

実測データを用いた動的等価回路の作成と安定度判定法

日大生産工(院) ○馬 寧 日大生産工 佐藤 正弘

1 まえがき

電力系統において、送電線へ事故が発生すると、事故除去のため、回線の開放さらには再閉路が行われ、発電機間の位相角が大きく変動し、発電機が脱調する場合もある。このような脱調現象を防止する必要がある。一発電機が大規模系統に接続した場合の安定度判定法の開発を目的にして、発電機からみた系統側を一線路と無限大母線で表現した動的等価回路を推定し、等面積法を用いた安定度判定法を開発することを検討した。

2 動的等価回路の作成法

一線路と無限大母線で構成される系統を用い、方法を説明する。図1のように系統事故の発生した線路を開放した後、発電機S1から見た系統側を一線路Aと無限大母線S2で表す。発電機S1の電圧 V 、 θ と発電機S1に接続する線路Aの電流 I 、 ϕ を測定し、無限大母線S2を基準として設定し、動的等価回路のパラメータを推定することが必要であり、以下にその方法を示す。

<2.1>パラメータの推定法

図1に示す R, X をインピーダンス Z と位相角 α で、次式で表す。

$$R + jX = Z \angle \alpha \quad (1)$$

有効電力 P 、無効電力 Q は(2)、(3)式のように求められる。

$$P = \frac{V^2}{Z} \cos \alpha - \frac{VE}{Z} \cos(\theta + \alpha) \quad (2)$$

$$Q = \frac{V^2}{Z} \sin \alpha - \frac{VE}{Z} \sin(\theta + \alpha) \quad (3)$$

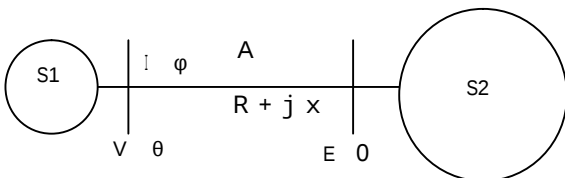


図1 一線路と無限大母線系統

(2) (3)式から、

$$G = (V^2 \cos \alpha - PZ)^2 + (V^2 \sin \alpha - QZ)^2 - (VE)^2 \quad (4)$$

になる。

非線形最小2乗法により、 N 組の測定値 (P, V, Q) を(4)式に代入した、関数 G_K^2 の和を L で定義する。

$$L = \sum_{K=1}^N G_K^2 \quad (5)$$

L が0になるような Z, α を推定するため、(5)式両辺を Z, α で偏微分すると、

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha} = \sum_{K=1}^N 4 G_K V^2 Z (P \sin \alpha - Q \cos \alpha) \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Z} = \sum_{K=1}^N 4 G_K (V^2 \cos \alpha - PZ)(-P) + (V^2 \sin \alpha - QZ)(-Q) \quad (7)$$

が得られる。

A は(6)、(7)式で求めた係数を成分とする N 行2列の行列である。

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_1}{\partial \alpha} & \frac{\partial L_1}{\partial Z} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial L_N}{\partial \alpha} & \frac{\partial L_N}{\partial Z} \end{bmatrix} = \sum_{K=1}^N \begin{bmatrix} \frac{\partial G_K^2}{\partial \alpha} & \frac{\partial G_K^2}{\partial Z} \end{bmatrix} \quad (8)$$

最小2乗法により、 L を最小化する $\Delta \alpha, \Delta Z$ は

$$\begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta Z \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T \Delta L \quad (9)$$

(9)式から求めることができる。

Newton-Raphson法により、得られた α, Z を用い、 α, Z を更新する。

<2.2>動的等価回路の作成

事故が発生した後、系統のパラメータ推定法により、得られた値を用い、系統内部の発電機から見た動的等価回路を図2のように示すことができる。

A method of making dynamic equivalent circuit by using
measurement data and stability judgment
Nei MA and Masahiro SATO

ここで、 $E_{\infty} \angle \delta_{12}$ が発電機内部の電圧と位相角で、 $E_{\infty} \angle 0$ は基準とした無限大母線側の電圧と位相角である。発電機内部の抵抗 ($R=0.0040$) は小さいので、無視する。 X_d が発電機内部の過渡リアクタンス ($X_d=0.35$) で、 $R_e + jX_e$ が線路のインピーダンスである。

