

電圧安定性からみた送電可能容量の高速推定法の提案

A Proposal of Fast Estimation for Available Transfer Capabilities from Viewpoint of Voltage Stability by Using Neural Network

一柳勝宏[†], 市川 智彦[†], 渡辺礼二[†], 谷口謙悟[†], 雪田和人[†], 後藤泰之[†],
星野 幸雄^{††}, 山本信幸^{††}, 杉本重幸^{††}

Katsuhiro Ichiyanagi, Tomohiko Ichikawa, Reiji Watanabe, Kengo Taniguchi, Gazuto Yukita, Yasuyuki Goto,
Yukio Hoshino, Nobuyuki Yamamoto, Sigezuki Sugimoto

Abstract Under the deregulated environment, to conduct the electric power transactions effectively and to operate the power system efficiently while maintaining reliability, 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.

1. まえがき

近年の規制緩和と電力自由化の進展に伴い、信頼性と安定度を保ちつつ多様な電力取引に対応できる電力システムの運用が求められている。そのためには、送電可能容量(ATC: Available Transfer Capabilities)を高速に算出することが必要となる¹⁾。一般に、ATCはN-1基準(システムを構成する設備のうち、任意の一つが停止してもシステムの供給能力を維持できるという基準)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¹⁾。しかしながら、大規模システムになれば、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^{1)~7)}。文献2)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。ここで、N-1基準を満たすため、大規模なシステムにおいては膨大な回数の潮流計算を繰り返す必要がある。筆者らは、電圧安定度からみた送電電力余裕に関して、電圧ATCを表す指標の高速推定手法を提案した⁷⁾。ATCはN-1基準に基づいて、熱容量制約、安定度制約、電圧制約などを考慮して決定されが、本報告では、これら3つの制約のうち、電圧制約が最も支配的であると仮定して得られる送電可能容量 P_{margin} をATCとし、 P_{margin} を高速に推定する手法を提案している。具体的に、4機ループ系統および電気学会WEST10機モデル系統(放射状系統)を取り上げ

て、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。

将来的に、電力自由化の進展や地球規模の環境問題などにより、風力、太陽光を中心とした新エネルギーによる分散電源が多数導入されるようになる。このような系統は孤立した電力送電網(マイクログリッドと呼ぶ)として構成されることが考えられる。本研究における提案法では系統規模の大小に関係なく同様の手法が適用可能であることから、巨大地震などの緊急災害時に孤立した地域では、電力ネットワークの安定運用と電力エネルギー自給が可能となる。

2. 送電可能量推定システムの構築

2.1 提案する推定手法

本報告ではP-Vカーブの概念を用いて、図1に示す送電可能容量 P_{margin} (ATC)を算出する。同図における P_{margin} は、最大送電可能容量 $P_{\text{tr,max}}$ (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。ここで、 $P_{\text{tr,max}}$ 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。したがって、大規模システム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。提案手法においては、ニューラルネットワークの学習時には計算時間がかかるが学習後の運用時には、瞬時に推定できることが期待される。

[†] 愛知工業大学工学部電気学科電気工学専攻(豊田市)

^{††} 中部電力(株)技術開発本部(名古屋市)

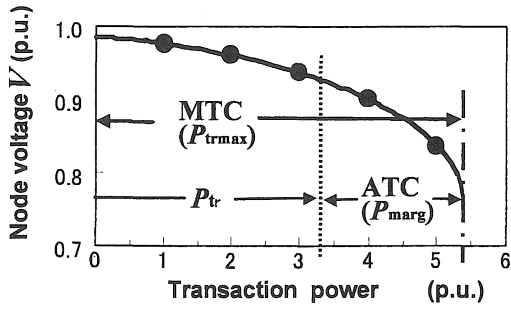


図 1 P-V 曲線
Fig1. P-V curve.

