UDC 621.311.1.016.352

論文

58-B15

過渡エネルギー関数の拡張と電力系統の安定性解析

正員 近藤 修 (室蘭工業大)
 正員 奥寺 祐直 (室蘭工業大)
 正員 大窪 協 (室蘭工業大)
 正員 藤原 一 (北海道大)

1. ま え が き

近來電力系統における発電機単機容量の増加の傾向は著しく、また長距離大電力送電線も不可避免的に採用されつつある。このような大容量発電機や送電線路に発生する電力動揺や事故による系統からの突発的な脱落が全系統へ波及する影響は重大となり、より効果的な動揺抑制法や安定性向上対策が要求され、これを満足すべく各種の制御装置はますます高速化し精密化されつつあり、また種々の安定化装置も活発に開発、実用化されている。これらの設備の採用により、系統の動特性を記述する数学的モデルは複雑化、高次元化し、安定性評価の困難さも増大している。

非線形システムの安定性評価にはリアプノフの直接法が有効であるとして広く用いられ、電力系統に関しても、一般的な V 関数の構成および安定領域の決定について多くの研究がある⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。しかし、システム次元の増加と共に具体的な V 関数構成の困難さは急速に増大し、いわゆる“鋭い V 関数”を見出すための労力は多大となり、システムモデルの僅かな変更にも新たな取扱いが必要となる。従って、低次元レベルでの V 関数法と同程度の簡便さをもって、高次元電力系統の安定性評価が可能であれば、その益する所は大きいと思われる。

本論文では、1機無限大母線系における発電機、原動機およびその制御系や送電側設備を含めて、比較的实际に近い高次元非線形モデルの大域安定性の簡便な

評価のため、従来の過渡エネルギー関数⁽⁶⁾⁽⁷⁾を形式的に時変形に拡張し、その若干の性質を明らかにすると共に、臨界故障時間による安定解析例について述べている。この拡張過渡エネルギー関数は発電機軸の二次元動揺モデルに対する位置エネルギーを、制御系などの動作による発電機入出力の時間的変化を加味するように変形したもので、一般的に V 関数の条件をみたしてはいないが、これによって解の有界性や漸近安定条件が導出でき、制御系などの動作を含めて発電機の安定領域が二次の位相面上で決定できるという特徴がある。

以下、本文においては、この新関数の構成、解の有界および収束条件などを取扱い、臨界故障時間の数値解析例などによって本手法の有効性を検証する。

2. 拡張過渡エネルギー関数

〈2・1〉 拡張過渡エネルギー関数の構成 本文において対象とする系統は、図1に示すように1機無限大母線系統であり、原動機、発電機および送電線側には入出力制御装置として調速機、自動電圧調整装置および系統安定化装置などが設備されているものとする。この系の動的挙動を記述する式は、発電機の機械的動揺を表現する(1)と(2)式および送電線側を

図1 システム構成図

Fig. 1. Configuration of system.

Extension of Transient Energy Function and Stability Analysis of Power System. By Osamu Kondo, Member, Sukenao Okudera, Member, Kyo Okubo, Member (Muroran Institute of Technology) & Hajime Fujiwara, Member (Faculty of Engineering, Hokkaido University).

近藤 修: 正員, 室蘭工業大学

奥寺祐直: 正員, 室蘭工業大学 (現在, 日立製作所)

大窪 協: 正員, 室蘭工業大学

藤原 一: 正員, 北海道大学工学部

含める系統全体の電気的特性と入出力制御系の動作を表現する(3)式と(4)式から成立っている。

$$\dot{x}_1 = x_2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{x}_2 = \{x_i - P_d x_2 - P_0(x_1, x_j)\} / M \dots\dots (2)$$

$$\dot{x}_K = f_K(x_1, x_2, \dots, x_i \dots x_j \dots x_n) \dots\dots (3)$$

$$g_l(x_1, \dots, x_n) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ここで $K=3, 4, \dots, n$ $l=1, 2, \dots, m$

x_1 と x_2 は発電機の内部相差角と角速度を代表し、 x_i と x_j は発電機の機械的入力と過渡リアクタンスの脊後電圧を代表する状態変数とし、 $P_0(x_1, x_j)$ は発電機の電気過渡出力を示す。