<2.3>シミュレーションの結果

今回は、図3のように一線路と無限大母線で構成されるモデルシステムを用い、シミュレーションを行なった。

図3のように発電機は $P=1.00$ $V=1.00$ 、無限大母線は $E=1.00$ $\theta=0.00$ (RAD)、線路のインピーダンスは $Z=0.30$ (P.U.)、 $\alpha=1.5708$ (RAD) とするモデルシステムを用い、線路(4)に系統事故が発生した場合の安定度計算の結果から、10時点の実測データ V, P, Q, θ を用いて(5)式を満足する Z と α を求めるため、最小二乗法により、(9)式を繰り返してパラメータを推定した。

シミュレーションの結果について、初期値が任意値で、事故除去時刻も変動する場合は、推定して得られたモデルシステムのパラメータの値が表1で示す。

計算値 $X=0.0000$ $R=0.4000$ と比べると、誤差が小さいので、近似解になることが考えられる。

3 動的等価回路を用い、発電機の位相角 δ_{12} と出力 P_0 を求める方法

図2のような動的等価回路でシステムの安定度が維持されるか否かを、発電機の位相角 δ_{12} と出力 P_0 の変動の様相から、判定するためには、発電機内部の位相角 δ_{12} と出力 P_0 を求めることが必要である。その計算手順を次に述べる。

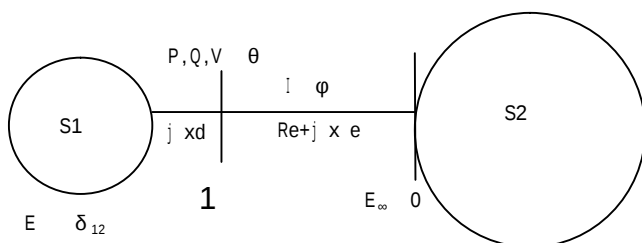


図2 動的等価回路

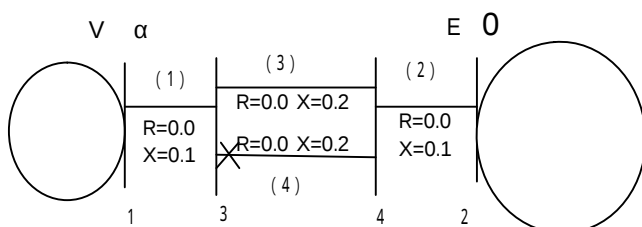


図3 モデルシステム

<3.1>発電機内部 $E_{\infty} \angle \delta_{12}$ の求め方

図2から見ると、ノード1の実測データ P, Q, V, θ は、次式の関係がある。

$$P + jQ = \vec{V} \cdot \vec{I}^* \quad (10)$$

動的等価回路の電流 I は、

$$\vec{I} = \frac{P - jQ}{\vec{V}} \quad (11)$$

になる。

したがって、次の関係を用い、発電機内部の電圧 $E_{\infty} \angle \delta_{12}$ を求めることができる。

$$\vec{E} = jX_d \cdot \vec{I} + \vec{V} \quad (12)$$

<3.2>事故除去後の出力 P の計算

式(12)で得られた $E_{\infty} \angle \delta_{12}$ の値を用い、ノード1で発電機の出力 P_0 と位相角 δ_{12} の関係は、

$$P_0 = \frac{E \cdot E_{\infty}}{X_d + X_e} \sin \delta_{12} \quad (13)$$

になる。

ここで、電力システムの機器の抵抗分はリアクタンス分に比べると十分小さいので、簡単に計算するために、線路の抵抗 R_e を無視した。

<3.3>事故前の安定平衡点 δ_s の計算

事故前の測定値 P_m と線路のリアクタンス X を用い、式(13)に代入すると、平衡点 δ_s は

$$\delta_s = \sin^{-1} \left(\frac{(X_d + X) \cdot P_m}{E \cdot E_{\infty}} \right) \quad (14)$$

になる。

表1 初期値と推定した値の対照表

事故除去時刻 (sec)	初期値		推定値	
	R	X	R	X
0.3	0.2	0.2	-0.0019	0.3972
0.35			-0.0006	0.4010
0.3	0.3	0.3	0.0054	0.4018
0.35			0.0060	0.3998
0.3	0.0	0.3	-0.0002	0.3981
0.35			-0.0002	0.3991
0.3	0.0	0.4	0.0000	0.4000
0.35			0.0000	0.4000
0.3	2.0	0.0	-0.0073	0.3954
0.35			0.0001	0.3986

