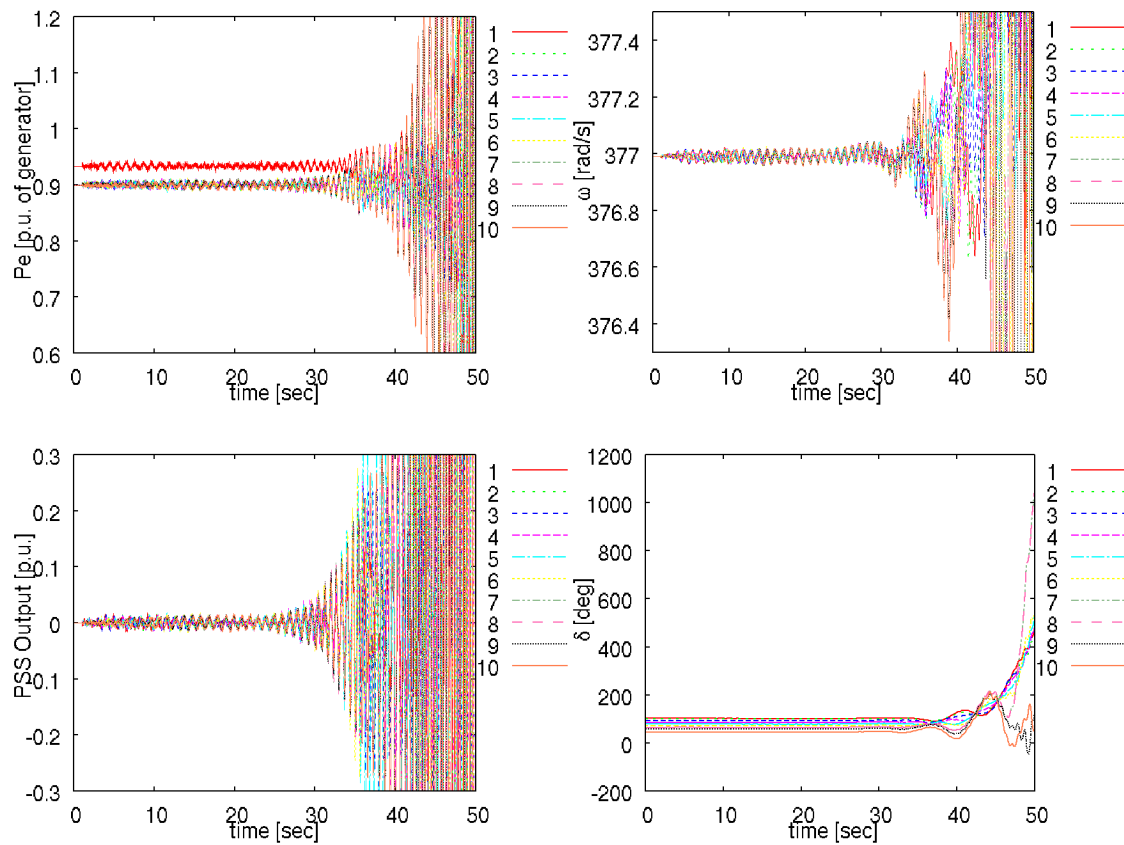


図 79：各発電機端子における物理量

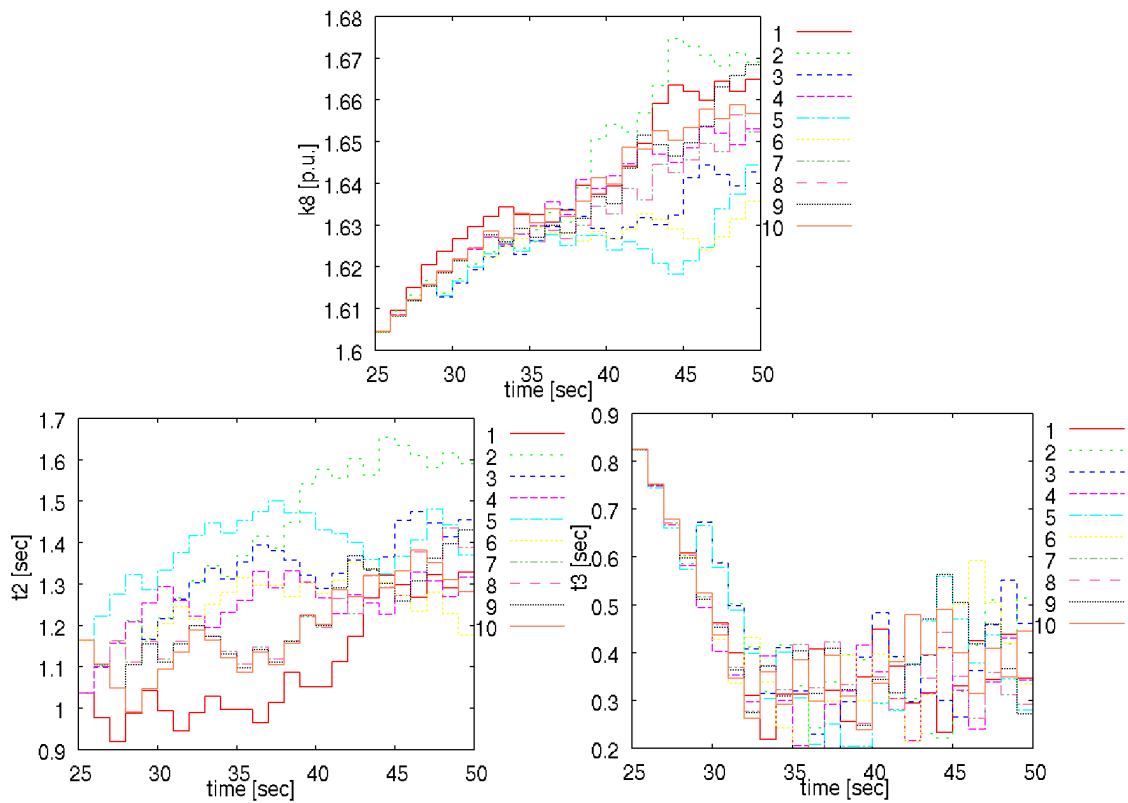


図 80 : 各発電機における PSS パラメータの推移

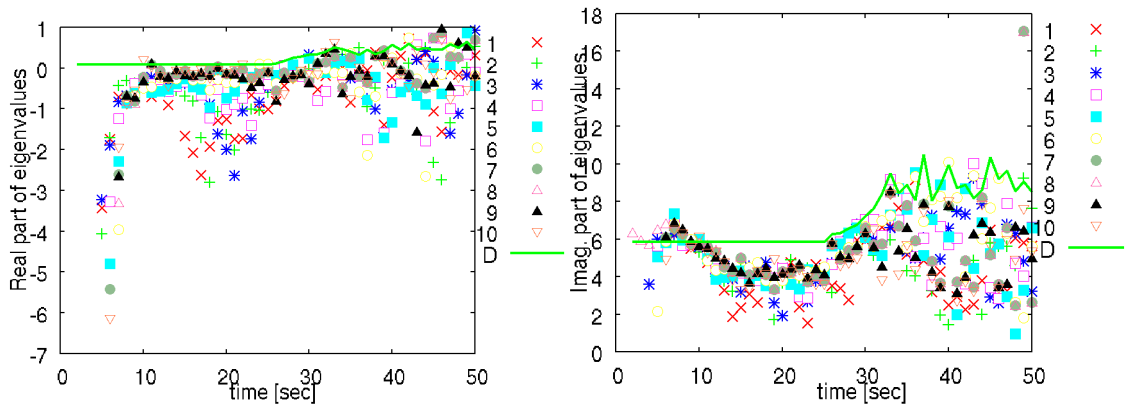


図 81 : 適応制御に用いた 5 次の線形モデルから算出された固有値

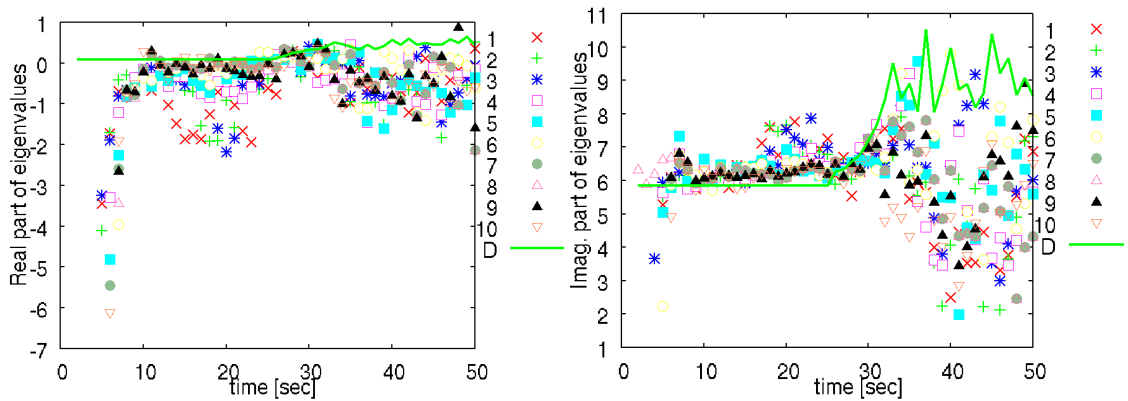


図 82 : 各発電機の 2 次モデルから算出された固有値(参考)

4.10.2.4. 詳細モデルから算出した固有値を直接利用してパラメータを更新する場合

次に、詳細モデルから算出した固有値と、PSS パラメータとの関係を直接用いてパラメータ設計を行った。シミュレーション開始後 25 秒の時点から、各発電機の PSS パラメータを、毎秒 1 回ずつ 3 分木法のアルゴリズムで更新した。この手法は、適応制御ではなく、系統の情報が全て既知であると理想的に考えた場合における、オフライン制御の一種である。各発電機端における物理量を図 83 に示す。一見すると、パラメータ設計により安定化が達成されたように見える。PSS パラメータの推移を図 84 に示す。ゲインはやや上昇した。位相補償は、発電機ごとに移動する方向が異なるが、弱い進み補償を保っている発電機が多い。また、設計開始後 10 秒以内に値が収束するパラメータが多い。参考までに、各発電機の 5 次モデルと 2 次モデルでの同定から得られた固有値を、図 85 と図 86 に示す。これらの図には、詳細モデルから直接求めた固有値も実線で掲載した。詳細モデルから直接求めた固有値は、実部は 0 をやや上回る値、虚部は 7 付近に収束している。本来は、PSS パラメータを適切に設定すれば、十分に安定化できる系統構成であるにもかかわらず、安定化を達成できていない。シミュレーション終了時における支配的な固有値は $+0.128 \pm j6.70$ と、やや不安定なままだった。

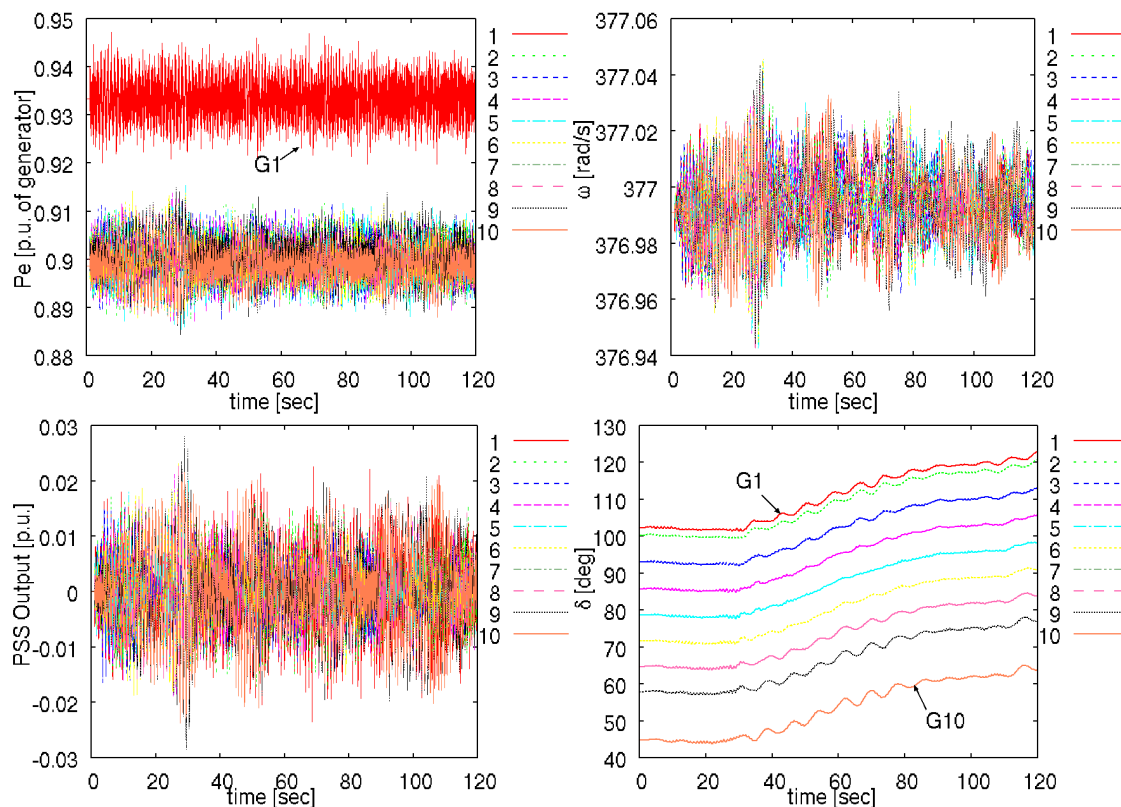


図 83 : 各発電機の端子で得られた物理量

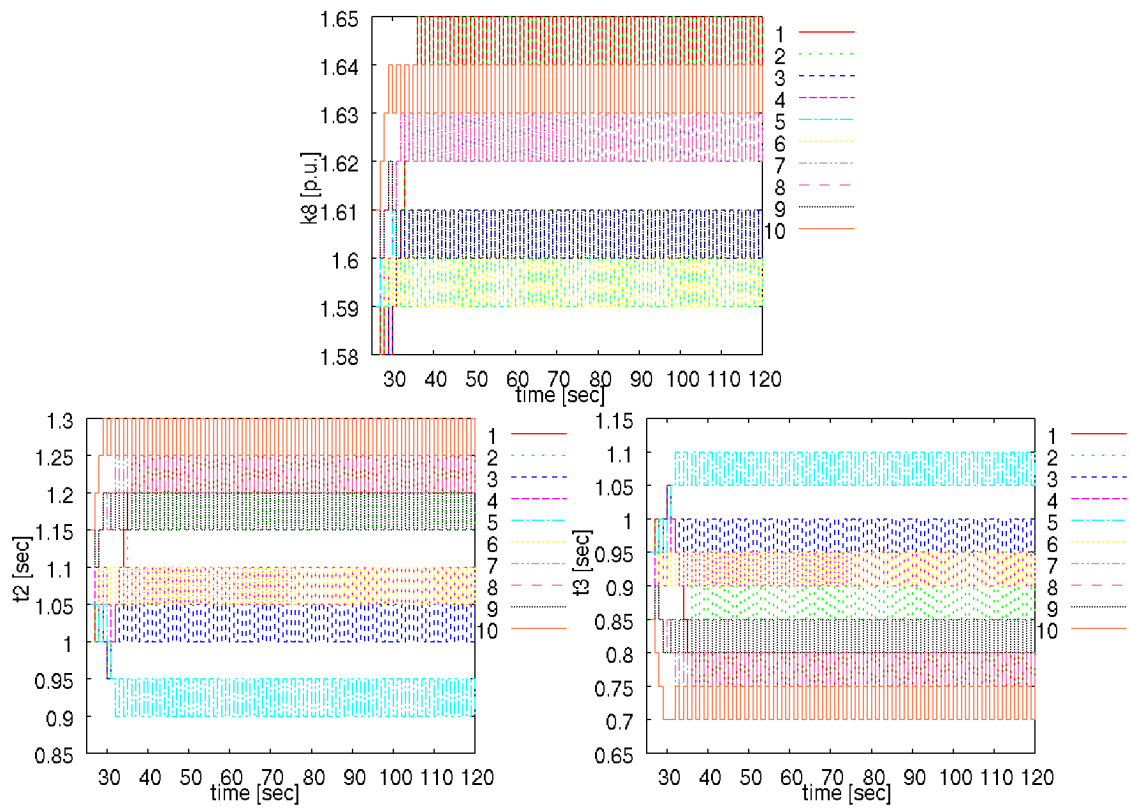


図 84 : 各発電機における PSS パラメータの推移

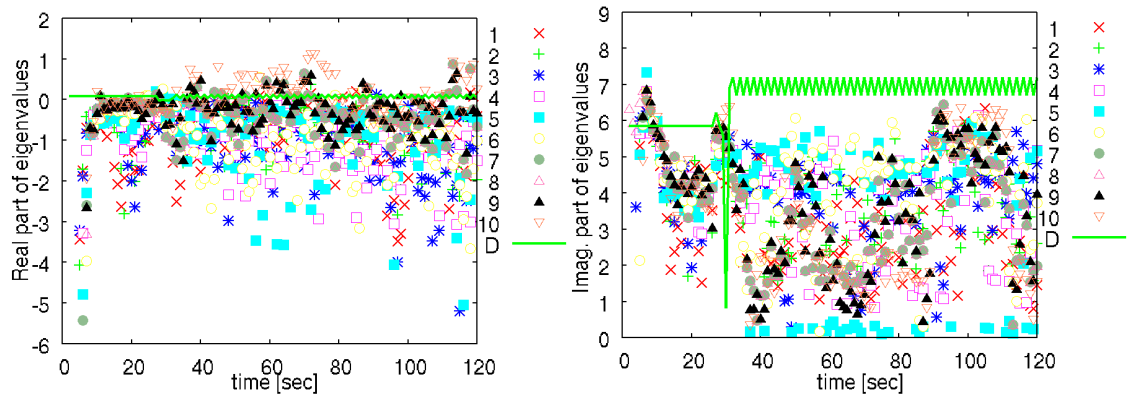


図 85 : 各発電機に置いた 5 次モデルから算出された固有値(参考)

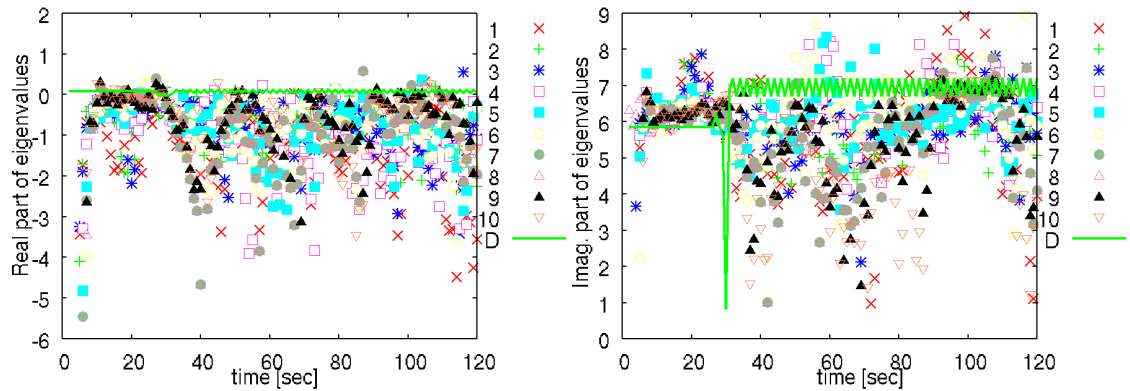


図 86 : 各発電機の 2 次モデルから算出された固有値(参考)

発電機 G10 の PSS パラメータと、支配的固有値実部との関係を図 87 に示す。初期状態として設定した $(k_8, t_2) = (1.6, 1.1)$ は、詳細モデルから直接求めた支配的固有値実部においては、盆地のように周囲を山(大きな値)に囲まれている。詳細モデルで算出した固有値を直接を用いた 3 分木法によるパラメータ更新では、下り坂となる方向を選択することで値を遷移させるため、局所的な谷から脱出できないことが分かる。発電機 G10 の 5 次モデルから求めた固有値実部は、谷のような形が見える点で詳細モデルから求めた固有値のグラフと近い形をしている。しかし、グラフの傾きを頼りに安定度の向上を目指すアルゴリズムでは、安定な状態にたどり着けないことが分かる。

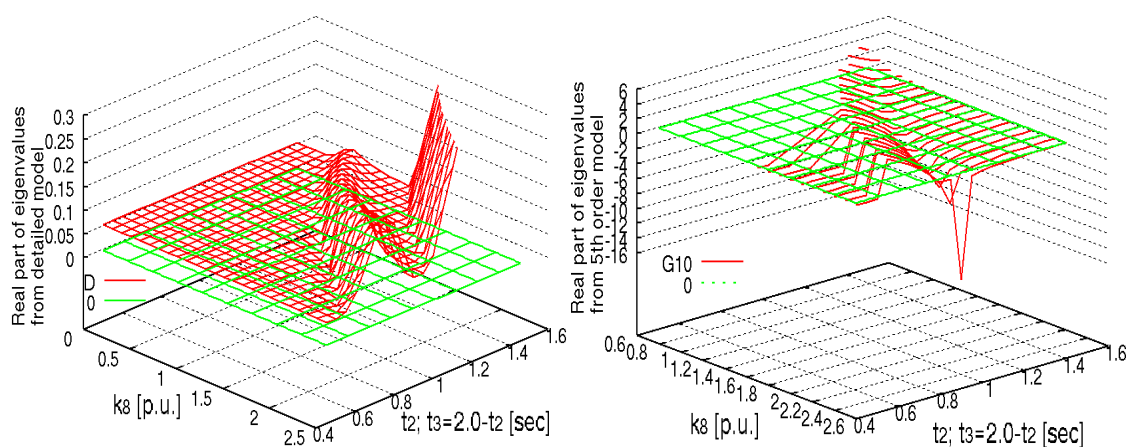


図 87 : 25 秒における発電機 G10 の PSS パラメータと支配的固有値実部との関係

4. 11. 基本的なシミュレーション事例に関するまとめ

この章では、低次線形モデルを用いた動揺モードの同定と、PSS パラメータの設計について、基本的なシミュレーションを行った。その結果、以下のことが分かった。

[同定の基本的な性質]

- 電力系統が持つ固有の動揺モードによる動揺現象が波形に大きく現れている間は、各発電機の 5 次モデルで行う同定から、その動揺モードに対応する固有値が得られる。ただし固有値虚部は、詳細なモデルから直接算出された固有値と比べ小さめになる傾向がある。また、値が 0 付近となり、動揺現象をとらえられない場合がある。
- 2 次モデルを用いた同定では、5 次モデルと比べ、観測された動揺の周期をより正確に反映した固有値が得られる。5 次モデルで求めた固有値が不正確になる背景としては、

5次モデルには PSS の制御ブロックが含まれるが、制御ブロックと同定から求められる部分の対応が、必ずしも適切に求められていない可能性が考えられる。

- 動揺が誘起されていない状態で、各発電機の 5 次モデルで同定を行うと、得られる固有値は時間軸上で大きくばらつく。固有値のばらつき具合から、動揺現象の存在を判定できる可能性がある。

[オンラインパラメータ設計の基本的な性質]

- PSS のパラメータを、オンラインの適応制御として反復継続して行くと、3 分木法を用いた方法では、いったん動揺を抑えて安定化に成功するものの、動揺波形の消失以降に行われるパラメータ操作が、不安定化を招く。再び不安定化すると、電力系統の物理量はすぐに振動発散し、安定度は回復しない。
- 線形計画法を用いて適応制御を行う場合は、シミュレーションの開始から少なくとも 120 秒後までは安定な状態を維持する。ただし、PSS のパラメータは、動揺現象が同定できていない間も変化を続ける。
- PSS のゲインを高め、位相補償を進みとした不安定状態でオンラインパラメータ設計を行うと、一方的に不安定化して発散する。

これらのことから、オンラインパラメータ設計は、必ずしも確実な方法ではないと考えられる。まず、動揺現象が観測されていないときに、電力系統固有の固有値が正しく同定できていないにもかかわらず、パラメータが変化を続けている。このような変化は、いわば当てずっぽうであり、避けたほうがよいと考えられる。次に、動揺が観測されていても、周期が短い動揺の場合には、正しい設計ができなかった。失敗の背景には、(1)PSS パラメータの移動方向と安定度の変化の関係を、正しく同定できない場合があること(2)PSS パラメータと安定度(詳細モデルの支配的固有値実部)の関係を正しく把握できても、3 分木法などの探索アルゴリズムが局所解につかまってしまい、安定となる領域までパラメータが動けない場合があること、が考えられる。

[詳細モデルから直接算出した固有値を利用する従来のオフライン設計について]

- 詳細モデルから算出した固有値を直接用いてパラメータを最適化した場合は、局所的な解に陥った場合を除いて安定な状態に到達した。
- 10 機で 30 あるパラメータを全て同時に設計する場合は、120 秒間のシミュレーションではパラメータが収束しない場合があるなど、設計の自由度が大きすぎるとパラメータの遷移に迷いが見られるようになる。

- PSS パラメータと安定度の関係が分かっている場合であっても、より安定化する方向にパラメータを繰り返し移動させる方法では、局所解に陥り安定化できない場合がある。

詳細な系統モデルが分かっているのであれば、実系統の PSS を操作するかわりに、モデル内の PSS パラメータであらゆる値を想定し、最も安定度がよくなる点を探し出せばよい。しかし、実系統の PSS を操作しながら安定度の改善を目指す場合は、パラメータを広い範囲で大きく操作することが難しいという問題がある。

5. 適応型 PSS に関する検討

ここからは、前章で行った基本的な事例の結果をふまえ、手法の性質をより詳しく調べる。また、振動発散のような不都合な現象が起こらないように、工夫を模索する。適応型 PSS の設置位置や、低次モデルの形、パラメータを更新するタイミングなど、多くの点を対象に、検討を行った。

5. 1. 適応型 PSS の設置位置検討

適応型 PSS を、必要がない場所に設置すると、効果が期待できないばかりか、不要な設計がかえって系統を不安定化する可能性もある。5 次の低次線形モデルを用いて ΔP 型 PSS に対して行う適応制御を、電気学会 WEST10 機系統モデル内の限られた発電機だけで行い、適応制御を行う位置と、電力系統の安定性の関係を調べた。

5.1.1. シミュレーションの設定

各発電機に PSS を設置し、初期パラメータを 4.6.1 節の表 3 と同じとした。システムモデルの設定も 4.6.1 節と合わせ、やや不安定な初期状態とした。図 24 からは、添字番号が小さい西側の発電機では動揺振幅と位相差がともに小さいが、番号が大きい東側の発電機では、振幅も位相差も比較的大きくなっていることが分かる。そこで、線形計画法によるオンライン設計により PSS パラメータを変更可能な発電機を、揺れが小さい西側の発電機 1 から 5 までに限る場合と、揺れが大きい東側の発電機 7 から 10 までに限る場合について、それぞれシミュレーションを行い、安定性の変化を調べた。適応型 PSS を設置する対象の発電機の出力の合計値は、西側に設置する場合の 5 台と、東側に設置する場合の 4 台で、それぞれともに 49500MW で等しい。

5.1.2. 西側 5 機を適応型 PSS とする場合

まず、発電機 G1 から G5 までを適応型 PSS とし、残りの発電機には、パラメータを初期値に固定した PSS を設置した。シミュレーション開始 1 秒後から、負荷ノイズの添加とモデル未知数の同定を始め、25 秒から PSS のパラメータを線形計画法により毎秒更新した。各発電機の電気出力・回転速度・PSS 出力を図 88 に示す。西側の発電機における動揺は、最初から小さめである。東側の発電機では、振幅が縮小する様子はなく、安定限界付近の動揺が電気出力として $\pm 2\%$ 程度の振幅で続いている。PSS パラメータの変化を図 89 に示す。動揺が最も大きい発電機 G5 では、比較的ゲインの上がり方が大きい。位相補償の調整では、遅れ・進みとも補償を行わないように変化している。次に、各発電機の 5 次モデルにより同定した固有値を図 90 に示す。シミュレーション開始時点では、詳細なモデルから直接求めた固有値と近い値を示す発電機が多かったものの、設計を開始して以降は、実部・虚部ともに低めに偏りながら大きくばらついた。理由を調べるために、電気出力・回転速度・PSS 出力を発電機 G1 から G5 のものに限りプロットしたところ、図 91 に示すように、動揺が収束していることが分かった。発電機 G1 から G5 までは安定となったため、動揺現象が観測されなくなり、より東側で起きている支配的な動揺現象を示す固有値が得られな

なくなったと考えられる。結果的に、系統全体として考えた安定度は、図 92 の左側に示すように、定態不安定なままで推移している。一方で、発電機 G6 から G10 に設置した低次モデルでは、図 92 の右側に示すように支配的な動揺モードの周期を正しく得ている。従って、動揺現象がより大きく見えている東側の発電機の PSS をオンライン設計したほうが、より動揺を抑えられると予想される。

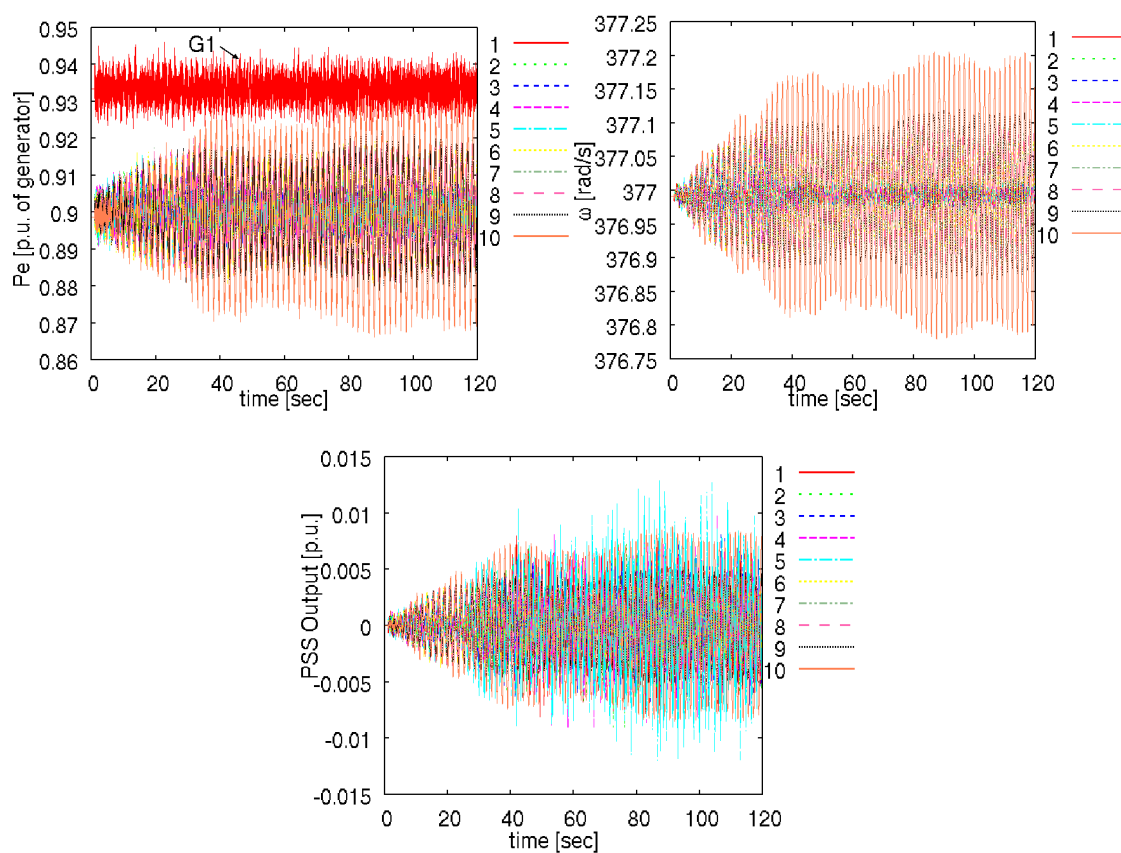
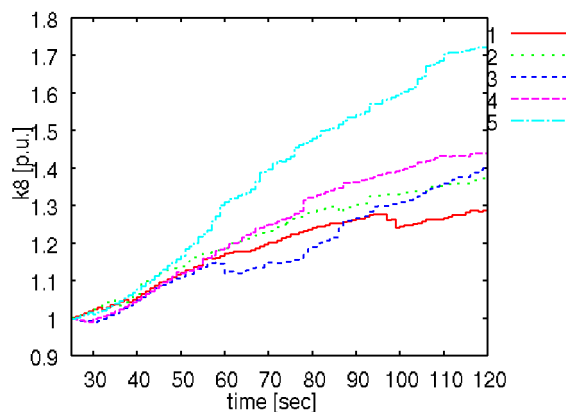


図 88 : 各発電機の電気出力・回転速度・PSS 出力



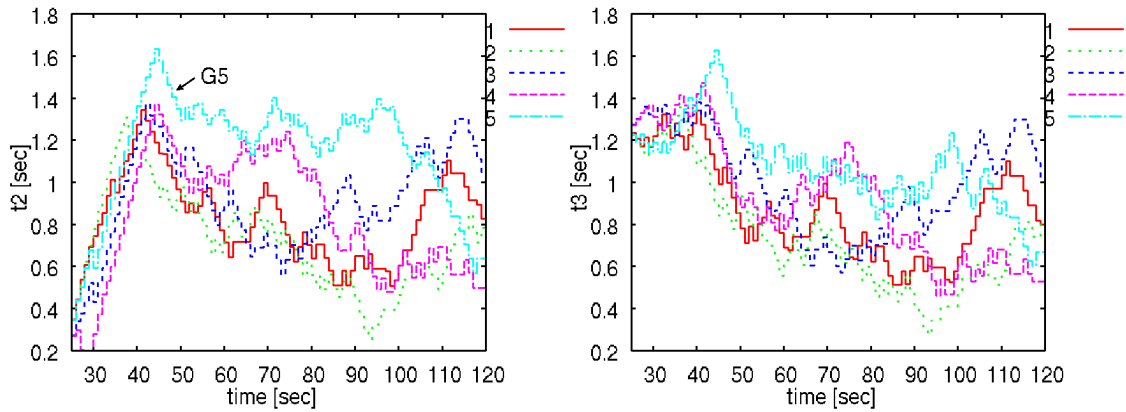


図 89：設計対象発電機における PSS パラメータの推移

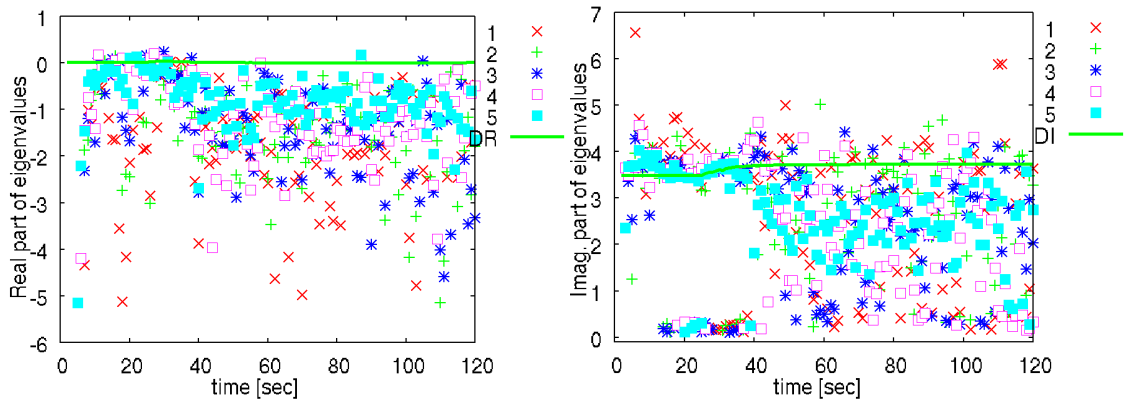


図 90：設計対象発電機の 5 次モデルと詳細モデルにおける支配的な固有値

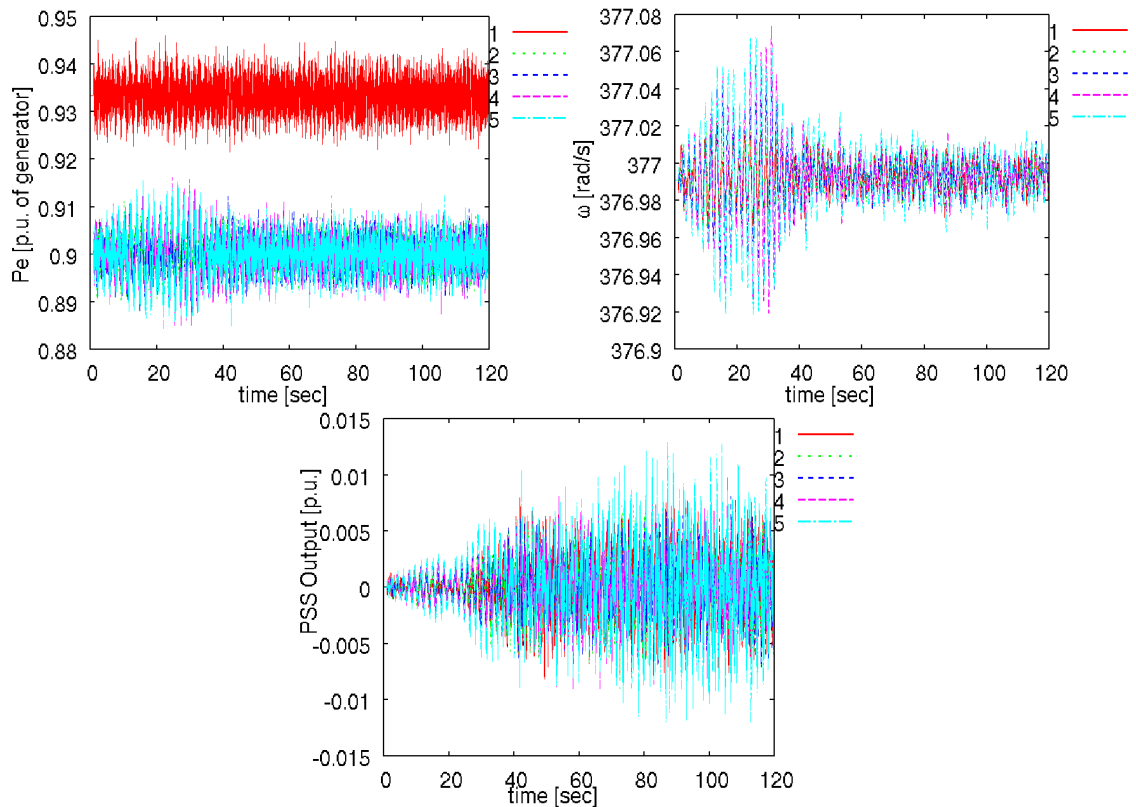


図 91：発電機 G1 から G5 までの電気出力・回転速度・PSS 出力

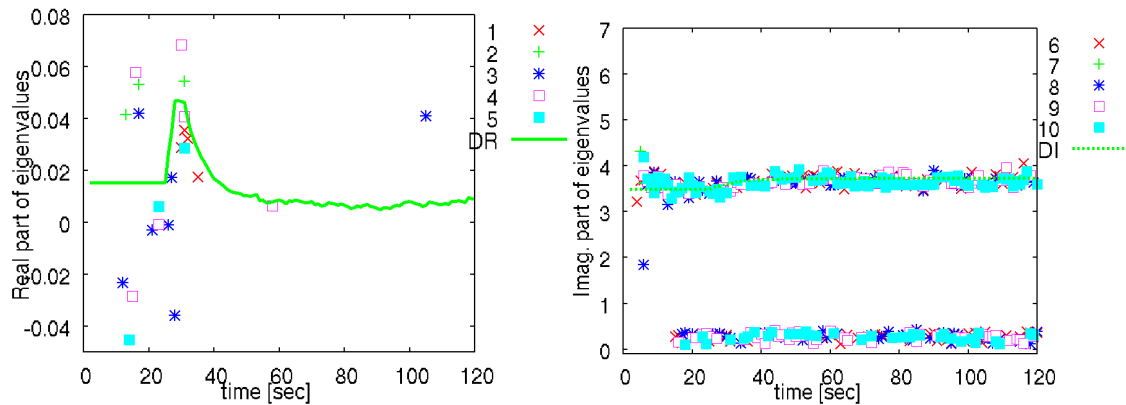


図 92 : 固有値実部の拡大図(左)と設計対象外の発電機の 5 次モデルで得た固有値虚部(右)

5.1.3. 東側 4 機を適応型 PSS とする場合

次に、発電機 G7 から G10 までを適応型 PSS とし、それ以外の発電機にはパラメータを初期値に固定した PSS を設置し、再びシミュレーションを行った。シミュレーション開始から 25 秒の時点から、設計対象となる発電機の PSS パラメータを毎秒 1 回ずつ更新した。各発電機における電気出力・回転速度・PSS 出力を図 93 に示す。動揺は 40 秒までにおさまリ、その後は不安定化せずに推移した。発電機 9 の PSS 出力が、他の発電機と比べてやや強く出ている。設計対象となった発電機の PSS パラメータを図 94 に示す。ゲイン k_8 は、30 秒台に G7,G8 で上昇、G9,G10 でやや下降したが、その後は上昇する傾向が見られる。位相補償の t_2, t_3 は、補償を打ち消した上で、互いが近い値を保ちつつ、低下している。発電機 9 に限り、補償を進みに設定しており、PSS 出力の短周期成分が強まっている。パラメータ値が変化する傾向としては、図 89 と比較的近い結果になっている。各発電機の 5 次モデルで同定して得た固有値を図 95 に示す。40 秒付近までは、虚部が 3.5 付近の動揺モードが支配的であり、同定により得た固有値はそのモードをとらえている。その後、虚部が 1 付近のモードと 6 付近のモードが交互に支配的となってからは、同定からは支配的な動揺モードが得られなくなっている。詳細モデルから算出した固有値実部を詳しく見ると、支配的なモードが観測されていた 40 秒付近までは安定度が向上するが、その後は少しずつ不安定化へ向かっていることが分かる。

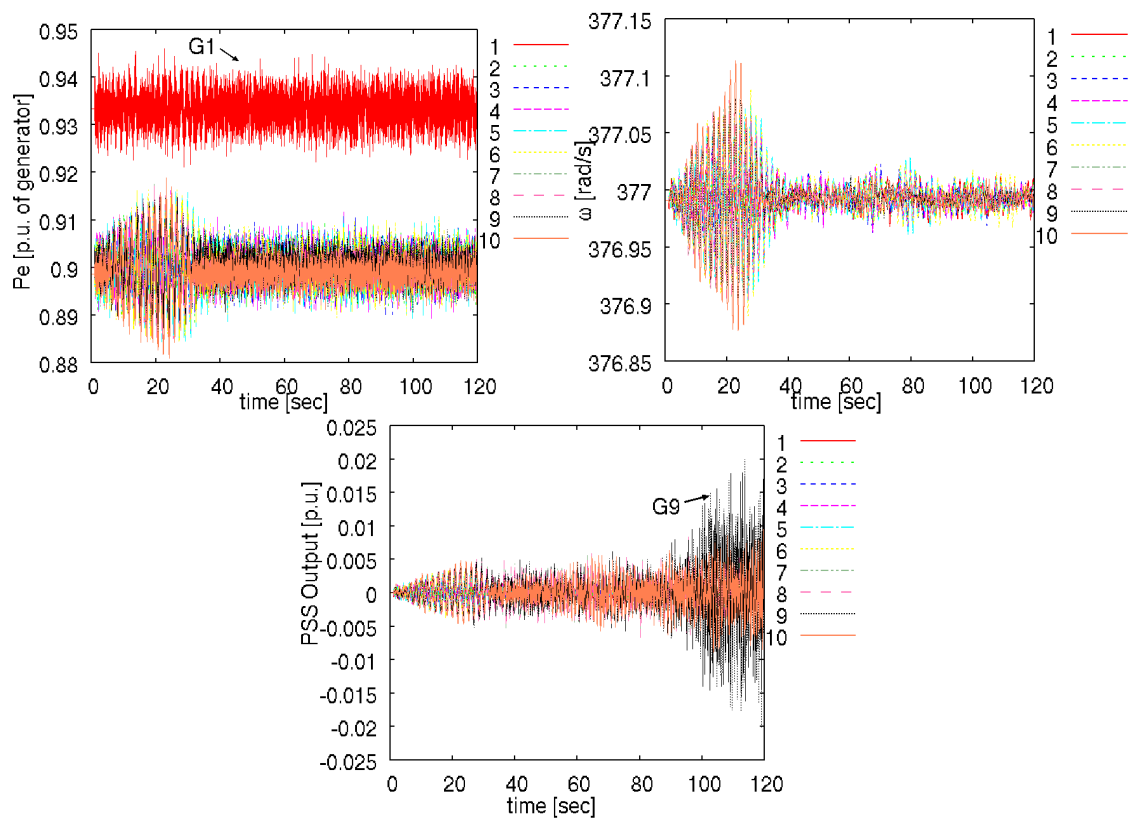


図 93 : 各発電機における電気出力偏差・回転速度・PSS 出力

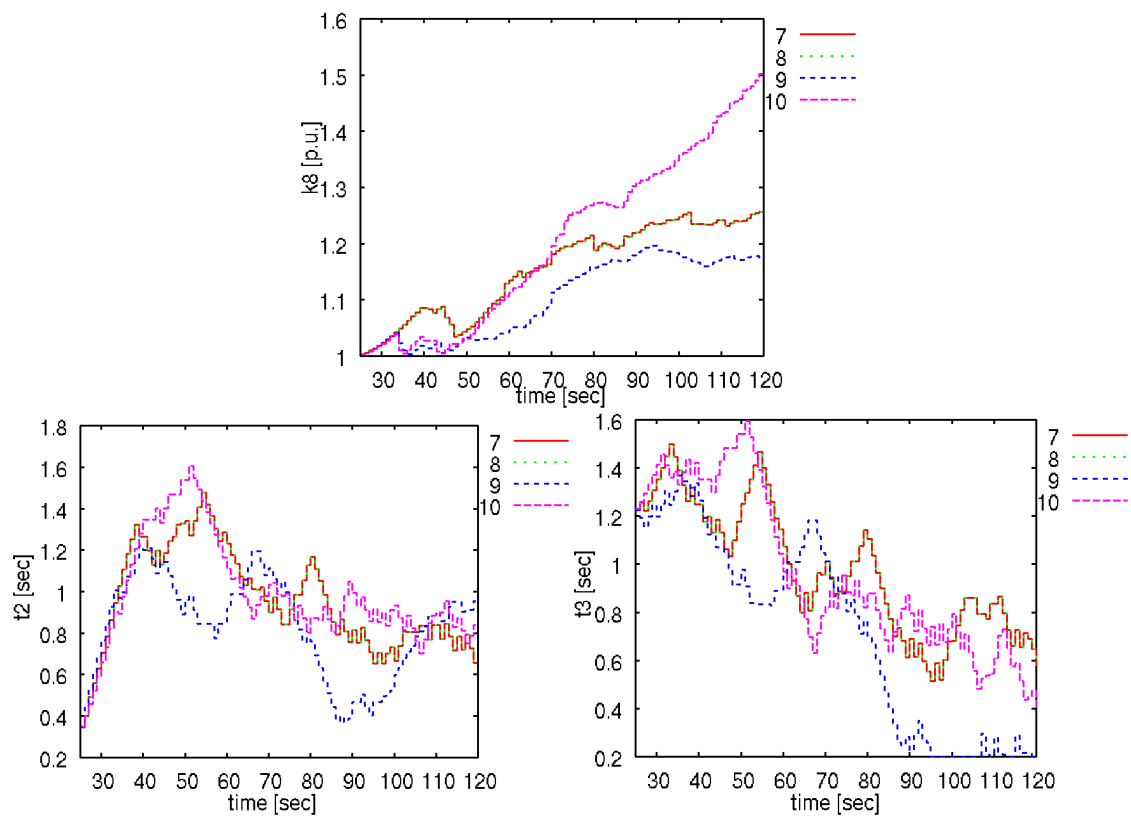


図 94 : 設計対象の発電機における PSS パラメータの推移

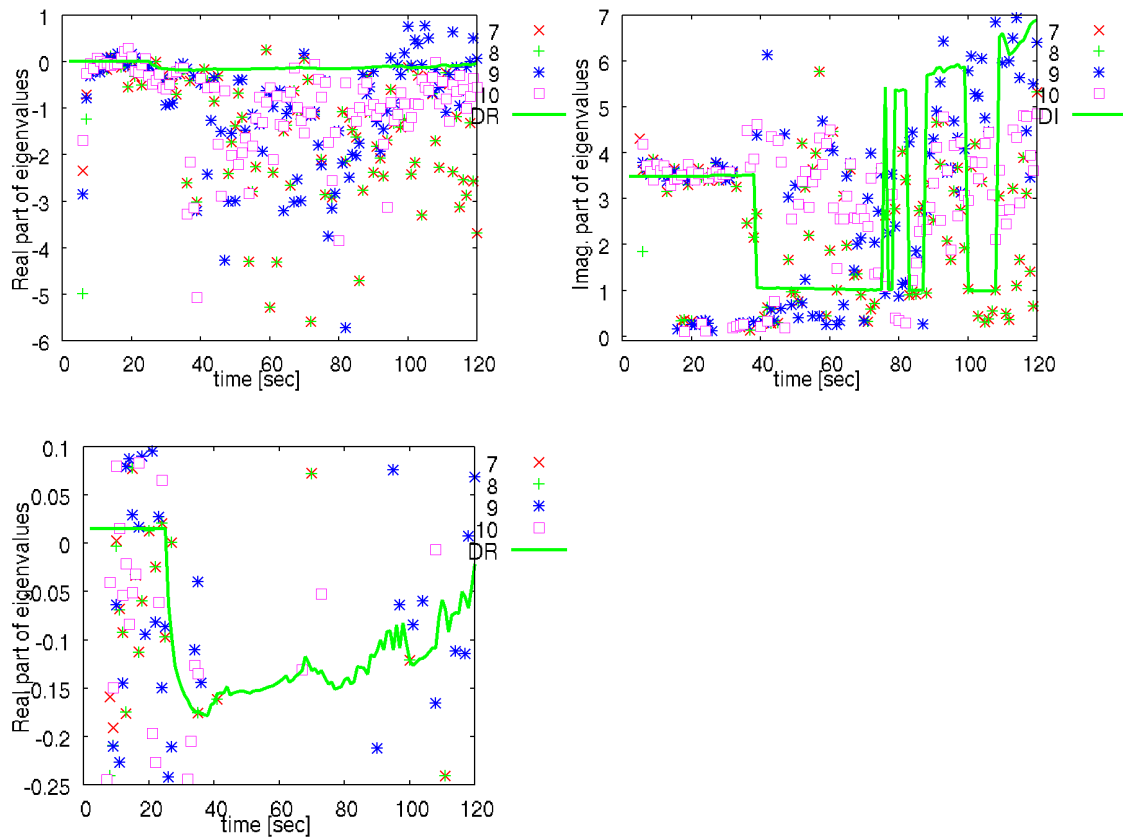


図 95：設計対象発電機の 5 次モデルと詳細モデルにおける支配的な固有値

5.1.4. 設置位置検討のまとめ

動揺が比較的小さい西側の発電機を適応型 PSS とするよりも、観測波形に動揺がよりはっきり現れる東側の発電機を適応型 PSS としたほうが、支配的な動揺現象を抑制できることが分かった。

動揺現象が観測されていない間であっても、PSS パラメータは変化を続けた。このようなパラメータの移動は、安定化に対して理屈上の根拠がないため、系統全体の安定化には貢献しにくいと考えられる。

5.2. 6次モデルを用いた異なる潮流状態における検討

次に、PSSの位相補償ブロックを1段追加して、低次線形モデルを6次モデルとした場合について、シミュレーションを行った。同時に、電気学会WEST10機系統モデルにおいて、西から東に流れる潮流の量が異なる2種類の初期状態を用いて、潮流状態の違いが、適応制御に与える影響について調べた。位相補償を2段持つPSSでは、補償可能な位相の範囲が広がる一方で、発電機単独で不安定化する可能性が増大する。オンライン設計では、2段ある位相補償のうちの1段だけを可変とし、残りの1段は、やや遅れに設定し固定した。オンライン設計は、3分木法により行った。

5.2.1. 同定の検証

まず、負荷に加えた外乱が、支配的なモードによる動揺を誘起するかを調べ、誘起された動揺が低次線形モデルによって同定されるかを検証した。各発電機のPSSパラメータを表4に示す値に設定した。詳細モデルにおける支配的固有値を $+0.0199 \pm j2.55$ (固有周期は2.46秒)と、安定限界付近に設定した。

表 4: PSS パラメータの初期設定値

k8	t2[sec]	t3[sec]	t8[sec]	t4[sec]	t5[sec]	t1[sec]
2.2	2.2	1.8	0.02	2.0	3.0	5.0

シミュレーション開始後1秒の時点から、負荷外乱の添加と低次線形モデルにおける同定を始めた。各発電機の電気出力偏差にカットオフ周波数4.0HzのLPFをかけた波形を図96に示す。およそ2秒半の周期を持つ動揺が誘起された。非線形性の影響からか、振幅が、ある程度大きくなったところで飽和している。波形の一部を拡大すると、西側に位置するG1からG5まではほとんど同位相だが、その東側では、より東に位置する番号が大きい発電機ほど、動揺の位相が遅れている。発電機回転子の回転速度の一部を図97に示す。東側の発電機ほど、動揺の振幅が大きいことから、東側の発電機が、系統の西側半分に対して動揺しているといえる。最も大きく揺れたG10における、オンラインで同定した6つのパラメータを図98に示す。約20秒で特定の値に収束している。各発電機の低次線形モデルで求めた振動的な固有値を、時系列で図99に示す。実部は、-0.25から+0.05の範囲に大部分が集まっている。虚部は、一部は0付近に集まるが、動揺が比較的大きい東側の発電機を中心に、1.5から2.0までの範囲に集中している。詳細モデルから求めた本来の値である2.55と比べ、0.5から1.0少ないが、動揺の周期に反応して得られた値であると考えられる。

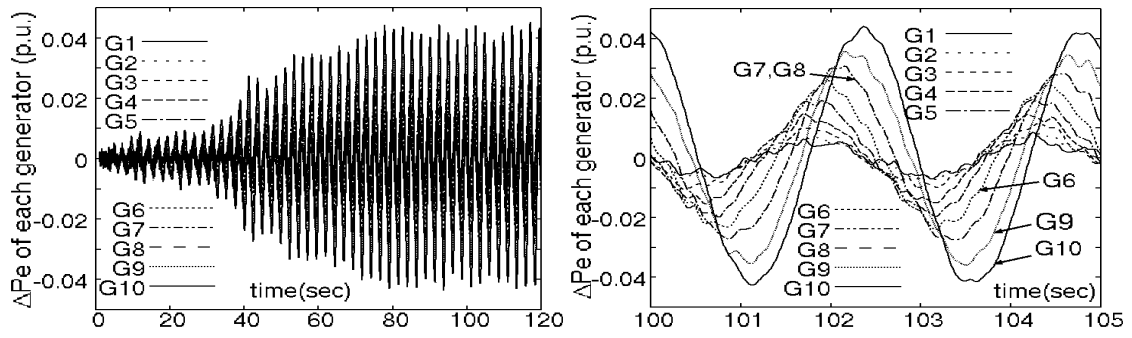


図 96: 各発電機の電気出力偏差

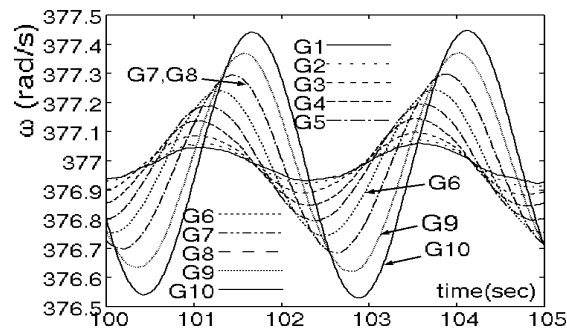


図 97: 各発電機の回転速度

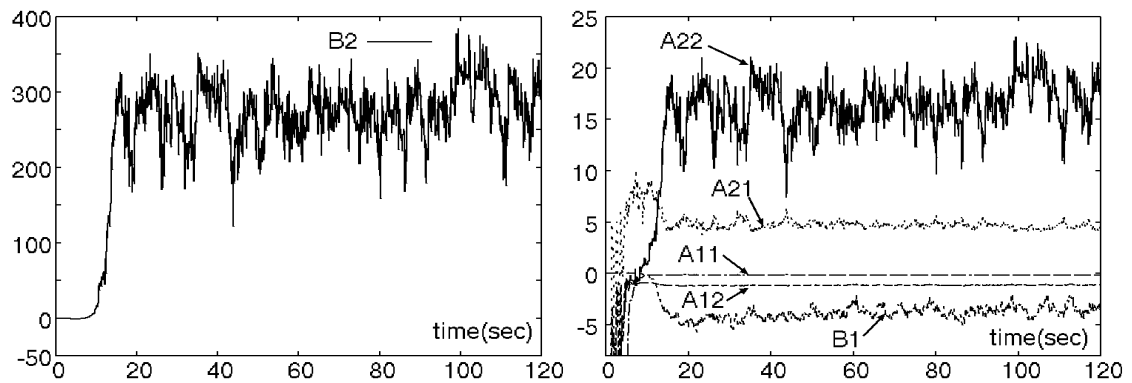


図 98: 発電機 10 における同定された 6 つの未知数

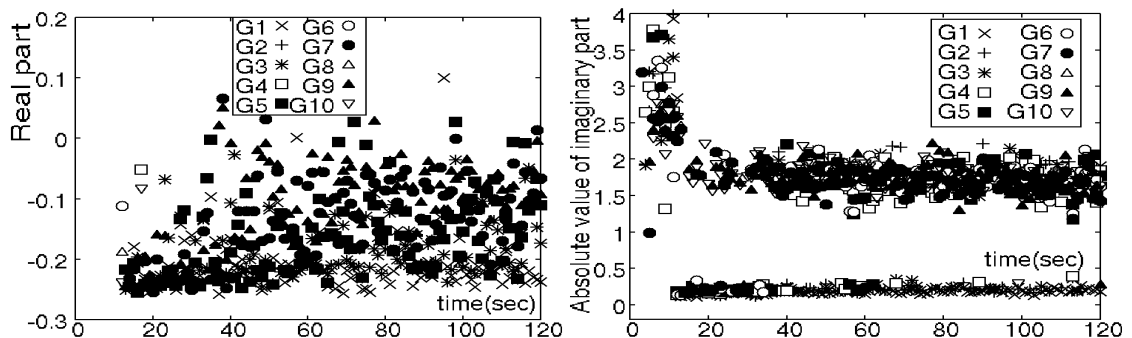


図 99: 低次線形モデルで算出した固有値

5.2.2. 比較的安定な初期状態での検討

全ての発電機の適応型 PSS で、25 秒の時点から毎秒パラメータ(k8,t2,t3)の更新を行った。各パラメータの初期値は、同定だけを行ったときと同じとし、3 分木法による設計 1 回あたりで移動可能な幅は、k8 は 0.2[p.u.], t2 と t3 は 0.1[sec]ずつとした。各発電機の電気出力偏差と回転子速度を図 100 に示す。30 秒以降では、2 秒半周期の動揺がほとんど見られなくなっている。低次線形モデルで観測された固有値を図 101 に示す。虚部では、支配的なモードが波形に現れていた 30 秒付近までは、周期に対応する値が得られたが、それ以降では値の範囲が広がっている。系統のモードが得られなくなってからは、添加したノイズの影響が支配的になっていると考えられる。実部は、波形がおさまり始めてからは、値がやや小さくなる傾向があったものの、引き続き 0 付近にとどまる場合も多かった。

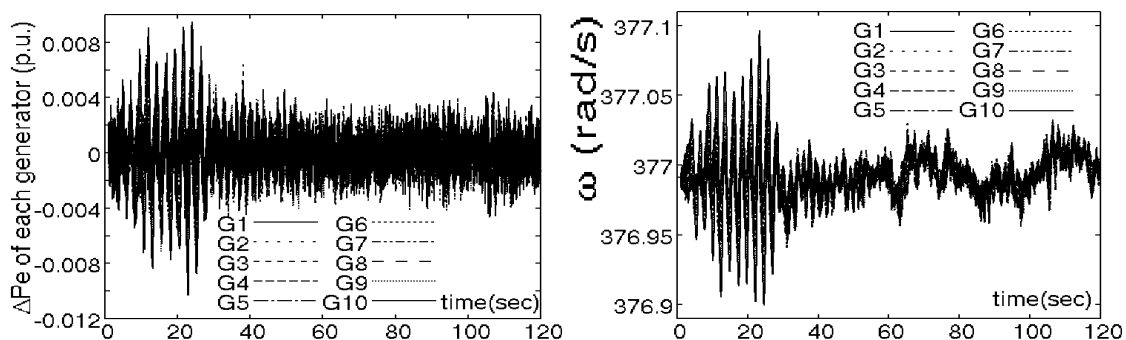


図 100: 各発電機の電気出力偏差と回転子速度

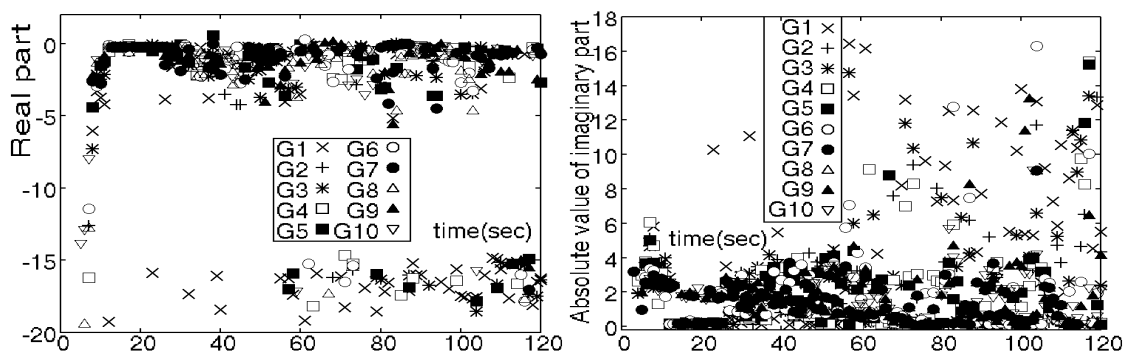


図 101: 低次線形モデルで算出した固有値

詳細なモデルから求めた支配的な固有値の推移を図 102 に示す。実部は、30 秒までは安定化し、40 秒から 50 秒にかけて若干悪化するが、その後は変化がおさまった。虚部からは、数秒周期の動揺が支配的となる期間が、30 秒付近までと、40 秒台の一部であることが分かる。

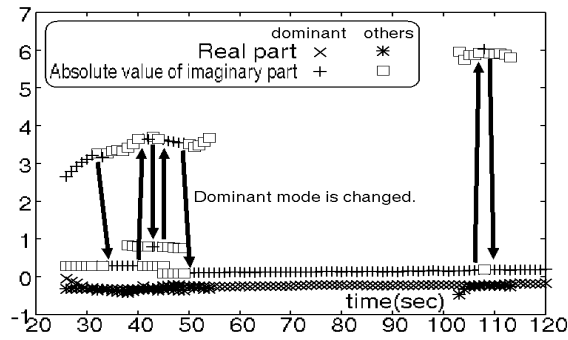


図 102: 詳細モデルにおける支配的固有値

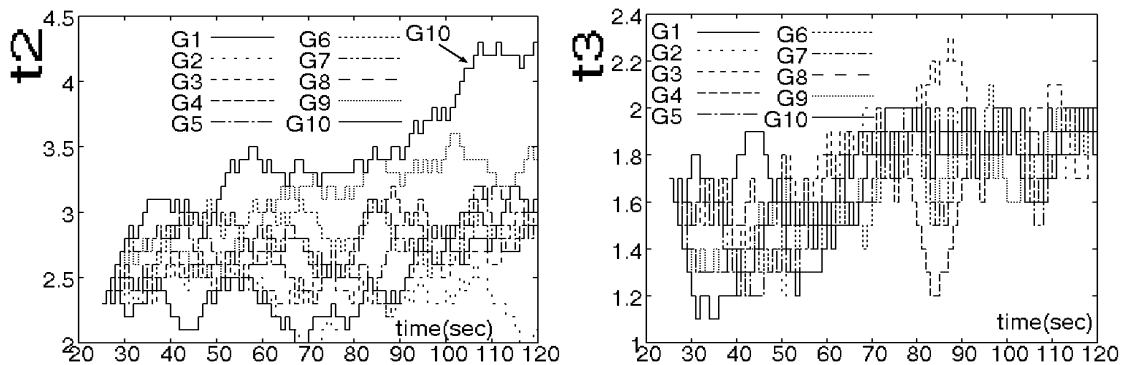
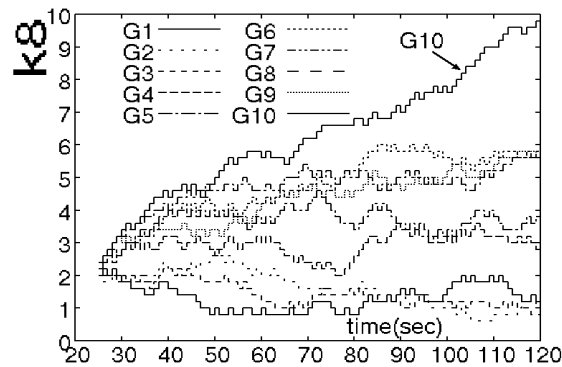


