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

正員 吉村 健司 (電力中央研究所)
正員 内田 直之 (電力中央研究所)
正員 岡田 俊之 (電力計算センター)

Development of Optimizing Method for Generator Excitation System Parameters Considering Overall Stability of Multi-machine Power System

Kenji Yoshimura, Member, Naoyuki Uchida, Member (CRIEPI)
Toshiyuki Okada, Member (Denryoku Computing Center)

We have developed new design methods for generator's excitation controller. The methods can improve damping and synchronizing torque to rise power transfer capability. The power transfer capability is evaluated in a one-machine connected infinite bus system and a multi-machine power system model.

- (1) Development of a new optimization method for parameters of AVR and PSS: The method can improve both of damping power and synchronizing power based on eigenvalue sensitivity technique. Applying this method to 18-generator system model, the power transfer capability increases by 7% larger than a conventional method.
- (2) Development of a new excitation system with a remote bus voltage as AVR input signal: Increasing of stabilized generator capacity, the power transfer capability expands much higher however its effect is saturated due to bus voltage instability. Introducing a remote signal of the bus voltage into the generator's exciter in addition to a conventional terminal voltage, the power transfer capability grows up to 63%.
- (3) Comprehensive controller design scheme for practical use is proposed to enhance both of steady state stability and transient stability.

キーワード：励磁制御系，最適化，固有値，安定度，遠端情報

1. まえがき

近年，電力需要の伸びは次第に鈍化しつつあるものの依然堅実な増加を続けており，21世紀中葉までに現在の1.5倍程度まで増加するとの見通しもある⁽¹⁾。また，電力自由化の進展などにより一層不確定な要因が拡大しつつある。このような条件下において，電力系統には柔軟・ロバスト性が求められ，より一層安定な系統運用が重要となる。定態安定度の面からは，発電機単体に起因する1秒周期程度の短周期動揺現象（以下，ローカルモード）だけでなく，系統の広域に影響するダンピングの悪い3秒周期程度の長周期動揺現象（以下，広域モード）が発生することが懸念される。また，送電電力の重潮流化による発電機内部相角度の拡大や，中間母線電圧の維持能力低下により過渡安定度が悪化することも懸念される。

大規模電力系統の定態安定度向上方策については筆者らは既にダンピング力に主眼をおいて，発電機PSSやSVCの効果について長距離串形系統モデルを用いて検討すると

もに⁽²⁾⁻⁽⁴⁾，さらに複数の系統運用条件の断面を同時に考慮したロバスト性の高い制御系の定数最適設計手法を開発した⁽⁵⁾。ローカルおよび広域モードのロバスト安定化については， $P+\omega$ 形PSS，遠端情報入力PSSの定数最適化手法を開発した^{(6),(7)}。これらPSSに着目した制御系設計手法は実用化レベルにあり，電力会社へS法⁽¹³⁾として導入されている。しかし，これらの手法は動揺モードのダンピング力に主眼をおいたもので，より実用的な手法とするためには，これに併せて送電電力の限度を増大させるため，同期化力も考慮に入れて大規模擾乱時の安定性も向上させるような総合的設計手法とすることが期待されている。この対策として，大擾乱時の非線形性を考慮し， $P+\omega$ 形PSSに発電機無効電力を加えた多入力PSSが開発・検証されている⁽⁸⁾。しかしながら，その設計に関しては，無効電力入力に関連した部分については既に設計手法が確立されているが， $P+\omega$ 形PSS部分については開発者の技術的ノウハウ・経験に依存する部分が多く，これをより普遍化するには定量的な設計法について今後更に検討が必要である。

本論文では，ダンピング力だけでなく同期化力も固有値で定

量的に評価しながら、両者をバランス良く向上させる論理を提案した。具体的には、発電機励磁系定数を最適設計する際に、設計対象となる制御系をPSSだけでなくAVRにも拡張し電圧維持能力を積極的に定数最適化へ反映させることを狙った。同時に、安定度評価関数の入力として従来のダンピング係数（固有値の実部）に加え、動揺周波数（固有値の虚部）も組み込み、間接的に過渡安定度を定量的に評価することを目指した（提案手法1）。さらに、重潮流条件において、母線電圧の低下による安定度の悪化を防ぐために、遠端の主要母線電圧を発電機励磁系の入力信号として加える手法も提案した（提案手法2）。

3章において、一機無限大母線系統に提案手法1を適用し、発電機のダンピング力係数（Kd）と同期化力係数（Ks）の向上効果と限界送電電力の向上効果を示した。次に、多機系統モデルへも適用し、電力輸送力向上効果を示した。4章において、輸送力を増加させるために最適設計対象発電機を増やすと限界送電電力は増加するが、主要母線の電圧の低下による安定度限界が生じることを明らかにし、その対策として提案手法2を適用することにより、限界送電電力の大幅な向上が得られることを示した。

