Development of Control Design Scheme Using Nonlinear Analysis

—PSS Parameter Design Effective for Suppression of Oscillatory Instability—

Hiroyuki Amano Member (CRIEPI, h-amano@criepi.denken.or.jp)

Toshio Inoue Member (CRIEPI, inotoshi@criepi.denken.or.jp)

Keywords: power system, rotor angle stability, control design scheme, nonlinearity, oscillatory instability, normal form theory

Phenomena in power systems tend to exhibit higher nonlinearity, because efficient operation accompanies severer power transfer. In such cases, there might exist some limitation to the use of conventional linear control design scheme due to the nonlinearity.

As for consideration to the nonlinearity, we have developed a nonlinear analysis method based on normal form theory. In this paper, we develop a new control design scheme based on the nonlinear analysis method.

Figure 1 shows the flow chart of the developed method. The developed method is effective in a case when oscillatory instability occurs. In the developed method, the parameters of control devices are adjusted so as to enlarge the stability limit against the oscillatory instability, unless each eigenvalue exceed its allowable threshold.

Fig. 1. Flow chart of developed method

We verify the effectiveness of the new control design scheme in the IEEJ 10-machine System Model by applying to PSS (Power System Stabilizer). Figure 2 shows a time-domain simulation results for a large disturbance when we apply the linear design or the developed nonlinear design. All eigenvalues are stable in both case. However, in the linear design case, the oscillatory instability occurs due to the nonlinearity as shown in Fig. 2(a). In contrast, in the developed nonlinear design case, the oscillation can be attenuated as shown in Fig. 2(b). We examine the power transfer limit and show that it increases by a few percent.

(a) Linear design case

(b) Developed nonlinear design case

Fig. 2. Time-domain simulation results for large disturbance

非線形解析理論を用いた制御系設計手法の開発

——振動発散の抑制に有効な PSS 定数設定法——

正員 天野 博之* 正員 井上 俊雄*

Development of Control Design Scheme Using Nonlinear Analysis

——PSS Parameter Design Effective for Suppression of Oscillatory Instability——

Hiroyuki Amano*, Member, Toshio Inoue*, Member

Phenomena in power systems tend to exhibit higher nonlinearity, because efficient operation accompanies severer power transfer. In such cases, there might exist some limitation to the use of conventional linear control design scheme due to the nonlinearity. As for consideration to the nonlinearity, we have developed a nonlinear analysis method based on normal form theory. In this paper, we develop a new control design scheme based on the nonlinear analysis method.

The developed method is effective in a case when oscillatory instability occurs. In the developed method, the parameters of control devices are adjusted so as to enlarge the stability limit against the oscillatory instability, unless each eigenvalue exceed its allowable threshold. We verify the effectiveness of the developed method in the IEEJ 10-machine System Model by applying to PSS (Power System Stabilizer). We show that the power transfer limit increases by a few percent.

キーワード：電力系統，同期安定度，制御系設計，非線形性，振動発散，標準形理論

Keywords: power system, rotor angle stability, control design scheme, nonlinearity, oscillatory instability, normal form theory

1. はじめに

電力系統は様々な非線形特性を有するが，従来の同期安定度の向上を目的とした制御系の設計では，線形解析が多く用いられてきた。これに関し著者らは，同期安定度における振動発散現象に対して非線形性を考慮できる安定性解析手法を開発してきた⁽¹⁾⁽²⁾。この手法を制御系の設計に適用することができれば，振動発散に対する安定性を更に向上できる可能性があり，限界送電電力の増加につながると考えられる。

本論文では，既開発の安定性解析手法を基に振動発散の抑制に有効な制御系設計手法を開発し，モデル系統において PSS (Power System Stabilizer) の定数設定に適用し，その有効性を検証した結果について述べる。

今後の電力系統では，コスト低減のための既存設備の最大限の活用，自由化の進展等により，更に重潮流化が進むことが予想され，PSS による系統の安定化は益々重要となると考えられる。このため新しい PSS の方式として，無効電

力や位相角偏差などを入力信号に加える方式⁽³⁾⁽⁴⁾や遠端情報を入力する方式⁽⁵⁾などが開発され，PSS の設計手法（制御定数の設定方法）についても固有値感度を用いた方法⁽⁶⁾や遺伝的アルゴリズムを用いた方法⁽⁶⁾など多くの方法が開発されている。

