

小規模システムから見た大規模システムの等価回路の推定法(2)

日大生産工 (院) ○及川 昭
 日大生産工 (院) 長峯 豊
 日大生産工 佐藤 正弘

1. まえがき

電力システムは系統どうしを相互に連携することによって大規模なシステムを構築し信頼性、経済性の向上を図ってきた。その反面、局所的な事故の波及によって系統全体が崩壊に至ることも懸念されている。これは大規模工場など、小規模な電力システムを構成している施設での安定度解析においても同様であり、事故の波及を防止するためには解析対象システムを正確に模擬し、安定度解析によって事故発生時の系統の振る舞いを把握することが重要である⁽¹⁾。

そこで本研究は大規模システムに接続された小規模システムを対象に系統解析を行う場合を想定し、大規模システムを無限大母線と、それに接続された一線路として推定するための線路インピーダンスを所内発電機の動揺中のデータを用いて推定する手法について検討を行った。

2. 電力系統等価回路の推定手法⁽²⁾

図1に示すモデル系統図を用いて本推定法の原理を説明する。図1においてノード1を小規模システム側の観測母線とし、この点での電圧 $\dot{V}=V\angle\delta$ 、電流 $\dot{I}=I\angle\phi$ のみが既知であるとする。またノード2を無限大母線とし、ブランチ12における線路インピーダンス $R+jX$ および対地静電容量 Y_c を推定する。この時点で未知数は R 、 X 、 Y_c 、 E 、 θ の5つである。この状態においてノード1に流れる電流 $I\angle\phi$ はブランチ12に流れる電流と対地静電容量に流れる電流の和で表され、(1)式が得られる。

$$\dot{I} = \dot{Y}_c \dot{V} + \dot{Z}(\dot{V} - \dot{E}) \dots\dots\dots(1)$$

また、(1)式を展開し実部と虚部に分解することにより(2)、(3)式の2つの関係式が得られる。

$$R(V \cos \delta - E \cos \theta) + X(V \sin \delta - E \sin \theta) - (I \cos \phi + Y_c V \sin \delta)(R^2 + X^2) = 0 \dots\dots\dots(2)$$

$$R(V \sin \delta - E \sin \theta) - X(V \cos \delta - E \cos \theta) - (I \sin \phi - Y_c V \cos \delta)(R^2 + X^2) = 0 \dots\dots\dots(3)$$

ここで、1章で述べたように本推定法は大規模システムに接続された小規模システムを対象としているので、大規模システムは小規模システム内のじょう乱によって受ける影響が極めて小さいという前提を立てることにより、無限大母線の電圧の大きさを一定(1.0[p.u.]とする)であると仮定し、未知数を4つに減少させる。

本推定法は(2)、(3)式を動揺中の電圧、電流データ中において時間の異なる2点で計4本立てることで、数値解析により推定を行う。また、数値解析の手法としては収束が速く、非線形方程式の解を求めるのに広く用いられているニュートン・ラフソン法⁽³⁾を用いた。

3. 数値解析に用いる初期値の算出法⁽²⁾

本推定法で用いる(2)、(3)式には複数の解が存在することが考えられる。また、ニュートン・ラフソン法では与える初期値によって解に収束せず発散することも考えられる。そのため、適切な解を得るためには初期値はできる限り解の近辺で与えることが好ましい。そこで次に、ニュートン・ラフソン法に用いる初期値の算出法について示す。

本推定法での初期値の算出は簡単化のために対地静電容量は無視する。すると動揺中の電圧、電流の異なる2点の時間において以下の式が得られる。

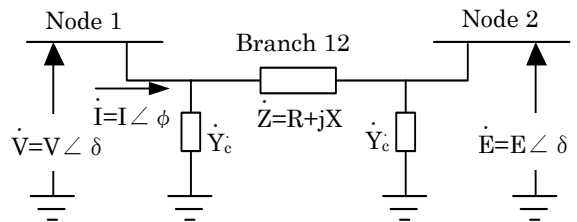


図1 系統モデル

An approach to estimate an equivalent of large part of network seen from small part of network (2)