<3.4>シミュレーションの結果

また図3のモデル系統を用い、動的等価回路のインピーダンス $Re + j X_e$ は表1から $Re = -0.0003, X_e = 0.3976$ とすると、図2のような動的等価回路が求められる。

図2のノード1に0.05秒間隔の10組の実測データ P, Q, V, θ を用い、式(10)～式(14)により、シミュレーションを行った。シミュレーションの結果を表2で表す。

この表から見ると、事故が発生した後、発電機の位相角が大きく変動し、発電機の出力 P_0 は $90(\text{deg})$ に一番大きくなり、それから減少し、0に近づくことがわかる。

事故前の平衡点 δ_s を式(14)によって計算すると、 $\delta_s = 39(\text{deg})$ になる。

安定度判定のため、表2のデータを用い、縦軸 P_0 で、横軸 θ_{12} で構成される P_0 と δ_{12} の電力相差角曲線を求めることができ、図4のように示す。

4 等面積法を用いた安定度の判定

系統事故時過度安定度が維持されるか否か、通常事故後1秒程度の発電機相互間の位相角の変動の様相から、判定できる場合が多い。発電機、一線路と無限大母線から構成される動的等価回路が近似的に適用できるかどうかを検討する。

<4.1>安定度の判定方法

安定度の判定法について、図4から説明する。

表2 位相角 δ_{12} と出力 P_0 の推定値

発電機内部 位相角 $\delta_{12}(\text{deg})$	出力 P_0	発電機内部 位相角 $\delta_{12}(\text{deg})$	出力 P_0
58	1.4555	120	1.4816
62	1.5149	124	1.4181
66	1.5670	128	1.2706
70	1.6115	132	1.2706
74	1.6481	136	1.1873
78	1.6767	140	1.0983
82	1.6971	144	1.0040
86	1.7093	148	0.9048
90	1.7132	152	0.8011
94	1.7087	156	0.6936
98	1.6959	160	0.5827
102	1.6748	164	0.4690
104	1.6612	168	0.3530
108	1.6280	172	0.2352
112	1.5869	176	0.1163
116	1.5380	180	-0.0031

ここで、 δ_s が事故発生の時刻で、 δ_c が事故除去の時刻である。

事故が発生すると、 P_0 は点1からゼロに落ち、 δ_c で事故除去した時、点2に移る。点2の P_0 が P_m より大きいので、減速する。エネルギーで考えると、Aの面積に相当する加速エネルギーとBの面積に相当する減速エネルギーが等しいとすれば、点3で速度が0となり、 δ_{12} が最大になる。この後点3から減速され、新しい平衡点に収束するまで動揺することになる。

安定度を判定するため、等面積法を用い、Aの面積とBの面積を等しいとする位相角 δ は安定限界である。Aの面積とBの面積を比べると、Bの面積が大きければ、系統安定と判断する。

図4からAの面積は

$$S_A = P_m \cdot (\delta_c - \delta_s) \quad (15)$$

になり、事故後のデータを用い、Bの面積は

$$S_B = \int_{\delta_c}^{\delta} \left(\frac{E' \cdot E_{\infty}}{X_d' + X_e} \sin(\delta_{12}) - P_m \right) d\delta \quad (16)$$