図 103: PSS パラメータの遷移

PSS の各パラメータの変化を図 103 に示す。支配的な固有値が安定化に向かった 30 秒付近までを見ると、東側の発電機ほどゲインが上がる傾向がみられた。支配的なモードが観測されなくなってからも、パラメータは収束せずに変化を続けた。改善が必要なモードの情報を持たない観測結果から、パラメータの更新を行うことには、意味がないと考えられる。

次に、PSS パラメータに対して行った個々の操作が、詳細モデルから直接求めた固有値に対して与えた影響について調べた。PSS の各パラメータに対して毎秒行う、値を上げる・下げる・変えないの判断を、低次線形モデルを用いた場合と、詳細モデルを用いた場合の両方で行い、両者の判断が一致した場合に、行った設計が正しかったとみなした。シミュ

レーションでは、適応型 PSS のパラメータを、低次線形モデルから算出した判断に従って変化させた。パラメータの種類および発電機ごとに、正しい設計が行われた期間を黒く、不適切な設計が行われた期間を白く、それぞれ示したのが図 104 である。

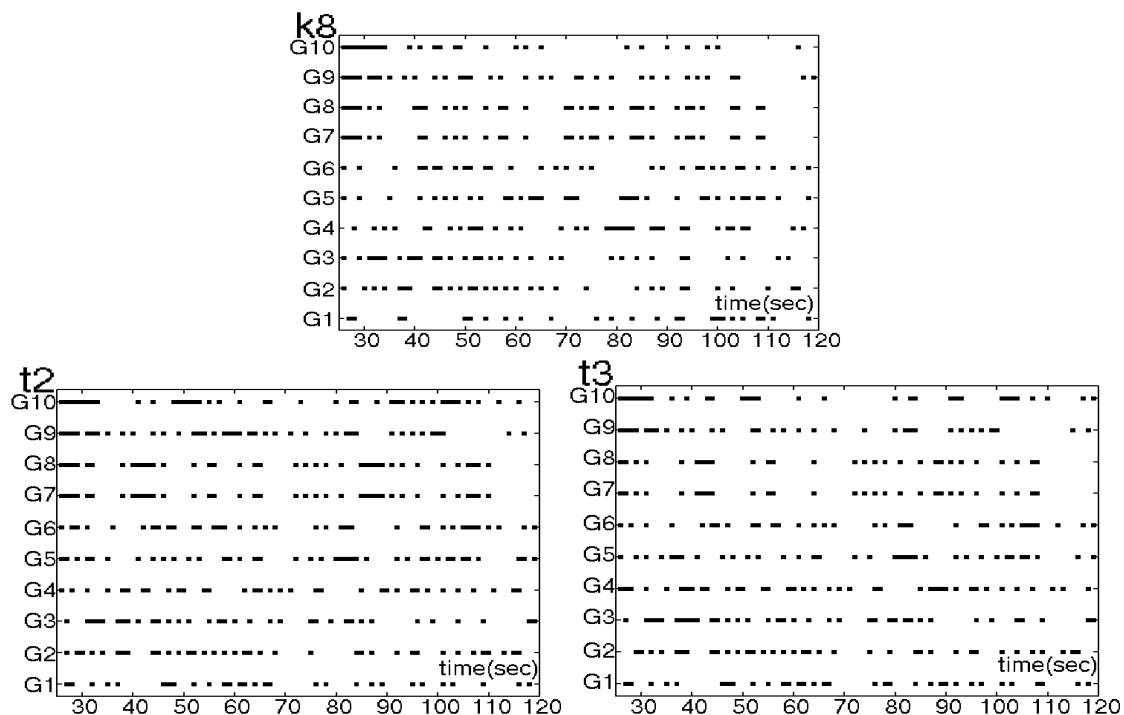


図 104: PSS パラメータチューニングの評価結果

安定性の向上がみられた 30 秒付近までに限れば、発電機 7 から 10 までが、適切な設計となっている。支配的な動揺が波形に見られなくなるそれ以降では、不適切な設計が増え、支配的固有値の改善に寄与しているとは言い難い。

5.2.3. やや厳しい初期条件での検討

次に、発電機 G1 の出力とノード 9 の消費量を、それぞれさらに 0.5[p.u.]上げ、PSS を全て取り外したと仮定した場合の詳細モデルにおける支配的固有値を $+0.514 \pm j2.17$ と、より不安定に設定した。安定限界付近からシミュレーションを開始する目的で、PSS の初期パラメータを表 5 に示す値とした。この状態では、詳細モデルにおける支配的固有値は $+0.0270 \pm j3.49$ (動揺周期は 1.80 秒)である。3 分木法によるオンライン設計を再び行い、適応制御の性質を調べた。

表 5: PSS パラメータの初期設定値

k8	t2[sec]	t3[sec]	t8[sec]	t4[sec]	t5[sec]	t1[sec]
5.0	2.5	1.5	0.02	2.0	3.0	5.0

25 秒の時点から設計を毎秒繰り返した場合について、発電機の電気出力の偏差と、回転子の速度、低次線形モデルから得た固有値を図 105 に示す。40 秒以前では、安定性が向上した。固有値の虚部でも、支配的なモードを観測できた。一方で、50 秒以降で急速に不安定化し、発散した。詳細モデルから計算した固有値の推移を図 106 に示す。約 1.6 秒周期のモードが支配的だった 35 秒までは、安定性は限界近くにあった。その後、約 0.8 秒周期の別のモードが支配的となったものの、低次線形モデルでは新しい支配的モードを観測できず、安定性が次第に低下した。観測波形では、新たなモードによる動揺が 45 秒以降ではっきりしてくるが、モードの同定や安定化には結びつかず、発散した。

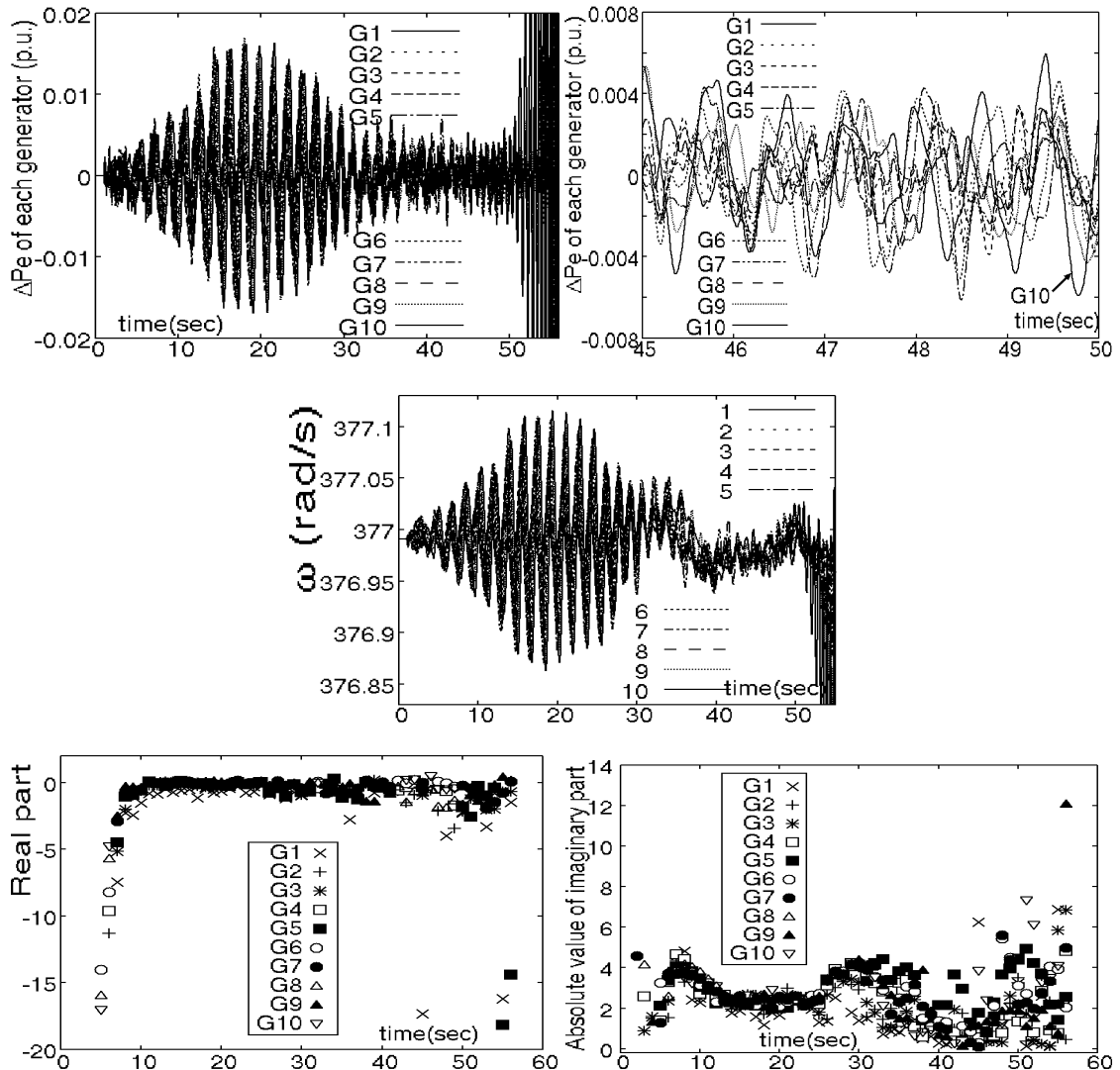


図 105: 各発電機の出力偏差・回転子速度と低次線形モデルで算出した固有値

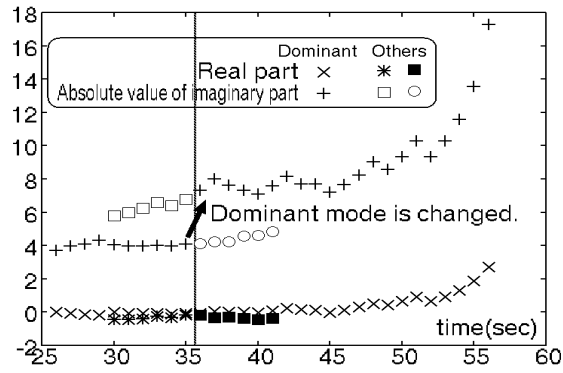


図 106: 低次線形モデルで算出した支配的固有値

各 PSS パラメータの変化を図 107 に示す。支配的なモードが同定できなくなってからも、ゲインの k_8 と位相補償の t_2 が上がり続ける発電機が多い。

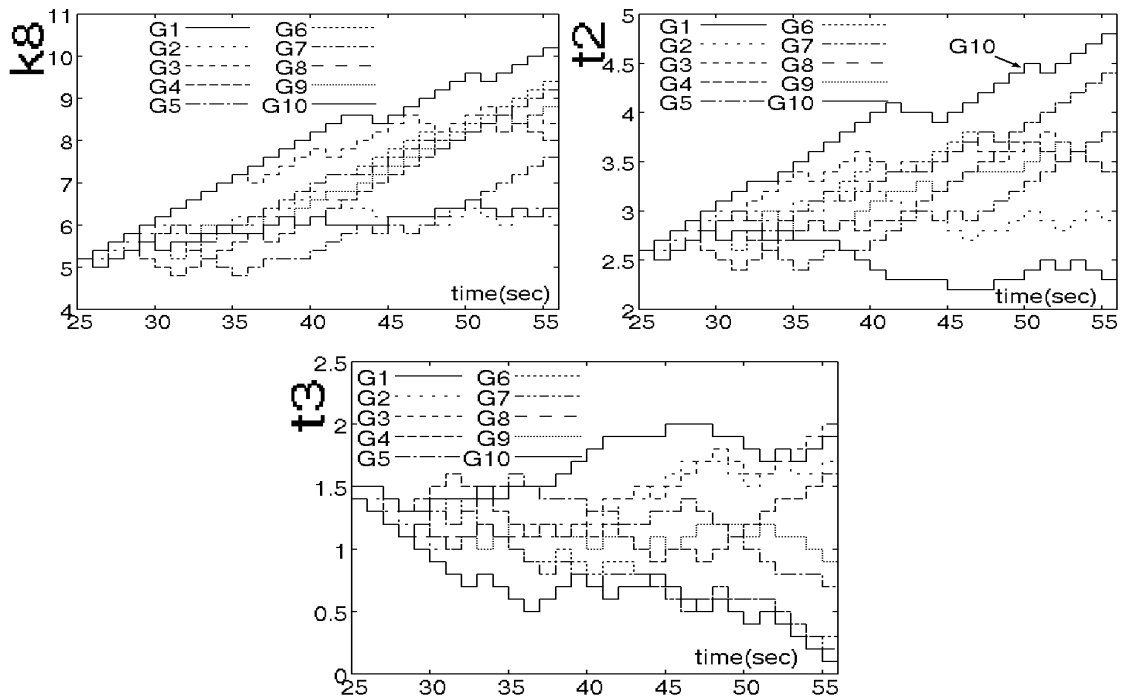


図 107: 各発電機における PSS パラメータの遷移

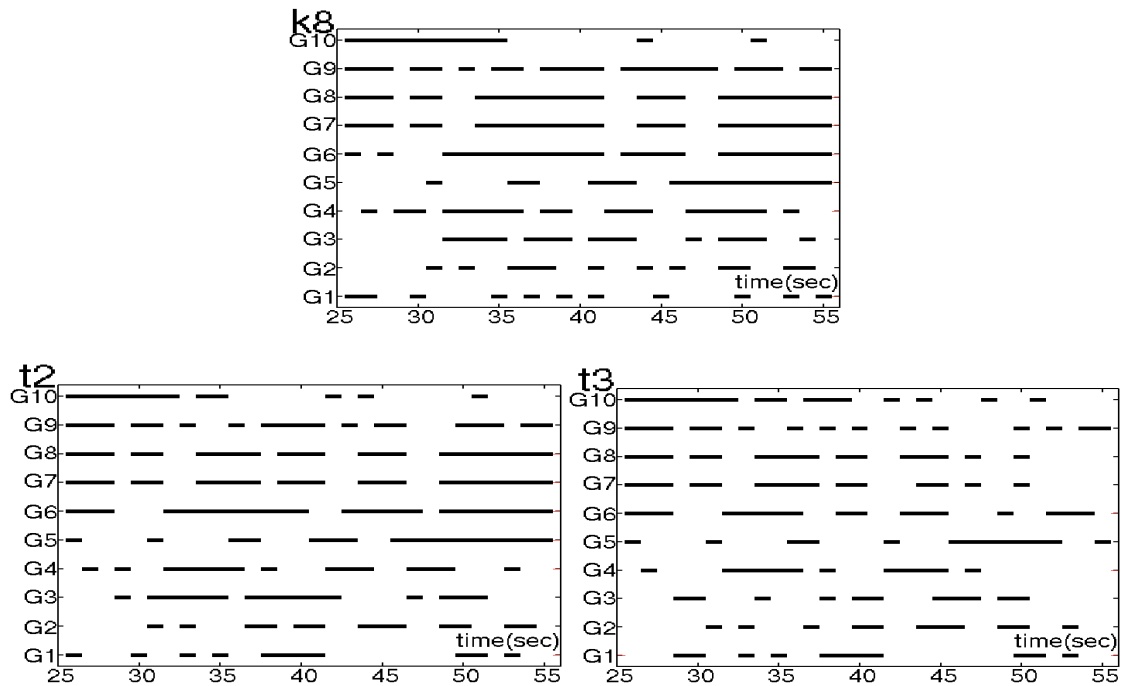


図 108: PSS パラメータチューニングの評価結果

PSS パラメータの移動方向を、詳細モデルの固有値解析により評価し、図 104 と同じ手法でプロットしたのが図 108 である。東側に位置する G6 から G10 まででは、最初の数秒間は適切な設計が行われたことが分かる。図 106 から、35 秒付近で支配的なモードがより周期の短い別のモードに切り替わったことが読み取られるが、図 105 からは、新たなモードが低次線形モデルでの同定では、検出できなかったことが分かった。このことが、図 108 で発電機 10 の k8 に対する設計が、35 秒付近から軒並み失敗していることと関係している可能性がある。システム全体が不安定化した理由としては、発電機 10 における設計の長期にわたる失敗が、図 105 の出力偏差から読み取れるシミュレーション末期における発電機 10 の不安定化をもたらしたためと考えられる。設計の失敗が連続した背景には、図 105 の回転子速度において、30 秒以降に動作点から常に下方方向に逸脱した状態が続いたため、同定が正常に行えなくなったことがあげられる。動作点の変化を検知し、同定を行う上での動作点を更新できるようにするか、直流的な偏差をフィルタ等で除去してから同定アルゴリズムを用いるようにするなどの対応策が、考えられる。(この節では、同定アルゴリズムに送る波形に対して、Wash-out フィルタを適用していない。)

5.2.4. 6 次モデルを用いた ΔP 型 PSS のチューニングに関するまとめ

全ての発電機を対象に、発電機ごとに 6 次の線形モデルを考え、3 分木法による PSS パ

ラメータの適応制御を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 初期段階では、発電機ごとに考えた低次線形モデルで状態量を計測することで、支配的なモードを同定できる。ただし、同定により得られた固有値の虚部は、詳細なモデルから直接算出して求めた本来の値よりも、0.5 から 1 程度小さい。
- 定態的に安定な系統では、負荷への外乱が支配的なモードを誘起しにくいため、同定を行うと、ノイズの影響が支配的となり、系統固有のモード以外の固有値が算出されることが多くなる。
- 低次線形モデルの固有値を改善する目的で、PSS パラメータを随時設計すると、不安定モードが観測できている初期段階では定態安定度が向上するが、その後は支配的モードとは無関係にパラメータが変動を続け、安定性を低下させる場合がある。
- PSS パラメータの設計を続けるうちに、短周期のモードが支配的モードに切り替わる場合がある。しかし、切り替わった後のモードは同定からは把握できず、オンラインパラメータ設計では対応ができない。同定が正常に行えない背景には、回転子速度が動作点を逸脱することなどが考えられる。

5.3. 方形波状の負荷変動に対する検討

電力系統固有の動揺モードは、何らかの微小な外乱によって、実際の波形として誘起される。これまでは、ホワイトノイズ状の負荷変動を、外乱として用いてきた。実際の電力系統では製鉄所などに、そのオン・オフにより電力系統全体に影響を与えうる、大きな規模の負荷が存在する。そのような負荷の変動からも、支配的なモードが誘起され、低次線形モデルにより同定ができるかについて、シミュレーションにより検討を行う。

5.3.1. シミュレーションの条件

安定限界に近い電力系統を模擬するモデル系統として、電気学会 WEST10 機系統の夜間断面を用いた。ただし、各発電機の制動巻線を、本来の値よりも、表 6 に示すように弱めることで、安定性を限界付近に設定した。また、各発電機に設置した適応型 PSS のパラメータ初期値を、表 7 に示す。適応型 PSS は、位相補償を 1 段とした ΔP_e 型とし、5 次の低次線形モデルを用いて同定を行い、線形計画法によりパラメータの設計を行う。適応型 PSS は、各発電機に設置した。詳細モデルから算出した支配的固有値は、 $-0.0399 \pm j2.56$ (動揺周期は 2.45 秒)と、安定限界付近である。方形波状の外乱は、16.5[p.u.] (1p.u.=1000MW) ある負荷の、 $\pm 2.5\%$ に相当する 0.4125(p.u.)だけ揺らした。外乱の波形を図 109 に示す。外乱の周期は、約 20 秒間とした。

表 6: 制動巻線の定数値

定数	ω_{id}'	ω_{id}''	ω_{iq}''
更新後	0.75	0.65	0.65
更新前	0.35	0.25	0.25

表 7: PSS パラメータの初期設定値

k8	t2[sec]	t3[sec]	t8[sec]	t1[sec]
9.0	0.1	2.0	0.02	5.0

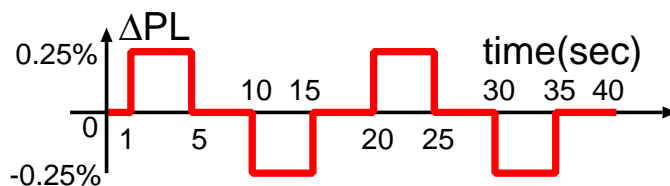


図 109: 負荷に加える外乱の波形

5.3.2. PSS パラメータを固定し同定だけを検討する場合

まず、同定により支配的なモードが得られるかを確認する目的で、PSS パラメータを初期値のまま固定して、低次モデルで同定だけを行った。シミュレーション開始 1 秒から、ノード 9 で負荷の±2.5%に相当する±0.4125(p.u.)だけ外乱を加え、10 秒の時点から同定を開始した。各発電機の電気出力偏差と、回転速度を図 110 に示す。

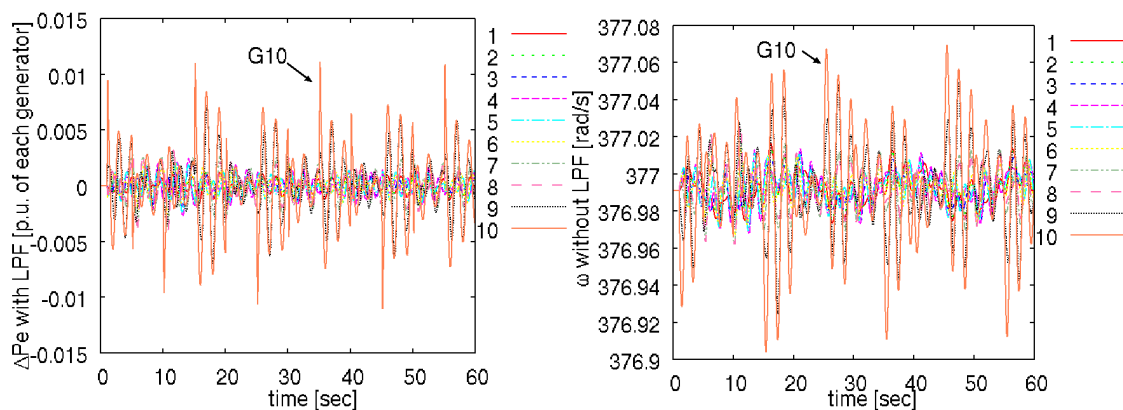


図 110: 各発電機の電気出力偏差と回転速度

外乱が加わる 5 秒ごとに、ノード 9 に近い発電機 G10 と G9 の波形の様子が大きく変わるが、支配的なモードの誘起に成功している。電気出力偏差と回転速度はともに、シミュレーション開始時の動作点を保ちながら動揺を続けている。各発電機の低次線形モデルで同定して得た固有値を、図 111 に示す。

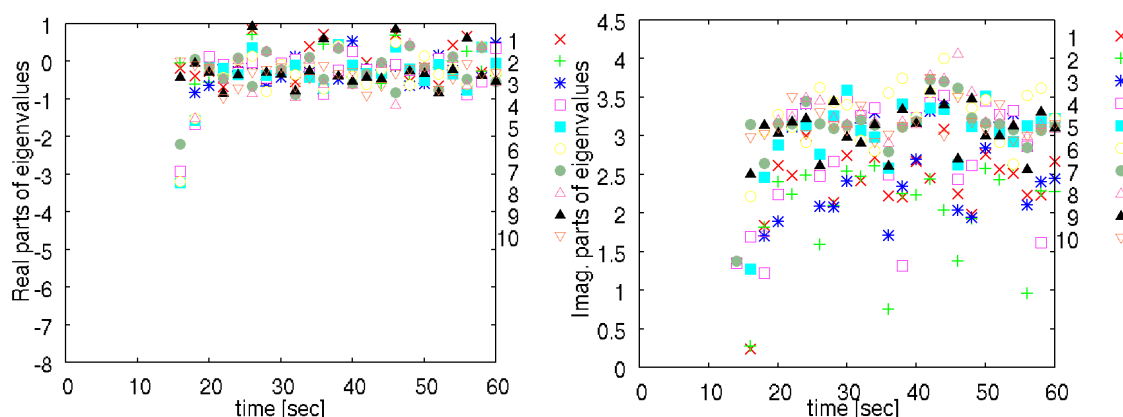


図 111: 各発電機の低次線形モデルで得た固有値

発電機 2 の虚部で、5 秒おきに変化が見られる以外は、外乱が加わるタイミングによる影響は目立たない。虚部では、支配的なモードに近い 2 から 3.5 付近に値が集中した。

5.3.3. PSS パラメータを線形計画法によりオンラインで設計する場合

次に、シミュレーション開始後 25 秒の時点から、PSS のパラメータを 2 秒に 1 回ずつ線形計画法によりオンラインで設計した。各発電機の電気出力偏差と回転子速度を図 112 に示す。

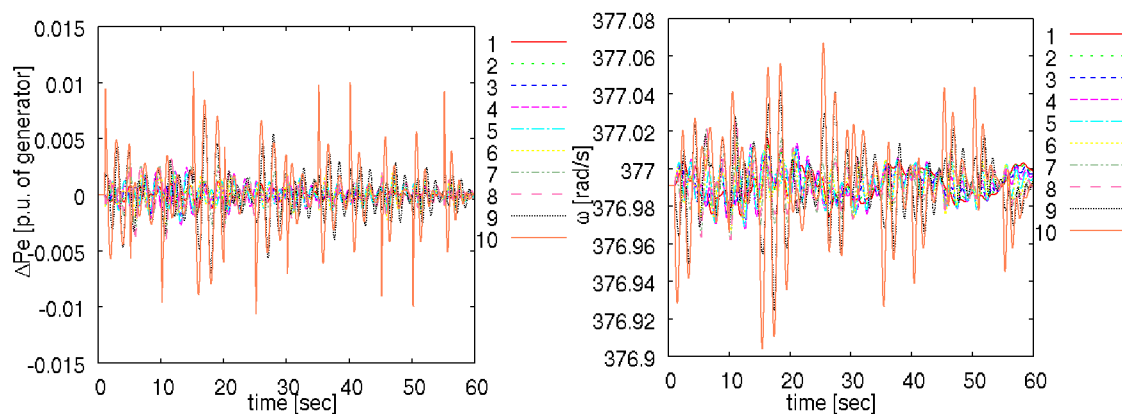


図 112: 各発電機の電気出力偏差と各速度

東側の発電機では、外乱が加わったときの過渡現象が 5 秒ごとに起きているが、波形の減衰や他の発電機での動揺は時間とともに改善し、安定性が高まったことが分かる。詳細モデルから直接計算した支配的固有値の推移を図 113 に示す。実部からは、設計開始後から緩やかに安定性が向上し、50 秒付近からは安定な状態が保たれたことが分かる。虚部からは、支配的モードの周期が少しずつ短くなっていったことが分かる。

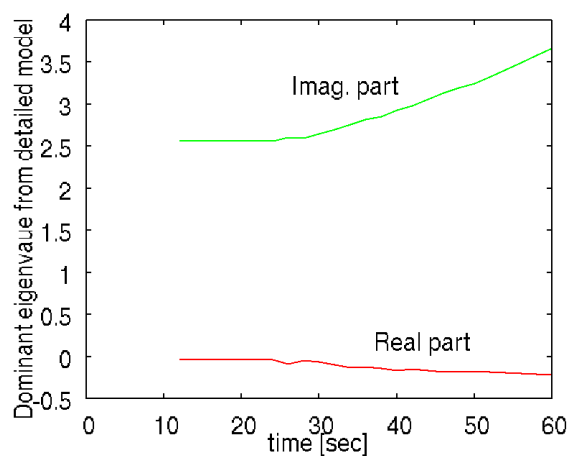


図 113: 詳細モデルから算出した支配的モードの推移

各発電機の低次線形モデルで算出した固有値を図 114 に示す。虚部では、安定性が高まるにつれて、少しずつ値の幅が広がっている。本来の支配的モードでは、時間とともに動揺周期が短くなっているが、同定した波形からは、やや反対の傾向が見られる。

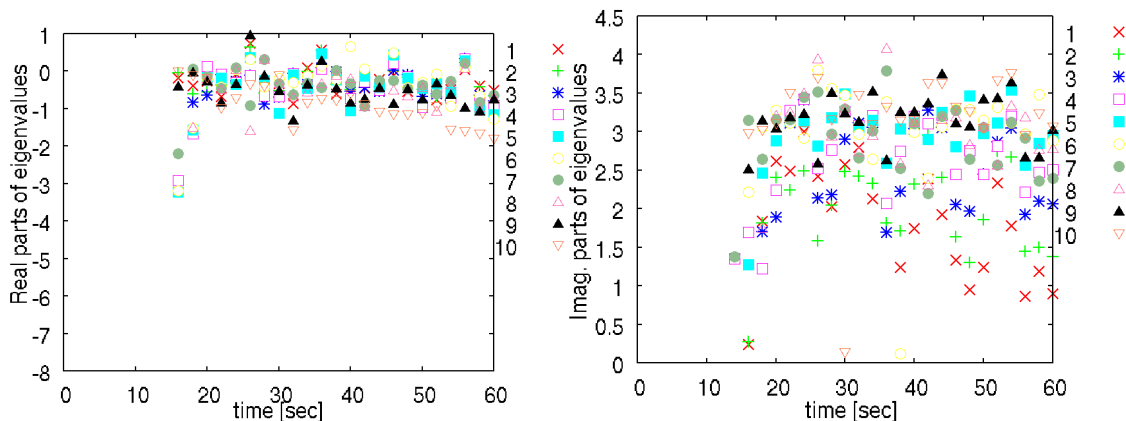


図 114: 各発電機の低次線形モデルから得た固有値

各 PSS パラメータの推移を図 115 に示す。k8 は、発電機 10 で特に強く上昇している。t2 と t3 は、位相補償の遅れ設定を弱めていることが分かる。

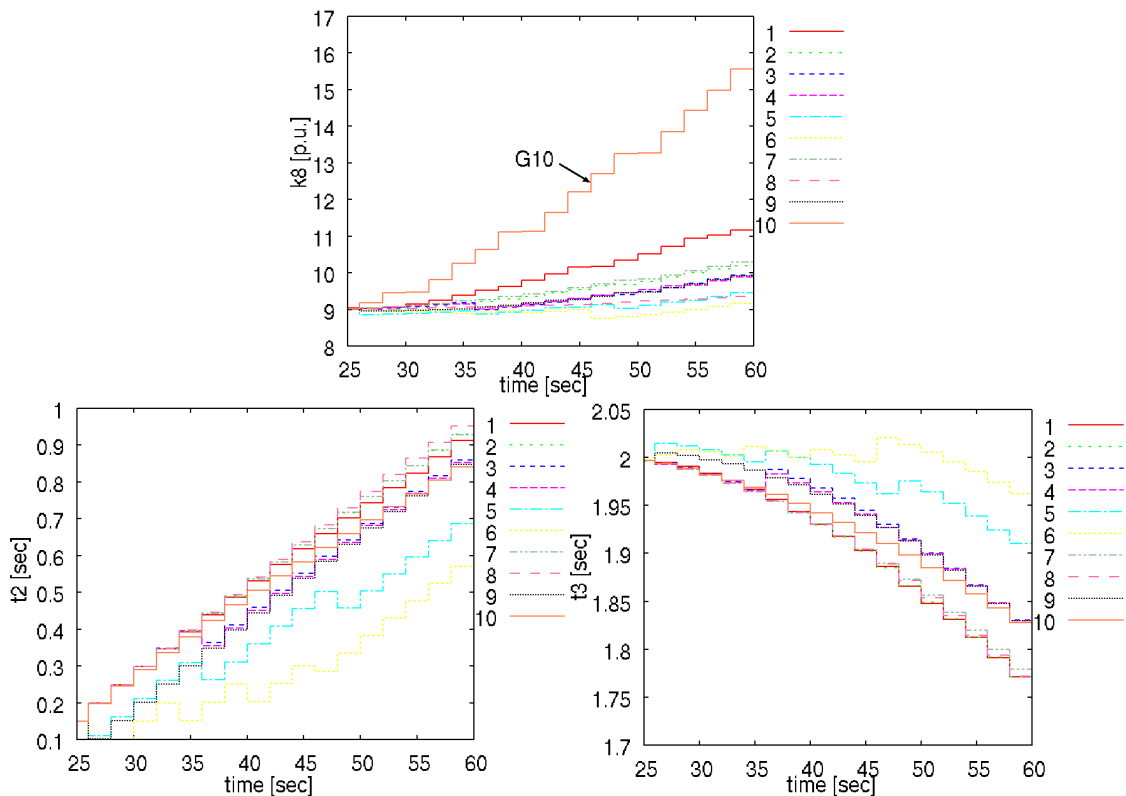


図 115: 各 PSS パラメータの推移

5.3.4. 方形波状の負荷を用いた解析に関するまとめ

方形波状の負荷外乱を用いて、動揺の誘起と各発電機での同定、PSS パラメータのオンライン設計を試みた。その結果、以下のことが分かった。

- 外乱を与えるたびに、動揺モードが誘起される。安定性がより高いほど、動揺波形はより早く収束する。
- オンラインの同定により、支配的なモードが検出される。ただし、動揺周期が変化する方向が、同定による固有値計算では逆に算出されるなど、必ずしも正確とは言えない面がある。
- オンラインパラメータ設計を行うと、安定性向上効果が発揮される。検討した結果では、全ての PSS パラメータが同じ方向に動き続けており、長期的に安定性を維持できるかについて、さらなる検討が必要である。

5.4. 2機の発電機からなる低次線形モデルの検討

これまででは、発電機 1 機ごとに、ひとつの低次線形モデルを考えてきた。実際の動揺現象は、複数の発電機が互いに影響を与え合っている場合もあり、1 機だけの情報からなるモデルだけでは、その性質を十分に把握できない可能性がある。そこで、発電機 2 台ぶんの情報を用いて、1 つの低次線形モデルを構築し、安定度の解析および PSS のパラメータチューニングを行った。モデルの中には例えば図 116 のように、2 つの PSS のモデルを 1 つのモデルに持たせているものもある。2 機を 1 つの低次線形モデルに入れることで、複数の発電機が互いに影響を与え合う性質が、低次モデルの内部で模擬され、1 台ずつ別々に扱う場合と比べ、系統全体の安定性をより正しくとらえることが期待される。

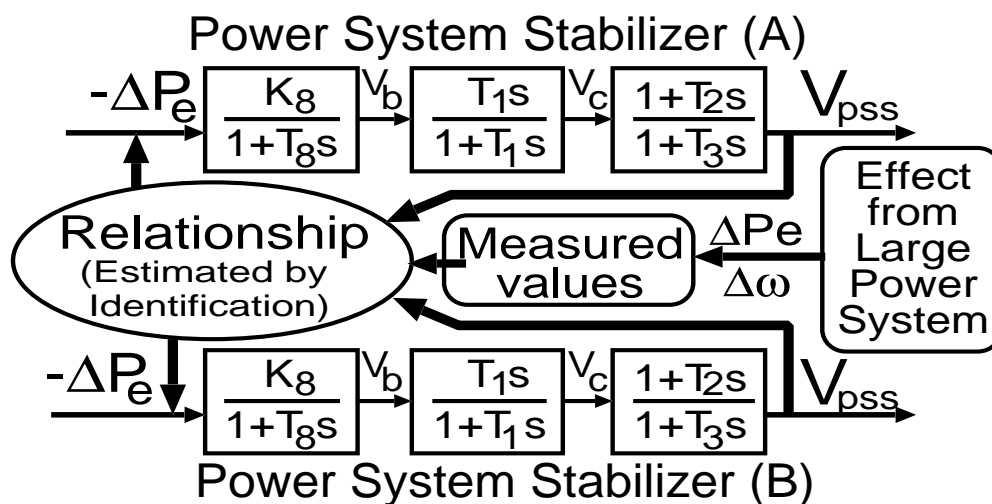


図 116: 2 台の発電機に関連する低次線形モデル

5.4.1. 2機を含む低次モデルの構成

数多くの発電機を持つ系統モデルから、代表的な 2 台の発電機を選び、選んだ 2 台だけからなる世界を仮定したモデルを考えた。どの 2 台をモデル化の対象とするかは、まずは手動で選ぶことにした。モデルの形や次数は、いくつかの種類を考えた。

5.4.1.1. ΔP 型 PSS により適応制御を行う 10 次のモデル

発電機 2 台を 1 つの線形モデルに入れるためには、同定すべき未知数を多くする必要がある。1 機ごとに 1 つのモデルを作る場合は、1 機あたり 6 つの未知数を同定するが、今回のモデルでは以下の式のように 18 の未知数を同定する。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \\ i & j & k & l \\ m & n & o & p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ x & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} \quad (\text{数式 21})$$

状態方程式の状態変数は、発電機 A と発電機 B を用いてモデルを組み立てる場合は、以下のようになる。ただし、右辺の右側の項は、時刻 0 における状態量で、動作点を意味する。

$$\begin{aligned} x_1 &= \omega_A - \omega_0 \\ x_2 &= P_{eA} - P_{eA0} \\ x_3 &= \omega_B - \omega_0 \\ x_4 &= P_{eB} - P_{eB0} \end{aligned} \quad (\text{数式 22})$$

また、 p_1, p_2 はそれぞれ、発電機 A, B の PSS の出力値である。同定すべき値は、abcdefghij klmnopxy の 18 個となる。

支配的なモードが 1 種類の場合は本来、2 つの未知数で全ての状況を表現可能だと考えられるので、数式 1 つあたりで 4 つか 5 つの未知数を同時に求める必要がある今回のモデルには、どれほど正確にモードを同定できるかについて、疑問もある。上記のモデルで同定を行った後で、以下の 10×10 行列を用いた状態方程式を組み立てて、2 台の PSS を含む低次線形モデルを完成させる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Delta\omega \\ \Delta Pe \\ \Delta PssOut \\ \Delta PssB \\ \Delta PssC \\ \Delta\omega \\ \Delta Pe \\ \Delta PssOut \\ \Delta PssB \\ \Delta PssC \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boxed{??0} & \boxed{??0} \\ \boxed{??0} & \boxed{??0} \\ \boxed{??0} & \boxed{??0} \\ \boxed{??0} & \boxed{??0} \\ \boxed{??0} & \boxed{??0} \\ \boxed{??0} & \boxed{??0} \\ \boxed{??0} & \boxed{??0} \\ \boxed{??0} & \boxed{??0} \\ \boxed{??0} & \boxed{??0} \\ \boxed{??0} & \boxed{??0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\omega \\ \Delta Pe \\ \Delta PssOut \\ \Delta PssB \\ \Delta PssC \\ \Delta\omega \\ \Delta Pe \\ \Delta PssOut \\ \Delta PssB \\ \Delta PssC \end{pmatrix} \quad (\text{数式 23})$$

対角のブロックだけを見れば、これまでの 1 機だけで作る 5 次のモデルとほぼ同じである。対角でない部分にある未知数が、2 機を 1 つのモデルにまとめたことで、新たに加わっている。

比較対象として、以下の 3 種類のモデルについて考えた。

5.4.1.2. $\Delta\omega$ と ΔP_e のモデル

前節の適応制御を行う場合のモデルから、PSS のモデルを取り除いたもので、未知数を16個としている。同定すべき未知数が少なくなるので、正しい動揺モードが得られる可能性が、高くなると期待される。PSS のパラメータを持たないため、オンライン設計には利用できない。波形データから、支配的なモードを同定する精度を比較する目的で用いる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \\ i & j & k & l \\ m & n & o & p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} \quad (\text{数式 24})$$

5.4.1.3. 連成モデル

発電機の角速度 ω と回転子位相角 δ を状態変数とする低次線形モデルの一種である。九州工業大学で提案され、実測データを用いたモデル同定に利用された^[4]。PSS を含まない4次のモデルは、オンライン設計には直接は利用できないので、同定の検証だけに利用する。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ e & f & g & h \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} \quad (\text{数式 25})$$

角速度と位相角は、互いが微分積分の関係にあるので、モデルの一部が最初から固定されている。また、動揺方程式に比較的近い数式モデルになっている。一方で、 δ は時刻 0 の値から大きく外れたままになりがちなので、基準点 S を別途用意し、各状態量を、基準点における値との差として利用する必要がある、情報が基準点と発電機(A, B)のどちらからもたらされたかを、分けられない問題点がある。

x_1, x_2 は発電機 A と基準発電機 S, x_3, x_4 は発電機 B と基準発電機 S の角速度と位相を用いて、以下のように定める。

$$\begin{aligned} x_1 &= \omega_A - \omega_S \\ x_2 &= (\delta_A - \delta_S) - (\delta_{A0} - \delta_{S0}) \\ x_3 &= \omega_B - \omega_S \\ x_4 &= (\delta_B - \delta_S) - (\delta_{B0} - \delta_{S0}) \end{aligned} \quad (\text{数式 26})$$

5.4.1.4. 従来の1機ごとに作る適応型PSSのモデル

発電機1台ごとに設ける、従来の適応型PSSのモデルである。図16で示した、位相補償が1段の ΔP_e 型PSSを持つ5次の低次線形モデルを用いる。適応制御の対象とする発電機を、2機ぶんの情報を持つ低次モデルで選んだ発電機2台と共通にした上で、互いのモデルを比較する目的で用いる。

5.4.1.5. PSSを持たない発電機ごとの2次モデル

同定の考え方を最も単純化すると、PSSの存在を無視し、発電機端で計測可能な2つの状態量だけを用いる最も単純なモデルとして、回転子速度と電気出力を用いた以下の2次モデルが考えられる。PSSのパラメータを含まないため、仮に動揺を同定できても、制御パラメータの設計はできない。状態変数の構成上最も単純な形のモデルであるため、同定を検証するときの比較対象として用いる。

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Delta\omega \\ \Delta P_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\omega \\ \Delta P_e \end{pmatrix} \quad (\text{数式 27})$$

5.4.2. 同定の検証

ここからは、上記の新しいモデルを用いて、同定やパラメータの設計をシミュレーションし、性質を比較する。まずは、PSSのパラメータを初期値に保ち、同定の性質を調べる。電気学会WEST10機系統モデルで、発電機1の出力と負荷ノード9の消費を、それぞれ0.5[p.u.](1p.u.=1000MW)ずつ増加させた安定限界に近い初期条件で、負荷ノイズにより動揺モードを誘起する。詳細モデルから計算した支配的なモードは、 $+0.00153 \pm j3.49$ (動揺の周期は1.80秒)である。PSSパラメータの初期値を、表8に示す。これらの設定は、4.6.1節における設定と同一である。シミュレーションの結果としてまず、各発電機で得られた電気出力の偏差、回転子速度、PSSの出力、位相角の偏差を図117に示す。安定限界付近の動揺現象がみられる。位相が一方向的に進んでいるが、時差の制御を行っていないためであり、位相の絶対量を評価しない限り、問題はない。波形を80秒からの5秒間だけ拡大したものを、図118に示す。周期が2秒ほどの一種類の動揺モードが比較的是っきりと見られる。番号が大きい発電機ほど、動揺の振幅が大きくなり、位相が遅れている。

表 8: PSS パラメータの初期設定値

k8	t2[sec]	t3[sec]	t8[sec]	t1[sec]
1.0	0.25	1.25	0.02	5.0

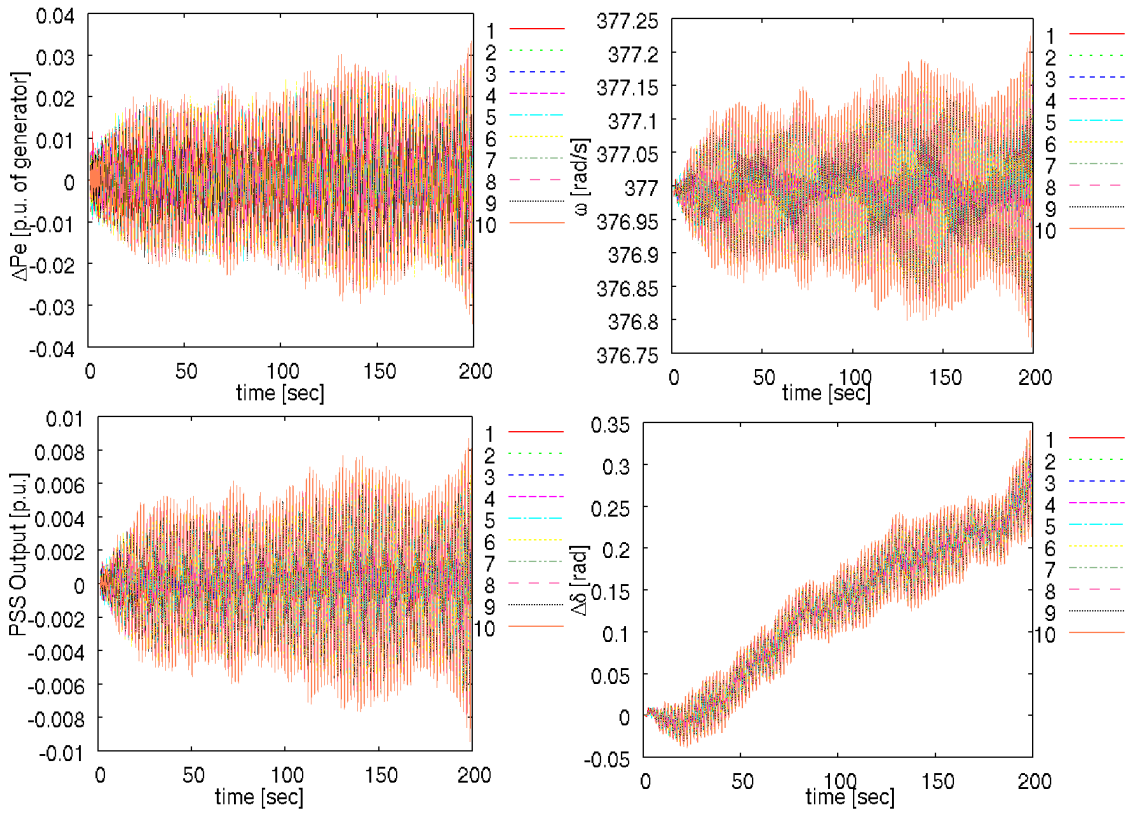


図 117: 各発電機の電気出力偏差・回転速度・位相

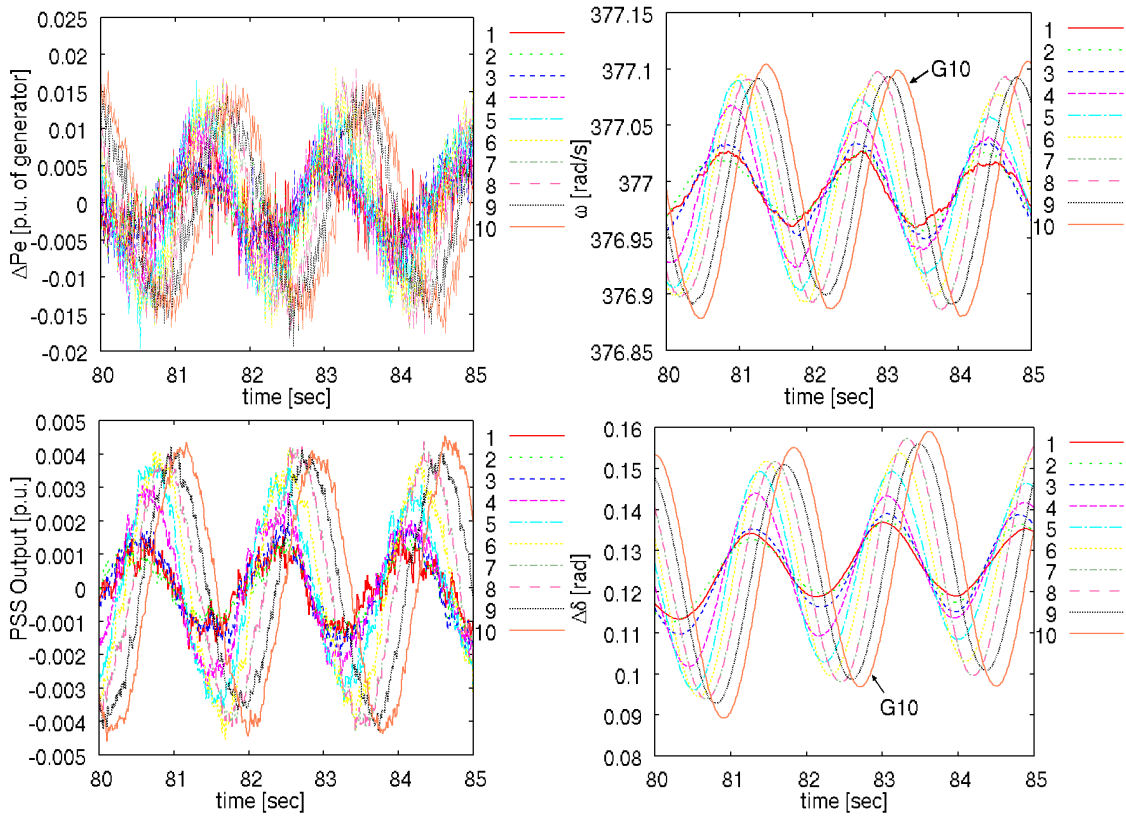


図 118: 各発電機の物理量の拡大図

次に、さまざまな種類の低次モデルを用いて行った、同定の結果を示す。ただし、発電機 A=G6, 発電機 B=G10, 基準点=G1 とした。

5.4.2.1. 連成モデル

まず、発電機 G6, G10 の回転速度偏差と位相偏差を用いた 4 次の線形モデルにおいて、 4×4 行列の要素を同定により求める同定を行った。同定により得られた未知数を図 119 に示す。値は、大きく乱れながらも一定の傾向を持っている。次に、モデルから算出された支配的な固有値を図 120 に示す。虚部において、ほぼ常に本来の動揺モードに対応する値が得られた点が、特筆される。

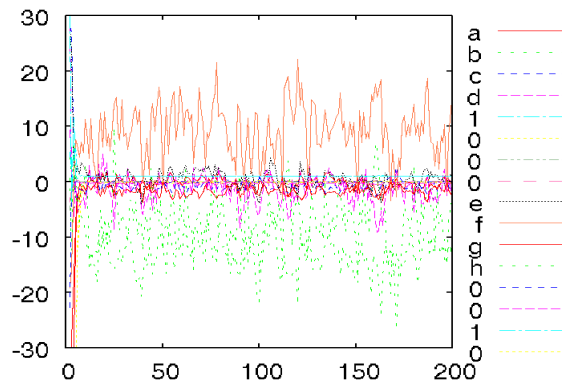


図 119: 同定により求めた各未知数の推移

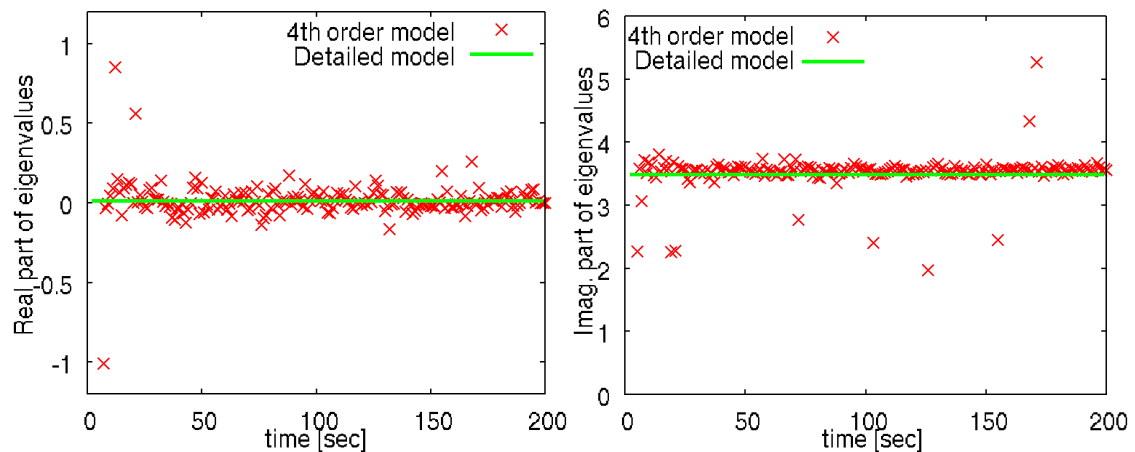


図 120: 連成モデル(δ, ω を利用)から求めた固有値

5.4.2.2. $\Delta \omega$ と ΔPe の4次モデル

次に、状態変数に、 $\Delta \delta$ のかわりに ΔPe を使った 4 次のモデルを用いて、同定を行った。同定により求められた 16 個の未知数を図 121 に示す。前回のシミュレーションで得

られた図 119 と比較すると、0 や 1 などに固定される変数が少ない。次に、同定から得られた固有値を図 122 に示す。前回の図 120 とほぼ同じ結果が得られている。連成モデルでは、3 台の発電機の計測情報を必要とするが、今回のモデルでは 2 台だけの情報でよく、より少ない手間で、安定度を評価できる。

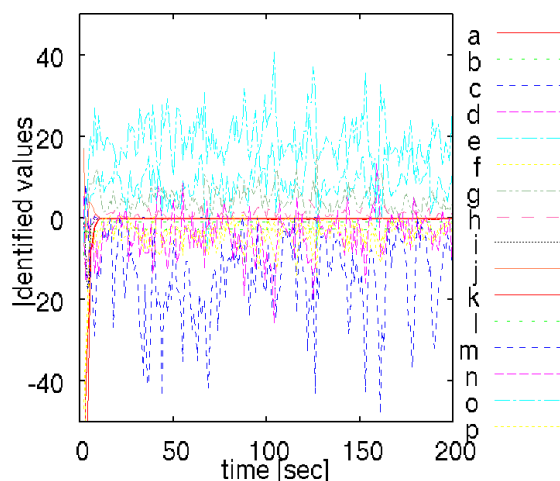


図 121：同定により求めた 16 個の未知数

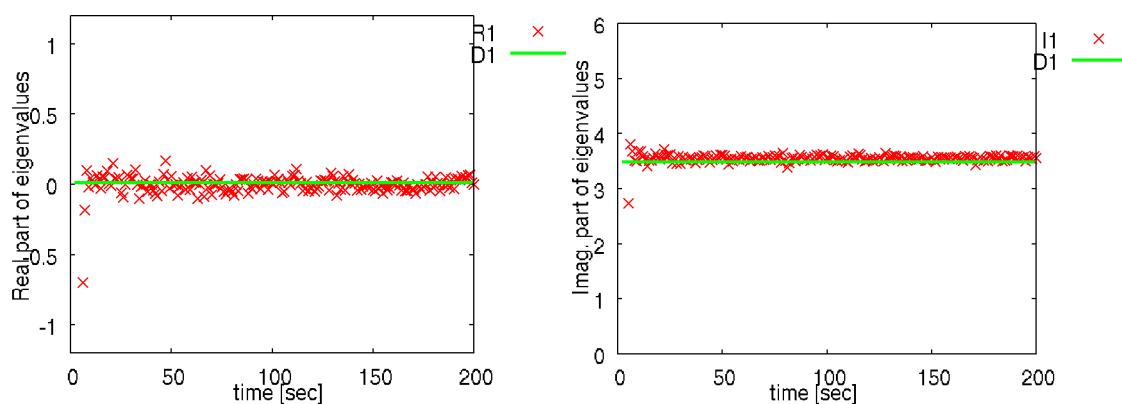


図 122: P_e, ω を用いた 4 次モデルで求めた固有値

5.4.2.3. 10 次の ΔP_e 入力型適応型 PSS モデル

次に、PSS を含めた閉ループのモデルで固有値を計算した。同定で用いる関係式は、4 入力 1 出力の関係が 2 つと、5 入力 1 出力の関係 2 つからなる。入力数の違いは、入力側に PSS の出力波形を用いるかどうかの違いである。同定により求める関係は、同定アルゴリズムへの入力数と同じ個数の係数として得られる。入力数が多くなると、一度に多くの未知数を算出する必要があるため、未知数の独立性が低下する可能性がある。オンライン設計は行わず、同定だけを行い、未知数を求めた結果を図 124 に示す。左側の a から p ま

では、見た目上は前回の図 121 と似ている。電気出力との関係を示す部分では、2 つの値がともに大きく現れている。次に、10 次のモデルから求めた固有値を図 124 に示す。ただし、虚部については 2 番めに支配的な固有値までプロットしてある。前回の図 122 と比べると、実部・虚部ともに、ややばらつきが大きくなっている。虚部では、値が 0 付近となり動揺周期を検出しない事例が散見されるようになった。PSS のブロックをモデルに組み込むことで、動揺周期が見られなくなる背景には、PSS のブロックの増加により、同定に必要な未知数が増えたものの、未知数にそれほどの独立性が見られないことから、誤差が大きくなっていることなどが考えられる。虚部では、低次モデルから算出された中で最も支配的な固有値が、実際の動揺周期を見失うときは、2 番めに支配的な固有値が動揺周期をとらえる傾向が見られた。

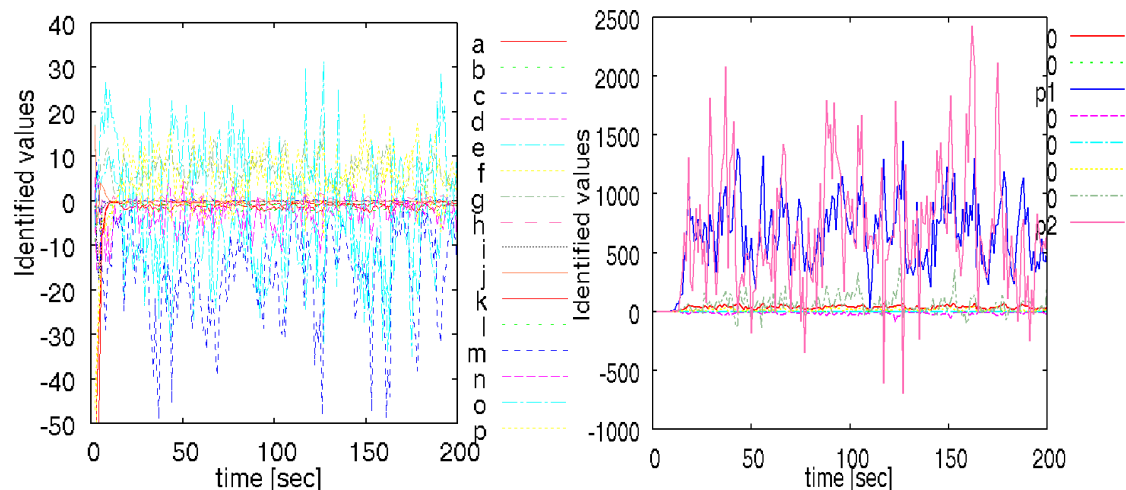


図 123 : 同定により算出された 10 次モデル中の 18 個の未知数

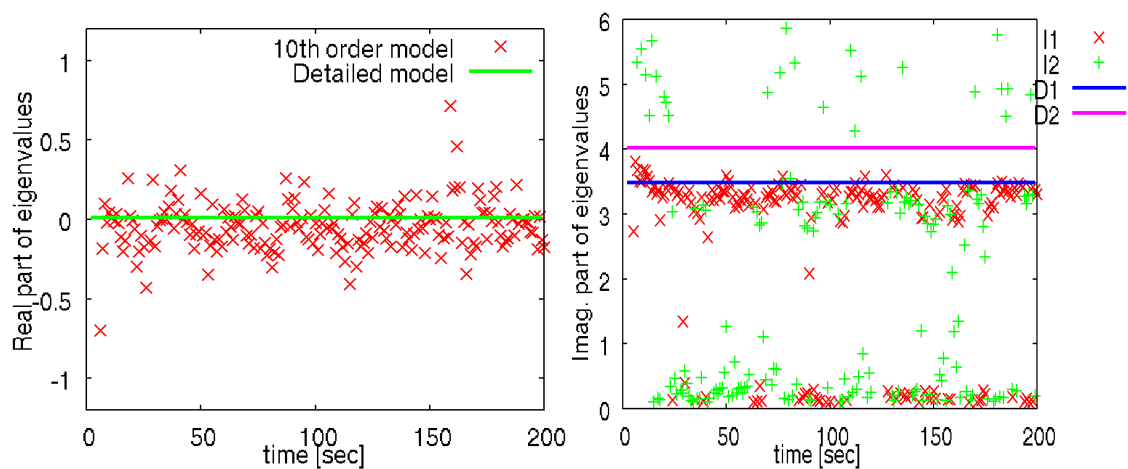


図 124: 10 次の線形モデルから算出した固有値

5.4.2.4. 従来の1機を1つのモデルとした適応型 PSS モデル(5次)における同定結果

発電機6と発電機10で、発電機1台だけの情報を用いる従来の5次モデルを用いて、低次線形モデルで同定を行った。得られた固有値を図125に示す。実部は、10次モデルの場合と同じ程度ばらついている。虚部についても、動揺モード本来の周期を示す部分と、ゼロ付近に見られる動揺周期を得られない値とに分かれ、10次モデルを用いた場合と似た結果になった。10次モデルで用いた発電機と、今回表示している発電機はともに、G6とG10であり、5次のモデルを別々に2つ用意しても、10次のモデル1つにまとめても、得られる固有値に、大きな違いは見られなかった。

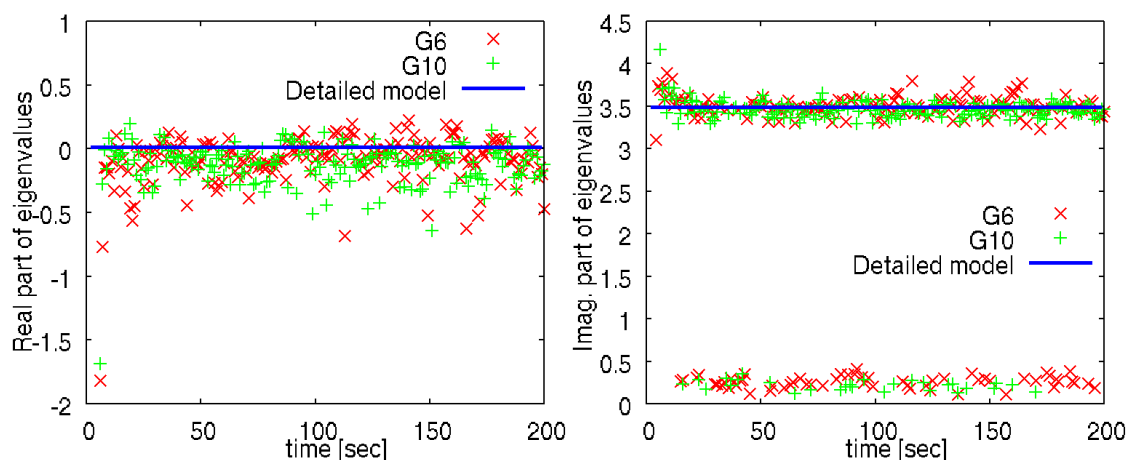


図 125: 1機単独で同定する5次モデルにおける固有値

5.4.2.5. 1機ごとに設けた2次モデルでの同定結果

発電機ごとに設けた2次モデルで同定を行って得た固有値を、図126に示す。実部では、5次モデルよりもばらつきが小さくなった。虚部では、5次モデルや10次モデルで見られた0付近の値がなくなり、常に本来の動揺モードに近い値が得られた。値はやや正方向に偏っている。