Akira OIKAWA, Yutaka NAGAMINE and Masahiro SATO

$$\dot{E}_1 = \dot{V}_1 - \dot{Z}I_1 \dots\dots\dots(4)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{V}_2 - \dot{Z}I_2 \dots\dots\dots(5)$$

次に無限大母線の電圧が時間によって変化しない、すなわち $\dot{E}_1=\dot{E}_2$ であると仮定すると(4)、(5)式より(6)式が得られる。

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{\dot{I}_1 - \dot{I}_2} \dots\dots\dots(6)$$

このようにして、線路インピーダンスの近似値を得ることができる。また、対地静電容量および無限大母線の電圧位相の初期値については小さいと考えられるので零と指定する。

4. 一機無限大母線システムを用いた有効性の確認

本研究では提案した推定法の有効性を確認するために図2に示す一機無限大母線システムモデルを用いた。

今回の推定は推定対象がはじめから一本の線路なので、推定結果がモデルで設定した線路定数とどの程度一致するかを誤差率で確認した。

〈4・1〉使用したシステムモデル概要

図2に示すシステムモデルにおいてノード4の左側を小規模システムとし、ノード4より右側を大規模システムとする。また、観測母線をノード4として、ブランチ45の線路定数を推定する。ここで、ブランチ45の100[km]あたりの線路インピーダンスを $\dot{Z}=0.005+j0.1$ [p.u.]、静電容量を $\dot{Y}_c=j0.1$ [p.u.]として、距離を100[km]、150[km]、200[km]の3通りについて推定を行った。また、事故をどの場合も一回線三相短絡事故をブランチ231において0.08[sec]継続させ、小規模システム内発電機が脱調した場合のデータを使用した。

〈4.2〉ブランチ45の推定結果

ブランチ45の距離を100[km]とした場合の電圧および電流波形を図3に示す。0.1[sec]で事故が発生し、

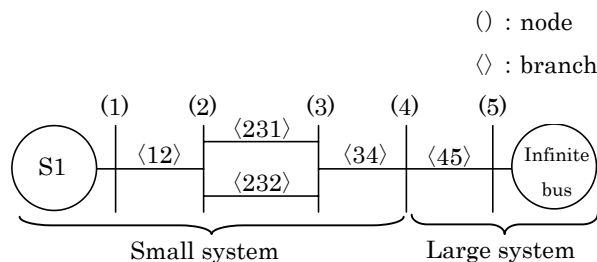


図2 一機無限大母線システムモデル

その後0.18[sec]で事故が除去されている。推定では事故除去直後で動揺中である0.3[sec]時の $\dot{V}_1=0.983$ [p.u.] \angle 0.055[rad]、 $\dot{I}_1=1.179$ [p.u.] \angle 0.456[rad]の値と0.4[sec]での $\dot{V}_2=0.966$ [p.u.] \angle 0.059[rad]、 $\dot{I}_2=1.405$ [p.u.] \angle 0.663[rad]の値を使用した。前章で示した手法により求めた初期値、および推定結果を表1に示す。

推定結果は大規模システム側の線路定数に近い値を示しており、その誤差率はR, X, Y_cのそれぞれの推定結果で4.36[%], 0.17[%], -1.06[%]であった。次に図4に原システムおよび等価回路での小規模システム内の発電機の動揺出力波形を示す。この結果においては両者とも脱調に至るまでの時間および過程が一致し、波形が一致した。

ブランチ45の距離を150[km]、200[km]とした場合の線路定数の推定結果とその誤差率を表2に示す。これらの結果において誤差率は3.0[%]未満であり、小規模システム内の発電機の動揺出力波形は一致する結果となった。

