電力系統における過渡安定度解析
—新しいRIDGE法に対する検討—

出口景一*・白井　功**・高橋雅彦**
高野三郎*・入沢壽逸*

A Study of the transient stability analysis in large systems
—The Application of NEW RIDGE Method to multi disterbuns cases—

Keiiti DEGUCHI, Isao SHIRAI, Masahiko TAKAHASHI,
Saburo TAKANO, and Juichi IRISAWA

Present day transient stability analysis is mainly performed by simulations based on a step by step method. This method is very reliable, but it is not suitable for on-line application since a large number of contingencies have to be simulated in a short time.

As a substitute, Lyapunov's direct method was proposed, and many papers have reported on this method. Research has reached some level of a simple model by the PEBS (potential energy boundary surface) method.

The PEBS method gives excellent agreement with actual Tcr (fault crealing time) except for a conservative estimate and pessimistic (over) estimate. In this paper a new approach to the quantitative study of the transient stability of large power systems is presented, using the new method of Lyapunov. A region of asymptotic stability for the postfault system is obtained through the RIDGE theorem.

In this method, fairly accurate results are also obtained for multiswing cases. In this paper, we discuss the RIDGE method for large systems with uniform-damping.

Key words: Lyapunov/Power system/Transient stability analysis

1. 緒　　言

電力系統に関する安定度解析の研究は電算機の発達と共に発展し，定態安定度には固有値法，過渡安定度にはSTEP BY STEP法と，それぞれ強力な手法が開発された．しかし，過渡領域においてオンライン監視など，系統運用時に用いられる高速安定度解析法の適法となる手法がなかった．

これらの背景より，従来から系統のエネルギー関数を拡張した，リアプノフ法による安定度解析法が注目されている．しかしこの手法はSTEP BY STEP法と比較すると，非常に高速だが精度の面で問題点があり，多くの研究者によってリアプノフ関数や計算アルゴリズムにおける精度の向上が図られ，STEP BY STEP法との誤差を短縮する努力がなされてきた．1988年に岩本氏がRIDGE法を提案し[1]，過大評価の問題を解消することによりリアプノフ法の実用性をさらに高めた．しかしこの方法は，ダンパーを含んだシステムに対する考慮がされていないことから生じる精度的な問題点がある．さらに全ての故障ケースにおいて反復法を使用していることから，計算時間が延長化するというアルゴリズムにおける問題点がみられる．そこで，この問題点を解消するためにリアプノフ関数にダンパーによる損失を加えて精度を高めた提案法1と，過大評価を与える可能性がないケースでは，反復法をキャンセルする判断法を採用することによって，計算時間の短縮化を図った提案法2について議論する．又，数値演算では大中小の規模の異なるシステムでシュミレーションを行い，提案法と従来法との比較検討を行った．

原稿受付：平成元年3月14日
*長岡技術科学大学
**東京電力㈱

2. リアプノフ法による過渡安定度解析

過渡安定度とは電力系統が通常運転している際，三相短絡等の過酷な擾乱が加わり，ラインスイッチングなどによる故障除去後にシステムが安定になる度合をいう．その解析法にはルンゲークッタ法等によって，模索的に故障除去時間を求めるSTEP BY STEP法が，精度的に最も高い．

リアプノフ法は，STEP BY STEP法が非線形モデルの過渡安定領域を直接的に解析するのに対して，リアプノフ関数である系統のエネルギー関数によって間接的に求め，速やかに故障除去時間を算出する高速法である．

3. 安定度解析手法

過渡安定度解析をシミュレーションで行う際に用いるシステムの数学的モデルを示し，リアプノフ法のひとつであるPEBS法について説明する．

3.1　電力系統の数学的モデル

発電機：定電圧源と過渡リアクタンスからなる古典的モデル

負　荷：定インピーダンス負荷

制御系：AVRやガバナーなどの制御系は無視し，ダンパーはUNIFORM-DAMPINGとする

3.2　システムの定式化

(1)　動揺方程式：UNIFORM-DAMPINGシステムとして角中心系による定式化を用いる．

$$\dot{\theta}_i = \omega_i \tag{1}$$

$$M_i\ddot{\theta}_i = P_{Mi} - P_{ei} - R_iP_{coa} - (D_i\dot{\theta}_i - R_iD_{coa}) \tag{2}$$

ただし，

$$P_{coa} = \sum_{i=1}^{N}(P_{Mi} - P_{ei}) \tag{3}$$

$$D_{coa} = \sum_{i=1}^{N} D_i\dot{\theta}_i \tag{4}$$

$$R_i = M_i/M_T \tag{5}$$

$$M_T = \sum_{i=1}^{N} M_i \tag{6}$$

θ_i：角中心系におけるi番目の発電機相差角

M_i：第i番発電機の慣性定数

D_i：第i番発電機のダンパー定数

P_{Mi}：第i番発電機の機械的入力

P_{ei}：第i番発電機の電気的出力

ただし，

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^{N} E_iE_j[G_{ij}\cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij}\sin(\delta_i - \delta_j)] \tag{7}$$