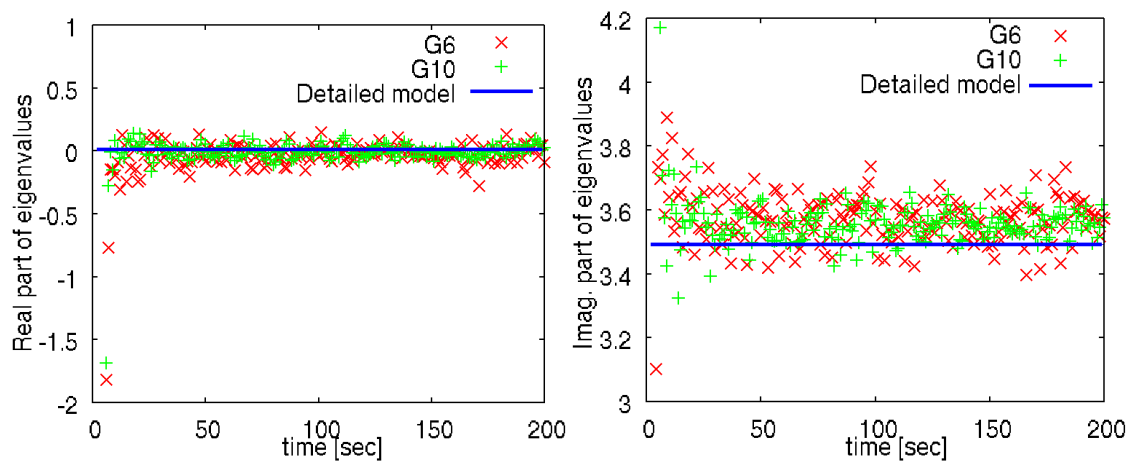


図 126: 2次モデルで得られた固有値

5.4.3. 3分木法による PSS パラメータ設計の検証

次に、3分木法を用いて PSS のパラメータの設計を行った。PSS のモデルには、位相補償が1段の ΔPe 型を用いた。

5.4.3.1. 2機を用いる10次線形モデルによる設計

まず、発電機 G6 と G10 の2機を1つのモデルにまとめた10次モデルを用いて、パラメータ設計を試みた。パラメータ設計の方法は、設計対象となる発電機 A、発電機 B のパラメータを、1つずつ単位量上げ下げしながら、低次線形モデルの支配的固有値を見比べ、パラメータを「上げる」「下げる」「止める」のうち最も望ましい方向を選択する、3分木法を採用した。シミュレーション開始後1秒から25秒までは、同定だけを行い、25秒からは毎秒1回ずつ設計を行った。以前の検討事例とは異なり、設計対象となる発電機は G6、G10 の2台だけである。(k8, t2, t3)の毎秒可能な移動幅は、(0.01, 0.05, 0.05)とする。各発電機の電気出力偏差・角速度・PSS出力・回転子の位相を図127に示す。まず安定化したのち、発電機 G6 の PSS 出力が次第に大きくなり、140秒付近で系統全体が発散へ向かっている。不安定化していく145秒からの5秒間における物理量を図128に示す。動揺の周期は1秒弱であり、パラメータを調整した発電機 G6 と G10 が中心となって、不安定化していく様子が分かる。各発電機の PSS パラメータが変化する様子を図129に示す。動揺現象が同定されているかどうかに関わらず常に、ゲインは上昇し、位相補償は進み側へ変化している。次に、10次の線形モデルと詳細モデルから算出された固有値を図130に示す。詳細モデルから算出した固有値実部からは、130秒付近から急速に不安定化した様子が分かる。虚部からは、不安定化時に急速に動揺周期が短くなる様子が読み取られる。一般的に、閉じたループがある制御系では、ゲインを上げ続けると、自発的な振動現象が発生し、不安定化する。今回のシミュレーション結果は、その典型例を示しているわけである。10次モデルを用いた同定では、急速な動揺モードの変化に、ある程度までは追従できているものの、適応制御でパラメータを移動させる方向を正しく算出するだけの精度は、得られていないと言える。

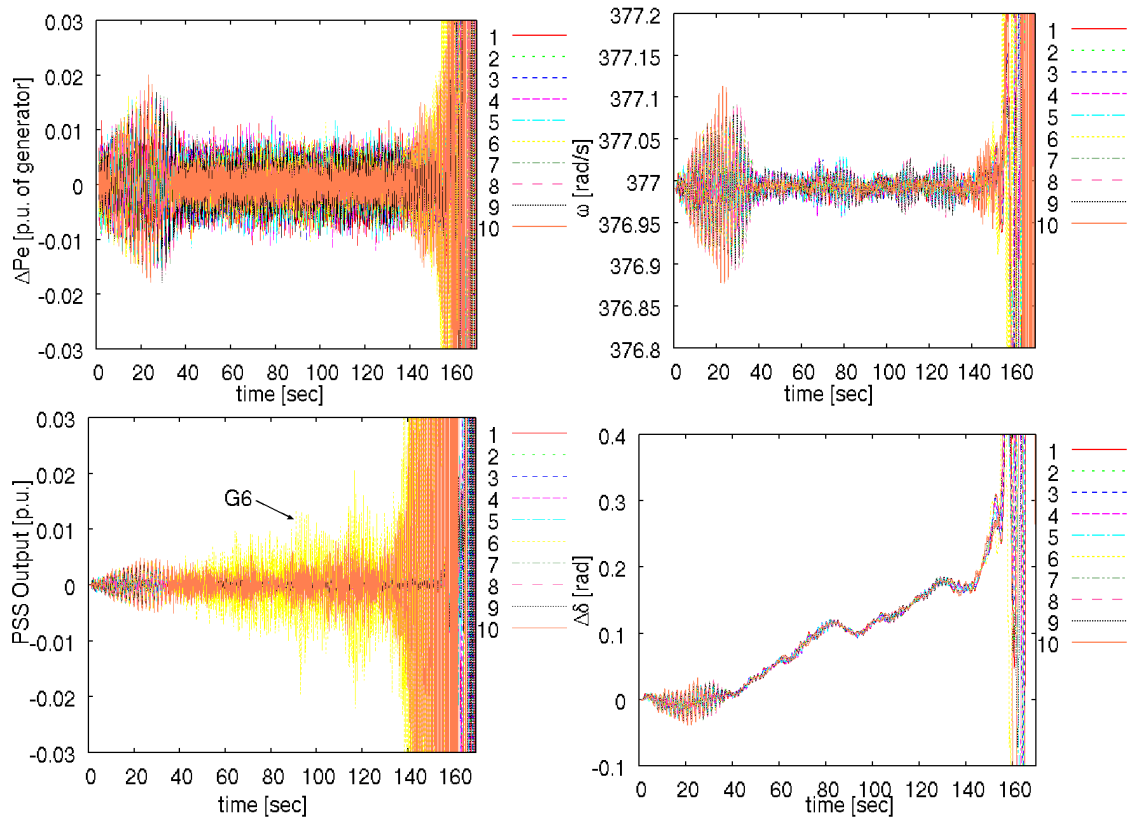


図 127：各発電機で検出された物理量

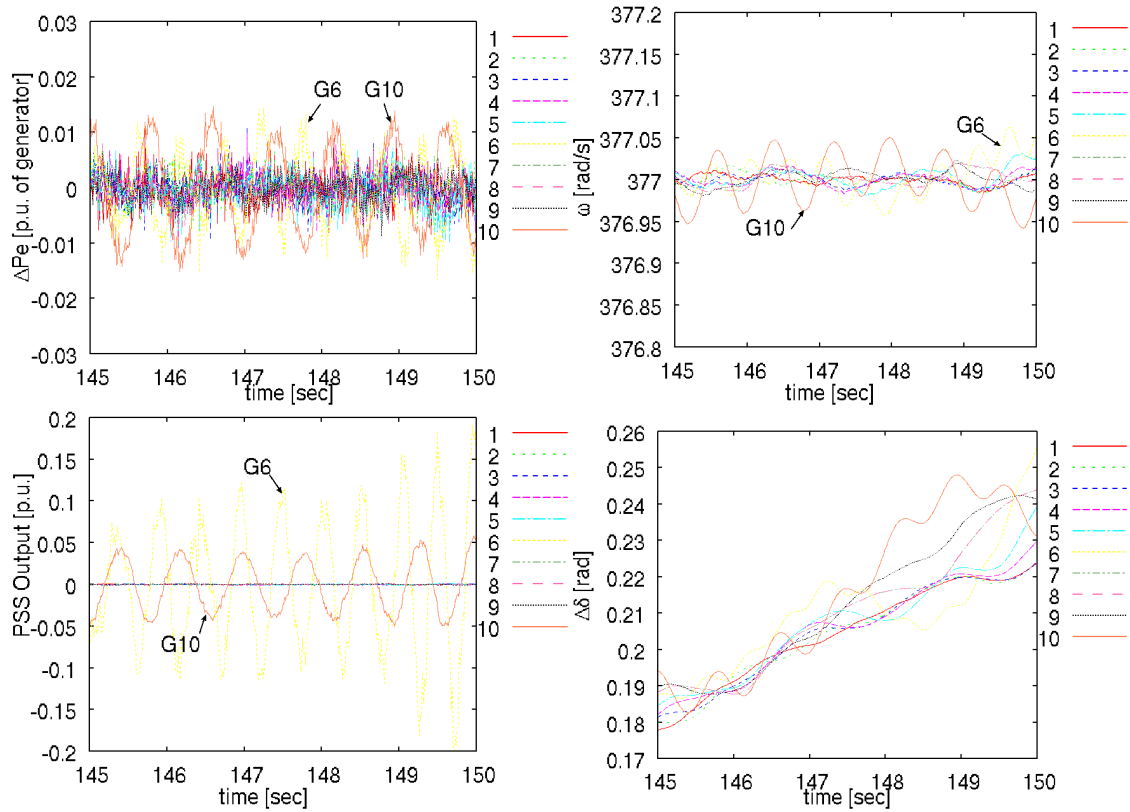


図 128：不安定化時における各発電機の物理量

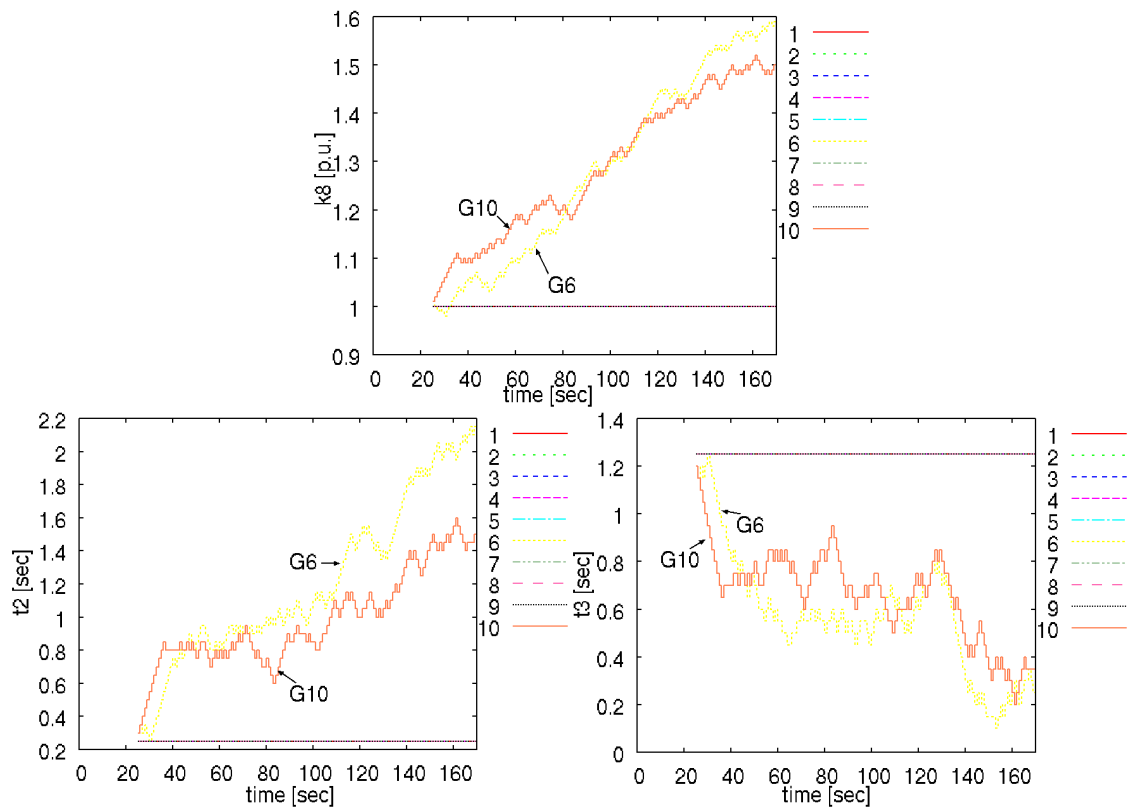


図 129 : 各 PSS パラメータの推移

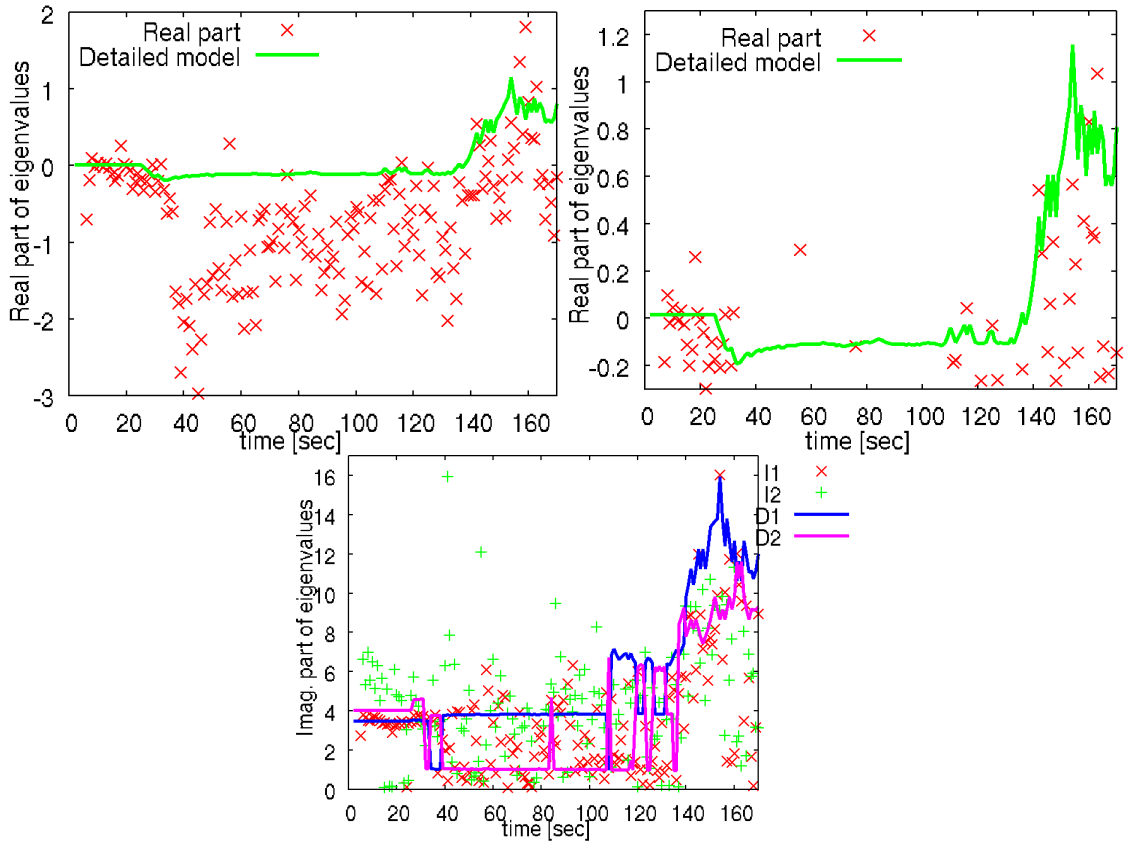


図 130 : 10 次モデルと詳細モデルで同定された固有値

5.4.3.2. 1機ずつをモデル化した低次線形モデルを用いた G6, G10 の設計

次に、発電機 G6 と発電機 G10 にそれぞれ、図 16 に示す低次線形モデルを設定して、2 台の発電機の PSS で、個別に 3 分木法による適応制御を行った。残り 8 台の発電機には、パラメータを表 8 に示す初期値に固定した PSS を設置した。各発電機の出力波形を図 131 に示す。およそ 130 秒の時点で発散した。発電機 6 の PSS 出力がとくに大きくなっている。次に、設計対象となった発電機における PSS パラメータの変化を図 132 に示す。パラメータが変化する傾向は、10 次モデルを用いたシミュレーションと似ているが、位相補償の t_2 と t_3 がほぼ等しい状態が、40 秒から 80 秒までの間に、比較的長く続いた点が、やや異なる。設計対象となった発電機の 5 次モデルで同定された固有値を図 133 に示す。シミュレーション初期の動揺現象は把握しているが、130 秒付近で急激に現れる不安定現象の把握は、発電機 G10 でわずかにできているだけで、急激な変化に同定が追いつかないようである。このような事態に陥る背景には、同定により動揺を把握していない期間にも、パラメータが特定の方向に変化し続ける点があげられる。低次モデルを用いた 3 分木法によるパラメータ設計では、動揺現象が見られない波形を用いて同定を行ったときに、パラメータの移動方向がランダムとはならず、一定の方向に動き続ける傾向があるようだ。

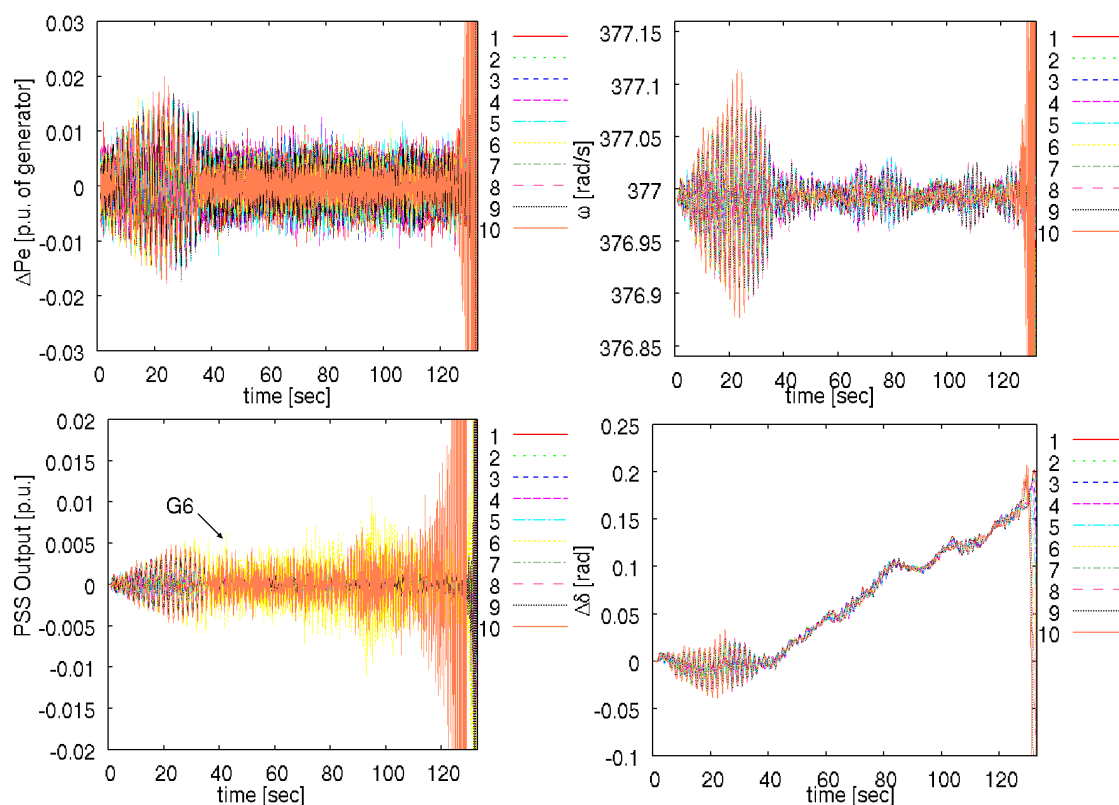


図 131：各発電機における物理量の推移

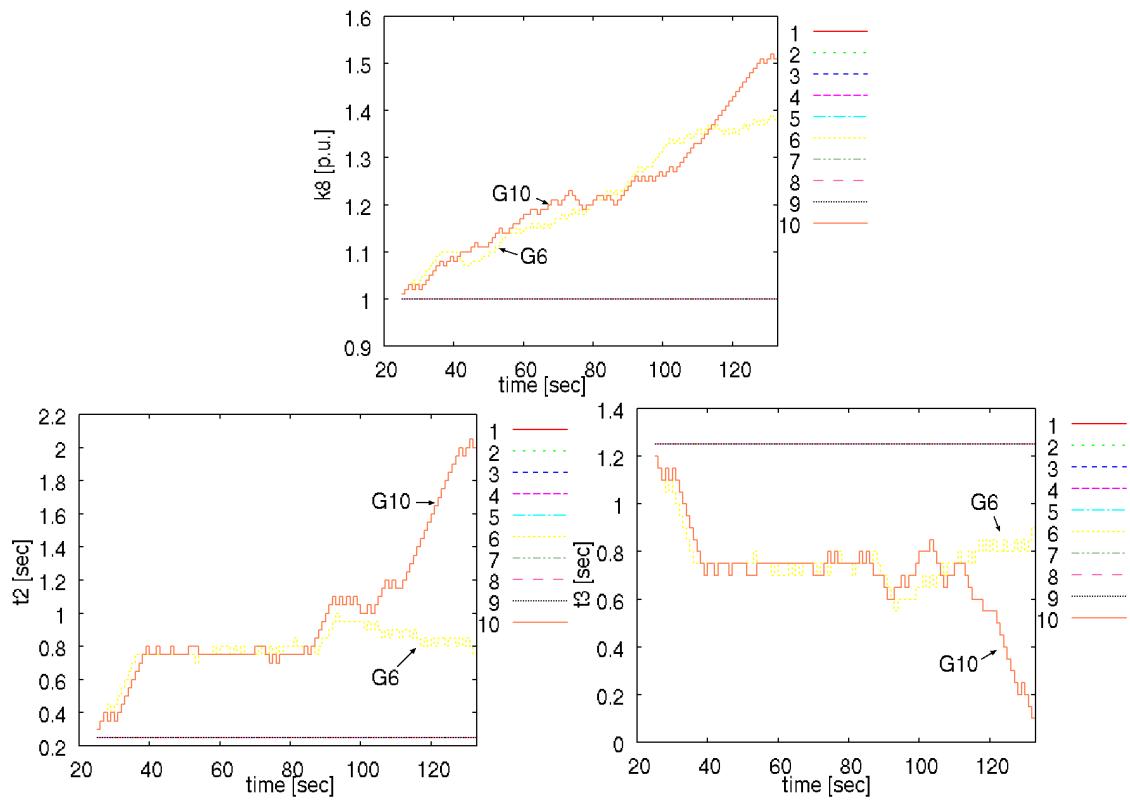


図 132 : 設計対象となる発電機におけるパラメータの推移

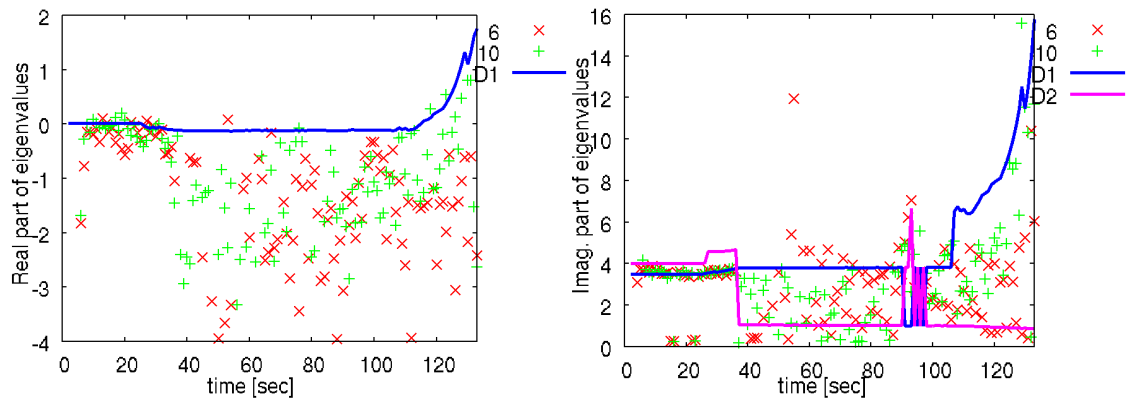


図 133 : 設計対象発電機の 5 次モデルと詳細モデルにおける支配的な固有値

5.4.3.3. 詳細なモデルから求めた固有値から直接 3 分木法でパラメータを操作する場合

シミュレーション波形の算出に用いている詳細なモデルから直接求めた固有値を用いて、発電機 G6 と G10 を対象に、3 分木法で安定度が改善する方向にパラメータを操作した。4.9.3 節との違いは、パラメータを更新する対象を発電機 G6 と G10 に絞っている点である。図 134 に示す各発電機の物理量は、パラメータ設計開始直後に直ちに安定化される、理想的な経過をたどっている。PSS のパラメータが変化の様子を図 135 に示す。全てのパラメータが収束している。ゲインは、発電機 6 でむしろ下げている。位相補償は、ともに遅れ補償の範囲内にあるが、発電機 10 では補償を弱めるように変化している。詳細なシステムモデルから算出した、支配的な動揺モードを図 136 に示す。最も不安定な動揺モードが素早く安定化し、その後は 2 番めに不安定な固有値と実部が等しくなり、互いにトレードオフの関係になったため、収束した。虚部では、異なる動揺周期を持つモードの間で、何番目に支配的であるかの順位が頻繁に入れ替わっていることが分かる。理想的なパラメータ設計が行われたことにより、異なる動揺周期を持ついくつかの動揺モードが、減衰定数をほぼ同じにして、共存していることが分かる。

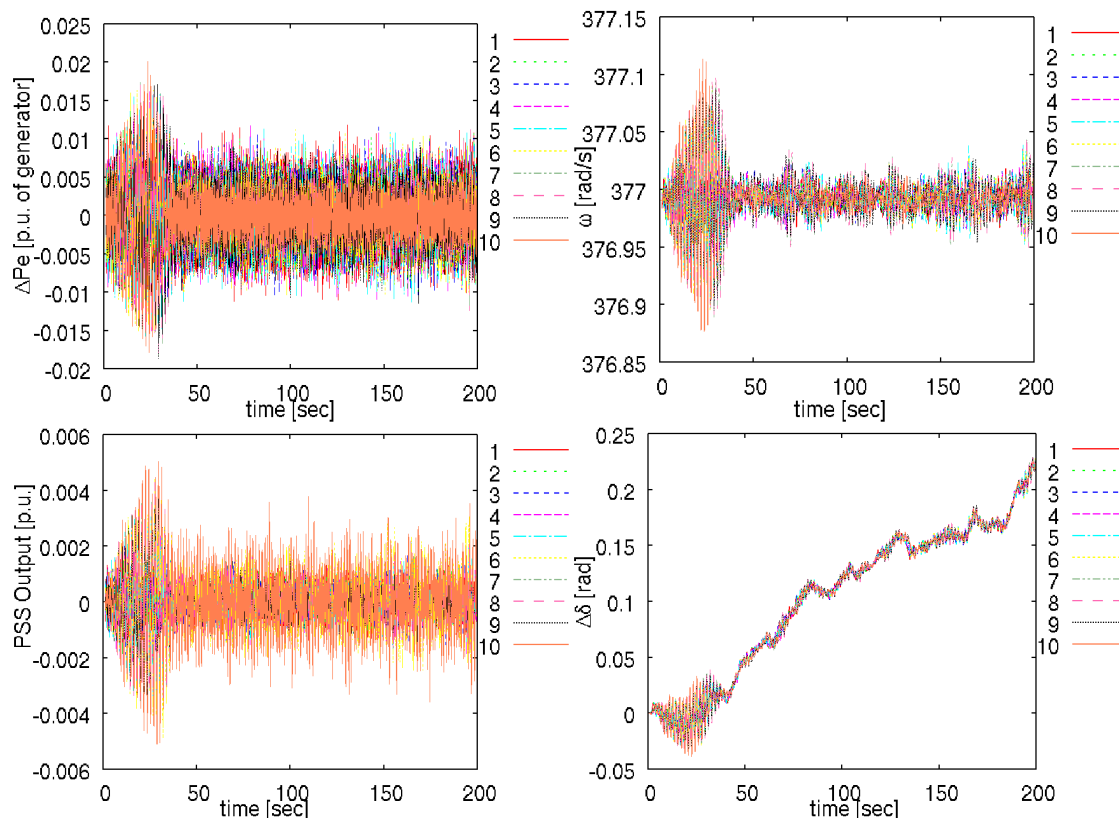


図 134 : 理想的な設計を仮定した場合の各発電機の物理量

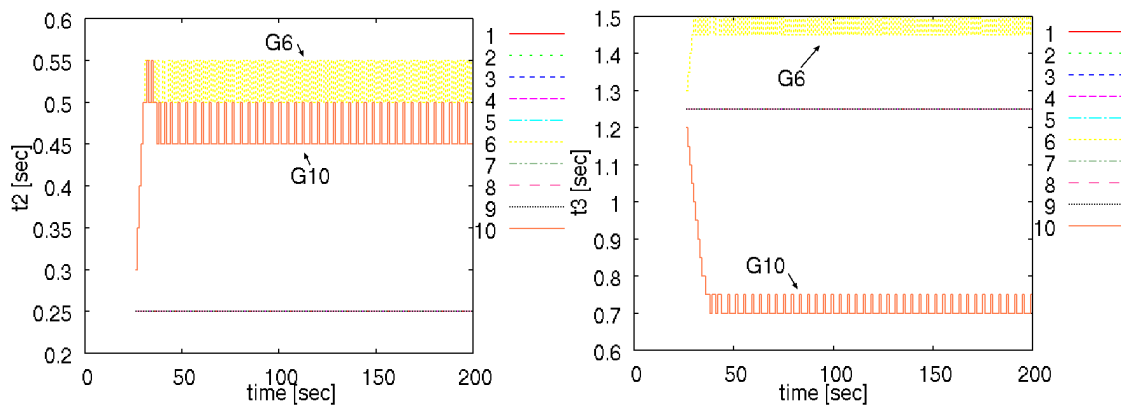
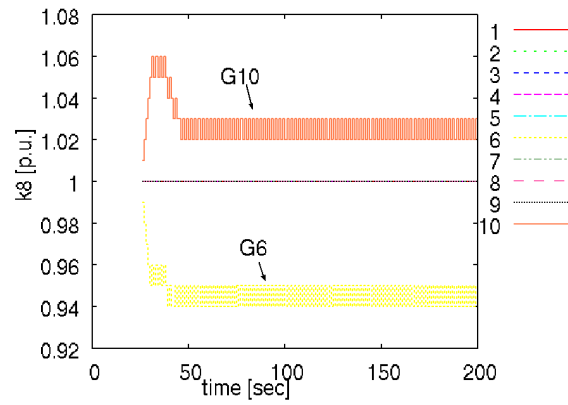


図 135 : 理想的な設計が行われた場合の PSS パラメータの推移

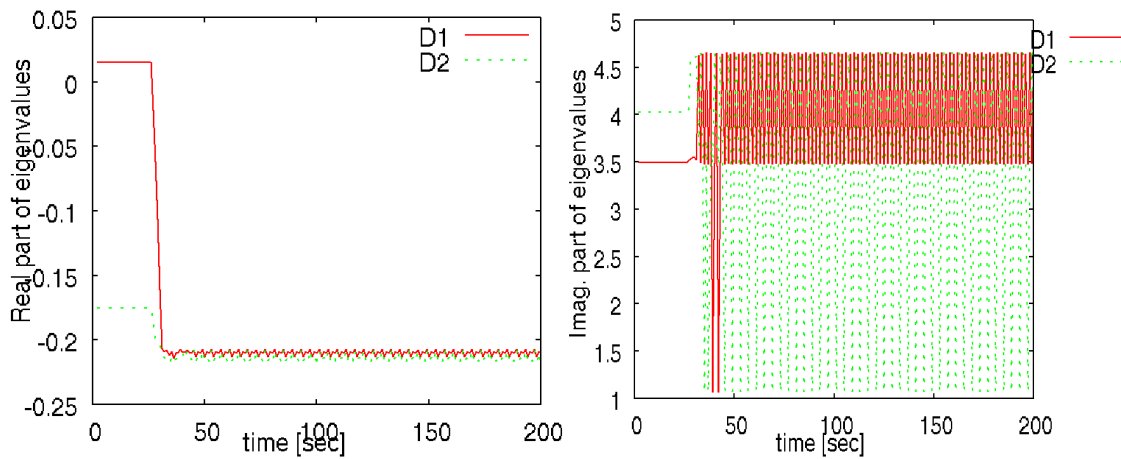


図 136 : 詳細な系統モデルから算出した支配的な固有値(上位 2 つ)

5.4.4. 線形計画法による PSS パラメータの設計を検証

5.4.4.1. 10 次モデルを用いた同定から線形計画法を用いてパラメータ設計を行う場合

次に、発電機 G6 と G10 を用いた 10 次モデルから固有値感度を計算し、線形計画法を用いて、PSS のパラメータを設計した。線形計画法では 3 分木法とは異なり、最も支配的な固有値以外の動揺モードも合わせて、実部の改善量の最大化を目指すため、異なった結果が得られる可能性がある。各発電機における物理量を図 137 に示す。発散せずに、安定化した。設計対象の PSS パラメータが変化の様子を示した図 138 を見ると、発電機 G6 と G10 で、変化の方向や大きさに違いが見られる。ゲインでは、発電機 G10 が G6 よりも大きくなり、位相補償がともに遅れを保っている点では、詳細モデルから設計した場合に近い結果となっている。10 次のモデルおよび詳細モデルから算出した固有値を図 139 に示す。詳細モデルの実部を見ると、変化が緩やかである。虚部も、2 番めに支配的な固有値との入れ替わりが起こりにくく、大きな変化が見られない。シミュレーション末期まで、10 次モデルから算出された支配的な固有値の虚部は、詳細モデルから算出された支配的な固有値の虚部に近い値である。同定により得られた 2 番めに支配的な固有値(虚部)は、詳細モデルで 2 番めに支配的なモードとは一致しない。

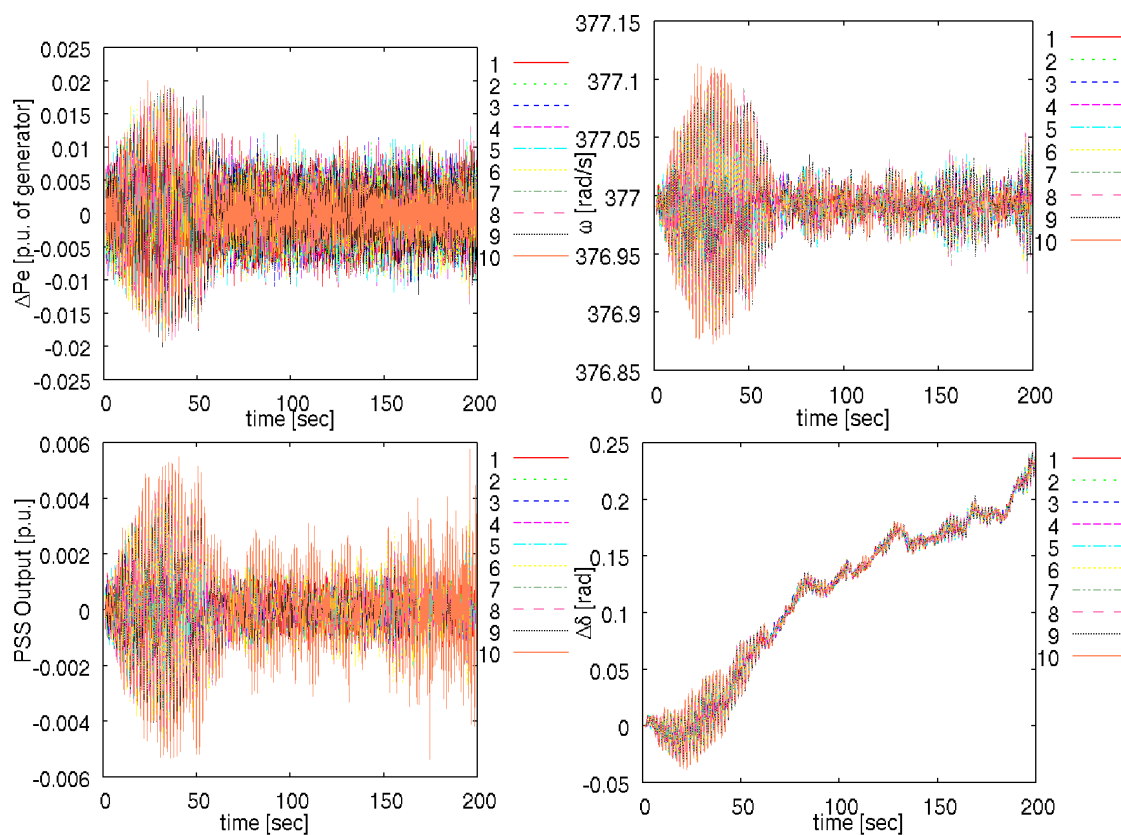


図 137 : 各発電機における物理量の変化

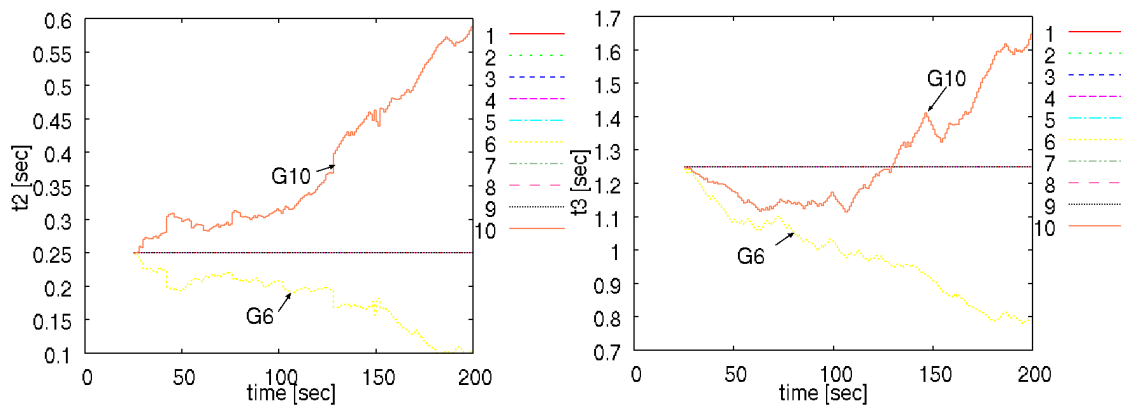
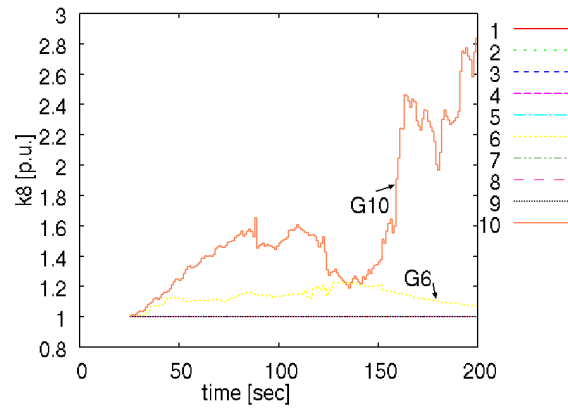


図 138 : 設計対象発電機における PSS パラメータの変化

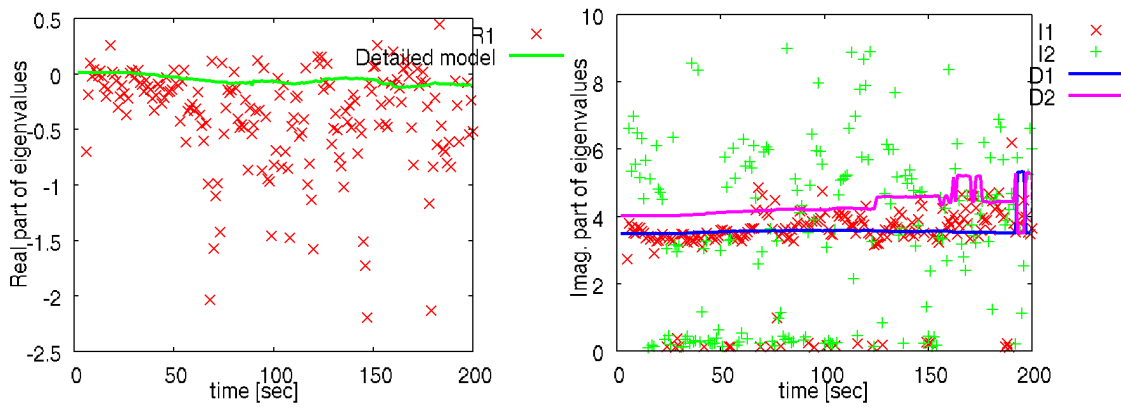


図 139 : 10 次モデルと詳細モデルから算出した支配的な固有値(虚部は上位 2 つずつ)

5.4.4.2. 各発電機の5次モデルによる同定から線形計画法を用いてパラメータ設計を行う場合

次に、発電機 G6 と G10 だけを対象に、5 次モデルでの同定結果をもとに固有値感度を求め、線形計画法を用いて PSS のパラメータをオンライン設計した。4.8.2 節と比べれば、発電機 G6 が設計の対象となる点が異なる。各発電機端子で得られた物理量を図 140 に示す。波形からは、およそ 40 秒付近で動揺が消え、それ以降は安定している。PSS の出力は、発電機 G6 と G10 で、大きくなった。設計対象となった PSS パラメータの変化を図 141 に示す。ゲインが上昇を続け、位相補償パラメータが補償を打ち消す状態を保ちながら変化する傾向は、4.8.2 節と共通している。設計対象発電機における 5 次モデルと、詳細なモデルから求めた支配的な固有値を図 142 に示す。詳細モデルから求めた虚部を見ると、最も支配的なモードは、別の固有値には入れ替わらなかった。しかし、動揺モードを正しくとらえられたのは、最初の 40 秒間に限られ、その後には得られた固有値はランダムに分布している。

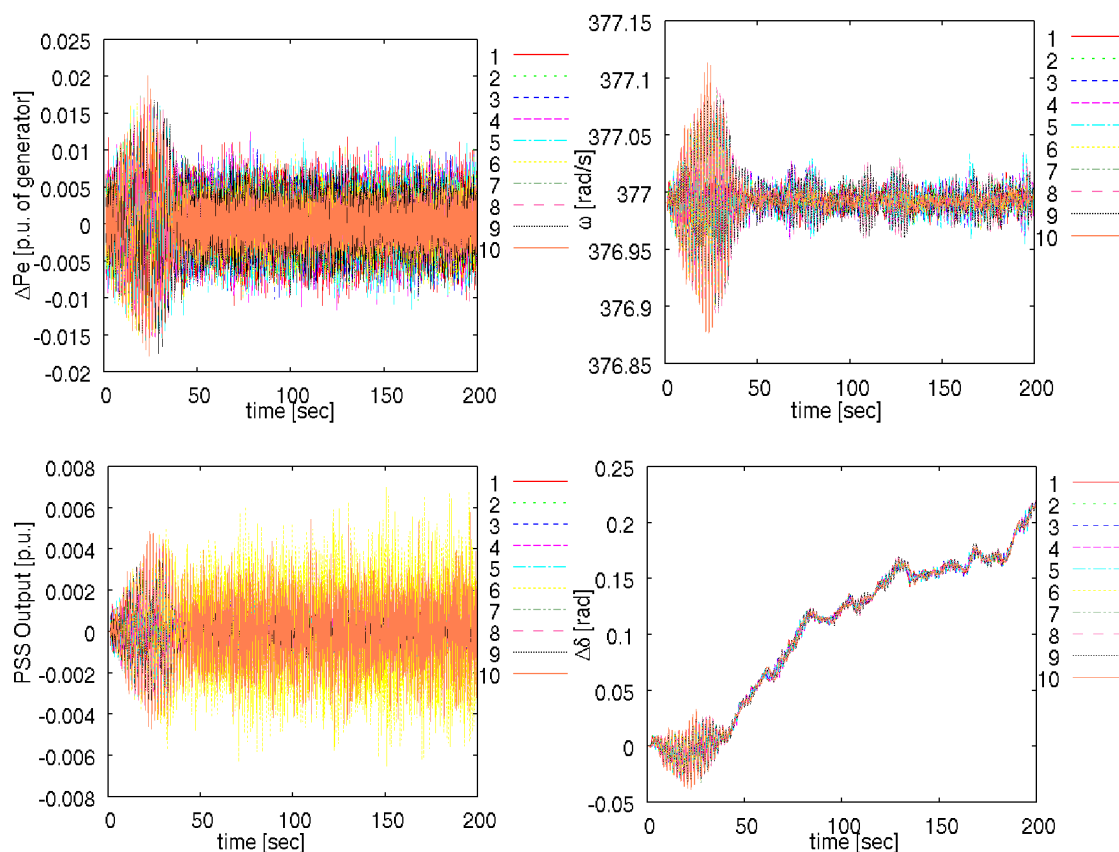


図 140 : 各発電機端子で得られた物理量

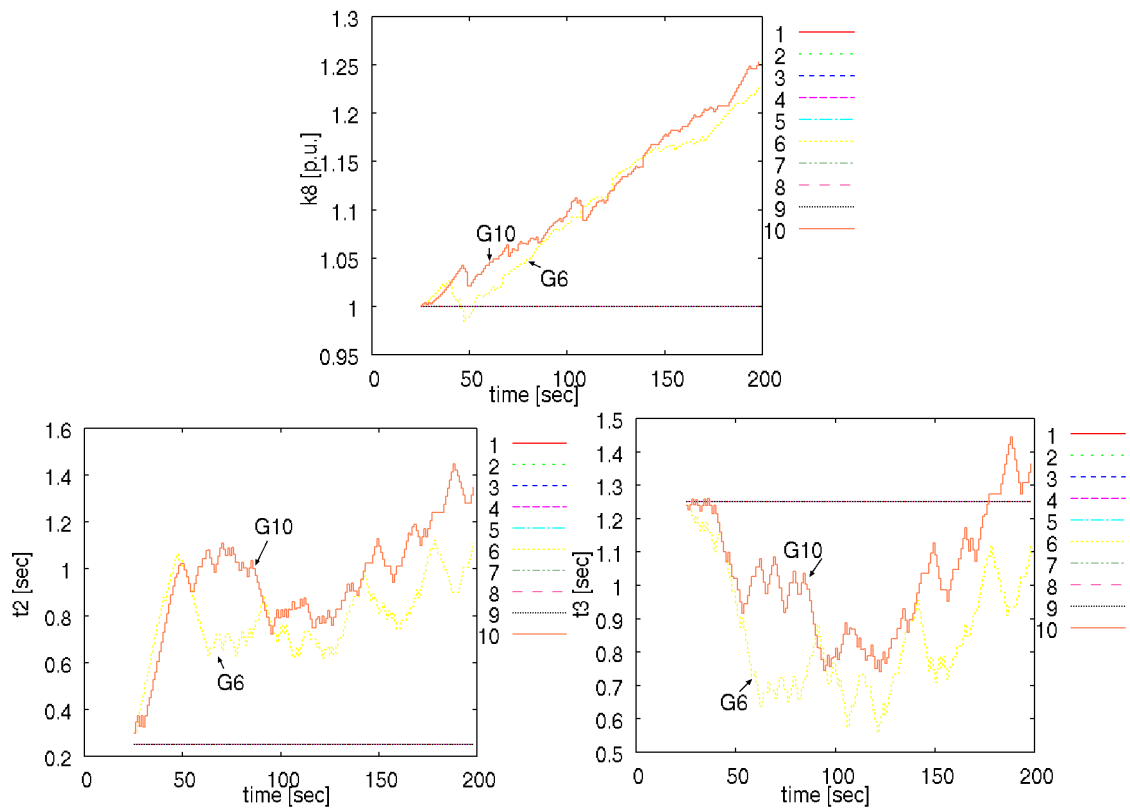


図 141：設計対象発電機における PSS パラメータの変化

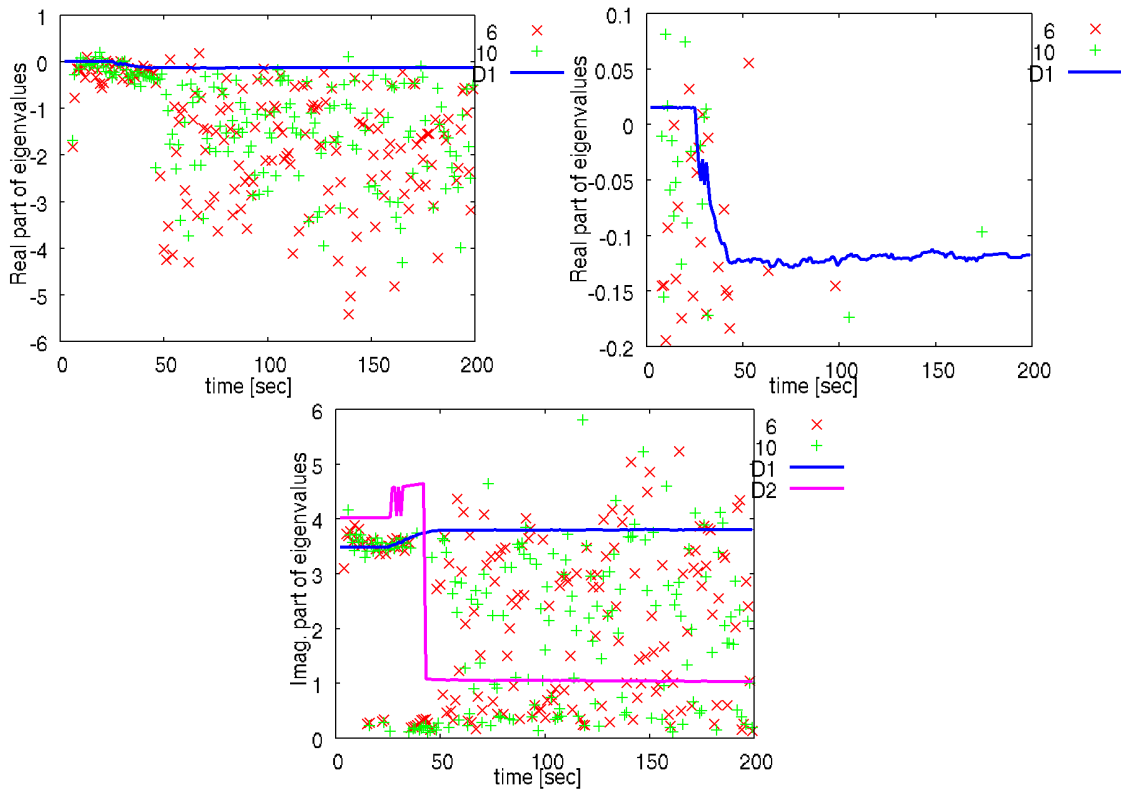


図 142：設計対象発電機の 5 次モデルと詳細モデルから求めた固有値

5.4.5. PSS パラメータが順次変化するときの同定の評価

同定を行い、その結果を用いて PSS のパラメータを更新する手法では、設計開始時は動揺が波形に現れているため、動揺現象を固有値としてとらえられるが、動揺現象が収束すると、同定からは有用な情報が得られなくなった。どのような状況まで、同定が動揺波形を反映した固有値をとらえられるかを、モデルごとに比較するためには、系統の状況を互いに合わせた上で、低次モデルの形を入れ替えながら評価を行う必要がある。そこで、シミュレーション結果として多く見られた、初期に安定限界付近にあり、中盤に定態安定となり、末期に振動発散する事例を再現するように PSS パラメータを操作し、そのとき各低次モデルがどのような固有値を同定するかを比較する。ただし、PSS のパラメータは、低次モデルの種類や同定の結果によらず、常にあらかじめ決めたカーブに従って動くものとする。この方法を用いることで、オンラインパラメータ設計には直接利用できない 4 次のモデルや 2 次のモデルの性質を評価することもできる。

5.4.5.1. 同時に複数の動揺モードが不安定となる事例

まず、5.4.3.1 節で行った発散事例のシミュレーション結果について、PSS パラメータが移動する様子を記録した。次に、記録されたパラメータの遷移を再現しながら、さまざまな低次モデルで同定を行った。図 127 と図 128 に見られるように、設計対象となっている発電機 6 と 10 が不安定化することにより、系統全体が不安定化して発散する。このとき、PSS 出力の 145 秒から 5 秒間を見ると分かるように、動揺の周期が発電機 6 と 10 で異なっている。同時に複数の動揺モードが不安定化し、2 つの動揺周期が混在した状態で振動発散する流れとなっている。この波形を用いて、各モデルで同定を行った。まず、各発電機に設定した 5 次モデルから算出した固有値を図 143 に示す。100 秒付近までは、虚部が 4 付近のモードをとらえている発電機が多かった。パラメータが変化した G6 と G10 に注目した図 144 を見ると、140 秒以降では、発電機 G6 は周期が短い(虚部が大きい)モードへ、発電機 G10 は周期が長い(虚部が小さい)モードへ追従していることが分かる。実際の波形と対応が取れており、各発電機で支配的となった動揺現象を正しく把握している。それ以外の発電機では、1 秒以下の短周期モードを検出していない。次に、各発電機の 2 次モデルで同定した固有値を図 145 と図 146 に示す。虚部に着目すると、発電機 G6 と G10 は本来の動揺モードを示す値よりも大きな値を取る傾向がある。再度不安定化してからは、短周期の動揺モードに従った値となっている。発電機 G6 の虚部が、やや低めになっている。次に、2 次モデルを 2 機ぶん連結した形に近い、 ΔP と $\Delta \omega$ を状態変数に用いた 4 次モデルにおける同定から得られた固有値を図 147 に示す。結果は、2 次モデルで個別に発電機 G6 と G10

で同定を行った場合とよく似ている。「×」を4次モデルで最も不安定なモード、「+」を2番めに不安定なモードとしてプロットしているが、140秒以降では、4次モデルで最も不安定なモードは詳細モデルで2番めに不安定なモードに近く、4次モデルで2番めに不安定なモードは、その付近でばらついた値となっている。次に、発電機 G6 と G10 の ω と δ を状態変数として考えた4次モデル(連成モデル)を用いた同定の結果について、得られた固有値を図148に示す。虚部を見ると、150秒付近から、急に動揺モードへの追従を行わなくなったことが分かる。 δ や ω は、Pの変動を積分して得られる性質を持つため、短周期化する動揺現象をとらえられなくなったと考えられる。発電機 G6 と G10 の5次モデルを組み合わせるようにして作った10次のモデルを用いて求めた固有値を図149に示す。5次モデルを用いた同定と、比較的近い結果が得られた。再度不安定化したときは、詳細モデルとして2番めに支配的な、周期が比較的長い動揺モードに追従するが多かった。

このように、発電機ごとに異なる周期を持つ動揺モードが発生する場合は、発電機ごとに別々に同定を行う5次モデルが、最も適切に動揺モードをとらえた。それ以外のモデルでは、不安定な動揺モードのうち、どれか1つに追従できる場合が多かったが、もう一つのモードに対しては、値の精度が低下した。

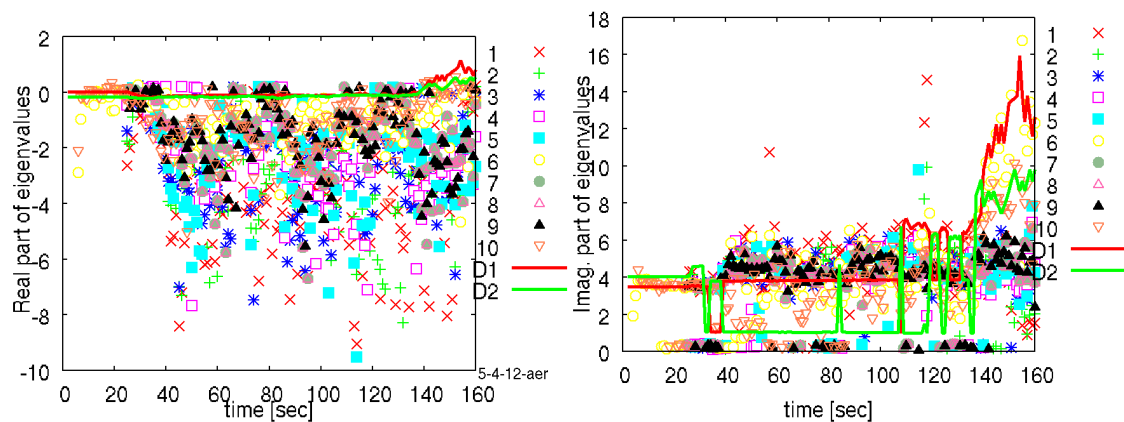


図 143 : 各発電機の5次モデルから得た固有値

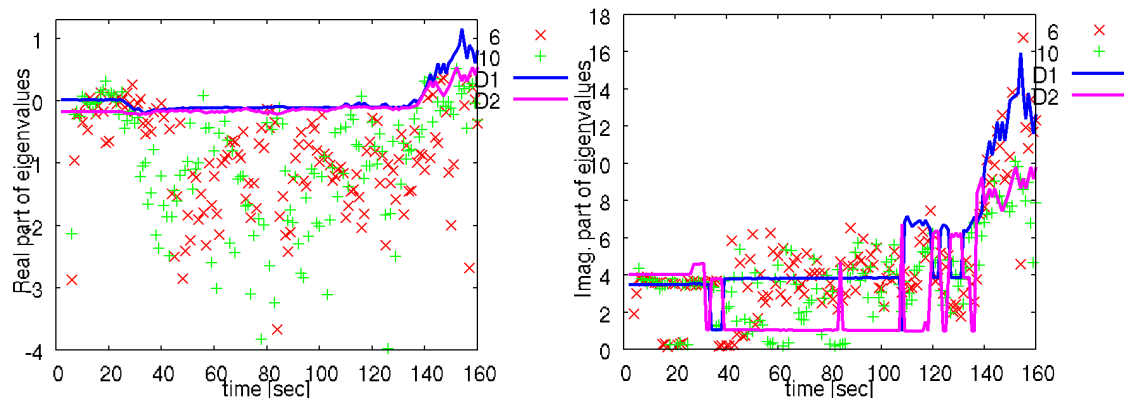


図 144 : パラメータ更新対象の発電機に関する5次モデルの固有値

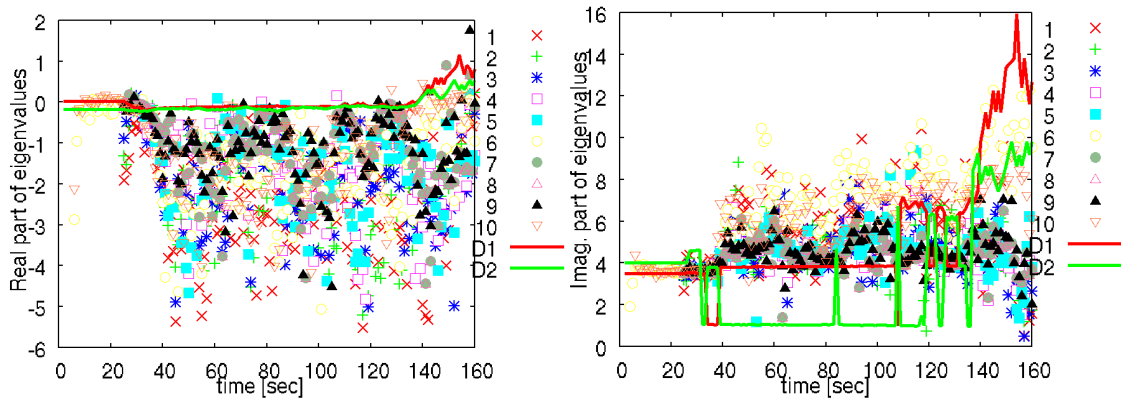


図 145 : 各発電機で考えた 2 次モデルにおける固有値

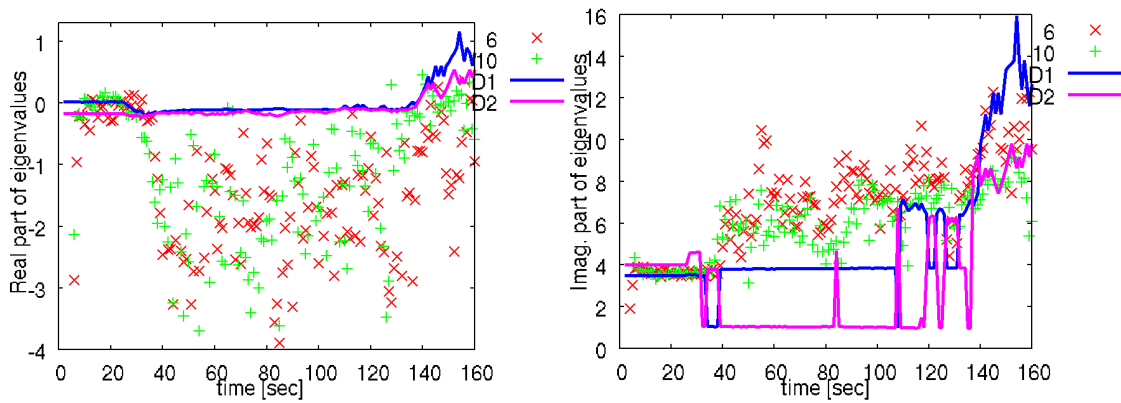


図 146 : パラメータ設計対象発電機で考えた 2 次モデルにおける固有値

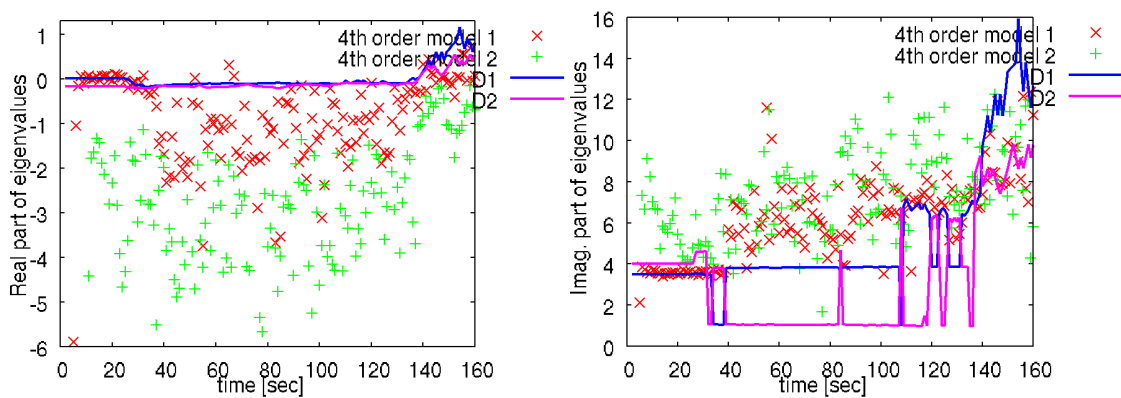


図 147 : 2 機の ΔP_e と $\Delta \omega$ を状態変数に用いた 4 次モデルにおける固有値

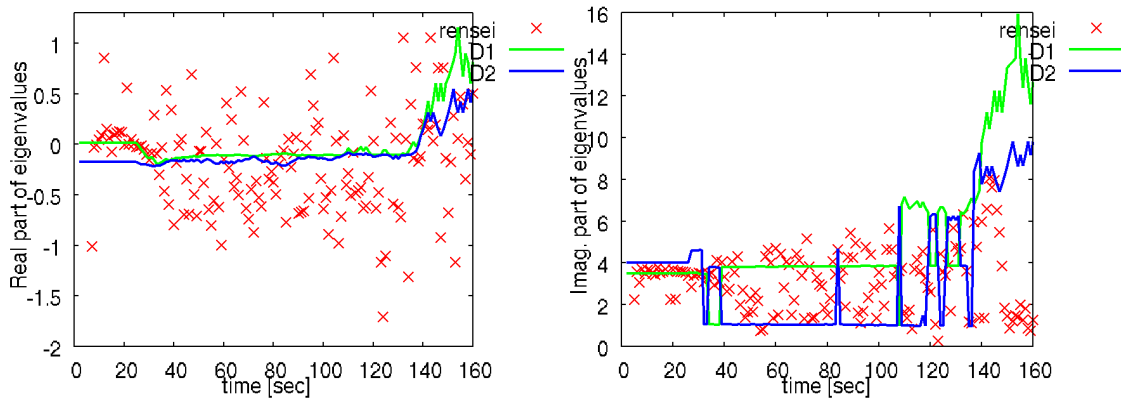


図 148 : 2機の $\Delta \omega$ と $\Delta \delta$ を用いた連成モデルから得られた固有値

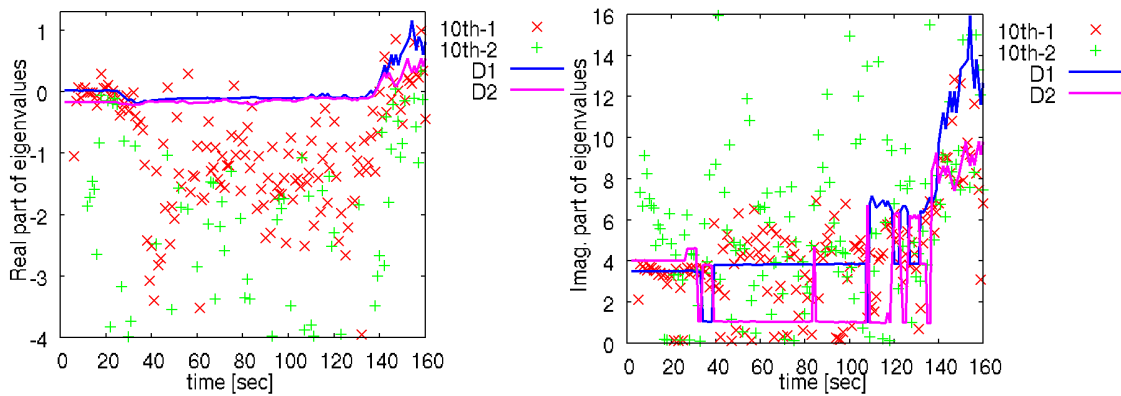


図 149 : オンライン PSS 設計に用いた 10 次モデルから得た固有値

5.4.5.2. ひとつの動揺モードが不安定化する事例

次に、初期条件と PSS パラメータが時間とともに取る値を変更して、同定に用いる波形を再度生成した。今回の動揺現象は、発電機 G10 が単独で不安定化し、ほかの発電機を巻き込みながら、系統全体が不安定化し、発散する事例である。各発電機の端子で得られる物理量を図 150 に示す。発電機の電気出力と回転速度は、70 秒台に不安定化している。PSS の出力を見ると、発電機 G10 の振幅が 60 秒台から急速に増大しており、不安定化の原因となったことがうかがえる。不安定化が進む 70 秒からの 5 秒間を拡大して、図 151 に示す。発電機 G10 に関する値が単独で急速に増大する様子が分かる。PSS パラメータが変化の様子を図 152 に示す。全ての発電機の PSS で、パラメータが変化しているが、発電機 G10 でとくに、ゲインが大きく上がり、位相補償が強くと進んでいるので、PSS の出力が大きくなりすぎるなどして、急速に不安定化したと考えられる。強い動揺が見られる発電機が 1 つだけであり、動揺周期も 1 種類しか見られない点が、前回の事例との相違点である。

