

動揺中の実測データを用いた電力系統等価回路の推定

日大生産工（院） ○及川 昭
日大生産工（院） 木内 徹
日大生産工 佐藤 正弘

1. まえがき

電力系統とは、発電所で発生させた電力を送電線、変電所を介して需要家へと送る巨大なシステムである。これと同様に製鉄所の構内などにおいては発電機および電動機等の負荷が存在し、自家電力系統を構成している⁽¹⁾。また、自家電力系統は自家発電のみならず、商用系統に連結され受電も行っているため、系統のじょう乱は互いに影響を及ぼす。よって、自家電力系統の安定度を判定する際には商用系統を考慮した上で行わなくてはならない。安定度の判定は、自家電力系統および商用系統を模擬し、潮流計算によって安定度判定を行うが、その際に自家電力系統は既知で正確に模擬できるが、商用系統は正確には模擬できない。この商用系統の等価回路を正確に把握できたならば、より正確な安定度解析が行える。そこで本論ではこのような場合に用いる自家電力系統から見た商用系統の等価回路を推定する手法について検討を行った。

2. 脱調現象と等面積法

電力系統には多数の発電機が存在し、それぞれが互いに同期を取りながら、同じ回転速度で運転している。しかし、落雷等の系統事故により、系統に大きなじょう乱が

発生した場合、発電機間の同期化力が失われ、位相差が拡大し、その大きさが 180 度以上となることがある。このような現象を脱調と呼ぶ。発電機が脱調に至るまでの経緯を理解するのに有効な手段として等面積法がある。図 1 に示す一機無限大母線系統の A 点において三相地絡事故が発生した場合に等面積法⁽²⁾を説明する。図 2 に示すのが電力相差角曲線⁽³⁾であり、次式で与えられる。

$$P = \frac{VE}{X'_d + X} \sin \delta \dots\dots\dots (1)$$

定常時において発電機の運転点は 2 回線分の電力相差角線上の点にあるが事故発生時には零に落ち、加速トルクによって発電機の回転子が加速され位相角が δ_1 まで拡大する。その時に故障回線が開放されると、運転点は一回線分の電力相差角線上点に移行する。点では減速トルクが働き、安定点に戻ろうとするが S_a の面積に相当する加速エネルギーを得ているために位相差は拡大する。このとき安定度限界点を超えなければ安定となり、そうでなければ、脱調に至る⁽³⁾。

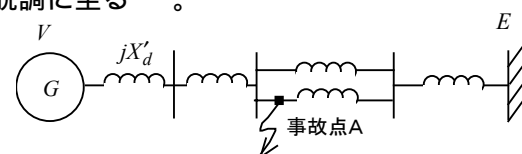


図 1 2 回線送電系統

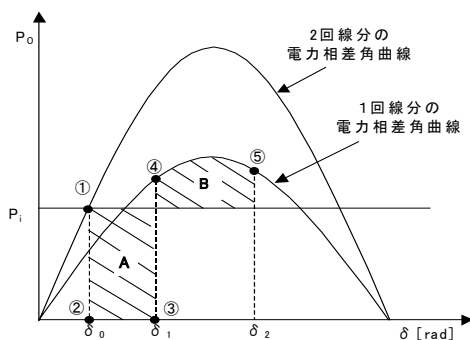


図2 等面積法

3. 推定法の原理

提案する等価回路の推定法の原理について説明する。まず、本手法では脱調に至った発電機の過渡状態のデータを用いて推定を行う。その理由としては前節で述べたように発電機の運転点は電力相差点角曲線上を移動するため発電機間の位相差が90度の時点で電力が最大値を示す。この関係を用いることにより、後に与えられる式が簡単化できるためである。次に図3に示す一機無限大母線系統を用いて等価回路の推定に必要な関係式の導出を行う。図中に示す2番ノードが発電機端子であり、それより右が系統側、左側が発電機内部である。実際にデータを測定できるのは発電機端子であり、発電機内部電圧 V_g 、 δ は発電機が過渡状態で X_d' が既知であるときのみ算出できる。これらの値を用いると回路について以下の方程式が成り立つ。

$$\left\{ \begin{array}{l} P = \frac{V_g E}{X_l + X} \quad \dots\dots\dots (2) \\ E \cos \theta = \frac{(X_l + X) V_t + V_g X \sin \theta + X E \cos \theta}{X_l + X} \quad (3) \\ E \sin \theta = \frac{X E \sin \theta - V X \cos \theta}{X_l + X} \quad \dots\dots\dots (4) \end{array} \right.$$