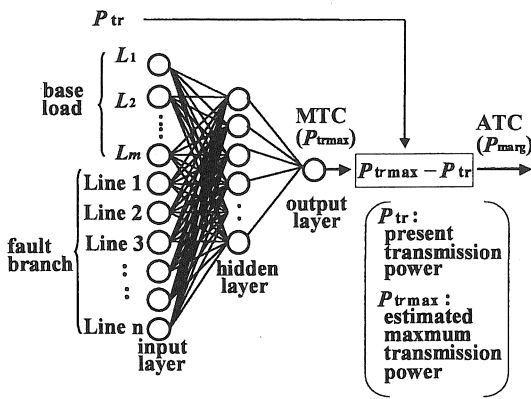


図 2 ニューラルネットワークの構造
Fig2. Structure of neural network.

2.2 ニューラルネットワークの構築

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 2 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

3.1 ループ型システムの例

図 3 に示す 4 機系統⁸⁾ を用いて、送電可能容量 ATC (P_{marg}) の推定シミュレーションを実施した。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 G3 には電力会社の所有する発電機に PPS(特定規模電気事業者:Power Producer and Suppliers)が所有する分散電源が、負荷ノード L2 には一般需要家に PPS 事業者と電力託送契約を結んだ契約需要家が含まれているものとした。用いた発電機定数および線路インピーダンスの値を表 1 および表 2 に示す。

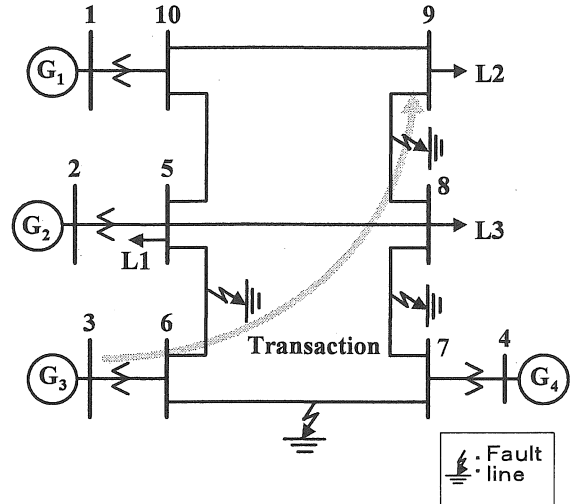


図 3 モデル系統 (4 機系統)
Fig3. 4-machine model system.

表 1 発電機定数

Table1. Generator constants.

Generator No.	Moment of inertia [s]	Damping constants [p.u.]	$x_{d'}$ [p.u.]	x_d [p.u.]	x_q [p.u.]
G1	500	0.01	0.44	0.40	0.40
G2	4.3	0.01	1.00	1.11	1.11
G3	8.6	0.01	0.50	0.55	0.55
G4	5.8	0.01	0.40	0.44	0.44

表 2 線路定数

Table2. Line impedance.

Node No. of lines	Line impedance (values of two lines)	
	R [p.u.]	X [p.u.]
1 - 10	0.00	0.03
2 - 5	0.00	0.03
3 - 6	0.00	0.03
4 - 7	0.00	0.03
5 - 6	0.10	0.50
5 - 8	0.20	0.50
5 - 10	0.05	0.20
6 - 7	0.20	0.80
7 - 8	0.10	0.30
8 - 9	0.20	0.40
9 - 10	0.10	0.15

電力託送としてはG3からL2の間で行われるものと仮定し、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.づつ増加させることにより、図1に示すような最大送電可能容量 P_{trmax} を算出した。負荷の潮流状態、故障線路および P_{trmax} の関係を図2のニューラルネットワークに学習させた。

本報告では、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⁷⁾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。想定故障ブランチに対応するユニットは、ノード5-6間、6-7間、7-8間、8-9間の4ユニットとした(図3のFault Line記号で示す)。推定システムの入力層にはベース負荷L1~L3に対応する3ユニット、想定故障ブランチに対応する4ユニットの計7ユニットを対応させ、出力層には最大送電可能容量MTC(P_{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3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} を算出した。推定に用いたデータを表4に示し、推定

表3 学習に用いたデータ
Table3. Data for training of neural network.