同定の結果としてまず、各発電機の 5 次モデルで同定した固有値を図 153 に示す。30 秒付近までは、詳細モデルで算出した固有値として 2 番めに支配的な動揺モードに近い値が得られた。60 秒付近までは安定な状況が続き、かつ実部がほぼ同じで虚部が異なる 2 つのモードが支配的となったため、同定から得られる固有値は一定とはならなかった。その後の不安定化では、虚部が 0 付近の 2 番めに支配的な動揺モードに近い値を示す発電機が多く見られたものの、短周期で不安定化する動揺モードを正しく示した発電機はなかった。次に、各発電機で考えた 2 次モデルで同定して得た固有値を図 154 に示す。虚部について見ると、初期から 60 秒付近までは、最初に値が 3 付近にあった動揺モードに追従している。60 秒以降になると、急激に動揺の周期が短くなるが、十分な追従はできていない。次に、 ω と δ を状態変数に用いた連成モードから得た固有値について、図 155 に示す。60 秒から出現する短周期の動揺現象に対しては、ほとんど無力である。周期が短い動揺現象は、回転子の慣性などにより、 δ では観測が難しいと考えられる。次に、 P と ω を状態変数に用いた 4 次モデルから得られた固有値を図 156 に示す。4 次モデルとして最も支配的な固有値は、詳細モデルから求めた最も支配的な固有値とよく一致した。周期が急激に短くなりながら動揺が増大していく部分でも、正しい結果を得ている。2 番めに支配的な固有値は、詳細モデルと低次モデルで、互いに一致しなかった。5 次モデルを 2 つつないだ形に近い 10 次モデルから求めた固有値を図 157 に示す。固有値虚部の値は、4 次モデルと比較すると、値がやや低めとなる場合があるが、実際に最も支配的となっている動揺現象に追従している。実部を見ると、再度不安定化したときに、図 156 では値に上昇傾向がみられる。図 157 でもわずかながら上昇の傾向が見られる。

このように、ひとつの不安定モードが原因となって不安定化する場合は、発電機 2 機の状態量を用いた低次モデルのうち、状態変数に P と ω を用いた 4 次モデルと、10 次モデルにおいて、急速に不安定化する動揺モードの固有値虚部に追従可能な同定を行うことができた。各発電機で個別に同定を行ったときは、2 台を 1 つのモデルにまとめた場合と比べ、動揺モードへの追従ができなかった。従って、2 機を 1 つのモデルにまとめたことにより、同定の精度が向上した事例を示していると考えられる。

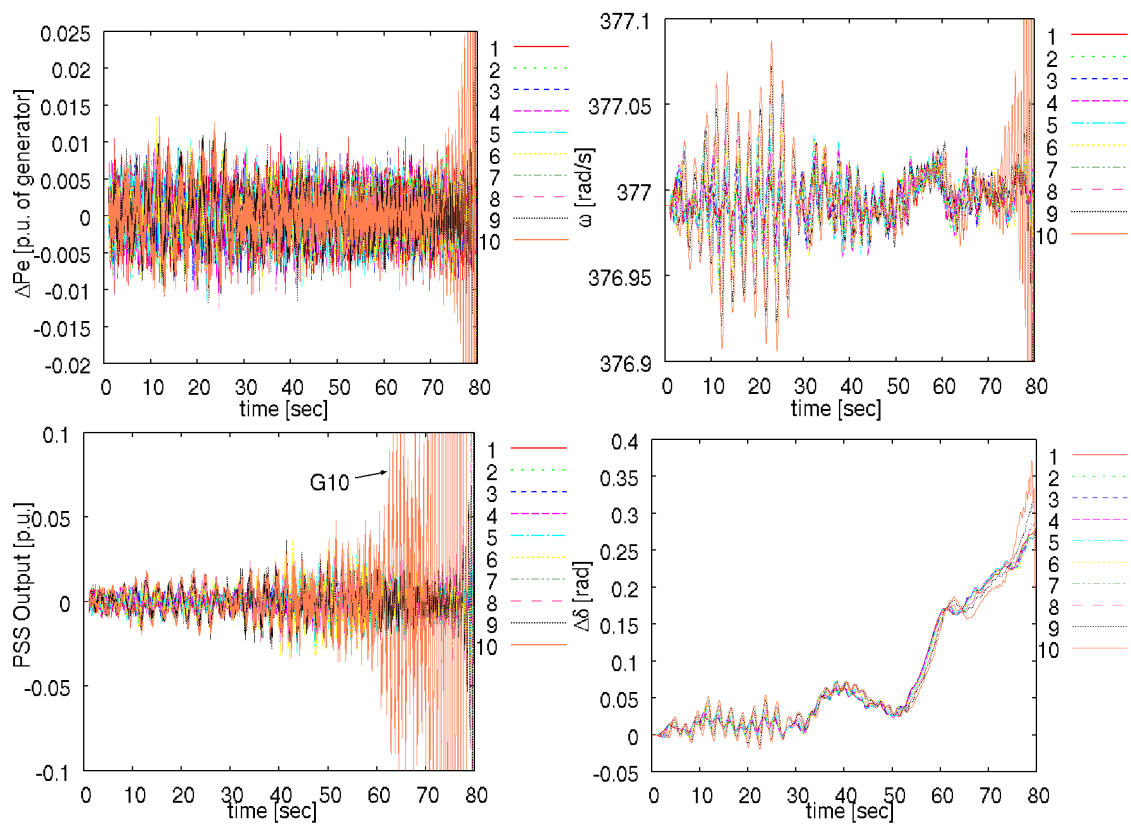


図 150 : 各発電機端子における物理量

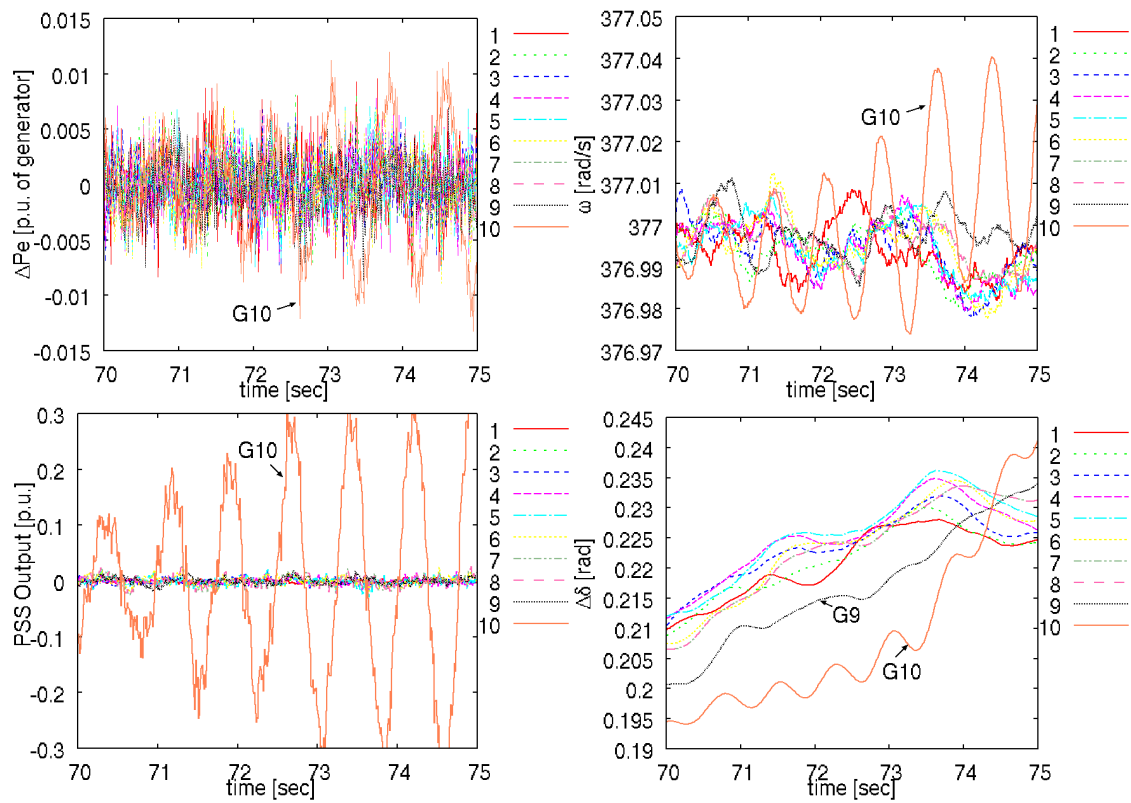


図 151 : 各発電機における物理量の拡大図

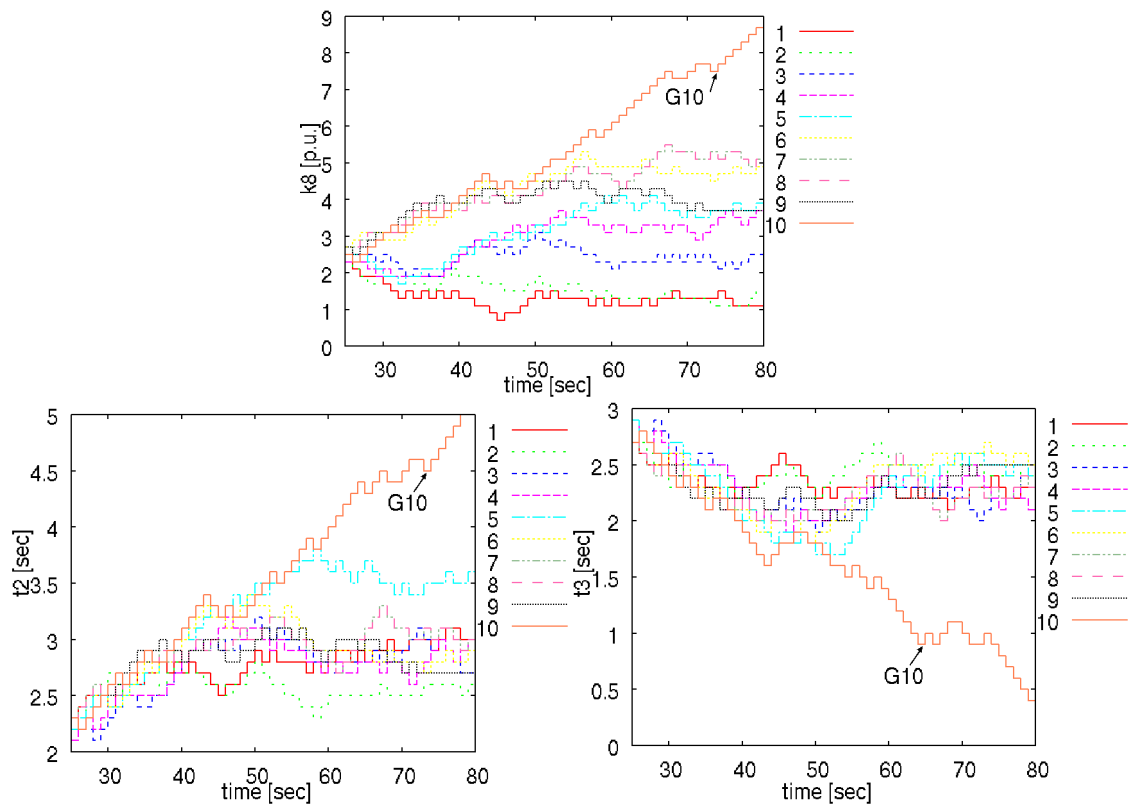


図 152 : 想定する PSS パラメータの変動

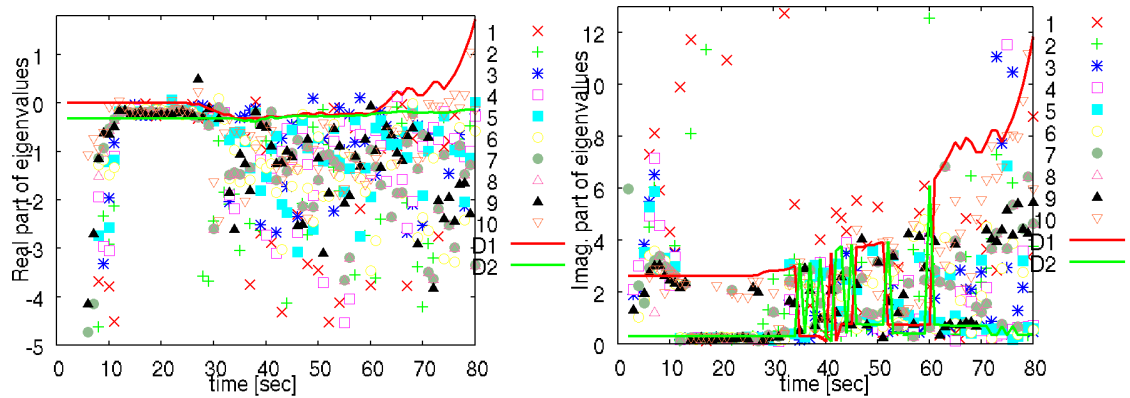


図 153 : 各発電機の 5 次モデルにおいて検出された固有値

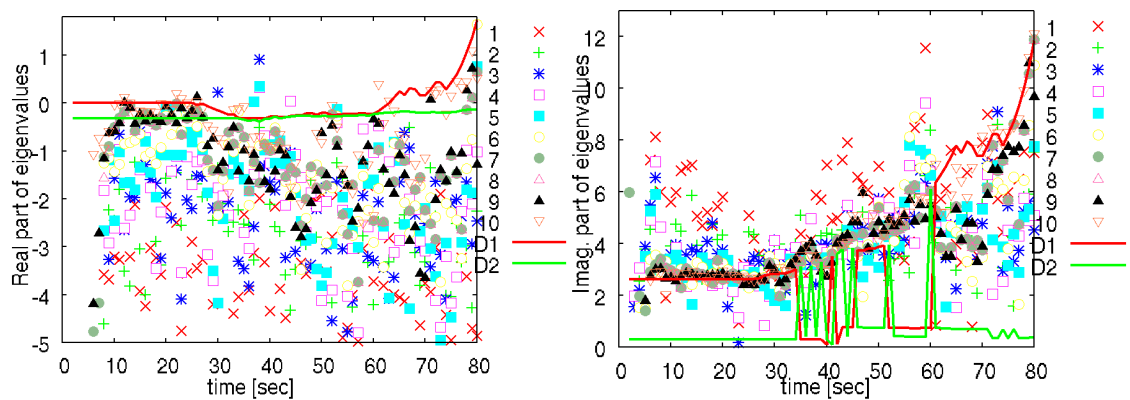


図 154 : 各発電機の 2 次モデルにおいて検出された固有値

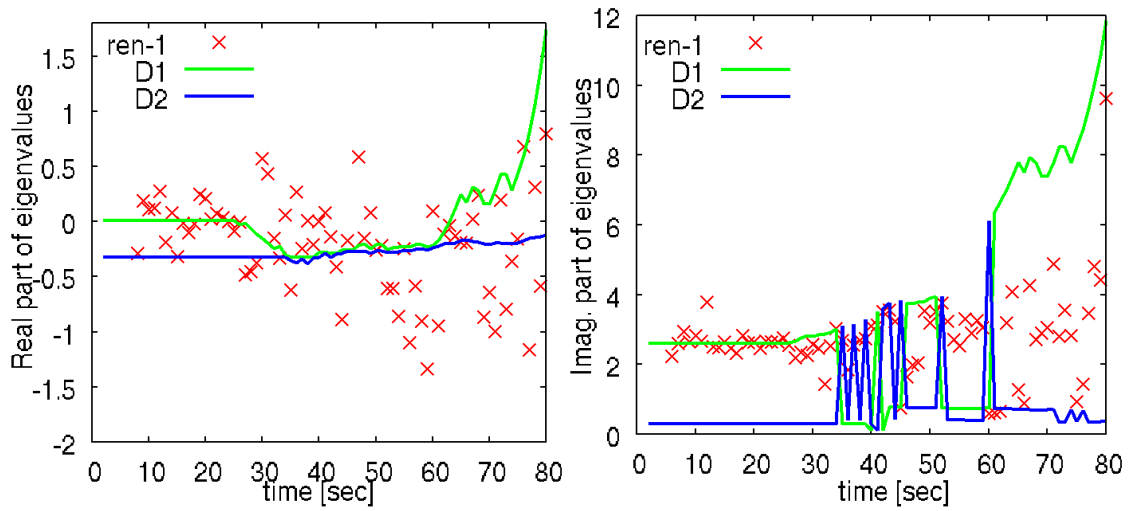


図 155 : 発電機 6 と 10 に設置した連成モデル(基準点は発電機 1)における固有値

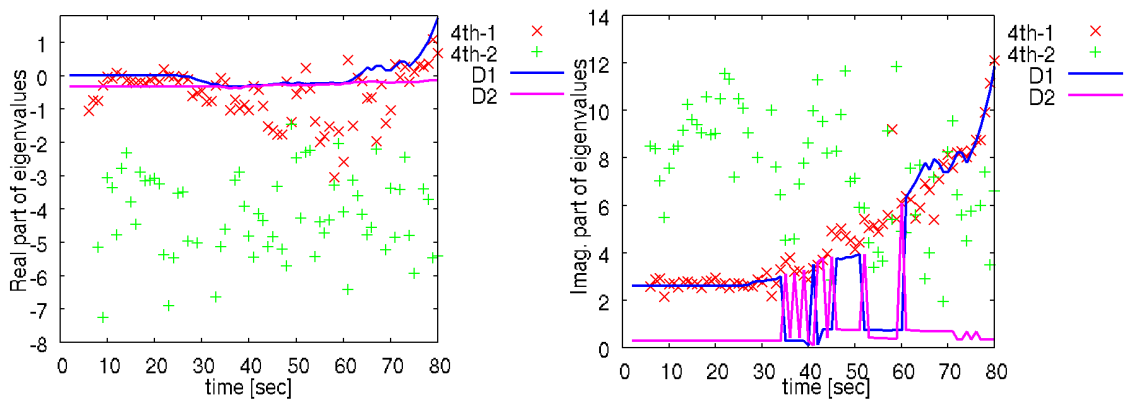


図 156 : P と ω を状態変数に用いた 4 次モデルから得られた固有値

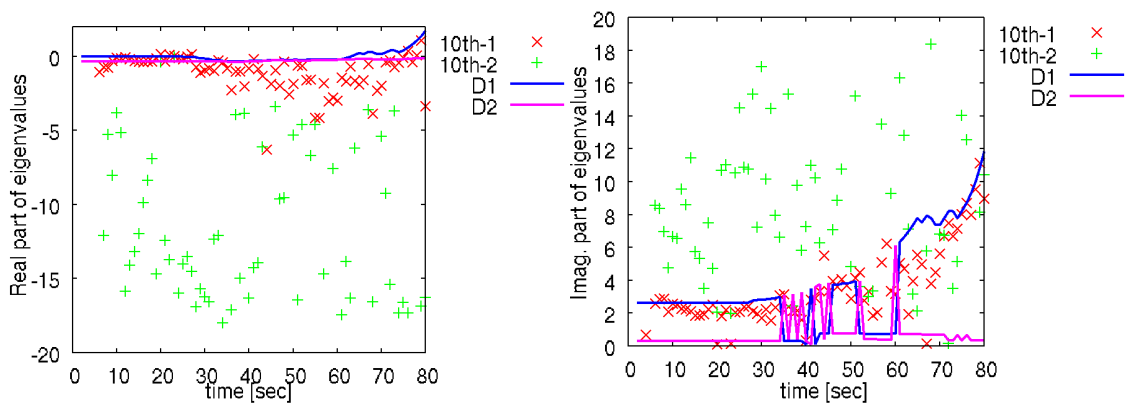


図 157 : ΔP 型 PSS の適応制御に対応した 10 次モデルから得られた固有値

5.4.6. 2機を用いたモデルの検討に関するまとめ

安定限界に近い状態から、複数の低次線形モデルを用いて、同定とオンライン設計の検討を行った。行った検討ごとにまとめれば、以下のことが分かった。

- PSS パラメータを固定した同定では、PSS を低次モデルから取り除いたほうが、支配的なモードをより正確に求められた。PSS を低次モデルに組み込むと、支配的モードの虚部において、0 付近となる値が頻繁に発生した。
- PSS パラメータをオンラインで設計した場合は、線形計画法を用いて設計したときに、3 分木法と比べて良好な結果を得た。2 機を 1 つのモデルに入れる場合と、1 機ごとに別々に扱う場合では、パラメータ値の変化に違いが見られた。
- 固定されたシナリオに従い PSS パラメータを操作して行った同定では、複数の動揺モードが同時に不安定化するときは、発電機ごとに別々に同定を行ったほうが、2 機の情報をもつモデルにまとめるよりも、正確な結果を得た。ひとつのモードだけが不安定化する場合は、2 機の ΔP_e と $\Delta \omega$ の計測を用いる 4 次の低次モデルで、最も正確な結果を得た。位相角 δ は、短周期の動揺現象を同定するには不適切であることが分かった。

結局のところ、ひとつのモデルで同時に複数の動揺モードを把握することは、難しいようである。発電機ごとにばらばらに動揺モードが発生するような、ローカルな動揺が中心となる場合は、発電機ごとに別々に同定を行うほうが、効果的である。一方で、電力系統全体が一種類の動揺モードで不安定化しそうなときは、同定に複数の発電機の状態量を用いる低次モデルを用いたほうが、素早い動揺モードの変化にも追従でき、効果が高いようである。

5. 5. PSS のパラメータを更新するタイミングの検討

電力システムの安定性が限界付近にあり、支配的なモードによる動揺が、発電機の電気出力偏差等にはっきりと現れるときは、支配的な動揺モードが同定の結果に反映されやすく、電力システムの安定化に寄与する事例が見られたが、いったん安定化すると、同定に用いる計測からは有意なモードが観測されず、かえってシステムを不安定化させる制御が行われる場合も見られた。同定の成否を把握し、適切に同定できたときに限り PSS パラメータを更新することで、不適切なパラメータ操作を抑えれば、不安定化を防止できると考えられる。システム全体の安定性把握を目的とした線形モデルを用いて、PSS のパラメータを更新するタイミングを検討する。

5.5.1. 4 次の線形モデルのモード検出判定への利用

5.4.1.2 節で提案した 4 次の低次線形モデルでは、2 台の発電機(A, B)における、電気出力偏差 ΔP_e と、回転速度偏差 $\Delta \omega$ を状態変数とする。その同定では、16 の未知数を逐次最小二乗法を用いて推定する。この形のモデルは、PSS の制御ブロックを持たないため、PSS パラメータとシステムの安定性との関係を算出できないが、5 次モデルと比べ、システム全体として支配的な動揺モードを、比較的正確に求められる特長がある。

本研究では、同定の不確かさやシステム状態の変化に対応するため、オンライン設計を反復継続して行う。オンライン設計では、同定の結果から PSS パラメータの操作方向を決めるが、同定の結果に有意な情報が期待できないときは、設計を行わず待機したほうが、設計の失敗による不安定化を予防できて好ましいと考えられる。

同定が正確なときは、システム構成が急変しない限りは、同定から得られる固有値の時間軸上のばらつきが小さくなる傾向がある。同定により得られる固有値は、特定の動揺モードが観測されている間は収束的となり、有意な動揺現象を観測できないときはランダムな値を持つ傾向があるためである。求めた固有値を時間軸上に集め、直近の十数秒間に得られた固有値について標準偏差を求めると、ばらつきの傾向が分かる。

同定は、抑制対象とするモードによる動揺の振幅が、負荷ノイズ等と比較してより大きいときほど、より正確になると考えられる。従って固有値のばらつきから、安定限界に近い動揺現象の存在を推定できる。

ここでは、4 次モデルから算出した固有値のばらつきを、システム全体で共通の動揺モードの把握に利用する。2 次モデルまたは 5 次モデルで求める固有値のばらつきは、個々の発電機で動揺モードが得られたかの判断に用いる。

5.5.2. 位相補償パラメータ t_2, t_3 の自由度削減

これまでは、PSSのパラメータを更新するときに、位相補償の t_2 と t_3 を別々に扱ってきた。図 158 に示すように、 t_2 と t_3 は、 $t_2 > t_3$ で「進み」、 $t_2 < t_3$ で「遅れ」となる。位相をどれだけ操作するかは、 t_2 と t_3 の関係により決まる。ところで、動揺周期が 1 種類しか存在しないときは、同じだけ位相を操作する場合であっても、 t_2 と t_3 の組み合わせが無数に考えられる。これまでは、このような状況で t_2 と t_3 を別々に操作したためか、 t_2 と t_3 が互いに等しい状態を保ちながら、上がったたり下がったりするなど、位相の補償量を調節するという本来の目的以外で、値が変化する現象が見られた。

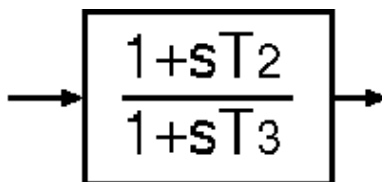


図 158 : 位相補償ブロック

そこで、定数 t_{230} と、変数 x を用いて、 t_2 と t_3 を以下のように表現することを考える。

$$\begin{aligned} t_2 &= t_{230} + x \\ t_3 &= t_{230} - x \end{aligned} \quad (\text{数式 28})$$

あらかじめ定数 t_{230} の値を決めておけば、位相補償として操作する変数を x の 1 つだけにできる。 x の増加が「進み」、減少が「遅れ」となり、パラメータの変化と制御装置への影響の関係が明確になる。従って、適応制御を行う場合に、値が迷走しにくくなることが期待される。

5.5.3. シミュレーションの設定

広域システムの不安定現象を計算機シミュレーションで再現するために、電気学会 WEST10 機系統モデルを、やや定態不安定となるように改変した系統モデルを用いて、数値積分法によるシミュレーションを行った。系統が安定なときは動揺モードが波形に現れず、有意な同定ができないので、東向きの重潮流状態を模擬した。通常の昼間断面よりも、発電機 1 の出力を 4.0p.u.、負荷 5, 6 の消費を 1.3p.u. ずつ、負荷 7 の消費を 1.4p.u. (1p.u.=1000MW)

それぞれ増加させた。シミュレーションに用いる詳細な系統モデルから直接算出した支配的な固有値は $+0.137 \pm j2.42$ (周期は 2.60 秒)と、やや不安定である。4 次モデルでは、発電機(A,B) = (G6, G10)とした。同定により系統の性質を推定する提案手法は、計測対象となる発電機出力や発電機回転速度等が、動揺モードの影響を受けて変動する時に限り、有意に機能しうる。ここでは、負荷の変動がそれらのモードを誘起すると考え、ノード 1 から 9 に振幅の平均値が 0.06p.u. (1p.u.=1000MVA)のホワイトノイズを加えることで負荷変動を模擬する。シミュレーションの開始から 1 秒後の時点から、負荷ノイズの添加と、4 次モデル・5 次モデルでの同定を始める。低次モデルの状態方程式と固有値は、1 秒ごとに更新する。20 秒の時点から 1 秒ごとに、線形計画法を用いた固有値制御手法により、PSS パラメータの更新処理を行う。ただし、必要に応じて更新の必要性を評価する。なお、全ての発電機が適応型 PSS を持つとする。

5.5.4. PSS パラメータの強制更新による統計量の評価

まず、PSS のパラメータの更新を、条件を設けずに行う場合について調べた。シミュレーション開始 20 秒の時点から、全発電機で 1 秒に 1 回ずつ無条件に PSS パラメータを更新する。各発電機における PSS パラメータの初期値を表 9 に示す。

シミュレーションの結果について、まず各発電機の電気出力偏差を図 159 に示す。全体としては、設計を開始する 20 秒よりも前では不安定モードが振動発散に向かうが、設計開始後に安定化し、40 秒までに動揺が消失した。動揺では、より番号の大きい東側の発電機ほど位相が遅くなっている。安定化後の計測波形では、負荷に対するノイズが支配的となり、モードが誘起されていないことが分かる。

表 9 : PSS パラメータの初期値

k8[p.u.]	t2[sec]	t3[sec]	t8[sec]	t1[sec]
2.5	2.2	2.8	0.02	5.0

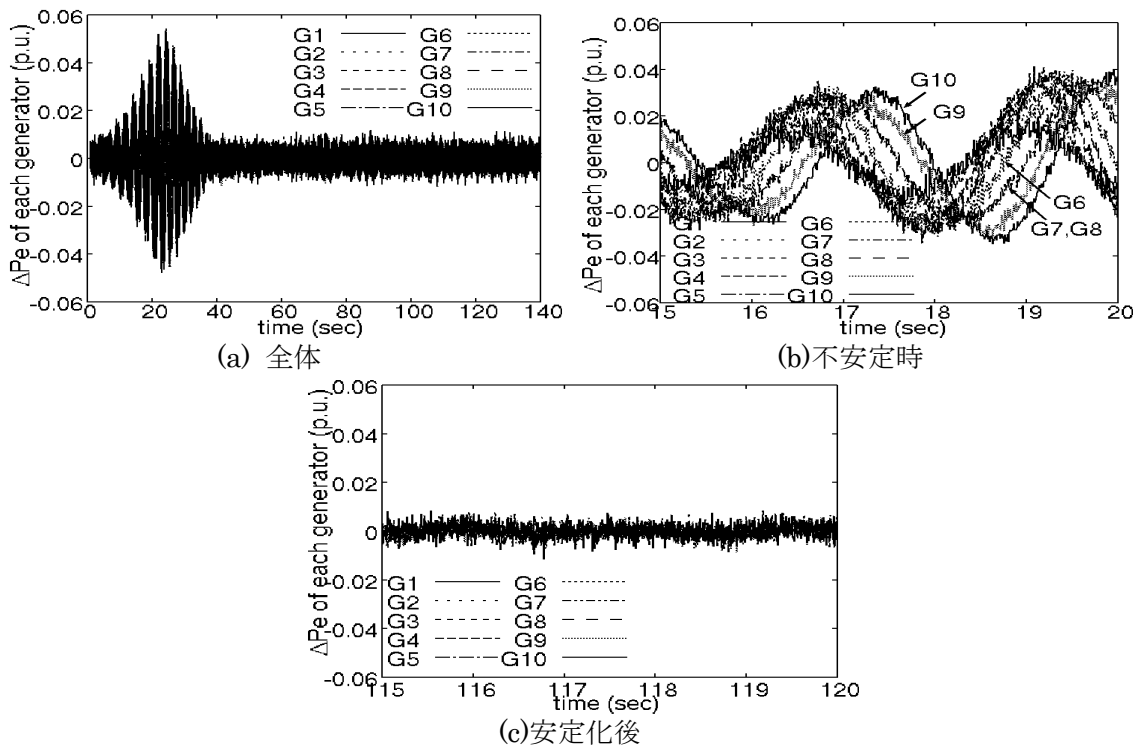


図 159 : 各発電機における電気出力偏差の推移

次に、各発電機の PSS パラメータを図 160 に示す。十分に安定化した 40 秒以降も値が収束しない。k8 は 40 秒付近、t2,t3 は 30 秒付近で、変化の様子が変わっている。4 次モデルで同定した固有値と、検算目的で算出した詳細なモデルから直接算出した固有値を図 161 に示す。詳細なモデルの値を真の値とすれば、40 秒付近までは実部が低下し、安定度が改善している。一方で、80 秒付近までは逆に不安定化するなど、時間帯によっては適切なパラメータ設計が行われなかった。4 次モデルで行った同定では、40 秒付近までは正確に支配的モードを検出できた。しかしそれ以降は値の幅が広がり、ばらつきが大きくなっている。4 次モデルで算出した固有値のばらつきは、支配的モードによる動揺を観測できたかに関係すると考えられる。固有値の実部・虚部それぞれに対して、直近の 12 秒ぶんの標準偏差を算出した結果(一部分を拡大)を、図 162 に示す。

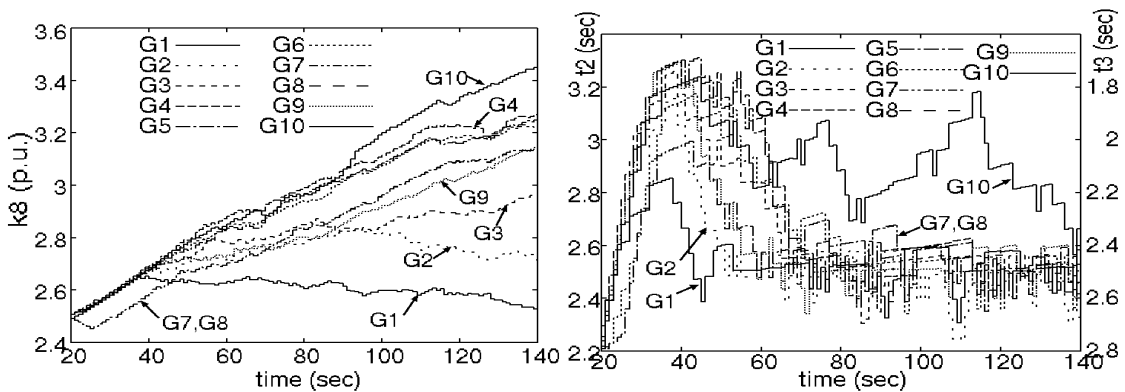


図 160 : 各発電機における PSS パラメータの変化

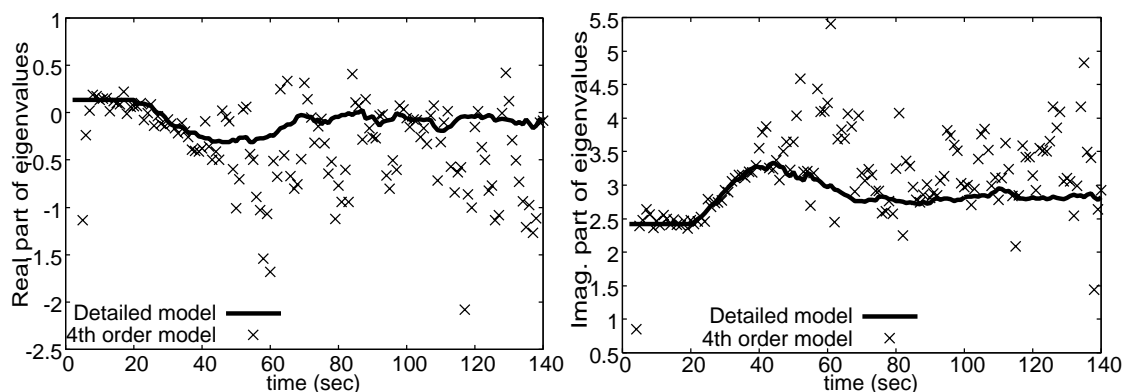


図 161 : 4 次モデル・詳細モデルにおける支配的な固有値

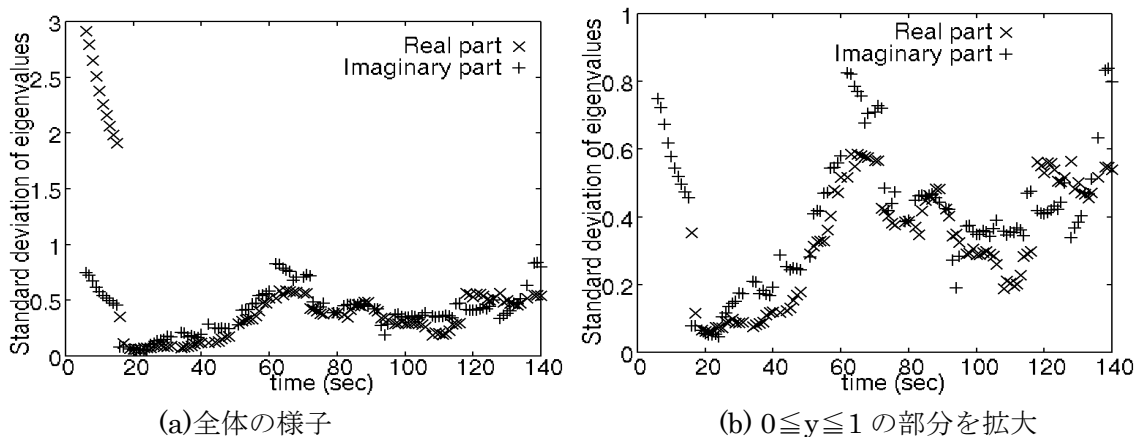


図 162 : 4 次モデルにおける固有値の標準偏差

20 秒から 50 秒までは、大部分で 0.3 以下となっている。標準偏差が小さくなっている間は、周期が 2 秒半程度の動揺をはっきりと観測しており、支配的な動揺モードの固有値を、正確に算出できたと考えられる。このような、同定が正確に行われているときにだけ、PSS のパラメータを更新したい場合は、標準偏差にしきい値を設定して、標準偏差がしきい値以下となるときに限り、PSS のパラメータを更新すればよいと考えられる。

次に、各発電機の 5 次モデルにおいて算出された固有値を、実部・虚部ごとに図 163 に示す。オンライン設計は、こちらの固有値を用いて行われている。実部については、最初の 40 秒までは 0 付近に集中し、本来の安定度を示しているが、安定化後の 40 秒以降は負方向に大きくばらついている。虚部については、40 秒の手前までは比較的動揺モードに近い値が多く、安定化後は 0 から 3 程度の範囲でばらついている。また、動揺を検出できなかったと思われる 0 付近の値が、20 秒付近などでみられる。

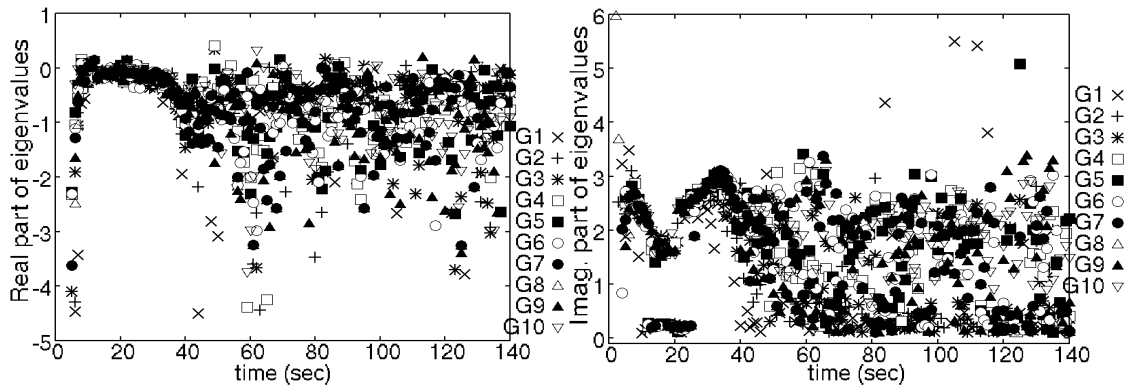


図 163 : 5 次モデルから算出された固有値

値のばらつきを詳しく調べる目的で、各発電機で固有値の実部・虚部ごとに、直近 12 秒ぶんの値に対して標準偏差を算出した。その結果を図 164 に示す。実部については、20 秒から 40 秒までの間に全発電機が 0.3 を下回る期間があり、動揺モード検出の成否を比較的是っきりと読み取れる。発電機を互いに比較すると、1 未満に集まる多数の発電機と、大きな値を持つ一部の発電機に分かれた。虚部では、不安定時もばらつきが大きく算出されており、安定・不安定の判断への利用は難しい。従って 5 次モデルでは、実部を用いた評価が有効であると考えられる。

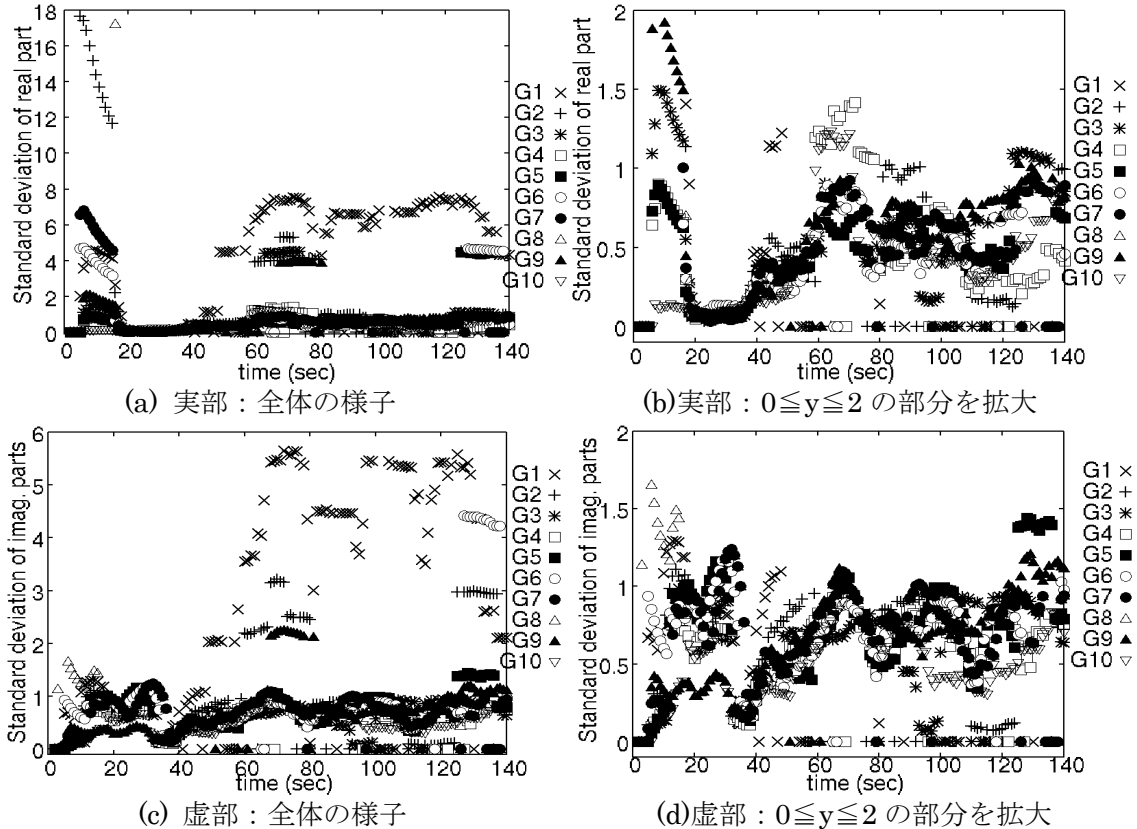


図 164 : 5 次モデルにおける固有値の標準偏差

5.5.5. 統計量を用いたパラメータ設計実施判定を伴うシミュレーション

次に、取得した情報をふまえ、標準偏差にしきい値を設け、PSS パラメータ設計の実施を判断するようにした上で、シミュレーションを行った。図 162 と図 164 をふまえ、以下の条件をともに満たすときに限り、設計を行うことにした。

- 4次モデルにおける固有値の標準偏差が実部・虚部ともに 0.4 以下である
- 5次モデルにおける固有値の標準偏差が、実部で 0.4 以下である

これらの条件が成立するかを毎秒調査し、4次モデルの条件が成立したときに、5次モデルの条件を満たす発電機で PSS のパラメータを更新する。上記の条件は、固有値の標準偏差を示す図 162 と図 164 をふまえて、手動で試行錯誤的に設定したものである。実際の電力システムでは、システムが十分安定なときと、安定度に問題が生じているときの計測結果を比較することで、しきい値の検討が行えると考えられる。

条件付きオンラインパラメータ設計のシミュレーション結果についてまず、電気出力偏差を図 165 に示す。値の傾向は前回の図 159 とほぼ同じである。次に、PSS パラメータの変化を図 166 に示す。50 秒台からは、設計が行われなかった時間帯が多くなっている。位相補償が、シミュレーション終了時に進み補償のままになっている点が、前節の結果とは異なっている。システム全体の安定性を意味する 4次モデルから得た固有値と、詳細なモデルから直接計算した固有値を図 167 に示す。詳細なモデルから算出した固有値では、安定化した 40 秒以降の変化が図 161 と比べて少なくなり、安定性の低下が防止された。4次モデルから求めた固有値は、安定化が進む 40 秒台半ばまでは本来のモードに近いが、それ以降は、実部は小さめ、虚部は大きめにかたより、かつ、ばらつきが大きくなっている。次に、4次モデルから算出した固有値の直近 12 秒ぶんを対象に、実部・虚部ごとに計算した標準偏差を図 168 に示す。20 秒から 60 秒の間と、100 秒から 110 秒の間に、しきい値よりも小さくなっている。前者は安定性向上時であり、とくに低い値となった。発電機ごとに設けた 5次モデルで算出された固有値を、図 169 に示す。実部・虚部ともに前章の結果とほぼ変わらない傾向を示している。5次モデルから算出された固有値の、直近の 12 秒ぶんに関する標準偏差を図 170 に示す。実部については、設計開始時点から 60 秒付近までは、しきい値を下回る発電機が多い。100 秒付近に、再びしきい値を下回る発電機が多くなる時間帯がある。

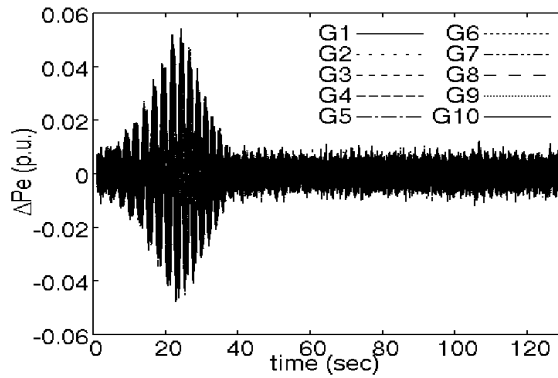


図 165 : 各発電機における電気出力偏差

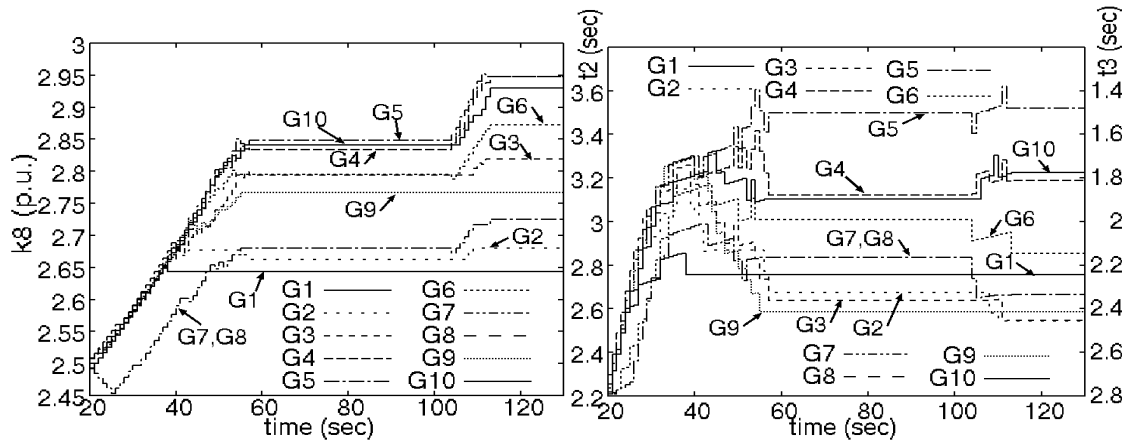


図 166 : P S Sパラメータの推移

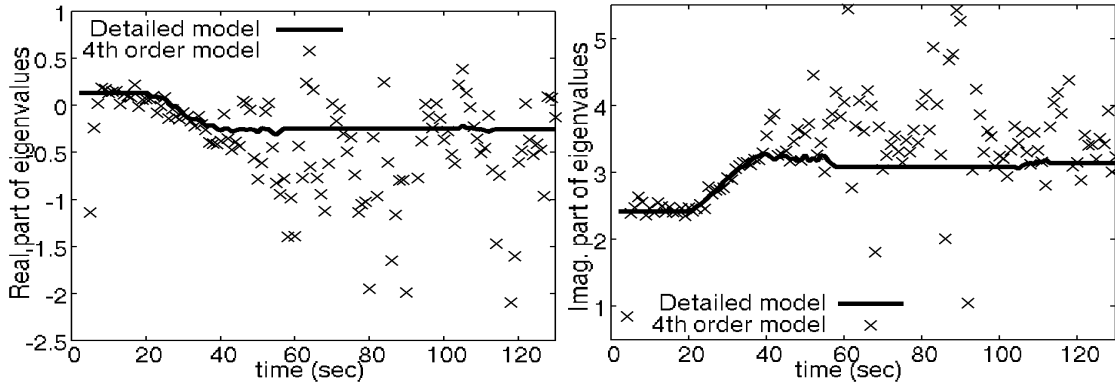


図 167 : 4次モデル・詳細モデルにおける支配的な固有値

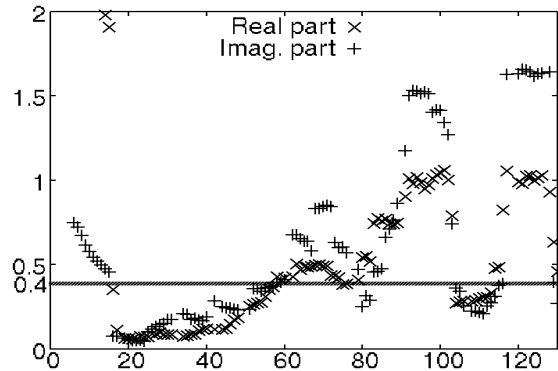


図 168 : 4次モデルにおける固有値の標準偏差($0 \leq y \leq 2$)

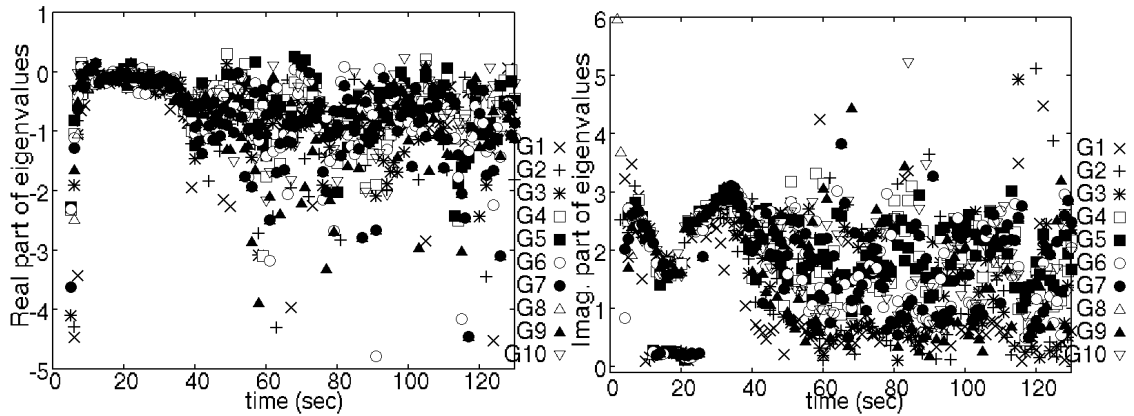
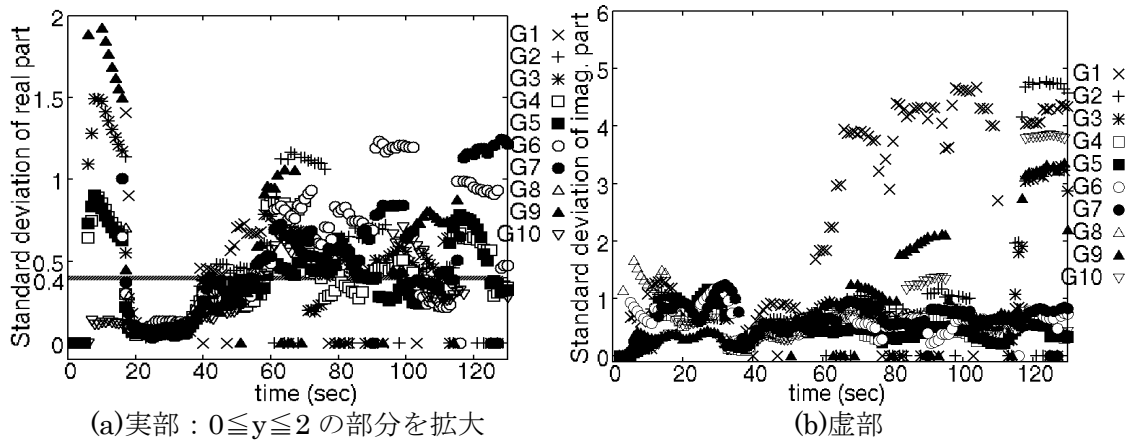


図 169 : 5 次モデルから算出された固有値



(a)実部： $0 \leq y \leq 2$ の部分を拡大

(b)虚部

図 170 : 5 次モデルにおける固有値の標準偏差

各発電機で PSS パラメータが更新された時と、4 次モデルでの同定でばらつきが大きい値を下回った期間を、図 171 に示す。定態安定度が向上した 20 秒から 40 秒の期間を含む前半部と、110 秒付近で集中して設計が行われていたことが分かる。安定化した後も、60 秒付近まで設計が続けられた背景には、標準偏差の算出に 12 秒ぶんの情報を用いたため、過去の値の影響が比較的長く残ったことが考えられる。

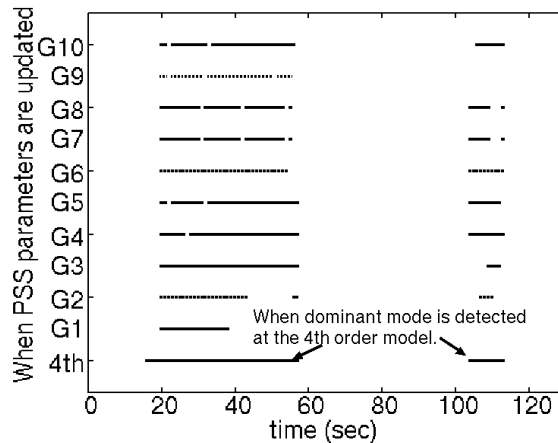


図 171 : PSS パラメータの更新時期と 4 次モデルにおける動揺検出期間

5.5.6. パラメータ更新のタイミングに関するまとめ

本節では、動揺現象が観測できていると考えられる時期を検出し、その時期に限って PSS のパラメータを更新する手法を提案した。4 次と 5 次の低次線形モデルを用いたシミュレーションを行った結果、以下の点が明らかになった。

- 4 次のモデルでは、動揺波形が計測対象の物理量にはっきりと現れている間は、その動揺モードに対応する固有値が正確に得られ、固有値のばらつきは小さくなる。計測波形から動揺が見られなくなると、得られる固有値は不正確となり、ばらつきが大きくなる。固有値を時系列上に集めて、その標準偏差を求めることで、同定により動揺現象が検出されているかどうかを判断できることが分かった。なお、判定できるのは、安定度そのものではなく、波形としての動揺現象をとらえられたかである。例えば図 167 では、安定度を示す固有値実部が 0 を下回ってから、約 10 秒間は虚部がモードを正確に追跡している。なぜなら、定態安定度が回復した瞬間が、動揺波形の振幅が最大となる時であり、動揺の振幅が減衰するにはさらにしばらくの時間を必要とするからである。
- 5 次モデルに対して、同定により得られた固有値を時系列上に集め、標準偏差を求めると、実部では 4 次モデルと似た性質が得られる。虚部では、5 次モデルが動揺現象を常に検出できるとは限らない性質の影響からか、動揺検出の可否を判断できる情報は得られない。
- 求めた固有値の標準偏差を、PSS パラメータの更新を行うかを判断する条件として用いたところ、安定化後に行われていた無意味なパラメータの更新を、軽減できることが分かった。

5.6. 電力系統が連続的に変化する場合はモデル同定

実際の電力系統では、その状態が時々刻々と変化し、定態安定度も一定ではない。従って、動揺現象を同定により把握できる期間は、限られていると予想される。同定の結果を利用した PSS パラメータの適応制御では、同定が適切に行われなければ、パラメータを安定性が高まる方向へ移動させられる可能性が低いと考えられる。従って、パラメータの設計が可能と考えられるタイミングや位置を評価する方法が求められる。ここでは、各発電機や系統全体で行っている計測や同定により、変化を続ける電力系統の状態をどれほど把握できるかについて調べる。

5.6.1. シミュレーションの概要

シミュレーションには、電気学会 WEST10 機系統モデルを用いる。ただし、潮流の流れを変化させることで、定態安定度を時変としている。同時に、負荷にホワイトノイズを加え、動揺現象が波形に誘起されるようにする。発電機 G6 と G10 を対象に、4 次モデルを設定する。

5.6.1.1. 評価の対象

過渡解析法によるデジタルシミュレーションを行い、各発電機での物理量を取り出して計測量として扱うことにより、以下について調べる。

- 過渡解析法により得られる電気出力や負荷消費量等が、条件設定で意図したとおりに変化しているかを調べる。
- 各発電機に設置した 5 次モデル、2 次モデルにおける同定の様子。同定から求められる固有値が、どのようなときに、系統本来の安定度を示すかを調べる。
- 系統全体で管理する 4 次モデルにおける同定の様子。系統全体の安定度や動揺現象が、どのようなになると、支配的なモードが得られるかを調べる。
- 各発電機で計測する電気出力の変動振幅。変動の振幅は、安定度の指標として利用できると考えられる。4 次モデル等を用いて安定度を評価する手法と、比較する。

5.6.1.2. 可変とする項目

シミュレーションでは、以下の項目に対して変化を加える。

- 時間とともに、潮流の大きさを変える。発電機 G1 の出力と、負荷 5,6,7,8 の消費を

時変とすることで、系統の西端から東へ向かう潮流を増減させることで、定態安定度を操作する。

- シミュレーション末期において、負荷ノード 1 から 9 に加えるノイズを、これまでの 4 倍の振幅となるように変更する。外乱の大きさは、安定度とは直接関係がないが、計測波形を乱れさせる点では似たような性質を持っている。一方で、計測により求めたいのは、安定度や、安定度の低下により発生した動揺現象の程度であり、外乱そのものではない。同定の手法が、外乱の大きさにどれだけ惑わされるかを、評価する。

5.6.1.3. シミュレーションの流れ

シミュレーションは、時間とともに表 10 に示すシナリオに従って進められる。また、PSS の初期パラメータを、表 11 に示す。

表 10：シミュレーションのシナリオ

時刻 [秒]	できごと
0	シミュレーション開始
1	負荷 1 から 9 までにノイズ添加開始
10	発電機 1 で発電量増加開始 負荷 5,6,7,8 で消費量増加開始
80	定態安定度が不安定に移行
115	発電機 1 で発電量減少開始 負荷 5,6,7,8 で消費減少開始
150	定態安定度が安定に移行
220	発電機 1 の発電量を初期値で固定 負荷 5,6,7,8 の消費を初期値で固定
250	負荷 1 から 9 に加えるノイズをこれまでの 4 倍に拡大
300	シミュレーション終了

表 11：PSS の初期パラメータ

k8[p.u.]	t2[sec]	t3[sec]	t1[sec]	t8[sec]
1.0	0.25	1.25	5.0	0.02

発電機 1 の出力は、毎秒 0.006p.u.ずつ増加する。負荷 5,6,7,8 の消費は、それぞれ毎秒 0.0028p.u.ずつ増加を指示する(1p.u.=1000MW)。消費の変化指示量が、発電量の変化量よりも大きい、このようにしないと、制御系の都合により周波数の上昇が著しくなる傾向がある。変化を指示しない発電機や負荷で、変動を指示した発電機や負荷の変化を打ち消すような反応が、ある程度見られるからである。

各負荷に加えるノイズの振幅平均値は、シミュレーション開始時は 0.06p.u.、250 秒以降では 0.24p.u.である(1p.u.=1000MVA)。250 秒以降の設定は、やや現実的でない振幅となっている可能性があるが、外乱の振幅が大きくなったときに、それが不安定モードによるものか、外乱の増大によるものかを、同定のアルゴリズムが区別できるかを調べる目的で用いる。

5.6.2. 発電機で得られる物理量の様子

まず、システムに加えた変更が正しく適用されたかを調べる目的で、電気出力の波形を図 172 に示す。

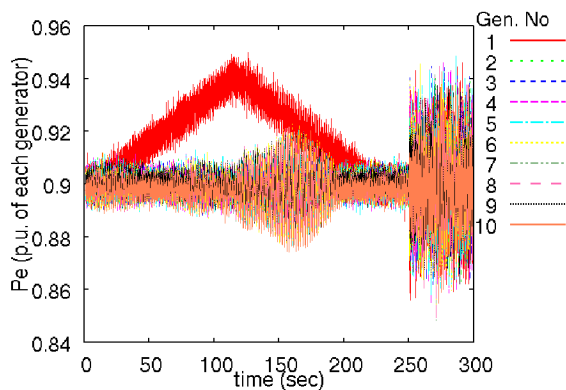


図 172 : 各発電機の電気出力

発電機 1 の出力が、115 秒を頂点として、直線的に変化したことが分かる。出力の上昇は、105 秒間で約 0.04[発電機単位の p.u.] = 約 0.6[系統単位の p.u.]であり、毎秒 0.006[系統単位の p.u.]ずつの増加とした指令とよく一致している。250 秒以降は、負荷ノイズの振幅を大きくした影響が、発電機の出力にもはっきりと現れている。次に、一部の負荷における消費量を図 173 に示す。

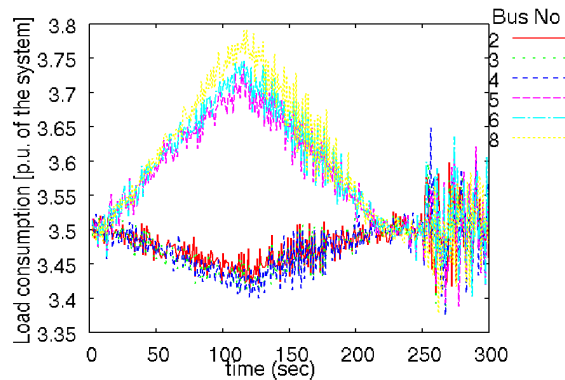


図 173 : 一部の負荷母線における消費量

消費の増加量は、0.2 から 0.27[系統単位の p.u.]で、増加を指示した量である 0.294[系統単位の p.u.]と比べれば、やや少ない。こうなった理由としては、負荷を一定のアドミタンスとしてモデル化し、消費の増加をアドミタンス増大として表現したので、負荷端の電圧が低下気味になったことがあげられる。そのため、消費量の変化を指示しなかったノード 2,3,4 において、わずかな消費量の減少がみられる。とはいえ、負荷の変化は、おおむね意図したとおりに設定できた。各発電機における端子電圧を図 174 に示す。

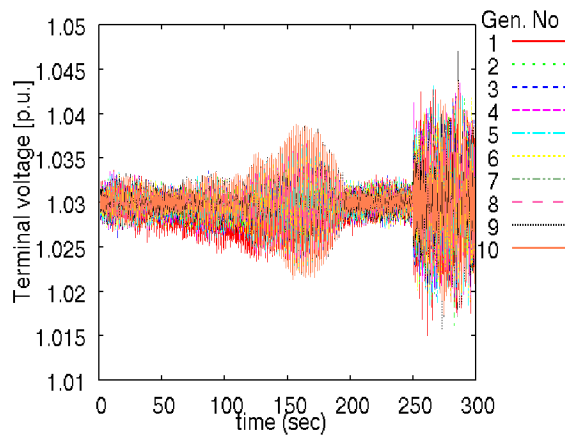


図 174 : 各発電機における端子電圧

動揺現象に伴い揺れているが、長期的にはほぼ一定である。ただし、出力を変化させている発電機 G1 では、AVR を比例制御としたためか、0.5%を下回る範囲でやや電圧が低下している。発電機が接続されない負荷端の電圧はプロットされていないが、送電線のインピーダンスが一定で、負荷の有効電力だけを操作したため、送電線での電圧降下量に変化し、負荷端電圧はある程度変化していると考えられる。次に、回転速度と PSS 出力を、図 175 に示す。120 秒付近から、動揺波形の振幅が拡大し、170 秒付近を最大の振幅として、その後 200 秒の手前で収束している。また、負荷へのノイズを増加させた 250 秒以降では、波