E_i, E_j：過渡リアクタンス背後電圧の大きさ

G_{ij}, B_{ij}：縮小アドミタンス行列の要素

(2)　リアプノフ関数（エネルギー関数）

$$V = 1/2\cdot\sum_{i=1}^{N} M_i\omega^2{}_i - \sum_{i=1}^{N}\int_{\theta_{io}}^{\theta_i}(P_{Mi} - P_{ei} - R_iP_{coa})d\theta_i + \sum_{i=1}^{N}\int_{\theta_{io}}^{\theta_i}(D_i\dot{\theta}_i d\theta_i - R_iD_{coa}d\theta_i) \tag{8}$$

$$= V_k + V_p + V_d \tag{9}$$

＝機械的運動エネルギー
＋電気的位置エネルギー
＋ダンパーによるエネルギー損失

θ_{io}：システムの故障前の発電機相差角

3.3　PEBS法（POTENTIAL ENERGY BOUNADARY SURFACE METHOD）

(1)　PEBS曲線による安定領域の評価

PEBS法は，いままで提案されてきたリアプノフ法の中で最も信頼性の高い方法のひとつである．

この方法はシステムの安定領域の認識のために，PEBS曲線を用いている．

PEBS曲線を次のように定義する．

いまf_i，$\hat{\theta}$を

$$f_i(\underline{\theta}) = P_{Mi} - P_{ei} - R_iP_{coa} - D_i\dot{\theta}_i + R_iD_{coa} \tag{10}$$

$$\hat{\theta}_i = \theta_i - \theta_{si}$$

θ_{si}：第i番機位相角の事故除去後の安定平衡点

としたとき，PEBSの内側では，

$$\sum_{i=1}^{N} f_i(\underline{\theta})\hat{\theta}_i < 0 \tag{11}$$

PEBSの外側では

$$\sum_{i=1}^{N} f_i(\underline{\theta})\hat{\theta}_i > 0 \tag{12}$$

となるので，PEBS上では

$$\sum_{i=1}^{N} f_i(\underline{\theta})\hat{\theta}_i = 0 \tag{13}$$

となる．

これは，$-\mathrm{grad}(V_p + V_d)$と，安定平衡点からみた軌

跡の方向ベクトルとの内積であり，PEBS を幾何学的に考えると，安定平衡点を盆地の中に取り囲む尾根を形成しているようになっており，PEBS 曲線は不安定平衡点を通過し，ポテンシャル等高曲線に直角に交わっている．

(2) PEBS 法＋反復法

従来の PEBS 法は故障軌跡から安定領域を認識し，臨界点 V_{cr} を得て，故障除去時間を算出した．その結果，過大評価を与えるケースに対する解決法として適当ではなかった．しかし，故障除去軌跡からさらに臨界値を再評価する反復法を併用することによって過大評価の解消法として期待できる．

(3) 問 題 点

Fig. 1 に，3 機 7 母線系統[2]における角度空間上に描かれた，ポテンシャルエネルギー等高曲線図を示す．太線は PEBS 曲線であり，点線と太線で原点を囲んだ部分がリアプノフの漸近安定定理に基ずいて描かれた真の安定領域である．このようにシステムの種類によっては，PEBS 曲線が安定平衡点を囲まない場合があり，もし軌跡が囲まない部分を通過した場合，(図中 A 点)正しい臨界点 A と臨界値 V_{cr} の評価ができない．

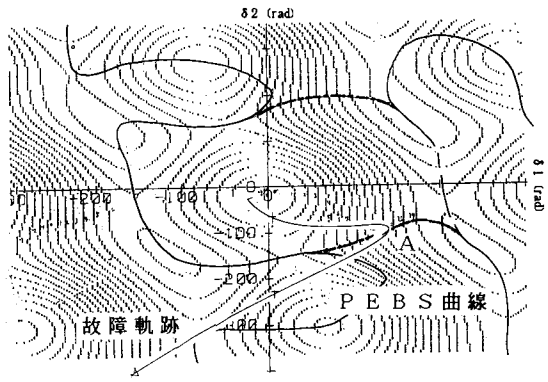


Fig. 1 PEBS curves and asymptotic stability reagion (dotted line) in the rotor angle reference frame.