No.	Base load[p.u.]			Fault brabch				MTC (P_{trmax}) [p.u.]
	L1	L2	L3	5-6	6-7	7-8	8-9	
1	0.40	0.30	0.20	0	0	0	0	1.82
2	0.40	0.30	0.20	1	0	0	0	1.80
3	0.40	0.30	0.20	0	1	0	0	1.83
4	0.40	0.30	0.20	0	0	1	0	1.73
5	0.40	0.30	0.20	0	0	0	1	1.63
6	0.56	0.42	0.28	0	0	0	0	1.69
7	0.56	0.42	0.28	1	0	0	0	1.66
8	0.56	0.42	0.28	0	1	0	0	1.70
9	0.56	0.42	0.28	0	0	1	0	1.59
10	0.56	0.42	0.28	0	0	0	1	1.50
11	0.64	0.48	0.32	0	0	0	0	1.62
12	0.64	0.48	0.32	1	0	0	0	1.60
:	:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:	:
28	0.32	0.48	0.64	0	1	0	0	1.57
29	0.32	0.48	0.64	0	0	1	0	1.44
30	0.32	0.48	0.64	0	0	0	1	1.42

* :ここで、Fault branchの1は故障発生を示し0は、健全であることを示す

表4 推定に用いたデータ
Table4. Data for estimating.

No.	Base load[p.u.]			Fault brabch			
	L1	L2	L3	5-6	6-7	7-8	8-9
1	0.48	0.36	0.24	0	0	0	0
2	0.48	0.36	0.24	1	0	0	0
3	0.48	0.36	0.24	0	1	0	0
4	0.48	0.36	0.24	0	0	1	0
5	0.48	0.36	0.24	0	0	0	1
6	0.28	0.42	0.56	0	0	0	0
7	0.28	0.42	0.56	1	0	0	0
8	0.28	0.42	0.56	0	1	0	0
9	0.28	0.42	0.56	0	0	1	0
10	0.28	0.42	0.56	0	0	0	1

表5 推定結果
Table5. Estimated result.

Load			Fault brabch	Trans- action power P_{tr} [p.u.]	Estimated		TRUE		Error [p.u.]
L1	L2	L3			MTC (P_{trmax}) [p.u.]	ATC (P_{marg}) [p.u.]	MTC (P_{trmax}) [p.u.]	ATC (P_{marg}) [p.u.]	
0.49	0.36	0.24	5-6	0.0	1.75	1.73	1.73	0.02	
				0.5	1.25		1.23	0.02	
				1.0	0.75		0.73	0.02	
				1.5	0.25		0.23	0.02	
			6-7	0.0	1.77	1.76	1.76	0.01	
				0.5	1.27		1.26	0.01	
				1.0	0.77		0.76	0.01	
				1.5	0.27		0.26	0.01	
			7-8	0.0	1.66	1.66	1.66	0.00	
				0.5	1.16		1.16	0.00	
				1.0	0.66		0.66	0.00	
				1.5	0.16		0.16	0.00	
			8-9	0.0	1.58	1.56	1.56	0.02	
				0.5	1.08		1.06	0.02	
				1.0	0.58		0.56	0.02	
				1.5	0.08		0.06	0.02	
0.29	0.41	0.56	5-6	0.0	1.63	1.64	1.64	-0.01	
				0.5	1.13		1.14	-0.01	
				1.0	0.63		0.64	-0.01	
				1.5	0.13		0.14	-0.01	
			6-7	0.0	1.65	1.64	1.64	0.01	
				0.5	1.15		1.14	0.01	
				1.0	0.65		0.64	0.01	
				1.5	0.15		0.14	0.01	
			7-8	0.0	1.53	1.53	1.53	0.00	
				0.5	1.03		1.03	0.00	
				1.0	0.53		0.53	0.00	
				1.5	0.03		0.03	0.00	
			8-9	0.0	1.47	1.49	1.49	-0.02	
				0.5	0.97		0.99	-0.02	
				1.0	0.47		0.49	-0.02	
				1.5	-0.03		-0.01	-0.02	
Average of estimated error of ATC(P_{marg})								0.01	
Average of maximum error of ATC(P_{marg})								0.02	