形の振幅が大きくなっている。

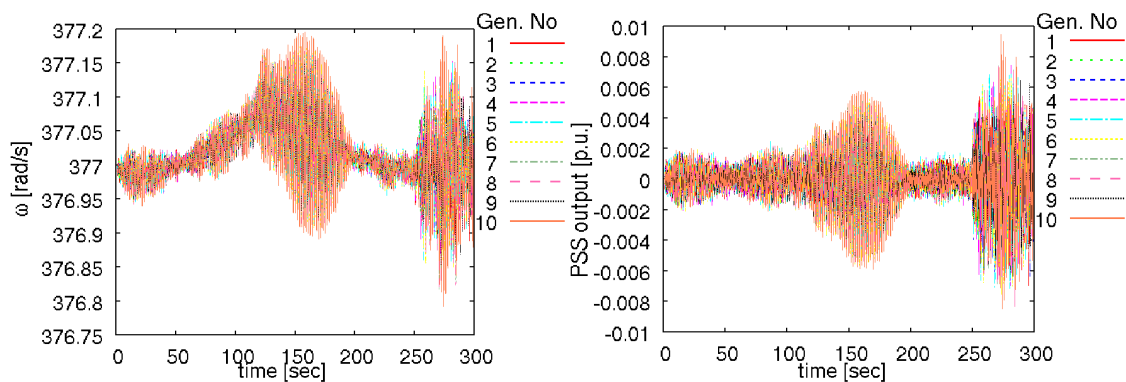
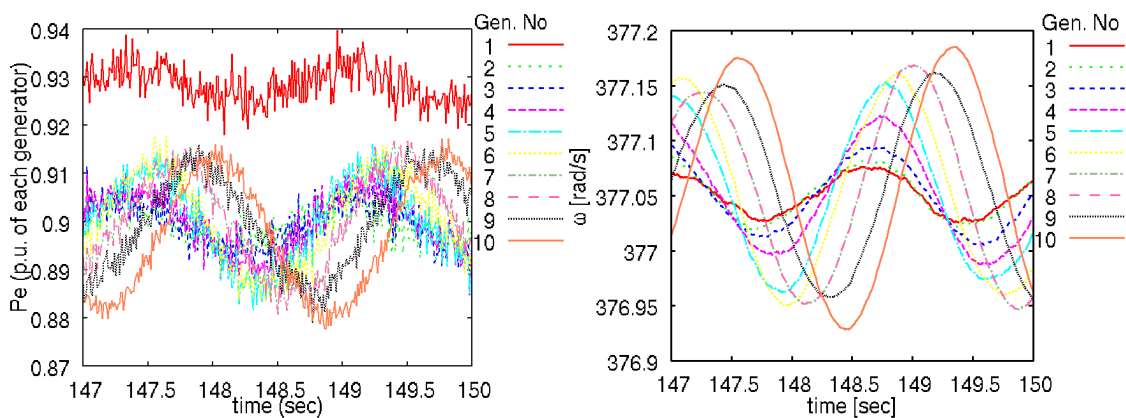


図 175 : 回転速度(左)と PSS 出力(右)

5.6.2.1. 不安定化により振幅が増加したときの拡大図

次に、定態安定度が低下し、不安定モードが一時的に動揺波形を増大させているときの様子を調べる。以下の図 176 は、同定で計測対象となる、発電機の出力と、回転速度、PSS の出力を示したものである。およそ 2 秒周期の動揺現象が、全ての発電機で見られる。東側の数字が大きい発電機ほど動揺振幅が大きく、位相が遅れている。位相のずれは東側の発電機でとくに大きい。電気出力と PSS の出力では、負荷ノイズの波が重なって見えるが、同定用のフィルタを通すことで、同定アルゴリズムは比較的なめらかな波形を受け取ることになる。



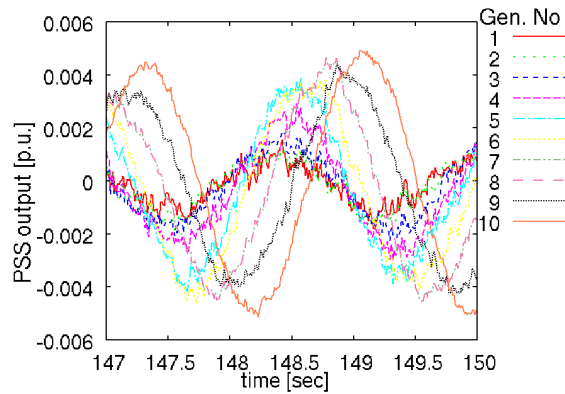


図 176 : 不安定モード発生時の動揺波形

5.6.2.2. ノイズ増大により振幅が増加したときの拡大図

振幅の増大は、電力系統としては安定であるが、負荷変動の振幅が増大した 250 秒以降にも見られる。定態安定度が失われて振幅が増大した場合との違いを明らかにする目的で、280 秒以降の波形を拡大して図 177 に示す。

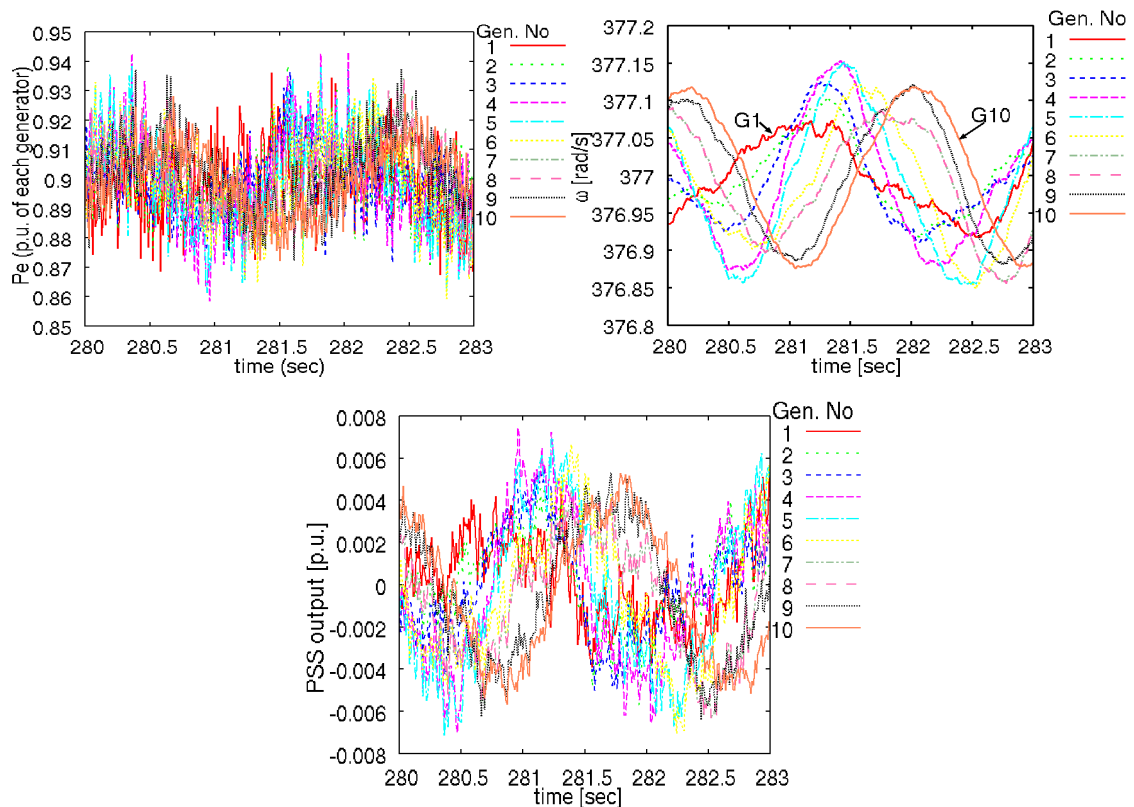


図 177 : 負荷ノイズの振幅が 4 倍となったときの波形

電気出力と PSS の出力では、動揺モードの振幅に対して、ノイズの振幅が大きくなった

ため、動揺がはっきり見えなくなっている。回転速度においても、G1 などでは波形が正弦波から大きくずれている。動揺がはっきりしなくなる理由としては、安定度が高いため、外乱を加えたときに誘起される動揺波形の振幅が、ノイズの振幅と比べ、相対的に小さくなったことが考えられる。同定を正確に行うことは、150 秒付近の不安定時と比べれば、比較的困難になると予想される。

5.6.2.3. 同定用フィルタの働き

同定アルゴリズムでは、物理量の波形にカットオフ周波数 4.0Hz の LPF と、時定数 5.0 秒のウォッシュアウトフィルタ(リセットフィルタ)を適用して、波形を整形してから同定を行っている。その様子を、定態不安定時である 147 秒からと、定態安定時である 280 秒からについて、図 178 に示す。

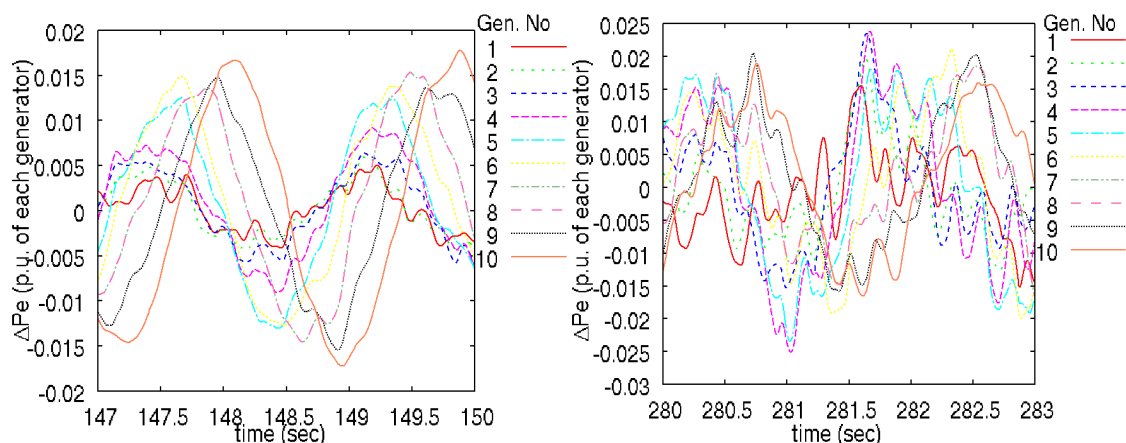


図 178 : フィルタ処理後の電気出力偏差

定態不安定時は、不安定な動揺モードがはっきりと現れているが、安定時はさまざまな周期を持つ振動が混在し、分かりにくい波形となっている。フィルタを介しても、ノイズの割合が大きくなると、本来支配的であるはずの数秒周期の振動現象を、とらえにくくなることが分かる。

5.6.3. 系統の状態がリアルタイムで変化するときの固有値計算に用いる動作点

次に、安定度の評価を固有値として示すが、その前に、系統の状態が変化したときに固有値をどう計算すべきかについて、考えておく必要がある。

固有値解析法では、特定の状態に落ち着いている系に、小さな外乱が加わったときの性質について考えている。落ち着いている状態のときに、各要素が持つ物理量を、さまざま

な状態を持ちうる空間内での点とみなして、動作点と呼んでいる。詳細なモデルから直接算出する固有値では、動作点をどう考えるかにより、結果が変わってくる。これまでは、シミュレーション開始時の状態を動作点とみなしていた。ところが、発電機の出力や負荷の消費量が連続して変化する場合は、実際の物理量が初期の動作点から大きく離れていくため、動作点を更新しなければ、定態安定度を正しく推定できなくなる。動作点は、変動している値が平均的に持つであろう値に追従させるのがよい。ここからは、詳細モデルから直接固有値を求めるときに、動作点の物理量として固有値を計算するタイミングにおける瞬時の物理量をそのまま用いる。ある程度統計的な処理をした値を用いたほうが、より適切ではあるが、毎秒繰り返して固有値を求めているので、多少の誤差があっても、全体としての傾向は正しく追えることが分かっている。

5.6.4. 4次モデルと詳細モデルから得られる固有値

安定度の評価について示す。まず、詳細なモデルから直接計算した、真の値としての固有値を図 179 に示す。ただし、"4R","4I"は4次モデルから算出した固有値である。

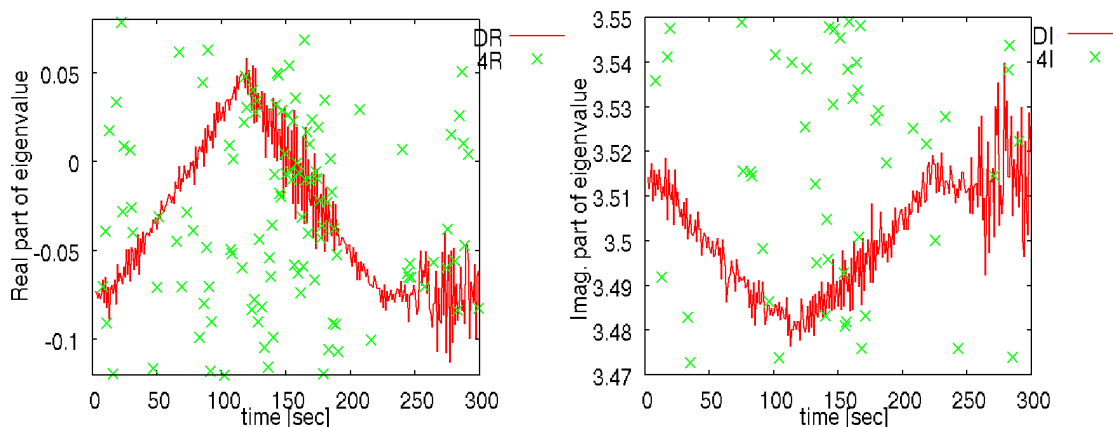


図 179：詳細なモデルの固有値(4次モデルで求めた固有値を併記)

安定性を表す実部は、80秒から150秒の間は不安定となっている。不安定なときは、動揺振幅が自然に拡大するので、動揺波形の振幅が最大となるのは、再び安定な状態に切り替わる150秒付近となる。虚部は、動揺周期を表す(周期[秒]= 2π /虚部)。周期は2秒弱で、より不安定な時ほど周期が長くなっていることが分かる。値が揺れているのは、固有値算出に用いる動作点として、動揺現象の中心値ではなく、状態量の瞬時値を用いているためである。固有値計算を繰り返し行うことで、算出される固有値は、本来の動作点から求め

た値を中心に变化しているようであり、値の傾向は正しく把握できる。次に、発電機 6 と 10 に設置した 4 次モデルで観測された固有値を図 180 に示す。

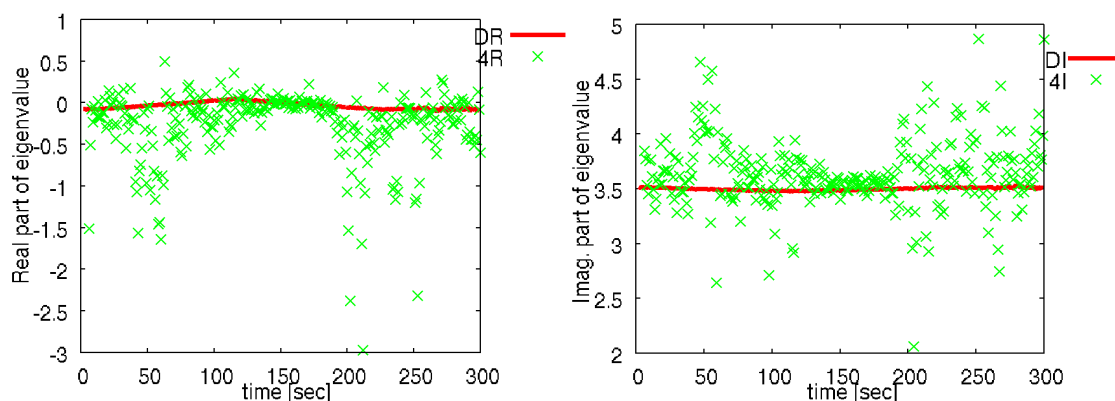


図 180 : 4 次モデルから求めた固有値(詳細モデルからの固有値を併記)

4 次モデルから求めた固有値は、不安定モードによる動揺振幅が最大となり、少しずつ収束に向かう 140 秒から 180 秒付近においてとくに、系統本来の安定度を意味する詳細モデルの固有値と近くなっている。250 秒以降は、動揺の振幅は大きくなっているものの、支配的なモードがはっきりと波形に出ていないことから、固有値としては必ずしも収束的にはなっていない。

5.6.5. 4 次モデルから得られる固有値のばらつき

次に、4 次モデルから得た固有値のばらつきを調べた。動揺振幅の拡大は、安定度の低下による場面と、ノイズの増大による場面で 2 回起きているが、両者の違いに注目する。直近の 12 時点ぶん(12 秒間ぶん)の固有値算出結果について、実部・虚部ごとに求めた標準偏差を図 181 に示す。

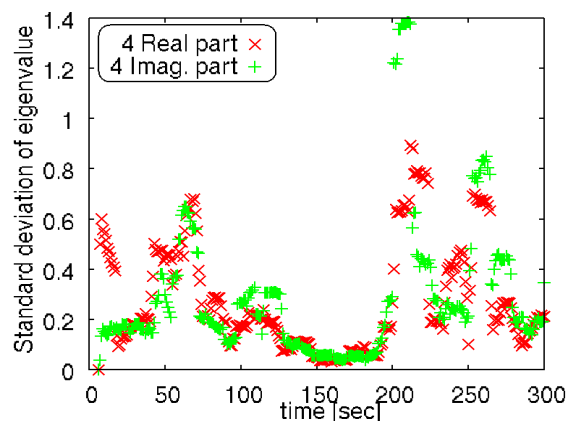


図 181 : 4 次モデルで得た固有値の時系列標準偏差

動揺現象がはっきりと見られた 120 秒付近から 180 秒頃までは、0.2 を下回る状態が続いている。250 秒以降は、150 秒付近と比べれば、ばらつきが大きくなっている。従って、4 次モデルを用いた同定では、系統固有の不安定な動揺モードにより起こる動揺波形を、負荷外乱の増加とは区別して把握できたと言える。

ちなみに、4 次モデルから得られた固有値のばらつきは、動揺が見あらず変動の振幅も小さかった 50 秒付近や 200 秒付近と比べれば、大きな負荷ノイズが見られた 250 秒以降のほうが、小さくなっている。ノイズの大きさと、それによる誘起される動揺の大きさは、系統モデルが完全に線形であれば、ノイズの強さが変化しても、比としては同じだけ現れると考えられ、同定により得られる固有値に影響を及ぼすとは考えにくい。電力系統の非線形性に関わるなどして、ノイズが大きいときに、動揺モードが相対的にやや強く誘起されている可能性がある。

5.6.6. 動揺振幅の評価

系統が不安定なときは、動揺の振幅そのものが大きくなる可能性がある。そこで、発電機の電気出力そのものを対象に、1 秒間ごとに振幅の最大値を記録した。ただし、数秒周期の動揺現象を優先してとらえる目的で、同定用のフィルタを介した後の波形を対象に求めた。結果を図 182 に示す。

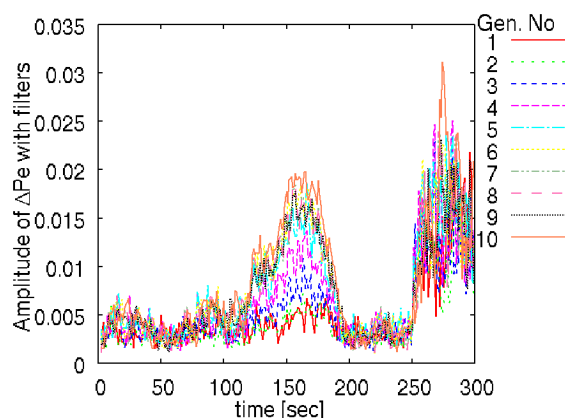


図 182 : ΔP_e の振幅をプロットしたもの

波形からは、次の点が読み取られる。

- 不安定モードによる動揺現象は、主に東側の発電機で起きている。出力を増やしたのは、西端の G1 だが、西側の発電機 G1, G2 などは、ほとんど変化していない。

- 不安定モードによらないノイズの増加では、加えたノイズのぶんだけ値が大きくなる。東西まんべんなくノイズを加えたため、全体として振幅が大きくなっている。

これらの結果から、動揺モードを固有値として同定することにより、動揺現象の有無を判断する方法は、動揺現象の振幅を単に評価する方法と比べ、安定度の低下による動揺現象をより優先してとらえられることが分かった。

適応制御により、パラメータを設計したほうがよいのは、定態安定度が下がり、外乱が小さくても大きな動揺が起こりうる状況になったときである。従って、4次モデルから出した固有値のばらつきを用いたほうが、単に動揺振幅を評価するよりも、パラメータ設計の必要性を、より正確に判断できると考えられる。

一方で、不安定化してある程度時間がたたないと、動揺振幅が大きくならないため、不安定化が同定の結果に反映されるまでに時間がかかる問題点がある。

5.6.7. 各発電機で同定される固有値

各発電機には、2次と5次のモデルを設定した。2次のモデルは、各発電機から見えるモードを算出する目的で、5次モデルは PSS パラメータと安定度の関係の評価しパラメータを更新する目的で設置している。2次モデルのほうが、PSS のブロックを内部に持たないぶんだけ、支配的な動揺モードを比較的正確に得られる傾向がある。

まず、2次モデルで算出した固有値を図 183 に示す。

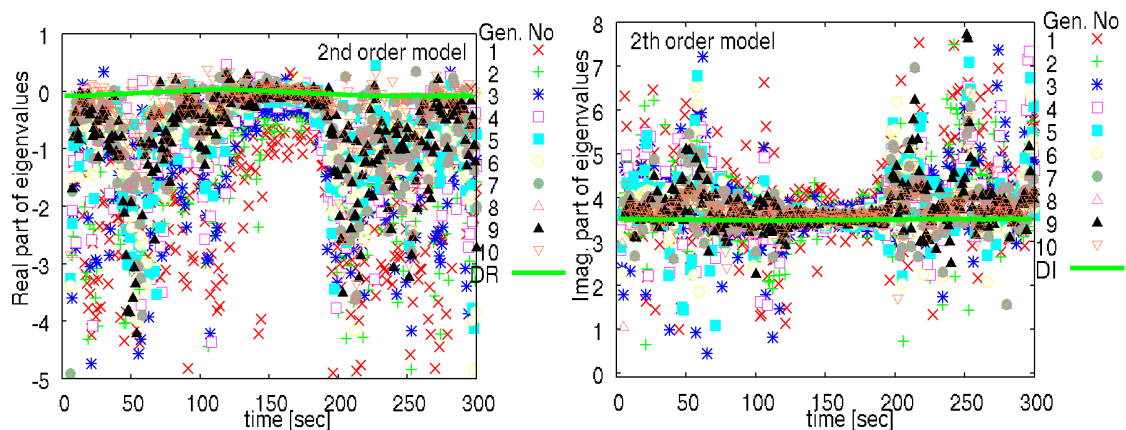


図 183 : 2次モデルで算出した固有値

2次モデルで算出した固有値からは、以下のことが読み取られる。

- 実部は 150 秒から 180 秒付近、虚部は 120 秒から 190 秒付近で、詳細モデルの固有

値に近づく傾向がある。

- 150 秒付近の実部は、東側の発電機ほど系統全体としての安定度の値に近い。西側の発電機ほど、安定よりにずれているが、動揺が誘起されにくかったので、発電機単独で考えれば、比較的安定性が保たれていたと考えられる。ただし、不安定さをもたらしたのは発電機 1 の出力増大(と、東側での負荷増大)である。
- ノイズを増やし、波形の変動量を大きくした 250 秒以降では、固有値としてののばらつきが大きい。2 次モデルにも、系統固有の動揺モードにより発生した動揺現象を、ノイズによる振幅の増大と区別して把握する性質があると考えられる。
- 動揺モードが得られないときの誤差は、詳細モデルの固有値を基準に考えると、実部では負方向に、虚部ではやや正方向に偏っている。

次に、5 次モデルで同定した固有値の様子を図 184 に示す。

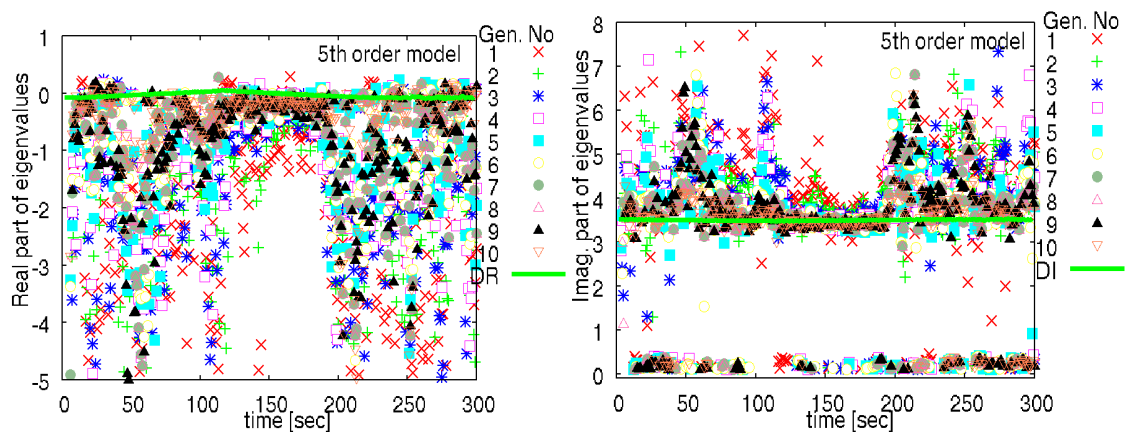


図 184 : 5 次モデルで同定して得た固有値

波形からは、次のことが読み取られる。

- 2 次モデルで求めた固有値と、かなり近い結果になっている。
- 5 次モデルの固有値虚部は、動揺周期をとらずに 0 付近となる場合がある。このようなときは、動揺現象を反映しない固有値を対象にパラメータ設計が行われる可能性が懸念される。

5.6.8. 各発電機で得られる固有値のばらつき

発電機ごとにモードを観測できたかを判断する方法として、2 次モデルと 5 次モデルでそれぞれ、求めた固有値を 12 秒ぶん集めて、実部・虚部ごとに標準偏差を算出した。2 次モ

デルについて算出した結果を図 185 に示す。

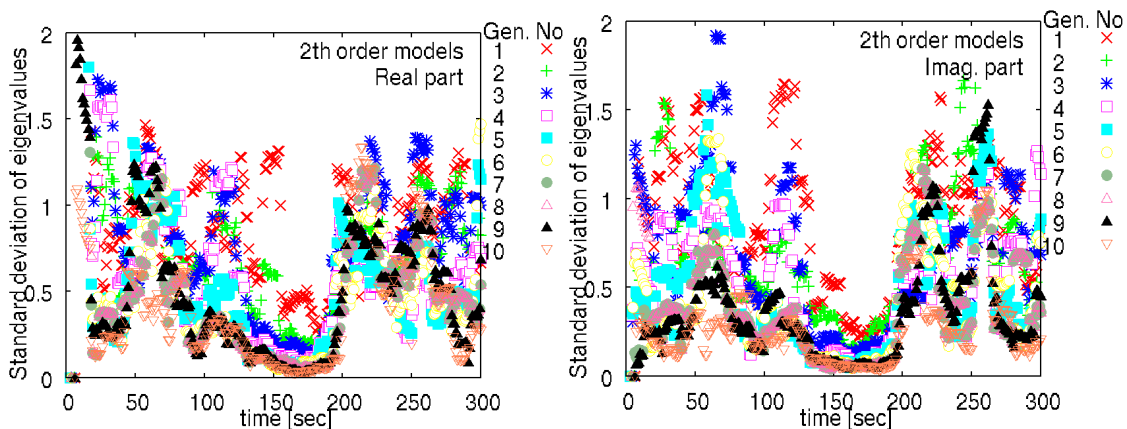


図 185 : 2 次モデルの固有値から求めた標準偏差

グラフの特徴を読み取ると、以下の点分かる。

- 120 秒から 190 秒付近までの間は、実部・虚部ともに小さな値となった。
- 250 秒以降は、比較的大きなばらつきを持っている。
- 動揺が強く現れる東側の発電機ほど、ばらつきが小さい。西端の発電機 1,2,3 は、動揺振幅そのものが小さいためか、とくにばらつきが大きい。

従って、各発電機の固有値のばらつきから、パラメータ設計が求められる不安定モードの存在を、ある程度把握できると考えられる。また、2 次モデルは発電機ごとの設定なので、動揺が強く揺れている位置を知る目的にも、役立つ可能性がある。

次に、5 次モデルで得た固有値のばらつきを標準偏差として求めた結果を図 186 に示す。

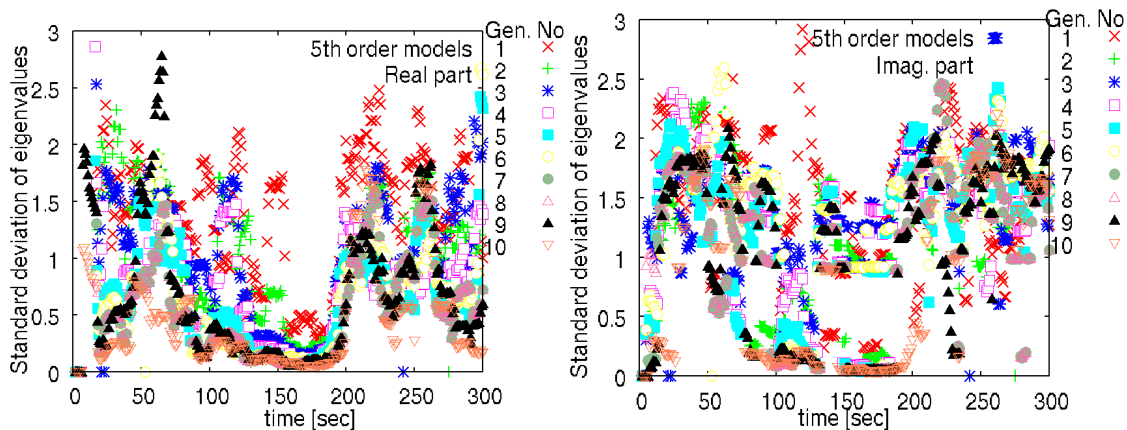


図 186 : 5 次モデルから求めた固有値の標準偏差

実部は、2次モデルに近い結果である。虚部は、安定であったかどうかにかかわらず、ばらつきが大きい。支配的な動揺があっても、虚部が0付近と算出される事例が散見されるため、大きなばらつきを招いていると考えられる。周期が長いモードへの対応をあきらめ、虚部が0付近のモードを無視することもひとつの方法かもしれないが、最初から有効な動揺周期を狭い範囲に限ってしまうと、適応制御としての柔軟性が損なわれる可能性があるため、現状では虚部の絶対値が0.1以上であれば、安定化の対象となる固有値として扱っている。2次モデルか4次モデルで求めた支配的な固有値と、5次モデルで求めた固有値が、互いに大きく離れているときに設計を行わないことで、虚部が0付近として同定された5次モデルでの設計を避けられると考えられる。

5.6.9. 発電機 G1または G10 をペアとした 4 次モデルを各発電機に設置する場合

4次の線形モデルはこれまで、系統全体として最も支配的な動揺モードを検出することを目的に、系統全体に1つだけ設定していた。一方で、4次モデルを、個々の発電機で支配的な動揺モードを見つける目的で用いることも、考えられる。4次モデルでは、2機の発電機の電気出力偏差 ΔP_e と回転速度偏差 $\Delta \omega$ を、状態変数として利用している。発電機を2機の情報を利用することで、特定の2点間としてとらえられる動揺現象の性質が、より得やすくなることが期待される。

ただし、発電機ごとに、動揺現象に関係がありそうな別の発電機と、ペアを組む必要がある。ここでは、ペアの相手となる発電機を、動揺現象を代表すると考えられる特定の1台として決め、残りの発電機にそれぞれ、代表の発電機をペアとする4次モデルを設定した。例えば、発電機 G10 を代表とする場合は、発電機 G1 には(G1,G10)の4次モデル、発電機 G2 には(G2,G10)の4次モデルを置く。常にペアとなる代表の発電機自体には、ここでは4次モデルを設置しないことにする。代表の発電機には比較のため、動揺現象が最も強く出ている物と、最も弱く出ている物を選ぶことにした。

まず、最も動揺が強く表れる発電機 G10 を代表とする4次モデルを、発電機 G1 から発電機 G9 までに設置した場合について調べた。この状態で同定を行い、固有値を算出したところ、**図 187** に示す結果を得た。各モデルから得られた固有値は、凡例「D」で示した詳細モデルから直接算出した固有値を追うように推移している。凡例「2-10」は、発電機 G10 の2次モデルで算出した固有値を、参考までにプロットしたものである。4次モデルで算出した固有値は、G10 の2次モデルから算出した固有値と、ばらつきの出方も含めて、たいへん近くなっている。このようになる理由としては、各4次モデルは発電機 G10 の2次モデルが持つ状態量を、状態変数として持っているため、発電機 G10 の動揺現象の影響を強

く受け、結果的に発電機 G10 だけの情報を持つ 2 次モデルの固有値と近い結果になったことが考えられる。従って、固有振動の振幅が大きい 150 秒付近では、得られた固有値は、発電機ごとにはばらつかず、ひとつの値に集中している。次に、算出した固有値を時系列上に 12 秒ぶん集め、その標準偏差を求めた結果を図 188 に示す。固有振動が大きく現れる期間ほど、ばらつきが小さくなる傾向は他のモデルと共通している。最もばらつきが小さい期間では、発電機ごとの違いがほとんど見られない。最も動揺が強く見られる発電機 G10 の性質が、全ての発電機で示されているためと考えられる。

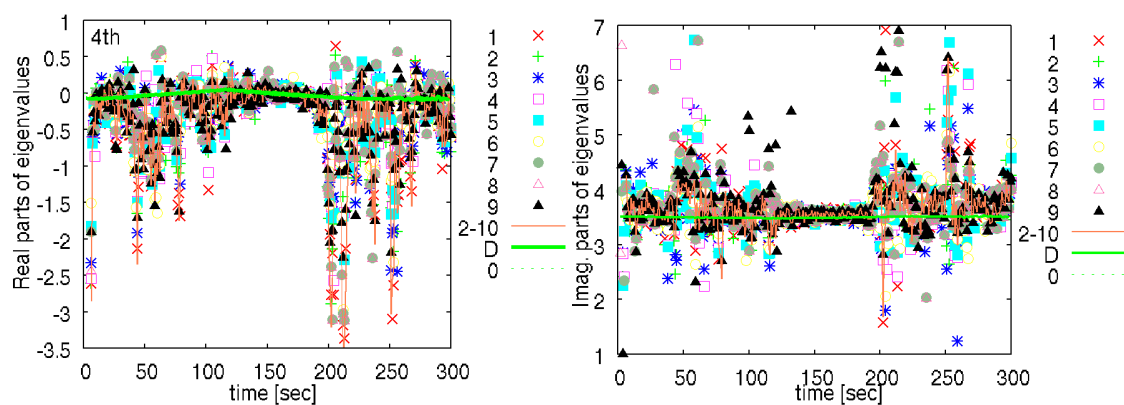


図 187：発電機 G10 とペアになる 4 次モデルの固有値

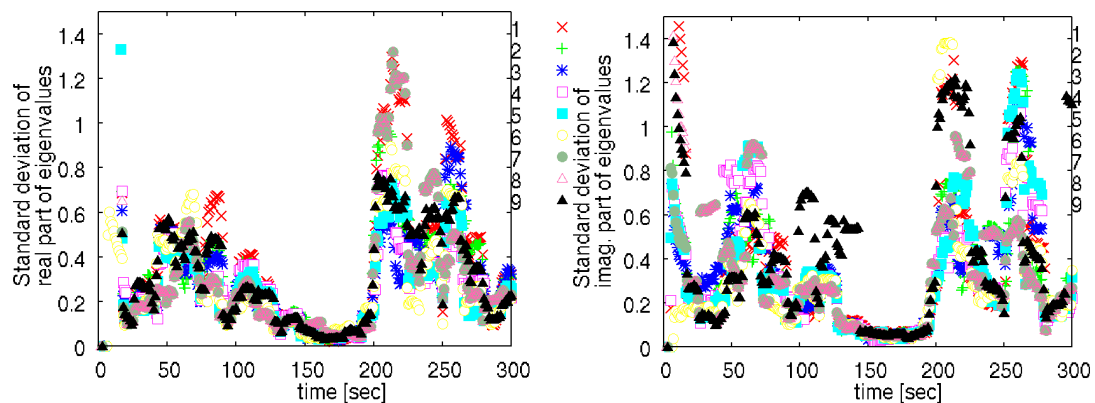


図 188：発電機 G10 とペアになる 4 次モデルの固有値標準偏差

次に、代表となる発電機を動揺現象が最も見られない G1 として、発電機 G2 から G10 に、4 次モデルを設置した。発電機 G2 には(G2,G1)の 4 次モデル、発電機 G3 には(G3, G1)の 4 次モデル、のように設定した。同定を行いながら固有値を求め、図 189 に示す結果を得た。凡例「2-1」は、発電機 G1 の 2 次モデルから得られた固有値を、参考までに示した

ものである。4次モデルから得た固有値と比較すると、実部ではややマイナス方向に外れた値となっている。4次モデルの固有値を見ると、発電機ごとに値が異なる傾向が見られる。各発電機の2次モデルから固有値を求めた図183と傾向が似ている。ペアとした発電機G1は、相対的に動揺現象の影響が小さいため、設置した場所の発電機で観測された動揺現象のほうが支配的となり、固有値となって現れたため、その発電機だけの情報から同定を行う2次モデルと結果が近くなったと考えられる。4次モデルから得た固有値を時系列上に集め、標準偏差を求めた結果を図190に示す。全体的に動揺現象が強くなる期間では、動揺現象が大きく現れる東側(添字番号が大きい)発電機ほど、ばらつきが小さくなっている。

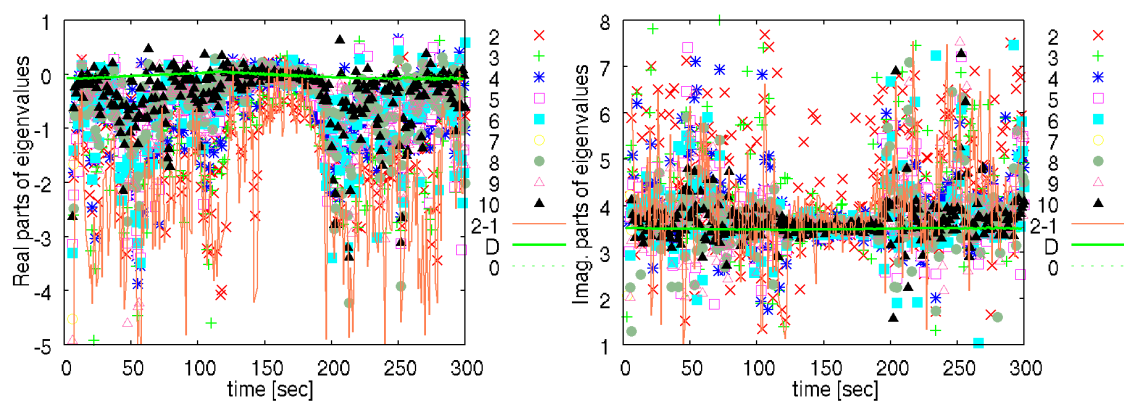


図 189 : 発電機 G1 とペアになる 4 次モデルの固有値

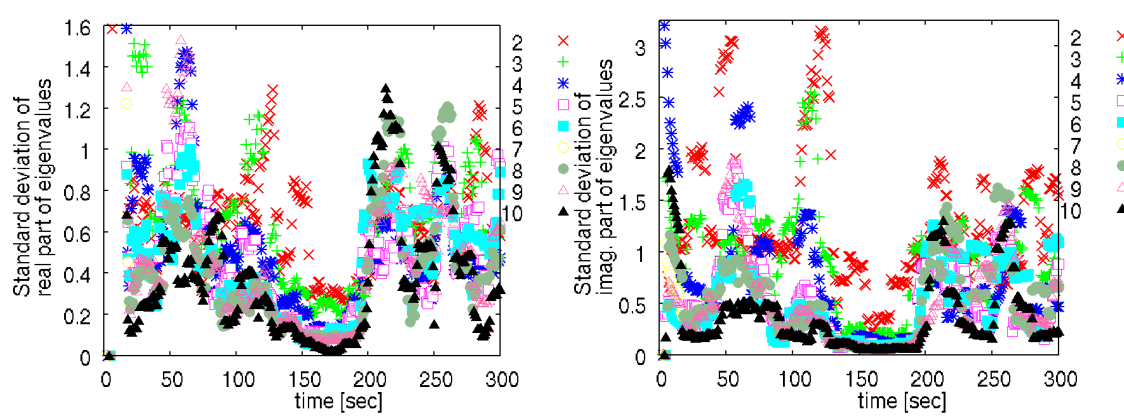


図 190 : 発電機 G1 とペアになる 4 次モデルの固有値標準偏差

このように、各発電機に4次モデルを設置して固有値解析を行うと、モデルごとに考えている2機のうちで、動揺現象がより強く現れている発電機で2次モデルを使って同定した固有値と同じようなモードが、4次モデルの固有値を代表して出力されるようである。特定

の場所と、発電機自身のどちらか一方でも不安定になったときに、パラメータ設計が必要となるような場面があれば、このような 4 次モデルを各発電機に配置する考え方が、役に立つ可能性がある。

5.6.10. 発電機 1, 10 から見た諸パラメータ

これまで、さまざまな指標を全発電機に対してプロットしたが、ここでは発電機 1 と 10 を対象に、発電機ごとに求めた固有値とそのばらつきをプロットする。発電機 1 について図 191 に、発電機 10 について図 192 に示す。固有値実部と虚部のプロットについては、図中の凡例は次の意味を持つ。

- "ER""5R""5I"が 5 次モデルで求めた固有値
- "E2R""E2I""2R""2I"が 2 次モデルで求めた固有値
- "10R""10I"が 4 次モデルで求めた固有値(発電機(G6, G10)のペアとして設定)
- "DR""DI"が詳細モデルで求めた固有値

また、ばらつき(標準偏差)のグラフの凡例は、上から順に 5 次モデル実部・5 次モデル虚部・2 次モデル実部・2 次モデル虚部となる。

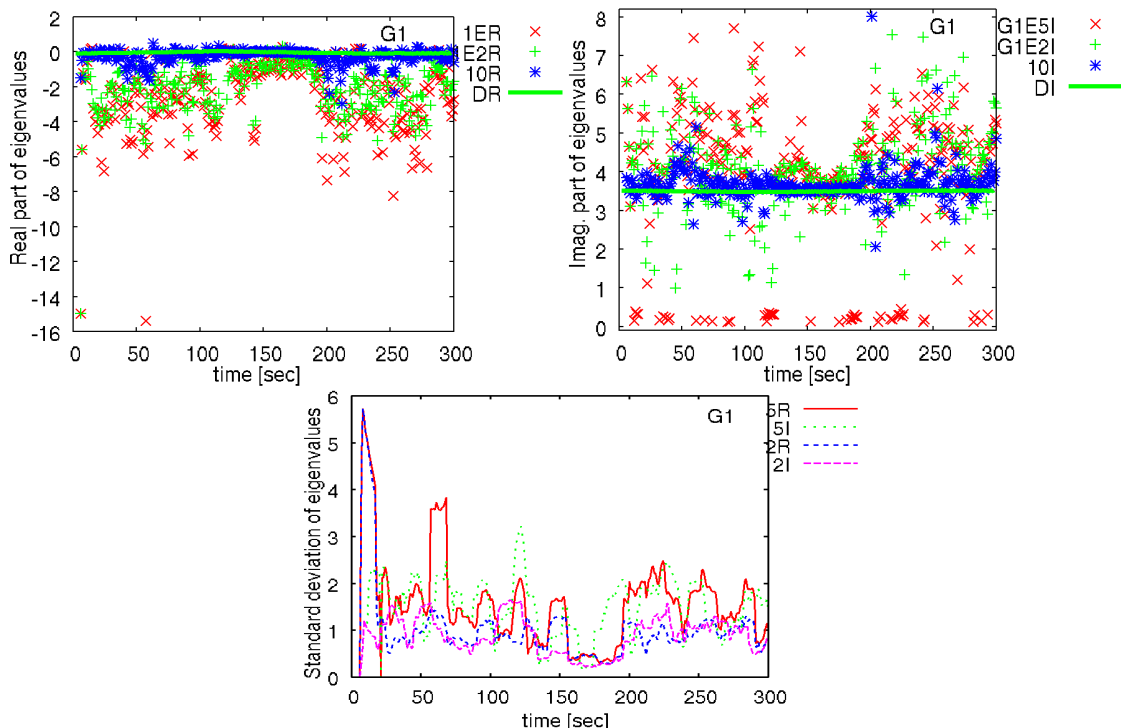


図 191 : 発電機 1 の固有値・固有値標準偏差

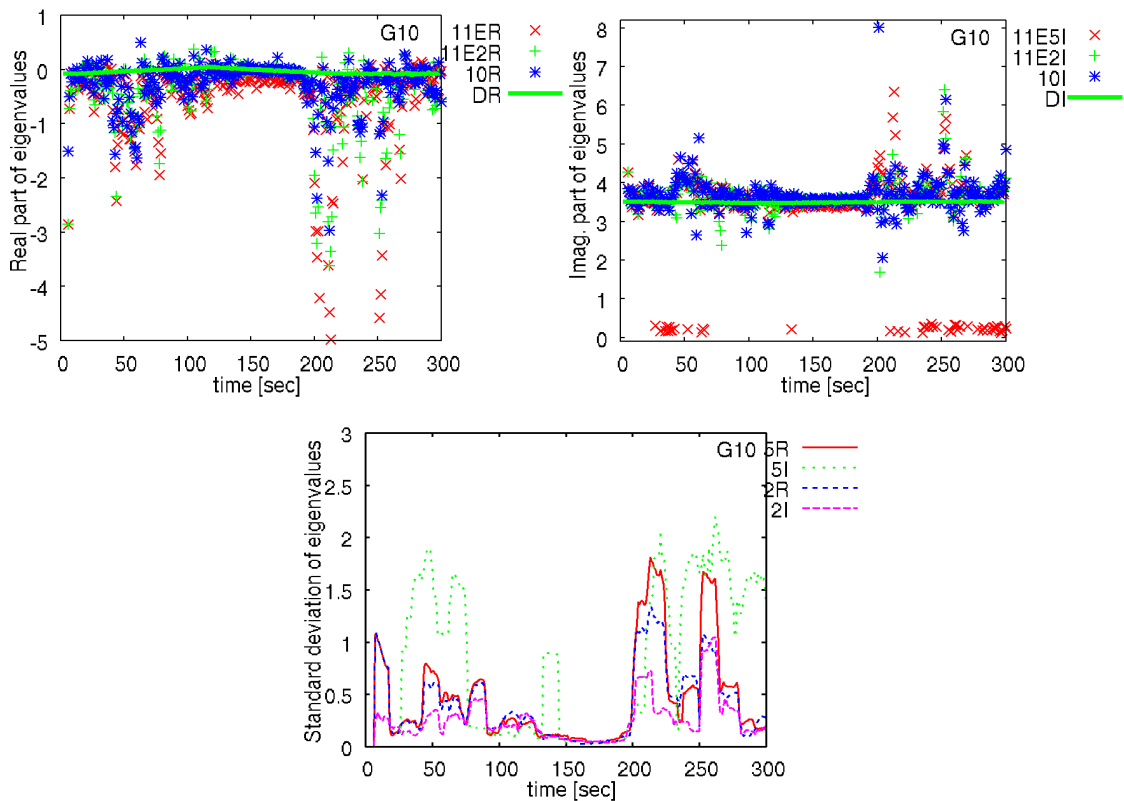


図 192 : 発電機 10 の固有値・固有値標準偏差

発電機 1 のほうが、得られる値の幅が広く、ばらつきが強く出がちである。5 次モデルと 2 次モデルから得た固有値は、どちらも詳細モデルから求めた固有値を基準にすると、偏りがある。偏りの現れ方には、5 次モデルと 2 次モデルで類似点が見られる。従って 5 次モデルと 2 次モデルで求めた固有値が、互いに近いからといって、その値が詳細モデルから直接求めた真の値に近いとは限らないことが分かる。このことは、4 次モデルと他のモデルで求めた固有値を比較するときにも、わずかながら当てはまるようである。

5.6.11. 電力系統が連続的に変化する場合のモデル同定に関するまとめ

ここまでは、時間とともに発電機の出力や負荷の消費量が変化する場合について、同定の結果を詳しく調べた。その結果、以下のことが分かった。

- 発電機の出力や負荷の消費量を変えると、系統全体の定態安定度が変化する。それにより動揺現象が起こるが、動揺の振幅が大きく出る場所は、必ずしも発電量を増やした発電機とは限らず、今回は西端の発電機で出力を增強したところ、東側の発電機ほど動揺の振幅が大きく出る結果になった。

- 2次・4次・5次モデルを用いた同定では、定態安定度が低下したことにより発生する動揺現象に対して、対応する固有値が得られた。ただし、5次モデルでは動揺現象の存在によらず、値が0付近となる場合が散見された。
- 定態安定度が高い状態で、負荷へのノイズを大きくしたときは、同定により得られた固有値は、系統固有の動揺モードによる動揺発生時と比較すれば、ばらつきが大きかった。
- 動揺振幅を直接評価した場合は、安定な状態でノイズが強い場合と、不安定な状態でノイズが小さい場合の区別ができなかった。
- 固有値を時間軸上に集めて標準偏差を求めると、2次・4次・5次モデルの実部と、2次・4次モデルの虚部では、標準偏差の値が小さいときに、不安定モードによる動揺現象の振幅が大きく見られた。なお、標準偏差が小さくなるのは、動揺現象の振幅が大きいつきであるが、動揺振幅は、不安定化時には徐々に大きくなり、安定時には徐々に小さくなる性質がある。従って、最も固有値がばらつきにくいのは、不安定な状態が安定な状態に切り替わったときである。不安定さの検出を目的に固有値のばらつきを利用する場合は、検出の遅れを意識する必要がある。
- 4次の線形モデルを、代表の発電機がペアとなるように各発電機に配置すると、モデルに関係する2つの発電機のうち、動揺現象がより強く見られる側の発電機で2次モデルから求めた固有値と比較的近い値が、その4次モデルを代表する固有値として得られた。

このシミュレーションで、不安定時とノイズ振幅拡大時を区別できた背景には、不安定時に1種類のモードだけがはっきりと現れたことがあげられる。複数の動揺モードが同時に不安定化するときは、ノイズ増大時と同じく、複雑な波形となり、正確な同定ができない可能性がある。動揺現象を検出する手法としては、波形の周波数解析など、別の方法も考えられる。

5.7. 系統状態が連続的に変化する場合のオンラインパラメータ設計

系統状態が時変となる場合における，同定の傾向をふまえ，PSS のパラメータを更新するタイミングを考慮したオンライン設計の手法を考え，シミュレーションにより検証を行った。

5.7.1. シミュレーションの条件

5 次のモデルを用いたパラメータ設計では，必ずしも正しい方向にパラメータを移動できるとは限らない。そこで，以下の場合

- 正しい設計ができる可能性が低いとき
- 設計を行わなくても安定なとき

は，設計を行わずに待機したい。設計の必要性を自動的に判断する手法を常時適用すれば，本当に必要なときにだけ，パラメータが移動するシステムを構築できる。このような目的を満たすため，次の2つの条件を考えた。

- 系統全体で不安定な動揺モードが見られるときにだけ設計する
- 5次モデルが動揺モードを正しく把握している発電機でだけ設計する

前者は設計を行うタイミング，後者は設計を行う場所を意味する。

具体的な判定のアルゴリズムは，次のとおりである。

- 判定は，毎秒実施する。
- 前者の条件が成立する場合に限り，個々の発電機に関する後者の条件を評価する。
- 後者の条件が成立する発電機で，パラメータを更新する。

なお，上記の対策は，明らかに不都合な状況を排除することが目的である。安定化の実現は，保証できない。

シミュレーションは，電気学会 WEST10 機系統モデルを対象に行う。同モデルは本来，安定なモデルだが，発電機 G1 からノード 5,6,7,8 への潮流を少しずつ増やしていくと，安定度は次第に悪化する。発電機の出力は図 193 のように次第に発散的となる。このような状況下で，PSS のパラメータを適応制御することにより，定態安定度の維持を目指す。潮

流の増加を際限なく続けていくので、どのように制御しても、いつかは必ず発散する。いつまで発散せずに、持ちこたえられるかを見る。なお、負荷に加えるノイズの振幅は 0.06p.u. とし、ほぼ一定に保った。4 次モデルは、発電機(G6, G10)の組で、1 つだけ設定する。発電機 1 の出力増加量は 0.006p.u./s、負荷の消費増加指示値はそれぞれ 0.0028p.u./s とした。パラメータ設計を実施するかどうかの判断は、1 秒ごとに行った。パラメータ設計は、3 分木法のアルゴリズムで行った。パラメータの初期値を表 12 に示す。ここでは、パラメータ設計は、位相補償だけを対象とした。なお、この節ではパラメータ設計は、位相補償パラメータの平均値 t_{230} を固定した上で、 $t_2=t_{230}+x$ 、 $t_3=t_{230}x$ とした場合の x だけを対象に行っている。ゲイン k_8 については、3 分木法では、パラメータ設計を行っている間は、ほぼ無条件に上昇する傾向が多くシミュレーション結果から得られているため、操作を行う意味が見いだせず、対象から外した。

表 12 : PSS の初期パラメータ

k8[p.u.]	t2[sec]	t3[sec]	t1[sec]	t8[sec]
1.0	0.25	1.25	5.0	0.02

以下の場合についてシミュレーションを行い、手法の有効性を検討した。

- パラメータを設計しない場合
- 詳細モデルの固有値が分かると仮定して、その改善を目的としてパラメータ設計を毎秒実施する場合。オンライン設計ではなく、理想的な場合の検証である。
- 5 次モデルの固有値を用いて、毎秒無条件に設計する場合
- 4 次モデルで動揺現象が見つかったときに、5 次モデルの固有値を用いてパラメータ設計を実施する場合
- 2 次モデルで動揺現象が見つかった発電機で、5 次モデルを用いてパラメータ設計を実施する場合
- 4 次モデルで動揺現象が見つかったときに、それぞれの発電機の 5 次モデルで見つかった固有値が、4 次モデルで得られた動揺モードに近いかどうかを調べ、近いと判断された発電機で、5 次モデルの固有値を用いてパラメータ設計を実施する場合
- 動揺振幅が大きい発電機で、5 次モデルの固有値を用いてパラメータ設計を実施する場合

5.7.2. PSS のパラメータを更新しない場合

まず、PSS のパラメータを初期値に固定した場合について示す。

5.7.2.1. 電気出力偏差・回転子速度・PSS 出力

シミュレーションでは、少しずつ東向き潮流が増加し、安定度が悪化する。各発電機の電気出力を図 193 に示す。

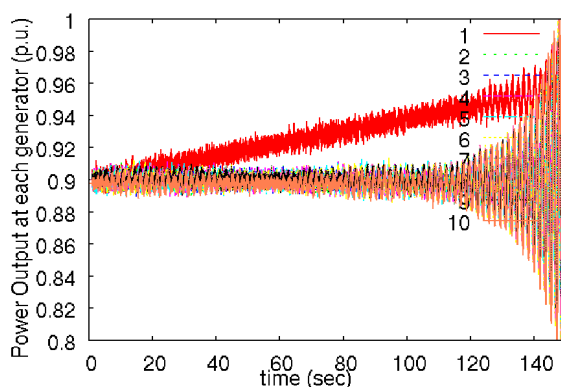


図 193: 電気出力の変化

100 秒付近から、動揺の振幅が次第に大きくなり、発散する。発電機 1 の出力を、直線的に上昇させたことにより、不安定化したからである。なお、グラフの縦軸は発電機の単位系で書かれている。不安定化したときの波形を 5 秒分拡大して図 194 に示す。

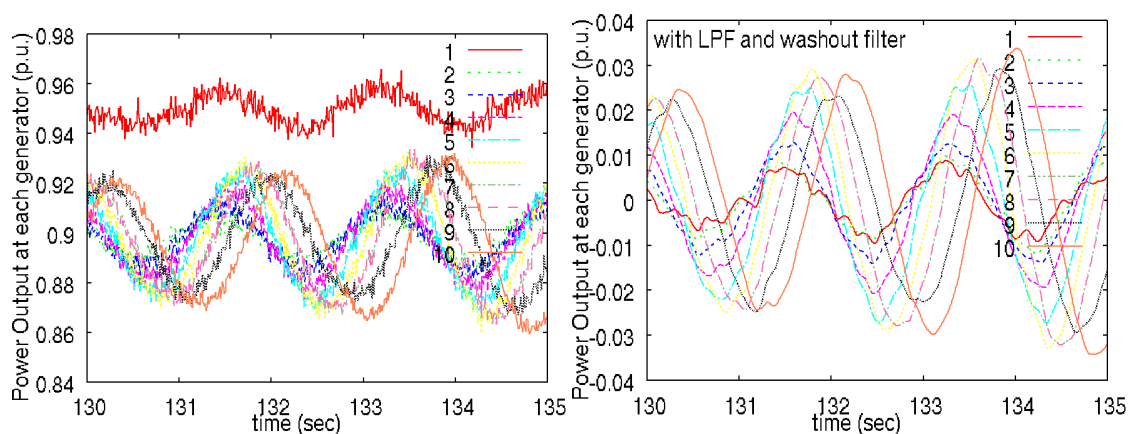


図 194: 不安定時の電気出力・電気出力偏差

発電機 1 と他の発電機の動作点が大きくずれているが、フィルタの適用により、0 を中心とした動揺となり、高周波成分が取り除かれ、2 秒程度の周期を持つ動揺の同定に適した波

形となったことが分かる。番号が大きい東側の発電機のほうが、番号が小さい西側の発電機に比べ、動揺の振幅が大きい。フィルタ適用後の波形で、1秒ごとに振幅の絶対値のピーク値を集めたのが図 195 である。最も安定なときは、0.003 付近で推移している。100 秒付近から、動揺による振幅が拡大している。このシミュレーションでは、詳細モデルで求めた固有値実部が 0 をこえ、定態安定度が失われるのは 70 秒付近であるので、不安定化から振幅の拡大が顕在化するまで、30 秒ほどかかったことが分かる。

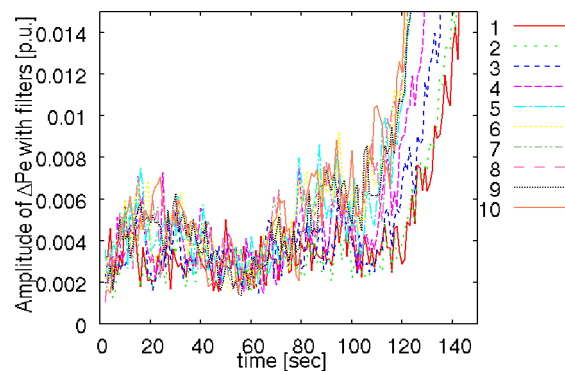


図 195 : 振幅の秒間ピーク値をプロットしたもの

5.7.2.2. 電圧の変化

各発電機の端子電圧を図 196 に示す。不安定化する前は、初期の電圧をほぼ保っている。発電機 1 で、若干の電圧低下が見られるが、1%にも満たない。

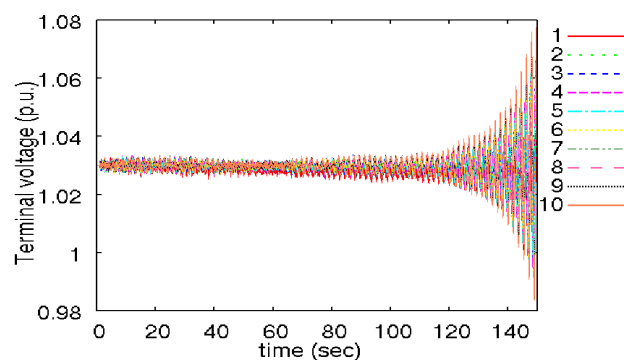


図 196: 各発電機の端子電圧

5.7.2.3. 系統全体に関する固有値

次に、詳細なモデルと 4 次モデルから計算した、系統モデル全体における固有値を図 197 に示す。

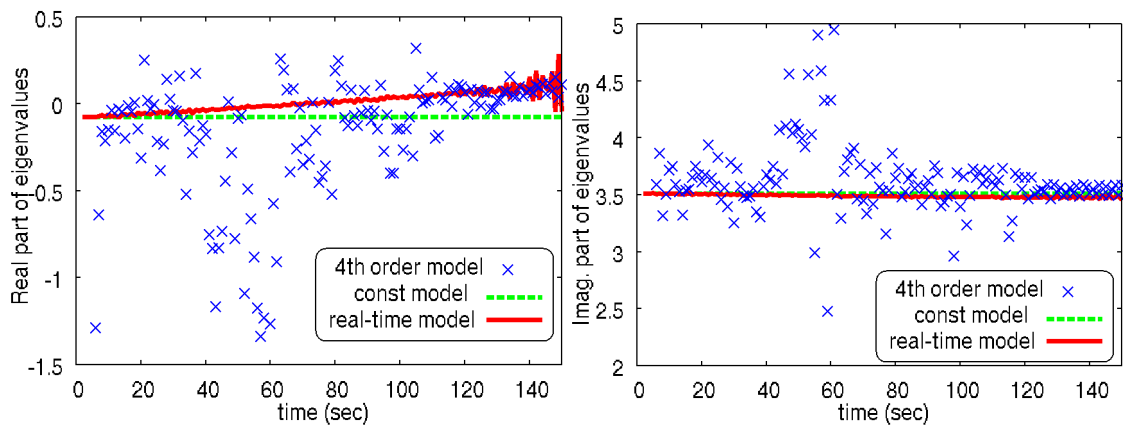


図 197：詳細モデルと4次モデルから算出した固有値

詳細モデルを用いた固有値は、2種類について求めた。時刻0の状態量で線形化する方法(const model)は、状況の変化に追従できず不適切な値となっている。1秒ごとに、観測した状態量を動作点であると仮定して線形化する方法(real-time model)は、実際の動作点から少々ずれた位置で線形化しているものの、全体としては本来の安定度を正しく追っていると考えられる。実部は少しずつ上がり続け、虚部は少しずつ下がっている。4次モデルから算出した固有値もプロットしている。全体として、詳細なモデルから算出した固有値を追いかける結果となっている。波形に動揺が見えにくくなる60秒付近では誤差が大きく、動揺の波形がはっきりしてくる100秒以降でとくに正確になった。4次モデルの固有値を対象に、直近の12秒ぶんの値に対して標準偏差を求めた結果を、図198に示す。

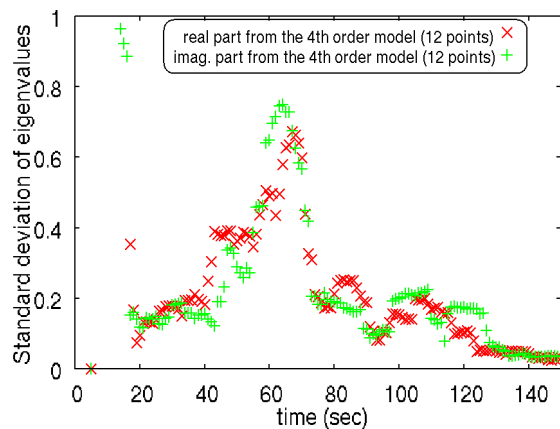


図 198:4次モデルから算出した固有値に対する標準偏差

実部・虚部ともに近い性質を示している。動揺波形がはっきりと見られる100秒以降は、0.2以下となる場合が多い。60秒付近では、同定の誤差を反映してばらつきが大きい。40秒までの期間でも、シミュレーション開始による外乱が影響してか、ばらつきが比較的小さくなっている。

5.7.2.4. 各発電機で観測された2次モデルの固有値

各発電機に設けた2次モデルで同定できた固有値の値を、図199に示す。

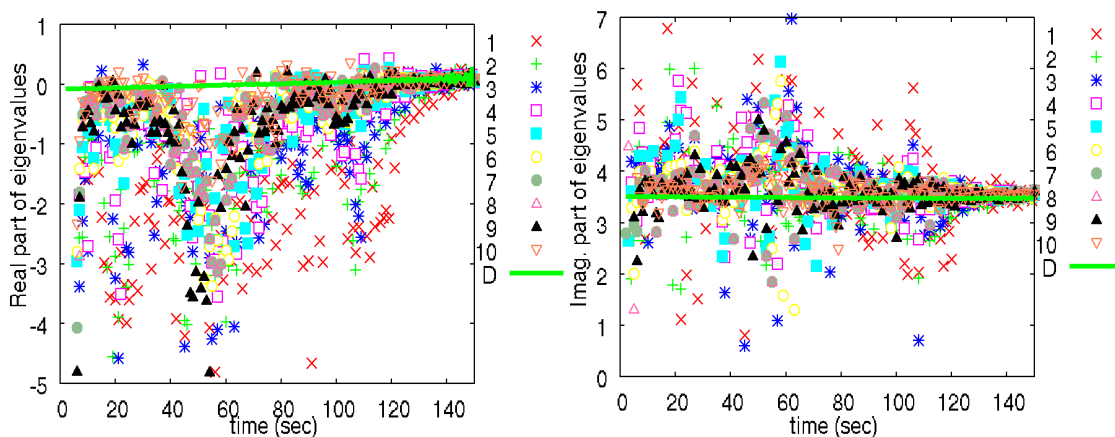


図199: 2次モデルから算出された固有値

動揺を把握しづらくなる60秒付近で、本来の動揺モードからの誤差が大きい。動揺振幅が大きくなる100秒以降では、本来の支配的モードに近づいていくことが分かる。固有値の傾向は、発電機ごとに異なる。例えば図200に示すように、東端のG10のほうが、西端のG1よりも、ばらつきが小さく、より不安定になっている。2次モデルにはこのように、動揺現象がどのようにとらえられているかを、発電機ごとに比べられる特長がある。