しかし，そのほとんどは線形解析（固有値解析やボード線図）をベースとした設計手法であるため，小外乱に対する減衰率（ダンピング）に関しては適切な設計を行うことが可能であるが，非線形性が影響する大外乱に対しての安定性に関しては，必ずしも望ましい特性が得られるとは限らない。したがって，最終的にはシミュレーション解析による非線形性の影響の確認が必要であり⁽⁷⁾，場合によっては試行錯誤的な定数の調整が必要となる。

これに対して本研究で開発した設計手法は，系統の非線形性を解析的に直接考慮するという新たなアプローチで大外乱に対する安定性の向上を図るものであり，線形解析によって得られた設計定数をスタートとして定数を更に調整するものである。すなわち，線形解析に基づいた設計における最終的なステップ（非線形性の影響の確認，場合によっては必要となる定数の調整）の負担軽減，および，非線形性を考慮した更なる安定性の向上を目指したものである。

開発した手法は非線形性によって振動発散が生じる場合

* (財) 電力中央研究所
〒201-8511 狛江市岩戸北 2-11-1
Central Research Institute of Electric Power Industry
2-11-1, Iwadokita Komae 201-8511

に有効であり、大外乱に対する振動の安定性を評価する指標を用いて、これが向上するように定数の調整を行うことによって、限界送電電力の増加を図る。但し、小外乱を対象に最適化を行う固有値解析に基づく手法と比較すると、開発手法では小外乱に対しての最適性は失われることになる。したがって、小外乱に対するダンピングを許容範囲内に留めつつ、定数の調整を行うことを前提としている。

本論文の構成は以下のとおりである。2章では開発した非線形性を考慮した制御系設計手法について説明し、3章では電気学会標準システムモデル⁽⁸⁾において開発手法の有効性を検証する。最後に4章で得られた結果についてまとめる。

2. 非線形性を考慮した制御系設計手法の開発

既開発の非線形性を考慮した安定性解析手法を基に、非線形性を考慮して制御系定数の調整を行う新たな手法を開発した。本章では、開発した制御系設計手法について述べる。

〈2・1〉 非線形性による振動発散 電力系統は、いわゆる $P-\delta$ カーブや制御系のリミッタ等の種々の非線形性を持ち、次数で言えば低次から高次までの非線形性を持つ。すなわち、系統の運転点で系統の動特性を表す微分方程式をテイラー展開すると、線形項に加えて高次の項（非線形性）までを含むことになる。

ここで、系統の非線形性が動揺の減衰率に及ぼす影響について、外乱の大きさ（動揺の大きさ）と減衰率の関係をイメージした図1を用いて説明する⁽¹⁾⁽²⁾。線形解析である固有値解析によって得られる固有値の実部は、線形領域での減衰率、すなわち小外乱に対する動揺の減衰率に対応する。一方、外乱が大きくなり非線形性の影響が増大すると、減衰率は固有値とは異なった値となる（動揺周波数についても同様である）。したがって図1の実線のような特性を持つ場合には、小外乱に対しては安定であったとしても、外乱が大きくなるにつれて減衰率が悪化し、外乱が安定限界となる振幅（critical amplitude）を越えると動揺が発散してしまう。開発手法が有効となるのは、このような系統の非線形性による振動発散が生じて安定領域が制限される場合である。

時間領域での非線形性による振動発散の波形のイメージを図2に示す。小外乱に対しては点線のように安定であるが、外乱が大きくなると実線のように動揺が発散する場合である。ここで、安定な場合と不安定な場合の境界に対応する安定限界の場合（振幅が critical amplitude となる場合）には、一点鎖線のように動揺は減衰も発散もせず周期的に繰り返され周期軌道となる。

一機無限大母線系統では、非線形性による振動発散が生ずるのは稀であると考えられるが、多機系統では広域モード間の相互作用などの非線形性によって振動発散が生ずる可能性がある^{(2)(9)(10)†}。前述したように電力系統には種々の

図1 減衰率への非線形性の影響

Fig. 1. Effect of nonlinearity on damping.

図2 非線形性による振動発散

Fig. 2. Oscillatory instability due to nonlinearity.

次数の非線形性があるが、多機系統での広域モード間の相互作用による振動発散においては、比較的 low order (2次あるいは3次) の非線形性の影響が大きく^{††}、これら比較的 low order の項のみを考慮することによって、基本的な特性を解析できることが知られている⁽²⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

〈2・2〉 既開発の非線形性を考慮した安定性解析手法

既開発の安定性解析手法は、標準形理論（normal form theory）⁽¹²⁾⁽¹³⁾ と呼ばれる非線形解析理論を応用したものである⁽¹⁾⁽²⁾。本節では、この手法に関して簡単に説明する。

