An Estimation Method of Available Transfer Capabilities from Viewpoint of Power System Transient Stability under Deregulated Environment

Tomohiko Ichikawa Student Member (Aichi Institute of Technology, itiya@aitech.ac.jp)

Katsuhiro Ichiyanagi Member (Aichi Institute of Technology)

Reiji Watanabe Student Member (Aichi Institute of Technology)

Kazuto Yukita Member (Aichi Institute of Technology, yukita@aitech.ac.jp)

Yasuyuki Goto Member (Aichi Institute of Technology, ygoto@aitech.ac.jp)

Yukio Hoshino Member (Chubu Electric Power Co., Inc., Hoshino.Yukio@chuden.co.jp)

Nobuyuki Yamamoto Member (Chubu Electric Power Co., Inc., Yamamoto.Nobuyuki@chuden.co.jp)

Sigeyuki Sugimoto Member (Chubu Electric Power Co., Inc., Shgeyuki.Yamamoto@chuden.co.jp)

Keywords : transient stability, neural network, IEEJ WEST10 model system, ATC, estimation

To conduct the electric power transactions effectively and to operate the power system efficiently while maintaining reliability under the deregulated environment, it is required that ATC (Available Transfer Capability) should be calculated at high speed with reasonable precision. The ATC is decided based on the N-1 criteria considering the thermal capacity constraint, the transient stability constraint and the voltage constraint. In this paper, it is assumed that the transient stability constraint is the most dominant within these constraints, and we propose an estimation method of the ATC from viewpoint of transient stability by using the neural network. The available transfer capabilities P_{marg} (ATC) is calculated from Viewpoint of power system transient stability after the fault occurrence. The P_{marg} is obtained by subtracting P_{tr} from P_{trmax} (MTC; Maximum Transmission Capability).

The P_{trmax} is calculated by repeating and carrying out the

power flow calculation every transaction route, amount of transaction, and assumed fault branch. Therefore, very long time is needed for P_{trmax} calculation in a large-scale power system. Then the neural network which has an off-line training function is effective for calculation of P_{trmax} . P_{trmax} is estimated by using the neural network in an instant.

The ATC estimation system shown in Fig.1 is proposed. The estimation system has m units corresponding to base load and n units corresponding to assumed fault branch in the input layer. The input layer has $m+n$ units in total. The '1' is given to the fault branch and the '0' is given to other branches. The estimation system has one unit corresponding to P_{trmax} . The simulations of estimation of the ATC from viewpoint of power system transient stability were carried out like the foregoing paragraph for IEEJ WEST10-machine system shown in Figure 2. The distributed generators that PPS owns are contained in G11 and the consumer that contracted a transaction with PPS is contained in L11. It is assumed that power transaction is performed from G11 to L11. The estimated results are shown in Table 1. The estimated and true ATC are almost equal. The average of absolute error estimated samples is 0.12 and ATC was estimated with sufficient accuracy. Furthermore, I examined the reduction of calculation time at learning by using the transient stability index.

Fig. 1. Structure of neural network

Fig. 2. IEEJ WEST10-machine system and transaction power route

Table 1. Estimated result of ATC

Load							Fault branch	Estimated	TRUE	Error
L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8		MTC (Ptrmax) [p.u.]	MTC (Ptrmax) [p.u.]	
2.40	2.40	2.40	3.10	3.10	4.50	3.10	5-15	1.24	1.46	-0.22
							6-16	1.82	1.86	-0.04
							5-6	1.57	1.40	0.17
							6-7	1.16	1.10	0.06
3.12	3.12	3.12	2.00	2.00	4.52	3.12	5-15	1.49	1.74	-0.25
							6-16	2.12	2.16	-0.04
							5-6	1.97	2.02	-0.05
							6-7	1.39	1.27	0.12
Average of estimated absolute error of Maximum transaction power MTC(P_{trmax})										0.12
Maximum absolute error of available transaction power ATC(P_{mare})										0.25

競争環境下における電力系統の過渡安定度からみた 送電可能容量の推定法の提案

学生員 市川 智彦* 正員 一柳 勝宏*
 学生員 渡辺 礼二* 正員 雪田 和人*
 正員 後藤 泰之* 正員 星野 幸雄**
 正員 山本 信幸** 正員 杉本 重幸**

An Estimation Method of Available Transfer Capabilities from Viewpoint of Power System Transient Stability under Deregulated Environment

Tomohiko Ichikawa*, Student Member, Katsuhiro Ichiyana*, Member, Reiji Watanabe*, Student Member,
 Kazuto Yukita*, Member, Yasuyuki Goto*, Member, Yukio Hoshino**, Member
 Nobuyuki Yamamoto**, Member, Sigeyuki Sugimoto**, Member

To conduct the electric power transactions effectively and to operate the power system efficiently while maintaining reliability under the deregulated environment, it is required that ATC (Available Transfer Capability) should be calculated at high speed with reasonable precision. In order to address this issue, in this paper, an Artificial Neural Network based estimation method for evaluating Maximum Transmission Capability (MTC), which is a key step but also a highly time consuming process in ATC, is proposed. It is confirmed through simulation studies that the proposed method is capable of estimating MTC (ATC) with high speed and sufficient precision. Furthermore, I examined the reduction of calculation time at learning by using the transient stability index.