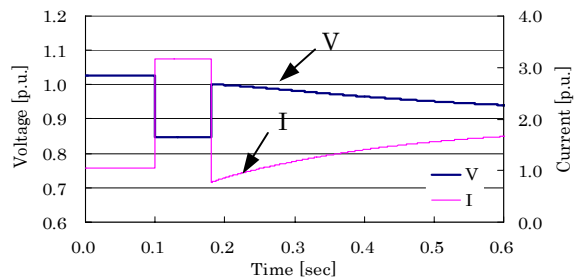


図3 観測母線での電圧・電流波形

表1 一機無限大母線での初期値および推定結果

	Parameters for transmission line	Initial values	Estimated values
R	0.0020 [p.u.]	0.0021 [p.u.]	0.0021 [p.u.]
X	0.0500 [p.u.]	0.0503 [p.u.]	0.0501 [p.u.]
Y _c	0.1000 [p.u.]	0.0000 [p.u.]	0.0989 [p.u.]
θ		0.0000 [rad]	-0.0001 [rad]

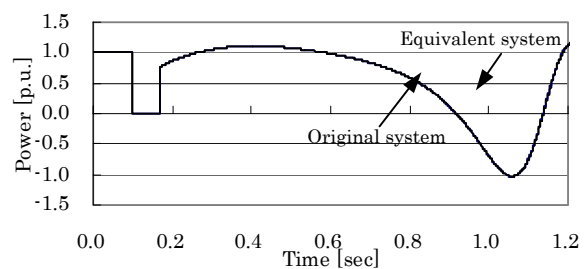


図4 発電機出力 (線路長 100[k m])

表 2 150[k m], 200[k m]での推定結果

	150km			200km		
	原系統 [p.u.]	推定値 [p.u.]	誤差率 [%]	原系統 [p.u.]	推定値 [p.u.]	誤差率 [%]
R	0.003	0.00303	1.070	0.004	0.00409	2.297
X	0.075	0.07501	0.015	0.100	0.09996	-0.036
Y _c	0.150	0.14994	-0.043	0.200	0.19885	-0.576

5. EAST10 を用いた有効性の確認

図 5 に示す電気学会EAST10 機系統モデル⁽⁴⁾(以下 EAST10 とする)を用いて等価回路の推定を行った。また、推定結果の有効性は、推定結果より作成した大規模系統の等価回路でのシミュレーション結果と原系統でのシミュレーション結果を用いて、発電機出力波形の類似性と臨界故障除去時間⁽⁵⁾ (以下 CCT とする)を比較することによって確認した。

〈5・1〉小規模系統内の発電機数を 1 機とした場合

図 5 に示す EAST10 の負荷ノードに小規模系統を接続し、その接続点から見た EAST10 側の等価回路の推定を行った。EAST10 の線路定数、発電機定数は電気学会技術報告第 754 号に掲載されている値を用いた。また、接続した小規模系統モデルは一機無限大母線系統での推定に用いたものを使用し、小規模系統をノード 41、ノード 44 およびノード 46 に接続した場合について検討を行った。

事故は三相短絡事故をブランチ 231 において 0.13[sec]継続させ、発電機 S1 が脱調した場合のデータを用いた。ノード 41 の観測母線での動揺中の電圧および電流波形を図 6 に示す。使用した電圧、電流の値は図中の事故除去後の 0.3[sec]での $\dot{V}_1=0.983[\text{p.u.}] \angle 0.055[\text{rad}]$, $\dot{I}_1=1.179[\text{p.u.}] \angle 0.456[\text{rad}]$ の値と 0.4[sec]での $\dot{V}_2=0.966[\text{p.u.}] \angle 0.059[\text{rad}]$, $\dot{I}_2=1.405[\text{p.u.}] \angle 0.663[\text{rad}]$ の値を用いた。これらより求めた初期値および推定結果を表 5 に示す。次に、原系統と等価回路での小規模系統内発電機の動揺出力波形を図 7 に示す。この図において事故除去後、発電機が脱調に至るまでの時間は原系統で 0.47[sec], 等価回路で 0.46[sec]であった。また、CCT は原系統で 0.08[sec], 等価回路で 0.86[sec]であった。小規模系統をノード 44 とノード 46 に接続し、その点から見た EAST10 の等価回路の推定結果と原系統と等価回路での CCT の結果を表 6、表 7 に示す。