(1)～(4)式で記述される系統の大域的安定性評価のため臨界故障時間を用い、その簡易計算のため V 関数を構成し、 n 次元空間において適切な漸近安定領域を決定することは、制御系などが一次や二次要素で表現できるような単純な場合を除いては、特殊な技法や熟練を必要とし、必ずしも容易な仕事ではない。また、このようにして構成された V 関数が、系統各要素の動作を正確に安定性評価に反映するという保証もない。従って、制御系などの構成の如何に関せずある一定形式をもつ安定性評価のための関数と計算アルゴリズムがあり、これによって精度高く臨界故障時間が決定できれば非常に便利である。これらの見地から上記方程式を見ると、系統の安定性に直接関係する発電機軸の動揺を一次的に決定するものは、その入出力エネルギーのバランス式(1)および(2)式であり、(3)と(4)式で表現されるものは、発電機の内部相差角や角速度の平衡状態からの偏差によって動作し、発電機入出力エネルギーの不平衡状態を解消しようとする二次的な働きと見なすことができる。よって、その入出力特性が明確になれば、内部の詳細に立入ることなく、系の安定性に及ぼす効果が発電機の入出力端子の量で評価できよう。更に焦点を発電機の内部相差角と角速度の変動に集めれば、(2)式における x_i と x_j の時間的変化が確定できればよい。一般に(1)～(4)式の解析的に閉じた形での解を求めることは困難であるが、適当な初期条件の下で、現象発生後各瞬時における状態量は n 次元空間内の軌道として、例えば数値解析的に計算可能である。そこで未知の状態量 x_i と x_j がこの軌道に沿って計算確定できたとして、以下のように表現する。

$$p_i(t) = x_i$$

$$p_e(t) = x_j$$

$$P_0(x_1, t) = P_0(x_1, x_j)$$

$$= p_e(t) f_1(x_1) + f_2(x_1)$$

これらの式を用いると(1)と(2)式は

$$\dot{x}_1 = x_2 \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{x}_2 = \{p_i(t) - P_d x_2 - P_0(x_1, t)\} / M \dots\dots (6)$$

と見掛け上非自励形となる。もちろんこれは n 次元空間内の軌道を x_1-x_2 位相面上に投影したものに過ぎない。しかし、以下(5)と(6)式は新安定性評価のための関数構成のためなどに、あたかも非自励系であるかのごとく取扱うことにする。

(5)と(6)式より

$$\frac{dx_1}{dx_2} = \frac{M x_2}{p_i(t) - P_d x_2 - P_0(x_1, t)} \dots\dots\dots (7)$$

更に次式を定義する⁽⁸⁾。

$$dV = M x_2 dx_2 - \{p_i(t) - P_d x_2 - P_0(x_1, t)\} dx_1 \dots\dots\dots (8)$$

この式において $M x_2$ を一般化運動量、 $p_i(t) - P_0(x_1, t)$ を一般化非保存外力とみなして、 x_1-x_2 位相面上で次の積分を実行する⁽⁹⁾。

$$V(x_1, x_2, t) = \int_{x_2: (x_2=0, t)}^{x_2: (x_2=x_1, t)} \int_{x_1: (x_1=0, t)}^{x_1: (x_1=x_1, t)} dV \dots\dots\dots (9)$$

すなわち、次式を得る。

$$V(x_1, x_2, t) = \frac{M}{2} x_2^2 - \int_0^{x_1} \{p_i(t) - P_0(x_1, t)\} dx_1 \dots\dots\dots (10)$$

この式において、右辺第2項の被積分関数は見掛け上時間の関数であるから、従来の位置エネルギーの概念は直接適用できないが、形式上、時変形の二次動揺方程式に拡張したエネルギー積分とみなすことができる。

〈2.2〉 解の有界条件 (10)式で定義された拡張過渡エネルギー関数は視察からも明らかのように、 V 関数の条件を満たしていない。しかし、これを用いれば以下のように解の有界条件を導くことができる。いま、 $t=0$ においてじょう乱が発生し、 $t=t_c$ でその原因が除去されたとする。更にこの時刻以降 x_i と x_j が t_c における値で一定に保持されると仮定したときの、(5)と(6)式の見掛け上の平衡安定点を $(x_{ss}, 0)$ とし、座標の原点をこの位置に移動する。更に $t \geq t_c$ において

$$p_i(t) = p_i(t_c) + p_i'(t)$$

$$p_e(t) = p_e(t_c) + p_e'(t)$$

とおき、(10)式を書直すと次式のように表現できる。

$$V(x, t) = V_c(x) - \int_0^{x_1} \varphi(x_1, t) dx_1 \dots\dots\dots (11)$$

ここで $x = [x_1, x_2]^T$ $\varphi(x_1, t) = p_i'(t) - p_e'(t) f_1(x_1)$

$$V_c(\mathbf{x}) = \frac{M}{2} x_2^2 - \int_0^{x_1} \{p_i(t_c) - P_0(x_1, t_c)\} dx_1 \quad (12)$$

更に(11)式を x_1-x_2 位相面上で、故障除去後の軌道に沿って微分すれば

$$\dot{V}(\mathbf{x}, t) = -P_d x_2^2 - \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{x_1} \varphi(x_1, t) dx_1 \quad (13)$$

