エネルギー関数法を用いた過渡安定度解析に関する研究

餘利野直人　造賀芳文　藤原拓真　丸山翔
（広島大学）

1．はじめに

近年、電力系統は大規模・複雑化し、過渡安定性解析の重要性が高まってきている。また、電力自由化によりリアルタイムでの解析の必要性が生じ、高精度で高速な手法が望まれている。これまで過渡安定度解析の手法としては、シミュレーション法とエネルギー関数法があり、状況に応じて使い分けられている。前者は正確に安定度判別を行えるが、計算負荷が大きいという欠点があり、後者はその逆の特徴を持つ。これに対して筆者らは故障後の安定限界に相当する発電機動揺を直接に算出することで安定判別を行う手法を検討してきた[1,2]。この発電機動揺の解析は微分方程式の解（すなわち軌跡）を求める問題であるので、本稿では安定限界に相当する軌跡を臨界軌跡（臨界トラジェクトリー）と定義し、この検討に基づき、新しい過渡安定度解析手法を提案している。

提案法は、過渡安定度解析モデルにおける臨界トラジェクトリーと臨界故障除去時間(CCT)を一括して効率的に求める、従来にない新しい手法である。この手法は非線形システムの安定限界を求める一般的な手法であるが、ここでは電力システムモデルへの応用に際して、エネルギー関数法の一種であるBCU 法に適用し、検討を行う。

2．提案法

提案法は、臨界トラジェクトリーの始点と最終点（不安定平衡点）の条件式を与え、その間を適当な長さで分割することで、従来の時間積分を距離に関する数値積分に変換し、不安定平衡点に至るまでの軌跡を求める手法である。そして、得られた不安定平衡点から臨界エネルギー、CCT を求めることにより系統の過渡安定度を調べる。以下に不安定平衡点までの臨界トラジェクトリーを求める定式化を示す。

<2.1>　臨界トラジェクトリーの差分化

システム方程式が以下のように与えられているとする。

$$\dot{x} = f(x,t) \tag{1}$$

ここで，時刻t^kでの解をx^kとすると，台形公式より次式が成り立つ。

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}\left(\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k\right)\left(t^{k+1} - t^k\right) \tag{2}$$

ここで，kは時間推移を表す。(2)式の両辺のノルムをとると以下のようになる。

$$\left\|x^{k+1} - x^k\right\| = \frac{1}{2}\left\|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k\right\|\left(t^{k+1} - t^k\right) \tag{3}$$

(3)式において$\left\|x^{k+1} - x^k\right\|$は 2 点間の距離を表しているので，これを$\varepsilon$とする。さらに(3)式を以下のように変形することで時間刻みを 2 点間の距離に置き換えることができる。

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2\varepsilon}{\left\|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k\right\|} \tag{4}$$

(4)式を(2)式に代入することで次式を得る。

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{\left\|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k\right\|}\varepsilon = 0 \tag{5}$$

この操作により，時間刻みでの積分が 2 点間の距離に関する数値積分に変換された。(5)式を分割点の数だけ連立して解けば、軌跡を一括して求めることができる。

<2.2>　BCU 法（エネルギー関数法）への適用

いま、通常のBCU法の手順[3]に基づいてExit Point が得られているものとする。ここではExit Pointから不安定平衡点までのPEBS上の臨界トラジェクトリーを得る手法を提案する。このため前節のシステム方程式(1)式として、以下の勾配系(6)式を考える。

$$\dot{\delta} = \frac{\partial V_P(\delta)}{\partial \delta}$$

$$\dot{\delta}_i = P_{mi} - P_{ei}(\delta) - \frac{M_i}{M_T}P_{coa}(\delta) \tag{6}$$

ただし、V_Pはポテンシャルエネルギー　δ_i：慣性中心内部位相角　M_i：慣性定数　P_m：機械入力　P_e：電気入力　$M_T = \sum M_i$　$P_{coa} = \sum(P_m - P_e)$

Exit Point から不安定平衡点までの軌跡を m+1 分割し、(6)式と(1)式より、軌跡上の全ての隣接する 2 点間の関係式を得る。

$$\begin{cases} G_{k+1} = \delta^{k+1} - \delta^k - \dfrac{\dot{\delta}^{k+1} + \dot{\delta}^k}{\left\|\dot{\delta}^{k+1} + \dot{\delta}^k\right\|}\varepsilon = 0, \quad k = 0 \sim m-1 \\ G_{m+1} = \delta^u - \delta^m - \dfrac{\dot{\delta}^m}{\left\|\dot{\delta}^m\right\|}\varepsilon = 0 \end{cases} \tag{7}$$

ここでδ^uは不安定平衡点であるので、δ^u=0 として扱う。次にこの不安定平衡点の条件式として以下の潮流方程式を追加する。

$$G_{m+1+i} = P_{m_i} - P_{e_i}(\delta^u) - \frac{M_i}{M_T}Pcoa = 0, \quad i = 1 \sim n \tag{8}$$