3.4 RIDGE 法

(1) RIDGE 曲線による安定領域の評価

PEBS 曲線は，全ての発電機の角度空間上において，尾根を形成するようなイメージを与える．しかし，前に述べたように，尾根が安定平衡点の回りを囲まない場合があることから，V_{cr} の再評価には問題があることを述べた．

従って，各発電機の角度空間上における尾根を定義して，V_{cr} の再評価に適した方法を述べる．

RIDGE 曲線を次式で定義する．

$$\text{RIDGE} = \{\theta \mid \partial(V_p + V_d)/\partial\theta_i = 0,\ \partial^2(V_p + V_d)/\partial\theta^2{}_i < 0\}$$

この定義式に示すように，RIDGE は $(V_p + V_d)$ の θ_i 方向の極大点の集合であることを示している．

Fig. 2 の説明；

角度空間上に 3 機 7 母線系統[2]におけるポテンシャル等高曲線を描いた図である．

RIDGE 曲線はそれぞれの角度空間上における極大点の集合であるので，図中の座標 δ_1，δ_2 方向にそれぞれ 2 本ずつの RIDGE 曲線が描かれる．

(2) 問 題 点

岩本氏によって提案されたこの方法はダンパーを無視したエネルギー関数を用いているので，ダンパーを含んだシステムでは誤差が大きくなる．また，反復法を全ての故障ケースで用いているため，1 ケースにつき動揺方程式を 2 度以上解かなければならないので，無駄な計算時間を必要とすることになる．

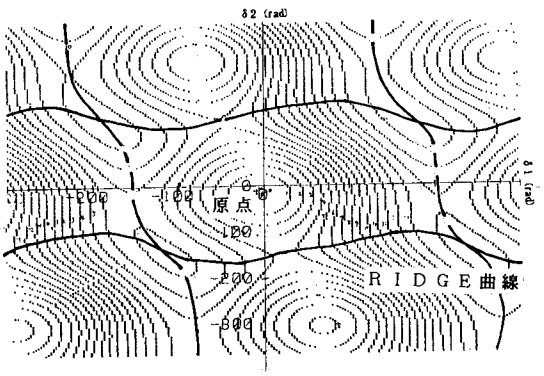


Fig. 2 RIDGE curves in the rotor angle reference frame.

3.5 提案法 1 (ダンパーを考慮した RIDGE 法)

Fig. 3 は従来の RIDGE 法，Fig. 4 は提案法 1 によって，それぞれ T_{cr} を求めていることを示している．

従来法ではダンパーによる損失 V_d を考慮していないため，エネルギー関数値 V が時間と共に減少しており，それだけ控え目な T_{cr} の評価を与えている．しかし提案法 1 では損失分も考慮しているので，控え目さが補正される．

3.6 提案法 2 (反復法の選択を考慮した RIDGE 法)

岩本氏が提案した RIDGE 法は，RIDGE 法に反復法が含まれている．

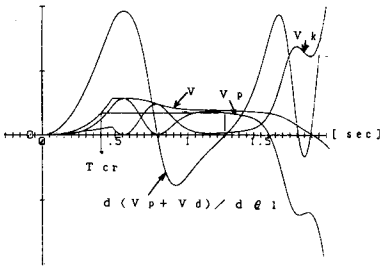


Fig. 3　Plots of system potential (Vp), keinetic (Vk), and total energy (V) and quantities of RIDGE.

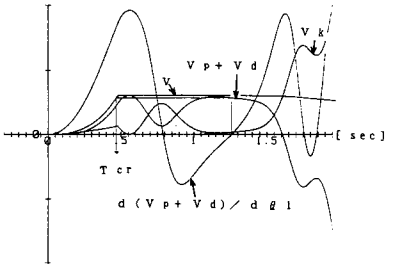


Fig. 4　Plots of system Vp, Vk, V and damper energy loss (Vd) and quantities of RIDGE.

反復法とは動揺方程式を何度か繰り返し解く方法で，この方法によって，システムの第2，第3脱調における V_{cr} の再評価が可能となる．しかし，この方法は過大評価を与えるケースでは有効であるが，一般の過大評価を与えないケースでは逆に T_{cr} の算出時間が長くなる．しかも，システムの全故障箇所の内で，過大評価を与えるケースは少ないので，システムの総ての故障箇所の T_{cr} を求める場合，算出時間のロスはPEBS法などの従来法に比べ，非常に大きい．

従って，過大評価を与えるケースのみに反復法を使用し，それ以外は反復法をキャンセルする方法が理想的である．そのために，第2，第3脱調を生じる過大評価を与えるケースであるか否かという判別法が必要となる．

そこで次に，過大評価を与えるケースに於けるシステムの状態を考察する．

(1)　不安定モードが複数の場合

故障軌跡は複数の脱調モードからなる不安定平衡点の付近を通過するが，故障除去後，単一の脱調モードからなる不安定平衡点の付近を通過する可能性があり，そのために第2脱調を生ずる．(Fig. 5 参照)

Fig. 5 の説明；

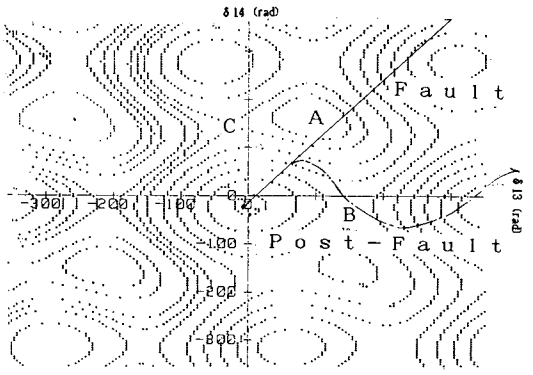


Fig. 5　Sustained fault trajectories and postfault trajectories in rotor angle frame.