となる。ここで $V_c(\mathbf{x})$ は(5)と(6)式において、 $t=t_c$ とおき、かつ $t \geq t_c$ で $p_i'(t) = p_i(t) = 0$ とした場合の見掛け上二次自動系のエネルギー積分であり、この条件の下で、 x_1-x_2 位相面上で原点を囲むある領域内での解の漸近安定性を保証するものである。しかし、(12)式の $\mathbf{x}$ の値は、導出過程より明らかなように、制御系が正常に動作しているときの値、換言すれば、(1)~(4)式の n 次元解軌道の x_1-x_2 位相面上への投影であることが強調される。次に(13)式を t_c から t まで時間積分し、(11)式を考慮して

$$\begin{aligned} \int_{t_c}^t \dot{V}(\mathbf{x}, t) dt &= V_c(\mathbf{x}) - V_c(\mathbf{x}(t_c)) \\ &= - \int_0^{x_1} \varphi(x_1, t) dx_1 \\ &= - \int_{t_c}^t P_d x_2^2 dt \\ &\quad - \int_{t_c}^t \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{x_1} \varphi(x_1, t) dx_1 dt \end{aligned}$$

更に右辺の二重積分を計算し変形して結局

$$V_c(\mathbf{x}) - V_c(\mathbf{x}(t_c)) = - \int_{t_c}^t \{P_d x_2 - \varphi(x_1, t)\} x_2 dt \quad (14)$$

を得る。ここで

$$V_c(\mathbf{x}(t_c)) = \frac{M}{2} x_2^2(t_c) - \int_0^{x_1(t_c)} \{p_i(t_c) - P_0(x_1, t_c)\} dx_1$$

で $t=t_c$ における解軌道先端のもつエネルギーである。さて、 $V_c(\mathbf{x})$ は t_c の値が定まれば、その時点での x_1, x_2 および $p_i(t_c)$ などによって確定されるが、(14)式は $t=t_c$ において、 x_1-x_2 位相面上に投影された(1)~(4)式の解軌道がこの見掛け上の二次自動系のエネルギー積分によってその位置が確定できること、およびこれが右辺の時変積分にも依存することを示している。さて(12)式に従来の V 関数によると同様の手法⁽²⁾を取り入れて、領域 Ω_a を

$$V_c(\mathbf{x}) \leq V M_a \quad (15)$$

$$V M_a = \min \{V_c(\mathbf{x}_c)\} \quad \mathbf{x}_c = [x_c, 0]^T$$

を満足する (x_1, x_2) の集合とする。ここで $\mathbf{x}_c$ は $t=t_c$ における(5)と(6)式の不安定平衡点である。明らかに $V_c(\mathbf{x})$ は領域 Ω_a 内で正定値であり、また $C_i \leq V M_a$ に対して $V_c(\mathbf{x}) \leq C_i$ を満たす領域を Ω_i として $\Omega_i \subset \Omega_j$ ($C_i < C_j$) が成立するから、 $t \geq t_c$ における解軌道先端の座標 $\mathbf{x}$ によって計算される $V_c(\mathbf{x})$ の値の大小は、その座標 $\mathbf{x}$ と $t=t_c$ における見掛け上の安定平衡点との関係位置の遠近を直接示すことになる。従って、(14)と(15)式より

$$V_c(\mathbf{x}) \leq V_c(\mathbf{x}(t_c)) \leq V M_a \quad (16)$$

なる関係があれば、 $\mathbf{x}(t_c)$ が領域 Ω_a 内にある限り、 $t \geq t_c$ において、この点から出発する解軌道はこの領域外へ出ることはない。すなわち時変二次系の(5)と(6)式、従って、(1)~(4)式の解の有界条件として

$$\int_{t_c}^t \{P_d x_2 - \varphi(x_1, t)\} x_2 dt \geq 0 \quad (17)$$

を得る。 $t=t_c$ における Ω_a の境界は $V_c(\mathbf{x})$ と同時に確定される。 Ω_a 領域外へ出た軌道は必ずしも発散するとは限らないが、制御系などが(17)式を満たすよう動作する限り解の有界性は保証できる。よって(17)式は解の有界のための十分条件となっている。

〈2・3〉 解の収束条件

(17)式は系統復旧後の軌道が有界領域内に留まるための十分条件であるが、復旧後の真の安定平衡点への収束については何も示していない。しかし以下のようにこの条件を若干強めることによって、解の漸近安定性を示すことができる。いま

$$w(t) = -\varphi(x_1, t)$$

$$F(x_1) = P_0(x_1, t_c) - p_i(t_c)$$

$$u(t) = w(t) + F(x_1)$$

とにおいて発電機の加減速に焦点をあてると、系統の等価構成線図は図2のように表現でき、(6)式は

$$\dot{x}_2 = \{-P_d x_2 + u(t)\} / M \quad (18)$$

となる。ここで解の有界条件式を強めて

図2 等価構成線図

Fig. 2. Equivalent block diagram.