MTC:最大送電可能容量,ATC:送電可能容量

結果を表5に示す。同表に見られるように、 P_{trmax} 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は少なめの最大で-0.02.u.であり、容量以上の誤差は+0.01p.u.程度でいづれも小さい値となった。対象とした4機系統モデル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。

3.2 放射状系統の例

図 4 に示す IEEJ WEST10 機系統⁹⁾ を用いて, 前節と同様の方法により, P_{marg} の推定シミュレーションを実施した。同図に示す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 G5 には電力会社の所有する発電機には PPS が所有する分散電源が, 負荷ノード L8 には PPS 事業者と電力託送契約を結んだ契約需要家が含まれているものとし, G5 から L8 へ電力託送が行われるものとした。

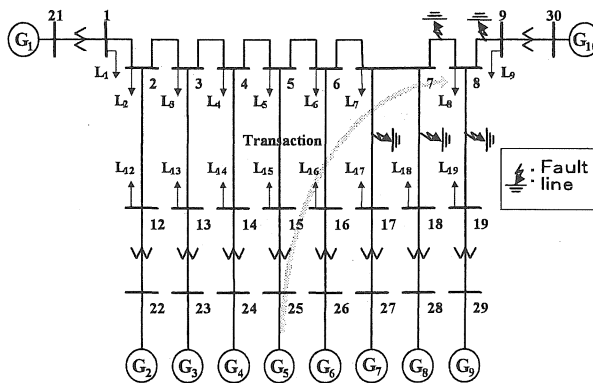


図 4 電気学会 WEST10 機系統
Fig.4. IEEJ WEST10 model system.

表 6 学習に用いたデータ
(WEST10 機系統: 一部抜粋)
Table6. Data for training of neural network.
(IEEJ WEST10 model system)

No.	Base load [p.u.]							Fault branch					Ptrmax [p.u.]
	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	7-17	7-18	8-19	8-7	8-9	
1	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	5.2	3.5	0	0	0	0	0	5.40
2	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	5.2	3.5	1	0	0	0	0	5.22
3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	5.2	3.5	0	1	0	0	0	5.32
4	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	5.2	3.5	0	0	1	0	0	5.38
5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	5.2	3.5	0	0	0	1	0	5.30
6	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	5.2	3.5	0	0	0	0	1	5.36
7	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	7.4	4.9	0	0	0	0	0	4.22
8	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	7.4	4.9	1	0	0	0	0	3.99
9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	7.4	4.9	0	1	0	0	0	4.12
10	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	7.4	4.9	0	0	1	0	0	4.18
11	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	7.4	4.9	0	0	0	1	0	4.10
12	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	7.4	4.9	0	0	0	0	1	4.17
13	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	8.4	5.6	0	0	0	0	0	3.55
14	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	8.4	5.6	1	0	0	0	0	3.27
15	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	8.4	5.6	0	1	0	0	0	3.44
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
30	6.3	6.3	6.3	3.8	3.8	6.3	3.8	0	0	0	0	1	6.31
31	7.2	7.2	7.2	4.4	4.4	7.2	4.4	0	0	0	0	0	5.72
32	7.2	7.2	7.2	4.4	4.4	7.2	4.4	1	0	0	0	0	5.57
33	7.2	7.2	7.2	4.4	4.4	7.2	4.4	0	1	0	0	0	5.66
34	7.2	7.2	7.2	4.4	4.4	7.2	4.4	0	0	1	0	0	5.69
35	7.2	7.2	7.2	4.4	4.4	7.2	4.4	0	0	0	1	0	5.69
36	7.2	7.2	7.2	4.4	4.4	7.2	4.4	0	0	0	0	1	5.71

表 7 推定に用いたデータ
(WEST10 機系統)