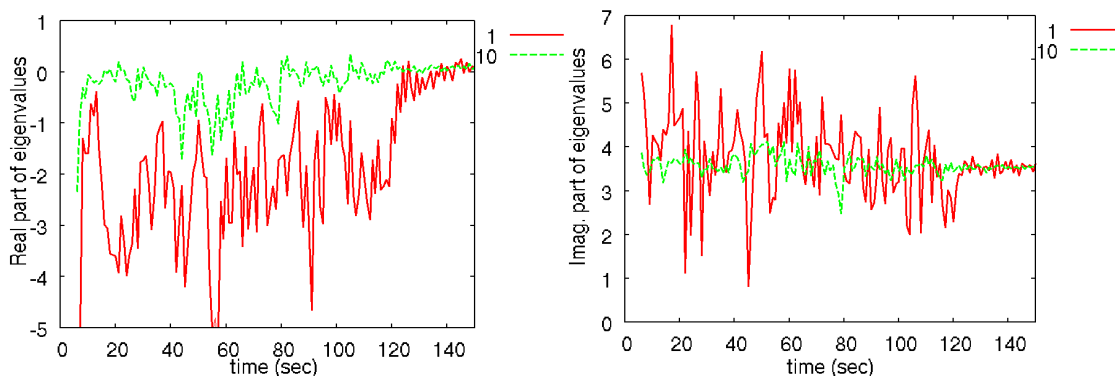


図200: 一部の発電機について取り出したもの

不正確な同定ほど、得られた固有値がばらついているように見えるため、2次モデルで算出された固有値についても、12秒ぶんのデータに対する標準偏差を求めた。その結果を図201に示す。60秒付近に、ばらつきが大きくなったことによる山を持つ。20秒から40秒までと、100秒以降では小さくなる傾向がある。発電機1,2,3,4は、他の発電機と比べ、比

較的ばらつきが大きくなりやすい。これは、動揺振幅の大きさそのものが、東側の発電機ほど大きいことと関係していると考えられる。

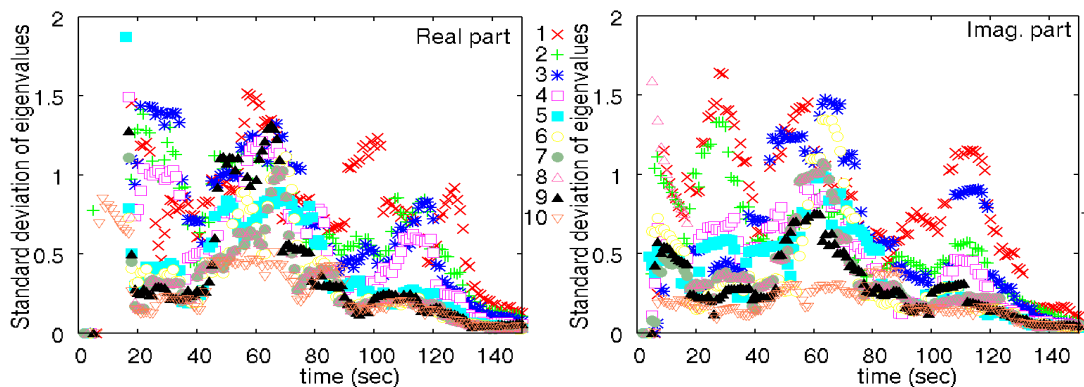


図 201: 2次モデル固有値のばらつき

発電機 10 はとくに、ばらつきが小さい。標準偏差の実部と虚部の値は、各発電機がモードを把握しているかを判断する指標として、利用できると考えられる。

5.7.2.5. 各発電機で観測された5次モデルの固有値

次に、各発電機の5次モデルで検出した固有値について、図 202 に示す。

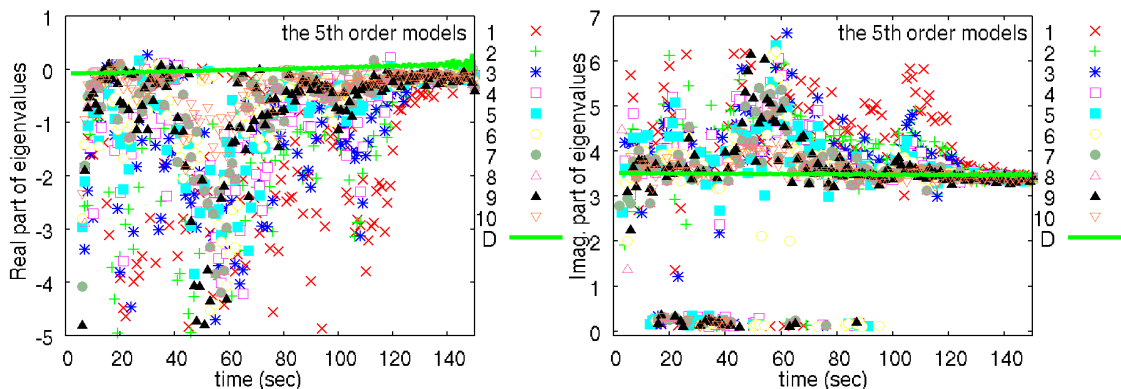


図 202: 5次モデルから算出した固有値

実部・虚部ともに、2次モデルから算出した固有値と比較的近い性質を示している。ただし、実部においては、動揺振幅が大きくなった100秒以降で、詳細モデルが示す本来の値と比べ、0.2ほど小さい値に値が集中している。また、虚部では動揺周期を検出できずに、値が0付近となっている固有値が見られる。動揺波形が分かりにくくなる60秒付近で、固有値の値が乱れる点は、2次モデルと共通している。2次モデルと同様に、発電機ごとにモ

ードをとらえる能力に差がある。発電機 1 と 10 について、固有値の様子を図 203 に示す。

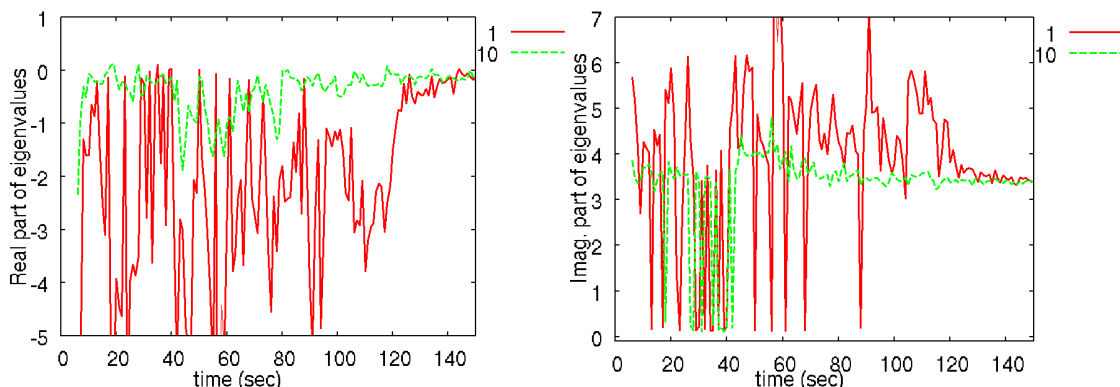


図 203: 発電機 1 と 10 の 5 次モデル固有値

2 次モデルと比べ、発電機 10 の虚部などにおいて、値の変化が激しくなっている。30 秒付近でとくに、支配的モードの周期を観測しにくいようである。5 次モデルの固有値を対象に、時間軸上における標準偏差を算出した結果を図 204 に示す。

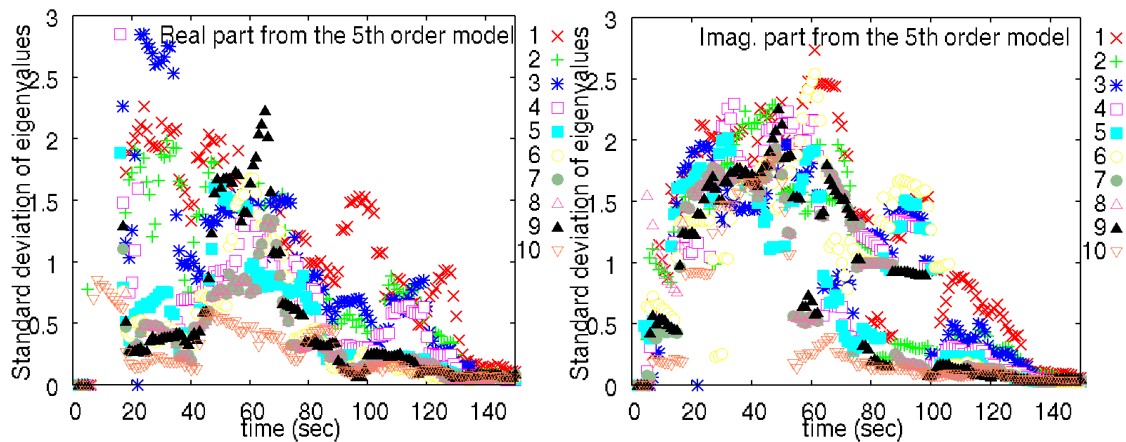


図 204: 5 次モデル固有値の標準偏差

実部は、2 次モデルと近い性質を示している。ところが虚部では、動揺波形が比較的是つきり観測されている 20 秒から 40 秒までの間に、ばらつきが大きくなっている。この期間で動揺周期を見つけられない現象が多発したことが原因と考えられる。

5.7.2.6. 同定結果の固有値設計実施判定への利用

5 次モデル以外のモデルから算出した固有値は、PSS パラメータと安定度の関係を求める目的では利用できない。パラメータ設計を必要とするような、支配的なモードが存在する

かや、存在する場合の値を明らかにする目的で用いる。その結果は、5次モデルでパラメータ設計を行うかを判断する材料として、利用される。例えば、系統全体として支配的な動揺モードが見つからないときは、安定度の問題は確認されておらず、パラメータチューニングを行わなくてよいという考え方がある。

各発電機でパラメータ設計を行うかどうかの判断では、5次モデルや2次モデルで求めた固有値を利用できる。例えば、5次モデルで求めた固有値が、他の方法で求めた固有値に近いときに、その5次モデルで同定が正確に行われたとみなし、その5次モデルに対応する発電機で、パラメータを設計するという考え方がある。

これらの考え方を、シミュレーションにより検証する。

5.7.3. リアルタイムの詳細固有値を直接改善するように設計する場合

5.7.3.1. 電気出力偏差と PSS パラメータ

パラメータ設計の理想的な場合として、詳細固有値を用いて3分木法で設計した場合を考える。検算目的で用いている固有値を改善するようにパラメータを更新するので、理想的な事例となる。今後行うオンラインパラメータチューニングを評価する目的で行う。各発電機の電気出力偏差を図 205 に示す。

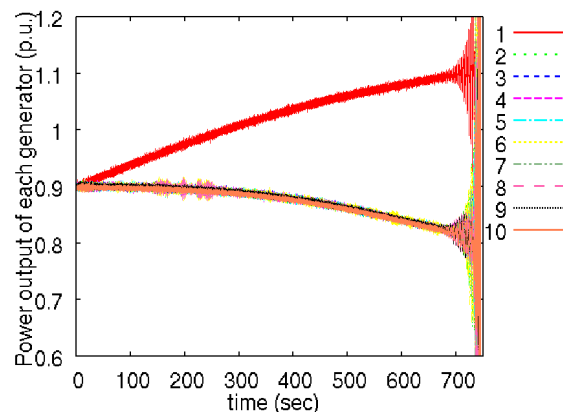


図 205 : 各発電機の電気出力偏差

650 秒付近までは安定だが、700 秒以降に動揺振幅が拡大して、750 秒の直前で発散した。東向き潮流を増加させ続けたため、最終的に発散することは避けられないが、理想的に位相補償パラメータを調整すれば、750 秒付近まで発散を遅くできることが分かる。PSS パラメータの変化を図 206 に示す。

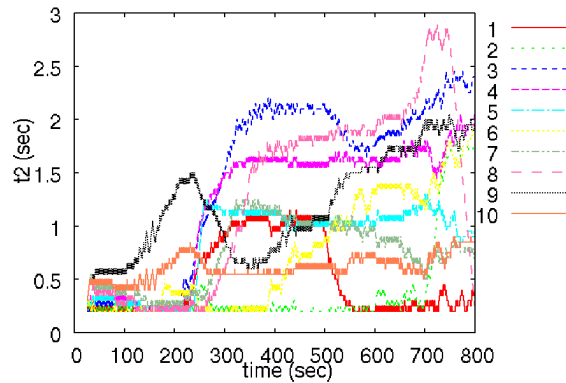


図 206:PSS の位相補償パラメータ

詳細モデルから直接求めた固有値を用いているにもかかわらず、パラメータは必ずしも収束的にはなっていない。この背景には、同時に10の自由度でパラメータを操作するので、自由度が大きすぎて、動くべき方向が定まりにくかったことがあると考えられる。

5.7.3.2. 系統全体に関する固有値

詳細モデルと4次モデルで求めた固有値の変化を、図207に示す。

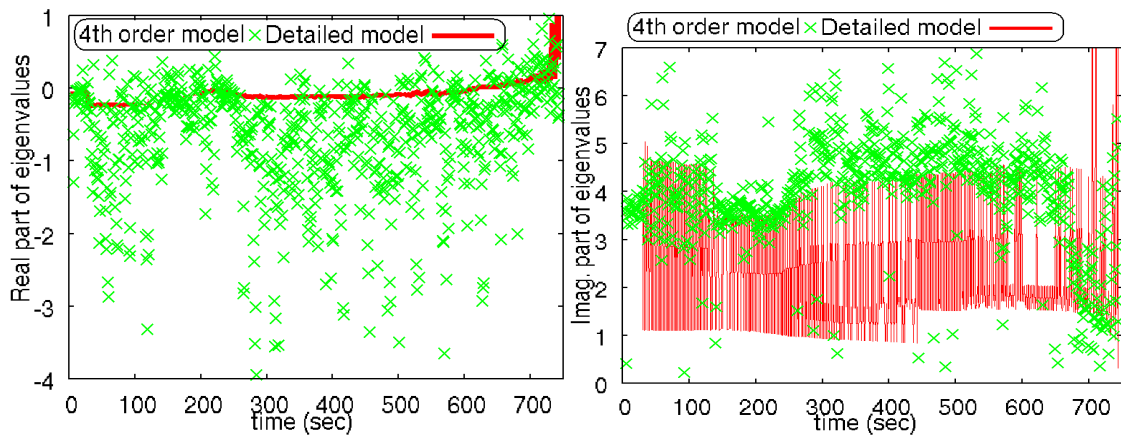


図 207: 詳細モデルと4次モデルの固有値

詳細モデルの虚部で、動揺周期が頻繁に入れ替わっている点が特徴的である。このような状況下では、動揺波形には、複数の周期の動揺が混在する。支配的な固有値の虚部が、数秒おきに大きく入れ替わる状況では、同定により正しい値を求めることは、困難である。

4次モデルで検出した固有値に対する標準偏差を、図208に示す。シミュレーション末期になっても虚部のばらつきが小さくならず、虚部の値が落ち着かなかったことが分かる。

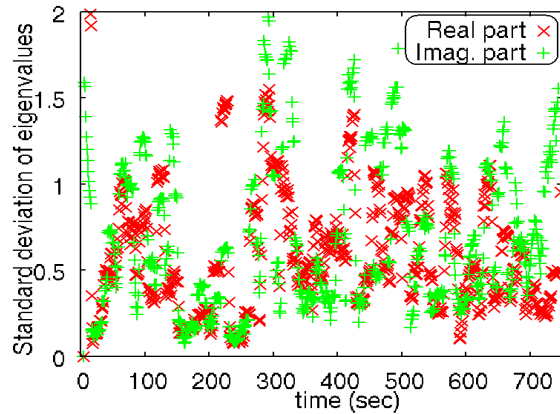


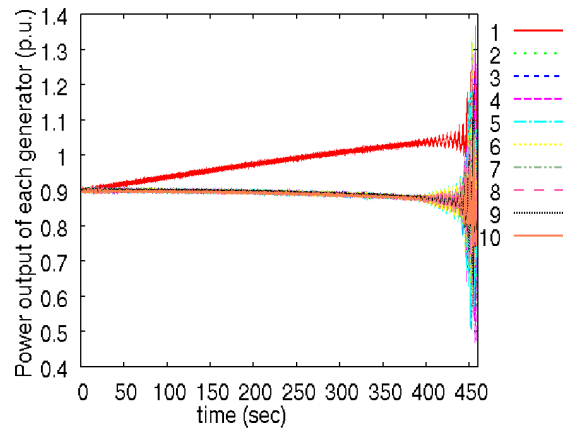
図 208:4 次モデルから求めた固有値の標準偏差

支配的なモードが他の固有値に切り替わるほどにまでパラメータを更新すると、同定が困難となりうる。従って、パラメータの更新は、現在不安定化している動揺モードが収まる程度にとどめ、他の固有値の悪化を抑えたほうが、同定が難しくなる状況を避けられる可能性がある。

5.7.4. 5次モデルを用いて毎秒設計する場合

5.7.4.1. 電気出力偏差と PSS パラメータ

次に、5次の低次線形モデルを用いて、毎秒パラメータ設計を行った場合について調べた。各発電機の電気出力について図 209 に示す。およそ 400 秒までは、動揺がよく抑えられている。パラメータを全く操作しない場合と比べれば、発散を 300 秒程度遅くできた。理想的な場合と比べれば、300 秒程度早い発散である。



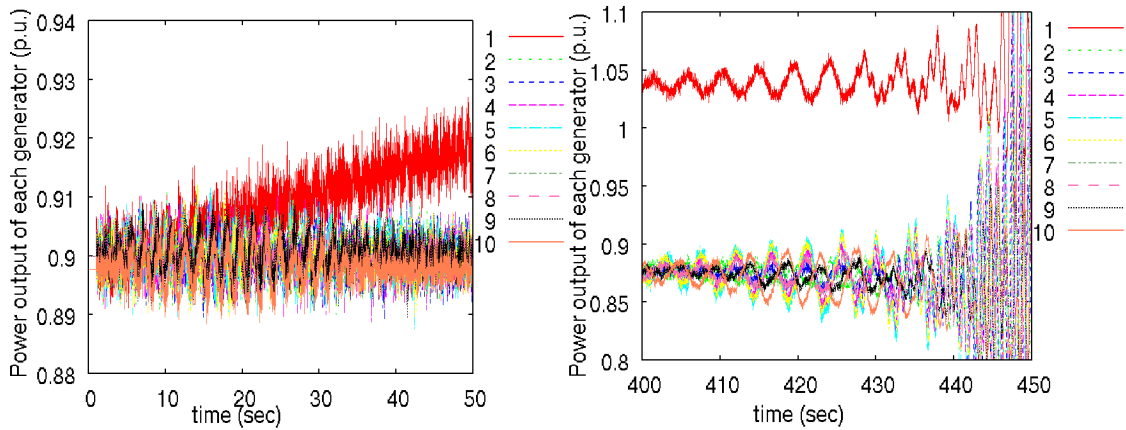


図 209:各発電機の電気出力偏差

10 秒から 30 秒の間に、2 秒台の周期を持つ動揺がはっきり見える期間がある。400 秒以降では定態不安定となるため、動揺がはっきり見える。動揺周期が 5 秒程度のモードと、1 秒程度のモードが混在しており、短周期のモードがより不安定になっていく様子が分かる。各発電機の PSS パラメータを図 210 に示す。まず、位相補償を打ち消すように動き、150 秒以降では発電機 10 で進み補償となった。以降は、多くの発電機が進み補償となっている。

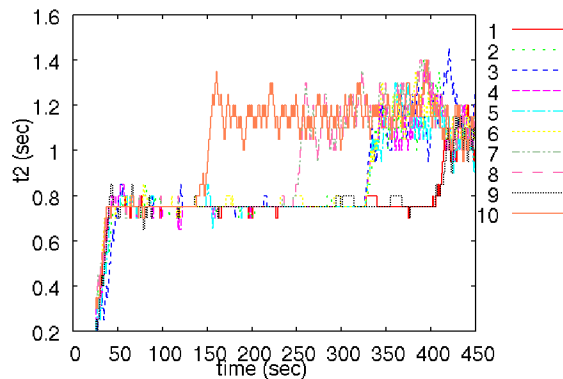


図 210:PSS パラメータの位相補償の変化

5.7.4.2. 系統全体に関する固有値

詳細モデルと 4 次モデルで求めた固有値を、図 211 に示す。ただし右側の図の縦軸は、固有値虚部を意味する。

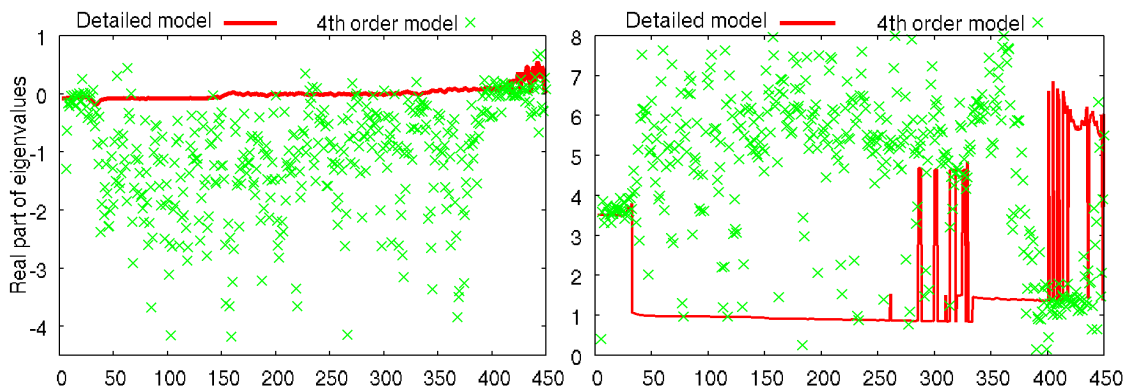


図 211:詳細モデルと 4 次モデルの固有値

支配的な固有値に近い値を、4次モデルで同定できた期間は、最初の30秒付近までと末期の380秒以降に集中している。このようになる背景としては、それ以外の期間では系統が安定であり、支配的なモードが波形に現れなかったことがあげられる。

5.7.4.3. 各発電機で観測された5次モデルの固有値

各発電機の5次モデルで求めた固有値を、図212に示す。

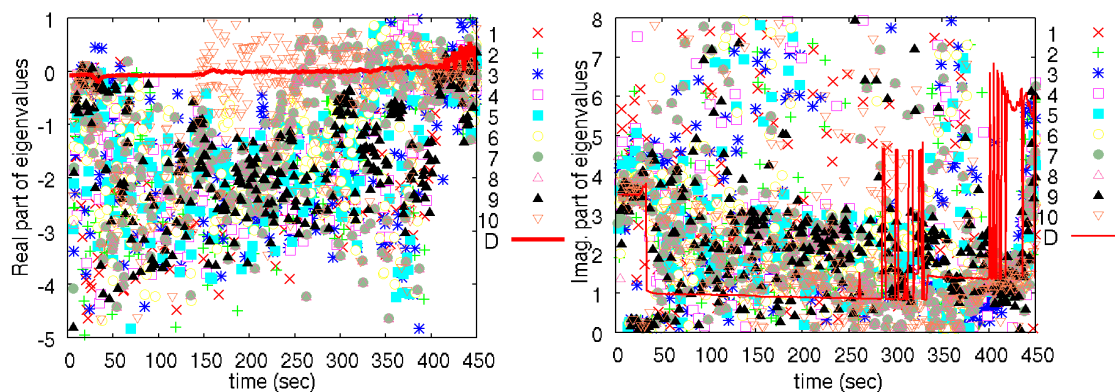


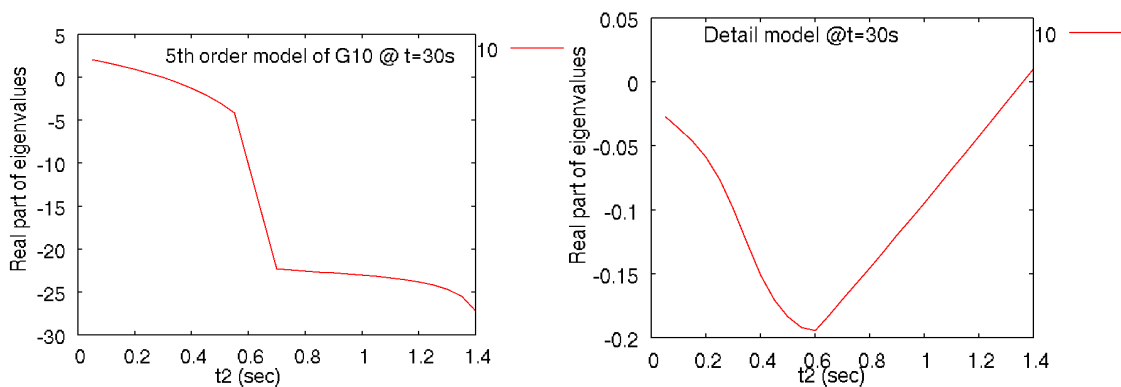
図 212: 各発電機の5次モデルで得た固有値

実部は400秒以降、虚部は30秒までと400秒以降で、詳細モデルが示す本来の値に近づく場面があるが、それ以外は比較的ランダムに分布している。ただし、発電機G10では、位相補償が進んだ150秒以降では、比較的正確な値が得られている。このことは、発電機G7とG8についてもいえる。

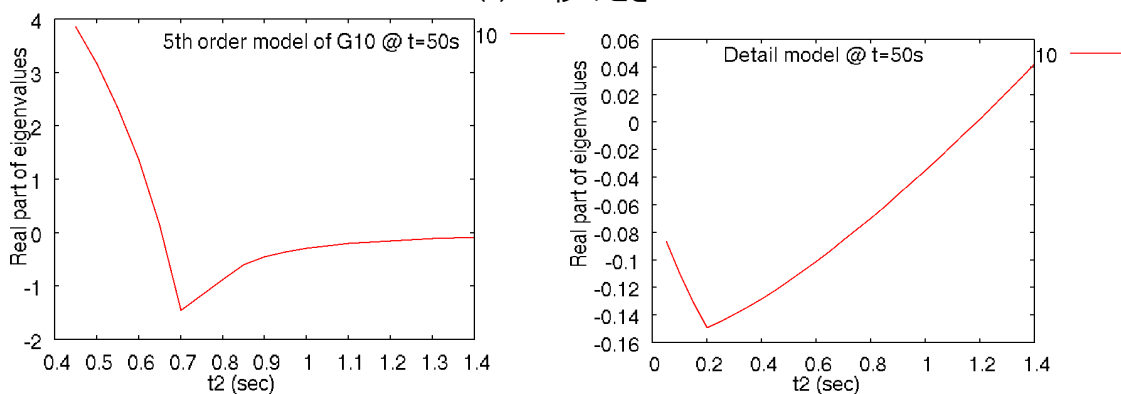
5.7.4.4. PSSパラメータと安定度との関係

PSSのパラメータを変更すると、系統全体の安定度が変化する。仮に、詳細モデルの固有値と5次モデルの固有値が、同じ方向に変化すれば、互いの固有値感度の方向が合っているので、5次モデルでの同定は適切に行えたといえる。変化の様子が大きく異なる場合は、同定は不適切であるといえる。

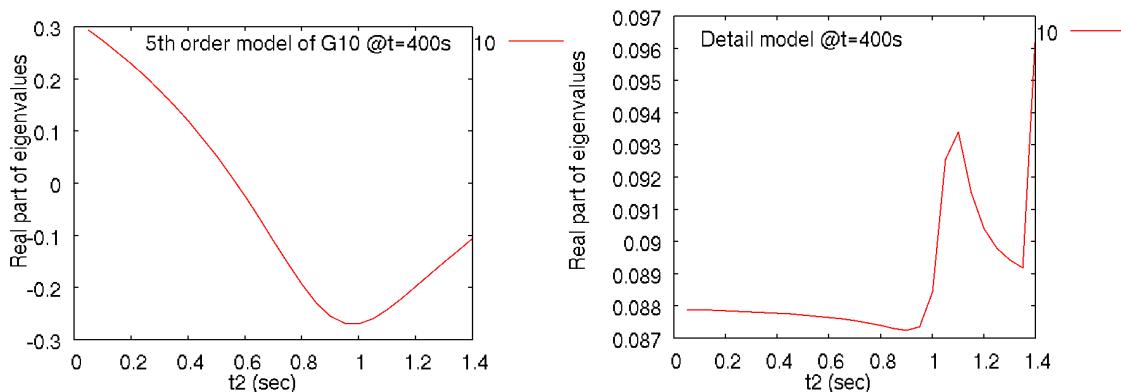
今回のシミュレーションで、時刻30秒、50秒、400秒を対象に、発電機G10の位相補償パラメータと、固有値(その発電機の5次モデルから求めた固有値と、詳細モデルの支配的固有値)との関係を調べた。結果を図213に示す。



(a) 30 秒のとき



(b) 50 秒のとき



(c) 400 秒のとき

図 213: 固有値実部と PSS パラメータの関係

大切なのは、その時点での位相補償パラメータの値で見たグラフの傾きが、図の左右で一致するかである。30 秒のときは、 $t_2=0.4$ 付近にあり、両者とも右下がりなので、パラメータを増加させて安定化する。50 秒では、 $t_2=0.7$ 付近にあるが、5 次モデルでは極小値、詳細モデルは右上がりであり、パラメータは動かないが、実際には下げた方が安定化する。400 秒では、 $t_2=1.2$ 付近にあるが、5 次モデルでは右上がり、詳細モデルでは右下がりなので、パラメータは下降し、不安定化する。このように、5 次モデルによる同定では、系統の安定化につながる場合もあれば、つながらない場合もある。ときには、400 秒の時点のよう

に、詳細固有値のグラフが複雑な形となり、仮に正しく感度が得られたとしても、極小値にとらえられてしまい、本来最適となる値に向かえない場合もある。

5.7.5. 4次モデルから支配的モードが見つかるときに5次モデルを用いて設計する場合

次に、4次モデルで支配的な動揺現象を観測できたと判断したときに限り、全ての発電機でPSSのパラメータを設計するように、設計のタイミングを制限した。4次モデルで観測した固有値の標準偏差が、実部・虚部ともに0.4以下のときに限り、全ての発電機でPSSパラメータを更新した。PSSのパラメータを更新するかどうかの判断は、1秒ごとに行った。

5.7.5.1. 電気出力偏差とPSSパラメータ

各発電機の電気出力偏差を図214に示す。300秒付近に、いったん不安定化したが、回復している場面がある。450秒を過ぎると、発散した。毎秒必ず設計を行った前節と比べ、発散が数十秒間遅くなっている。

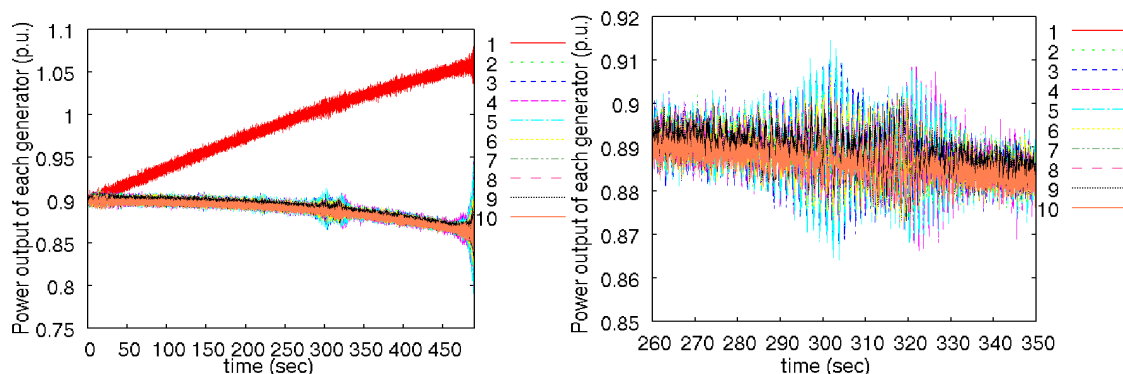


図 214:電気出力偏差

適応制御の対象とした位相補償パラメータを、図215に示す。30秒付近、300秒付近、400秒付近、シミュレーション末期に、主に位相を進める補償が行われている。

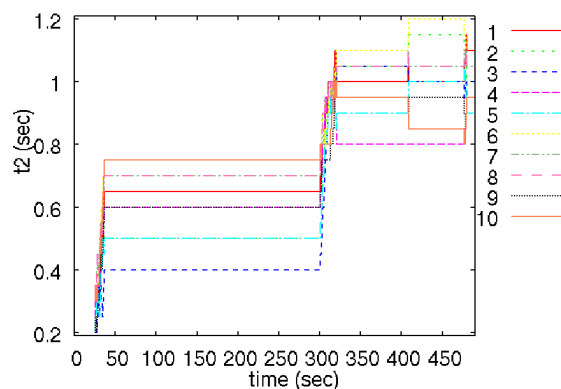


図 215:PSSパラメータの位相補償

5.7.5.2. 系統全体に関する固有値

4次モデルと詳細モデルで求めた固有値を、図 216 に示す。なお、右側の図の縦軸は、固有値虚部を意味する。

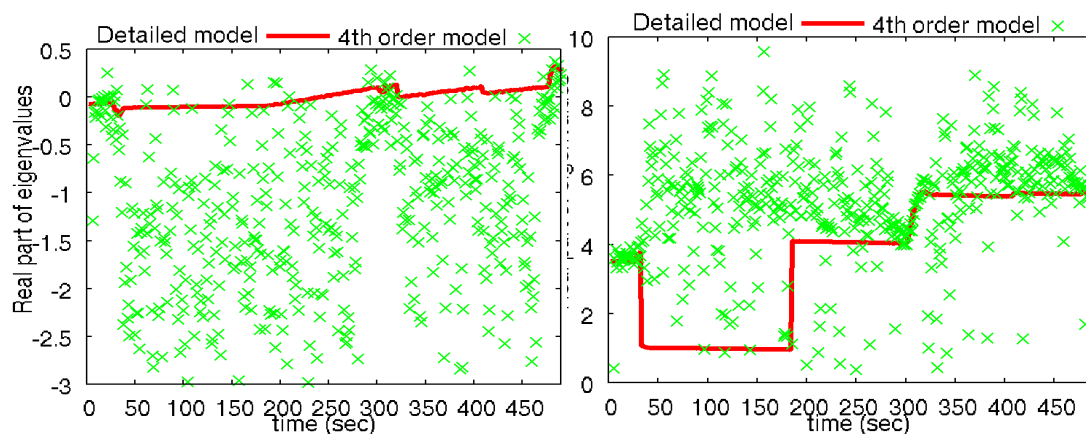


図 216：詳細モデルと4次モデルで求めた固有値

シミュレーション開始時と300秒付近、シミュレーション末期で、4次モデルで観測した固有値が、詳細モデルで観測した固有値と近づいている。同時に、そのような時期に、安定度が大きく変化していることが分かる。なぜなら、PSSのパラメータが4次モデルの固有値のばらつきが小さい時にだけ更新され、更新により系統全体の安定度が変化しているからである。詳細モデルから算出した固有値は、シミュレーション開始時、300秒付近、400秒付近には改善した。重潮流がより厳しくなるシミュレーション末期には、適応制御を行ったものの、安定化はできなかった。

パラメータ設計を行うかを判断する指標として用いた、4次モデルから得た固有値の標準偏差を、図 217 に示す。

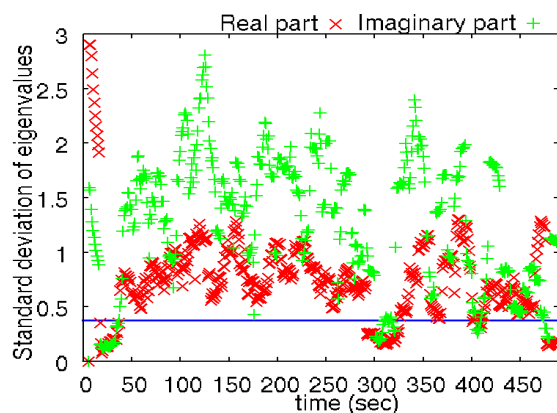


図 217: 4次モデルから得た固有値の標準偏差

4次モデルの固有値が、詳細モデルの固有値とよく合っているときに、標準偏差が小さくなっている。ただし、400秒付近に限っては、必ずしもそうとは言えず、4次モデルの固有値が偶然ばらつかなかったことによるようである。

5.7.5.3. 各発電機で観測された5次モデルの固有値

次に、各発電機で PSS パラメータと安定度の関係を評価する、5次モデルで得られた固有値を図 218 に示す。

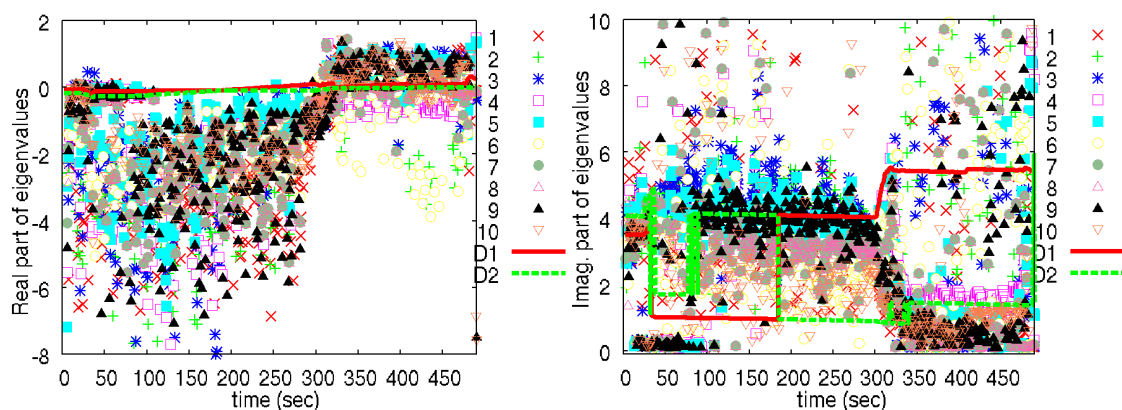


図 218:各発電機の5次モデルで得られた固有値

実部は、300秒以前は、安定よりに偏りながら、大きくばらついている。300以降は、安定限界付近に集中している。虚部は、300秒付近までは、4付近のモードをとらえていたが、それ以降は2番めに支配的な1付近のモードに値が集中している。300秒付近では、詳細モデルから直接算出した固有値の虚部は、4付近から6付近へ上昇するが、同定の結果としては逆に、値が下降している。300秒付近における値の大きな変化は、動揺波形の変化だけでなく、5次モデルに含まれる PSS パラメータの値そのものの変化が、影響を与えている可能性がある。適応制御では、同定の結果をふまえて、5次モデルの安定度を高める方向にパラメータを動かすが、結果として5次モデルの固有値実部は大きくなっている。5次モデルの、同定により定める部分と、PSS の制御ブロックからなる部分との関係が、正しく得られていないことがうかがえる。

時刻 300 における、発電機 10 の PSS パラメータと、固有値との関係を調べた結果を、図 219 に示す。

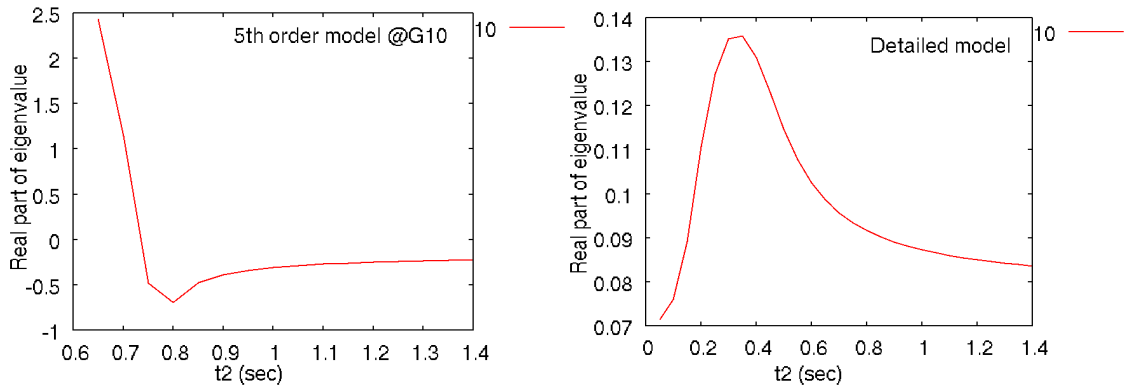


図 219: 時刻 300 秒における G10 の t2 と固有値の関係

詳細モデルでは、上に凸のグラフになっている。0.4 とするのが一番よくないらしい。一方で、5 次モデルでは 0.8 付近に底がある下に凸のグラフになっている。この時刻での t2 は 0.75 で、結果的に両者とも傾きは右下がりであり、一致している。ただし、これで同定が理屈通りに成功したと判断することには、やや違和感がある。

5.7.6. 2 次モデルから支配的モードが見つかるときに 5 次モデルを用いて設計する場合

次に、発電機ごとに設けた 2 次モデルから算出した固有値のばらつきを利用して、パラメータ設計の実施を判断する方法でシミュレーションを行った。12 秒ぶんの固有値に対して各 2 次モデルで標準偏差を求め、実部・虚部ともに 0.4 以下であるときに限り、対応する発電機でパラメータの設計を行う。判定は 1 秒ごとに行った。

5.7.6.1. 電気出力偏差と PSS のパラメータ

各発電機の電気出力を図 220 に示す。

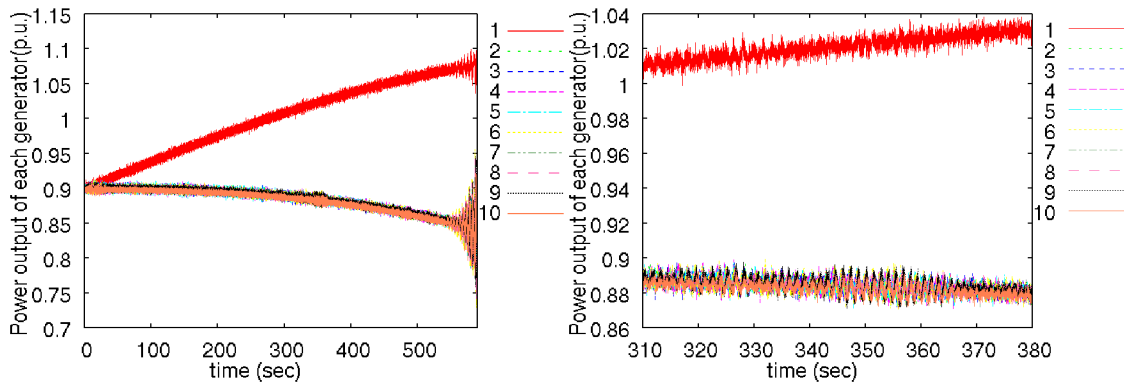


図 220: 各発電機の電気出力

前回のシミュレーションよりも、発散がさらに数十秒遅くなっている。550秒を過ぎると不安定になり、発散しているが、それまでは比較的安定な状態が続いた。300秒台に、やや不安定となる時期があるが、370秒までには安定度を回復している。各発電機の PSS パラメータ t_2 を図 221 に示す。

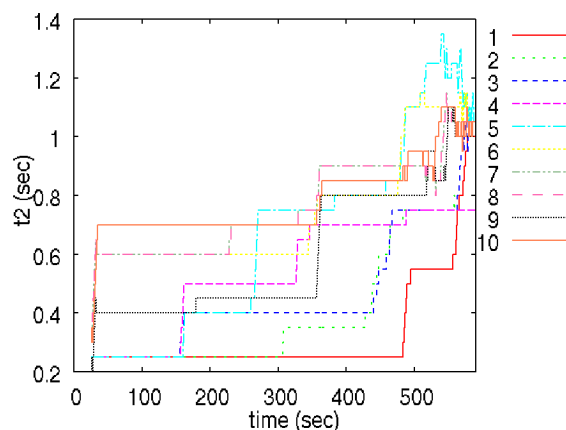


図 221: 位相補償パラメータ

発電機ごとに 2 次モデルが独立しているため、パラメータ設計が行われるタイミングが別々になっている点に特徴がある。シミュレーション開始直後と、160 秒付近、350 秒付近、シミュレーション末期などでは、多くの発電機が同時にパラメータ設計を行っている。

5.7.6.2. 系統全体に関する固有値

詳細なモデルと 4 次モデルで求めた固有値を図 222 に示す。

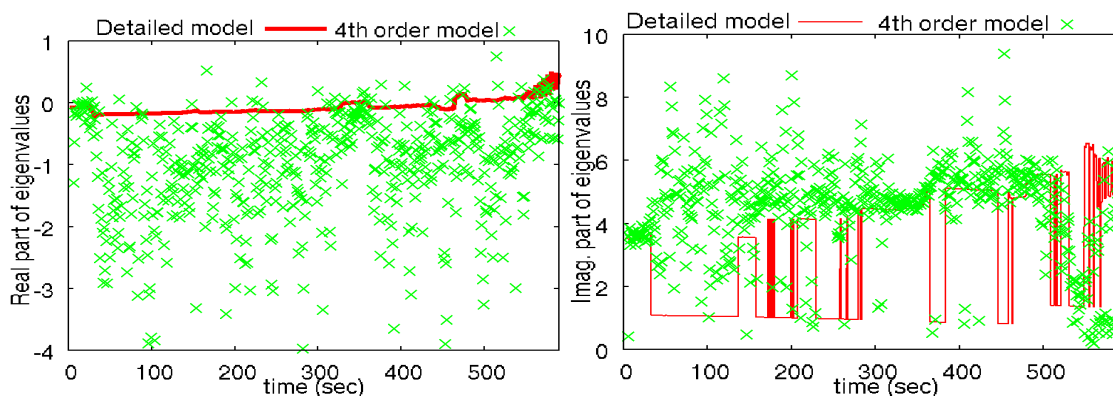


図 222: 詳細モデルの固有値と 4 次モデルの固有値

実部は、シミュレーション開始時と 350 秒付近で、やや不安定となり、4 次モデルと詳細モデルの値が接近した。虚部からは、支配的となる動揺モードがときおり入れ替わって

ることが分かる。動揺モードには、虚部が 1, 4, 6 付近となるものがあるが、4 次モデルはそのうちの 4 から 6 となるモードに追従した。300 秒台ではとくに、本来の支配的モードに正確に追従している。

4 次モデルの固有値を 12 秒ぶん集め、標準偏差を求めた結果を図 223 に示す。シミュレーション開始直後と、350 秒付近に、実部・虚部ともに 0.4 を下回る期間があり、動揺現象の発生を感知している。ただし、今回のシミュレーションでは、4 次モデルはオンライン設計の実施判定には関わっていない。

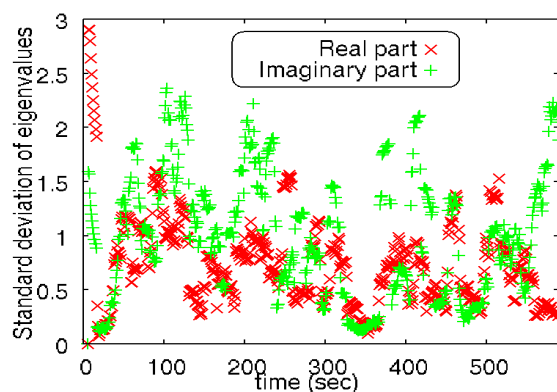


図 223: 4 次モデル固有値の標準偏差

5.7.6.3. 各発電機で観測された 2 次モデルの固有値

各発電機の 2 次モデルでの同定から求めた固有値を、図 224 に示す。実部は、シミュレーションの進行とともに 0 へ近づいている。虚部は、シミュレーション開始時から次第に値が 0 へ近づき、終了間際に上昇している。詳細モデルの固有値との比較では、ほとんど追従していないように見える。

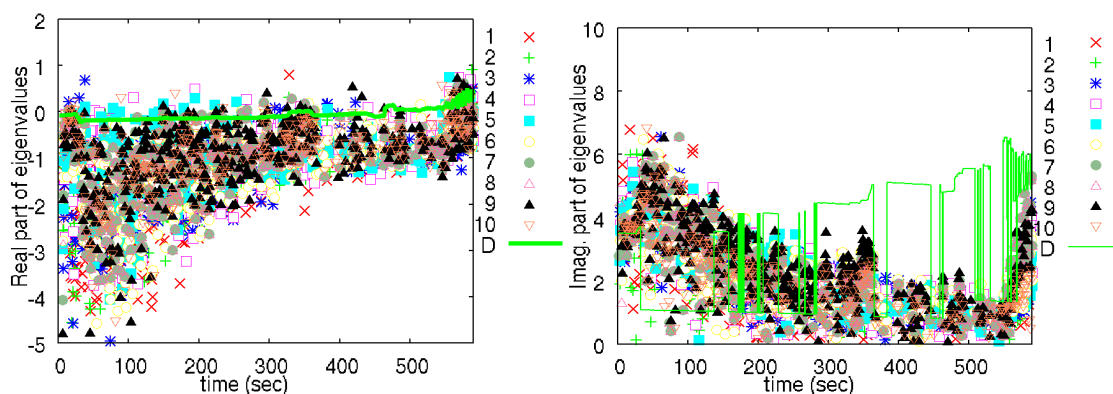


図 224: 2 次モデルで求めた固有値

これらの固有値を発電機ごとに時系列に集め、直近の 12 秒ぶんについて求めた標準偏差を

図 225 に示す。

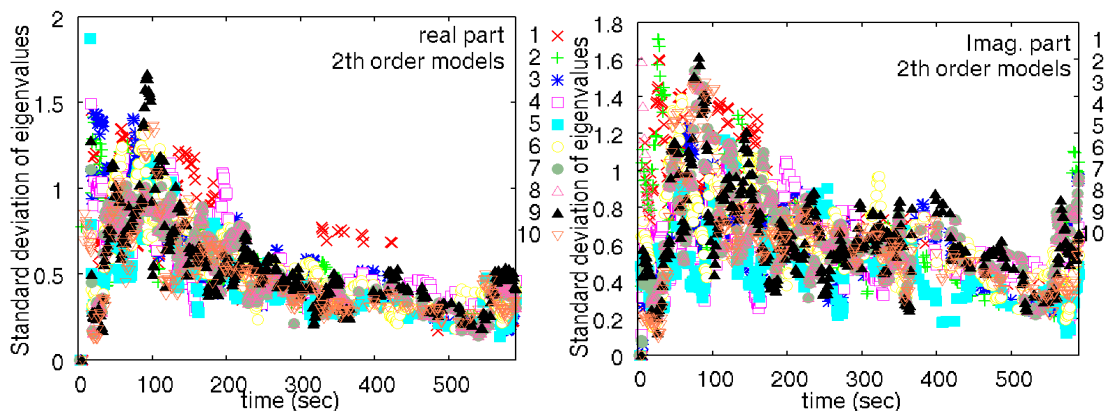


図 225:2 次モデル固有値の標準偏差

時間とともに値が低下している。定態安定度そのものも時間とともに悪化しているの、必ずしも誤りではないと思われるが、元になる固有値のデータが詳細モデルで算出した固有値に連動していないため、それほど信用できる情報とは考えにくい。発電機ごとに、この値が実部・虚部ともに 0.4 以下となるタイミングで、PSS のパラメータを更新したが、更新のタイミングが、不安定化による動揺現象を把握したときであったとは、必ずしも言えないと考えられる。

5.7.6.4. 各発電機で観測された 5 次モデルの固有値

次に、各発電機の 5 次モデルで検出された固有値を図 226 に示す。

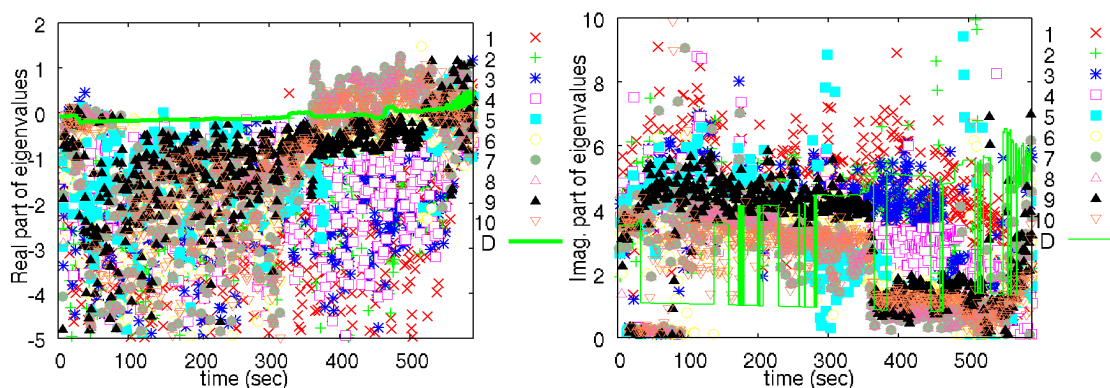


図 226:5 次モデルで求めた固有値

時間帯によって、同定されている固有値が異なることが分かる。虚部について見ると、360 秒付近までは G9 をはじめとする多くの発電機が支配的モード付近にあるが、それ以降

は発電機ごとに異なるモードをとらえているように見える。詳細モデルから求めた支配的モードの虚部が頻繁に変化していることから、低次モデルがどのモードをとらえるかで迷っている様子うかがえる。

2次モデルの固有値を、パラメータ設計のタイミング判定に利用することには、困難があることが分かった。4次モデルと比べ、得られる固有値が不正確であり、詳細モデルから求めた支配的な固有値を反映していないからである。

5.7.7. 5次モデルの固有値が4次モデルの固有値に近いときに設計する場合

次に、4次モデルでのオンライン設計が支配的モードを同定できたとみなせるときに限りパラメータ設計を行う処理に加え、「5次モデルで出した固有値が、4次モデルで出した固有値に近いときに限りパラメータを更新する」という条件を適用した。

新しい条件は、4次モデルで算出した支配的固有値に対して、5次モデルで算出した固有値が、実部・虚部ともに1.5以内の差におさまっているときに成立するとした。

5.7.7.1. 電気出力偏差とPSSパラメータ

各発電機の電気出力を図227に示す。

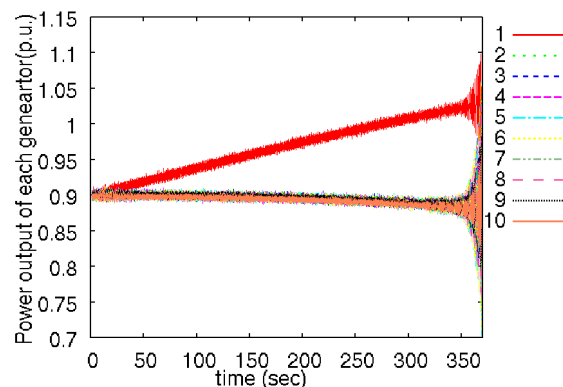


図 227:各発電機の電気出力

4次モデルの固有値のばらつきだけで判定を行った場合と比べ、発散する時刻が100秒程度早くなっている。発散直前の動揺を、同定用フィルタに通した結果を図228に示す。およそ1秒周期の動揺がみられる。

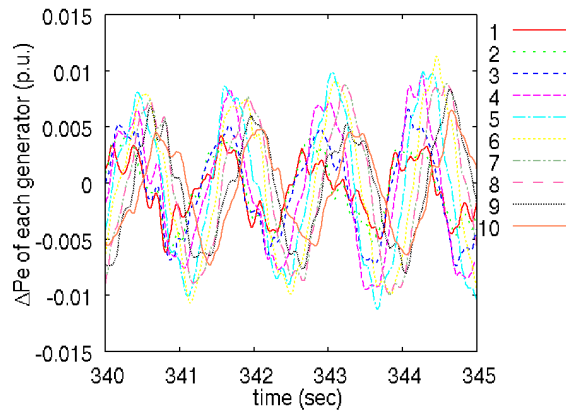


図 228:シミュレーション末期における動揺波形

PSS パラメータの変化を図 229 に示す。パラメータ設計は、シミュレーション開始時付近と、150 秒付近、250 秒付近、300 秒、350 秒付近で行われている。不安定さが顕在化した 350 秒以降は、行われていない。

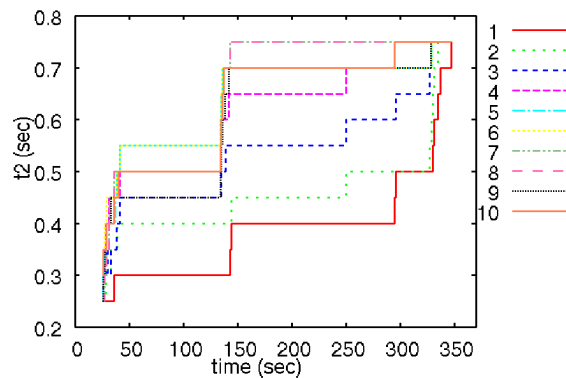


図 229:PSSの位相補償パラメータの推移

5.7.7.2. 系統全体に関する固有値

詳細モデルから直接求めた固有値と、4 次モデルから求めた固有値について、図 230 に示す。シミュレーション開始直後と終了間際に、詳細固有値と 4 次モデルで求めた固有値が近づく場面がある。虚部は電気出力波形に見られる 1 秒強の周期を持つモードを中心にとらえている。このモードは、系統全体では、1 番目か 2 番めに支配的となっている。

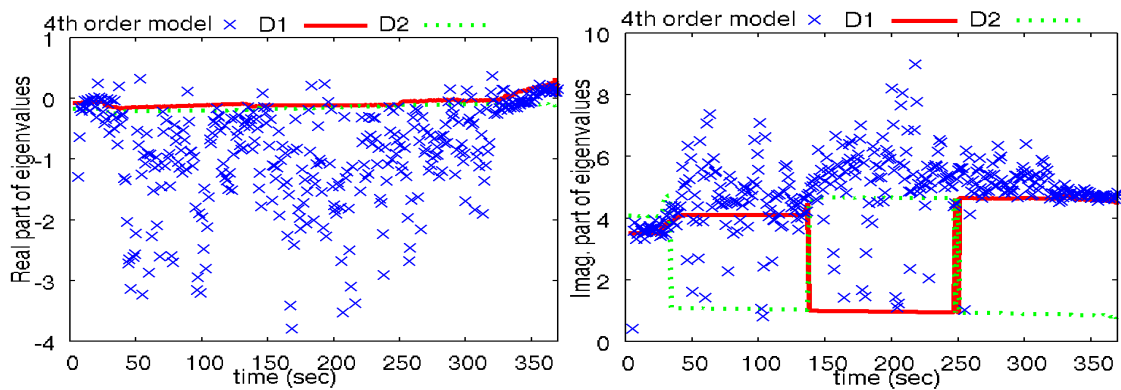


図 230: 詳細モデルと4次モデルから求めた固有値

5.7.7.3. 各発電機で観測された5次モデルの固有値

各発電機の5次モデルで求めた固有値を図 231 と図 232 に示す。シミュレーション末期ではなぜか、そのときに支配的とは考えられない周期に固有値が集中している。このため、5次モデルでは動揺モードを見つけたとみなされず、オンライン設計が行われなかった。動揺波形を目で見る限りにおいては、1番めに支配的なモードが最も強く表れているが、同定ルーチンから見れば、2つのモードが半分くらいずつ見えてしまっている可能性もある。

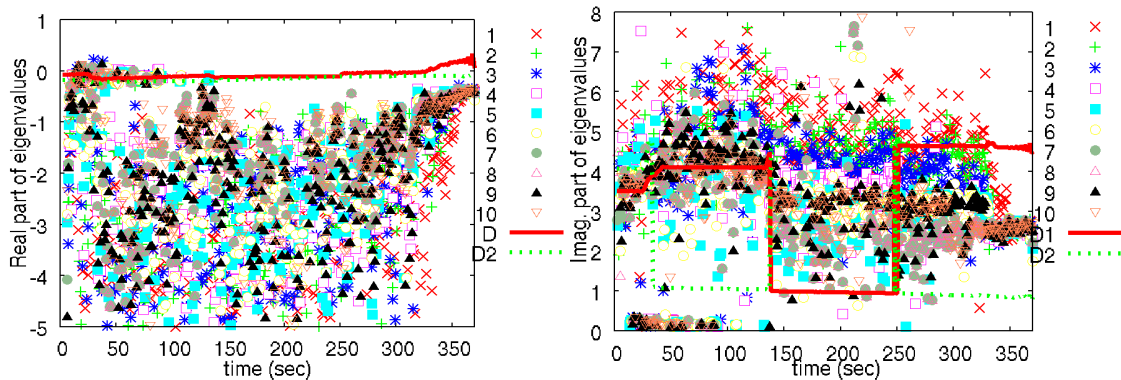


図 231: 5次モデルで算出した固有値

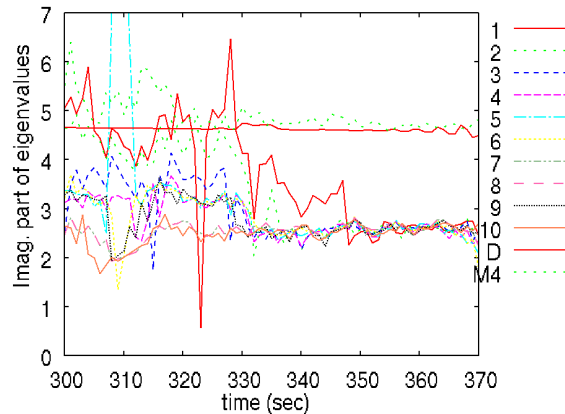


図 232: 300秒以降の固有値虚部拡大図

このように、5 次のモデルでは、支配的なモードを必ずしも正しくとらえない。とくに、複数の動揺モードが混在するシミュレーション末期では、存在しない動揺周期に、固有値が収束する場面も見られた。

5.7.8. 動揺振幅からパラメータ設計実施を判定する場合

次に、電気出力偏差の動揺振幅を用いて、設計を行うかの判断をした。負荷から発生するノイズが一定であれば、不安定なモードによる動揺現象が激しいときほど、電気出力は大きく変化することが分かっている。そこで、図 195 を見て、振幅の値が 0.006p.u. (単位は発電機の単位法)以上となったときに限り、パラメータを更新することにした。電気出力の偏差を図 233 に示す。出力に大きな乱れがないまま 600 秒付近まで到達した。動揺の振幅最大値を 1 秒ごとに取り出したものを図 234 に示す。全体として、少しずつ振幅が拡大している。ときどき基準値の 0.006 に達している。

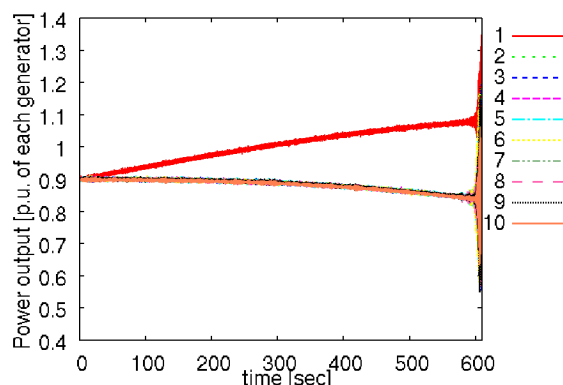


図 233: 電気出力偏差

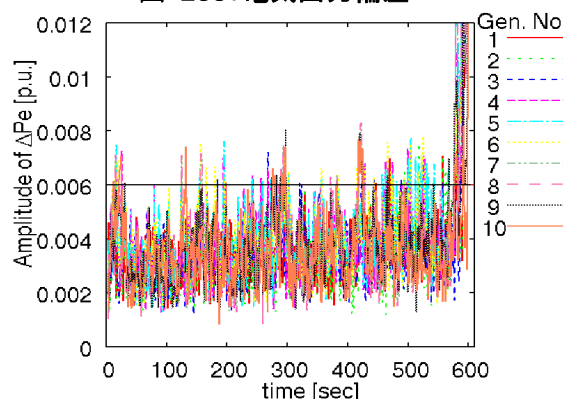


図 234: 電気出力偏差の動揺振幅

PSS のパラメータが変化の様子を図 235 に示す。ときどき集中的にパラメータが更新されている。更新されるときは、ほとんどの場合で t_2 が増加するが、500 秒付近では、同じ値を保つように更新を続ける場面もある。