2. 励磁制御系による総合的安定度向上方策の提案

<2.1>AVRとPSS定数同時最適化論理の開発（提案手法1）

一般的にはAVRとPSSの定数整理手順は文献(9)によると、最初に総合電圧変動率によってAVRの定常ゲインが決定され、以後固定として扱われる。後は無負荷時や負荷時の所要の応答特性が得られるまで繰り返すことで、AVR位相補償回路定数、乱調防止回路定数、PSS定数が決定される。これらの検討はシミュレーションでの試行錯誤によるため、安定度等の定量的な評価が得られ難く作業が繁雑になると思われる。また、最初に固定したAVR定常ゲインも実際には若干の設定裕度があり、この定数を含めたAVR定数を積極的に活用することにより発電機電圧制御機能を強化することが期待できる。

そこで、本論文では、従来の固有値ベースによるPSS定数最適化論理⁽⁶⁾を拡張し、AVR定数も取り込んで、AVR、

PSS一体として最適設計することを提案する。しかしながら、この方法だけでは同期化力を向上させるための安定度評価指標が無いため、ダンピング力と同期化力の両者を向上させることは難しい。したがって、次に述べるような安定度評価関数を導入した。

同期化力を簡略かつ定量的に考慮した定数最適化のために、次式の評価関数を用いた。

$$F = \sum_{j=1}^m C_j \sum_{i=1}^n \left\{ e^{k_f \lambda_{ij}} + e^{k_w \frac{\omega_{ij0} - \omega_{ij}}{\omega_{ij0}}} \right\} \dots (1)$$

ここで、 λ_{ij} ：系統断面jの固有値iの実部、 ω_{ij} ：系統断面jの固有値iの虚部、 ω_{ij0} ： ω_{ij} の初期値、n：断面jでS法で求めた固有値数。m：系統断面数、 k_f ：ダンピング評価の重み、 k_w ：動揺周波数評価の重み

(1)式の第一項は、固有値の実部 λ_{ij} を用いた従来からの評価値⁽⁶⁾であり、ダンピング力を評価していた。今回これに第二項の固有値の虚部である動揺周波数 ω_{ij} を新たに評価関数として加え、これにより同期化力を間接的にはあるが定量的に評価するものとした（評価関数に動揺周波数を導入することの定性的な説明は付録Aを参照されたい）。ダンピング力と同期化力の向上はFの最小化により達成できる。すなわち、 λ_{ij} はダンピングが向上する方向へ変化し、 ω_{ij} は動揺周波数が上昇する方向へ変化するように定数を更新する。 ω_{ij} と初期値 ω_{ij0} との差分の比としたのは、比較的高い周波数の発電機ローカル動揺や、それ以上の周波数帯の制御系動揺モードの値が非常に大きくなり、比較的低い周波数帯の広域動揺モードの評価値との間の適切な評価が行えなくなることを避けるためである。以降、本節の提案を提案手法1と呼ぶ。なお、(1)式の重みパラメータ k_f と k_w については現在のところ体系的な決定方法は無いが、本論文では $k_f=10.0$ 、 $k_w=3.0$ とした。評価関数Fの最小化は最急勾配法を用いた（最適化手法については付録Bを参照されたい）。提案手法1の適用による限界送電電力向上効果を3章に示す。

<2.2>遠端主要母線電圧入力形励磁系の提案（提案手法2）

超速応励磁系とP+ ω 形PSSを全発電機に設置し最適設計を行

図1 発電機励磁系による限界送電電力向上対策の流れと開発手法の位置づけ

Fig.1 Flow-chart of countermeasures with generator excitation system to improve ATC

うことにより、ネガティブダンピングによる振動発散型の定態不安定現象と、過渡的な不安定現象は十分に抑制することができるが、新たに別のタイプの不安定現象が現れてくることが分かった。この不安定現象は、系統が重負荷となり定態安定度が安定であってまかなり限界に近い状態で、落雷などの外乱によって引き起こされるものである。外乱により発電機から遠い基幹送電線の系統電圧が低下すると、これにより同期化力が不足し発電機位相角が開き、さらに電圧低下を引き起こすという正のフィードバックが形成され、ゆっくりとした単調発散となる現象である。この不安定現象がゆっくりと進行する初期の段階においては、発電機位相角や無効電力出力は大きく変化するが、有効電力出力や端子電圧の変化は小さく、従来型のAVR、PSSではこの不安定現象を抑制することは困難であることが分かった。系統電圧を維持することによりこの不安定現象は抑制できると考えられ、具体的な方策としては、SVCの設置や無効電力変化を補助入力とするPSSが有効となる。

