空間線形化法を用いた電力系統安定化系の設計[†]

高木 康夫*・曾我部 敏明*

平山 開一郎*・重政 隆*

A Design of Power System Stabilizer Applying State-Space Linearization

Yasuo TAKAGI*, Toshiaki SOGABE*,
Kaichiro HIRAYAMA* and Takashi SHIGEMASA*

A power system stabilizer which stabilizes power oscillations in wider system conditions is proposed. To this purpose, a new state-space linearization methodology is developed which belongs to geometrical nonlinear control theory. Furthermore, the linearization yields linear system that is the first order approximation of the nonlinear system, and nonlinear compensator for exact linearization. The feature brings robustness against unmodeled dynamics at least around the origin. Then heuristic approximations are introduced to widen the exactly linearizable class.

The design method is applied for single-machine infinite bus power system. Then a power system stabilizer is obtained which stabilizes power system of wider conditions, such as angular positions and system impedances. Adding a system observer, the ability is proved by computer simulations of single-machine infinite bus system and multimachine system.

Key Words: nonlinear control, power system stabilizer, exact linearization, computer simulations

1. ま え が き

PSS(系統安定化装置)は電力系統の安定度を補強し、有効電力の動揺を抑制する目的で、AVR(自動電圧調整装置)と共に発電機に設置される制御装置である。近年の電力需要増大により電力会社間の大電力送電の必要性が高まり、これに伴い、PSSの長距離大電力送電への対応が求められている。

PSSの設計に関しては、1970年代よりAVP-PSS系を一つの高速励磁制御系としてとらえ、現代制御理論を用いて一括設計しようという試みが報告されてきた。発電機励磁制御系を設計するには、定電圧保持機能に加えて、微小外乱に対する応答(動態安定度)のみでなく、三相地絡故障に代表されるような大外乱に対する応答(過渡安定度)を考慮しなければならない。また、長距離大電力送電に対応するには、高インピーダンス大相差角での運転も考慮する必要がある。動態安定度は平常運転時の

線形化モデルの極配置で決定されるが、過渡安定度は、線形化モデルの極配置だけでなく、事故後の系統変化に伴う非線形特性にも大きく影響される。また、ピーク負荷時の長距離大電力送電によっても系統の非線形特性が顕著に現れる。したがって、平常運転状態に対してLQ理論を単純に適用したPSSでは、事故後一回線を解放した場合に有効な制御が行えるとは限らず、事実文献1), 2)では、必ずしも過渡安定度の改善がみられないことが指摘されている。その後、この点を改良するために、種々の電力系統の非線形性を考慮する手法が提案されてきている。文献3)では、セルフチューニング型の適応型電力安定化系が提案されている。また、文献4)では、システムのダイナミクスが非線形項と線形項に分離した形式で記述される非線形系の多変数制御系構成問題としてとらえ、最適解について論じている。文献5)では、一機対無限大母線系統の非線形な動特性方程式を状態空間の線形化手法により、線形システムに結び付けている。このように多くの非線形性を考慮した提案があり、特に、適応型のPSSは実用化に向けて検討が進んでいるものの、いまだ現場では定常運転点における進み遅れフィルタにより励磁制御系を構成している。

[†] 第34回自動制御連合講演会で発表(1991・11)

* (株)東芝 川崎市川崎区浮島町4-1

* Toshiba Corp., Kawasaki
(Received March 2, 1992)
(Revised August 5, 1992)

一方、近年のデジタル AVR-PSS の普及に伴い、複雑なアルゴリズムも容易に実装可能となってきた。そこで、本論文では、一機対無限大母線系の非線形動特性方程式に基づき状態空間の厳密線形化を用いた、デジタル AVR-PSS に適した非線形 PSS の設計法を提案する。この方針自体は、文献5)に近いが、本論文ではより実用性を重視し、AVR-PSS 系を一体としては扱わない。これにより、AVR は従来のままの構成とし、PSS を入れ換えるだけで簡単に性能向上が図れるようにしたこと、また、状態空間の線形化により完全にもとの動特性を打ち消し、Brunovsky の正準形に帰着させるのではなく、もとの動特性に沿って線形化(空間線形化)することにより、未知動特性の制御性能への悪影響を軽減できるように改良した点が文献5)と異なる。また、設計した励磁制御系の制御性能は、一機対無限大母線系および、3機系の計算機シミュレーションにて確認した。