キーワード：過渡安定度，ニューラルネットワーク，IEEE WEST10 機系統，ATC，推定

Keywords : transient stability, neural network, IEEE WEST10 model system, ATC, estimation

1. まえがき

電力自由化の進展に伴い，信頼性と安定度を維持しつつ多様な電力取引に対応できる電力系統の運用が求められている。電力自由化先進国では，市場参加者に対し，電力系統の効率的利用するための「送電空き容量」の情報として，送電可能容量(ATC: Available Transfer Capabilities) が公開されている⁽¹⁾。このような ATC はリアルタイムの取引に対応させるために，高速に算出することが必要となる⁽²⁾。

一般に，ATC は N-1 基準に基づいて，熱容量，過渡安定度，電圧安定性などを考慮して決定される⁽²⁾。しかし，大規

模系統になれば，ATC の算出時間が問題となる。ATC 算出に関して，種々の計算手法が提案されている^{(2)~(9)}。文献(3)では，電圧 ATC に関して，健全時と故障発生後のノード電圧の差から得られる指標を比較することにより，厳しい故障条件のスクリーニングを行っている。ATC 算定に対して，電圧制約に基づく ATC について検討した例⁽³⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が多く，過渡安定度制約を考慮した検討例は少ない⁽⁵⁾。本論文では，過渡安定度制約が最も支配的であると仮定することにより，過渡安定度からみた送電可能容量 P_{marg} を ATC とし，ニューラルネットワークを用いて，ATC を高速に推定する手法を提案している。さらに，多機系統に適用可能な過渡安定度指標を用いることにより，推定システムの学習データ作成時間を低減できた。具体的に，電気学会 WEST10 機モデル系統(串形状系統)を取り上げ，PPS 事業者と託送契約を結んだ需要家を想定することにより，各送電線故障時における送電可能余裕量の推定手法を検証している。

* 愛知工業大学工学部電気学科
 〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247
 Dept. of Electrical and Electronics Engineering,
 Aichi Institute of Technology
 1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota 470-0392

** 中部電力(株)
 〒459-8522 名古屋市緑区大高町北関山 20-1
 Chubu Electric Power Co., Inc.
 20-1, Kitasekiyama, Ohdaka-cho, Midori-ku, Nagoya 459-8522

2. 過渡安定度からみた送電可能容量推定システムの構築

〈2・1〉 送電可能容量 本論文では故障後の過渡安定度からみた送電可能容量 P_{marg} (ATC) を算出する。 P_{marg} は最大送電可能容量 P_{trmax} (MTC; Maximum Transmission Capability) から現時点における送電電力 P_{tr} の差をとり算出した。

$$P_{\text{marg}} = P_{\text{trmax}} - P_{\text{tr}} \quad (1)$$

ここで、 P_{trmax} は与えられた系統のベース潮流に対して、想定される送電電力ルート、想定故障ブランチ、送電電力量ごとに N-1 基準に基づく故障回線除去後の過渡動揺計算を繰り返し実施し、算出する必要がある。したがって、大規模系統においてはかなりの時間を要すると考えられる。そこで本報告では、ニューラルネットワークによる送電可能余裕容量の高速推定手法を提案する。

〈2・2〉 ATC 推定システムの構築 ニューラルネットワークを用いることにより、システムの学習時には計算時間がかかるが学習後の運用時には、瞬時に推定や予測が可能となる。本報告ではオフラインでの事前学習機能を有し、オンライン適用時には学習結果に基づいて、送電電力余裕量を瞬時に推定可能なニューラルネットワークシステムを構築した。図 1 に、提案する送電可能容量推定のためのニューラルネットワークを示す。

ニューラルネットワークは、入力層には各負荷ノードの需要量に対応するユニット m 個、N-1 基準を考慮するための想定故障ブランチに対応するユニット n 個の計 $(m+n)$ ユニットの設けた。故障ブランチユニットには、故障点に 1、その他の健全ブランチに 0 を与えた。また、出力層には故障線路除去時に対応する最大送電可能容量 P_{trmax} を 1 ユニットのとした。これにより推定システムの出力として送電可能余裕容量 P_{marg} の推定が可能となる。