Table7. Data for estimating.
(IEEJ WEST10 model system)

No.	Base load [p.u.]							Fault branch				
	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	7-17	7-18	8-19	8-7	8-9
1	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	6.3	4.2	0	0	0	0	0
2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	6.3	4.2	1	0	0	0	0
3	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	6.3	4.2	0	1	0	0	0
4	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	6.3	4.2	0	0	1	0	0
5	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	6.3	4.2	0	0	0	1	0
6	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	6.3	4.2	0	0	0	0	1
7	5.4	5.4	5.4	3.3	3.3	5.4	3.3	0	0	0	0	0
8	5.4	5.4	5.4	3.3	3.3	5.4	3.3	1	0	0	0	0
9	5.4	5.4	5.4	3.3	3.3	5.4	3.3	0	1	0	0	0
10	5.4	5.4	5.4	3.3	3.3	5.4	3.3	0	0	1	0	0
11	5.4	5.4	5.4	3.3	3.3	5.4	3.3	0	0	0	1	0
12	5.4	5.4	5.4	3.3	3.3	5.4	3.3	0	0	0	0	1

表 8 推定結果
(WEST10 機系統)

Table8. Estimated result.
(IEEJ WEST10 model system)

Load	Fault branch	Trans-action power Ptr[p.u.]	Estimated		TRUE		Error [pu]
			MTC (Ptrmax) [pu]	ATC (Pmarg) [pu]	MTC (Ptrmax) [pu]	ATC (Pmarg) [pu]	
4.2 4.2 4.2 4.2 4.2 6.3 4.2	7-17	0.0	4.62	4.63	4.63	-0.01	
		0.5	4.12	4.13	4.13	-0.01	
		1.0	3.62	3.63	3.63	-0.01	
		1.5	3.12	3.13	3.13	-0.01	
		2.0	2.62	2.63	2.63	-0.01	
	7-18	0.0	4.73	4.74	4.74	0.00	
		0.5	4.23	4.23	4.23	0.00	
		1.0	3.73	3.73	3.73	0.00	
		1.5	3.23	3.23	3.23	0.00	
		2.0	2.73	2.73	2.73	0.00	
	8-19	0.0	4.78	4.80	4.80	-0.02	
		0.5	4.28	4.30	4.30	-0.02	
		1.0	3.78	3.80	3.80	-0.02	
		1.5	3.28	3.30	3.30	-0.02	
		2.0	2.78	2.80	2.80	-0.02	
8-7	0.0	4.76	4.72	4.72	0.04		
	0.5	4.26	4.22	4.22	0.04		
	1.0	3.76	3.72	3.72	0.04		
	1.5	3.26	3.22	3.22	0.04		
	2.0	2.76	2.72	2.72	0.04		
8-9	0.0	4.77	4.79	4.79	-0.02		
	0.5	4.27	4.29	4.29	-0.02		
	1.0	3.77	3.79	3.79	-0.02		
	1.5	3.27	3.29	3.29	-0.02		
	2.0	2.77	2.79	2.79	-0.02		
7-17	0.0	6.49	6.59	6.59	-0.10		
	0.5	5.99	6.09	6.09	-0.10		
	1.0	5.49	5.59	5.59	-0.10		
	1.5	4.99	5.09	5.09	-0.10		
	2.0	4.49	4.59	4.59	-0.10		
7-18	0.0	6.60	6.69	6.69	-0.09		
	0.5	6.10	6.19	6.19	-0.09		
	1.0	5.60	5.69	5.69	-0.09		
	1.5	5.10	5.19	5.19	-0.09		
	2.0	4.60	4.69	4.69	-0.09		
8-19	0.0	6.64	6.74	6.74	-0.10		
	0.5	6.14	6.24	6.24	-0.10		
	1.0	5.64	5.74	5.74	-0.10		
	1.5	5.14	5.24	5.24	-0.10		
	2.0	4.64	4.74	4.74	-0.10		
8-7	0.0	6.63	6.70	6.70	-0.07		
	0.5	6.13	6.20	6.20	-0.07		
	1.0	5.63	5.70	5.70	-0.07		
	1.5	5.13	5.20	5.20	-0.07		
	2.0	4.63	4.70	4.70	-0.07		
8-9	0.0	6.63	6.70	6.70	-0.07		
	0.5	6.13	6.20	6.20	-0.07		
	1.0	5.63	5.70	5.70	-0.07		
	1.5	5.13	5.20	5.20	-0.07		
	2.0	4.63	4.70	4.70	-0.07		
Average of estimated error of available transaction power ATC(Pmarg)							0.06
Average of maximum error of available transaction power ATC(Pmarg)							0.10