$$\int_{t_c}^t w(t)x_2 dt \geq 0 \dots\dots\dots (19)$$

とおき、制御系などはこの条件を満たすように動作すると仮定する。 x_1 座標の原点は x_{ae} に移動しているので

$$x_1 F(x_1) \geq 0 \quad (0 \leq |x_1| \leq x_c)$$

更に

$$\begin{aligned} \int_0^{x_1} F(x_1) dx_1 &= \int_{x_1(t_c)}^{x_1} F(x_1) dx_1 \\ &+ \int_0^{x_1(t_c)} F(x_1) dx_1 \geq 0 \end{aligned}$$

$$\text{また } F(x_1) dx_1 = F(x_1)x_2 dt$$

であるから

$$\int_{t_c}^t F(x_1)x_2 dt \geq - \int_0^{x_1(t_c)} F(x_1) dx_1 \dots (20)$$

これを(19)式の辺々に加えて

$$\begin{aligned} \int_{t_c}^t u(t)x_2 dt &\geq - \int_0^{x_1(t_c)} F(x_1) dx_1 \\ &= -\gamma^2(x_1(t_c)) \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

一方(18)式の両辺に x_2 を乗じて t_c から t まで積分し整理すると

$$\begin{aligned} \frac{M}{2} x_2^2(t) + \int_{t_c}^t P_d x_2^2 dt &\leq \gamma^2(x_1(t_c)) \\ &+ \frac{M}{2} x_2^2(t_c) \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

となる。この式の右辺は $t=t_c$ における軌道先端の位置によって定まる有限確定値であるから、十分大きな t についてもこの関係が成立つためには

$$x_2(\infty) = 0 \quad (P_d \neq 0) \dots\dots\dots (23)$$

が満足されねばならない。更に(5)式より

$$x_1(\infty) = \text{const} \dots\dots\dots (24)$$

であり、軌道は x_1 軸上の一点に収束する。その座標は(5)式と(6)式より

$$(dx_2/dt)_{t=\infty, x_2=0} = 0$$

すなわち

$$F(x_1) - \varphi(x_1, \infty) = 0 \dots\dots\dots (25)$$

を満足する平衡安定点 $x_1 = x_{fe}$ であり、これは系統復旧後における制御系の動作を包含する真の収束点となる。条件式(21)は図2の系に対する超安定性⁽¹⁰⁾の条件ともなっている。

以上により、制御系の動作を加味した系統の電氣的および機械的動揺時における有界ならびに窮極の収束条件が導出できた。既に述べたことから、安定領域 Ω_a を決定する(15)式は、系統じょう乱発生瞬時から復旧動作瞬時までに至る制御系動作による発電機入出力

力の時間的変動に伴って変化するものであるから、この時間帯の解軌道に沿って計算されるべきものである。

3. 臨界故障時間の算定法

(3・1) 安定領域の境界

前述のように、系統復旧後解が安定と判定される領域は、事故状態継続中の軌道に沿って計算される拡張過渡エネルギー関数によって評価される。そしてこの関数は制御系などの構成に無関係な形であり、従来の V 関数が制御系モデルなども包含して具体的な対象ごとに個別に決定され、一般的にシステムの高次元化と共にその構成が急速に困難になることと比べて、一定形式の簡便なものになっている。他方 V 関数法においては、所定の V 関数が構成されると、それによって決定される安定領域内より出発する軌道は常に漸近安定性が保証されるという特長を有するに対して、本手法では安定領域 Ω_a が保証されるためには、故障除去後の制御系が(17)式または(19)式に従って動作する必要がある。系統がこれらの条件を満たすか否かの一般的な判定は困難であり、個別に検討する必要がある。そこで本論文では、まずこれらの条件が成立しているとして Ω_a の範囲を考究し、次いで具体的な系統について数値シミュレーションを実行し、厳密な安定領域との関係を明らかにする。

さて、事故発生に引続き制御系は補償動作を開始し、任意の時間後に事故原因が除去されたとする。系統復旧後の真の安定および不安定平衡点を $(x_{fe}, 0)$ と $(x_{se}, 0)$ とすると、制御系の補償動作により、一般的に $x_{ae} \leq x_{fe} < x_{se} \leq x_c$ が成立つから、 $t=\infty$ での真の収束点および発電機入出力を用いる過渡エネルギー関数とその極大値 VM_f が決定する安定領域を Ω_f とすれば、故障継続中における制御系の補償動作は安定性に寄与すると考えられるから、 $\Omega_f \leq \Omega_a$ である。ここで Ω_f または Ω_a の境界を表現する閉曲線は x_1-x_2 位相面上で、それぞれ添字 f と a を付して、以下のようになる(図3)。

$$\begin{aligned} \{x_2\}_f = \pm \left[\frac{2}{M} \int_{x_1}^{x_{fe}} \{p_i(\infty) \right. \\ \left. - P_0(x_1, \infty)\} dx_1 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{x_2\}_a = \pm \left[\frac{2}{M} \int_{x_1}^{x_c} \{p_i(t_c) - P_0(x_1, t_c)\} dx_1 \right]^{1/2} \\ \dots\dots\dots (27) \end{aligned}$$

事故除去後の系統について(1)~(4)式から $p_i(\infty)$ と $P_0(x_1, \infty)$ 、従って、安定領域 Ω_f の境界も直ちに

図 3 安定領域 (Q_a)Fig. 3. Stability region (Q_a).