3. 送電可能容量の推定シミュレーション

送電可能容量の推定シミュレーションに用いるモデル系

図 1 ニューラルネットワークの構造

Fig. 1. Structure of neural network

統は図 2 に示すように、電気学会 WEST10 機系統⁽¹²⁾をベースに、発電機 G_{11} および負荷 L_{11} を追加した。同図において、各ノード間はいずれも 2 回線の送電線により接続されているものとした。また、発電機ノード G_{11} および負荷ノード L_{11} を追加した。 G_{11} として、PPS(特定規模電気事業者: Power Producer and Suppliers)が所有する分散電源を対応させ、負荷ノード L_{11} として、PPS 事業者と電力託送契約を結んだ契約需要家を対応させた。以上により、 G_{11} から L_{11} へ電力託送が行われるものとした。

各負荷潮流状態において、2 回線送電中 1 回線の 3 相地絡故障(N-1 基準)を想定した。託送電力が 0 の負荷状態(ベース潮流時)における故障線路除去後の系統について、託送電力量を 0.01p.u. ずつ増加させることにより、過渡安定度が維持できる託送電力の最大値を求め、この値を最大送電可能容量 P_{trmax} とした。負荷の潮流状態、故障線路および P_{trmax} の関係を図 1 のニューラルネットワークに学習させた。

本論文では、推定システムの入力ユニット数の増加による学習の収束性悪化を防ぐために、先に報告した電圧安定度からみた送電電力余裕の推定手法⁽⁸⁾⁽⁹⁾を用いることにより、厳しい故障線路のスクリーニングを実施し、想定故障ブランチを選定した。現時点において電圧安定度からみた想定故障ブランチに対応するユニットは、ノード 5-15 間、6-16 間、5-6 間、6-7 間の 4 ユニットのとした。故障線路を図 2 の F1~F4 で、それぞれ示す。

推定システムの入力層にはベース負荷 $L_2 \sim L_8$ に対応する 7 ユニットの、想定故障ブランチに対応する 4 ユニットの計 11 ユニットの対応させ、出力層には最大送電可能容量 $MTC(P_{\text{trmax}})$ を対応させた。中間層には学習の収束性と誤差の検討結果から 4 ユニットのとした。

学習に用いた各負荷ノードの需要量、故障線路および最大送電可能容量 P_{trmax} の値を表 1 に示す。故障線路は故障点に 1、その他の健全ブランチに 0 を与え故障のないケースも与えた。

学習後のニューラルネットワークを用いて、学習に用いなかった負荷状態、故障線路を与え、 P_{trmax} を推定し、 P_{marg}

図 2 電気学会 WEST10 機系統と託送電力ルート

Fig. 2. IEEE WEST10-machine system and transaction power route

表 1 学習に用いたデータ
(一部抜粋)Table 1. Data used to training of neural network
(extract of used data)

No.	Base Load[p.u.]							Fault branch				P_{tmax} [p.u.]	
	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	5-15	6-16	5-6	6-7	[P.U.]	
1	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	5.25	3.50	1	0	0	0	1.00	1.00
2	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	5.25	3.50	0	1	0	0	1.42	1.42
3	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	5.25	3.50	0	0	1	0	1.33	1.33
4	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	5.25	3.50	0	0	0	1	1.01	1.01
5	2.70	2.70	2.70	1.65	1.65	2.70	1.65	1	0	0	0	3.09	3.09
6	2.70	2.70	2.70	1.65	1.65	2.70	1.65	0	1	0	0	3.42	3.42
7	2.70	2.70	2.70	1.65	1.65	2.70	1.65	0	0	1	0	3.32	3.32
8	2.70	2.70	2.70	1.65	1.65	2.70	1.65	0	0	0	1	2.49	2.49
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
98	3.90	3.90	3.90	2.50	2.50	5.65	3.90	1	0	0	0	1.01	1.01
99	3.90	3.90	3.90	2.50	2.50	5.65	3.90	0	1	0	0	1.32	1.32
100	3.90	3.90	3.90	2.50	2.50	5.65	3.90	0	0	1	0	1.37	1.37
101	3.90	3.90	3.90	2.50	2.50	5.65	3.90	0	0	0	1	0.74	0.74
102	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	5.10	3.00	1	0	0	0	0.93	0.93
103	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	5.10	3.00	0	1	0	0	1.42	1.42
104	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	5.10	3.00	0	0	1	0	1.81	1.81
105	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	5.10	3.00	0	0	0	1	1.65	1.65