Fig. 5 に，Fig. 8 に示す15機43母線系統[2]におけるポテンシャル等高曲線図を示す．53番母線に故障が生じた場合の，過大評価を与えるケースを例に説明する．複数の発電機（図中，13，14番機）が同期から外れた場合，故障軌跡(図中)はそれらの発電機を不安定モードとした不安定平衡点 UEP（図中，点 A）の付近を通過すると考えられる．その UEP は最大値であり，その近くに各々のモードが支配する鞍点 UEP(図中，点 B，C)があるならば，V_{cr} は過大評価を与え，故障除去後の軌跡は鞍点 UEP の付近を通過し，脱調する可能性がある．

(2)　不安定モードが単数の場合

故障軌跡は，単一モードからなる不安定平衡点（図中，点 A)の付近を通過する．故障除去後，不安定モードであった発電機が振動し，故障軌跡とは逆方向にある不安定平衡点（図中，点 B）の付近を通過するとき，その不安定平衡点が V_{cr} よりも小さな値を与えるならば，減速脱調による第2脱調を生じる可能性がある．(Fig. 6 参照)

Fig. 6 の説明；

Fig. 6 に Fig. 7 に示す4機6母線系統[3]におけるポテンシャル等高曲線図を示す．4番母線—3番母線に故障が生じた場合の，単一脱調モードにおける過大評価を与えるケースである．

3相地絡など，過酷な条件下における故障で不安定モードが一つの場合，故障除去後においてその不安定モードを呈する発電機が安定になるシステムで，それ以外の発電機が脱調することは経験的にないと考えられる．従って単一の発電機のみが不安定になる場合，故障軌跡が通過する臨界値 V_{cr} と，その発電機の減速方向にある UEP における V と比較を行う．

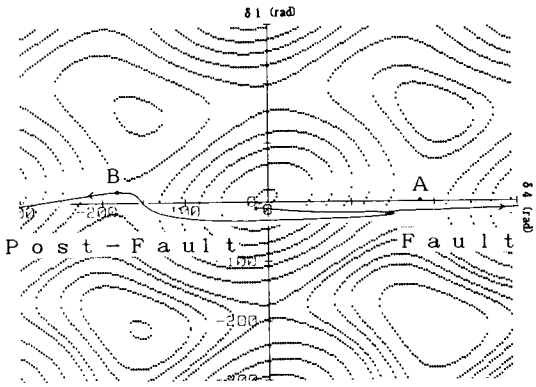


Fig. 6 Sustained fault trajectories and postfault trajectories in rotor angle frame.

従って，前述の2つの条件のいずれかを満たせば，第2，第3脱調を生じる可能性があると判断し，反復法を使用する．もし両者とも満足しないならば，脱調を生じないと判断し，反復法をキャンセルする．

以上を考慮して，計算方法の各ステップは次に示す様になる．

1. 故障軌跡を求める．
2. 軌跡に沿って，V，V_k，V_p，V_d，RIDGE式を解く．
3. RIDGEを越えたときの，V の値を V_{cr} とする．
4. 故障軌跡から，同期に外れた発電機が存在する場合を不安定モードといい，脱調する発電機の数をモード数とする．
5. もし，不安定モードが2以上の複数ならば，反復法を用いる．
6. 不安定モードが単一ならば，そのモードの減速方向にある不安定平衡点をグラジェント法によって求め，その点における V の値を求める．その V が V_{cr} よりも小さいならば，反復法を用いる．
7. $V > V_{cr}$ ならば，反復法の使用をキャンセルし，V_{cr} から T_{cr} を求める．

（フローチャート1参照）

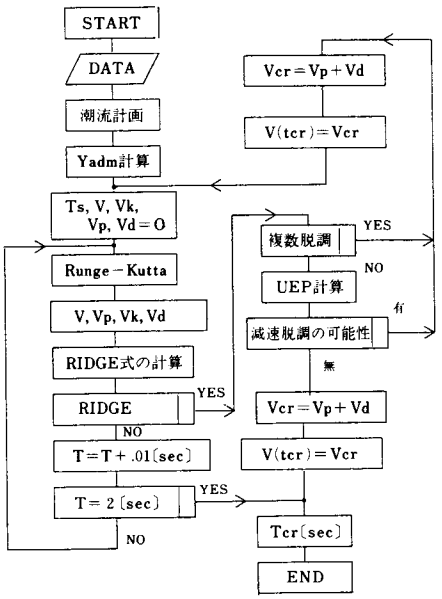
4. 数値解析

系統モデルを用いて数値解析を行い，従来法と提案法の数値結果を比較し，提案法の有効性を考察する．

数値解析に用いる，3種類の系統モデルのDATAを以下に示す．

4.1 3機7母線系統モデル[2]

Pavella女史の3機7母線系統モデルの各機器定数と，故障前，故障中の縮約アドミタンス行列を Table 1に示す．



Flowchart 1

Table 1 Synchronous machine constants and initial condition.