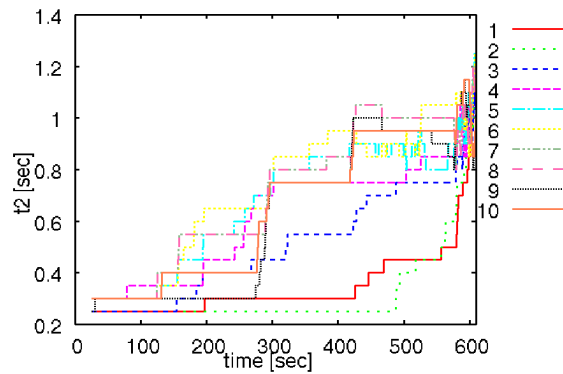


図 235 : 各発電機の位相補償パラメータ

詳細なモデルと 4 次モデルから求めた、系統全体に関する固有値を図 236 に示す。

詳細モデルから求めた固有値実部によると、100 秒台、300 秒直前、400 秒直後においては、パラメータ設計が安定度の向上に貢献している。一方で、600 秒付近では設計を行ったにもかかわらず、安定度が低下して発散した。

4 次モデルから求めた固有値は、実部は、詳細モデルの固有値と比べ、やや負方向に偏っている。600 秒以降に著しく不安定化したときは、詳細モデルの値に近づいている。虚部は、系統本来の支配的なモードに正確に追従した。ただし、一時的に支配的なモードが別の固有値になったときは、従来支配的だった固有値に引き続き追従している。

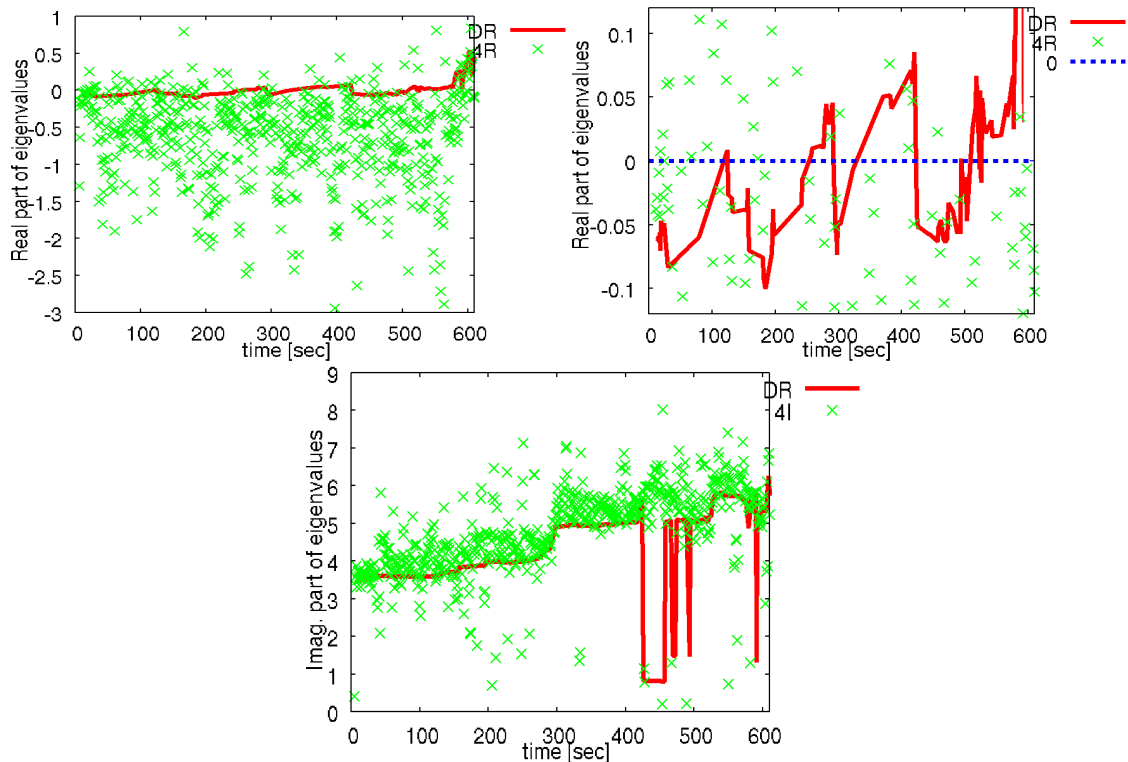


図 236: 4 次モデルと詳細モデルで求めた固有値

PSS パラメータの更新に用いた 5 次モデルから得た固有値を図 237 に示す。実部は、誤差が大きく、支配的なモードをとらえているとは言い難い。虚部は、300 秒までは一番支配的なモードに、それ以降は 2 番めに支配的なモードに追従しているように見える。

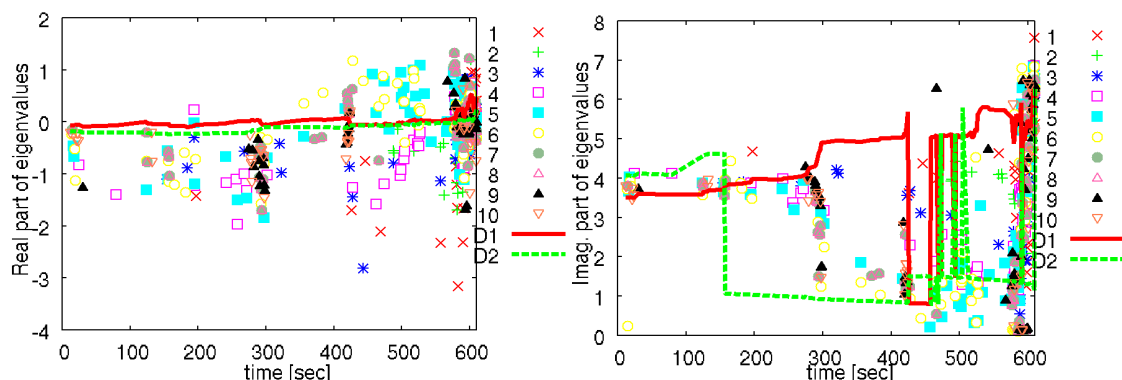


図 237:5 次のモデルから得た固有値

このように、動揺振幅を適応制御実施の判定に使うことで、不安定化するたびに、パラメータを設計して安定化する制御ができた。ただし、実際の電力系統では、負荷のノイズが常に一定の振幅を持つとは限らないので、不安定化による振幅の増大と、ノイズの増大による振幅の増大を、区別できない課題がある。

5.7.9. 発電機ごとに設けた 4 次モデルの固有値の標準偏差で設計実施を判断する場合

次に、4 次モデルを系統全体に 1 か所ではなく、発電機ごとに設定した場合について調べた。4 次モデルは、2 台の発電機から 2 つずつ状態量(ΔP_e , $\Delta \omega$)を取り出して状態変数としたもので、固有値解析を行うと、2 機のうちで、より強い動揺現象を観測している発電機の動揺によく合った固有値が得られることが多い。ペアとする発電機のうちの 1 台に、動揺現象の影響が大きそうな発電機を選び、その発電機または各発電機で動揺現象が強く観測されたときに、PSS のパラメータを更新することを意図していることになる。

5.7.9.1. 発電機 G10 とペアを組む場合

まず、動揺が比較的強く現れる発電機 G10 に着目し、発電機 G10 以外の各発電機に、発電機 G10 とペアを組んだ 4 次モデルを設定した。例えば、(G1,G10)の 4 次モデルを G1 に、(G2,G10)の 4 次モデルを G2 に設定する。発電機 G10 では、同一の発電機とはペアを組めないため、(G10,G5)の 4 次モデルを設定した。この状態で、各発電機の 4 次モデルで同定を行い、直近 12 秒間に得られた 12 点の支配的固有値を対象に、発電機ごとに標準偏差を算出し、実部の標準偏差と虚部の標準偏差がともに 0.4 以下となる発電機で、PSS のパラ

メータを更新した。シミュレーション開始 25 秒の時点から、毎秒この判定を行った。各発電機端における物理量を図 238 に示す。600 秒付近までは、一貫して安定な状態が続いている。600 秒付近で急速に振幅が拡大し、発散した。

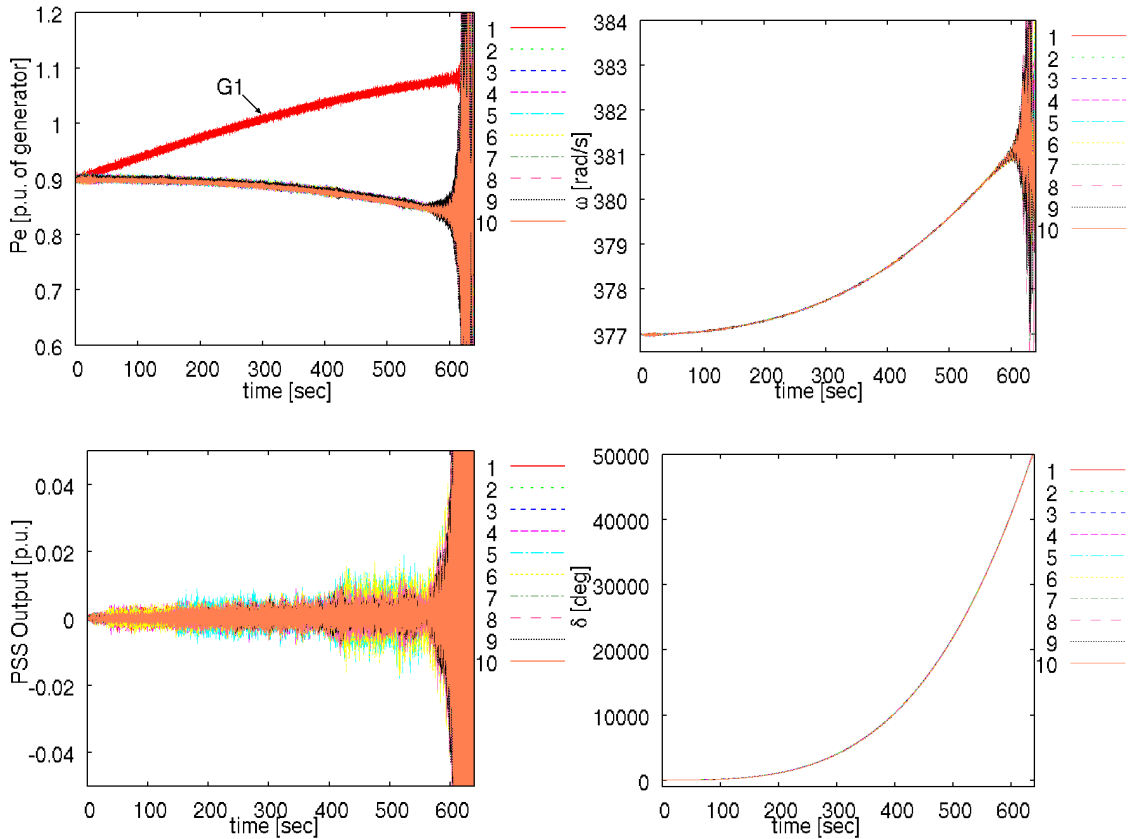


図 238 : 各発電機における物理量

次に、各発電機の PSS における、位相補償パラメータの推移を図 239 に示す。シミュレーション開始直後に大きな操作が行われた後は、150 秒付近や 400 秒付近で、値が大きく変化している。遅れの位相補償を、少しずつ弱める操作が行われている。次に、詳細モデルから直接求めた固有値を図 240 に示す。ただし、支配的なものから 2 つを掲載している。点のプロットは、4 次モデルから求めた固有値のうち、値がプロットの範囲に入っているものである。150 秒付近のパラメータ操作は、安定度の回復に貢献しているが、400 秒付近の操作は逆に、安定度の悪化をやや早めている。500 秒以降では、2 種類の固有値が同時に不安定となっている。各発電機で考えた 4 次モデルから得られた固有値を、図 241 に示す。実部は、-5 から 0 付近まで広く分布している。はっきりとした動揺波形が現れたのは、シミュレーション末期に限られるからであろう。虚部では、6 付近 (約 1 秒周期) のモードをとらえた発電機が多かった。ただし、550 秒付近では全体的に、1 付近に値が向かう期間が

見られた。複数の動揺モードが同時に不安定化すると、どちらのモードの周期に追従するかで、虚部の値は大きく変わるため、不安定な状況であっても値が収束しにくくなるようである。各発電機の4次モデルから求めた固有値を直近の12秒ぶん(12プロット)集め、標準偏差を求めた結果を図242に示す。実部・虚部ともに発電機ごとにさまざまな値になっている。500秒以降では、実部は不安定化を反映して値が小さくなっているが、虚部は同定の対象が1つの動揺モードに定まらなかったためか、ばらつきが大きいままである。実部と虚部の両方が0.4を下回ると、PSSのパラメータが設計される。多くの場合、安定度が改善するなどして再び固有値のばらつきが大きくなり、標準偏差は再びしきい値よりも大きくなる。同定に用いた波形のうち、電気出力に同定用のフィルタをかけたものを図243に示す。2種類のモードが不安定化した550秒付近の拡大図では、支配的な周期が見にくく、同定が難しいことが読み取られる。610秒を過ぎると、約1秒周期の動揺が明らかに支配的となる。発電機G10よりも、発電機G9, G8, G7のほうが動揺の振幅が大きくなっている。

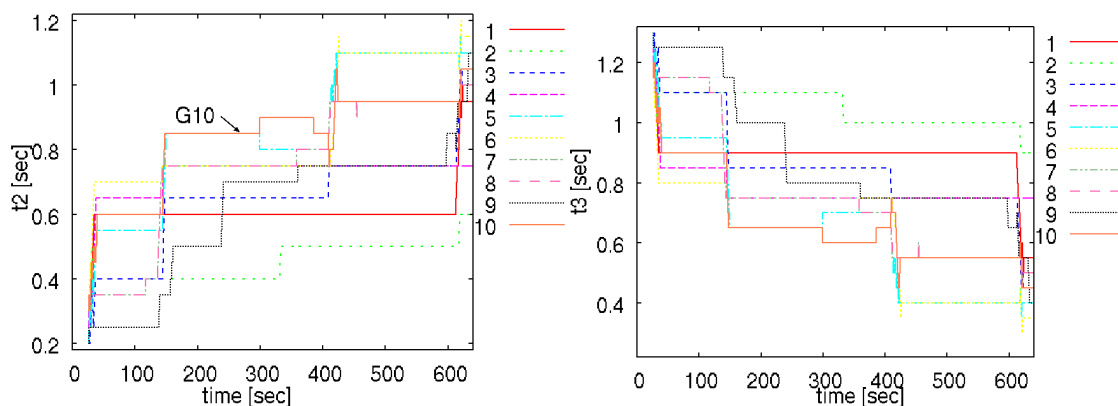


図 239 : 各発電機における位相補償パラメータ

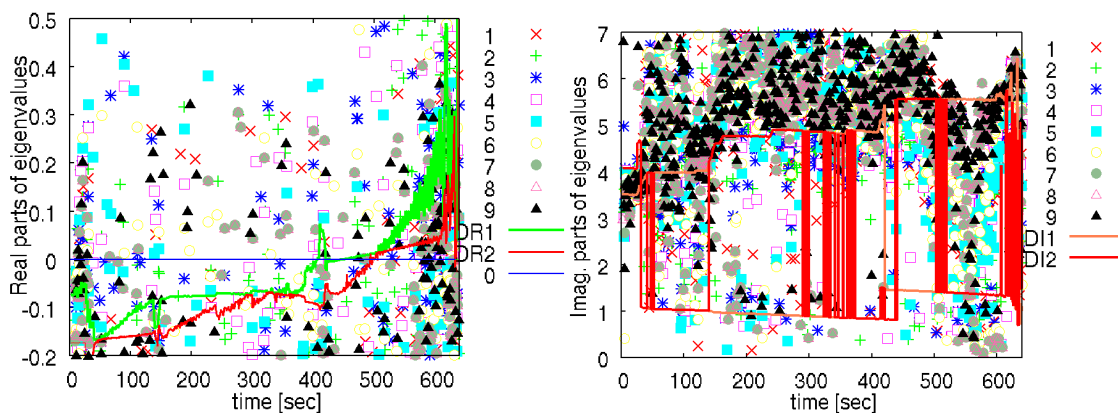


図 240 : 詳細モデルから求めた支配的な固有値と付近の4次モデル固有値

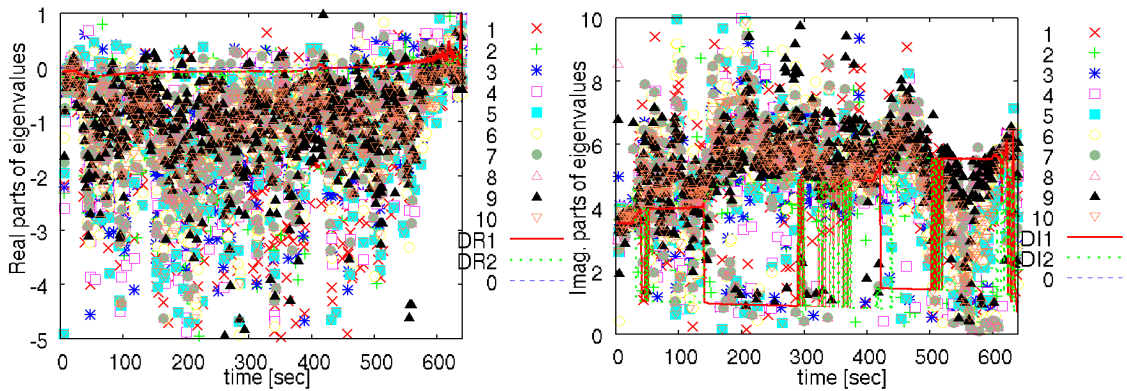


図 241：各発電機に設置した 4 次モデルから得られた固有値

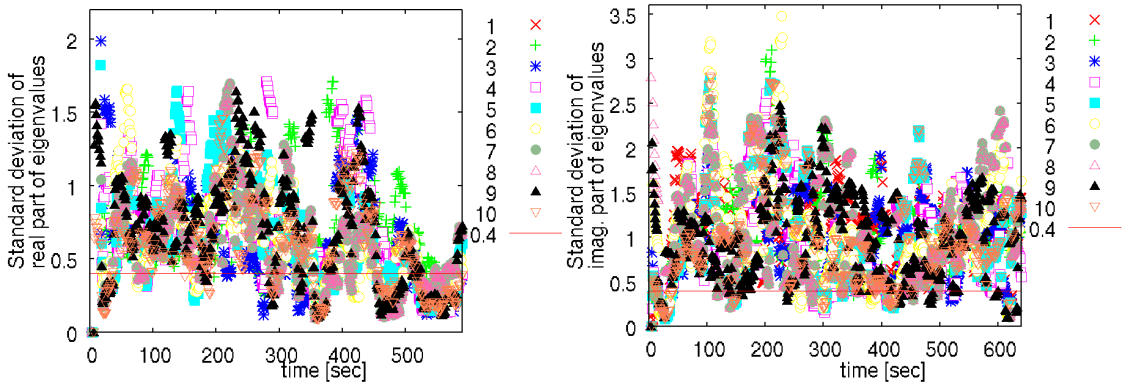


図 242：各発電機の 4 次モデルの固有値から算出した標準偏差

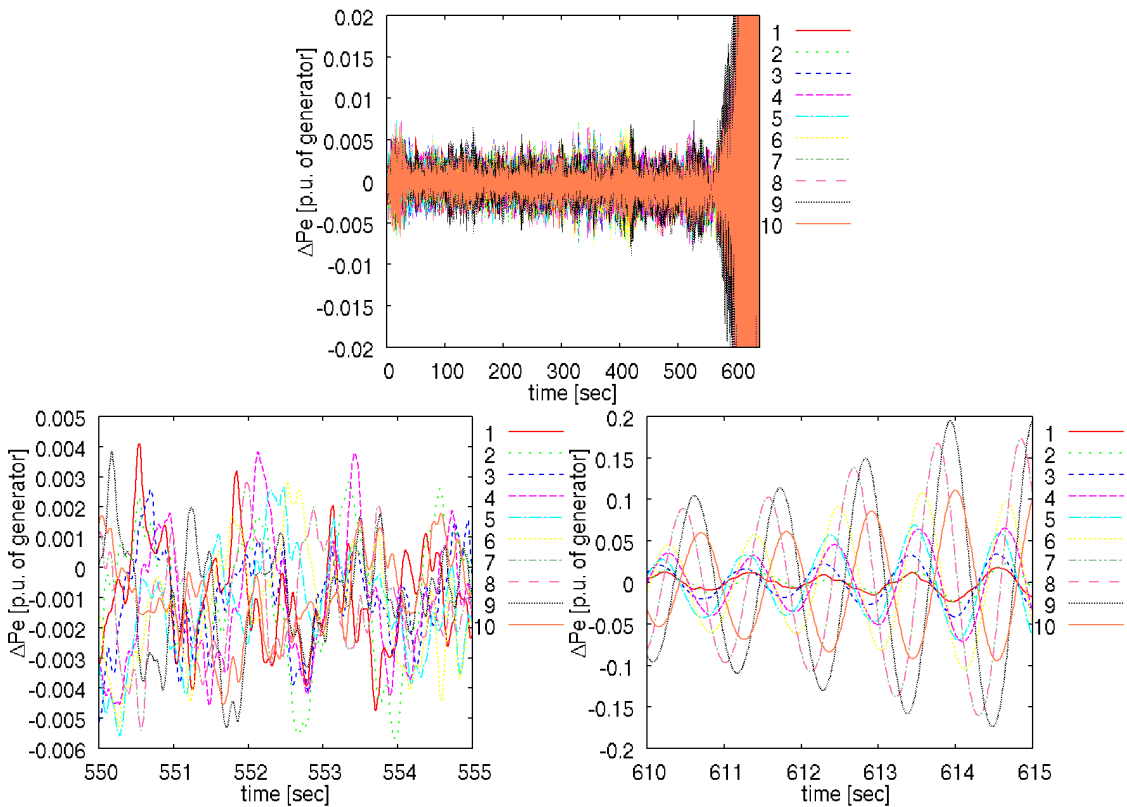


図 243：各発電機の電気出力偏差(同定用フィルタ適用後)

5.7.9.2. 発電機 G1 とペアを組む場合

次に、動揺が比較的弱く現れる発電機 G1 を 4 次モデルのペアとして、オンラインパラメータ設計を行った。発電機 G2 から G10 までに、発電機 G1 をペアとする 4 次モデルを設定した。発電機 G1 には、(G1, G5)からなる 4 次モデルを設定した。発電機 G1 は、今回の解析事例では動揺が起こりにくいので、動揺が起こりやすい G10 をペアにした場合との違いが注目される。

まず、各発電機端子で得られた物理量を図 244 に示す。360 秒付近と 460 秒、480 秒付近に不安定モードと見られる動揺が見られる。これらの動揺現象は後に収束するが、最終的に 500 秒付近から動揺振幅が急速に拡大して発散する。回転速度は、シミュレーション全体にわたって少しずつ加速している。シミュレーション終了時点でおおよそ 60.8Hz に相当する。各発電機の PSS パラメータを図 245 に示す。発電機 G1 は補償を行わないように、それ以外の発電機は進みの位相補償を行うようになっている。一時的に不安定となった期間を含め、パラメータの更新が集中する期間が数十秒から 100 秒に 1 回程度の頻度で見られる。電力系統全体の詳細モデルから直接算出した固有値を図 246 に示す。パラメータ設計が行われた期間では、安定度が急速に変化している。160 秒付近では、いったん不安定化しそうな系統を安定な状態に回復させている。280 秒付近では、パラメータの更新によりいったん不安定化してしまうが、直後に再び安定性を回復している。同じような現象が、360 秒付近や 400 秒台にも見られる。パラメータ設計の実施は、電力系統の安定度を回復させる場合と、かえって悪化させる場合があることが分かる。安定度が回復すれば、以降の設計が行われなくなる。回復しない場合は、動揺振幅が大きい間は設計が繰り返される。従って、このシミュレーション結果からは、設計が必要なときに設計を行いたいという目的が、かなえられていることが読み取られる。各発電機に設置した 4 次モデルで得られた固有値を図 247 に示す。実部と虚部がそれぞれ、特定の値に集まるときにパラメータ設計が行われるが、例えば 350 秒付近では、詳細なモデルから算出した固有値に近い値に集まっている。400 秒以降では、同時に 2 種類の動揺モードが不安定化することからか、同定から得られた固有値虚部は、6 付近(周期は約 1 秒)と 1 付近(周期は 5 から 6 秒)の間で定まらない様子になっている。同定から得られた固有値を 12 秒ぶん(12 プロット)集め、標準偏差を求めた結果を図 248 に示す。実部と虚部は、500 秒付近までは比較的似た動きをしている。例えば、しきい値の 0.4 を下回るタイミングは、互いにほぼ等しい。ところが、500 秒を超え、2 つの不安定モードによる影響が大きくなってくると、実部は不安定さを検出してばらつきにくくなる一方で、虚部はどちらのモードの周期へ行けばよいか迷ってしまったのか、大きくばらついたままである。固有値の虚部は、複数のモードが同時に不安

定化した状況では、どのモードにも収束できない状況になりやすいことが分かる。同定アルゴリズムで用いられた波形の例として、各発電機の電気出力偏差をフィルタに通した後の波形を図 249 に示す。360 秒付近の不安定化では、周期が 1 秒程度の動揺が支配的であることが読み取られる。一方で 520 秒付近では、周期が約 1 秒のモードと約 5 秒のモードが重なっている。同じ波形に 2 種類の動揺モードが重なっていると、どちらを主に扱うかで複数の可能性が生じてしまうためか、同定の結果は収束的ではなくなるようである。

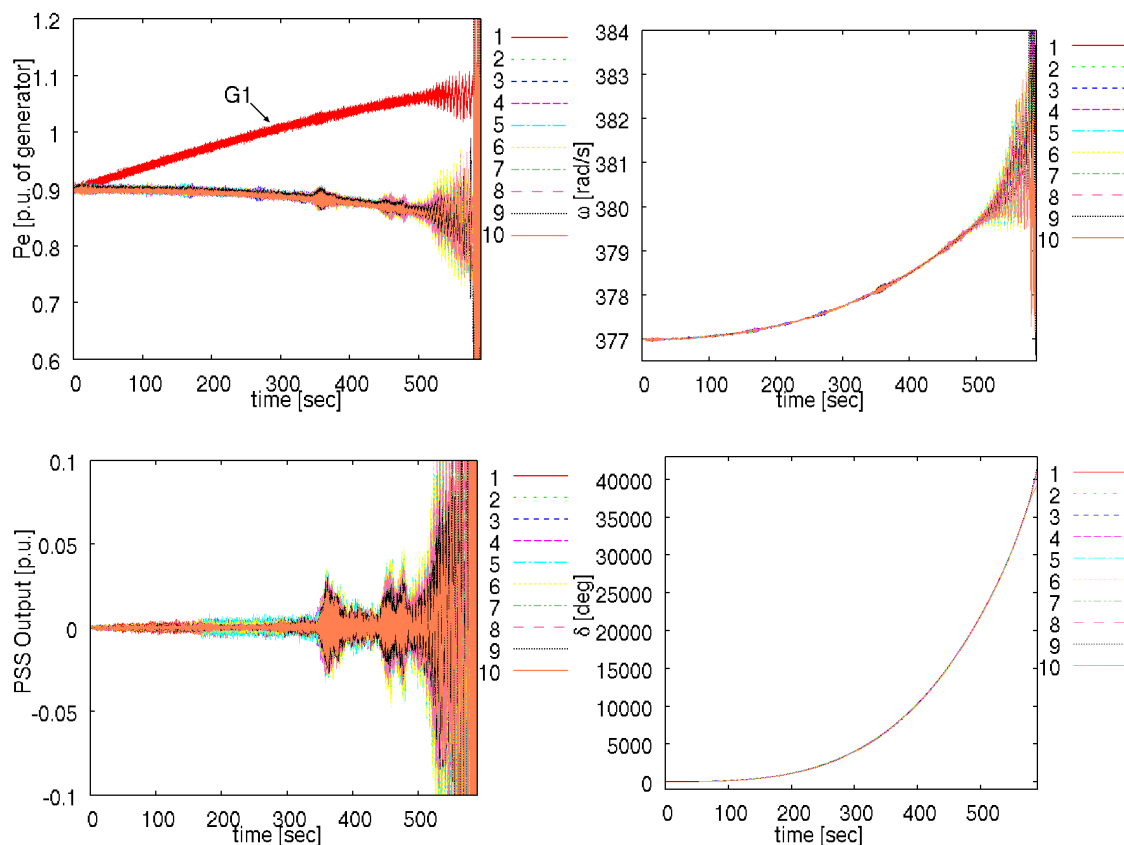


図 244 : 各発電機端で得られた物理量

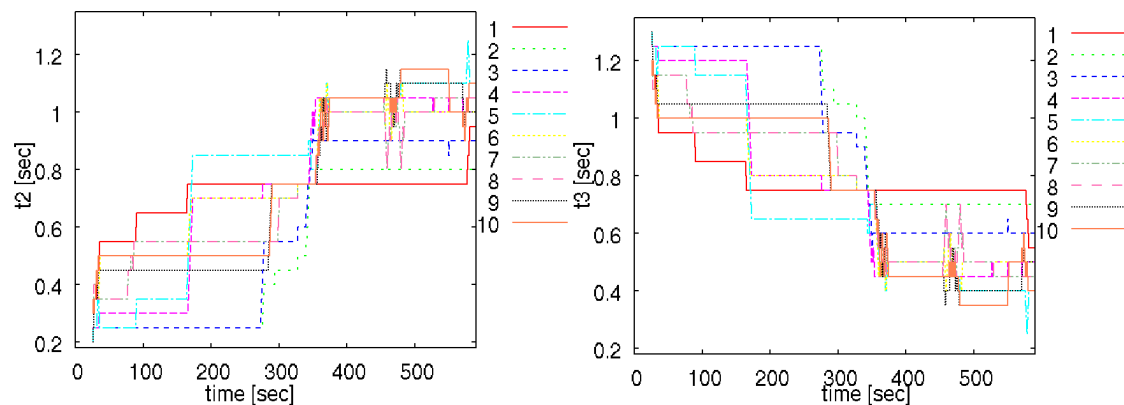


図 245 : 各発電機の PSS における位相補償パラメータの推移

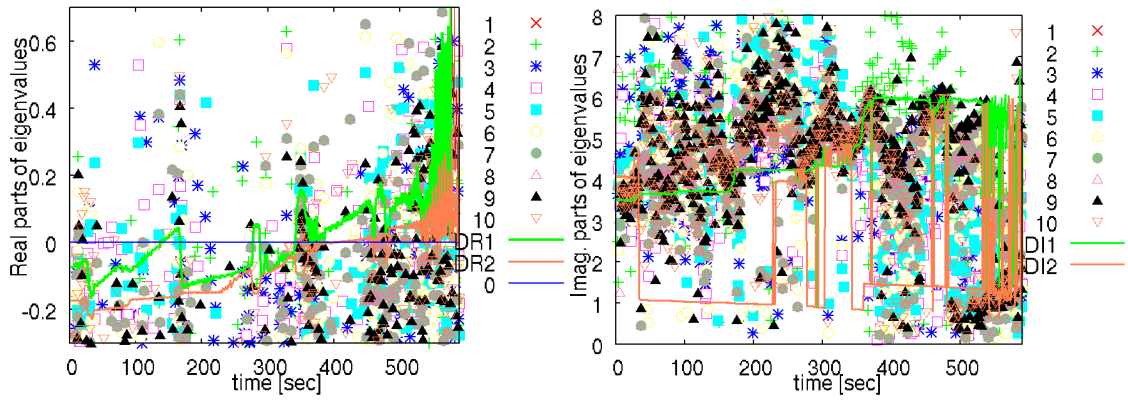


図 246 : 詳細モデルから直接算出した支配的な固有値の推移

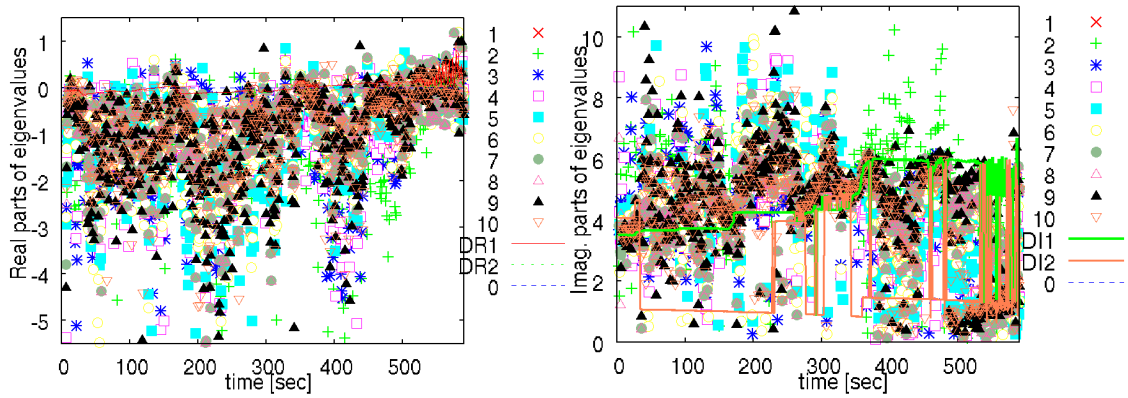


図 247 : 各発電機に設定した 4 次モデルから得られた固有値

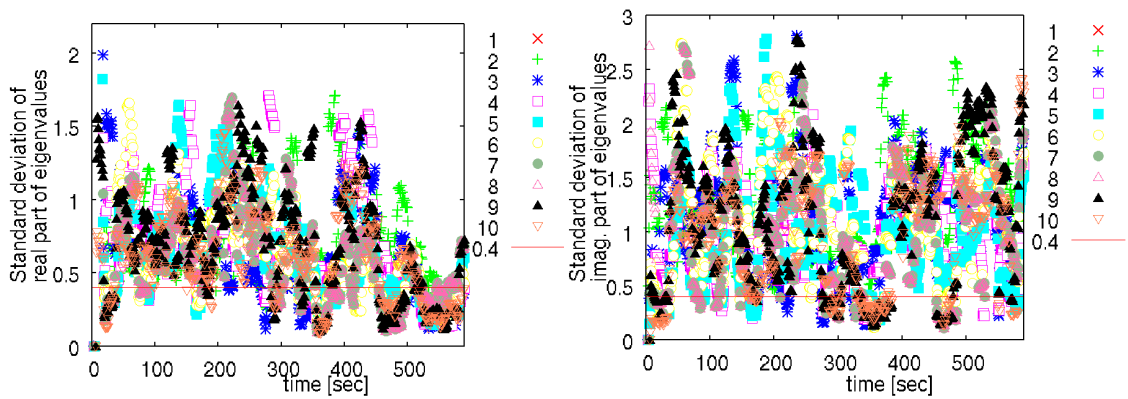


図 248 : 各発電機の 4 次モデルの固有値から求めた標準偏差

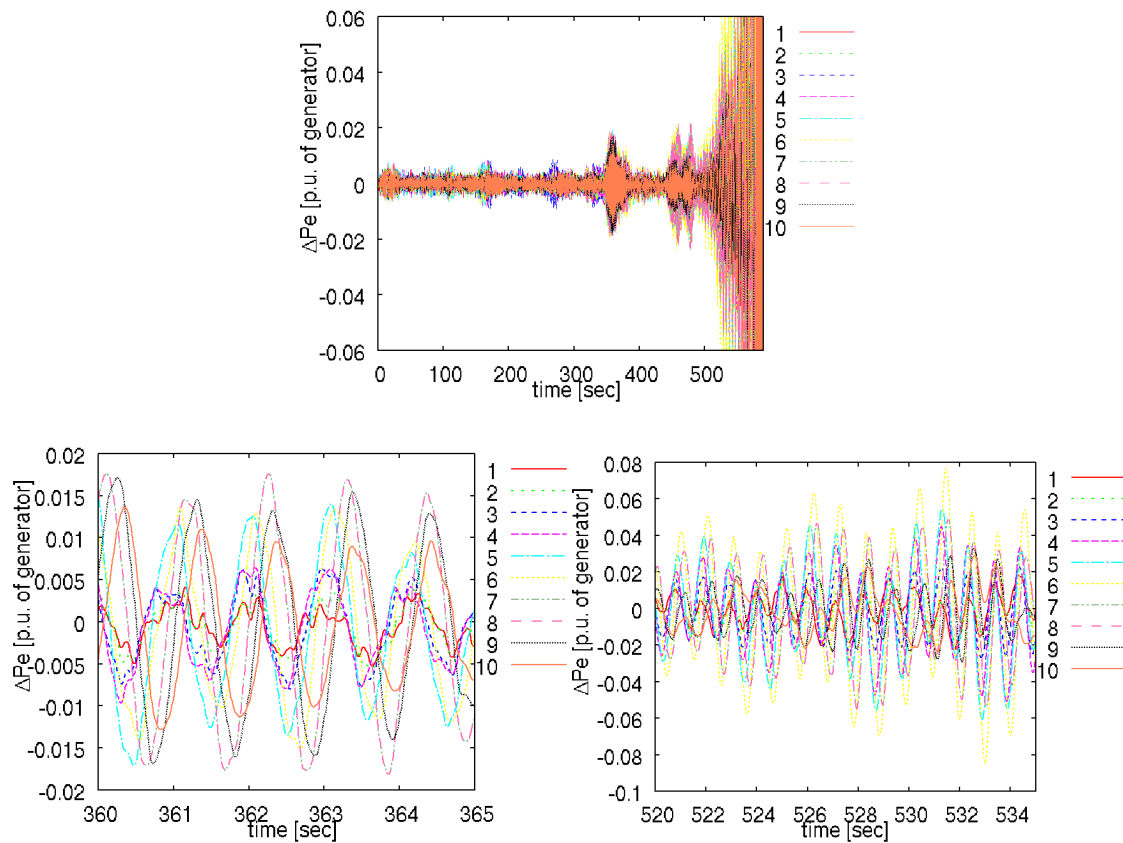


図 249：各発電機の電気出力偏差に同定用フィルタを適用した波形

5.7.10. 系統状態が時変となる場合のオンライン設計に関するまとめ

- 4次モデルで支配的モードの存在を検出する手法は、比較的適切に動作することが分かった。動揺モードが波形として現れると、支配的な固有値に近い値が連続して得られ、動揺モードの存在を把握し、その固有値を求められた。不安定化したときに限りパラメータを設計すると、運悪く発散するか、運良くおさまるかのどちらかとなる。おさまった場合はパラメータ設計が中断され、その後再度不安定化するまでの間は設計に失敗するリスクを避けられることが分かった。
- 同時に複数の動揺モードが不安定化すると、低次モデルを用いた同定では、固有値虚部が収束しなくなる傾向が見られた。固有値のばらつきが小さいときにだけ、パラメータ設計を行う設定だと、設計が行われなくなる。
- 2次モデルを用いて、その発電機における支配的モードを求める手法では、一種類のモードが大きく不安定化し、かつ PSS パラメータを固定したシミュレーションでは、本来の動揺モードに比較的近い値を得たが、PSS のパラメータを操作し、支配的なモードが次々と入れ替わる状況になると、本来支配的となる動揺モードには、追従しなく

なった。

- 動揺振幅から、設計の実施を判断する方法は、負荷からもたらされるノイズの振幅が一定であれば、不安定化するたびにパラメータを設計する動作を実現できる。
- パラメータの更新を行うかを判定するしきい値は、パラメータ設計を控えて同定だけを行った結果を利用して、試行錯誤的に設定できる。
- PSSのパラメータを操作することで、5次モデルの固有値が変化する。そのような変化に対して同定は、動揺波形と5次モデルの性質が近くなるように働くはずだが、効果が見られない場合がある。

5. 8. WEST30 機系統モデルを用いた解析事例

ここでは、評価の対象とする電力系統モデルを、これまでの 10 機系統から 30 機系統に変更し、これまでと異なる電力系統モデルにおいて、提案手法がどのように作用するかについて調べた。

5.8.1. WEST30 機系統モデル

本研究で提案する適応制御手法は、これまで電気学会 WEST10 機系統だけを対象に検討してきた。検討の対象とする電力系統モデルが 1 種類だけだと、安定化すべき状況や、安定化後の状況が限られるため、手法の性質を十分に検証できない可能性がある。そこで、形が異なる系統モデルとして、発電機の数これまでの 3 倍とした、電気学会 WEST30 機系統モデルを用いて、提案手法の検討を行う。図 250 に示す電気学会 WEST30 機モデル^[11]は、西日本の広域電力系統を、発電機 30 台、負荷 64 点、ノード 115 点、枝 129 本で表現したものである。西日本の電力系統の特徴である、長周期・弱制動の動揺モードを再現するように作られている。

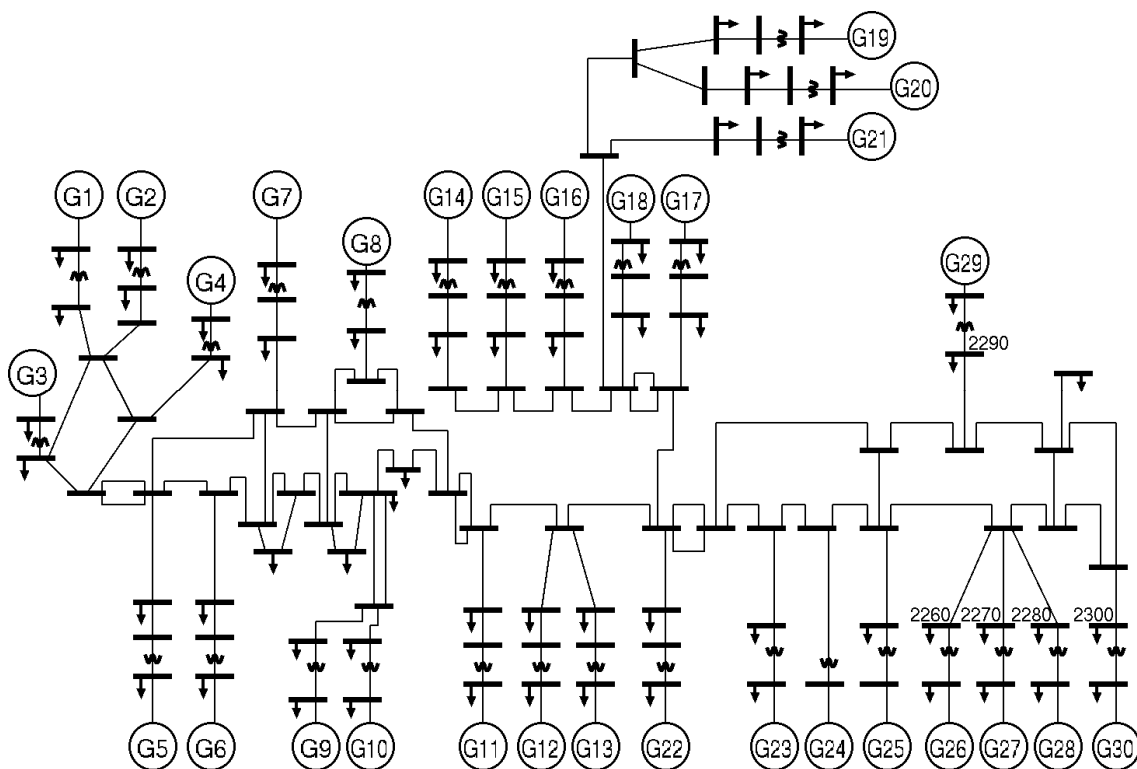


図 250 : 電気学会 WEST30 機系統モデルの系統図^[11]

数値積分法(過渡解析法)のシミュレーションでは、内部で行列のかけ算や逆行列の計算を行っている。これらの演算に用いる行列の行数や列数は、発電機の数に比例する 경우가多

い。従って、シミュレーションの計算量のオーダは、発電機数の 3 乗に比例する。10 機系統が 30 機系統になると、計算量は約 27 倍になる。執筆現在の計算機やソフトウェアでは、30 機系統を用いて、十分なシミュレーション事例を積み重ねることは、そう簡単ではない。

5.8.2. 東向き潮流を少しずつ増加させる場合における同定

まず、少しずつ不安定化する潮流状態を用意し、動揺現象の同定を検証する。シミュレーションは、東側へ向かう潮流が少しずつ増加する状況を想定して行う。シミュレーション開始後 1 秒の時点から、以下の操作を行う。

- 負荷ノードのうち、発電機が接続されていないノードを対象に、負荷変動としてのノイズを加える。
- 発電機 1 の出力を 0.0065[p.u./sec]で増やし、負荷ノード 2260, 2270, 2280, 2290, 2300(シミュレーションシステム内部では、ノード番号は 60,61,62,63,64 となっている)の消費量に対応するアドミタンスを、0.0030[p.u./sec]で増やす。ただし、1[p.u.] = 1000[MW]とする。

各発電機には、 ΔP 型の PSS を設置した。PSS パラメータの初期値を表 13 に示す。シミュレーション開始 2 秒の時点における詳細モデルから直接算出した支配的な固有値は、 $+0.0737 \pm j1.21$ (動揺周期は 5.20 秒)と、やや不安定である。シミュレーションを続けることで、重潮流化によりさらに不安定化し、発散する状況を想定している。

表 13 : PSS パラメータの初期設定値

k8	t2[sec]	t3[sec]	t8[sec]	t1[sec]
0.3	0.50	0.90	0.02	5.0

発電機端における物理量を図 251 に示す。60 秒以降に動揺の振幅が大きくなる。回転数が、120 秒までに 2[rad/s]程度上昇し、周波数が 60.3[Hz]程度になっている。200 秒付近までは、動揺振幅が次第に増大しているが、その後急激に不安定化して、発散する。不安定な動揺が強く見られる 200 秒付近を拡大したものを、図 252 に示す。動揺波形は正弦波状ではなく、複雑な形をしている。回転速度のグラフからは、発電機 G1 から G10 までと、発電機 G11 から G30 までが、それぞれグループを作り、互いのグループが動揺の腹となって揺れていることが分かる。

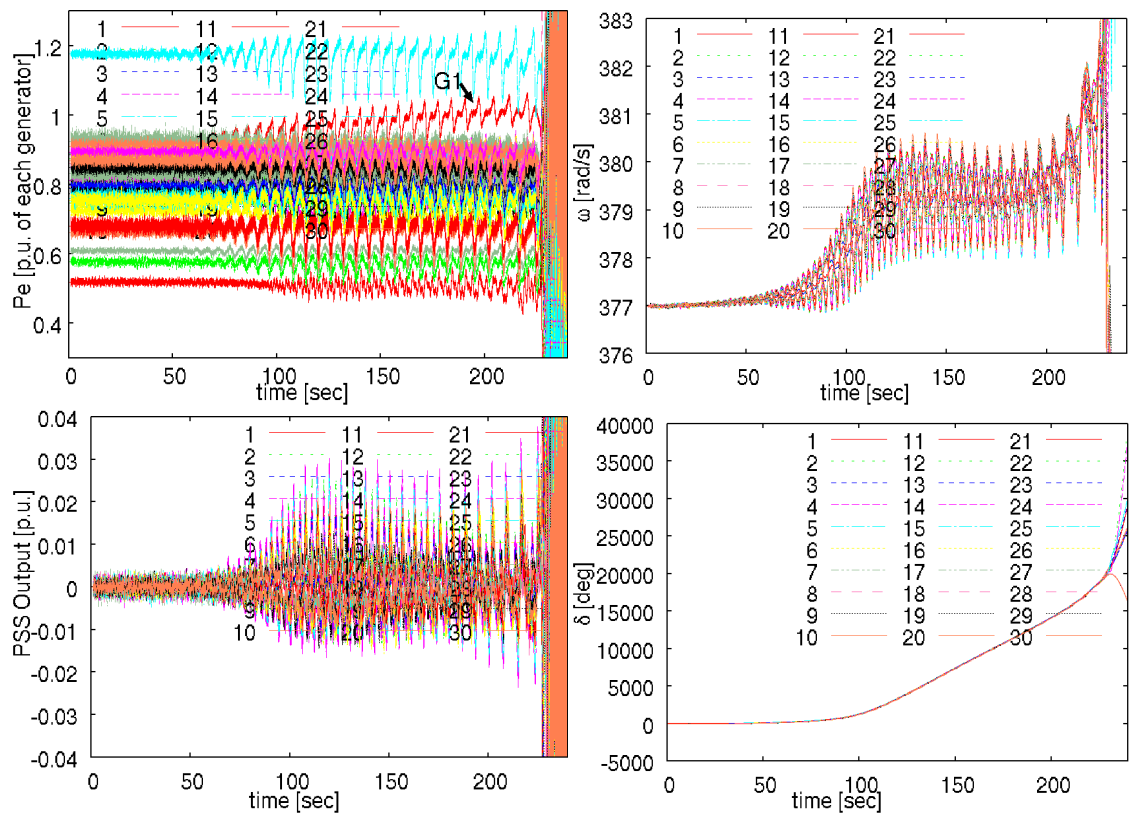


図 251 : 各発電機における物理量(電気出力・回転速度・PSS出力・回転子の位相)

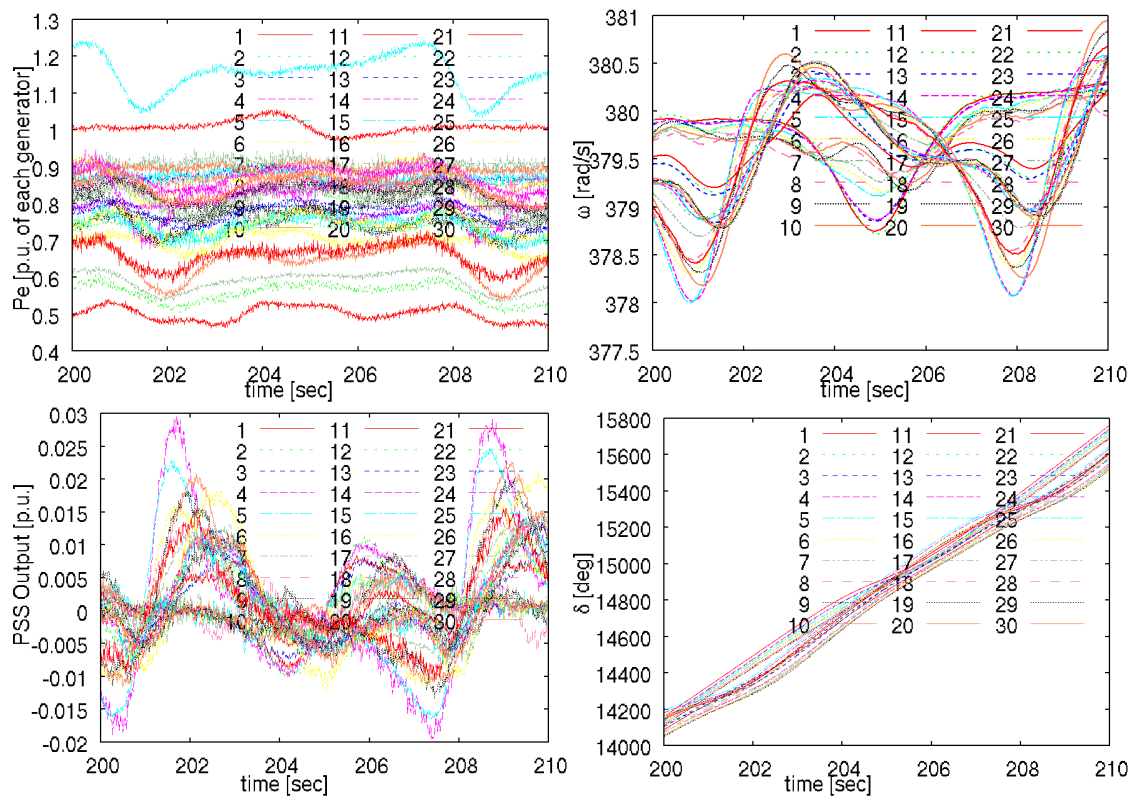


図 252 : 不安定化が進行したときの各発電機における物理量

次に、詳細な系統モデルを用いて、各時刻の物理量を動作点として求めた、支配的な固有値を図 253 に示す。60 秒付近までは、少しずつ安定度が悪化する様子が見られる。それ以降は、物理量の振動が大きくなり、値が乱れがちであるが、全体としては安定度はそれほど変化しない。220 秒を過ぎると、急激に悪化する。”DR2”と”DI2”として示した、2 番めに支配的な固有値は、重潮流化に伴い、むしろ安定化している。

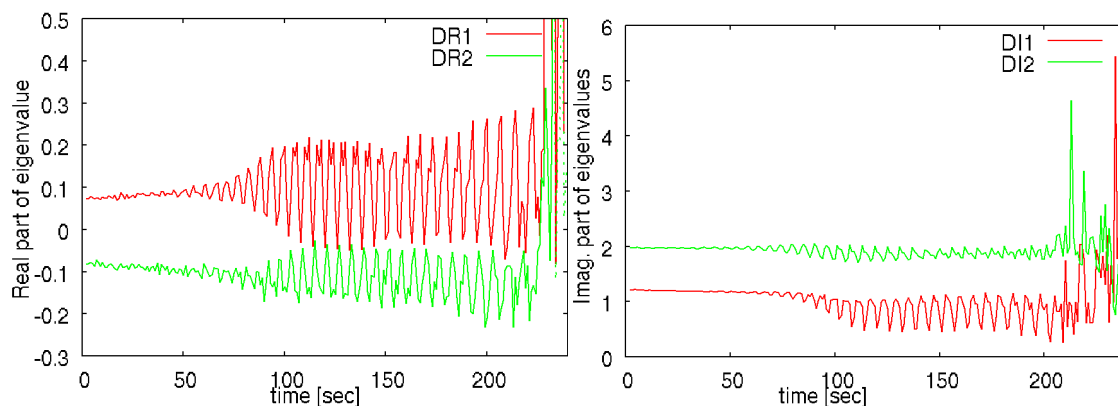


図 253 : 詳細モデルからその時点の物理量を動作点として求めた支配的固有値

各発電機の 5 次モデルで行った同定により得られた固有値を、図 254 に示す。実部・虚部ともに、100 秒以降は、本来の動揺モードに近い値になっているただし、本来取るべき値からずれたプロットは、常に存在する。虚部では、0 付近となる場合が常に見られる。各発電機の 2 次モデルにおける同定から得られた固有値を、図 255 に示す。値の傾向は、5 次モデルから求めた場合と似ている。虚部で 0 付近となりにくい点と、実部・虚部ともに値が取る幅がやや狭い点が、異なっている。

各発電機に 4 次モデルを設定し、同定を行い、固有値を求めた。4 次モデルでは、2 台の発電機の情報を用いるため、ある発電機に設置する 4 次モデルは、もう一つの発電機の情報、ペアとして持つ必要がある。ここでは、発電機 G1 から G10 までと、発電機 G11 から G30 までが、グループを形成して動揺する傾向があるので、発電機 G1 から G10 の 4 次モデルでは、最も離れた G30 の情報をペアとして持ち、発電機 G11 から G30 までの 4 次モデルでは、最も離れた G1 の情報をペアとして持つことにする。4 次モデルから得られた固有値を、図 256 に示す。実部は、2 次モデルの場合と同じく、0 付近に収束している。虚部は、最も支配的な動揺モードだけでなく、2 番めに支配的な動揺モードにも値が集まる傾向が見られる。

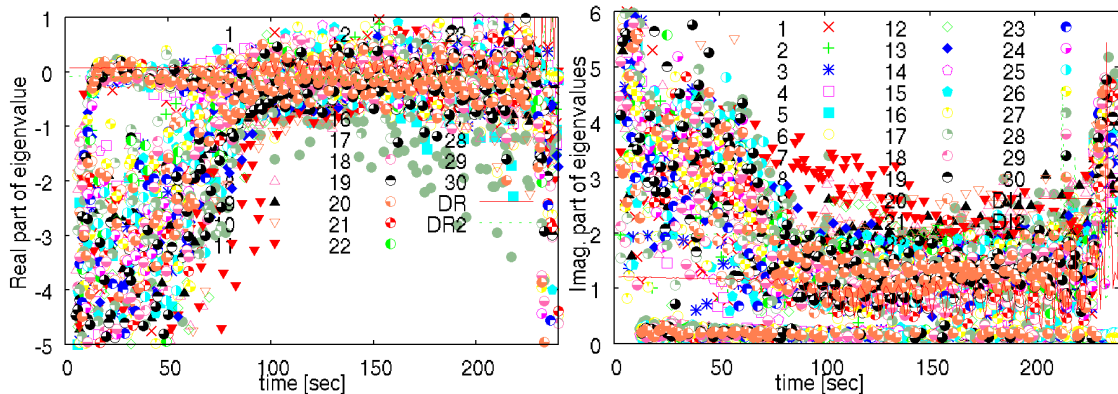


図 254 : 各発電機の 5 次モデルでの同定から求めた固有値

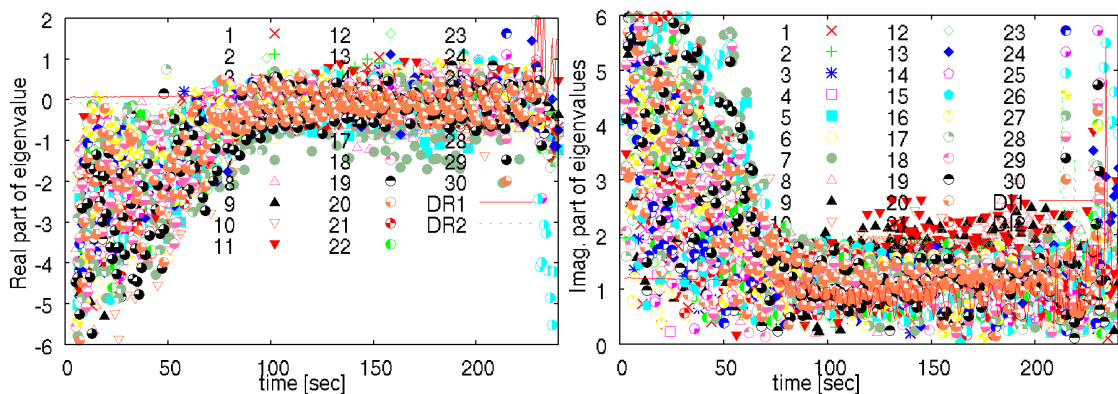


図 255 : 各発電機の 2 次モデルでの同定から求めた固有値

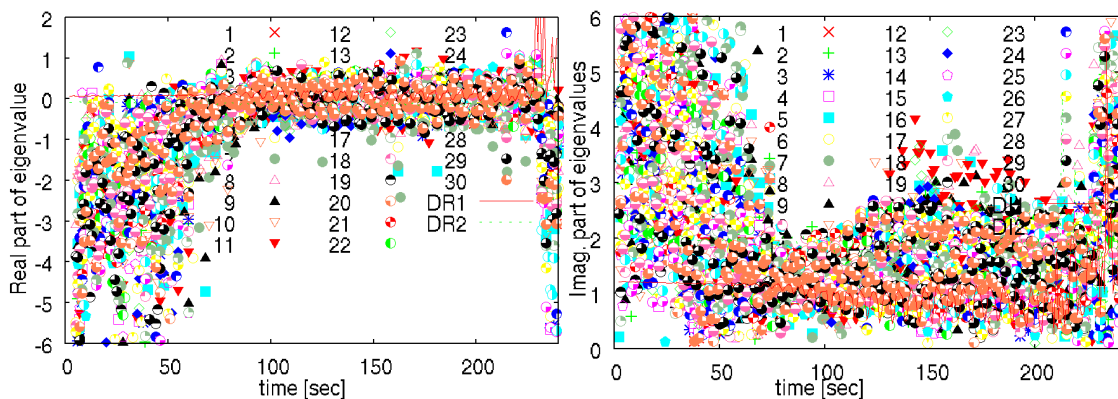


図 256 : 各発電機の 4 次モデルでの同定から求めた固有値

次に、2 次モデルと 4 次モデルを対象に、求めた固有値を時系列上に集め、12 秒間(12 秒ぶん)の値に対して標準偏差を求めた。2 次モデルについては図 257 に、4 次モデルについては図 258 に、それぞれ示す。実部では、100 秒を過ぎて動揺現象がはっきりと見られるときは、0.4 以下となる発電機が多い。虚部では、2 次モデルでは実部と同じように、100

秒を過ぎると 0.4 以下となる発電機が多い。4 次モデルでは、2 つの動揺モードの両方を行き来するような同定となった発電機が見られたため、不安定であるにもかかわらず、ばらつきが大きく出たためか、120 秒以降は 0.5 付近に値が集まっている。一度に複数の動揺モードを検出してしまうと、虚部の値が落ち着かなくなることが分かる。

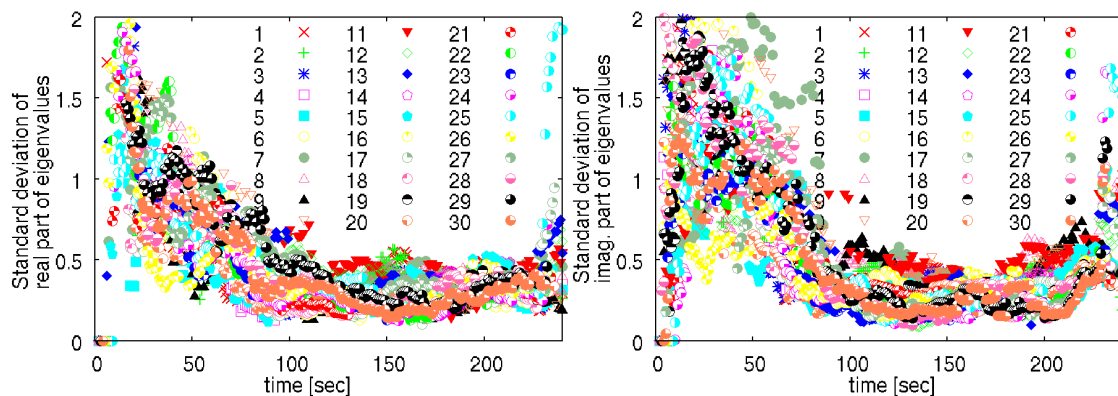


図 257 : 2 次モデルで求めた固有値の時系列上のばらつき(12 秒ぶん)

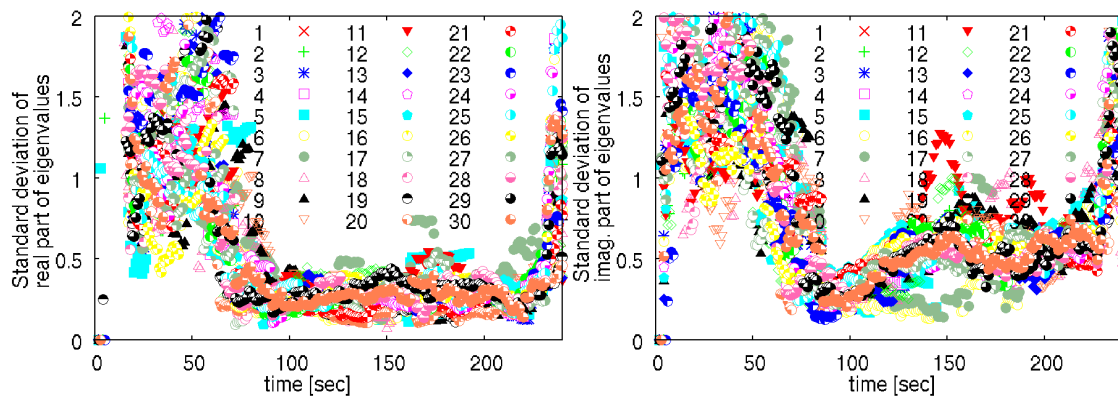


図 258 : 4 次モデルで求めた固有値の時系列上のばらつき(12 秒ぶん)

5.8.3. 詳細モデルの固有値を直接用いた固有値制御

次に、理想的なパラメータ設計が行われた場合について調べる。詳細なシステムモデルから直接算出された固有値を用いて、3 分木法のアルゴリズムで PSS のパラメータを更新する。東向き潮流を際限なく強めていくので、いつかは必ず発散するが、理想的なパラメータ設計により、最も長く安定でいられる設計が行われることが期待される。シミュレーション開始 1 秒の時点から、前節と同じように負荷外乱の添加と、東向き潮流の増加を開始する。シミュレーション開始 25 秒の時点から、全ての発電機で毎秒 1 回ずつ、PSS のパラ

メータを更新する。更新可能な幅は、 $(k8, t2, t3) = (0.001, 0.05, 0.05)$ とする。

各発電機の端子で得られる物理量を、図 259 に示す。いったん動揺振幅が拡大するが、300 秒付近までにおさまる。しかし、重潮流状態が悪化し、発電機が加速を続け、400 秒付近に発散する。発散する前後における、各発電機の回転速度と位相角を、図 260 に示す。動揺振幅の増加による振動発散ではなく、潮流の増加により位相角が拡大し、発電機 G1 から G10 までのグループと、発電機 G11 から G30 までのグループの間で、位相差が拡大し、同期が取れなくなったことで、系統崩壊に至ったことが読み取られる。