2. ヒューリスティックな近似による空間線形化法

特定の動作点回りでヤコビアンを求め、このヤコビアンで表現される一次近似により非線形動特性を線形化するのが従来より行われている線形化手法である。一方、これとは異なり、ある一定の領域に渡り、座標変換と入力変換により非線形システムを線形化する厳密な線形化(Exact linearization)に関する理論が1970年代より発展してきている。これにより、厳密に線形化できる非線形方程式のクラスが明らかになると共に、線形化変換がシステムティックに求まるようになった。ここでは特に、実際の制御への応用が容易な、状態空間の線形化について、1入力1出力システムに関し簡単に紹介する⁶⁾。この理論で扱う制御対象は、次式で表わされる入力に関して線形な、非線形システムである。

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + g(x)u \quad (1)$$

ただし、 $u \in R$, $x \in R^n$, $f(x)$ と $g(x)$ は R^n 上の C^∞ に属するベクトル場である。状態空間線形化とは、この非線形システムを、つぎの状態フィードバックと座標変換により、

$$u = \alpha(x) + \beta(x)v \quad (2)$$

$$z = T(x) \quad (3)$$

新たな入力 $v \in R$ と状態 z について、次式に示す Brunovsky の正準形で表現される線形システムに変換することである。

$$\frac{dz}{dt} = Ax + bv \quad (4)$$

ここで、行列 A とベクトル b は次式で表現される。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(1)式で表現される非線形システムが、可制御可観測な線形系(4)式に変換できるための条件は、つぎの定理で表わされる。

《定理1》⁶⁾ 非線形システム(1)式が線形系に変換できるための必要十分条件は、

(1) 可制御性行列 $[g(x) \quad ad_f g(x) \quad \cdots \quad ad_f^{n-1} g(x)]$ のランクが n ,

(2) ベクトル場の集合 $\{g(x), ad_f g(x), \cdots, ad_f^{n-2} g(x)\}$ が involutive,

の2条件が同時に成立することである。

定理1の条件を満たすシステム(1)式に対して、つぎの入力 $u = \alpha(x) + \beta(x)v$ と $z = T(x)$ により線形システム(4)式が得られることが知られている。

$$\alpha(x) = \frac{-L_g L_f^{n-1} \phi(x)}{L_g L_f^{n-1} \phi(x)} \quad (6a)$$

$$\beta(x) = \frac{1}{L_g L_f^{n-1} \phi(x)} \quad (6b)$$

$$T(x) = \begin{bmatrix} \phi(x) \\ L_f \phi(x) \\ \vdots \\ L_f^{n-1} \phi(x) \end{bmatrix} \quad (6c)$$

ここで、 $\phi(x)$ はつぎの関係を満足する関数である。

$$L_g \phi(x) = L_g L_f \phi(x) = \cdots = L_g L_f^{n-2} \phi(x) = 0 \quad (7)$$

(for all x near x^n)

$$L_g L_f^{n-1} \phi(x^0) \neq 0 \quad (8)$$

状態空間線形化による非線形制御系の設計では、以上の変換により線形化した $(v-z)$ 間のダイナミクスに対し、線形制御器を設計し付加する。(5)式と(6)式で表現される非線形補償器とこの線形制御器を組み合わせ非線形制御系を構成する(Fig. 1)。

従来の制御系の設計では、特定の平衡点近傍でヤコビアン行列を計算し線形化していたのに対し、この状態空間線形化では全動作領域にわたり厳密に線形化する。こ

Fig. 1 Nonlinear control system block diagram

の結果、従来は線形化したシステムに対し最適に設計した制御系でも、動作点が変わると制御対象の実際の動特性と、制御系の設計に用いた線形システムが異なってくるので、適切な制御系ではなくなってしまう。一方、この制御系では全動作領域にわたり厳密に線形化されているので、この状態空間線形化されたシステムに対して最適な制御系は、どのような動作点に対しても最適である。したがって、広い動作範囲にわたる高速高精度制御が実現できる。