* : ここで, Fault branch の 1 は故障を示し, 0 は健全であることを示す

表 2 推定に用いたデータ

Table 2. Data used to estimation of neural network

No.	Base Load[p.u.]							Fault branch			
	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	5-15	6-16	5-6	6-7
1	2.40	2.40	2.40	3.10	3.10	4.50	3.10	1	0	0	0
2	2.40	2.40	2.40	3.10	3.10	4.50	3.10	0	1	0	0
3	2.40	2.40	2.40	3.10	3.10	4.50	3.10	0	0	1	0
4	2.40	2.40	2.40	3.10	3.10	4.50	3.10	0	0	0	1
5	3.12	3.12	3.12	2.00	2.00	4.52	3.12	1	0	0	0
6	3.12	3.12	3.12	2.00	2.00	4.52	3.12	0	1	0	0
7	3.12	3.12	3.12	2.00	2.00	4.52	3.12	0	0	1	0
8	3.12	3.12	3.12	2.00	2.00	4.52	3.12	0	0	0	1

を算出した。推定に用いたデータを表 2 に示し, 推定結果を表 3 に示す。同表に見られるように, P_{tmax} の推定値から得られる送電可能容量 P_{marg} の値は実績値に比較的近い値で推定できており, 送電可能容量の誤差として, 絶対値誤差の平均が 0.12p.u., 最大誤差は 0.25p.u. の値となった。対象としたモデルシステムによる結果によれば, 提案手法は有効であることがわかる。なお, ATC 推定を算出するために, 本推定システムを用いた場合, 計算時間は 2msec を要したのに対し, 逐次過渡動揺計算を用いた場合は 21.8sec を要した。

4. 過渡安定度指標活用による ATC 推定法の改善

前章までに, ニューラルネットワークを用いることにより, ATC の高速推定手法を提案し, IEEJ WEST10 機系統をモデルとして, 提案法の有効性を検証した。前述したように, 学習後のネットワークシステムを用いることにより, オンライン運用時において, 瞬時に ATC 推定が可能となる。しかし, オフライン時での学習データの作成とニューラルネットワークの学習に計算時間を要する。本章では, 文献(13)で提案されている過渡安定度指標を用いることにより, オフライン時における推定システムの学習データ作成のための計算時間の高速化について検討している。

表 3 推定結果

Table 3. Estimated result

Load								Fault branch	Estimated	TRUE	Error
L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	MTC		MTC		
									(Ptrmax)	(Ptrmax)	
								[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
2.40	2.40	2.40	3.10	3.10	4.50	3.10	5-15	1.24	1.46	-0.22	
							6-16	1.82	1.86	-0.04	
							5-6	1.57	1.40	0.17	
							6-7	1.16	1.10	0.06	
3.12	3.12	3.12	2.00	2.00	4.52	3.12	5-15	1.49	1.74	-0.25	
							6-16	2.12	2.16	-0.04	
							5-6	1.97	2.02	-0.05	
							6-7	1.39	1.27	0.12	
Average of estimated absolute error of Maximum transaction power MTC(<i>P</i> _{tmax})										0.12	
Maximum absolute error of available transaction power ATC(<i>P</i> _{marg})										0.25	

〈4・1〉 過渡安定度指標 故障が発生した場合, 系統全体の発電機について, 安定な発電機群 A と不安定な発電機群 S とに分ける。各発電機群の動揺を位相中心の考え方で表すと, 2 系統のモデルに縮約される。等価 1 機無限大母線系統に簡略化する。縮約後の系統における安定平衡点を θ_a , 不安定平衡点を θ_u とする。

$$\phi(t) = \delta(t) - \theta_a(t) \dots\dots\dots (2)$$

さらに, 位置エネルギーを PE , 運動エネルギーを KE として表し, $I(t)$ を次式により定義する(付録参照)⁽¹³⁾。

$$I(t) = \frac{PE(\delta_u) - PE(\phi(t)) - KE(\phi(t))}{PE(\theta_u) - PE(\theta_a)} \dots\dots\dots (3)$$

故障除去後における $I(t)$ の値のうち最小値を I_{min} とする。 I_{min} は $I_{min} > 0$ で安定, $I_{min} < 0$ で不安定を意味する。

〈4・2〉 過渡安定度評価のシミュレーション 過渡安定度指標の評価に用いるモデル系統として, IEEJ WEST10 機系統⁽¹²⁾を用い, 故障線路 2-12 および故障時間 0.21s として, 各発電機位相 $\delta_k(t)$ および $I(t)$ の計算結果を図 3 および図 4 に各々示す。図 3 から, 故障後の各発電機は大きく動揺するものの, 安定を維持できていることが分かる。図 4 では $I(t)$ の値は故障除去の直後, 減少するものの最小値 $I_{min} = -0.01$, 以後, 正の値を呈している。