本論文では、AVR入力信号に従来の発電機端子電圧偏差に加え、発電機から遠方の母線電圧偏差を遠端情報として入力とすることを提案する。発電機内部電圧を強め母線電圧の大幅な低下を防ぐことで安定度の向上が期待できる。発電機端子電圧の他に別の電圧を入力する考え方自体は、Power System Voltage Regulator(PSVR)として既に実系統に導入されているところもある⁽¹⁰⁾が、付加信号は発電機昇圧変圧器の高圧側母線電圧であり、基本的には過渡安定度の向上を積極的に目指したものではない。なお、本節の提案を以降、提案手法2と呼ぶ。4章に提案手法2による限界送電電力向上効果を示す。

＜2.3＞総合的制御系定数設計方策の提案

今後の電力需要増に対して安定度を適切に確保し、現有設備を最大限に利用した電力輸送力増強のための発電機励磁制御系の総合的な設計指針を提案する。図1にその概略図を示す。本論文で提案した手法だけでなく、既に筆者らが報告した手法も取り入れ統合化したものである。概要を以下に述べる。

- (1) 想定された様々な潮流条件、系統条件の定態安定度を確保できなければ、複数の重要な系統断面を対象にした発電機PSS定数最適化を実施する。(文献(5))
- (2) (1)によって発電機ローカルモードと広域モードの安定性が十分に確保できない場合、P+ ω 形PSS等の多入力PSSを導入する。(文献(6),(8))
- (3) 過渡安定度をチェックし問題があれば、AVRとPSS定数を同時に最適化するなどして、同期化力を向上させるための対策をとる。(本論文提案手法1、文献(8))
- (4) (3)によっても所要の電力を送れない場合、超速応励磁制御機の安定化対象発電機を増やす。
- (5) 所要電力の送電可否を再チェックする。過渡安定度で

はなく重潮流による電圧低下が問題となる場合は、Q、V node等の付加信号を励磁系に入力する。(本論文提案手法2、文献(8))

3. 発電機AVRとPSS定数の同時最適化による限界送電電力向上効果(提案手法1の検証)

＜3.1＞簡略系統における限界送電電力向上効果

(1) 発電機励磁系モデルと一機無限大母線系統モデル

検討に使用した発電機励磁系モデルを図2に示す。発電機励磁系は超速応のサイリスタ励磁方式、PSSはP+ ω 形PSSで検討することとした。制御系の最適設計対象定数は、図2の本枠で囲った部分のゲインや位相補償時定数とした。PSSのリセットフィルタは、ローカルおよび広域電力モードより低周波数の成分をカットするためのハイパスフィルタであり、その時定数は固定とした⁽⁶⁾。表1に発電機諸定数を、図3に一機一負荷無限大母線系統モデルを示す。これは、系統に短周期モードだけでな

設計対象定数(本枠のブロック)

AVR: $G_A(=1.0)$, $T_{AVR1}(=1.3)$, $T_{AVR2}(=7.1)$
P形PSS: $G_P(=0.01)$, $T_{P1}(=0.2)$, $T_{P2}(=0.1)$, $T_{P3}(=0.1)$, $T_{P4}(=0.2)$
 ω 形PSS: $G_W(=0.10)$, $T_{W1}(=1.0)$, $T_{W2}(=0.5)$, $T_{W3}(=0.5)$, $T_{W4}(=1.0)$
※各定数()内の数字は最適化計算時の初期値

図2 超速応自動式サイリスタ励磁系とP+ ω 形PSSモデル
Fig.2 Self-excited thyristor type excitation model and P+ ω type PSS model

表1 発電機定数
Table 1 Generator constants z

定格容量(MVA)	972	xq' (pu)	0.53
慣性定数(sec)	7.81	xq'' (pu)	0.25
x_d (pu)	1.61	T_d' (sec)	1.05
x_d' (pu)	0.30	T_d'' (sec)	0.03
x_d'' (pu)	0.24	T_a (sec)	0.31
x_q (pu)	1.48	x_L (pu)	0.19

図3 一機一負荷無限大母線系統
Fig.3 One machine-infinite bus system

く長周期モードも含めるために、発電機出力の半分を中間負荷で消費し残りを長距離送電線で送電する系統モデルである。具体的には、発電機出力は0.86puで0.43puを無限大母線へ送電し、送電線リアクタンスは片回線j2.0puの2回線とした。送電限界を求めるシミュレーション検討は電中研開発のY法を用いた。系統事故条件は、送電線中間地点の3LG-0-Cとした(故障継続時間0.07秒、1回線開放後10秒後に再閉路)。送電限界の判定は、発電機内部相差角が360度を超える状態となったケースの送電線潮流を限界潮流とした。S法による発電機励磁系定数の最適化⁽¹⁾に際しては、2回線系統と事故後線路開放による1回線系統の2断面を同時に考慮し、以下の2ケースを実施した。