このようにきわめて良好な性質をもつ設計法であるが、その課題はこのように厳密に線形化できる非線形関数のクラスが必ずしも広くないことである。条件(1)ランク条件は局所的な可制御性の条件に対応しており多くの場合満足されるが、(2)integrability condition がかなり厳しく、満足しない実際的な問題が多い。そこで、psuedo-linearization⁷⁾, extended linearization⁸⁾ など、適当な近似によりこの条件を満足する非線形システムを得ようとする努力が続けられている。たとえば、extended linearization は、この手法により設計された非線形制御器を含む閉ループ系のヤコビアン線形近似が、各平衡点で同じになるように座標変換や入力変換を決める方法である。システムティックに解が求まるうえ、近似精度を向上させるにしたいが、広い動作域で良い制御性能が実現される。しかし、あくまでも各動作点でのヤコビアン線形近似が一定の安定なシステムであることを保証するにすぎないので、動作域内の平衡点近傍での微小変化や、準静的とみなされるようなゆっくりした変化には適切な制御を期待できるものの、大きく、かつ、速い動作点変更時には高次の非線形項が大きく影響するために、extended linearization では適切な制御動作を保証できない。

そこで、ここではヒューリスティックな非線形近似を用いた状態空間線形化法を提案する。この設計法はつぎの 6 ステップからなる。

(ステップ 1) 非線形関数の変数依存性をグラフィック表示して、その近似関数形を設計者が選択する。このとき注意すべきことは、状態空間線形化できるように簡易な関数を選ぶことである。

(ステップ 2) 近似関数がもとの非線形関数に最も良くあうように、最小二乗法により関数のパラメータを決定する。

(ステップ 3) 近似関数を含む非線形システム方程式を状態空間線形化するように、変数変換 $x=x(\xi)$ を選ぶ。

(ステップ 4) 線形システム (A, B, C) をつぎにより決める。

$$A = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial f}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} \Big|_{x_0} \quad (9a)$$

$$B = \frac{\partial x}{\partial \xi} g(\xi) \Big|_{x_0} \quad (9b)$$

$$C = \frac{\partial h}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x} \Big|_{x_0} \quad (9c)$$

(ステップ 5) 近似された非線形システム方程式が、厳密に線形システム (A, B, C) に変換されるように入力変換 $u = \alpha(x) + \beta(x)v$ を求める。この入力変換が求まるように(ステップ 1 および 3)において、非線形関数を適切に近似し、適当な変数変換をほどこしておく必要がある。

(ステップ 6) 線形システム (A, B, C) に対して、最適レギュレータを設計する。

このステップにより、 $f(x)$ の平衡点近傍でのヤコビアン線形化したシステムを対象に線形制御器を設計することになるので、従来の線形制御器と似たロバストな線形制御器が得られる。これに、非線形補償器を付加するので、従来の制御系からこの方法により設計した非線形制御系に、実装上容易に変更することができる。

3. 電力システムモデルとその非線形性

本章では、power system stabilizer (PSS) の設計に用いた電力系統-発電機モデルについて述べる。ここでは、通常行われるように、一機対無限大母線モデル (Fig. 2) を用いて、設計および評価を行った。このシステムのダイナミクスは、Park の初期過渡モデルにより以下の式で表現される。

$$\frac{M}{\omega_0} \ddot{\delta} + \frac{D}{\omega_0} \dot{\delta} = T_m - T_e \quad (10)$$

$$T_e = P_e = E_q i_q \quad (11)$$

$$i_q = \frac{|e_o| \sin \delta}{x_e + x_q} \quad (12)$$

$$E_q = E'_q + (x_d - x'_d) i_d \quad (13)$$

$$i_d = \frac{E'_q - |e_o| \cos \delta}{x_e + x'_d} \quad (14)$$

$$T_{d0} \dot{E}'_q + E'_q = E_{fd} - (x_d - x'_d) i_d \quad (15)$$

$$e_q = E'_q - x'_d i_d \quad (16)$$

$$e_d = x_q i_q \quad (17)$$

$$|e_t| = \sqrt{e_q^2 + e_d^2} \quad (18)$$

これらの式は、平方やかけ算、 $\sin$, $\cos$ などを含み、強い非線形性をもつ。とくに、(19)式の相差角動揺の制動係数 D は、誘導電動機のトルクとスリップの関係の考