確定できるが、この領域は従来のエネルギー関数による安定領域⁽⁵⁾に一致している。事故発生と共に(5)と(6)式の解軌道は x_1-x_2 位相面上、第1象限内をこの境界に向かって接近し、最初にこの境界に到達する。事故の継続下でこの軌道は Q_f の境界を超えて進行するが、その後の各時刻ごとに制御系動作を考慮しつつ、事故原因が除去されたと仮定して Q_a の境界を計算する。事故継続中の解軌道の進行速度は Q_a 領域の拡大速度より一般的に大であるが、やがてこの境界と交さる。このとき得られる領域 Q_a が求める安定領域とする。

〈3.2〉 臨界故障時間算定法 以上の論述から、制御系などが(17)式または(19)式を満たすよう動作すると仮定して、臨界故障除去(または再閉路)時間の算定は、従来の V 関数を用いる手法を拡張して概略次のようになる。事故継続中の系統方程式(1)~(4)の積分を実行し、 x_1-x_2 位相面上で解軌道先端が領域 Q_f の境界に到達するまで解計算を進める。軌道先端がこの境界を通過した後は x_i および x_j の時間的変化を考慮しつつ、解計算の各ステップごとに系統が復旧したと仮定して Q_a の境界を計算する。事故中の制御系の補償動作によって、この境界は拡大するが、軌道先端がこの境界に追付く時間を臨界故障時間とする。図4は以上の計算のための流れ図である。

4. 数値解析例

〈4.1〉 系統モデル⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ 臨界故障時間の簡易計算法としての本手法の有効性を検証するため、図5に

図 4 臨界故障時間の計算流れ図

Fig. 4. Flow chart for critical clearing time.

図 5 制御系の構成線図

Fig. 5. Block diagram of control systems.

示すような制御系などの構成について数値解析を実行した。原動機や制御系についてはより複雑な表現⁽¹¹⁾⁽¹²⁾も可能であり、更にボイラーや原子炉などの後背設備の動特性も、必要ならば直ちに考慮に入れることもできるが、それらによる計算手法の流れには本質的な差がないことは前述の所論から明らかである。

さて原動機、発電設備および制御系の数式モデルは以下になる。

調速機・タービン

$$\dot{x}_3 = -(K_g x_2 / \omega_0 + x_3) / T_g$$

$$0 \leq x_3 \leq P_{\max}$$

$$-\dot{P}_{\downarrow} \leq \dot{x}_3 \leq \dot{P}_{\uparrow}$$

$$\dot{x}_4 = (x_4 - x_3)/T_c$$

電圧調整器-安定化装置-発電機界磁巻線

$$\dot{x}_5 = -(E_q + x_6)/T_{d0'}$$

$$\dot{x}_6 = \{K_A(x_7 + V_R - v_i) - x_6\}/T_A$$

$$\dot{x}_7 = \{-x_7 + K_s(1 - T_1/T_W)x_8 + K_s T_1 \dot{x}_2\}/T_2$$

$$\dot{x}_8 = -x_8/T_W + \dot{x}_2$$

$$-V_{R\min} \leq x_6 \leq V_{R\max}$$

$$|V_{SL}| \geq x_7$$

発電機-送電線

$$E_q = x_5 + (x_d - x_d')i_d$$

$$i_d = (x_5 - v_d)/(x_d' + x_i + x_{i1})$$

$$i_q = v_q/(x_d' + x_i + x_{i1}) \quad (x_d' = x_q)^{(14)}$$

$$v_i = \{(x_5 - x_d')i_d + (x_d' i_q)^2\}^{1/2}$$

$$v_d = v \sin x_1 \quad v_q = v \cos x_1$$

$$x_{i1} = \begin{cases} 0 & (\text{三相短絡時}) \\ x_i & (\text{一回線送電時}) \\ x_i/2 & (\text{二回線送電時}) \end{cases}$$

なお発電機回転子は円筒構造とし、電気出力の過渡突極成分は無視している。表1は数値解析に用いた系統各構成要素の定数であり、主要パラメータのいくつかについてはこれらの値を基準にして変動させている。また本文に用いられている記号は以下の意味をもち、特に指摘しないかぎり単位法で表現している。