(1) Synchronous machine constants and initial conditions.

発電機	E_i (pu)	θ_i (red)	M_i (pu)	P_{mi} (pu)
1	1.2050	−0.294950	0.17190	6.00000
2	1.1510	0.043633	0.05157	1.50000
3	1.0420	0.286234	0.14320	5.57780

(2) Matrix for faulted system (fault on bus 1).

G_{ij}

ij	1	2	3
1	0	0	0
2	0	0.0961718	0.042732
3	0	0.042732	1.320587

B_{ij}

ij	1	2	3
1	−30.0003	0	0
2	0	−2.406016	1.181749
3	0	1.181749	−5.770403

(3) Matrix for post-fault system.

G_{ij}

ij	1	2	3
1	5.022934	0.154652	1.075054
2	0.154652	0.966479	0.075933
3	1.075054	0.075933	1.535934

B_{ij}

ij	1	2	3
1	−8.783806	0.661266	3.359617
2	0.661266	−2.385407	1.286484
3	3.359617	1.286484	−5.241902

4.2　4機6母線系統モデル[3)]

El-Abiad の4機6母線系統モデルを Fig. 7 に，又，それに関する DATA を Table 2 に示す．

Table 2　Synchronour machine constants and initial condition.

(1)

番号	容量 (MVA)	M (p.u)	$\omega L'_d$ (p.u)
1	100	75350	.004
2	15	1130	1.0
3	40	2260	.5
4	30	1508	.4

(2)

接続母線	負　荷	
母線2	$.2+j.1$	
母線5	$.4+j.15$	(p.u)
母線6	$.3+j.1$	

(3)

接続母線	電　力	
母線2	$.1+j.05$	
母線3	$.3+j.2$	(p.u)
母線4	$.2+j.1$	

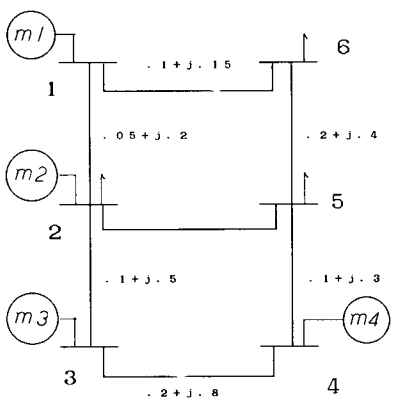
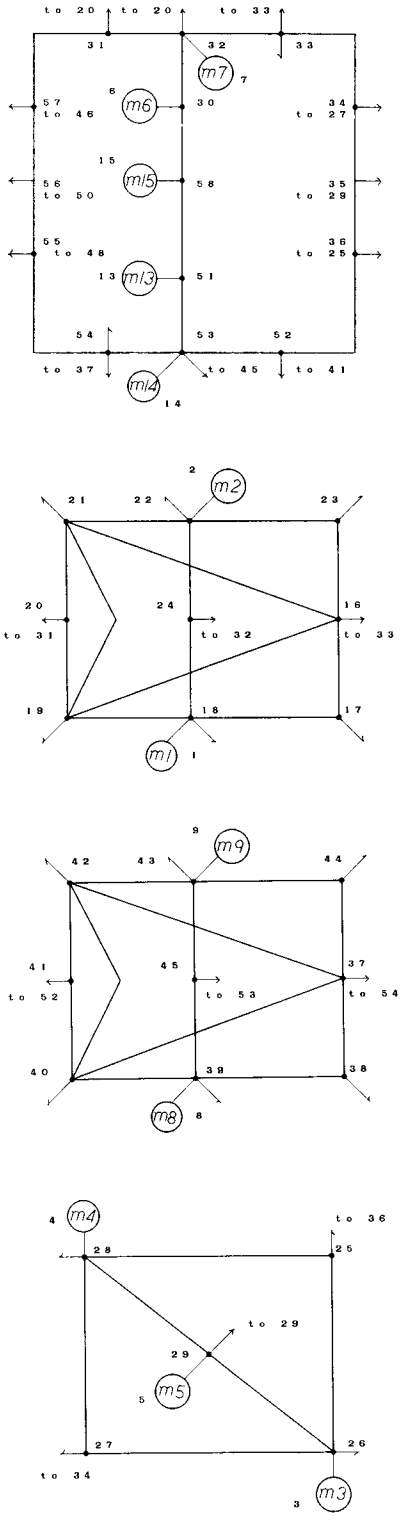


Fig. 7　Single line diagram and line impeadance.