Fig. 2 Single machine infinite bus system

Fig. 3 Damping coefficient dependency on system impedance and angular position

察から、一般的には満足されるつぎの3条件のもとに Park⁹⁾により導出された。

- (1) armature および, field 巻線に抵抗がない。
- (2) 電圧に対する発電機ロータのスリップは大きくない。
- (3) ダンピングはダンパー巻線のみにより起こる。

$$D = e_b \omega_0 \left[\frac{(x'_d - x''_d) T'_{d0}}{(x'_d + x_e)^2} \sin^2 \delta + \frac{(x_q - x''_q) T'_{q0}}{(x_q + x_e)^2} \cos^2 \delta \right] \quad (19)$$

この特性は、Fig. 3 に示すように、系統インピーダンス x_e と相差角 δ に大きく依存する¹⁰⁾。特に、 x_e が大きい弱い系統や、 δ が大きい重負荷時には D が小さくなり、きわめて振動的になる。Fig. 4 は、0.3 pu 程度の系統インピーダンスをもつ一機対無限大母線系統に対して設計したサイリスタ励磁タイプの AVR に付加される従来型 PSS (Fig. 5) の系統インピーダンスのステップ変化に対する制御応答を示したものである。この例にも示されているように、通常考えている系統インピーダンスの範囲 ($x_e < 0.6$ pu) では良好な応答を示し、系統の安定化に関し顕著な効果が認められる。しかし、落雷などの事故により大幅に系統インピーダンスが増加した場合には、Fig. 4(b) のように十分なダンピング性能が得られなくなる。

このように、従来の固定ゲインとフィルタによる PSS は、動特性の非線形性のために、調節した動作点では良い制御性能を示していても、運転条件が大きくかわると振動的になっていた。したがって、この非線形性をうまく補償することができればきわめて有効な PSS を構成することができるものと考えられる。

4. 空間線形化による PSS の設計

前章で述べた一機対無限大母線系統の非線形動特性を補償して、より広い範囲で一定のダンピング力を得るた

(a) x_e : from 0.2 pu to 0.3 pu

(b) x_e : from 0.2 pu to 0.8 pu

Fig. 4 System responses for impedance (x_e) step changes with conventional PSS

Fig. 5 Conventional PSS with AVR

めに、2章で説明した空間線形化法による制御系の設計手順を適用して PSS を設計した。さて、PSS は有効電力を安定化するのがその主任務であるが、それだけではなく、発電機の発電端電圧を乱してはならないという制約条件が存在する。この制約条件がなければ、種々の線形化のための方式を考えることができる。ところが、形式的に線形化したのでは有効電力の安定化は達成されるものの、発電端電圧を大きく乱し採用することができない。種々の試行錯誤の結果、ここでは端子電圧 e_t と有効電力 P_e を適当に近似することにより、(10)式から(18)式を空間線形化した。2章での設計手順に従い、それぞれの x_e

Fig. 6 P_e and e_t 's dependencies on angular position and quadrature axis voltage

と δ への依存性をグラフィックス表示 (Fig. 6) して、その近似関数をヒューリスティックに決めた。関数形は、下式のとおりである。

$$\bar{e}_t = 1 + C_1 x_e^{C_2} E_q' \quad (20)$$

$$\bar{P}_e = \frac{b}{ax_e + 1} (\delta_0^2 - (\delta - \delta_0)^2) E_q' \quad (21)$$

(20), (21) 両式において、 $\bar{}$ は近似値であることを示し、 C_1 , C_2 および a , b , δ_0 は発電機特性に合わせて決めるべきパラメータである。また、端子電圧 e_t は無限大母線電圧を基準単位として表わしている。これらのパラメータは、最小自乗法により近似関数が、最ももとの e_t , P_e 式にあうように決めた。

この近似式を用いて、Park の過渡モデルを空間線形化した。以下にここでの空間線形化の手続きと仮定を簡単にまとめる。まず相角の動揺方程式 (10) 式に有効電力の近似式 (21) 式を代入する。さらに、(21) 式中の E_q' に (20) 式を代入して E_q' を消去する。これにより次式が得られる。

$$\frac{M}{\omega_0} \ddot{\delta} + \frac{D}{\omega_0} \dot{\delta} + \frac{b}{C_1 x_e^{C_2} (ax_e + 1)} (E\delta - \delta^2) (e_t - 1) - T_m = 0 \quad (22)$$