故障点, 故障持続時間を変化させて, 同様のシミュレーションを実施し, 系統の安定性と I_{min} との関係を調べた。その結果を○(安定), ×(不安定)にて表 4 にまとめた。同表には, 故障線路 4-14, 同 6-16 の場合の結果も併記した。

いずれも, $I_{min} > 0$ で安定, $I_{min} < 0$ で不安定となることが分かる。同表には過渡動揺計算の中で指標 $I(t)$ が負値となる時刻(Judgement time of unstability で, 単位を s で示す)も併記してある。

結果をみると, 評価指標 I_{min} が負の場合, 系統は不安定となる。他の故障線路の場合についても, 同様の傾向が見られた。与えられた系統状態における安定, 不安定を判別する場合, 過渡動揺計算において, $I(t) < 0$ の時点で系統は不安定と判定される。託送電力を逐次変化させて, 安定, 不安定状況から最大送電可能容量 P_{tmax} を高速に算出する際, $I(t) < 0$ の時点で不安定が確定され, 以後の動揺計算が不要になり,

図3 発電機位相動揺
(故障線路 2-12,故障時間 0.21s,臨界的安定)
Fig. 3. Swing curves of generator angle
(fault line: 2-12, fault duration:0.21s, stability : critical)

図4 過渡安定度指標 $I(t)$
(故障線路 2-12,故障時間 0.21s, 臨界的安定, $I_{\min} = -0.01$)
Fig. 4. Transient stability index $I(t)$ (fault line : 2-12, fault duration : 0.21s, stability:critical, $I_{\min} = -0.01$)

計算時間の短縮が図れる。

〈4・3〉 $I_{\min}$ を用いた学習データ作成 前節で述べたように、評価指標 $I_{\min}$ が負の場合、システムは不安定となることがわかる。推定システムの学習データは与えられた潮流状態における故障後の系統が安定かどうかの結果から決定される。したがって、学習データは種々の潮流状態を与えることにより過渡計算を行い、故障後の評価指標 $I(t)$ が負の値を示した時点で系統は不安定として判定され、計算を終了とする。不安定と判定された場合、それ以後の動揺計算が不要となり、計算時間の短縮が図れる。

図5に過渡安定度評価指標と託送電力の関係を表す概念図を示す。託送電力は系統の最大送電可能容量 P_{trmax} (MTC; Maximum Transmission Capability) の範囲内で指標 $I_{\min}$ は正值を示し、 P_{trmax} を超えると $I_{\min}$ は負値を与えることを示している。したがって、故障後の安定判別として、 $I_{\min}$ の正負値を参照することにより、 P_{trmax} を求めることができる。この P_{trmax} を用いて、送電可能容量 P_{marg} (ATC) を算出する。なお、 P_{marg} は、最大送電可能容量 P_{trmax} から現時点における送電電力 P_{tr} の差をとり算出した。ここで、 P_{trmax} は想定される送電電力ルート、想定故障ブランチ、送電電力量ごとに潮流計算を繰り返し実施し、算出する必要がある。

表4 安定度指標 $I_{\min}$

Table 4. Stability index $I_{\min}$

Fault line 2-12	Fault duration (sec)	0.23	0.22	0.21	0.2	0.19	0.18
	Index ($I_{\min}$)	-3.05	-3.13	-0.01	0.13	0.38	0.48
	Stability	×	×	○*	○	○	○
	Judgment time of instability (sec)	0.05	0.05	0.51	---	---	---
Fault line 4-14	Fault duration (sec)	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.21
	Index ($I_{\min}$)	-0.66	-0.51	-0.21	-0.08	0.04	0.16
	Stability	×	×	×	○*	○	○
	Judgment time of instability (sec)	0.0167	0.0167	0.017	---	---	---
Fault line 6-16	Fault duration (sec)	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23
	Index ($I_{\min}$)	-81.60	-14.10	0.51	0.55	0.19	0.06
	Stability	×	×	○	○	○	○
	Judgment time of instability (sec)	0.0167	0.0167	---	---	---	---

○* : critical stable state

Judgment time of instability : time from fault clearance

図5 安定度評価指標 $I_{\min}$ と託送電力
Fig. 5. Stability index $I_{\min}$ versus transaction power

想定される託送ルートに対して、安定限界を与える託送電力 P_{trmax} を求めた。計算としては、託送電力 P_{tr} に大きい値を与え、不安定な状態から順次、 P_{tr} を減少させていくことにより、安定な状態 $(I(t) > 0; t < t_{\text{fin}})$ となる P_{tr} を P_{trmax} とした。ここで、不安定な状態は $I(t) < 0$ となったことによりで判定し、一連の過渡動揺計算は終了した。これにより、計算時間は大幅に短縮できる。 $I_{\min}$ を用いた学習データ作成結果の例を表5に示す。同表の右端欄に、 $I(t) < 0$ の条件で不安定と評価することにより、安定度限界 P_{trmax} を算出し、ケース1とした。他方、各発電機 $\delta(t)$ の動揺状況 ($\delta(t) > 180^\circ$) から、不安定と判断し、 P_{trmax} を算出し、ケース2とした。両ケースとも、近い値を示していることがわかる。また、ケース1はケース2に比べて、学習データ作成のための計算時間は数倍速くできた。