非線形性による振動発散が生じる場合を考える。固有ベクトルを利用して安定限界の場合に対応する周期軌道の一周期分の波形（図3）を各動揺モードに分解する⁽¹⁾と、図4のようになる。図4のように、動揺モードの中には、振動発散に大きく関与する（振幅が大きい）モードとほとんど関与しない（振幅が小さい）モードがある^{†††}。また、いずれのモードについても、動揺周波数は周期軌道の基本周波数の n 倍（ n は整数）となる。なお、各モードの固有値虚部（振幅が小さい場合の周波数）は整数比ではなくても、周期軌道においては非線形性の影響により各モードの周波数は整数比となる（同期する）。逆に言えば、周期軌道における各モードの振幅および位相は、減衰率が零かつ周波数が整数比となるという条件によって定まる^{††††}。

既開発の安定性解析手法は、この条件を基に周期軌道を求める手法である。具体的には、振動発散に大きく関与する各動揺モードに関して、周期軌道における振幅（critical

† 後述する電気学会標準システムモデルでは非線形性による振動発散が生じる場合が少なくない。

†† なお、過渡第一波に関しては、より高次の非線形性の影響が大きいと考えられる。

††† 多機系では振動発散に関与するモードは複数存在することが多い。

†††† 図1に関して、動揺モード間の相互作用が強い場合は、正確に言うと減衰率は動揺の振幅だけでなく位相にも依存する⁽²⁾。

図3 周期軌道における内部相差角の例

Fig. 3. Example of rotor angle on periodic orbit.

図4 周期軌道における各動揺モードの例

Fig. 4. Example of oscillation mode on periodic orbit.

amplitude に対応) と位相の近似値を求めることができる。

なお、既開発の安定性解析手法において考慮する非線形性は3次までであるため、4次以上の非線形性あるいは制御系のリミッタの影響は考慮できない。

〈2・3〉 非線形性を考慮した制御系設計手法 既開発の非線形性を考慮した安定性解析手法を基に、非線形性を考慮して振動発散に関する安定性を高める新しい制御系設計手法を開発した。

〈2・3・1〉 開発手法の概要 開発手法の基本的な考え方は、以下の2つである(図5)。

- 限界送電電力の増加を目的に、大外乱に対する安定性が向上するような設計を行う。具体的には、安定限界の場合に対応する周期軌道の振幅(critical amplitude)は振動発散に関する安定領域の広さに概ね対応すると考えられることから、これを大きくすることによって大外乱に対する安定性の向上を図る。
- 小外乱を対象に最適化を行う固有値解析に基づく手法と比較すると、小外乱に対する減衰率(固有値実部)の最適性が失われるため、これを許容範囲内に留める。

開発した制御系設計手法のフロー図を図6に示す。開発手法では、固有値解析を用いて調整した制御系定数をスタートとし、安定領域の大きさを評価する指標 E を用いて、これが大きくなる方向に定数を調整する。但し、固有値実部(小外乱に対する減衰率に相当)に対しては、適切なしきい値を定め、これを越えない範囲内で定数の調整を行う。最終的には、制御定数および指標の変化幅が小さくなった時

図5 開発手法の基本的な考え方

Fig. 5. Basic concept of developed method.

図6 開発手法のフロー図

Fig. 6. Flow chart of developed method.

点、あるいは、既開発の安定性解析手法によって周期軌道が算出できなくなった(安定領域が十分広くなったと判定された)時点で定数の調整を終了し、指標が最大となる定数を採用することとする。

なお、開発手法は既開発の安定性解析手法を基にしているため、4次以上の非線形性あるいは制御系のリミッタの影響は考慮できない。

以下では、特に安定領域の大きさを評価する指標 E 、およびその感度を基にした定数調整について説明する。

〈2・3・2〉 安定限界エネルギーの導入 既開発の非線形性を考慮した安定性解析手法によって、安定限界に対応する周期軌道(周期軌道における各モードの振幅と位相)が得られる。しかし、振動発散に関する安定領域を考慮して制御系の設計を行うにあたっては、何らかの形でこれらの各モードの振幅と位相を一つの指標にまとめる必要がある。

そこで、以下に説明する振動発散に関する安定限界エネルギーという概念を導入し、これを振動発散に関する安定領域の大きさを評価する指標 E として用いることとした。

まず、既開発の安定性解析手法によって得られる周期軌

道における各モードの振幅 R_i と位相 Θ_i を用いて、周期軌道を表現すると次のようになる。

$$x(t) = \sum_{i \leq N} a_i R_i \exp[j(n_i \Omega t + \Theta_i)] \dots \dots \dots (1)$$