4.3　15機43母線系統モデル[2)]

Pavella 女史の15機43母線系統モデルを Fig. 8 にそれに関する DATA を Table 3 に示す．



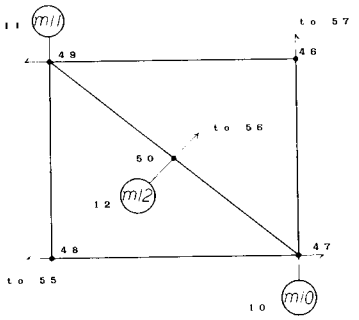


Fig. 8 Single line diagram of 15-machine 43 bus power system.

Table 3 Data of 15-machine 43-bus power system.

(1) 発電機

母線番号	容量 X MVA %	M MWs/red	P_S MW	E p.u	δ_0 Deg
4	500 37	11.14	360	1.182	14.3
3	350 37	7.80	255	1.163	14.2
5	300 37	6.68	200	1.141	13.4
11	500 37	11.14	360	1.182	14.3
10	350 37	7.80	255	1.163	14.2
12	300 37	6.68	200	1.141	13.4
1	400 37	8.91	300	1.168	3.6
2	400 37	8.91	300	1.198	3.0
8	400 37	8.91	300	1.168	3.6
9	400 37	8.91	300	1.198	3.0
7	900 43	17.19	675	1.177	13.5
6	900 43	17.19	675	1.183	14.0
14	900 43	17.19	675	1.177	13.5
13	900 43	17.19	675	1.183	14.0
15	900 40	17.19	544	1.194	11.2

(2) 変圧機

母線番号	容量 MVA	X %	n %	母線番号	容量 MVA	X %	n %
31-20	1000	13	110	52-41	1000	13	110
32-24	1000	13	106	53-45	1000	13	106
33-16	400	13	110	54-37	400	13	110
34-27	200	13	100	55-48	200	13	100
35-29	400	13	100	56-50	400	13	100
36-25	200	13	100	57-46	200	13	100

(3) 負荷

母線番号	P MW	Q MVA	母線番号	P MW	Q MVA
17	200	66	38	200	66
18	150	50	39	150	50
19	600	200	40	600	200
20	200	66	41	200	66
21	400	132	42	400	132
22	400	132	43	400	132
23	200	66	44	200	66
24	50	24.2	45	50	24.2
25	100	8.4	46	100	48.4
26	75	36.3	47	75	36.3
27	175	84.7	48	175	84.7
28	50	24.2	49	50	24.2
33	400	100	54	400	100

(4) 線路インピーダンス

母線番号	R Ω	X Ω	$\omega C/2$ μs
16-17	1.5	5	69
17-18	1.5	5	69
18-19	1	3.33	103.5
19-20	0.72	2.4	73.8
20-21	1.08	3.6	49.2
21-22	1.5	5	69
22-23	1.5	5	69
23-16	1.5	5	69
16-19	2.4	24.7	85
19-21	3.6	12	41.4
21-16	7.4	24.7	85
22-24	1.2	4	124.2
24-18	1.8	6	82.8
25-26	2.7	9	124.2
26-27	2.18	7.28	100.4
27-28	2.18	7.28	100.4
28-25	2.7	9	124.2
28-29	1.24	4.13	56.8
29-26	1.24	4.13	56.8
37-38	1.5	5	69
38-39	1.5	5	69
39-40	1	3.33	103.5
40-41	0.72	2.4	73.8
41-42	1.08	3.6	49.2
42-43	1.5	5	69
43-44	1.5	5	69
44-37	1.5	5	69
37-40	7.4	24.7	85
40-42	3.6	12	41.4
42-37	7.4	24.7	85
43-45	1.2	4	124.2
45-39	1.8	1	82.8
46-47	2.7	9	124.2
47-48	2.18	7.28	100.4
48-49	2.18	7.28	100.4
49-46	2.7	9	124.2
49-50	1.24	4.13	56.8
50-47	1.24	4.13	56.8
31-32	1.8	11.4	43.3
32-33	2.4	15.2	57.8
33-34	1.8	11.4	43.3
34-35	1.8	11.4	43.3
35-36	2.4	15.2	57.8
36-52	1.8	11.4	43.3
52-53	1.8	11.4	43.3
53-54	2.4	15.2	57.8
54-55	1.8	11.4	43.3
55-56	1.8	11.4	43.3
56-57	2.4	15.2	57.8