表 5 $I_{\min}$ を用いて作成した学習データ

Table 5. Training data by using index $I(t)<0$

No.	Base Load[p.u.]							Fault branch				$P_{tmax}[p.u.]$		Error [p.u.]
	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	5-13	6-16	5-6	6-7	Case1: by using transient calculation	Case2: by using index $I(t)<0$	
1	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	5.25	3.50	1	0	0	0	1.00	0.96	-0.04
2	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	5.25	3.50	0	1	0	0	1.42	1.39	-0.03
3	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	5.25	3.50	0	0	1	0	1.33	1.28	-0.05
4	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	5.25	3.50	0	0	0	1	1.01	1.01	0.00
5	2.70	2.70	2.70	1.65	1.65	2.70	1.65	1	0	0	0	3.09	3.02	-0.07
6	2.70	2.70	2.70	1.65	1.65	2.70	1.65	0	1	0	0	3.42	3.38	-0.04
7	2.70	2.70	2.70	1.65	1.65	2.70	1.65	0	0	1	0	3.32	3.31	-0.01
8	2.70	2.70	2.70	1.65	1.65	2.70	1.65	0	0	0	1	2.49	2.52	0.03
9	3.90	3.90	3.90	2.50	2.50	5.65	3.90	1	0	0	0	1.01	0.98	-0.03
10	3.90	3.90	3.90	2.50	2.50	5.65	3.90	0	1	0	0	1.32	1.32	0.00
11	3.90	3.90	3.90	2.50	2.50	5.65	3.90	0	0	1	0	1.37	1.41	0.04
12	3.90	3.90	3.90	2.50	2.50	5.65	3.90	0	0	0	1	0.74	0.68	-0.06
13	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	5.10	3.00	1	0	0	0	0.93	0.89	-0.04
14	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	5.10	3.00	0	1	0	0	1.42	1.39	-0.03
15	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	5.10	3.00	0	0	1	0	1.81	1.77	-0.04
16	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	5.10	3.00	0	0	0	1	1.65	1.65	0.00

5. あとがき

ATC は系統の有する送電能力の上限を数値化したものであり、(1)熱容量制約、(2)安定度制約、(3)電圧制約を考慮して決定される。本論文では、与えられた系統の特性から、過渡安定度制約が支配的であるとして、送電可能容量(ATC)の高速推定法を提案した。具体的に、ニューラルネットワークを用いることにより ATC 推定システムを構築し、10 機串形系統に対して、PPS 事業者と託送契約を結んだ需要家が含まれるものとして検討した。その結果、学習後の推定システムを用いることにより、送電可能容量が比較的精度良く、高速に推定できることを確認した。また、学習データ作成の際、N-1 基準に基づく故障除去後の系統の安定度性を表す指標 $I(t)$ の導入を試みた。その結果、 $I(t)$ の最小値 $I_{\min}$ の値が負の場合に不安定となることを利用することにより、学習データ作成に要する計算時間が短縮できた。なお、用いたニューラルネットワークは一般的に用いられる 3 層階層型を用いているが、その構成やネットワークの学習法について今後、改善する必要がある。

また、線路故障の他に、電源脱落の有無情報を推定システムの入力情報として追加することにより、同様の検討が可能と考えられる。電源脱落を含む想定故障については今後の検討課題としたい。さらに、実際の大規模系統を対象とし、実系統での運用を視野に入れた ATC 推定システムとして改良を図るとともに、電圧安定性からみた ATC 推定法と結合させた ATC 推定法について検討を進める予定である。

(平成 18 年 3 月 28 日受付，平成 19 年 2 月 2 日再受付)

文 献

(1) 競争環境下における電力品質調査専門委員会：「競争環境下における電力品質」，電気学会技術報告，第 925 号 (2003)
(2) “Available Transfer Capability Definition and Determination”，North American Electric Reliability Council, June (1996)
(3) M. Nagata, A. Takehara, and K. Tanaka : “Development of ATC assessment method—A fast assessment method of ATC with thermal and voltage constraints—”, Komae Research laboratory Rep. No.T01020 (2002-4) (in Japanese)

付 録

系統縮約とエネルギー関数

多機系統の全発電機について、安定な発電機群 A と不安定な発電機群 S とに分ける。各発電機群の動揺を位相中心の考え方で表すと、次式の 2 系統のモデルに縮約される。