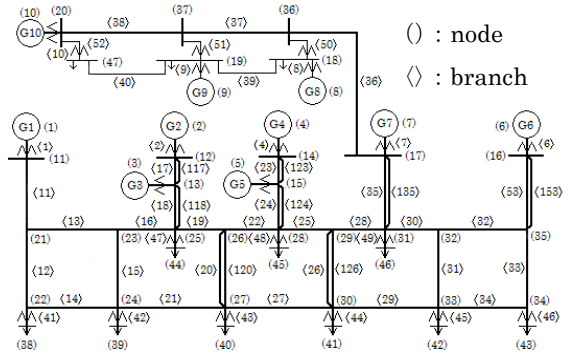


図 5 EAST10 機系統モデル

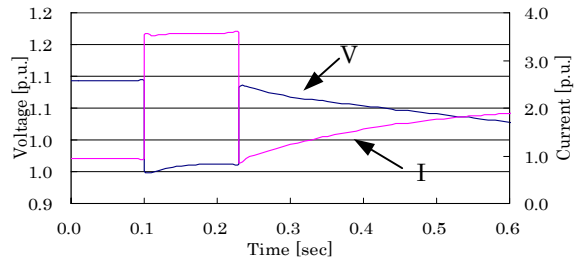


図 6 観測母線での電圧・電流波形

表 5 ノード 41 での初期値および推定結果

	Initial values	Estimated values
R	0.0715 [p.u.]	0.0695 [p.u.]
X	0.0233 [p.u.]	0.0257 [p.u.]
Y _c	0.0000 [p.u.]	0.5562 [p.u.]
θ	0.0000 [rad]	-0.5700 [rad]

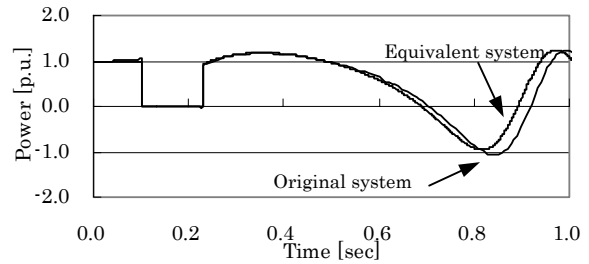


図 7 発電機出力 (ノード 41 に接続した場合)

表 6 ノード 44 およびノード 46 での推定結果

	Node 44	Node 46
R	0.0690 [p.u.]	0.0566 [p.u.]
X	0.0363 [p.u.]	0.0352 [p.u.]
Y _c	-0.7714 [p.u.]	0.3309 [p.u.]
θ	-0.5700 [rad]	-0.4038 [rad]

表 7 ノード 44 およびノード 46 での CCT

	Node 44	Node 46
Original system	0.082 [sec]	0.081 [sec]
Equivalent circuit	0.079 [sec]	0.080 [sec]

<5.2>小規模系統内の発電機数を2機とした場合

続いて EAST10 に接続する小規模系統を図8に示すように発電機数を2機として EAST10 のノード41に接続した。事故は三相短絡事故をブランチ35において0.13[sec]継続させ、発電機S1が脱調し、S2が安定であった場合のデータを使用した。

観測母線での電圧および電流波形を図9に示す。推定で使った電圧、電流の値は0.3[sec]の時の $\dot{V}_1=0.983[\text{p.u.}] \angle 0.055[\text{rad}]$, $\dot{I}_1=1.179[\text{p.u.}] \angle 0.456[\text{rad}]$ と 0.4[sec]での $\dot{V}_2=0.966[\text{p.u.}] \angle 0.059[\text{rad}]$, $\dot{I}_2=1.405[\text{p.u.}] \angle 0.663[\text{rad}]$ の値を使用した。これらより求めた初期値および推定結果を表8に示す。

次に原系統と等価回路での小規模系統内発電機S1, S2の動揺出力波形の比較を図10に示す。(a)に示すS1発電機出力波形は原系統と等価回路で脱調に至るまでの時間が0.473[sec]と0.471[sec]であり波形は良く一致している。(b)に示すS2発電機の波形は事故中および事故除去直後に波形のずれが見られる。また、S1の原系統と等価回路のCCTは0.06[sec]と0.067[sec], S2では0.151[sec]と0.143[sec]であった。