E_q : 発電機内部誘起電圧, v_i : 発電機端子電圧, V_R : 電圧調整器基準電圧, v, v_d, v_q : 無限大母線電圧とその直軸および横軸成分, i_d, i_q : 発電機電機子電流の直軸および横軸成分, x_d' : 発電機過渡リアクタンス, x_i : 変圧器リアクタンス, x_{i1} : 送電線リアクタンス, $T_{d0'}$: 発電機界磁開路時定数, K_s, T_s : 調速機利得および時定数, T_c : タービン時定数, K_A, T_A : 電圧調整器利得および時定数, K_s, T_1, T_2, T_W : 系統安定化装置利得および時定数, $P_{\max}$: 調速機操作量の上限度, $\dot{P}_{\text{up}}, \dot{P}_{\text{down}}$: 調速機動作速度の上, 下限度, $V_{R\max}, V_{R\min}$: 界磁電圧の上, 下限度, V_{SL} : 系統安定化装置出力信号の制限値, M : 発電機慣性定数, ω_0 : 系統角周波数

<4.2> 数値解析結果 故障条件は送電線引出口

表 1 系統要素の諸定数

Table 1. Constants of system elements.

$x_d' = 0.25$	$x_i = 0.25$	$x_{i1} = 1.0$	$P_d = 0.01$
$T_{d0'} = 5.0$	$M = 0.012$	$K_g = 20.0$	$T_g = 0.1$
$T_c = 0.1$	$K_A = 10.0$	$T_A = 0.05$	$T_1 = 0.15$
$T_2 = 0.015$	$T_W = 1.6$	$P_{\max} = 1.2$	$\dot{P}_{\text{up}} = 0.1$
$\dot{P}_{\text{down}} = 1.0$	$V_{SL} = 0.1$	$V_{R\max} = 7.0$	$x_i(0) = 0.7$
$E_q'(0) = 1.1$	$v = 1.0$		

註 数値計算には特記しない限り、この表の数値を用いている。

表 2 臨界再開路時間 (I)

Table 2. Critical reclosing time (I).

		単位 秒							
		10		20		30		50	
P_{down}	K_g T_c	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
0.1		0.26	0.25	0.26	0.25	0.26	0.25	0.26	0.25
		0.27	0.26	0.27	0.26	0.27	0.26	0.27	0.26
0.3		0.33	0.28	0.34	0.28	0.34	0.28	0.34	0.28
		0.34	0.30	0.35	0.30	0.35	0.30	0.36	0.30
0.5		0.40	0.32	0.50	0.33	0.58	0.34	0.73	0.34
		0.40	0.33	0.50	0.36	0.58	0.36	0.73	0.37
1.0		0.50	0.37	*	0.66	*	*	*	*
		0.50	0.37	*	0.66	*	*	*	*

註 上段: 本法値, 下段: 厳密値 無制御時 本法値 0.23秒
*: 1回線遮断で安定 厳密値 0.25秒

表 3 臨界再開路時間 (II)

Table 3. Critical reclosing time (II).

		単位 秒							
		10		50		100		200	
T_A	K_A V_{SL}	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5
0.01		0.36	0.41	0.47	0.54	0.51	0.59	0.54	0.69
		0.37	0.42	0.49	0.56	0.53	0.61	0.56	0.71
0.03		0.35	0.41	0.47	0.53	0.50	0.56	0.52	0.58
		0.36	0.42	0.49	0.55	0.52	0.58	0.54	0.60
0.05		0.34	0.42	0.49	0.55	0.51	0.56	0.52	0.57
		0.35	0.42	0.51	0.57	0.53	0.58	0.54	0.59
0.1		0.32	0.39	0.53	0.61	0.53	0.59	0.54	0.58
		0.34	0.40	0.55	0.63	0.55	0.61	0.55	0.60

註 上段: 本法値 下段: 厳密値

表 4 臨界再開路時間 (III)

Table 4. Critical reclosing time (III).

		単位 秒							
		0.02		0.04		0.06		0.1	
V_{SL}	K_s T_W	0.4	1.6	0.4	1.6	0.4	1.6	0.4	1.6
0.1		0.39	0.40	0.39	0.41	0.39	0.41	0.39	0.42
		0.40	0.42	0.41	0.43	0.41	0.43	0.41	0.43
0.2		0.41	0.43	0.42	0.46	0.43	0.47	0.43	0.60
		0.43	0.45	0.44	0.47	0.44	0.49	0.44	0.61
0.3		0.41	0.44	0.46	0.51	0.47	0.54	0.47	0.60
		0.43	0.45	0.47	0.52	0.48	0.56	0.48	0.61
0.5		0.41	0.44	0.48	0.57	0.53	0.67	0.53	1.07
		0.43	0.45	0.51	0.59	0.54	0.68	0.55	1.08

註 上段: 本法値, 下段: 厳密値

における一回線三相同時短(地)絡を想定し、臨界再開路時間と臨界故障除去(復旧)時間を求めた。前者では故障回線の0.1秒後両端同時遮断再開路まで、後者では故障回線の両端同時遮断または復旧までの時間を取り、何れも動揺1サイクルでの安定限界とした。

