リアプノフ関数を用いた電力システムの オンライン過渡安定度評価の一手法

正員 平 良 栄 吉 (三菱電機)

正員 宮 城 隼 夫 (琉球大学)

正員 山 下 勝 己 (琉球大学)

A Method of Transient Stability Estimation for Power Systems by Lyapunov Function

Eikichi Taira, Member (Mitsubishi Electric Corp.), Hayao Miyagi, Member, Katsumi Yamashita, Member (Ryukyu University)

The power system stability problem has been one of the major subjects concerning power system engineering, and is becoming much more significant today in accordance with increasing size and complexity of interconnected power systems. In this problem, it is well known that the direct method of Lyapunov is the most suitable method of on-line transient stability estimation for power systems, and several different techniques have been proposed for the construction of Lyapunov functions up to this time. However, the effectiveness of these Lyapunov functions for power systems have been demonstrated using only digital computer simulations.

The purpose of this paper is to construct microprocessor-based on-line transient stability estimation system using Lyapunov function constructed by the Lagrange-Charpit method and estimate the transient stability of a microalternator connected to a large system. The experimental results show that this system can act satisfactorily for estimating the transient stability of the power system.

キーワード：電力系統, リアプノフ関数, オンライン過渡安定度評価, 位相差測定, オイラー法による予測

1. ま え が き

電力系統は需要の増大に伴い年々巨大化・複雑化してきているが、最近はこれに加えて公害問題など社会情勢からの制約のため、取得できる電源用地や送電ルートも限定され電源の大容量化・遠隔化の傾向も避けがたい情勢になってきている。このため、少数の大容量発電所と送電線による大容量長距離送電を余儀なくされ、系統計画あるいは系統運用の段階において、系統安定度に関する問題が一層重要性を増すようになってきている。

電力系統の過渡安定度解析に対する手法としては、一般に次の二つに分類することができる。一つは故障発生瞬時から故障回線遮断に至るまでの動揺状態をス

テップバイステップに解き、系統の最終形態が安定を保持するように臨界故障除去時間を得る方法である。そのためには、故障継続時間を想定してシステムの最終形態突入後の発電機の動きを長時間にわたって調査し安定・不安定を判別する必要があるうえ、計算打ちりの是非についてもかなりの経験と適切な判断が要求される。この方法に対し、系統の安定性のある評価関数との相対関係を通して判定するという方法がある。リアプノフの直接法はこれに類するもので、系統の最終形態へ突入するまでの過渡状態を求め、最終形態突入瞬時における各状態量を把握するだけでその後の系統の動向を知ることができ、計算時間の大幅な短縮が図れると同時に計算打ちりによる誤判定を回避することができる。

電力系統におけるリアプノフ関数構成法としては、Gless⁽¹⁾あるいはEl-Abiadら⁽²⁾のエネルギー関数、Siddiquee⁽³⁾による物理的概念に基づく構成法、またZubovの偏微分方程式を解く構成法、特に、Yuら⁽⁴⁾およびDeSarkarら⁽⁵⁾によるZubovによって提案された級数解の近似解を用いる方法が挙げられる。更に、Pai⁽⁶⁾らによって提案されたリアプノフ関数あるいはその時間導関数などの形式をあらかじめ未定係数含みで仮定し、関数のもつべき性質を制約条件として係数選定を行い構成する方法、また著者らによって提案されたラグランジュ・シャルピ法を基盤とする構成法⁽⁷⁾などが挙げられる。しかしながら、これらの関数の有効性の検証については計算機シミュレーションにより行われるものがほとんどで、実機モデルへ適用しその関数の有効性を検証した論文は著者らが知るところでは見当たらない。実際、リアプノフ関数を用いて実機モデルのオンライン過渡安定度評価を行うには次の二つの大きな問題が生じる。

(1) リアプノフ関数を評価するのに状態変数を測定しなければならないが、特に十分な測定精度をもつ位相差測定装置を構築しなければならない。

(2) リアプノフ関数を計算するのに必要な処理時間および遮断器を動作させるのに必要な動作時間が存在するので、これらの時間遅れを十分考慮しなければならない。

本論文では、電力系統のオンライン過渡安定度評価を行うため位相差測定装置を構築しその有効性を検証すると共に、リアプノフ関数を計算するのに必要な処理時間および遮断器を動作させるのに必要な動作時間の遅れを補正するため、オイラー法によるリアプノフ関数の予測値を算出し過渡安定度評価に適用する。また、計算機シミュレーション結果と実験室の小形機による実験結果との比較検証を行うことにより本方式の有効性を示している。