図4 Case1, 2の制御系定数最適化過程におけるダンピング係数と周波数の変化の様子(1回線系統断面ケース)
Fig.4 Change of damping coefficient and mode frequency during parameter optimization

表2 一機無限大母線系統における最適化後の励磁系定数と限界送電電力

Table 2 Parameters and power transfer capability for one machine and infinite bus system

	限界送電電力 (1GVA ¹ -s)	増分率 (注1)	最適化後のAVR, PSS定数値(注2)
(Case1) P+ ω 形PSSのみ最適化 (ダンピングのみ考慮)	0.37pu	-----	AVR: $G_{AVR}=1.00$, $T_{AVR1}/T_{AVR2}=1.30/7.10$ PPSS: $G_p=0.15$, $0.09/0.16$ $0.67/0.12$ ω PSS: $G_w=1.15$, $1.87/0.88$ $7.63/0.65$
(Case2) (提案手法1) AVR&PSS最適化 (ダンピング&同期化力考慮)	0.41pu	+10.8%	AVR: $G_{AVR}=1.00$, $T_{AVR1}/T_{AVR2}=2.84/3.09$ PPSS: $G_p=0.01$, $0.08/0.29$ $0.14/0.14$ ω PSS: $G_w=0.81$, $1.97/0.81$ $5.92/0.72$
(参考Case) AVR&PSS最適化 (ダンピングのみ考慮)	0.40pu	+8.1%	AVR: $G_{AVR}=1.11$, $T_{AVR1}/T_{AVR2}=3.00/3.00$ PPSS: $G_p=0.01$, $0.08/0.25$ $0.15/0.13$ ω PSS: $G_w=0.62$, $1.97/0.66$ $5.57/0.54$

(注1) Case1の限界送電電力を基準にした場合の増分率

(注2) PSS定数はゲイン, 進み遅れ時定数の順で標記している。例えば: PPSS: $G_p=0.15$, $0.09/0.16$, $0.67/0.12$, は, 「 G_p T_{p1}/T_{p2} T_{p3}/T_{p4} 」の意

(Case1) PSSのみ最適化

(ダンピングのみ考慮して最適化)

(Case2) (提案手法1) AVRとPSSを同時に最適化

(ダンピングと同期化力の両方を考慮して最適化)

(2)励磁制御系定数最適化とKs, Kd

Case1とCase2の定数最適化時の固有値の推移を図4に示す(事故後1回線状態の固有値の変化)。Case1は、最適化計算が進むにつれダンピングの向上とともに動揺周波数が急速に低下する傾向にある。Case2はCase1に比べてダンピングはほぼ同程度か若干劣るものの、動揺周波数の落ち込みが抑えられるだけでなく初期値よりも大きくなっており、提案手法の特徴が現れている。最適化後の励磁制御系の定数を表2に示す。

次に、定数最適化後の発電機のダンピング係数(Kd)と同期化力係数(Ks)を計算し図5に結果を示した。Case2のKdはほぼCase1と同じでKsはCase1より大きくなっており。これにより固有値最適化結果と併せて提案手法1の周波数応答の観点か

図5 ダンピング係数(Kd)と同期化係数(Ks)
Fig.5 Damping power(Kd) and synchronizing power(Ks) after optimizing parameters

図6 一機無限大母線システムシミュレーション時の発電機諸量
Fig.6 Simulation results of Case1 for one machine and infinite bus system model

らの有効性が検証できた。

(3) 限界送電電力による提案手法1の検証

限界送電電力の観点から提案手法1の検証を加える。表2に各ケースの最適化後の限界送電電力(送電端母線から無限大母線への送電電力)を示す。参考Caseとして、ダンピングのみを対象としてAVRとPSSの定数を同時に最適化するケースも実施した。限界送電電力の大きさは、Case1<参考Case<Case2となっている。Case1を基準にしたときのCase2の潮流増分率は約11%であり、この値は参考Caseよりも大きくなっている。なお、Case2の限界送電電力0.41puの値を他のケースに適用したときのY法シミュレーション結果を図6に示す。Case1は1波脱調となっているがCase2は事故後の過渡安定度をクリアしていることが分かる。これは、界磁電圧を見ると、Case1は事故直後の電圧の突き上げが不足しており急速に1波脱調に至っているためである。提案手法1により、Case2は最適化後のAVR定数の過渡ゲインがCase1よりも高くすること