なお、 $x(t)$ は状態変数、 N はモードの総数、 a_i はモード i の固有ベクトル、 Ω は周期軌道の基本周波数 ($2\pi/\text{周期}$)、 n_i はモード i の周波数の Ω に対する比 (整数) である。また、振動発散に関与しないモードに関しては、振幅 R_i は零である。

(1) 式は、 $n_i = k$ ($k = 1, 2, 3$) であるモードの集合を N_k と表すと次のように書ける。なお、既開発の安定性解析手法では 3 次までの非線形性を考慮していることに対応して 3 倍周波数まで考慮する。

$$\begin{aligned} x(t) &= \left(\sum_{i \in N_1} a_i R_i \exp(j\Theta_i) \right) \exp(j\Omega t) \\ &+ \left(\sum_{i \in N_2} a_i R_i \exp(j\Theta_i) \right) \exp(j2\Omega t) \\ &+ \left(\sum_{i \in N_3} a_i R_i \exp(j\Theta_i) \right) \exp(j3\Omega t) \\ &= A_1 \exp(j\Omega t) + A_2 \exp(j2\Omega t) + A_3 \exp(j3\Omega t) \\ &\dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

これは、周期軌道を基本周波数、2 倍周波数、3 倍周波数の各成分で表現したことに対応する。

ここで周期軌道全体に対応するエネルギーを各周波数成分のエネルギーの和として捉えることとし、各周波数成分のエネルギーを以下のように定義する。

まず、それぞれの n 倍周波数成分について、

$$\begin{aligned} x_n(t) &= A_n \exp(jn\Omega t) \\ &= (\text{Re}[A_n] + j \text{Im}[A_n]) \{ \cos(n\Omega t) + j \sin(n\Omega t) \} \\ &\dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

と表現し、次式の運動エネルギー $E_n^{\text{kinetic}}(t)$

$$E_n^{\text{kinetic}}(t) = \sum_{j \leq M} \frac{1}{2} m_j (\Delta \omega_j^{\text{COA}}(t))^2 \dots \dots \dots (4)$$

に着目する。ここで、 M は発電機総数、 m_j は発電機 j の慣性、 $\Delta \omega_j^{\text{COA}}(t)$ は慣性中心を基準とした発電機 j の角速度偏差である。なお、(3) 式より $\Delta \omega_j^{\text{COA}}(t)$ は三角関数を用いて表現可能である。

この運動エネルギー $E_n^{\text{kinetic}}(t)$ が周期軌道においてとり得る最大値を、各 n 倍周波数成分のエネルギー E_n と見なすこととする[†]。 $E_n^{\text{kinetic}}(t)$ は三角関数の合成で表現されるため、容易に最大値を計算できる。すなわち、各 n 倍周波数成分のエネルギー E_n は次式のように定義される。

[†] 厳密にはポテンシャルエネルギー等も関係すると考えられる⁽¹¹⁾ が、簡単には表現できないため、運動エネルギーのみを考慮することとした。

$$E_n = \max_t E_n^{\text{kinetic}}(t) \dots \dots \dots (5)$$

最終的に、周期軌道全体に対応するエネルギーを、次式のように各周波数成分のエネルギー E_n の和で定義し、振動発散に関する安定限界エネルギー E と呼ぶことにする。

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \dots \dots \dots (6)$$

このように定義した振動発散に関する安定限界エネルギー E を大きくすることによって、振動発散に関する安定領域が拡大され、大外乱に対する安定性が向上すると考えられる。

〈2・3・3〉 制御系定数の変化に対する感度の利用 振動発散に関する安定限界エネルギー E を大きくするように制御系定数 $P^{\dagger\dagger}$ を調整するため、 P の変化に対する E の感度 $\partial E / \partial P$ を利用して次式のように定数の調整を行うこととした。

$$P^{(k+1)} = P^{(k)} + \alpha \left. \frac{\partial E}{\partial P} \right|_{P=P^{(k)}} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $P^{(k)}$ は k 回目の調整ステップでの定数である。

なお、定数調整の度に $\partial E / \partial P$ を厳密に計算すると、計算量が多大となるという問題がある。そこで以下のように近似的な感度を算出して E が大きくなる方向に少しずつ定数を調整することとした。

- 2 次と 3 次の非線形項については計算量が多大となることから、これらについては一定であると見なして近似的な感度を計算する。
- α は 0.01 ~ 0.10 程度、定数の最大変化幅は 0.01 ~ 0.02 程度とし、少しずつ定数を調整する。
- 上記のように定数を調整しても E が低下するような場合^{†††}は、反対方向に定数を調整する。