2. オンライン過渡安定度評価システム

本実験に使用したシステムの全景を図1に、また提案するオンライン過渡安定度評価システムの概要図を図2に示している。図2に示すように、一機-無限大母線系統が本実験室の小形機を含む模擬電力系統により構成されている。小形機は、5.5 kWの直流電動機および3 kWの交流発電機で構成され、直流電動機により交流電動機が駆動される。また、直流電動機速度制御については直流電動機の端子電圧をサイリスタ制御することにより行われる。このとき、交流発電機と無限大母線を示すシステム（沖縄電力）とが100

図1 本システムの全景

Fig. 1. A photograph of the whole system.

図2 オンライン過渡安定度評価システム

Fig. 2. On-line transient stability estimation system.

km 模擬した二回線送電線を通じて連系されている。ここでは、二回線送電線の一回線上 A 点において、すなわち、発電機母線端から全長の四分の一地点に三相短絡故障を想定し、この故障回線の除去をリアプノフ関数を用いて自動的に行うものである。その際、リアプノフ関数を評価するのに状態量として位相差 δ 、速度 ω および機械的入力 ΔP_m を観測する必要がある。速度については直流タコジェネレータの出力量を、また機械的入力についてはトルクメータの出力量 τ の観測値を利用し、位相差については十分な測定精度をもつ位相差測定回路を構築することによりその出力量を利用する。なお、リアプノフ関数の計算には、16 ビットマイクロプロセッサ i80286 を内蔵したパーソナルコンピュータ PC-9801 VX 41 を用いている。

〈2・1〉 位相差測定装置の構築 内部誘起電圧 E_q' と無限大母線電圧 E_b 間の位相差 δ を測定するには、 E_q' と E_b の電圧波形をそれぞれ測定しなければならないが、 E_q' は仮想電圧であるため利用することはできない。ここでは、 E_q' と同位相の電圧波形を得るため、回転軸に交流発電機と同極数をもつ交流タコジェネレータ (ACTG) を取付けその出力電圧を利用する。このとき、ACTG と E_b との電圧波形を図示すると

図3 位相差
Fig. 3. Phase angle.

図4 波形整形
Fig. 4. Wave arrangement.

図3のようになるが、便宜上、ここでは ACTG の出力電圧を E_q' と記述している。図3から明らかなように、 E_q' の電圧を基準波としその半周期を T 、また E_q' と E_b 間の時間差を t とすると位相差 δ は次式で与えられる。

$$\delta = 180 \frac{t}{T} \quad (\text{deg}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

それゆえ、図4のように E_q' の正の半波と E_b の負の半波をそれぞれ矩形波に整形し、また、この二つの矩形波を AND ゲートに通すことにより E_q' と E_b との位相差部を得ることができる。なお、位相差には図5に示すように E_q' に対して進みと遅れが存在するが、 E_q' と位相差部の立上りを観測することにより位相の

(a) 位相遅れ

(b) 位相進み

図5 基準波に対する進みと遅れ
Fig. 5. Lagging phase and Leading phase.

図6 位相差測定装置の構成図
Fig. 6. Block diagram of phase angle detector.

進みと遅れを判断することができる。図6には、提案する位相差測定装置の構成図を示す。本装置は波形整形部、カウンタ部およびスイッチング部の3部分から構成されている。まず、波形整形部では E_q' と E_b の電圧のグラウンドレベルが異なるため変圧器を用いて絶縁と降圧を行い、IC(TCA 780)で波形を矩形波に整形する。また、発振回路から得られるパルス列を基準波と位相差部に加える。次に、カウンタ部では波形整形部で得られたパルス列をカウントするカウンタとそ

図 7 カウンタ信号および制御信号
Fig. 7. Counter and control signals.

表 1 三相電源の位相差
Table 1. Phase angle of three phase power source.