安定化対象発電機: 小容量: G1単独, 大容量: G1, G2合算

図7 18機長距離串形システムモデル図(有効電力潮流分布)
Fig.7 18-generator longitudinal transmission system model (Active power flow map)

ができた。これらにより提案手法1の有効性が検証できた。

<3.2>多機系統における限界送電電力向上効果

提案手法1の有効性をより実際に近い多機系統に適用しその効果を検証する。

(1) 長距離串形システムモデルと緒言

図7に18機長距離串形システムを示す。これは我が国の60Hz系統全体を縮約した系統で、実系統への適用性の検討のためにこれまでの研究でも用いてきたモデル^{(3),(6)}である。この系統には、発電機固有のローカルモードの他に系統全体の安定性に大きく影響する約0.3Hzの広域動揺モードが存在する。安定化対象発電機は上記広域モードに大きい感度を持つ系統左端のG1とし、励磁制御系は<3.1>で用いたものと同じとした。基幹送電

表3 18機串形システムモデルでの定数最適化後の結果
Table 3 Results after parameter optimization for 18-generator model

	広域モード (注)	ローカルモード (注)	限界送電電力 (増分率)
(ベースケース) G1にPSS設置無し	+0.13 (0.33Hz)	-0.73 (1.31Hz)	
(Case1) P+ω形PSSのみ最適化	-0.22 (0.33Hz)	-0.93 (1.68Hz)	2.7pu (---)
(Case2) 提案手法1 AVR&PSS最適化 (ダンピング&同期化力考慮)	-0.28 (0.35Hz)	-2.02 (3.78Hz)	2.88pu (6.8%)

(注)各欄上段はダンピング係数(1/sec),
下段は動揺モード周波数を示す

(a)Case1 (母線電圧)

(b)Case2 (母線電圧)

図8 多機系統シミュレーション波形
(Case2の送電限界値(2.88pu)における母線電圧波形)
Fig.8 Simulation results of Case1 for 18-generator system model

線 A B (母線 A-B 間) の増分潮流の設定は母線 201, 母線 210 と 212 の負荷調整とした。系統事故条件は, 送電線 A B の送り側母線至近端の 3LG-0 (故障継続時間 0.07 秒, 送電線 1 回線開放, 再閉路無し) で与え, 負荷特性は定電流特性とした。

(2) G1 発電機励磁系定数最適化結果と限界送電電力

G1 の励磁制御系定数を最適化した (検討ケースは <3.1> と同じ Case1, Case2)。最適化結果と限界送電電力の比較を表 3 に示す。提案手法 1 は他の 2 ケースに比べて, 広域モード, ローカルモードともに動揺周波数を高めに設定でき, ダンピングも十分な値を確保できている。限界送電電力の大きさは, Case1 < Case2 であり, +6.8% の増分潮流となった。以上により提案手法 1 が多機系統においてもその有効性が検証できた。Case2 の限界潮流値 (2.88 pu) を他のケースに適用したシミュレーション結果の比較 (系統母線電圧) の動揺波形を図 8 に示す。Case1 は 2 波脱調となっているが, Case2 は安定に運転できている。ただ, その場合でも送電線開放後の主要な母線電圧 0.8 pu 程度まで大きく低下し, その動揺が持続している。

図9 安定化対象発電機増ケース (G1 & G2) の送電限界時のシミュレーション結果

Fig.9 Simulation results under case of transmission power limitation

4. 発電機励磁制御系入力信号の拡張による限界送電電力の一層の向上方策 (提案手法 2 の検証)

<4.1> 多機系統における限界送電電力向上効果の限界

図 7 の安定化対象発電機を増やし, G1 と G2 を一つに合わせ約 19000 MVA の大容量発電機とし, これに超速応サイリスタ励磁系を付加した究極的な状況を想定し, 限界送電電力を検討した。その結果, Case1, Case2 とともに限界送電電力は約 3.4 pu とほぼ同じ値となった。G1 のみによる結果 (表 3) に比べ更に増加してはいるが, その差分は 0.5 ~ 0.7 pu 程度とさほど大きくはない。これは, 提案手法による限界送電電力増大の効果が現れる前に, 電圧異常低下という別の不安定現象によって限界値が制約されているため, 両 Case の値に差が生じなかったものである。これを説明するために, シミュレーション結果を図 9 に Case2 を代表させて示す。<2.2> で述べたように, 事故後の内部相差角の拡大に対して有効電力出力の変化は小さく, それに対して無効電力出力は大きいことが分かる。また, 主要中間母線電圧 (母線 301 や 303) が単調に減少し崩壊に至っている。一方, 発電機の励磁電圧と端子電圧は, 事故直後の第 1 波動揺後はほぼ事故前の状態に落ちつき, 上位系母線の電圧低下による不安定現象とは無縁となっている。すなわち, 重潮流の場合, 究極的に発電機励磁系を強化しても従来手法では電圧低下に起因する安定度の崩壊には無力であることが分かる。したがって, この不安定現象を安定化し電力輸送力を更に向上させるためには, 電圧低下量の大きい母線電圧を直接発電機励磁系に入力して系統電圧を高め維持すればよい。