電力託送としてはG5からL8の間で行われるものと仮定し、前節と同様にして、最大送電可能容量 P_{trmax} を算出した。負荷の潮流状態、故障線路および P_{trmax} の関係を図2のニューラルネットワークに学習させた。

A T C 推定の前処理として、前節と同様に、送電電力余裕の推定手法⁷⁾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。想定故障ブランチに対応するユニットとしては、ノード7-17間、ノード7-18間、ノード8-19間、ノード8-7間、ノード8-9間の5ユニットとした(図4のFault Line記号で示す)。

推定システムの入力層にはベース負荷L2~L8に対応する7ユニット、想定故障ブランチに対応する5ユニットの計12ユニットを対応させ、出力層には最大送電可能容量 P_{trmax} を対応させた。中間層は前節と同じく、学習の収束性と誤差の検討結果から4ユニットとした。

推定システムの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} に関する全データのうち、一部を抜粋して表6に示す。前節の表3と同様に、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} を推定したのち、 P_{margin} を算出した。推定に用いたデータを表7に示し、その推定結果を表8に示す。同表に見られるように、 P_{margin} の推定値はその実績値に比べて全体として少な目の値を示し、誤差は最大で $\pm 0.1p.u.$ であった。先の4機系統モデルによる結果と比べて、若干大きい誤差となっている。

6. あとがき

A T C 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。本報告では、与えられた系統の特性から、電圧制約が支配的な制約であるとして、送電可能容量(A T C)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A T C推定システムを構築し、4機ループ系統および10機放射状系統を用いて検討した。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。以上により、本研究では大規模電力系統を例に、電力の安定供給に対して、提案手法の有用性を示した。

今後において、風力や太陽光を始めとする新エネルギーによる多くの分散電源の導入により、独立した電力送電網(マイクログリッドと呼ぶ)が構成されることが考えられ

る。本研究は電力系統規模の大小に関係せず、安定供給に対して、同様の手法が適用可能である。したがって、将来的に、巨大地震などの緊急災害時における孤立地域の電力ネットワークの安定運用と電力エネルギー自給が可能となる。

謝辞

平成17年度愛知工業大学教育・研究特別助成のうち「研究分野」による助成(研究テーマ:自然エネルギー発電による緊急災害時における孤立地域の電力自給に関する研究)を頂いたことを記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) "Available Transfer Capability Definition and Determination", North American Electric Reliability Council, June 1996
- 2) 永田・竹原・田中: 「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, 平成14年4月
- 3) 岡本・田辺・多田・関根: 「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, No. 12, pp 1670-1680 (2001-12)
- 4) 山田・長田・田中: 「過渡安定度A T C評価のための想定事故スクリーニング手法」, 平成14年電気学会全国大会, 6-001, 2002年3月
- 5) 林・松木・池田: 「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, No. 12, pp 1366-1375 (2001-12)
- 6) 永田・竹村・岡田・田中: 「A T C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, 平成14年8月
- 7) 山田・雪田・後藤・一柳・田端・小川: "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", 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-03-127, PSE-03-138, pp. 39-43, 平成15年9月
- 8) A.H.El-Abiad et al: "Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, pp169-179, Vol.PAS-85, No.2, 1966.
- 9) 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)
(受理 平成18年3月18日)