6. まとめ

本研究では小規模系統に接続された大規模系統の等価回路を小規模系統内の観測データを用いて推定する手法について検討を行った。

一機無限大母線系統での有効性の確認では推定結果が線路長を変化させた3つの場合において、いずれも原系統に近い結果が得られ、今回の検討では得られた推定結果は誤差率がすべて5.0[%]以下であり小規模系統内の発電機の動揺波形は一致する結果となった。また、5.1の検討では、ノード41に接続した場合で脱調に至るまでの時間で0.01[sec], CCTでは0.06[sec]の差であり原系統と等価回路での出力波形は良く一致した。これより本手法の有効性を確認した。しかし、5.2の検討では事故中および事故除去直後の発電機S2の出力波形において波形のずれがあり、この原因の解明が今後の課題である。

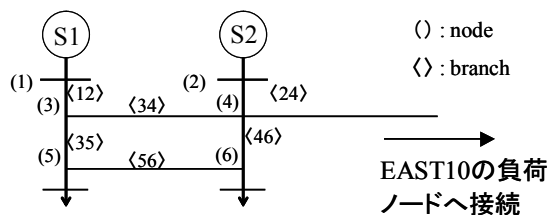


図8 2発電機小規模系統モデル

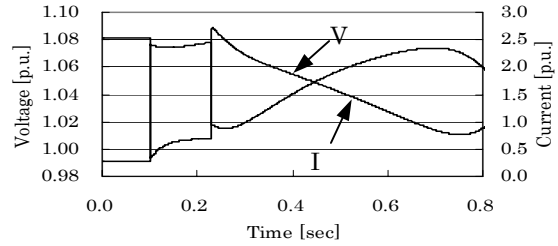
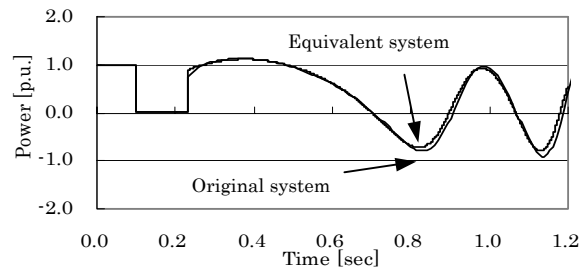


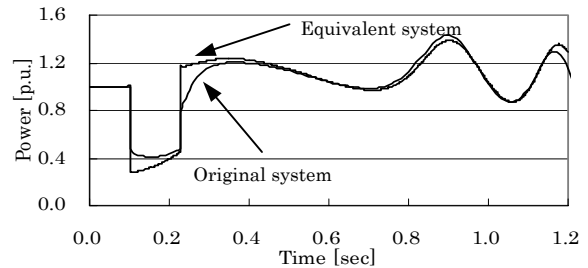
図9 観測母線での電圧・電流波形

表8 2発電機小規模系統での初期値および推定結果

	Initial values	Estimated values
R	0.0457 [p.u.]	0.0408 [p.u.]
X	0.0342 [p.u.]	0.0353 [p.u.]
Y_c	0.0000 [p.u.]	1.6461 [p.u.]
θ	0.0000 [rad]	-0.6062 [rad]



(a) S1 発電機出力波形



(b) S2 発電機出力波形

図10 2発電機小規模系統内の発電機出力

参考文献

- (1)及川昭, 木内徹, 佐藤正弘, 実測データを用いた電力系統等価回路の推定, 電気学会全国大会, 2005, 6-109
- (2)及川昭, 佐藤正弘, 小規模系統から見た大規模系統の推定法電力技術・電力系統技術合同研究会, 2005, PE-05-40
- (3)関根泰次・林宗明・芹澤康夫・豊田純一・長谷川淳: 「電力系統工学」, (1979)
- (4)電力系統モデル標準化調査専門委員会, 電気学会技術報告, 第754号, p12(1999-11)
- (5)田村康男: 「電力システムの計画と運用」, p33-34(1991-2)