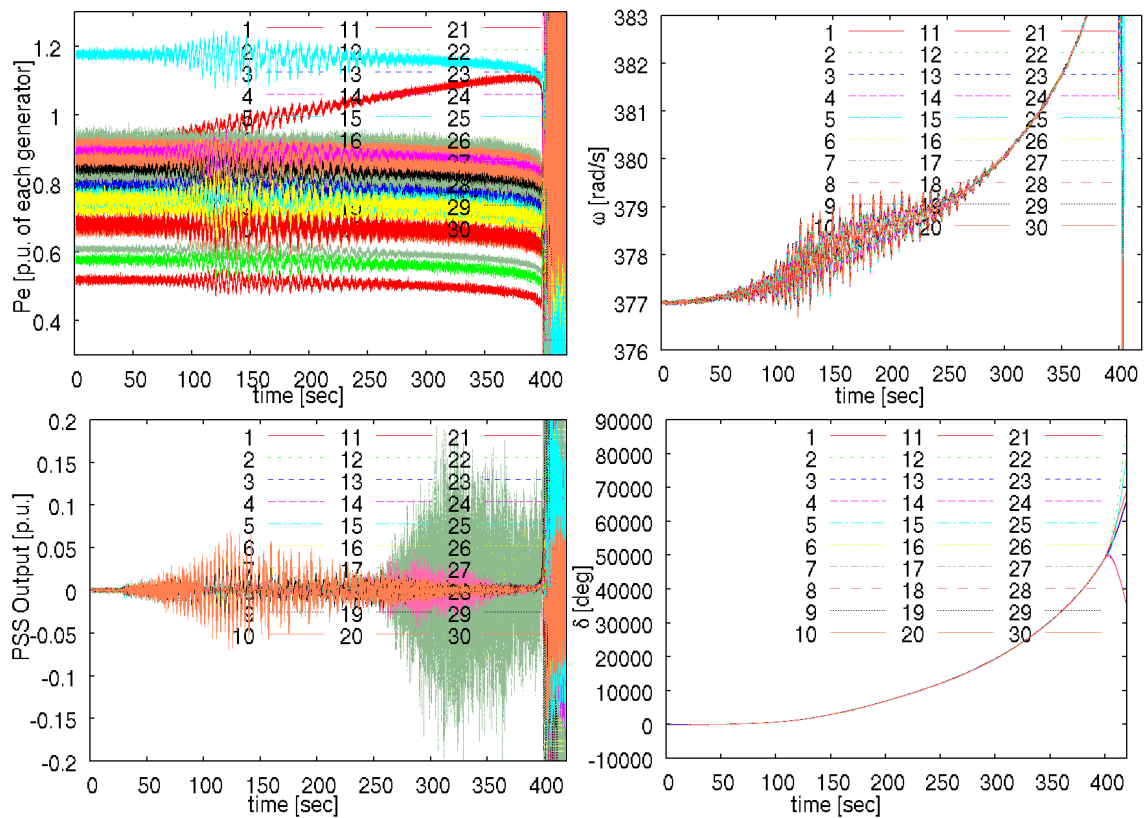


図 259：各発電機の端子で得られた物理量(電気出力・回転速度・PSS出力・位相角)

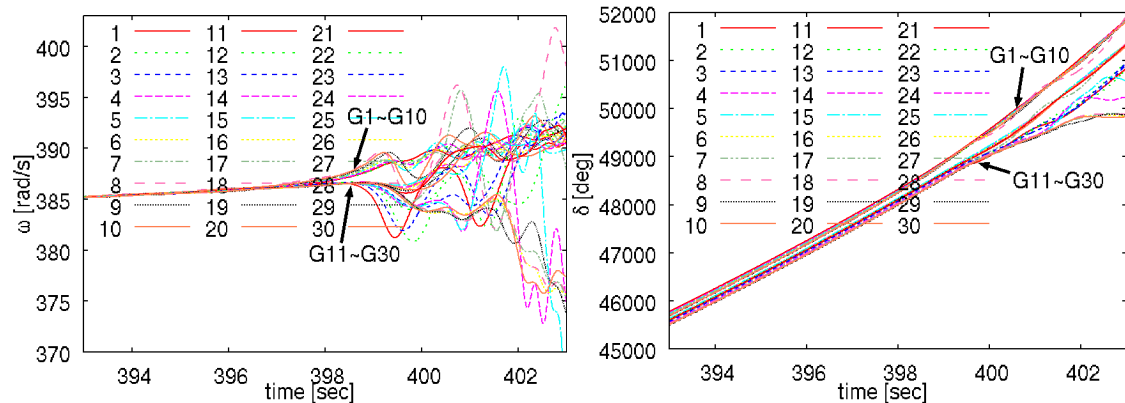


図 260：発散するときの各発電機の回転速度と位相

次に、各発電機の PSS パラメータを図 261 に示す。ゲイン k_s は、大部分の発電機で増加し、350 秒付近で収束した。位相補償は、発電機ごとに様々な値になっている。強い遅れ補償となる発電機と、補償をそれほど行わない発電機がある。値の様子は、必ずしも発電機 G1 から G10 までと、G11 から G30 までで分かれているわけではないが、発電機 G1 から G10 まではいずれも、 t_2 の値が 2 を下回るなど、ある程度の傾向は見られる。

詳細なモデルから、リアルタイムの物理量を動作点とみなして算出した、支配的な固有値を図 262 に示す。実部を見ると、380 秒付近までは、最も支配的な固有値と 2 番めに支配的な固有値が、安定化を続けているが、その後、突然不安定化して発散する。発散直前まで固有値実部が小さいことから、不安定化の理由は、動揺現象ではなく、重潮流化による位相差拡大であると考えられる。従って、詳細モデルから算出した固有値を用いたパラメータの更新は、動揺現象を抑えるという目的においては、十分な働きをしていたといえる。固有値の虚部からは、値が 2 付近の固有値と 1 付近の固有値が、どちらが最も支配的となるかで、激しく入れ替わっていることが分かる。このような状況では、複数の周期が同じくらい誘起されやすくなるので、動揺波形から特定の動揺モードを同定することが、難しくなると予想される。

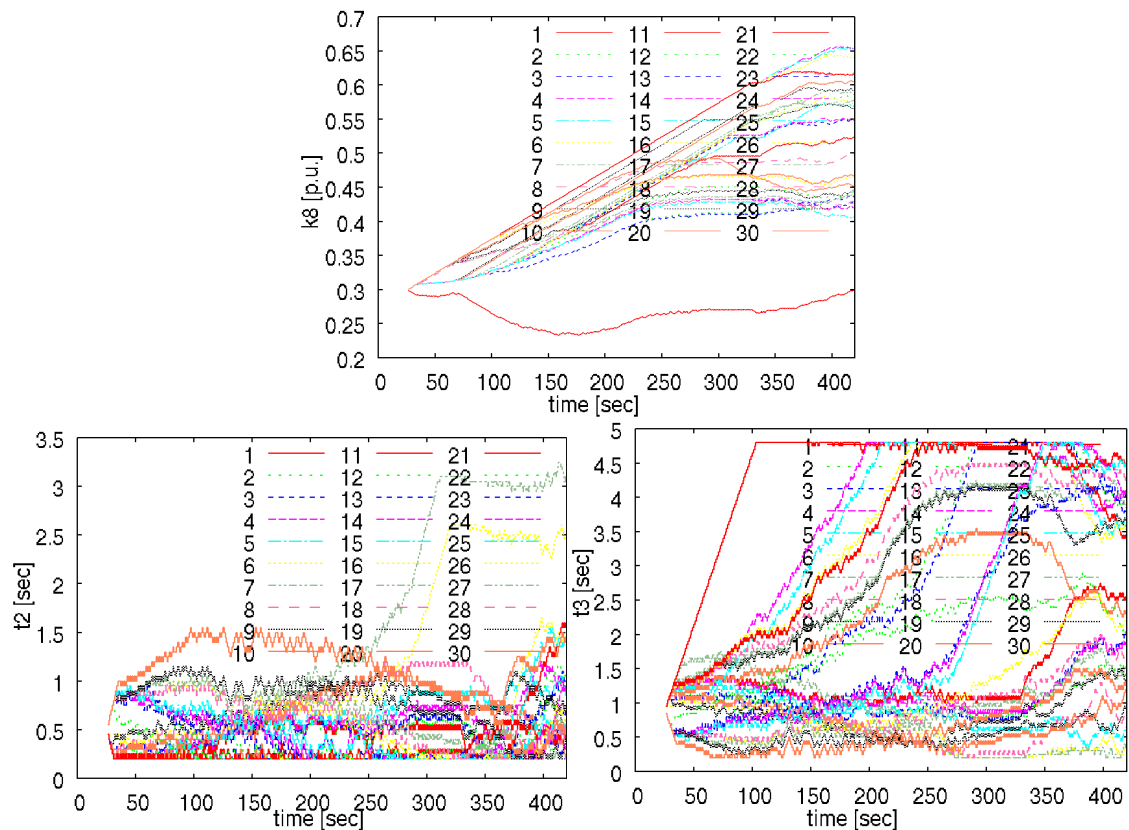


図 261：各発電機における PSS パラメータの変化

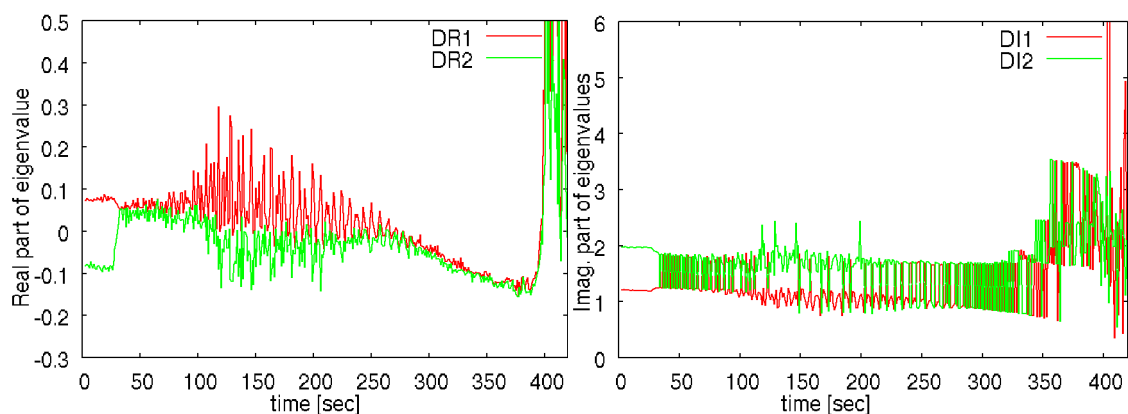


図 262 : 詳細モデルでリアルタイムの物理量を動作点として求めた固有値の推移

詳細モデルから直接求めた固有値を用いたパラメータの更新は、適応制御ではなく、同定の結果は用いていないが、参考として各低次モデルで同定を行い、得られる固有値の傾向を調べた。5次モデルから求めた固有値を、図 263 に示す。動揺現象がはっきりと見られる 150 秒から 200 秒の間では、動揺波形の振幅が比較的大きいため、固有値が詳細モデルから求めた本来の値に集まっている。250 秒を過ぎると、実部・虚部ともに値の幅が大きく広がっている。動揺現象が収束に向かい、同定に必要な情報を得にくくなったためと考えられる。

各発電機の 2 次モデルから同定して得た固有値を、図 264 に示す。250 秒付近までは、詳細なモデルから求めた固有値に追従した結果が得られている。300 秒以降では、支配的な固有値そのものが算出できていない時間帯がある。2 次モデルからは、最大で 4 つの固有値 (複素共役な値 1 組は 2 つと数える) が得られるが、それら全てで虚部が 0.1 以上の固有値が得られなかったためであり、動揺現象を把握していないようである。

各発電機に設置した 4 次モデルから求めた固有値を、図 265 に示す。ただし、4 次モデルを作る上で、ペアとした発電機は前節と同じである。固有値の分布は、実部・虚部ともに 5 次モデルから算出した値と近い傾向になっている。100 秒から 250 秒までの間は、詳細モデルから求めた固有値に近い値となっており、その後はばらつきが大きくなっている。

虚部が 1 付近のモードと 2 付近のモードが共存しているが、図 262 からは、動揺が波形として現れている間は 1 付近のモードのほうが、支配的となる時間が長いことが分かる。図 266 は、動揺が同定により検出されている 210 秒付近について、2 次モデルと 4 次モデルで得た固有値の虚部を示したものである。値は、1 を中心に上下しているようであり、この時点では、虚部の値が 1 付近の動揺モードがとらえられていたことが分かる。

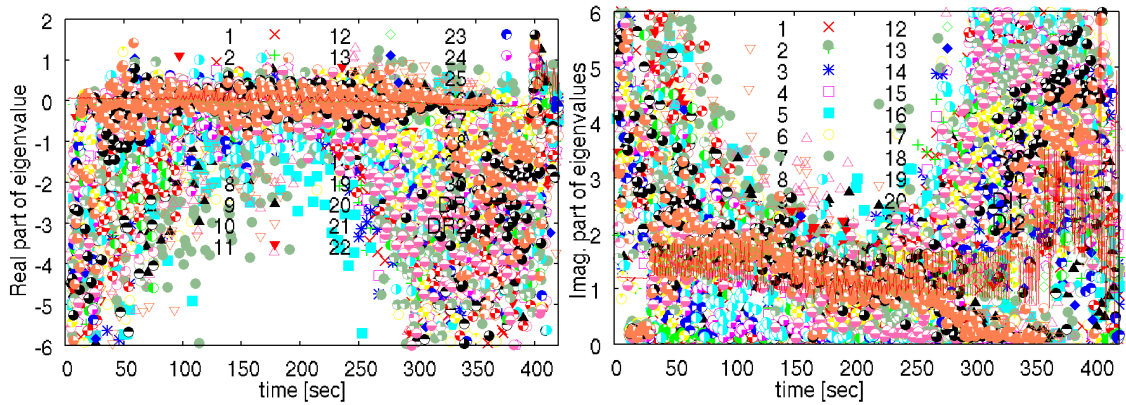


図 263 : 各発電機の 5 次モデルで同定して得た固有値

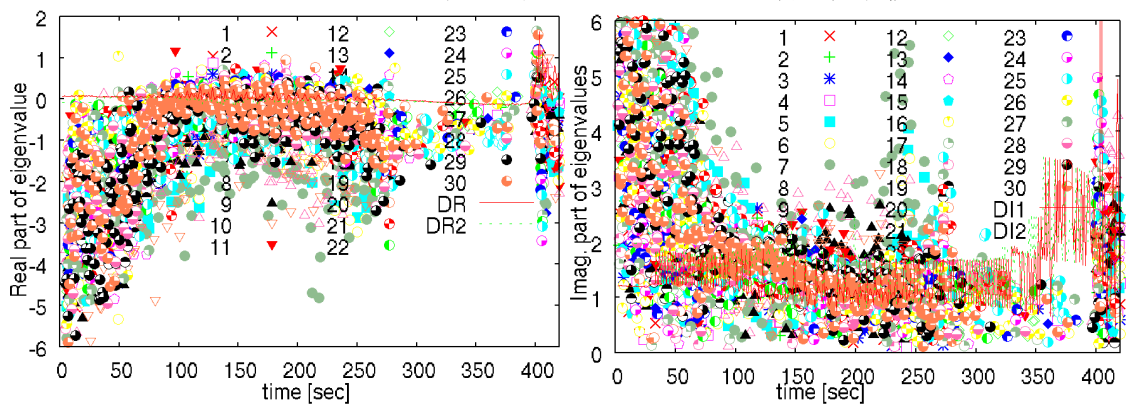


図 264 : 各発電機の 2 次モデルで同定して得た固有値

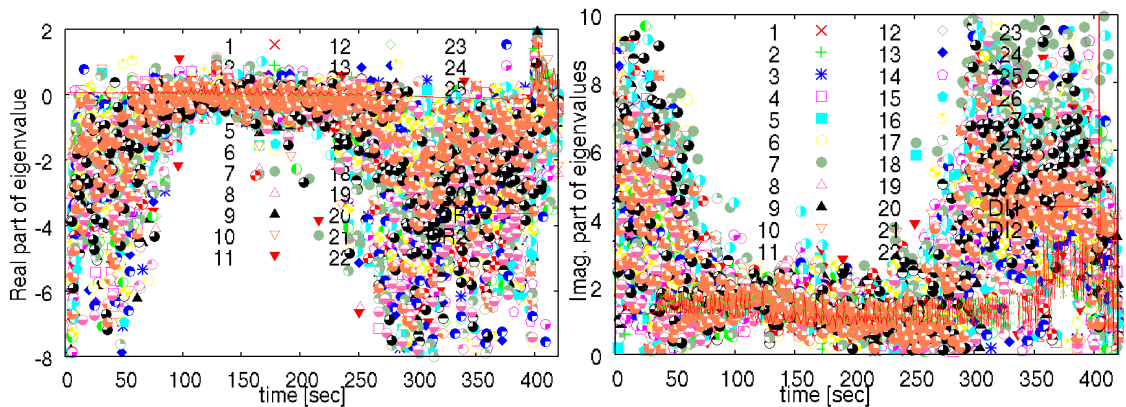


図 265 : 各発電機に設置した 4 次モデルにおける同定から得られた固有値

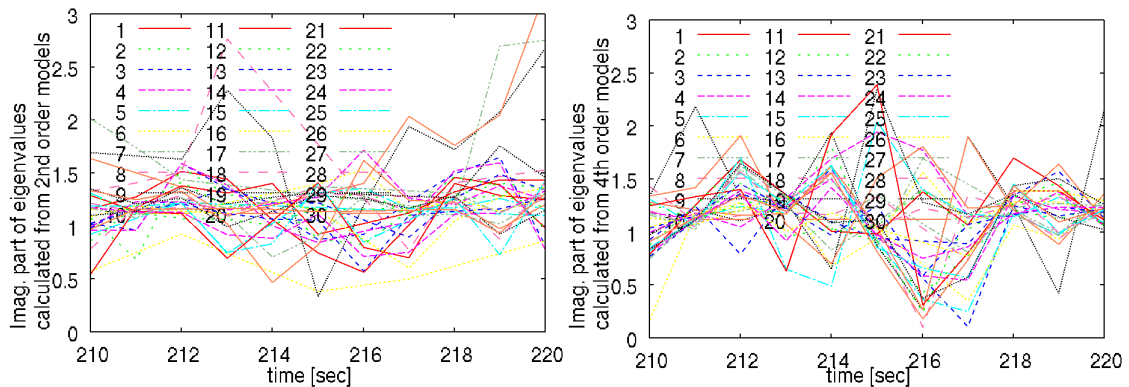


図 266 : 2 次モデルと 4 次モデルから求めた固有値虚部を動揺検出時に拡大したもの

各発電機で求めた固有値を、時間軸上に 12 秒ぶん集めて求めた標準偏差を、2 次モデルについては図 267 に、4 次モデルについては図 268 に、それぞれ示す。100 秒から 250 秒までの間は、比較的小さな値になっている。同じ時間帯に、動揺現象がはっきりした波形として現れているので、標準偏差の値から、動揺現象の存在を推定できると考えられる。2 次モデルから得られた値のほうが、4 次モデルから得られた値よりも、ばらつきが大きい。2 次モデルでは、発電機ごとの違いが比較的強く出ているようである。

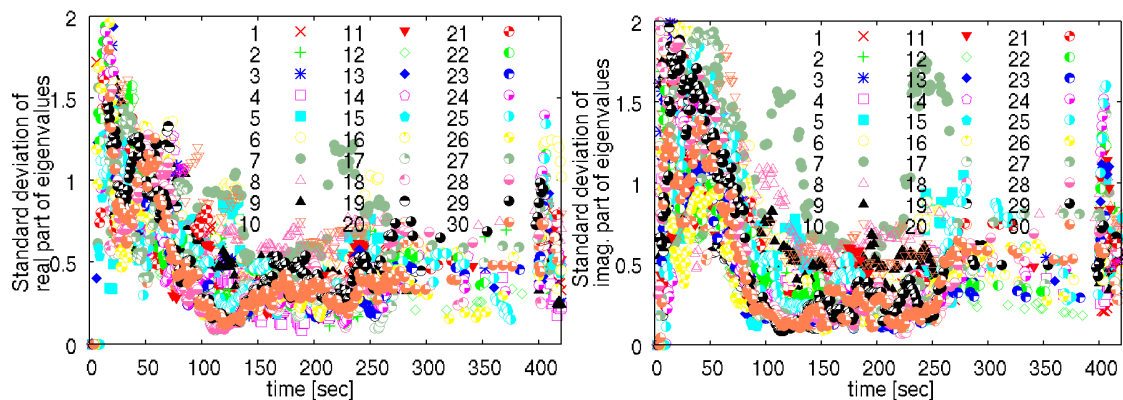


図 267 : 2 次モデルから得た固有値の直近 12 秒ぶんから求めた標準偏差

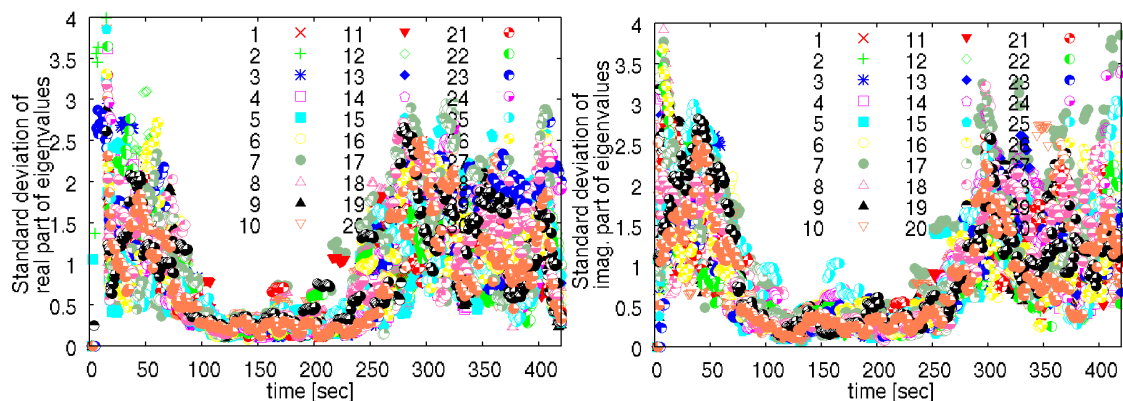


図 268 : 4 次モデルから得た固有値の直近 12 秒ぶんから求めた標準偏差

5.8.4. ローカル 4 次モデルによりオンラインパラメータ設計の実施を判定する場合

次に、適応制御によりパラメータを更新する事例として、各発電機の 4 次モデルでの同定で得られた固有値の標準偏差が、しきい値を下回るときに限り、3 分木法を用いて PSS のパラメータを適応制御する場合について、調べた。PSS パラメータの初期値や、パラメータ移動の単位量は、前節と共通である。シミュレーション開始 25 秒の時点から、全部の

発電機において、適応制御を可能とした。各発電機の4次モデルで、直近の固有値12秒分の標準偏差が、実部・虚部ともに0.4以下となるかを判定し、条件を満たす発電機でPSSのパラメータを、5次モデルを用いた適応制御により3分木法で更新する。

各発電機の端子から得られる物理量を、図269に示す。動揺の振幅が少しずつ大きくなり、240秒付近で発散することが分かる。発散する時期は、パラメータ設計を行わないケースを示した図251と、ほとんど変わらない。動揺が拡大しつつある200秒付近における動揺波形を図270に示す。回転速度の波形からは、およそ7秒の周期を持つ動揺が最も支配的と読み取れるが、さまざまな動揺が混ざり合い、複雑な波形になっている。

各発電機のPSSパラメータの変化を図271に示す。主に、60秒から120秒までと、200秒以降にパラメータが変化している。ゲイン k_s は、120秒にならないうちに値が変化しなくなっただので、値が収束したようである。

詳細なモデルで、リアルタイムの物理量を動作点とみなして求めた支配的な固有値を、図272に示す。パラメータ設計が行われた時間帯には、安定度はほとんど変化していない。パラメータ設計を行わなかった図253と比べても、違いがそれほど分からない結果になっている。

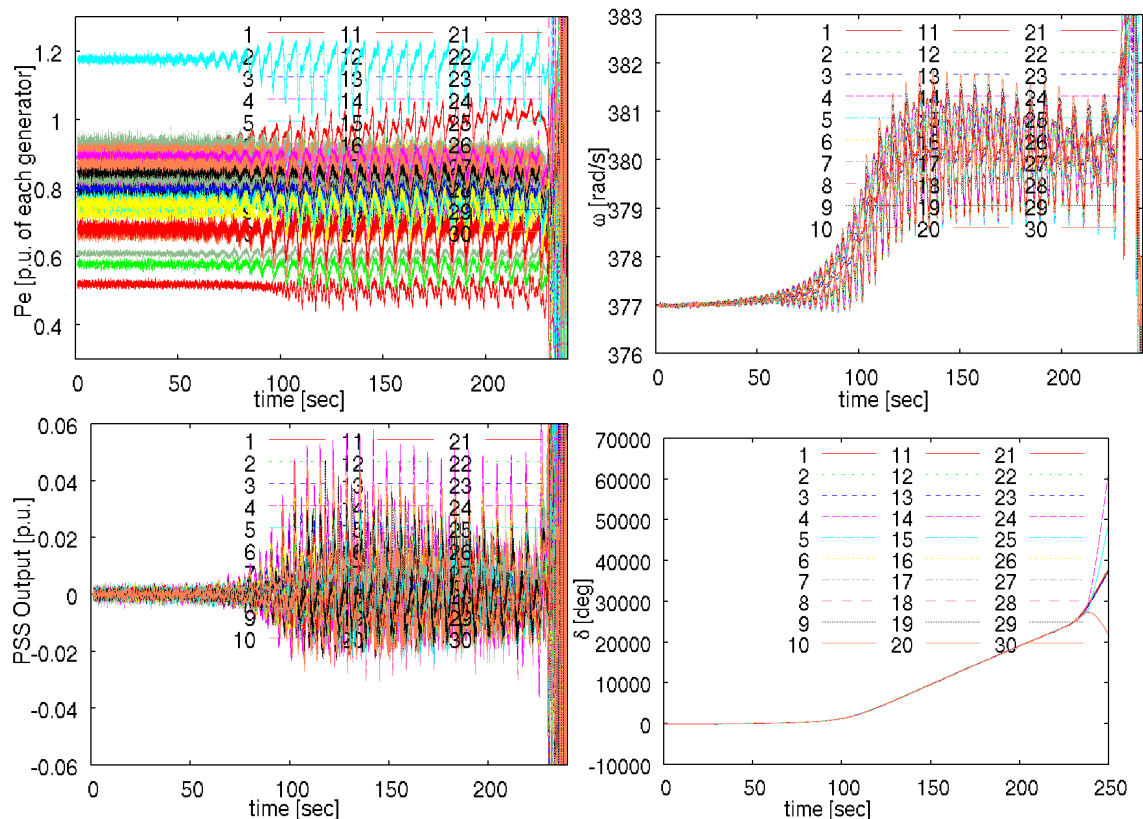


図 269 : 各発電機の端子で得られた物理量(電気出力・回転速度・PSS出力・位相角)

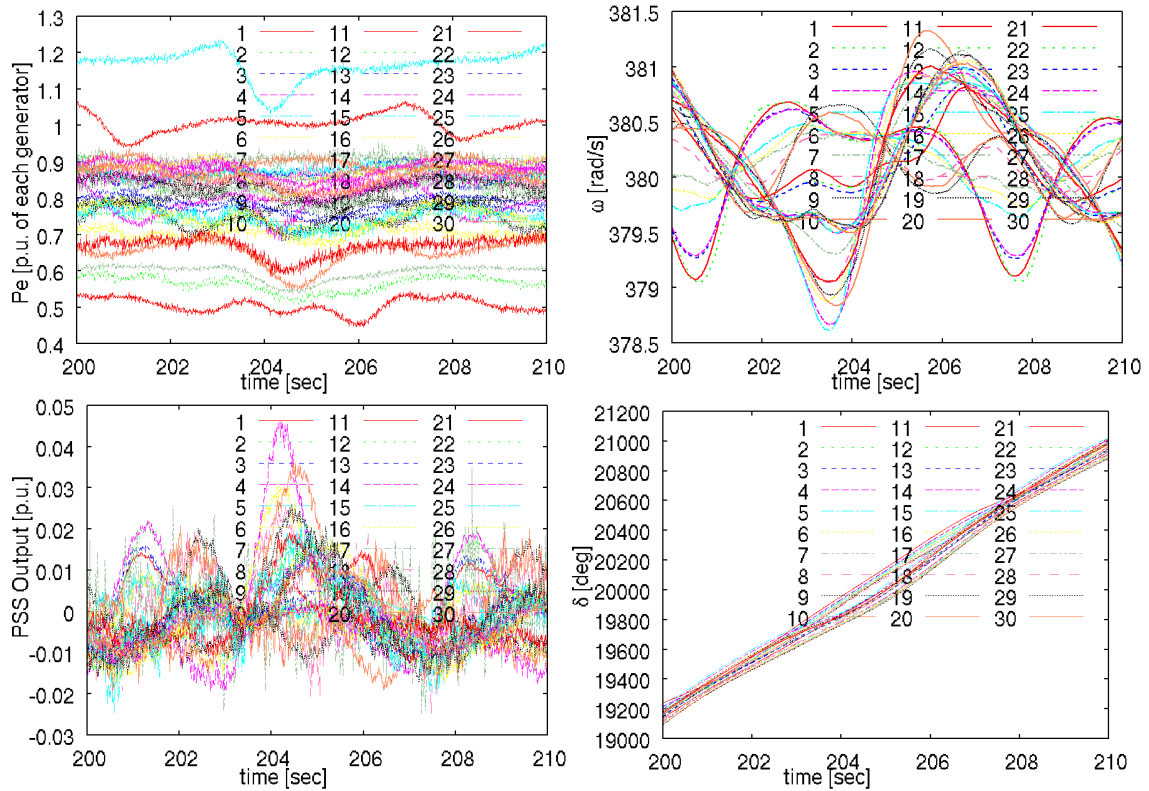


図 270 : 不安定化が進行したときの各発電機における物理量

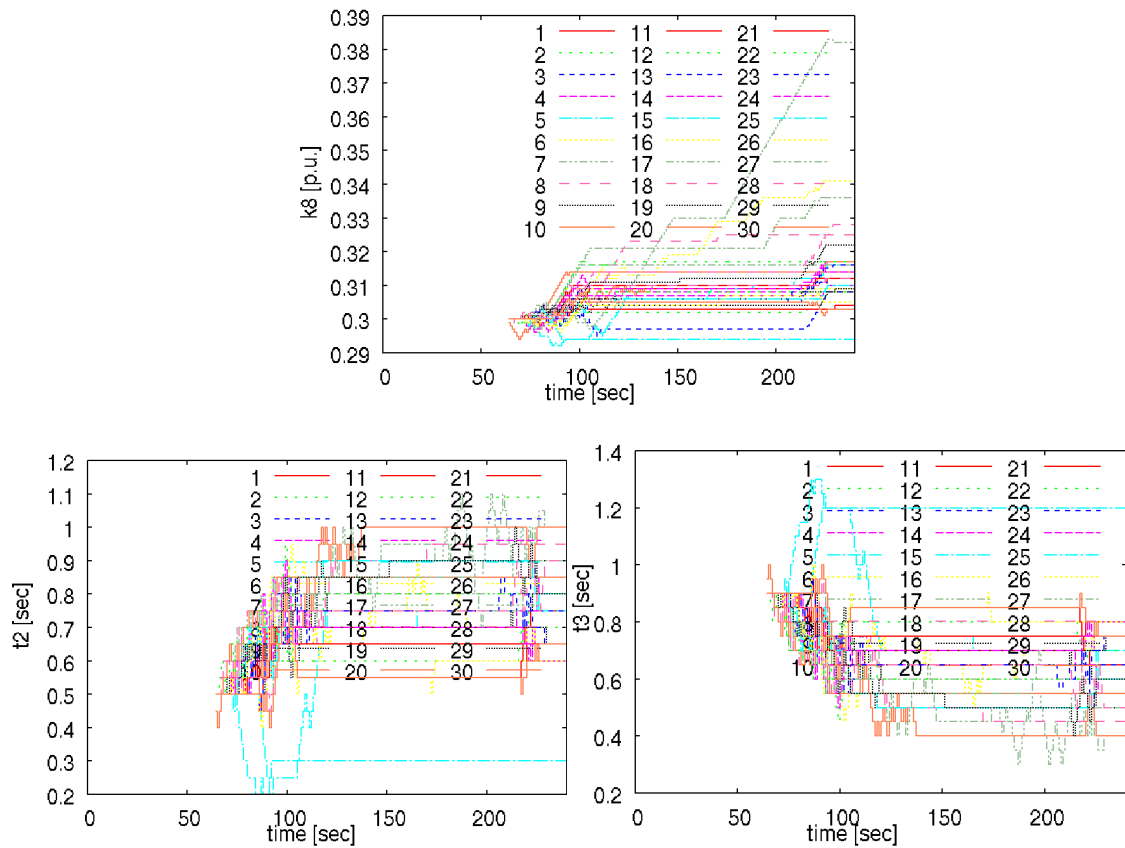


図 271 : 各発電機における PSS パラメータの変化

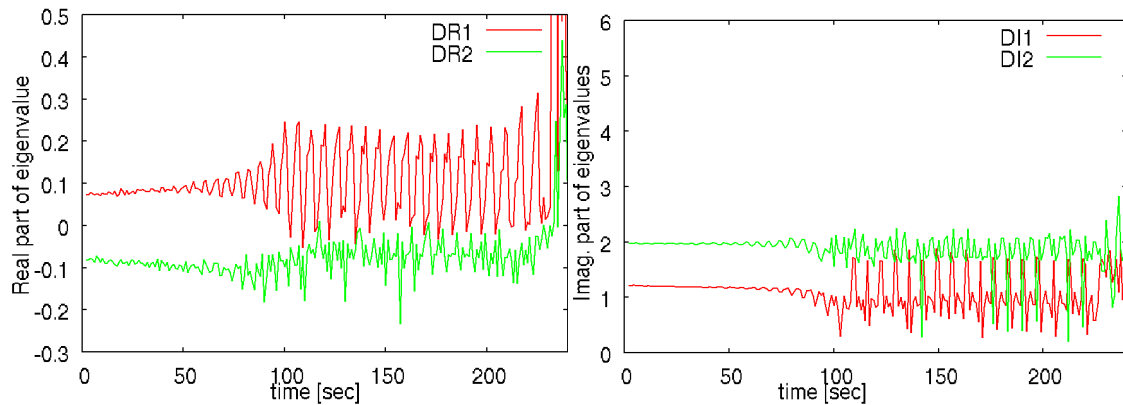


図 272 : 詳細モデルでリアルタイムの物理量を動作点として求めた固有値の推移

次に、各発電機に設定した低次線形モデルから算出した固有値について、示す。

まず、各発電機で PSS のパラメータと安定度の関係を判定し、パラメータを更新する目的で用いた、5 次モデルから求めた固有値を図 273 に示す。動揺現象が波形としてはっきりと現れている間は、実部・虚部ともに特定の値に集中している。ただし、虚部は 0 付近となる場合がある。実部は 1 ほど、虚部は 2 ほどの幅を持って分布している。

次に、各発電機の 2 次モデルから求めた固有値を、図 274 に示す。5 次モデルから求めた固有値と、近い結果になっている。ただし、虚部が 0 付近に集まる現象は、起こっていない。

次に、各発電機の 4 次モデルから求めた固有値を図 275 に示す。各発電機に設定した 4 次モデルは、発電機 G1 から G10 まででは、G30 をペアとする。発電機 G11 から G30 まででは、G1 をペアとする。前節までと同じ設定であり、離れたグループの発電機とペアにすることで、より広域の動揺現象を把握しやすくすることを意図している。4 次モデルから求めた固有値は、各発電機でパラメータ設計を行うかどうかを判断するために用いる。150 秒付近では、虚部が、2 番めに支配的な動揺モードである 2 付近にも集まっているため、虚部が持つ値の幅が 3 程度まで広がっている。それ以外は、2 次モデルから求めた固有値と近い結果になっている。虚部の値が 2 付近となる動揺モードは、動揺現象として別のグループとなる発電機を組み合わせた 4 次モデルで、強く観測されている。従って、この動揺モードはとくに、広い範囲の発電機が関わって起きている可能性もある。

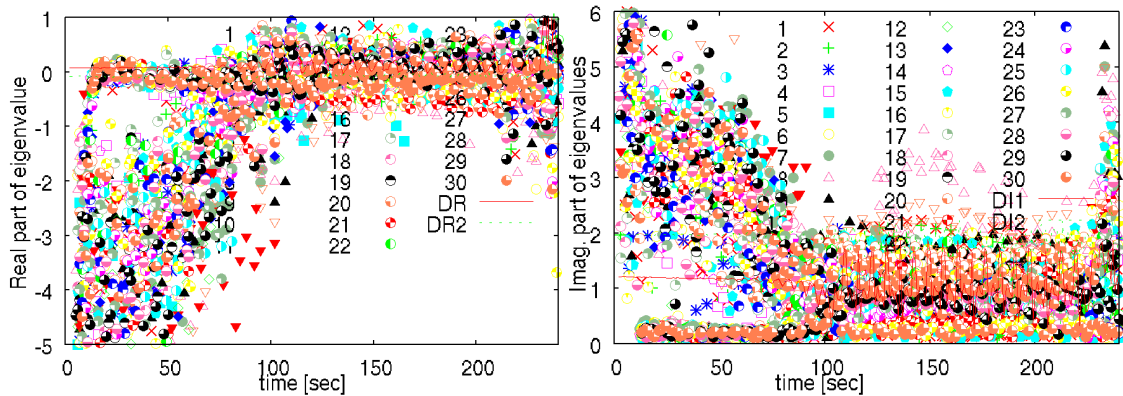


図 273 : 各発電機の 5 次モデルで同定して得た固有値

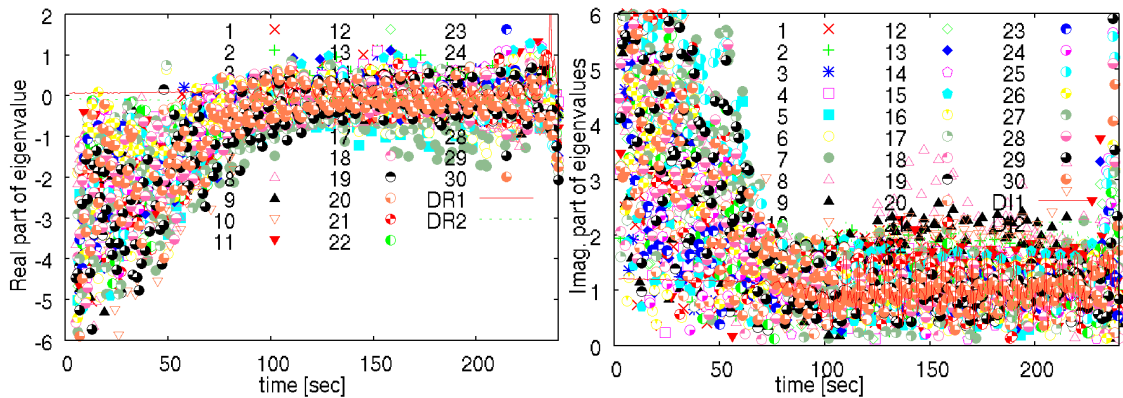


図 274 : 各発電機の 2 次モデルで同定して得た固有値

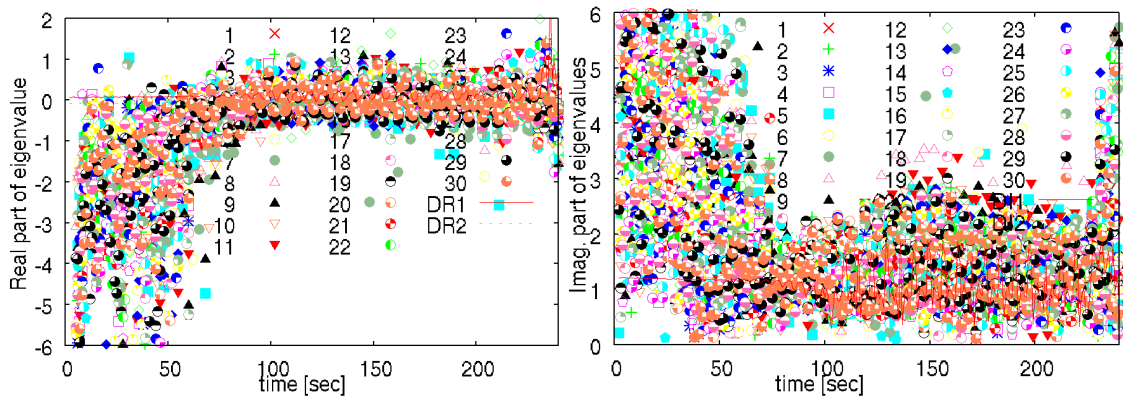


図 275 : 各発電機に設置した 4 次モデルにおける同定から得られた固有値

次に、低次線形モデルから求めた固有値を直近の 12 秒ぶん集め、標準偏差を算出した結果について示す。2 次モデルから求めた固有値のばらつきを示す図 276 からは、動揺がはっきりと現れてからは、実部・虚部ともに 0.4 を下回る状況が長く続いたことが分かる。このグラフの値は、パラメータ設計の実施判定には用いていないが、2 次のモデルからは動揺現象が検出されているものの、長時間にわたり動揺現象が抑えられていないことが分かる。

4次モデルから求めた固有値のばらつきを示す図 277 からは、80 秒付近でたいへん小さな値になるものの、その後は 200 秒付近まで、虚部が 0.5 以上となる発電機が多い。このため、100 秒から 200 秒までの間は多くの発電機で、改善すべき動揺モードが存在するにもかかわらず、パラメータ設計が行われなかったことが分かる。

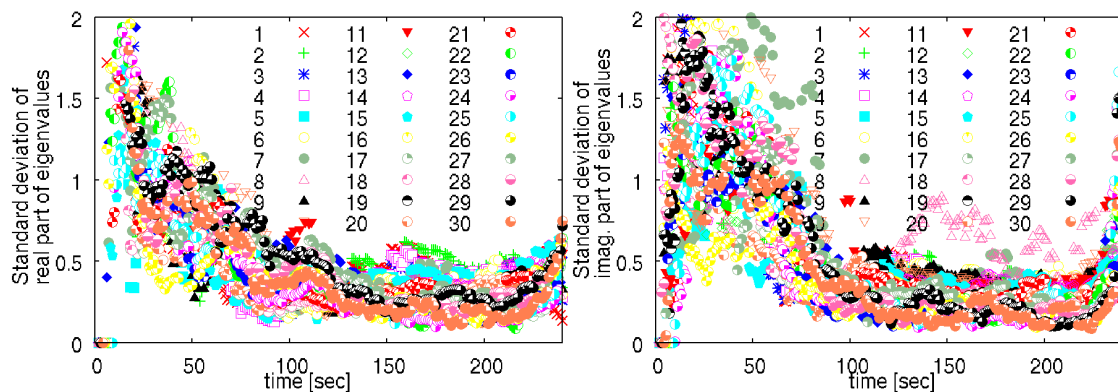


図 276 : 2次モデルから得た固有値の直近 12 秒ぶんから求めた標準偏差

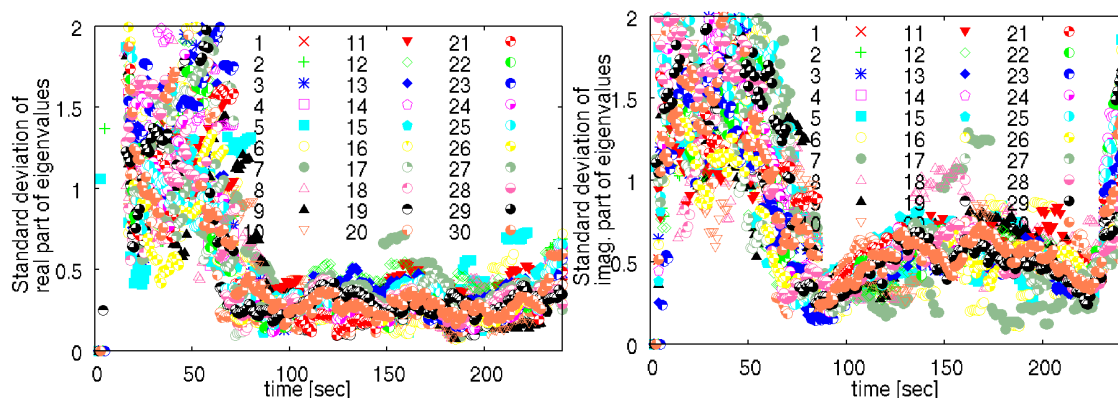


図 277 : 4次モデルから得た固有値の直近 12 秒ぶんから求めた標準偏差

4次モデルから求めた固有値虚部のばらつきが大きい 150 秒付近について、2次モデルと4次モデルから求めた固有値の虚部を拡大して、図 278 に示す。2次モデルでは、1 付近に大部分の発電機が追従しているが、4次モデルでは 1 付近に行ったり 2 付近にいたり、あわただしく動き続けている。4次モデルでは、どちらの動揺モードに追従するかがはっきりしないため、結果的に値のばらつきが大きくなり、ばらつきの値からは、動揺現象を把握できなくなっているようである。

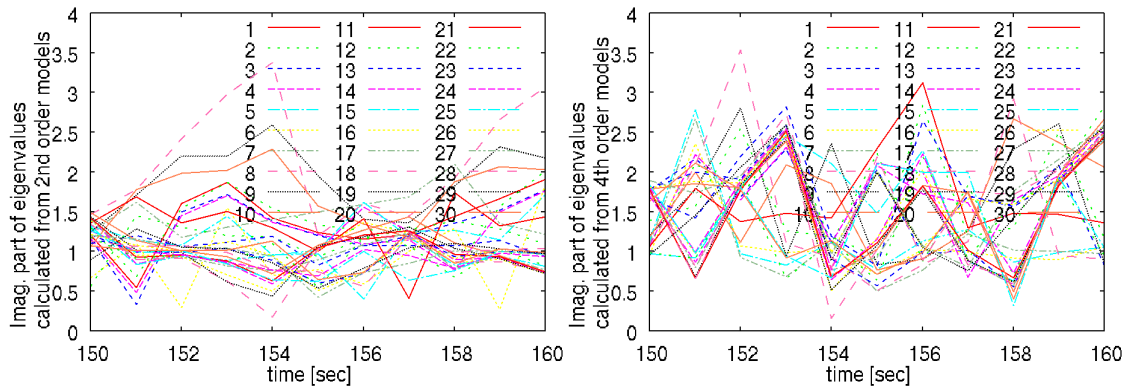


図 278 : 150 秒から 10 秒間における 2 次モデル・4 次モデルの固有値虚部

5.8.5. WEST30 機系統モデルを用いた検討のまとめ

電気学会 WEST30 機系統を用いて、低次線形モデルにおける同定と、PSS パラメータの設計について、基本的なシミュレーションを行った。その結果、以下のことが分かった。

- WEST30 機系統では、東向きの潮流を増加させると、系統全体が発電機 G1 から G10 までと、G11 から G30 までの 2 つのグループに分かれ、互いが動揺の腹となるような、動揺現象が起こりやすい。2 つのグループは、東向きの重潮流が厳しくなると、動揺現象が強くなり起こっていても、互いに脱調する場合がある。
- 低次線形モデルを用いた同定を行うと、主に固有値虚部が 1 付近となる動揺モードをとらえられる。ただし、4 次モデルでは、固有値虚部が 1 付近と 2 付近の動揺モードが同時に見えてしまい、どちらの動揺モードに固有値が追従するかが、短い間隔で入れ替わるため、動揺現象がはっきりと見られる期間であっても、同定から得られる固有値虚部の値が安定せず、動揺現象の存在を検出できない場合がある。
- 詳細な電力系統モデルから直接算出した固有値を、PSS のパラメータ設計に用いる従来手法を用いると、安定度を十分高められる PSS パラメータが得られる。ただし、広域電力系統の詳細な物理モデルは、一般には得られないものである。
- 4 次の低次線形モデルで動揺現象の存在を検出し、5 次の低次線形モデルを用いて PSS パラメータの適応制御を行った。検討した事例においては、パラメータを設計しない場合と結果がほとんど変わらず、その効果を判断できない。動揺現象の検出を判定する条件や、適応制御によりパラメータが変化する速度の設定などに、検討の余地があると考えられる。また、理想的な状況を想定した、詳細モデルから直接求めた固有値を用いたパラメータ設計でも、系統が安定化するのには 200 秒を過ぎてからであるので、初期条件が厳しすぎる可能性がある。

電気学会 WEST30 機系統を用いたシミュレーションは、計算量がたいへん多く、十分な事例数を検討することが難しい。異なる初期条件に対する検討や、オンラインパラメータ設計を行う発電機の選定など、考えるべきことは多数あるようにも思える。並列処理技術の導入や、物理的なモデルを用いたアナログシミュレーションなどを活用することで、より高速な解析ができると考えられる。

6. おわりに

6.1. 本研究のまとめ

本研究では、発電機の励磁制御装置の一種である PSS(電力系統安定化装置; Power System Stabilizer)を対象に、計測を伴うモデル同定を行い、簡素化された固有値解析法を用いて、PSS の制御パラメータを定態安定度が高まるように操作する適応制御に取り組んだ。

PSS の制御ブロックを含む低次の線形モデルを発電機ごとに置き、モデルの具体的な要素を、各発電機で計測した電気出力・回転子の速度・PSS の出力波形を用いて、逐次最小二乗法により同定した。この低次モデルを用いて固有値解析を行い、PSS のパラメータと低次モデルの安定度との関係を調べ、低次モデルの安定度が向上する方向にパラメータを操作した。低次モデルとしての安定度の変化が、実際の電力系統における安定度の変化と近ければ、電力系統の安定度を高められる。

固有値解析の結果からパラメータを実際に操作するアルゴリズムとして、既存の線形計画法に加えて、より簡便な 3 分木法についても検討した。同定を常時続けて行い、適応制御によるパラメータチューニングを反復継続して行うことで、状況が変化しても、安定度が継続して維持されることを期待した。

同定を伴う適応制御では、同定から有用な情報が得られる期間が限られるため、パラメータ設計を行うべきかを判定する手法を検討した。支配的な動揺モードが波形として観測されるとき以外は、低次モデルから算出される固有値の値が時間軸上で大きくばらつく性質を利用して、時系列上に集めた固有値の標準偏差などを、設計実施の判断基準として用いた。PSS の制御ブロックを伴う 1 台の発電機をモデル化した 5 次の線形モデルに加え、2 台の発電機に関する情報を 1 つのモデルに組み込んだ低次線形モデルについても、同定により支配的な動揺現象を把握できるかや、パラメータ設計で有用な効果を示すかについて、調べた。また、適応型 PSS を設置する場所を変えながら、有効な設置位置について調べた。

提案手法を、電気学会 WEST10 機系統モデル(一部で電気学会 WEST30 機系統モデル)に適用する計算機シミュレーションを行い、提案手法の有効性を検討した。

シミュレーション環境として、数値積分法(過渡解析法)と固有値解析法を実装したシミュレータを作成し、提案手法のアルゴリズムをシミュレータ内に追加した。適応制御のアルゴリズムからは、制御対象となる発電機の、現在の PSS パラメータと、発電機端の電気出力・発電機回転速度・PSS 出力だけを参照できるようにし、限られた情報を用いて適応制御を行う状況を再現した。負荷変動が支配的な動揺モードを誘起すると仮定して、負荷端にたえず変動を添加した。

さまざまな状況を想定して、シミュレーションを繰り返した結果、次のことが明らかになった。

- 低次の線形モデルを用いた同定では、1種類の動揺モードによる動揺現象が大きく現れているときは、固有値解析から動揺現象の性質を推定できた。PSS の制御ブロックを含む5次のモデルよりも、計測対象の物理量だけを状態変数とする2次のモデルや、2台の発電機の情報を用いる4次のモデルのほうが、支配的な動揺モードに対応する固有値を、より正確に求められる場合が多かった。
- 互いに異なる動揺周期を持つ、複数の動揺モードが同時に不安定化するとき、動揺波形が複雑な形となるため、同定を行っても支配的な固有値を正しく得られない場合が多かった。同定結果の固有値虚部において、どの動揺モードに対応する値へ向かうかに迷いが見られ、結果的に大きな動揺現象が観測されていても、固有値虚部の値が収束しない場合があった。最も不安定な固有値を安定化することを目指すと、別の固有値とのトレードオフが起こり、周期が異なる複数の固有値が、ほぼ同じ実部を持ち、共存する可能性がある。このような状況下で複数の動揺モードが同時に不安定化すると、異なる周期を持つ動揺が同時に拡大するため、同定により動揺の周期を把握しにくくなる。
- 詳細な電力系統モデルから直接算出した固有値を用いて、PSS のパラメータを操作する従来の固有値制御手法を用いると、多くの場合、システムの定態安定度が改善された。安定度が極値につかまり、十分改善しない場合も見られた。
- 同定の結果をもとにPSSのパラメータを更新すると、シミュレーション開始後しばらくの間は定態安定度が向上するが、安定化後は動揺現象が負荷変動のノイズに埋もれて観測できなくなるため、同定が不正確になり、安定度が再度低下する場合が多かった。動揺現象がはっきりと観測されないときは、同定を行い、固有値を繰り返し求めると、計算のたびに大きくばらついた値が得られた。このような状況であっても、PSSのパラメータを更新すると、パラメータが特定の方向に動き続ける傾向がある。結果として、ゲインが上がりすぎることにより、短周期の振動発散に至る場合が多かった。
- 低次モデルから算出した固有値を時系列上に集め、その標準偏差を求めると、支配的な動揺現象が把握できたかを判定できた。支配的な動揺現象を把握できていないときに、パラメータ設計を中止する操作を行った場合は、動揺現象が収束するとパラメータ設計が行われにくくなり、安定度が高い状態を長く維持できるようになっ

た。ただし、同時に複数の動揺モードが支配的になると、動揺現象が存在するにもかかわらず、正しく把握できない場合があった。

6.2. 将来への展望

本研究では、1または2機の発電機を用いて定めた、2次から10次までの線形モデルが、電力系統全体の定態安定度を表現できると仮定したが、同定に用いるモデルの形は他にも考えられうる。状況によって、考えるべきモデルの形そのものが変化する可能性もある。従って、どのようなモデルを立てれば、電力系統の性質を、より確からしく推定できるかについて、さらなる検討が求められる。

複数の動揺モードが同時に不安定となり、動揺波形が複雑になったときでも、同定やパラメータ設計を有効に行う方法を検討できるとよい。例えば、波形を周波数分析して、最も強い周期の動揺だけを取り出して同定するなどすれば、特定の動揺モードを抑えるパラメータ設計が実現する可能性もある。

本研究では主に、電気学会 WEST10 機系統モデルを対象に検討を行ったが、電気学会 WEST30 機系統など、他のモデル系統について、さらに詳細な解析を行うことで、系統構成と提案手法の特性との関係について、さらなる知見が得られると考えられる。

本研究では、計算機を用いたデジタルシミュレーションにより解析を行ったが、アナログシミュレータ等を用いることで、計測ノイズや計測・演算・制御の遅れなどもふまえた、より実際的な検討が行えると考えられる。また、アナログシミュレーションでは、複数の構成要素を同時並列にシミュレーションできるため、シミュレーションの対象となる発電機が多い場合であっても、シミュレーションの実行にかかる時間を短く抑えられると考えられる。

発表文献

- (1) 杉原俊雄・横山明彦：「適応型 PSS の複数回制御による広域電力系統の安定度向上効果」，平成 17 年電気学会全国大会(6-025)，(2005)
- (2) 杉原俊雄・横山明彦：「適応型 PSS による広域電力系統の定態安定度向上効果」，平成 17 年電気学会電力・エネルギー部門大会(180)，(2005)
- (3) 杉原俊雄・横山明彦・伊是名篤志：「定態安定度向上を目指した系統状態の変化に対応した適応型 PSS の設計手法」，平成 17 年電気学会電力技術電力系統技術合同研究会(PE-05-88)，(2005)
- (4) 杉原俊雄・横山明彦・伊是名篤志：「広域電力系統における低次線形モデルを用いた適応型 PSS 設計の一手法」，平成 18 年電気学会保護リレーシステム研究会(PPR-06-17)，(2006)
- (5) 杉原俊雄・横山明彦・伊是名篤志：「広域電力系統における低次線形モデルを用いた適応型 PSS の設置位置検討」，平成 18 年電気学会全国大会(6-003)，(2006)
- (6) 杉原俊雄・横山明彦・伊是名篤志：「広域電力系統の低次線形モデルを用いた定態安定度の継続的向上に関する研究」，平成 18 年電気学会電力技術電力系統技術合同研究会(PE-06-22)，(2006)
- (7) 杉原俊雄・横山明彦・伊是名篤志：「広域電力系統を対象とした低次線形モデルを用いた適応型 PSS に関する考察」，平成 18 年電気学会電力・エネルギー部門大会(469)，(2006)
- (8) Toshio Sugihara, Akihiko Yokoyama, Atsushi Izena:"Adaptive PSS Designed based on Low-order Linear Model for Large-scale Power System", 2006 International Conference on Power System Technology(F0843), (2006)
- (9) 杉原俊雄・横山明彦・伊是名篤志：「広域電力系統における低次線形モデルを用いた適応型 PSS のパラメータのオンライン設計法」，電気学会論文誌 B 2006 年 12 月号(pp.1215-1222)，(2006)
- (10) 杉原俊雄・横山明彦・伊是名篤志：「広域電力系統を対象とした 3 分木法を用いた適応型 PSS の選択的なオンラインチューニング方式」，電気学会論文誌 B に投稿中

参考文献

1. 吉本真呂・三谷康範・辻毅一郎・北條 昌秀・大西徳生・橋口卓平: 「同期計測技術を用いた西日本 60Hz 系統動揺特性の観測」, 平成 14 年電気学会全国大会, 6-008, (2002)
2. E.V. Larsen, D.A. Swann: “Applying Power System Stabilizers Part I: General Concepts”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 6 pp.3017-3024 (1981)
3. 太田豊・鶴飼裕之・中村光一・藤田秀紀: 「多地点同期フェーザ計測値を用いた広域電力系統の中間領域安定度評価」, 電学論 B 123 巻 2 号 p143-150, (2003)
4. 渡邊政幸・橋口卓平・三谷康範: 「動揺観測に基づく電力系統安定化制御」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料 PE-04-05, (2004)
5. 渡邊政幸・泉 貴紀・三谷康範・橋口卓平: 「広域位相計測に基づく PSS 調整のための連成振動モデルの一構成法」, 平成 17 年電気学会全国大会, 6-028, (2005)
6. 前田隆文・横山明彦・関根泰次: 「電力系統安定化のための最適動作点設定による固有値制御とそのアルゴリズム」, 電気学会論文誌 B, 107 巻 5 号 pp221-228, (1987)
7. 川元亮徳・川上仁志・西松慎也・横山明彦: 「P- ω 入力型 PSS による電力系統安定度向上効果」, 平成 12 年電気学会全国大会, 6-147, (2000)
8. 系統脱調・事故波及防止リレー技術調査専門委員会: 「系統脱調・事故波及防止リレー技術」, 電気学会技術報告第 801 号, (2000)
9. 関根泰次: 「電力系統過渡解析論」, オーム社, (1984)
10. 堀洋一・大西公平: 「応用制御工学」, 丸善株式会社, (1998)
11. 電力系統モデル標準化調査専門委員会: 「電力系統の標準モデル」, 電気学会技術報告第 754 号, (1999)
12. 「電力自由化を考える 電力自由化と電力系統」, 電力中央研究所
13. Payman Shamsollahi ほか: 「Application of Neural Adaptive Power System Stabilizer in a Multi-Machine Power System」, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.14, No. 3, (1999)
14. Tomonobu Senjyu ほか: 「Adaptive Power System Stabilizer based on Fuzzy Logic Technique with Frequency Domain Analysis」, 2000 International Conference on Power System Technology, (2000)
15. J.H.Chow ほか: 「Robust Control Design of Power System Stabilizer using Multivariable Frequency Domain Techniques」, Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control, (1990)
16. 檜山隆・原弘一: 「コンピュータネットワークを介した PSS パラメータの遠隔自己調整」, 平成 17 年電気学会全国大会, (2005)

謝辞

この論文には、さまざまな取り組みが書かれていますが、必ずしもうまくいったことばかりではありません。むしろ、思い通りにはならず、期待とは正反対の結果が得られた場合も少なくありません。「よくない結果が多いから、だめな研究だ」と結論づけることは簡単ですが、ちょっと待ってください。この論文は「課程博士」の取得を目指して書かれたものです。取り組みの過程にこそ、注目していただきたいと考えています。

うまくいく場合にも、うまくいかない場合にも、それなりの理由があります。その理由が何なのかを論理的に考え、明らかにしようと努力することが「研究」であると、私は考えます。試した結果から、うまくいった場合だけを選んで掲載すれば、まるで全てが思い通りの結果だったかのように装うこともできます。しかし、それでは「なぜそうなったか」、つまり「結果は何によって決まるのか」という本質的なことを考えることができません。さまざまな場合を試し、その結果をありのままに記述してこそ、意味のある考察につながり、新しい発見に結びつく可能性が出てくるのです。この研究では、分かったことが今すぐ社会で役に立つとは言えないかもしれませんが、取り組む姿勢や方法に間違いがあったとは考えていません。むしろ、「制御装置のパラメータを安易にいじるだけでは、電力システムの安定度はそう簡単にはよくなりません。電力システムを運営したり、拡張したりするときは、システムの構成をよく調べ、システム全体の安定度をよく考えて進めるべきだ」ということが、改めて分かってよかった、と言えるかもしれないのです。

うまくいかない結果との付き合いには、つらい面が多々ありました。学会発表を行っても、けげんそうな顔を見るばかりで質問は出ず、研究室内の打ち合わせでも、ひとりで一方的に解析事例を話すばかりで、議論らしい議論ができない状況が続きました。関わり合っても得られることがないという点でしか同意が成立しないコミュニケーションほど、むなしなものはありません。うまくいかない原因を考えながら、できる限りの努力を繰り返しましたが、その結果は厳しいものでした。論理的に手順を組み立てながら取り組むことの難しさを痛感しつつ、自信の喪失からひどく落ち込みました。

とはいえ、ときにはうまくいかないことも、よい経験であることは確かです。所属することが高い地位を象徴するような場所に入ったからといって、そのことにより人間の価値そのものが変化することはありません。他人を頼りにするばかりでは、自分自身の現状を把握できず、有意義な解決策を見いだせません。現実をまっすぐ見つめた上で、自分を高めようとする姿勢は、大きな苦難があつてこそ身に付いたと思います。そして私には、まだまだ大きな未来があり、自分自身の力で切り開ける可能性のある世界が広がっています。

これからも、地に足の着いた努力を重ね、社会の信頼が得られるように努め、充実した人生を送りたいと思います。そしていつかは、大きな苦難に対して、大きな感謝ができる日が来ると信じています。

博士課程の学校生活では、多くの方々と関わり合いました。日々の生活の中でふれ合うことで、人間として多くのことを学び、生活をより充実したものとすることができました。ここではそのうち、所属していた横山研究室に関する方々について主に記述します。横山明彦先生は、修士課程から博士課程までの6年間に渡り、学業や生活上の心配事などについて、たいへん深く長くお世話になりました。学会の会議への参加など、貴重な体験の機会を提供していただき、たいへんありがたく思っております。世界中を飛び回り、たいへんお忙しい生活を送られているようですが、どうぞお体を大切にして、健康な人生をより長く送られることを、お祈り申し上げます。島田規人様は、研究室の運営にあたりさまざまなお仕事をしてくださいました。研究室内のネットワーク管理などでは、互いにより勉強になりました。伊是名篤志様は、電力会社の立場から、私の学業について様々なご助言をくださいました。ともに学生生活を送った、安田祐治様、近藤太郎様、元木啓明様、村上明子様、倉石英明様、志岐明様、有田征史様、益田泰輔様、川沼岳明様、都留大和様、小澤学様、河島清貴様、伏木圭祐様、江連誠様、大屋慎次様、桃原千尋様、関田航様、入江寛様、久保田嘉臣様、ウォーラウト・セーコック様、スラチャイ・チャイタッサニー様、チャン・ジュン様、ブンヨン・タッサポン様、タンパティパーン・クリサナ様、パトム・アッタウィリヤヌパーブ様、グルヨス・ウドムヴォンセーリー様、スイリチョム・テイーラタナー様、北村弘明様(順不同)には、それぞれたいへんお世話になりました。執筆時点で既に社会で活躍されている方も多く、大学で過ごした時間の長さを痛感しますが、皆様とともに過ごせたことは、たいへん喜ばしいことでした。これからも、どこかでお会いする機会があるかもしれませんので、どうぞよろしくお祈り申し上げます。