<4.2> 発電機無効電力入力励磁系による限界電力向上効果

重潮流となり内部相差角が大きく開いた状態で制御系を活用するためには, 発電機無効電力出力 Q を AVR の入力信号とすればよいことが提案されている⁽⁸⁾。そこで, ここではその効果を利用し電圧低下現象の改善を試みる。図 10 に示すように, P+ω 形 PSS に Q 入力ブロックを追加し位相進み遅れ時定数 T_{Q1} と T_{Q2} を最適化した (この場合, $G_V=0$ とした)。表 4(a) に限界送電電力を示す。限界電力は約 3.7 pu と Q 入力導入前に比べて更に向上する。限界送電電力時と安定送電電力時の波形を図 11(a) に示すが, 限界時は事故後の母線電圧が低めで推移し 10 秒後に崩

図10 発電機励磁系入力信号を拡張したモデル (Qg, V_node)
Fig.10 Expanded excitation input signal

壊に至っている。安定送電時の場合も動揺収束後の母線電圧は約0.9puとかなり低下している。

<4.3>遠端主要母線電圧入力による限界電力向上効果

図10の V_{node} 入力ブロックに示すように、発電機から遠方の主要な母線電圧をAVRに補助信号として入力することにより $P+\omega+V_{node}$ 励磁系として中間母線電圧の低下を積極的に抑制することにより安定度の向上を図った。本論文では簡単のために、電圧低下量の大きい母線の中で、G1発電機に近い母線301を、 V_{node} として入力し、位相補償は行わずに、 $GV=1.0$ で直接入力した（この場合、 $G_Q=0$ とした）。表4(b)に限界送電電力を示す。限界電力は約4.4puとなり $P+\omega+Q$ 形PSSのケースよりも更に大幅に増加させることができた。限界送電電力時と安定送電電力時の波形を図11(b)に示すが、安定送電時の母線電圧は $P+\omega+Q$ よりも $P+\omega+V_{node}$ の方が動揺収束後の電圧はほぼ事故前の電圧レベルに維持（約1.0pu）できており、提案手法2の有効性が示された。

表4 励磁制御系入力信号拡張による限界送電電力
Table 4 Ability of transmission capacity with expanded excitation input signal

	限界送電電力 (増分率)注1	備考
(a) $P+\omega+Q$ 入力PSS	3.70pu (+37.0%)	・中間母線電圧の低下はかなり抑制できる
(b) $P+\omega+V_{node}$ 入力PSS	4.40pu (+63.0%)	・中間母線電圧の低下は $P+\omega+Q$ 以上に抑制できる

(注1) 表3のCase1の限界送電電力を基準にした場合の増分率

(限界送電電力時: 3.7pu)

(安定送電電力時)

(a) $P+\omega+Q$ 入力励磁系ケースの主要母線電圧波形

(限界送電電力時: 4.4pu)

(安定送電電力時)

(b) $P+\omega+V_{node}$ 入力励磁系ケースの主要母線電圧波形

図11 励磁制御系入力信号を拡張したケースの送電限界状態のシミュレーション波形
Fig.11 Simulation results with expanded exciter signal at transmission power limitation

5. 提案手法の検証結果のまとめ

本論文で得られた結果のまとめを図12に示す。

(1) 発電機励磁系による電力輸送力向上効果

- ・図7の発電機G1に従来のダンピングの向上のみを目的としたPSS定数最適化(同図(A1): 限界電力2.7pu)よりも、AVRも含めた励磁系全体の定数最適化により同期化力が向上し、電力輸送力は向上する(同図(B1): 限界電力2.88pu)。

(2) 安定化対象発電機増による輸送力向上効果

- ・安定化PSS設置対象発電機を増やすと(G1とG2)輸送力は一層増加する(同図(B2): 限界電力3.4pu)。ただし、重潮流になることにより基幹送電線母線の電圧低下が顕著になり、その制約条件で輸送力向上効果は限界となる。

(3) 励磁系入力の拡張による電圧制約の改善

- ・電圧低下現象を防止するために従来のAVRとPSSに加え、電圧変動に効果的な発電機無効電力を入力に追加しその定数を最適化することにより輸送力は改善される(同図(B3): 限界電力3.7pu)。
- ・より積極的に電圧を維持するために、主要母線の電圧を遠端情報として励磁系に入力することにより、電圧問題は解消し飛躍的に輸送力は増大する(同図(B4): 限界電力4.4pu)。