真 値 (deg)	180.0	120.0	60.0	0.0	-60.0	-120.0
測定値 (deg)	179.8	120.2	60.0	0.0	-59.5	-119.7

の値をラッチおよびクリアする制御信号生成部からできており、そのタイムチャートは図7となる。なお、カウンタは12 bit の二進カウンタではあるが、位相差部のパルス列をカウントするカウンタ2の最上位 bit は、位相の進み遅れを区別する符号 bit として用いるため、実際には11 bit カウンタとして使用する。更に、スイッチング部ではパーソナルコンピュータの保護のためホットカプラを用いた絶縁形のデジタルインタフェースカードを取付けているので、カウンタ出力の TTL レベルを昇圧するためのトランジスタスイッチ回路を設けている。

上記で示したように波形整形部、カウンタ部およびスイッチング部を構成し、更にカウンタ部の出力をパーソナルコンピュータに取込むことにより位相差を次式のように求めることができる。

$$\delta = 180 \frac{n_2}{n_1} \text{ (deg)} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 n_1 : カウンタ1のカウント数、 n_2 : カウンタ2のカウント数

図6に示す位相差測定装置の有効性を検証するため、三相電源の線間電圧を測定したのでその結果を表1に示す。表1から明らかなように、本装置により測定された位相差は真値との誤差が0.5度以下であることから、位相差測定装置として十分な測定精度をもっていることがわかる。

表 2 システムパラメータと定格値
Table 2. System parameters and rated values.

S_B	3.0 kW	E'_g	1.298 pu
V_B	220 V	E_b	0.9545 pu
I_B	7.8 A	X'_d	0.59 pu
Z_B	16.28 Ω	Z_1	0.0344 + j0.181 pu
M	6.67 sec	T_d	0.0731 s
D	9.84 pu	K_d	0.1927 pu

〈2・2〉 システム方程式とシステムパラメータ

電力系統の動特性式は、故障前、故障中および故障除去後（最終形態）とでその記述が異なるが、ここではリアプノフ関数の構成上必要な最終形態の動特性式のみを記述する。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{M}\omega - \frac{\omega_0}{M}\{P_e(\delta) - P_m\} \\ \Delta \dot{P}_m = \{K_g \omega - \Delta P_m\} / T_g \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$P_e(\delta) = \frac{E_g'^2}{Z} \cos \phi + \frac{E_g' E_b}{Z} \cos(\delta + \phi)$$

であり、 Z および ϕ は直軸過渡リアクタンス X'_d と線路インピーダンス Z_1 との和のインピーダンスの大きさとインピーダンス角を意味する。

模擬電力系統の各パラメータおよび定格値については表2に示す。 S_B 、 V_B および I_B は、それぞれ発電機の定格容量、定格電圧および定格電流であり、 Z_B は基準インピーダンスである。なお、他の諸記号の詳細な説明については付録に示す。

〈2・3〉 リアプノフ関数構成とその予測法

リアプノフの直接法によれば、系統の最終形態突入時における各状態量を把握するだけで、その後の系統の安定判別を行える利点がある。それゆえ、リアプノフの直接法は、電力系統のオンライン過渡安定度評価に最も適した手法と考えられる。電力系統に対するリアプノフ関数構成法には、これまで種々の方法が提案されているが、ここでは、ラグランジュ・シャルピ法に基づくリアプノフ関数⁽⁷⁾、すなわち関数構成が系統的に行え、また、安定領域の拡張につながる新しい項をもつリアプノフ関数を採用する。

電力系統の動特性式は一般に次式の様な非線形オートノマス系として記述することができる。

$$\dot{x} = f(x), f(0) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 x : n 次元のベクトル関数、 $x=0$:

平衡点

ラグランジュ・シャルピ法によれば、(4)式に対す

るリアプノフ関数 V は次式の偏微分方程式を解くことによって求められる。

$$F(\mathbf{x}, V, \mathbf{P}) = \mathbf{P}^T \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \phi(\mathbf{x}) = 0 \quad \dots\dots (5)$$

ここで、 $P=\partial V/\partial x$ であり、 ϕ は後に決定される任意の非負値関数である。

(5)式を解くための特性微分方程式は

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{\partial F / \partial P_1} &= \frac{dx_2}{\partial F / \partial P_2} = \dots = \frac{dx_n}{\partial F / \partial P_n} \\ &= \frac{dV}{P_1 \frac{\partial F}{\partial P_1} + P_2 \frac{\partial F}{\partial P_2} + \dots + P_n \frac{\partial F}{\partial P_n}} \\ &= \frac{-dP_1}{\frac{\partial F}{\partial x_1} + P_1 \frac{\partial F}{\partial V}} = \frac{-dP_2}{\frac{\partial F}{\partial x_2} + P_2 \frac{\partial F}{\partial V}} \\ &= \dots = \frac{-dP_n}{\frac{\partial F}{\partial x_n} + P_n \frac{\partial F}{\partial V}} \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