さらに、タービントルク T_m の変動は一般にゆっくりしていると仮定できる。また、この値は有効電力 P_e と定常状態では釣り合っているはずである。そこで、発電端電圧の平衡値からの偏差を Δe_t として (22) 式は次式のように書ける。

$$\frac{M}{\omega_0} \ddot{\delta} + \frac{D}{\omega_0} \dot{\delta} + \frac{b}{C_1 x_e^{C_2} (ax_e + 1)} (E\delta - \delta^2) \Delta e_t = 0 \quad (23)$$

さらに、ここで考えている周波数帯域で、AVR は一般的にかなりのハイゲインなので、端子電圧 e_t はほぼ目標値どおりに制御されていると仮定する。実際には遅れが存在するので後で補正が必要である。このように考えると (23) 式の Δe_t を PSS の操作量 u (電圧目標補正量) と同じとみなすことができ、空間線形化可能となる。そこで、平衡点 ($x_e = 0.4$ pu, $\delta = 45^\circ$) において、入力変換を求め空間線形化した、50 万 KW のサイリスタ励磁の火力発電機について得られた線形化モデルは以下のとおりである。

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1.07 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -114 \end{bmatrix} v \quad (24)$$

また、PSS の演算は以下の非線形なものになった。

$$u = \alpha + \beta v \quad (25)$$

$$\alpha = -\frac{B(x_e)}{A(x_e)} \cdot \frac{\delta(0.5 - \cos^2 \delta)}{\delta(\delta - E)} \quad (26)$$

$$\beta = -\frac{2.3}{A(x_e)\delta(\delta - E)} \quad (27)$$

$$v = C_3(\delta - \delta_0) + C_4 \dot{\delta} \quad (28)$$

(C_3 と C_4 は (24) 式に対して設計された線形制御器のパラメータである。)

以上の演算に、AVR の制御遅れを補償するための進み遅れ要素と定常状態における電圧のオフセットを除くためのリセットフィルタを加えて PSS を構成した。

5. 制御性能の評価

設計した PSS の性能評価を計算機シミュレーションにて行った。まず、一機対無限大母線系統のモデル (10) 式から (18) 式に設計した PSS を組み込み、当初の目的を達成する系統インピーダンスや相角に依存しない安定した応答が得られることを確認した。一例として、系統インピーダンス x_e を種々の幅で変えたときの応答例を Fig. 7 に示す。 x_e の小さい通常運転範囲から、従来の PSS では考慮しないような大幅な x_e の変化まで、十分なダンピング性能をもつことが検証できた。特に Fig. 7 (c) の系統インピーダンス増大後の相角 δ の最終安定値からわかるように、相角が 80° を越える従来制御が難しかった領域をも安定して制御できることが特徴である。一方、まったく同じ条件で従来の PSS (Fig. 5 参照方) による計算機シミュレーションを行うと、Fig. 7 (d) のように 1 秒程度で脱調する。

以上の検討はすべて一機対無限大母線系での考察・設計・評価であった。この中でも、多くの近似や遅れを無視して設計したものが、近似のないもとの動特性モ

(a) x_e : from 0.2 pu to 0.3 pu (with nonlinear PSS) (b) x_e : from 0.2 pu to 0.8 pu (with nonlinear PSS) (c) x_e : from 0.2 pu to 0.9 pu (with nonlinear PSS) (d) x_e : from 0.2 pu to 0.9 pu (with conventional PSS)Fig. 7 System responses for impedance (x_e) step changes

Fig. 8 3-machine power system model

デルに対して有効なことが示されたのであるから、設計した PSS のある程度のロバスト性がいえていることにはなる。しかし、実際の電力系統は多数の発電機を含む多機系である。したがって、実用的な PSS であるためには、多機系において十分な系統安定化性能が要求される。また、一機無限大母線に換算した相変角や系統インピーダンス(以下、単に相変角、系統インピーダンスと呼ぶ)は実際には測定することのできない仮想上のパラメータである。したがって、この PSS を実用化するには相変角と系統インピーダンスの推定方法を付加する必要がある。そこで、発電機の動揺方程式に基づき相変角のオブザーバを設計し、また、有効・無効電力や発電端電圧な

Fig. 9 system response for 3-line faults

ど測定できる諸量と、系統インピーダンスの関係式から系統インピーダンスを推定する推定器を開発した。これを、前章に述べた PSS と組み合わせることにより、実機に組み込み可能な PSS を構成した。このシステムを電力系統シミュレータに組み込み、多機系における電力安定化性能を検証した。検証に用いた電力系統モデルは、Fig. 8 に示す 3 機系 + 無限大母線系統である。そのときの、応