になる。

5 シミュレーションによる確認

<5.1>一線路と無限大母線系統において

表2により、0.05秒の間隔として推定した δ_{12} と P_0 の値を用い、プログラムでシミュレーションを行った。

事故の発生時刻が0.1秒として式(15)(16)により、事故継続時間は次々変化すると、図3のモデル系統の安定度を判定した。判定の結果について、表3に示す。

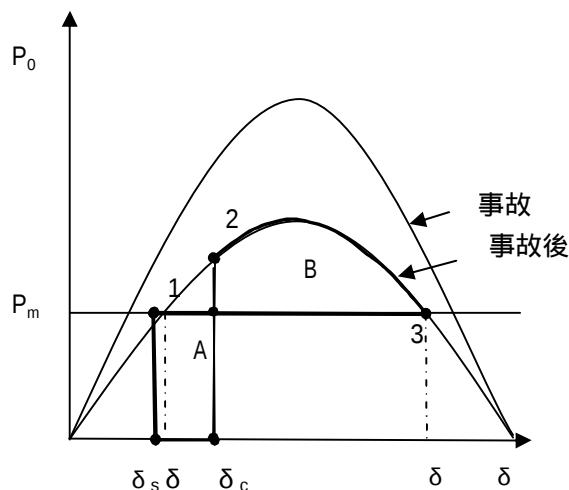


図4 電力相差角曲線

表3から推定したCCTは0.33秒である。この結果はシミュレーションで計算したCCTの値と一致になることがわかった。

<5.2>多機系統において

本手法でEast10モデルを用い、安定度判定のため、次々にシミュレーションを行った。

(1) 発電機G1の近端に事故発生の場合

発電機G1の近端に事故発生時刻は0.1秒とすると、近端ノードの実測データ(P Q V θ)を用い、線路のパラメータを推定し、 $P_0 \delta_{12}$ カーブを

求め、安定度判定を行った。結果を表4に示す。

表4を見ると、CCTの推定値とシミュレーションによるCCTは一致している。

(2) 発電機G6の近端に事故発生の場合

また事故発生時刻は0.1秒とし、発電機G6の近端データを用い、線路のパラメータと系統の安定度を推定した。結果は表5に示す。

表5から、推定したCCTはCCT=0.04である。シミュレーションの結果CCT=0.02と比べると、誤差が0.02秒であることがわかった。

6 まとめ

一発電機、一線路と無限大母線で構成されるモデル系統で事故が発生した後、0.05秒間隔の実測データ(P, Q, V θ)を用い、動的等価回路を求めた。等面積法により、モデル系統の安定度と多機系統の安定度について、シミュレーションを行い、安定度判定ができることを確認した。

今後の課題は、本手法でEast10モデルを用い、様々な条件で適用できるかどうかを確認することである。

「参考文献」

- 1) William L. Brogan, "Modern Control Theory", QUANTUM, pp.91 ~ 93
- 2) 小向敏彦, 色川彰一, 加藤政一, 電力システム工学, 第3章, pp.35 ~ 44
- 3) 馬寧, 坂入利保, 佐藤正弘, 系統事故後の動的等価回路のパラメータ推定法, 電気学会全国大会, No.6-295, pp.480 ~ 481(平成21年)
- 4) 馬寧, 佐藤正弘, 実測データを用いた動的等価回路の安定度判定への適用, 電気学会研究会, PE - 09 - 47(平成21年9月)

表3 安定度判定の結果

事故継続時間	Aの面積	Bの面積	提案方法による安定度判定結果	シミュレーションによる安定度判定結果
	S_A	S_B	安定度	安定度
0.20	19	68	S	S
0.22	24	66	S	S
0.24	28	64	S	S
0.26	33	61	S	S
0.27	35	59	S	S
0.28	37	58	S	S
0.29	40	57	S	S
0.30	42	56	S	S
0.31	44	53	S	S
0.32	47	50	S	S
0.33	49	49	S	S
0.34	52	46	U	U

表4 シミュレーションの結果

事故除去時刻	初期値 R=0.2 X=0.2	事故継続時間	S_A	S_B	提案方法による安定度判定	シミュレーションによる安定度判定
	推定したパラメータの値					
0.14	R=0.0370 X=0.1150	0.04	111	230	S	S
0.15	R=0.0355 X=0.1127	0.05	133	223	S	S
0.16	R=0.0320 X=0.1105	0.06	152	214	S	S
0.18	R=0.0291 X=0.1070	0.08	185	203	S	S
0.19	R=0.0281 X=0.1056	0.09	200	200	S	S
0.20	R=0.0270 X=0.1044	0.10	214	191	U	U

表5 シミュレーションの結果

事故除去時刻	初期値 R=0.2 X=0.2	事故継続時間	S_A	S_B	提案方法による安定度判定	シミュレーションによる安定度判定
	推定したパラメータの値					
0.11	R=0.0053 X=0.0744	0.01	45	298	S	S
0.12	R=0.0316 X=0.0822	0.02	160	243	S	S
0.13	R=0.0169 X=0.0784	0.03	178	246	S	U
0.14	R=0.0139 X=0.0772	0.04	213	245	S	U
0.15	R=0.0135 X=0.0768	0.05	249	227	U	U