で与えられ、このとき $\partial F/\partial x_1, \partial F/\partial x_2, \dots, \partial F/\partial x_n$ はそれぞれ $\partial \phi/\partial x_1, \partial \phi/\partial x_2, \dots, \partial \phi/\partial x_n$ を含む。

上式より，少なくとも P の一つの成分を含む $n-1$ 個の式

$$\left. \begin{aligned} G_1(x, V, P, \partial\phi/\partial x) &= 0 \\ G_2(x, V, P, \partial\phi/\partial x) &= 0 \\ \dots\dots\dots \\ G_{n-1}(x, V, P, \partial\phi/\partial x) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

が導出されるならば、この G と (5) 式の F が共通解を有するためには

$$[G_i, F] = \sum_{k=1}^n \left[\frac{dG_i}{dx_k} \frac{\partial F}{\partial P_k} - \frac{dF}{dx_k} \frac{\partial G_i}{\partial P_k} \right] = 0 \dots\dots\dots (8)$$

ただし, $i=1, 2, \dots, n-1$

が成立しなければならぬ。ここで、 $[G, F]$ が P の関数ならば、更に $[G, F]=G$ と置き、このすべての G が F と共通解をもつようにする。従って、未知関数 $\partial\phi/\partial x$, ϕ は次のヤコビの括弧式が零になる条件

$$[G_p, G_q] = \sum_{k=1}^n \left[\frac{dG_p}{dx_k} \frac{\partial G_q}{\partial P_k} - \frac{dG_q}{dx_k} \frac{\partial G_p}{\partial P_k} \right] = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$[G_s, F] = \sum_{k=1}^n \left[\frac{dG_s}{dx_k} \frac{\partial F}{\partial P_k} - \frac{dF}{dx_k} \frac{\partial G_s}{\partial P_k} \right] = 0$$

ただし, $p, q=1, 2, \dots, \max(s), s>n-1,$

$$p \neq q$$

を満足し、かつ ϕ が非負値関数となるように決定される。 ϕ はその非負値性の証明の容易さから x に関する二次形式の項を含むことが望ましいので、 $[G_i, F] = G$ の置き換えは (9) 式の偏微分方程式が ϕ についての 2 階偏微分形を含むまで続けられる。

ϕ が決定されたあと、もし(5), (7)式から

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}(\mathbf{x}, V) \dots\dots\dots (10)$$

として求められるならば

$$\mathbf{P}^T d\mathbf{x} = (\nabla V)^T d\mathbf{x} \dots\dots\dots (11)$$

は積分可能であり，所望のリアプノフ関数 V とその時間微分 $\dot{V}$ は

$$V(x) = \int_0^x P^T dx \dots\dots\dots (12)$$

$$\dot{V}(\mathbf{x}) = -\phi(\mathbf{x}) \dots\dots\dots (13)$$

として与えられる。

上記の手順に従い、(3)式に対するリアプノフ関数を構成する次式となる。

$$\begin{aligned}
V(\delta, \omega, \Delta P_m) = & \frac{1}{2} \{ \omega + \alpha k(\delta) \}^2 \\
& + \frac{1}{2} \alpha (1 - \alpha) k(\delta)^2 + \int_{\delta_0}^{\delta} h(\delta) d\delta \\
& + 2\sqrt{\alpha(1-\alpha)} D/M \int_{\delta_0}^{\delta} \sqrt{h(\delta) \overline{k(\delta)}} d\delta \\
& + \frac{\alpha D}{2b} \left[\sqrt{g} (\delta - \delta_0) - \frac{\Delta P_m}{\sqrt{g}} \right]^2 \\
& + \frac{\Delta P_m^2}{2g} \dots\dots\dots (14)
\end{aligned}$$

ただし、

$$h(\delta) = D\{P_e(\delta) - P_m\} / M$$

$$k(\delta) = D(\delta - \delta_0)/M$$

$$b=1/T_g, g=K_g/T_g, 0 \leq \alpha \leq 1$$

また、その時間導関数は次式となる。

$$\begin{aligned} \dot{V}(\delta, \omega, \Delta P_m) = & - \left[\frac{b + \alpha D/M}{g} \right] \Delta P_m^2 \\ & - \{ \sqrt{\alpha(1-\alpha)D/M} \omega - \sqrt{a h(\delta) k(\delta)} \}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

(14)式で示されるリアプノフ関数を安定度評価に用

図 8 電力系統の安定領域
Fig. 8. Stability boundary for a power system.