3. 開発した制御系設計手法の有効性の検証

本章では、電気学会標準系統モデルにおいて開発手法を PSS の定数設定に適用し、シミュレーション解析 (time-domain simulation) 等から線形解析を用いた設計との比較を行い、開発手法の有効性を検証する。

なお、前章で述べたように開発手法では制御系リミッタの影響は考慮できないが、シミュレーション解析はリミッタを考慮して行い、その影響を含めて開発手法の有効性を検証する。

〈3・1〉 電気学会標準系統モデル 解析の対象とした系統モデルは、わが国の西地域、東地域の電力系統を模擬した WEST10 機系統モデルと EAST10 機系統モデルである。これらのモデルでは、実系統の系統構成を模擬し、実系統と同程度の長周期動揺が発生するようになっている。以下では、本モデルの概要およびオリジナルのモデルからの変更点について述べる。潮流条件、インピーダンスマップなどの詳細については文献(8)を参照されたい。

^{††} 複数の制御系定数をまとめてベクトル表記したものを P とする。
^{†††} 感度 $\partial E / \partial P$ を近似的に計算しているため、厳密な感度との差が大きい場合には (7) 式に従って定数を調整しても E が低下する場合がある。

〈3・1・1〉潮流条件 本研究では昼間断面を対象とした。限界送電電力を求める際は、発電機の出力を変更した。

〈3・1・2〉発電機モデル 発電機は d, q 軸に各 1 個の制動回路を考慮したモデルである。

〈3・1・3〉励磁系モデル AVR は基本的には回転形励磁機用モデルである。但し、開発した制御系設計手法を適用する発電機については、図 7 の ΔP 形 PSS 付サイリスタ励磁系モデルに変更した。

PSS の定数に関しては、リセット回路時定数は長周期動揺に対しても効果を期待できるよう 5.0 秒とし、最終段の一次遅れ時定数は 0.02 秒とし、他については調整対象とした。

なお、AVR、PSS のリミッタは同期安定度（特に過渡第一波）に大きく影響するため、シミュレーション解析においてはこれらのリミッタを考慮した（PSS の出力リミッタは ± 0.10 pu とした[†]）。

〈3・1・4〉调速機系モデル 调速機系は火力・原子力機用と水力機用のモデルが使用されている。なお、调速機系のリミッタは同期安定度にあまり影響しないため、簡単のため無視することとした。

〈3・1・5〉負荷特性 簡単のため、負荷は定インピーダンスとし、周波数特性はなしとした。

〈3・2〉開発手法の有効性の検証 下記の発電機について、開発手法を用いて PSS 定数の調整を行った。

図 7 ΔP 形 PSS 付サイリスタ励磁系モデル

Fig. 7. Thyristor-type exciter model equipped with ΔP type PSS.

• WEST10 機系統モデル：G1, G10（それぞれに PSS を設置した場合を検討）

• EAST10 機系統モデル：G10

調整の対象とした PSS 定数は、2 段の進み遅れ時定数 T_2, T_3, T_4, T_5 とゲイン G_8 である（図 7）。なお、ゲイン G_8 に関しては、ゲインが上がり過ぎないように^{††}調整の上限を 1.0 とした。

以下では、WEST10 機系統（図 8）の G1 に PSS を設置して開発手法を適用した場合を例にとり、具体的に説明する。

〈3・2・1〉固有値を用いた設計 まず、固有値を用いて定数を調整した結果、下記の定数が得られた（図 9）。

$$\frac{5s}{1+5s} \cdot \frac{1+0.5163s}{1+0.3696s} \cdot \frac{1+0.0580s}{1+0.3665s} \cdot \frac{1.000}{1+0.02s}$$

ここでは、次式の指標 F ⁽⁵⁾ が小さくなるように定数の調整を行った。

$$F = \sum_i \exp(k_f \cdot \text{Re}[\lambda_i]), \quad k_f = 10 \dots \dots \dots (8)$$

考慮する固有値については、減衰比 $(-\text{Re}[\lambda_i]/|\lambda_i|)$ が 0.2 程度以下のものを選んだ。なお、本研究では QR 法によって全ての固有値を算出した。また、定数の初期値は $T_2 = T_4 = 0.2, T_3 = T_5 = 0.8, G_8 = 0.5$ とした^{†††}。

図 9 線形解析を用いた設計過程での PSS 定数および指標 F の変化

Fig. 9. Variation of PSS parameters and index F through linear design.

図 8 電気学会 WEST10 機系統モデル

Fig. 8. IEEE West 10-machine system model.