さらに各分割点は以下の位相中心制約を満たす。

$$\begin{cases} G_{m+n+1+k} = \sum M_i \delta_i^k = 0, \quad k = 1 \sim m \\ G_{2m+n+2} = \sum M_i \delta^u = 0 \end{cases} \tag{9}$$

(7),(8),(9)式を一括して次式のように表現する。

$$G(X)=0 \tag{10}$$

$$X=(\delta^1,\cdots,\delta^k,\cdots,\delta^m,\delta^u,\varepsilon) \tag{11}$$

提案法は(10)式に最小二乗法を適用し、NR 法を用いて臨界トラジェクトリーと不安定平衡点を一括して求めるものである。ここで最小二乗法を適用する理由は、(10)式に冗長な方程式が含まれるためである。すなわち、通常微分方程式の軌跡を求める際は初期値のみが必要であるが、ここでは終端点を(8)式として指定している。また、(9)式の慣性中心制約は、(6)式より導かれるので本来であれば必要ないが、最小二乗法により誤差を適切に分配する意味で数値的な安定性に寄与している。

３．シミュレーション

提案法の性能を評価するためWEST30 機系統モデルを用いてシミュレーションを行った。故障条件としては、無作為に選んだ系統内の様々な送電線の母線至近端において３相地絡故障を発生させ、そのときの安定性を調べる。ただし、第１波脱調のみを考慮する。ここでは、シミュレーション法、Shadowingを適用したBCU法(BCU-Shadowing法)、提案法の３つの手法を比較する。シミュレーション法においては、時間刻みを 0.01 秒として 4 次のルンゲクッタ法により数値積分を行っており、故障除去時間を再設定しながら小数点以下２桁の精度までシミュレーションに基づく安定判別を繰り返し、臨界状態を求めている。また、BCU-Shadowing法では刻み幅を 0.01 としてシミュレーションを行っている。提案法については、臨界トラジェクトリーの分割数を１、最大反復回数を 10 とし、収束判定は修正量の最大値<10^{-5}としている。

表１にこれら３つの手法で求めた CCT を示す。これを見ると提案法の結果はほぼ正しいと言える。ここで、エネルギー関数法（BCU-Shadowing 法および提案法）は理論的にシミュレーション法より CCT が控えめに出るという特徴を持っている。しかし、故障点によってはシミュレーション法による値より大きく出ている点が存在する。この誤差は C-UEP からエネルギー値を算出する際の誤差と考えられる。そのため表 1 には、シミュレーション法の方が控えめに出ている場合や誤差が大きい場合について△を記している。

次に、表２にこれら３つの手法に必要となる CPU 時間を示す。表２を見ると、提案法はシミュレーション法・BCU-Shadowing 法と比べても、短時間で解析ができている。これより、提案法の高速性が示されたといえる。

４．おわりに

本稿では、過渡安定度解析を効率化するために、従来法では求めることが難しかった臨界トラジェクトリーを用い、CCT を求める手法を提案した。そして、提案法をエネルギー関数法の一種である BCU 法に適用し、WEST30 機系統で解析を行った結果、その有効性を示した。

表１　CCT の比較
Table 1.　Comparison of Critical Clearing Time

fault point	simulation [s]	BCU-Shadowing [s]	proposed method [s]
A	0.21	0.2275　△	0.1727
B	0.33	0.3224	0.3257
C	0.32	0.2910	0.1599　△
D	0.32	0.2794	0.1606　△
E	0.15	0.0255　△	0.1118
F	0.33	0.3232	0.3258
G	0.42	0.4533　△	0.4561　△
H	0.27	0.2675	0.2467
I	0.21	0.1529	0.2075
J	0.39	0.2847　△	0.4089　△
K	0.32	0.3003	0.3127
L	0.20	0.1849	0.1858
M	0.18	0.1826　△	0.1715
N	0.35	0.3457	0.3500
O	0.38	0.3186	0.4017　△

表２　各手法の CPU 時間
Table 2.　CPU Time for analysis

fault point	simulation [s]	BCU-Shadowing [s]	proposed method [s]
A	4.2	0.5	0.281
B	4.2	0.34	0.280
C	4.2	0.431	0.241
D	4.2	0.35	0.240
E	4.2	0.341	0.230
F	4.2	0.391	0.211
G	4.2	0.201	0.201
H	4.2	0.425	0.218
I	4.2	0.403	0.203
J	4.2	0.391	0.180
K	4.2	0.411	0.231
L	4.2	0.531	0.171
M	4.2	0.459	0.141
N	4.2	0.447	0.188
O	4.2	0.425	0.203

参考文献

[1] 餘利野　直人他,「臨界トラジェクトリーによる過渡安定度判別」，電力エネルギー部門大会, No.156 (2000-8)
[2] 藤井　誠一郎他,「過渡安定度解析に用いる BCU 法の収束特性の改善に関する一考察」，電力技術研究会, PE-00-83, PSE-00-88 (2001-9)
[3] R.T.Treinen, V.Vittal, W,Kliemann: “An Improved Equilibrium Point in a Power System” IEEE Trans. Circuit and Systems, Vol.43, No.4, pp.313-323 (1996-4)