母線番号	R Ω	X Ω	$\omega C/2$ μs
57-31	1.8	11.4	43.3
58-30	2.7	16.5	64.6
30-32	0.3	1.8	7.2
58-51	2.7	16.5	64.6
51-53	0.3	1.8	7.2

5. 数値結果および検討

5.1 提案法1

提案法1による数値解析を，それぞれのシステムについて従来法と比較する．

5.1.1 3機7母線系統モデル

数値結果を Table 4 と Table 5 に示す．Table 4 はダンパーを零としている．Table 5 において上段はダンパーを $\lambda = 0.5$ とし，下段は $\lambda = 1.0$ とした結果である．PEBS 法ではダンパーと無関係に，過大評価を与えていることがわかる．RIDGE 法は過大評価を与えないが，反対に控え目な評価を与えている．しかも，ダンパー定数が大きくなるに連れ控え目さは大きくなっている．しかし提案法1では真値である STEP BY STEP 法による算出値とほぼ同じ値を与えている．

Table 4　*Tcr* by Lyapunov method.

事故母線	SbyS 法	PEBS 法	RIDGE 法	提案法1	λ
1*	.40	.69	.38	.38	0

単位［sec］　$\lambda = D_i/M_i$ for $i = 1$ to n

Table 5　*Tcr* by Lyapunov method

事故母線	RbyS 法	PEBS 法	RIDGE 法	提案法1	λ
1*	.44	.74	.41	.44	.5
1*	.49	.80	.41	.49	1

単位［sec］　$\lambda = D_i/M_i$ for $i = 1$ to n

5.1.2 4機6母線系統モデル

Table 6　T_{cr} by Lyapunv method.

事故母線	SbyS 法	PEBS 法	RIDGE 法
2 - 1	.67	.66	.66
2 - 3	.66	.65	.65
2 - 5	.65	.65	.65
3 - 2	.51	.51	.51
3 - 4	.51	.51	.51
4 - 3 *	.56	.58	.55
4 - 5	.57	.57	.57

単位［sec］　$\lambda = D_i/M_i = 0$ for $i = 1$ to n

Table 6 にダンパーを無視した計算結果を示す．事故母線 4—3 で PEBS 法が過大評価を与えていることがわかる．RIDGE 法は，0.01 (sec) の誤差を与えてはいるが過大評価になっていない．Table 7 にダンパーを含んだシステムにおける結果を示す．ダンパーを考慮すると，従来法では控え目な評価を与えるが，提案法1では控え目性の問題が解消されることが分かる．

Table 7　T_{cr} by Lyapunov method

事故母線	RbyS 法	PEBS 法	RIDGE 法	提案法1
2 - 1 *	.74	.75	.74	.74
2 - 3 *	.73	.74	.73	.73
2 - 5 *	.73	.74	.73	.73
3 - 2	.64	.64	.64	.64
3 - 4	.57	.55	.55	.56
4 - 3	.64	.64	.64	.64
4 - 5	.64	.64	.64	.64

単位［sec］　$\lambda = D_i/M_i = .8$ for $i = 1$ to n

5.1.3 15機43母線系統モデル[2)]

Table 8(1) にダンパーを零とした計算結果，Table 8(2)，Table 8(3) に各々 $\lambda = 0.5, 1.0$ とした計算結果を示す．＊印をつけた事故母線が，PEBS 法によって算出した T_{cr} で故障除去した場合に，第2，第3脱調を生ずる箇所である．

Table 8　T_{cr} by Lyapunov method.

(1)

事故母線	SbyS 法	PEBS 法	RIDGE 法
18	.41	.41	.41
22	.42	.42	.42
26	.37	.37	.37
28	.38	.38	.38
29*	.44	.46	.44
39	.41	.41	.41
43	.42	.42	.42
47	.37	.37	.37
49	.37	.37	.37
50*	.44	.46	.43
32*	.43	.44	.42
35	.75	.75	.75
53*	.43	.44	.42
56	.74	.74	.74
58	.52	.52	.52
30*	.42	.44	.40
51*	.42	.44	.39

注；2秒以内に脱調しないケースは無視　ダンパーは無視する

(2)

事故母線	SbyS 法	PEBS 法	RIDGE 法	提案法 1
29*	.45	.48	.43	.45
50*	.45	.48	.43	.45
32*	.46	.47	.46	.46
53*	.46	.47	.46	.46
30*	.45	.47	.45	.45
51*	.45	.47	.45	.45

単位 [sec] $\lambda = D_i/M_i = .5$ for $i = 1$ to n

(3)

事故母線	SbyS 法	PEBS 法	RIDGE 法	提案法 1
29*	.47	.51	.46	.47
50*	.47	.51	.46	.47
32*	.48	.50	.48	.48
53*	.48	.50	.48	.48
30*	.47	.50	.47	.47
51*	.47	.50	.47	.47