[†] リミッタを ± 0.05 pu とした場合の影響を〈3・2・6〉項で検討している。

^{††} 一般的に、ゲインを上げ過ぎると PSS のリミッタに張りつき易い状況となり、好ましい結果が得られないことが多い。

^{†††} 折れ点周波数を約 0.2 Hz と約 0.8 Hz に設定したことに相当する。

(a) Variation of PSS parameters.

(b) Variation of indexes F and E .

図 10 非線形解析を用いた設計過程での PSS 定数および指標 F , E の変化

Fig. 10. Variation of PSS parameters and indexes F and E through developed nonlinear design.

なお、実際に固有値解析に基づいて設計を行う場合には、最終的にシミュレーション解析を行いながら必要に応じて定数を更に調整することになる。しかし本論文では、開発手法により非線形性を考慮して更に調整を行った場合、どの程度の効果があるのかを調べるという観点から、固有値解析により直接得られた定数との比較を行う。

〈3・2・2〉開発手法による設計 次に、固有値を用いて設定した定数をスタートとして、開発手法によって振動発散に関する安定限界エネルギー E が大きくなるように定数の調整を行った結果を図 10 に示す。

固有値実部の許容範囲に関しては、固有値を用いて設計した場合での最も減衰の悪い固有値の実部が約 -0.09 であったため、ここでは -0.05 以下とした。33 回目の調整において既開発の安定性解析手法により周期軌道が算出できなくなった（安定領域が十分広くなったと判定された）ため、安定限界エネルギー E が最大となった 30 回目の下記の定数を採用した。

$$\frac{5s}{1+5s} \cdot \frac{1+0.9309s}{1+0.4698s} \cdot \frac{1+0.0000s}{1+0.4692s} \cdot \frac{1.000}{1+0.02s}$$

時折（1, 15, 32 回目）安定限界エネルギー E が減少している箇所がある[†]が、基本的に安定限界エネルギー E が大きくなるように定数が調整されており、前述の〈2・3・3〉項で示した定数調整法は有効であると考えられる。

[†] 〈2・3・3〉項で述べた、厳密な感度 $\partial E / \partial P$ と近似的に求めた感度との差が大きい場合に対応すると考えられる。

図 11 固有値の変化

Fig. 11. Variation of eigenvalues.

なお、固有値に関する指標 F は若干悪化している（値が大きくなっている）が、いずれの固有値についても実部がしきい値 -0.05 を越えることはなかった。参考として、開発手法による定数調整の前後での固有値（減衰比 0.2 程度以上）の動きを図 11 に示す。

〈3・2・3〉小外乱に対する安定性 固有値に関する指標 F が若干悪化することに留意して、小外乱に対する安定性の確認を行った。ここでは、小外乱として発電機至近端の 10 msec の三相地絡故障（但し、故障除去後は元の系統に戻す）を想定した。小外乱に対して、固有値を用いて設計した場合と開発手法を用いて設計した場合のシミュレーション結果を図 12 に示す。なお、位相角の基準は G10 としている。

指標 F の悪化に対応して、小外乱に対する安定性は若干低下する（図 11 に対応して、特に G1 に関する約 1.3 Hz のローカルモードの安定性が低下する）が、許容できる範囲にあると考えられる。

〈3・2・4〉安定限界となる振幅 開発手法を適用する前後での安定限界となる波形（周期軌道）を繰り返し計算によって求めた。具体的には、動揺の振幅（外乱の大きさに相当）を変えてゆき、周期軌道となるような波形を求めた。その結果を図 13 に示す。

図 13 より、開発手法によって周期軌道の振幅（Critical Amplitude）が大きくなっており^{††}、図 5 に示したような設計が実現できていることが確認できる。

〈3・2・5〉大外乱に対する安定性 開発手法の適用による大外乱に対する安定性の向上効果を調べた。ここでは、発電機至近端での 70 msec の三相地絡故障（但し、故障除去後は元の系統に戻す）を想定し、G1 の発電機出力を 0.05 pu

^{††} 与えた外乱に関しては、開発手法の場合の方が大きい。

図 12 小外乱に対するシミュレーション結果

Fig. 12. Time-domain simulation results for small disturbance.

図 13 安定限界となる振幅の変化

Fig. 13. Variation of critical amplitude.