永田真幸・竹原有紗・田中和幸：「送電可能容量 (ATC) の評価手法の開発—熱容量および電圧 ATC の高速計算手法—」，電力中央研究所報告 T01020 (2002-4)
(4) H. Okamoto, R. Tanabe, Y. Tada, and Y. Sekine : “A Method for Voltage Stability Constrained Optional Power Flow(VSCOPF)”, *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.12, pp.1670-1680 (2001-12) (in Japanese)
岡本 浩・田辺隆也・多田泰之・関根泰次：「電圧安定度制約を考慮した最適潮流計算手法」，電学論 B, **121**, 12, pp.1670-1680 (2001-12)
(5) Y. Yamada, M. Nagata, and K. Tanaka : “Contingency Screening Method for ATC Assessment with Transient Constrains”, Proceedings of National Convention. IEE of Japan, 6-001 (2002-3) (in Japanese)
山田義徳・永田真幸・田中和幸：「過渡安定度 ATC 評価のための想定事故スクリーニング手法」，平 14 電学大全，6-001 (2002-3)
(6) Y. Hayashi, J. Matsuki, and T. Ikeda : “Computation Method for Simultaneous Transer Capability Considering Wheeled Power by PPS”, *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.12, pp.1366-1375 (2002-12) (in Japanese)
林 泰弘・松木純也・池田孝之：「PPS の系統参入に対する同時送電可能容量 (STC) の計算手法」，電学論 B, **122**, 12, pp.1366-1375 (2002-12)
(7) M. Nagata, M. Takemura, T. Okada, and K. Tanaka : “Development of ATC Assessment Syatem”, Proceedings of the Thirteenth Annual Conference of Power & Energy Society. IEE of Japan(Volume A), No.143 (2002-8) (in Japanese)
永田真幸・竹村昌彦・岡田俊之・田中和幸：「ATC 自動算定システムの開発」，電気学会電力・エネルギー部門大会論文集 (分冊 A)，No.143 (2002-8)
(8) K. Ichiyangi, S. Washizu, T. Ichikawa, K. Yukita, Y. Goto, N. Yamamoto, Y. Hoshino, and S. Sugimoto : “Estimation of ATC from Viewpoint of Voltage Stability in Multi-machine Power System”, *Wseas Transactions on Power Systems*, Issue 2. Vol.1, pp.331-337, February (2006) ISSN:1790-5060
(9) H. Yamada, K. Yukita, Y. Goto, K. Ichiyangi, Y. Tabata, and S. Ogawa : “Estimation of ATC in View of Voltage Stability in Multi-machine Power System”, The Papers of Joint Technical Meeting on Power Engineering and Power System Engineering, IEE Japan PE-03-127, PSE-03-138, pp.39-43 (2003-9) (in Japanese)
山田 浩・雪田和人・後藤泰之・一柳勝宏・田端康人・小川重明：「多機電力系統の電圧安定度からみた送電電力余裕の推定」，電学電力技術・電力系統技術合同研資，PE-03-127, PSE-03-138, pp.39-43 (2005-9)
(10) Y. Kamemura and S. Iwamoto : “A Study on voltage stability ATC in the Deregulated Environment” The Papers of Joint Technical Meeting on Power Engineering and Power System Engineering, IEE Japan PE-05-140, PSE-05-147, pp.1-6 (2005-9) (in Japanese)
亀村祐介・岩本伸一：「電力自由化環境下における電圧 ATC に関する考察」，電学電力技術・電力系統技術合同研資，PE-05-140, PSE-05-147, pp.1-6 (2005-9)
(11) N. Yorino, Y. Zoka, K. Kawano, K. Okagawa, and H. Q. Li : “Proposal of Fast Computation for Voltage and Thermal Magnitude ATC”, The Papers of Joint Technical Meeting on Power Engineering and Power System Engineering, IEE Japan PE-05-141, PSE-05-148, pp.7-11 (2005-9) (in Japanese)
餘利野直人・造賀芳文・川野晃紀・岡川康二・李華強：「熱容量・電圧 ATC の高速計算法の提案」，電学電力技術・電力系統技術合同研資，PE-05-141, PSE-05-148, pp.7-11 (2005-9)
(12) 電力系統モデル標準化調査専門委員会：「電力系統の標準モデル」，電気学会技術報告第 754 号 (1999)
(13) A. Rahimi and K. N. Stanton : “Dynamic Aggregation and the Calculation of Transient Stabiity Indices”, *IEEE Trans. PAS-91*, No.1, pp.118-122 (1972)

$$M_a \frac{d^2 \delta_a}{dt^2} = \sum_{k \in A} (P_{mk} - P_{ek}) \quad \text{.....(付 1)}$$

$$M_s \frac{d^2 \delta_s}{dt^2} = \sum_{l \in S} (P_{ml} - P_{el}) \quad \text{.....(付 2)}$$

$$\delta_a = \frac{\sum_{i \in A} M_i \delta_i}{\sum_{i \in A} M_i} \quad \delta_s = \frac{\sum_{i \in S} M_i \delta_i}{\sum_{i \in S} M_i} \quad \text{.....(付 3)}$$