図12 多機系統モデルにおける発電機励磁系による限界送電電力の比較
Fig.12 Evaluation of power transfer capability between (Case-A)~(Case-B4)

6. あとがき

現有設備の中で安定度向上に最もコストパフォーマンスのよい発電機励磁制御系を対象にして、安定度を総合的に向上させる励磁系定数最適化論理を開発した。さらにこれまでに開発した手法と併せとりまとめ電力輸送力を向上させるための総合的な制御系定数設計方策を提案した。これまでの研究期間中に得られた電力動揺現象に関する数々の知見、開発した各種解析機能や制御系設計機能はすべてS法に組み込んでいる。近年、S法の電力会社への導入はほぼ全社に行われており、今後の系統全体の安定性を考慮した系統運用・計画策定作業に強力なサポートが提供できるものと期待する。しかしながら、一方で、S法はあくまでも非線形な電力系統動特性を線形近似したモデルでの安定度解析手法である。本論文で提案した制御系設計方策もS法だけで完結できるものではなく、Y法シミュレーションによる過渡安定度や各種非線形性影響の確認が必要である。この両プログラムの特徴を活かしバランス良く利用することで効率よい作業が行われる。

なお、ここで提案した手法を実運用へ導入するに当たっては、留意する点があるので付記する。AVRの主目的は過電圧や不足電圧の防止である。したがって提案手法1により従来固定で扱っていた定数を再設計する際には、設計後の定数の妥当性を無負荷インディシャル応答等のシミュレーションにより十分にチェックする必要がある。提案手法2では電圧低下の大きい母線電圧を遠端情報として用いた。このためには高速な情報通信網のインフラ整備の進展が背景になることはいうまでもない。また、制御する発電機が遠端の電圧に寄与する度合いは一般に小さく、極端な場合には系統から分離される場合もあることから、発電機の保護等にも留意する必要がある。さらに、ダンピング向上を目的としたPSS設置発電機選定論理はすでに文献(12)にて提案しているが、過渡安定度向上のための体系的な発電機励磁系選定論理や最適な V_{node} 検出地点選定論理が今後の課題として残されている。

最後に、本論文をまとめるにあたり、当所電力システム部谷口浩人部長、同部北内義弘主任研究員には有益なディスカッションおよびコメントを賜った。ここに深く感謝いたします。

(平成12年07月04日受付、平成12年09月20日再受付)

文 献

- (1)高橋：「21世紀中葉の電力システムと技術課題（要点と総論）」、電中研調査資料 No.T98913、平成11年4月
- (2)吉田、内田：「長距離串形系統の不安定動揺現象とその対策—励磁制御系の影響とPSSによる安定化効果—」、電中研研究報告 T88001、昭和63年8月
- (3)吉村、高崎、内田：「大規模電力系統安定化のためのSVC制御定数の最適化手法」、電気学会論文誌B、112巻1号、平成4年1月
- (4)高崎：「SVCのダンピング向上効果に関する一検討」、電気学会電力技術研究会資料、PE-89-129、平成元年
- (5)吉村、内田、吉田：「電力系統の定態安定度向上対策（その3）—複数の系統断面に対するPSS定数最適設計手法—」、電中研研究報告 T93072、平成6年4月
- (6)吉村、内田：「多機系ロバスト安定化のためのP+ ω 形PSS定数最適設計手法」、電気学会論文誌B、118巻11号、平成10年
- (7)吉村、内田：「電力系統の定態安定度向上対策（その5）—遠端情報PSSの定数最適化による広域動揺抑制効果—」、電中研研究報告 T97025、平成10年5月
- (8)北内、谷口：「長周期動揺抑制用多入力PSS(P+ ω +Q型)の開発」、電中研研究報告 T960212、平成9年5月
- (9)同期機励磁系の仕様と特性調査専門委員会：「同期機励磁系の仕様と特性」、電気学会技術報告 第536号、1995年2月
- (10)電力系統の電圧・無効電力制御調査専門委員会：「電力系統の電圧・無効電力制御」、電気学会技術報告 第743号、1999年9月
- (11)岡田、吉村、内田：「発電機任意制御系の定数最適化プログラムの開発」、電気学会全国大会 No.1306、平成10年3月
- (12)内田：「電力系統の定態安定度向上対策（その1）—PSSの設置箇所選定と定数最適化論理—」、電中研研究報告 No.183040、昭和59年6月
- (13)内田：「大規模電力系統の動的定態安定度解析手法—S行列法—」、電中研研究報告 No.179068、昭和55年10月