$\lambda = D_i/M_i = 1.0$ for $i = 1$ to n

一方，RIDGE 法を用いることによって，この問題点は解消されることが分かる．しかし，ダンパーを考慮した結果では，故障箇所によっては RIDGE 法は控え目な値を与えている．そこで本提案法を用いると，真値とほぼ同じ値が得られていることが分かる．

5.2 提 案 法 2

提案法 2 は，過大評価を与える場合のみに反復法を用い，それ以外はキャンセルする方法である．

ここでは，各々のシステムで過大評価を与えるケースに対し，提案法 2 による判断がどの様な評価を与えるか示す．

5.2.1 3 機 7 母線系統モデル

Table 9 に 3 機 7 母線系統における評価を示す．

このシステムでは 1 番母線事故が過大評価を与える箇所である．過大評価を呈する条件は複数脱調することであり，この事故の場合減速脱調を生じる条件を持っていることがわかる．従ってこのケースは，過大評価を与える可能性があるとして反復法を用いる．

Table 9 T_{cr} by Lyapunov method.

事故母線	SbyS 法	PEBS 法	RIDGE 法	複数脱調	減速脱調	反復法使用
1*	.40	6.69	.38	○	○	○

5.2.2 4 機 6 母線系統モデル

Table 10 に 4 機 6 母線系統における評価を示す．

このシステムでは，故障母線 4—3 が過大評価を与える箇所であり，減速脱調によって第 2 脱調を生じている可能性があるケースと予想される．事実この場合，減速脱調によって過大評価を与えている．従って，反復法使用の判断は正しいと言える．

Table 10 T_{cr} by Lyapunov method.

事故母線	SbyS 法	PEBS 法	RIDGE 法	複数脱調	減速脱調	反復法使用
2-1	.67	.66	.66	×	×	×
2-3	.65	.66	.66	×	×	×
2-5	.65	.65	.65	×	×	×
3-2	.51	.51	.51	×	×	×
3-4	.51	.51	.51	×	×	×
4-3*	.56	.58	.55	×	○	○
4-5	.57	.57	.57	×	×	×

5.2.3 15 機 43 母線系統モデル

Table 11 に 15 機 43 母線系統に於ける評価を示す．このシステムでは複数脱調が 6 箇所見られる．従って，第 2，第 3 脱調を生じる可能性があるとし，反復法を用いる．実際に PEBS 法はこれらの箇所で過大評価を与えている．

以下に数値結果からの検討を与える．

提案法 1　従来の RIDGE 法では，ダンパーが含まれると著しく控え目な評価を与えるが，提案法 1 では真値とほぼ等しくなる．

提案法 2　従来の RIDGE 法では，過大評価を与えないケースにおいても，反復法を用いていることから計算時間が延びた．しかし，提案法 2 ではそれが必要でない場合は反復計算をキャンセルするので，総合的に計算時間が短縮できる．

Table 11 T_{cr} by Lyapunov method.

事故母線	SbyS 法	PEBS 法	RIDGE 法	複数脱調	減速脱調	反復法使用
18	.41	.41	.41	×	×	×
22	.42	.42	.42	×	×	×
26	.37	.37	.37	×	×	×
28	.38	.38	.38	×	×	×
29*	.44	.46	.44	○	×	○
39	.41	.41	.41	×	×	×
43	.42	.42	.42	×	×	×
47	.37	.37	.37	×	×	×
49	.37	.37	.37	×	×	×
50*	.44	.46	.43	○	×	○
32*	.43	.44	.42	○	×	○
35	.75	.75	.75	×	×	×
53*	.43	.44	.42	○	×	×
56	.74	.74	.74	×	×	×
58	.52	.52	.52	×	×	×
30*	.42	.44	.40	○	×	○
51*	.42	.44	.39	○	×	○

6. 結　　論

岩本氏によって提案されたRIDGE法は，PEBS法をはじめとする従来法において，問題であった過大評価の問題を解決した．しかし，この方法は反復法による計算時間の延長化，ダンパーに関する精度的な問題点などの欠点があった．

本論文ではそれらの問題点を提案法1,2によって解決し，より能力の高いリアプノフ法を開発した．そして，計算結果では大，中，小各種規模の系統モデルで提案法の有効性を示した．しかし，系統モデルの一部の箇所においては提案法がまだ控え目な評価を与える場合があり，精度的な問題は少なからず残っている．

参考文献

1) 安藤龍一，岩本伸一：信頼性の高いエネルギー関数形過渡安定度計算法，電学論，Vol. 108-B, No. 6, 252 (1988).
2) M. Ribbens-Pavella and B. Lemal : Fast determination of stability regions for on-line power systems studies, Proc. IEE, Vol. 123, No. 7, (1976).
3) A.H. El-Abiad and K. Nagappan : Transient Stability Resions for Multi-Machine Power Systems, IEEE, Vol. PAS-85, No. 2, 169, (1966).

長岡技術科学大学