さらに、集合 A における集合 S からの相対的な位相差を δ とすると、以下の 1 機無限大母線系で表される縮約モデルが得られる。

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - \{P_c + P_{em} \sin(\delta - \nu)\} \quad \text{.....(付 4)}$$

$$\delta = \delta_s - \delta_a \quad \text{.....(付 5)}$$

$$\nu = \tan^{-1} \left(\frac{M_T}{M_a - M_s} \tan \delta \right) - \frac{\pi}{2} \quad \text{.....(付 6)}$$

ここで、縮約後の系統における安定平衡点を θ_a 、不安定平衡点を θ_u とする。発電機の位相 $\delta(t)$ と θ_a の差 $\phi(t)$ をある時刻における運転点とする。

$$\phi(t) = \delta(t) - \theta \quad \text{.....(付 7)}$$

さらに、位置エネルギーを PE 、運動エネルギーを KE とし、 $I(t)$ を次式により定義する⁽¹³⁾。位置エネルギーと運動エネルギーの関係を示す概念図を付図 1 に示す。

$$I(t) = \frac{PE(\delta_u) - PE(\phi(t)) - KE(\phi(t))}{PE(\theta_u) - PE(\theta_a)} \quad \text{.....(付 8)}$$

故障除去後における $I(t)$ の値のうち最小値を I_{min} とする。 I_{min} は $I_{min} > 0$ で安定、 $I_{min} < 0$ で不安定を意味する。

付図 1 縮約系統の運動エネルギーと位置エネルギー
Appendix fig.1 Kinetic and potential energy of simplified power system

市川 智彦

(学生員) 1981 年生。2004 年 3 月愛知工業大学電気工学科卒業。2006 年 3 月同大学大学院工学研究科修士課程電気電子工学専攻修了。現在、三重県立四日市工業高等学校講師。主として電力系統の安定化に関する研究に従事。

一柳 勝宏

(正員) 1945 年生。1970 年 3 月愛知工業大学大学院工学研究科修士課程修了。同年同大学助手。その後、同講師、同助教授を経て、1993 年教授、現在に至る。工学博士。主として電力系統の安定度および自然エネルギーの有効利用に関する研究に従事。電気設備学会、日本太陽エネルギー学会、IEEE など各会員。

渡辺 礼二

(学生員) 1984 年生。2006 年 3 月愛知工業大学電気工学科卒業。同年 4 月名古屋大学大学院工学研究科修士課程（電子情報システム専攻）入学、現在に至る。主として電力システムの解析、安定化に関する研究に従事。

雪田 和人

(正員) 1967 年生。1997 年 3 月東海大学大学院工学研究科博士課程修了。同年愛知工業大学助手。1998 年同講師。2003 年同助教授、現在に至る。博士(工学)。主として電力系統の運用・制御に関する研究に従事。電気設備学会、日本風力エネルギー協会、IEEE など各会員。

後藤 泰之

(正員) 1958 年生。1985 年 3 月東海大学大学院工学研究科博士課程満了。同年同大学助手。1988 年同講師。1991 年名古屋大学工学部講師。1994 年愛知工業大学助教授。2000 年同大学教授。2003 年中国東南大学客座教授。2004 年愛知工業大学学長、現在に至る。工学博士。主として電力系統の運用・制御に関する研究に従事。IEEE など各会員。

星野 幸雄

(正員) 1971 年生。1994 年 3 月東洋大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月中部電力(株)入社。現在、同社電力技術研究所に勤務。主として電力系統の解析技術および制御機器に関する研究に従事。

山 本 信 幸

(正員) 1958 年生。1983 年 3 月中部工業大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了。同年 4 月中部電力(株)入社。現在、同社電力技術研究所に勤務。主として電力系統の解析モデルおよび瞬低補償機器に関する研究に従事。

杉 本 重 幸

(正員) 1958 年生。1983 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科修士課程電気工学専攻修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。1991 年 9 月中部電力(株)入社。現在、同社電力技術研究所に勤務。主として電力機器・電力系統へのパワエレ技術の適用および瞬低補償機器に関する研究に従事。博士(工学)。1998 年電気学会電気学術振興賞論文賞, 2005 年同進歩賞受賞。