付録A 過渡安定度向上方策の基本的考え方

付図A1に一機無限大母線系統における発電機出力-内部相差角曲線（P- δ カーブ）を示す。系統事故直後の運転点はAからBへ移動する。過渡安定度の向上は、基本的には系統事故後の発電機の加速エネルギーを減少させ、減速エネルギーを増加せればよい。送電線リアクタンスXは不変とすると、加速エネルギー減少のためには以下が考えられる。

(i) 事故後の励磁電圧を大きく突き上げ内部電圧Eを上昇させる等により系統電圧の低下を防ぐ。

(ii) 事故後の運転点BにおけるP- δ カーブそのものの特性を変え、B点の傾きを大きくする。

B点における同期化力は次式で与えられる。

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{EV \cos \delta}{X} \quad \dots (A1)$$

一方、発電機回転子の運動方程式は次式で与えられる。

$$M\ddot{\delta} + D\dot{\delta} + K\delta = 0 \quad \dots (A2)$$

ここで、M：慣性定数、D：ダмп係数、K：同期化力係数

(A2)式の解は、一般に次式のような振動解となり、Kは ω の二乗に比例する。

$$\delta = \frac{-D \pm \sqrt{D^2 - 4MK}}{2M} \mp j \sqrt{\frac{K}{M}} = D' \pm j\omega \quad \dots (A3)$$

$$\therefore 4M^2 \gg D^2 \text{ as usual}$$

$$K = M\omega^2 \quad \dots (A4)$$

ここで、同期化力係数Kは(A1)式そのものである。したがって、事故後の電力動揺モードの周波数 ω を高くすることにより、同期化力係数（P- δ カーブの傾き）を大きくできる。

付図A1 発電機出力P-内部相差角 δ 曲線
Fig.A1 P- δ curve of generator

付録B 励磁制御系定数最適化計算

評価関数Fの最小化は最急勾配法を用いた。Fを最小化する際、文献(6)と同様に各繰り返し計算において α の修正幅に上限を設け（ $\|\alpha\|$ の20%）、この範囲内では $\partial \lambda_{ijk} / \partial \alpha$ 、 $\partial \omega_{ijk} / \partial \alpha$ を一定と見なし、 λ_{ij} と ω_{ij} を次式で近似し、

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ijk} + \Delta \alpha \frac{\partial \lambda_{ijk}}{\partial \alpha}, \quad \omega_{ij} = \omega_{ijk} + \Delta \alpha \frac{\partial \omega_{ijk}}{\partial \alpha} \quad \dots (B1)$$

ただし、 λ_{ijk} 、 ω_{ijk} はk回目の繰り返し計算時の固有値のダンピングと動揺周波数の初期値

繰り返し毎に次式を最小にする α を求め、 $\alpha_{k+1} = \alpha_k + \Delta \alpha$ として最適化計算を進めた。

$$F_k(\Delta \alpha) = \sum_{j=1}^m C_j \sum_{i=1}^n \left[e^{k_f \left(\lambda_{ijk} + \Delta \alpha \frac{\partial \lambda_{ijk}}{\partial \alpha} \right)} - e^{k_w \frac{\omega_{ij0} - \left(\omega_{ijk} + \Delta \alpha \frac{\partial \omega_{ijk}}{\partial \alpha} \right)}{\omega_{ij0}}} \right] \quad \dots (B2)$$

なお、ここで用いた定数最適化機能は、先に開発したS法特殊ブロック定数最適化機能を用いているため⁽¹⁾、任意の制御系に対して適用でき、非常に実用性の高いものとなっている。

吉村 健司

（正員）昭和34年4月6日生。60年3月九州大学大学院工学研究科電気工学修士課程修了。同年4月（財）電力中央研究所入所。現在電力システム部に勤務し、主として電力系統の定態安定度向上対策に関する研究に従事。平成2年8月～3年8月米国テキサス大学アーリントン校客員研究員。平成11年電気学術振興賞論文賞受賞。

内田 直之

（正員）昭和22年9月29日生。53年3月東京大学大学院工学研究科電気工学博士課程修了。同年4月（財）電力中央研究所入所。現在電力システム部に勤務し、主として定態安定度や並列計算手法に関する研究に従事。57年8月～58年8月米国テキサス大学アーリントン校客員研究員。平成11年電気学術振興賞論文賞受賞。IEEE Senior Member。

岡田 俊之

（正員）昭和43年5月3日生。平成3年3月日本大学理工学部電気工学科卒業。同年4月（株）電力計算センター入社。現在泊江事業部技術1課に勤務し、主としてS法・Y法の解析機能の向上、およびこれらを用いた電力系統の安定度解析業務に従事。