表2～表4は臨界再開路時間の計算例であり、それぞれ調速機単独動作、電圧調整器と系統安定化装置の

動作およびこれら全装置の総合動作時について、主要パラメータの影響を検討したものであり、本手法値と系統方程式の直接数値積分による厳密解と比較している。なお、調速機単独動作時には横軸過渡内部電圧 E_q' を一定とし、また調速機単独動作時を除いてはタービン時定数 T は零として計算を実行した。これらの仮定は本手法による安定領域の評価に対して、次節に述べる理由により、一般的に厳しい条件となるものであるが、主要パラメータの比較的広い範囲にわたって、本手法値は厳密値より小さく（負誤差）、その差はほぼ 0.03 秒以下で十分よい精度をもっている。また、結果が負誤差であることは、見積られた安定領域が厳密な領域の内部に包まれることを示しているのであり、実際の系統運用面からも有用となりうることを示している。

表 5 と表 6 は臨界故障復旧（除去）時間を示すもので、それぞれ、制御系の動作は、表 2 と表 3 に対応している。この場合も誤差の絶対値はほぼ 0.03 秒以下であり、実用上十分な精度を示しているが、故障復旧後制御系の復帰速度が著しく早いと考えられるときや、制御量に飽和が生ずる場合は、表にも示したように、正誤差の発生する可能性がある。このような例は再閉路計算時にもあり、何れの場合も誤差の絶対値は十分小さいが、実系統の運用データとして使用するためには検討が必要である。

〈4・3〉 制御系の動作と安定領域 上述の数値解析結果より、拡張過渡エネルギー関数が系統の大域安定性の評価や設計、運用に有効であることが明らかになった。一方、この結果はじょう乱中における制御系の入出力補償動作による大域安定性に及ぼす効果が、じょう乱原因除去の前後で異なることも示している。すなわち、故障継続中は制御系の応答速度とその動作量の大なるほど、復旧瞬時に評価する安定領域は拡大するが、復旧後、特に動揺の 1~2 サイクルの発電機出力特性の非線形性が顕著な期間は、復旧へ向っての制御系動作が、逆に軌道を安定領域外へ逸脱させる傾向にあり、その量が大なるほど不安定性も増加する期間が存在する。この間の事情を漸近安定条件式(19)によって、動揺 1 サイクルでの安定性につき検討してみる。

軌道は x_1-x_2 位相面上で第 1 象限内にあり、 $x_2 > 0$ かつ復旧へ向かう発電機入出力補償分 $w(t)$ の符号は定義によって負である。従って、(19)式は、動揺の 1 サイクル期間について次のように書き改められる。復旧瞬時 t_c からある期間 Δt が存在して、この期間中（添字 d ）および実質的な復旧動作期間（添字 r ）について

表 5 臨界故障除去時間 (I)

Table 5. Critical clearing time (I).

		単位 秒							
T_g	K_g T_c	10		30		50		50*	
		0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
0.01		0.22	0.19	0.22	0.19	0.22	0.19	0.42	0.25
		0.23	0.20	0.23	0.21	0.24	0.21	0.41	0.27
0.05		0.21	0.19	0.22	0.19	0.22	0.19	0.40	0.24
		0.22	0.22	0.23	0.21	0.24	0.21	0.39	0.26
0.1		0.20	0.18	0.22	0.19	0.22	0.19	0.37	0.23
		0.21	0.20	0.23	0.21	0.23	0.21	0.36	0.25
0.5		0.18	0.17	0.20	0.18	0.21	0.18	0.23	0.19
		0.19	0.18	0.21	0.20	0.22	0.20	0.25	0.22

註 上段：本手法値、下段：厳密値、 $x_1(0)=0.6$

無制御時 本手法値 0.16秒

厳密値 0.18秒

* $P_{down}=-2.5$, $P_{up}=1.0$

表 6 臨界故障除去時間 (II)

Table 6. Critical clearing time (II).

		単位 秒							
T_A	K_A T_{dc}	10		50		100		200	
		5.0	3.0	5.0	3.0	5.0	3.0	5.0	3.0
0.01		0.16	0.18	0.17	0.18	0.17	0.19	0.18	0.20
		0.17	0.18	0.17	0.18	0.18	0.19	0.18	0.19
0.03		0.16	0.17	0.16	0.18	0.17	0.18	0.17	0.19
		0.17	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18	0.18	0.18
0.05		0.16	0.17	0.16	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18
		0.17	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18
0.1		0.15	0.16	0.16	0.18	0.16	0.18	0.17	0.18
		0.17	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18

註 上段：本手法値、下段：厳密値、 $x_1(0)=0.6$

$$(i) \quad \{w(t)x_2\}_d \geq 0 \quad (t_c \leq t \leq t_c + \Delta t)$$

$$(ii) \quad \left\{ \int_{t_c}^{t_c + \Delta t} w(t)x_2 dt \right\}_d \geq \left\{ \int_{t_c}^{t_c + \Delta t} w(t)x_2 dt \right\}_r$$