答例を Fig. 9 に示す。この例では、発電機 2 にここで設計した空間線形化を用いた非線形 PSS を、ほかの発電機には従来型の PSS が設けられている。シミュレーション条件は、3 線地絡発生後 5 サイクルで故障回線を解放したときの応答であり、この図には発電機 2 と発電機 1 の有効電力と端子電圧の応答を示す。この一連の解析をとおして、このような実際に即した設定でも、電力の安定化を達成することができることを確認した。

6. おわりに

幾何学的アプローチによる非線形システム論の 1 成果である State-space linearization を PSS の設計に用いた。その際、少なくとも平均的動作状態では従来の PSS と同程度のロバスト性を保証し、かつ、従来の PSS からの変更を容易にするために、厳密に線形化後の線形システムが平衡点近傍でのヤコビアン線形近似になるように、入力変換を求め(空間線形化)、さらに、空間線形化できるクラスを拡大するためにヒューリスティックな近似を導入した。

以上の工夫により、一機対無限大母線系の動特性方程式が空間線形化可能となり、相差角や系統インピーダンスに代表される電力系統の状態によらず常に十分なダンピング性能をもつ Power System Stabilizer が得られた。この制御性能は一機対無限大母線系の計算機シミュレーションにて確認した。さらに、設計した PSS を実用に供するためには相差角や系統インピーダンスの推定器が必要である。そこで、これらの機器を付加して、実際に使用される場面を模擬した多機系の計算機シミュレーションにより、その実用性を検証した。

参 考 文 献

- 1) J. H. Anderson: The Control of a Synchronous Machine Using Optimal Control Theory, PROC. IEEE 59-1, 25/35 (1971)
- 2) A. R. Daniel, et al.: Linear and Nonlinear Optimization of Power System Performance, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-94-3, 810/818 (1975)
- 3) S. J. Chen, et al.: Damping of Multi-Modal Oscillations in Power Systems Using a Dual-Rate Adaptive Stabilizer, IEEE Transactions on Power Systems PS-3-1, 101/108 (1988)
- 4) 貝津弘幸: 最適手法による電力系統の多変数制御系構成問題における最適解の存在条件, 電学論 C-111-5, 181/186(1991)
- 5) R. Marino: An Example of a Nonlinear Regulator, IEEE Transactions on Automatic Control, AC-29-3,

276/279 (1984)

- 6) A. Ishidori: Nonlinear Control Systems: An Introduction, Spring-Verlag (1989)
- 7) C. Reboul, et al.: A New Method for Linearizing Non-Linear Systems: The Pseudo-Linearization, Int. J. Control, 40, 631/638 (1984)
- 8) W. T. Baumann, et al.: Feedback Control of Nonlinear Systems by Extended Linearization, IEEE Trans., AC -31, 36/40 (1986)
- 9) R. H. Park: Two Reaction Theory of Synchronous machine-I, AIEE Transaction, 48 (1929)
- 10) E. W. Kimbark: Power System Stability: Synchronous Machines, Dover Publications (1956)

[著 者 紹 介]

高 木 康 夫 (正会員)

1980 年、京都大学工学部原子核工学科修士課程修了。同年(株)東芝に入社。87 年ワシントン大学システム科学・数学科修士号取得。以降、非線形制御理論を応用した制御系開発に従事し現在に至る。電気、機械、システム制御情報学会などの会員。

曾我部 敏 明

1974 年、早稲田大学電気工学科卒業。同年(株)東芝入社。現在に至る。発電機励磁制御、水力発電制御開発に従事。日本電気学会の会員。

平 山 開一郎

1970 年、北海道大学電気工学科卒業。同年(株)東芝入社。現在に至る。発電機励磁制御システム、原子炉給水・再循環流量制御システムなどの開発に従事。日本電気学会、火力原子力発電協会などの会員。

重 政 隆 (正会員)

1972 年、早稲田大学大学院電気工学科修士課程修了。同年(株)東芝に入社。総合研究所においてシステム制御技術の研究開発に従事。85 年計測自動制御学会論文賞受賞。現在、研究開発センタ、機械・エネルギー研究所研究主幹。システム制御情報学会、電気学会、IEEE、CSS などの会員。