いるには、安定限界を与える V の値 $V_{\max}$ を求めなければならないが、(14)式の V は α の選定により異なる安定領域を与える。ここでは、 $V_{\max}$ が最大になる α 、すなわち、 $\alpha=0.62$ を算出し、このときの安定領域を採用する。参考のため、図8には $\alpha=0.0$ および $\alpha=1.0$ の安定領域も示す。なお、本システムに対する安定領域は本来、三次元空間で与えられるべきものであるが、安定・不安定を決定する主要因が δ および ω であることから $\Delta P_m=0$ の断面のみを描いている。図8で示される安定領域内では、リアプノフの安定定理により漸近安定が保証されていることから、領域内を初期値とするシステムの解軌道は、最終的に安定平衡点に収束する。それゆえ、故障などが生じたとき解軌道が $V_{\max}$ に到達するまでに適切な処置、すなわち故障回線の遮断を施せばシステムは脱調することなく安定に至らしめることができる。しかしながら、実際には、リアプノフ関数を計算するのに必要な処理時間および遮断器を動作させるのに必要な動作時間の遅れが存在するので、 V が $V_{\max}$ に到達した時点で遮断信号を出力してもすでに解軌道は安定領域外に進み、必ずしも安定を保証することはできない。ここでは、リアプノフ関数を計算するのに必要な処理時間および遮断器を動作させるのに必要な動作時間の遅れを補正するため、オイラー法によるリアプノフ関数の予測値を

$$V_{(t+T)} = V_{(t)} + \{V_{(t)} - V_{(t-NT_s)}\} T / NT_s \quad \dots\dots\dots (16)$$

で算出し、過渡安定度評価に適用する。上式において、 $V_{(t)}$ は時刻 t におけるリアプノフ関数の値、 T_s はサンプリング時間、 T はリアプノフ関数を計算するのに必要な処理時間および遮断器を動作させるのに必要な動作時間のトータル時間を意味する。なお、 N については $T/NT_s \approx 1$ となるように選ぶ。

3. 結果および考察

電力システムのオンライン過渡安定度評価システムの有効性を検証するために、図2に示す一機-無限大母線系統を対象とした計算機シミュレーションおよび実機モデルの実験結果を比較する。このとき電力系統の運転条件は、位相差 $\delta_0=0.35$ rad、速度 $\omega_0=60 \pi$ rad/s および機械的入力 $P_{m0}=0.67$ pu である。なお、安定度評価を行うリアプノフ関数としては、ラグランジュ・シャルビ法によるリアプノフ関数を採用する。また、 δ 、 ω および ΔP_m を観測するサンプリング時間 T_s は 4 ms であり、リアプノフ関数を計算するのに必要

図9 計算結果による $V-t$ 特性
Fig.9. $V-t$ characteristic for computer simulation.

図10 実験結果による $V-t$ 特性
Fig.10. $V-t$ characteristic for experimental result.

な処理時間および遮断器を動作させるのに必要な動作時間のトータル時間 T は 30 ms であることから、(16)式の N は 8 として実行する。

図9および図10は、提案するオンライン過渡安定度評価システムを用いて二回線送電線の一回線上A点に想定した三相短絡故障を除去したときの時間対リアプノフ関数値の計算機シミュレーションと実験結果とを示したものである。これらの図において、a点は三相短絡の故障発生点を、b点は遮断信号出力点を、またc点は故障回線の遮断点をそれぞれ示している。なお、実機モデルでは三相短絡故障が瞬時に起こらないことから、計算機シミュレーションを行う際にはこの点を補正するために故障発生瞬時に仮想的負担を考慮する。同図より明らかなように、故障発生後、発電機の加速とともにリアプノフ関数値 V も上昇し、また遮断信号が出力されるb点においても、前述したようにリアプノフ関数を計算するのに必要な処理時間および遮断器を動作させるのに必要な動作時間が存在

(a) 位相差 δ の応答 (b) 速度 ω の応答 (c) 機械的入力 P_m の応答

図 11 計算結果による δ , ω および P_m の応答
Fig. 11. Responses of δ , ω and P_m for computer simulation.