ずつ増加して潮流条件を変更し[†], 限界送電電力を調べた。但し, 便宜上, 位相角基準の発電機 G10 からの位相角の絶対値が, シミュレーション開始後 30 秒までに 360 度を超過した場合を不安定と判定し, それ以外は安定と判定することとした。また, 限界送電電力は, 前述の判定基準で不安定と判定されたケースの直前での G1 の発電機出力とすることとした。その結果,

- 固有値を用いて設計した場合: 12.35 pu
- 開発手法を用いて設計した場合: 12.60 pu

となり, 限界送電電力は約 2% 増加した。

参考として, 固有値を用いて設計した場合に最初に不安定となる G1 の発電機出力 12.40 pu の潮流条件でのシミュ

レーション結果を図 14 に示す。

また, WEST10 機系統の G10, および EAST10 機系統の G10 に PSS を設置した場合に対して, 同様に開発手法を適用して限界送電電力を調べると, それぞれ約 2%, 約 8% の増加効果が見られた。

〈3・2・6〉 制御系リミッタの影響 制御系リミッタの影響を見るため, PSS のリミッタを ± 0.10 pu から ± 0.05 pu に変更して検討を行った。

固有値を用いた設計および開発手法による設計では, 制御系リミッタの影響は考慮できない^{††}ため, 設計定数は同じ値となる。また, 小外乱に対しても制御系リミッタは影響しないため同じ結果となる。

安定限界に対応する周期軌道の振幅に関しては, PSS のリ

[†] このとき, スイング発電機とした G10 の発電機出力は 0.05 pu ずつ減少する。また, 正確に言う, オリジナルの潮流条件 (G1 の出力は 13.50 pu) では不安定であるため, G1 出力は 12.00 pu から徐々に増加した。

^{††} 固有値解析では線形項のみを考慮し, 開発手法では 3 次までの非線形性のみを考慮するため, 4 次以上の非線形性が影響するリミッタは両者とも考慮できない。

図 14 大外乱に対するシミュレーション結果
Fig. 14. Time-domain simulation results for large disturbance.

図 15 リミッタが周期軌道に与える影響（開発手法による設計の場合）
Fig. 15. Effect of limiter on periodic orbit in developed nonlinear design.

ミッタの値を変更すると若干小さくなった。開発手法を用いて設計した場合の周期軌道の変化の様子を図 15 に示す。

また、限界送電電力に関しても

- 固有値を用いて設計した場合：12.20 pu
- 開発手法を用いて設計した場合：12.40 pu

のように若干小さくなり、開発手法による増加効果も同様に減少した。

したがって、制御系リミッタの影響が大きくなるにつれて周期軌道の振幅および限界送電電力は減少し、開発手法による増加効果も減少する傾向にあると考えられる。

4. おわりに

本研究では、既開発の非線形性を考慮した安定性解析手法を基に、振動発散の抑制に有効な制御系設計手法を開発した。また、その有効性の検証のため、電気学会標準システムモデルにおいて開発した手法を PSS の定数設定に適用した。

その結果、開発手法を用いることにより、小外乱に対する安定性だけでなく、非線形性の影響まで考慮した定数設定を行うことができるため、線形解析により得られた設計と比較して限界送電電力の向上が期待できることを示した。

なお、開発した制御系設計手法の適用対象は PSS に限らず、従来、固有値解析を用いて安定性の向上が図られている SVC などの他の制御系に関しても同様に適用可能と考えられる。

但し、既開発の安定性解析手法および今回開発した制御系設計手法はプロトタイプであり、実システムへの適用には計算量の面においては課題がある[†]。今後、計算の簡略化等による計算量の軽減を図ることが必要である。