なる条件が成立し、かつ条件 (ii) の下で x_2 の符号が正から負に反転することである。すなわち期間 d が存在し、この期間中制御系による発電機入出力の補償分が零に保たれるか、または復旧前と同一方向の変化を継続する必要がある。特に前者の場合には条件 (i) の下で x_2 の符号が反転することが十分条件となる。このような例として発電機入出力に飽和が生ずるような場合が想定され、例えば蒸気タービンのインターセプト弁を用いる高速バルブ制御法⁽¹⁵⁾などが対象となり、バルブ復旧開始時点や復旧速度の設定に適用可能である。図 6 は前節と同様な調速機単独動作モデルについてのシミュレーション結果であるが、復旧時における応答速度と軌道の安定性の関係が明白である。ただし窮極的な平衡点への収束性については同一な論述は成立せず、一般的には別の動揺抑制方策が必要となる。

図 6 安定性と制御系動作の関係

Fig. 6. Relation between stability and controller action.

前節の数値解析に用いた制御系の動作速度レベルでは、復旧後におけるその入出力特性が、ほとんど有界および漸近安定条件を満足しているが、復旧へ向っての速度が更に十分増大するとき、本手法によって見積られる安定領域は真の安定領域を僅かではあるが包み込む。一方、見掛け上の安定領域 Ω_a は故障継続中の発電機入出力変化に即して評価された量であり、これには復旧時での制御系動作の情報は入っていない。従って安定性問題から見た制御系の性能としては、見掛け上の安定領域の拡大に積極的な役割を果たす故障継続期間とこの領域内から出発する軌道の挙動を決定する復旧期間とに分けて検討する必要がある。特に後者の期間では、領域 Ω_a が真の安定領域内に包まれるか否かを決定するものであり、与えられた系統構成に対する Ω_a の境界より出発する軌道が真の安定領域内に留まるための制御系動作が対象になる。例えば正誤差が生ずるとき、領域 Ω_a を可能な安定領域の一部分集合として見なすことができるから、この期間中の制御系の性能が更に改善の余地があると考え、積極的に制御方策の検討へ進むことができよう。この際拡張過渡エネルギー関数 $V(x, t)$ や $V_a(x)$ 更に有界および漸近安定条件式の利用が期待できる。

5. む す び

二次動揺系の過渡エネルギー関数を見掛け上の時変

形に拡張し、その一部の性質を調べた臨界故障時間による安定性解析例を示した。対象としたのは1機無限大母線系統であるが、得られた結果を概括すると以下のようになる。

- (i) 拡張過渡エネルギー関数の形が制御系や電力設備側に無関係にほぼ同一であり、その構成に特別な考慮を必要としない。
- (ii) 解の有界および漸近安定性に対して制御系に課せられるべき条件が発電機の入出力端子の量で表現でき、これが比較的ゆるやかな積分拘束の形であって、より安定な制御系の設計に利用することが期待できる。
- (iii) 臨界故障（再閉路、除去および復旧）時間が十分精度高く、しかも低次元の V 関数法とほぼ同様の簡便さと、若干の所要計算時間の増加で決定でき、系統構成の変更に対しては解計算の変更のみで、安定性評価や実運用に利用できる。

本論文では発電機端子での入出力特性に焦点をあて、制御系などはブラックボックスとして、その内部構成や動作の細部に立入らなかった。具体的な制御系の構成や動作と解の有界や収束性との関連など、更に一般的な取扱いは本手法の多機問題への拡張や安定化制御問題への適用を含め、今後に残されている課題である。

(昭和56年11月24日受付, 同57年5月31日再受付)

文 献

- (1) Y.N. Yu, et al: *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-86, 12, 1480 (1967)
- (2) M.H. Pai, et al: *ibid PAS-89*, 5/6, 788 (1970)
- (3) H. Miyagi et al: *Proc. Instn. Elect. Engrs.* 124, 12, 1197 (1977)
- (4) T. Athay et al.: *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-98, 2, 573 (1979)
- (5) N. Kakimoto, et al: *ibid PAS-99*, 5, 1819 (1980)
- (6) P.C. Magnusson: *AIEE Trans.* 66, 747 (1947)
- (7) 関根: 電力系統解析理論 328 (1971)
- (8) E.T. Wall, et al: *IEEE Trans. Automat. Contr.* AC-14, 2, 211 (1969)
- (9) D.C. White, et al: *Electromechanical Energy Conversion* 47 (1959)
- (10) 高橋: システムと制御 (下) 418 (1978)
- (11) IEEE Comitee Report: *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* PAS-92, 6, 1904 (1973)
- (12) V.M. Raina: *ibid PAS-95*, 2, 677 (1976)
- (13) IEEE Comitee Report: *ibid PAS-87*, 6, 1406 (1968)
- (14) E.W. Kimbark: *Power System Stability III* 83 (1956)
- (15) 阿部・井上: 火力原子力発電 24, 8, 855 (1973)