するので V はなお上昇し続けていることが分かる。しかしながら、 c 点においては遮断器が実際動作するので、遮断と同時に V は減少している。

図 11 および図 12 は、計算機シミュレーションおよび実機モデルにより得られた δ , ω および P_m の時間的変化を示したものである。これらの結果から明らかに、計算機シミュレーションと実機モデルによる実験結果とで得られた δ , ω および P_m の時間的変化は非常によく似た傾向がある。また、故障回線除去後のこれらの波形は、安定領域内で適切な処置が施されているので、最終的には新しい平衡点へと収束していくことがわかる。

4. む す び

本論文では、故障回線の除去を自動的に行えるオンライン過渡安定度評価システムをラグランジュ・シャルピ法に基づくリアプノフ関数を用いて構成した。また、本システムの有効性を検証するため 5.5 kW の直

(a) 位相差 δ の応答 (b) 速度 ω の応答 (c) 機械的入力 P_m の応答

図 12 実験結果による δ , ω および P_m の応答
Fig. 12. Responses of δ , ω and P_m for experimental result.

流電動機および 3 kW の交流発電機から構成された模擬電力システムを対象に計算機シミュレーションと実機モデルによる実験結果との比較で行った。本論文の特徴は次の点にある。

(1) リアプノフ関数を評価するのに必要な位相差測定装置を構築し、その有効性を検証した。

(2) リアプノフ関数を計算するのに必要な処理時間および遮断器を動作させるのに必要な動作時間の遅れを補正するため、オイラー法によるリアプノフ関数の予測法を提案した。

なお、一機無限大母線システムを対象に本手法の有効性を検証したが、今後、系統負荷の取扱いが可能な Bergen らの構造保存モデル⁽⁸⁾⁽⁹⁾ の考え方を多機システムに適用し、漸近安定領域の拡張につながる非ルーリエ形リアプノフ関数を構成し、多機システムのオンライン過渡安定度評価システムを構築していきたいと考えている。

最後に、本実験に多大な協力をいただいた OCC

(株) 具志幸人氏および日立エンジニアリングサービス(株) 瑞慶山薫氏に感謝の意を表します。また、本研究は文部省科学研究費(一般研究C)の助成のもとに行われたことを付記し、併せて謝意を表します。
(平成2年4月3日受付, 同2年7月10日再受付)

E_b : 無限大母線電圧
 X_d' : 直軸過渡リアクタンス
 Z_1 : 一回線の線路インピーダンス
 T_o : 調速機系時定数
 K_o : 調速機系利得

文 献

- (1) G. E. Gless: "Direct method of Lyapunov applied to transient power system stability", *IEEE Trans Power Apparatus Syst.* PAS-85, 159(1966)
- (2) A. H. El-Abiad & K. Nagappan: "Transient stability region of multimachine power systems", *ibid.*, PAS-85, 169(1966)
- (3) M. W. Siddiquee: "Transient stability of an a. c. generator by Lyapunov's direct method", *Int. J. Control*, 8, 131(1968)
- (4) Y. N. Yu, K. Vongsuriya: "Nonlinear power system stability study by Lyapunov function and Zubov's method", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-86, 1480(1967)
- (5) A. K. De Sarkar, N. Dharma Rao: "Zubov's method and transient-stability problems of power systems", *Proc. Instn. Elect. Engrs*, 118, 1035(1971)
- (6) M. A. Pai, M. Ananda Mohan, J. Gopala Rao: "Power system transient stability regions using popov's method", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-89, 788(1970)
- (7) H. Miyagi, T. Taniguchi: "Lagrange-Charpit method and stability problem of power systems", *IEE Proc.*, 128, Pt. D, 117(1981)
- (8) A. R. Bergen, D. J. Hill: "A Structure preserving model for power system stability analysis", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-100, 25(1981)
- (9) D. J. Hill & A. R. Bergen: "Stability analysis of multimachine power networks with linear frequency dependent loads", *IEEE Trans. Circuits Syst.*, CAS-29, 840(1982)

付 録

諸記号の説明を以下に示す。

M: 慣性定数
D: 制動係数
 E_o' : 内部誘起電圧

平 良 栄 吉 (正員)

昭和40年12月12日生。平成2年3月琉球大学大学院修士課程修了。同年4月三菱電機(株)入社、現在に至る。

宮 城 隼 夫 (正員)

昭和24年2月11日生。53年3月大阪府立大学大学院博士課程修了。52年琉球大学工学部助手、57年同大学工学部助教授、62年同大学工学部教授、現在に至る。工学博士。主として、システムの安定論に関する研究に従事。

山 下 勝 己 (正員)

昭和27年2月20日生。55年3月大阪府立大学大学院博士課程単位取得修了。57年琉球大学工学部助手、62年同大学工学部助教授、現在に至る。工学博士。主として、電力システムの負荷周波数制御、信号処理に関する研究に従事。