（平成 18 年 9 月 25 日受付，平成 19 年 1 月 16 日再受付）

[†] 概略，系の次数の 3 乗に比例して計算量が増大すると考えられる。

文 献

- (1) H. Amano, T. Kumano, T. Inoue, and H. Taniguchi: "Proposal of Nonlinear Stability Indices of Power Swing Oscillation in Multi-machine Power System", *IEEJ Trans. PE*, Vol.124, No.2, pp.215–221 (2004-2) (in Japanese)
天野博之・熊野照久・井上俊雄・谷口治人:「多機系統における非線形を考慮した動揺安定性指標の提案」, 電学論 B, **124**, 2, pp.215–221 (2004-2)
- (2) H. Amano, T. Kumano, and T. Inoue: "Application of Nonlinear Stability Indices of Power Swing Oscillation to Analysis of Autoparametric Resonance in Longitudinal Power Systems", *IEEJ Trans. PE*, Vol.125, No.7, pp.663–670 (2005-7) (in Japanese)
天野博之・熊野照久・井上俊雄:「多機くし形系統における内部共振の解析への非線形動揺安定性指標の適用」, 電学論 B, **125**, 7, pp.663–670 (2005-7)
- (3) Y. Kitauchi, H. Taniguchi, T. Shirasaki, Y. Ichikawa, M. Amano, and M. Banjo: "Setting Scheme and Experimental Verification of Multi-Input PSS Parameters for Damping Low Frequency Power Swing in Multi-machine Power System", *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.1, pp.137–144 (2002-1) (in Japanese)
北内義弘・谷口治人・白崎 隆・市川嘉則・天野雅彦・萬城 実:「多機系統における長周期動揺抑制用多入力 PSS の定数設定法とその実験的検証」, 電学論 B, **122**, 1, pp.137–144 (2002-1)
- (4) Y. Sudou, A. Takeuchi, M. Kawasaki, Y. Mitani, M. Andou, K. Hirayama, Y. Uemura, N. Fukushima, and T. Sogabe: "Development of a Parallel PSS for Long Term Power Oscillation Damping", *T. IEE Japan*, Vol.119-B, No.12, pp.1493–1501 (1999-12) (in Japanese)
須藤義也・竹内 昭・川崎 守・三谷嘉伸・安藤幹人・平山開一朗・上村洋一・福島宣夫・曽我部敏明:「系統モード抑制用並列型 PSS の開発」, 電学論 B, **119**, 12, pp.1493–1501 (1999-12)
- (5) K. Yoshimura, N. Uchida, and T. Okada: "Development of Optimizing Method for Generator Excitation System Parameters Considering Overall Stability of Multi-machine Power System", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.2, pp.201–209 (2001-2) (in Japanese)
吉村健司・内田直之・岡田俊之:「多機系統の安定度を総合的に考慮した発電機励磁制御系定数最適化手法の開発」, 電学論 B, **121**, 2, pp.201–209 (2001-2)
- (6) H. Okamoto and Y. Tada: "A Method for Automatic Tuning of PSS under Restriction of Robustness", *T. IEE Japan*, Vol.119-B, No.12, pp.1502–1509 (1999-12) (in Japanese)
岡本 浩・多田泰之:「ロバスト安定性を考慮した PSS の自動設定に関する一検討」, 電学論 B, **119**, 12, pp.1502–1509 (1999-12)
- (7) P. Kunder, M. Klein, G.J. Rogers, and M.S. Zywno: "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability", *IEEE Power Syst.*, Vol.4, No.2, pp.614–626 (1989-5)
- (8) 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, No.754 (1999-11)
- (9) N. Yorino, Y. Nagashima, T. Kubota, H. Mori, and Y. Tamura: "On Parametric Resonance in Power Systems", *T. IEE Japan*, Vol.105-B, No.10, pp.805–811 (1985-10) (in Japanese)
餘利野直人・長島義明・久保田徹・森 啓之・田村康男:「電力系統におけるパラメータ共振について」, 電学論 B, **105**, 10, pp.805–811 (1985-10)
- (10) N. Kakimoto: "Instability of Low-Frequency Oscillation in Longitudinal Power System due to Autoparametric Resonance", *T. IEE Japan*, Vol.115, No.3, pp.219–226 (1995-3) (in Japanese)
垣本直人:「長距離くし形系統の内部共振による長周期動揺の不安定性」, 電学論 B, **115**, 3, pp.219–226 (1995-3)
- (11) T. Tsuji, R. Hara, and T. Oyama: "A Calculation Method of the Multi Swing Instability Region using Energy Function and Hopf Bifurcation Theory", The Papers of Joint Technical Meeting on PE and PSE, IEE Japan, PE-05-8, PSE-05015 (2005-9) (in Japanese)
辻 隆男・原 亮一・大山 力:「エネルギー関数とホップ分岐理論を用いた第 n 波不安定領域算定のための一手法」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究, PE-05-8, PSE-05-15 (2005-9)
- (12) J. Guckenheimer and P. Holmes: *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems and Bifurcations of Vector Fields*, Springer-Verlag, New York (1983)
- (13) S. Wiggins: *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*, Springer-Verlag, New York (1990)

天 野 博 之 (正員) 1973 年 6 月 8 日生。1996 年 3 月京都大学工学部電気工学科卒業。1998 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月 (財)電力中央研究所入所, 現在に至る。主に, 電力系統における非線形動特性解析, 周波数制御に関する研究に従事。2003 年電気学会論文賞受賞。

井 上 俊 雄 (正員) 1958 年 2 月 15 日生。1982 年 3 月早稲田大学工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月 (財)電力中央研究所入所。2006 年 7 月より電力システム領域リーダー。主として, 需給制御, 電圧・無効電力制御に関する研究に従事。1996, 2003 年年電気学会論文賞受賞。1988 年～1989 年, 米国テキサス州立大学アーリントン校客員研究員。IEEE 会員。