この連立方程式を解くことにより、未知数 E 、 θ 、 X を求める関係式が以下のように導

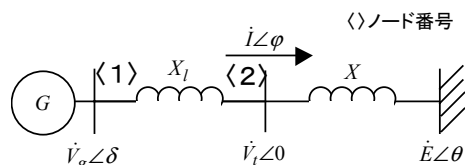


図3 一機無限大母線系統

かれる。この関係式を用いることにより無限大母線の等価回路を推定できる。

$$E = \frac{X_l + X}{V_g} P_m \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{X_l P_m}{V_t V_g} \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$X = \frac{-X_l^2 P_m \sin \theta}{X_l P_m \sin \theta + V_g^2 \cos \theta} \quad \dots\dots\dots (7)$$

4. シミュレーションによる確認

4.1 一機無限大母線系統による確認

本推定法の有効性を確認するために図4に示す系統モデルを用いて等価回路の推定を行う。図4に示したモデルは1番ノードが発電機端子であり、それより右が無限大母線である。線路のリアクタンスを $X_1=0.15$ 、 $X_2=0.378$ 、 $X_3=0.05$ として、潮流計算を行い、A点において3相地絡事故を模擬し、1番発電機を脱調させるシミュレーションを行った。それより得られたデータを(5)～(7)式に代入し E 、 θ 、 X の算出を行った。まず、シミュレーションより得られた発電機間の位相差特性および電力特性を図5、図6に示す。図5の位相差特性では時間と共に位相差が拡大し時刻が0.575秒の時点で位相差が180度に達して脱調に至っていることが確認できる。また、図6の発電機出力特性においても発電機出力が事故後、大きく弧を描きながら変化し

ている。0.35 秒周辺で最大値を示しているため、この点付近で発電機間位相差が 90 度に至ったものと考えられる。

本手法による等価回路の推定結果を表 1 に示す。結果では電力が最大値を示した時刻は 0.339 秒であり、無限大母線の電圧は 0.909 - 60.352、リアクタンスは 0.498 という結果であった。潮流計算時に設定した無限大母線の電圧は 1.0[p.u]、事故中の無限大母線のリアクタンス合計は 0.578 であるので、10%程度の誤差が生じている。しかし、算出された結果中の時刻が 0.317 秒の点において電圧が 0.999 - 61.34、リアクタンスが 0.577 と極めて設定値に近い結果を示す点を確認できた。この原因としては、電力位相差角曲線において発電機出力が最大値を示す点が位相差角 90 度の点からずれたためと推測される。

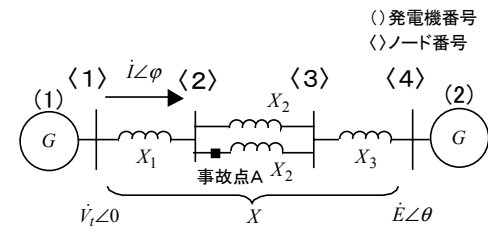


図 4 シミュレーションモデル系統

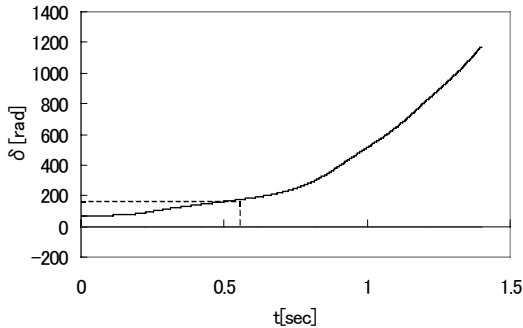


図 5 位相差特性

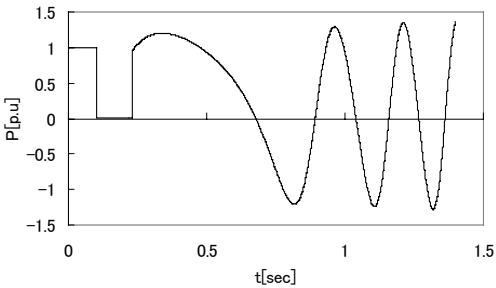


図 6 1 番発電機出力特性

表 1 無限大母線の計算結果

time	P	X	E	θ
0.316	1.194	0.581	1.003	-61.390
0.317	1.195	0.577	0.998	-61.337
0.318	1.196	0.573	0.994	-61.290
0.338	1.202	0.501	0.913	-60.392
0.339	1.202	0.498	0.909	-60.352
0.340	1.202	0.495	0.905	-60.312

4 . 2 E A S T 10 による確認

本節ではモデル系統をより複雑にして本手法の有効性の確認を行う。用いるモデル系統は図 7 に示す E A S T 10 モデル系統⁽⁴⁾であり、1 番の発電機から見た電力系統の等価回路を推定する。ブランチ 11 において 1 回線三相地絡事故を模擬する潮流計算を行い、その結果を用いて 4.1 節と同様に E、 θ 、X を求めた。潮流計算より求めた発電機出力特性と本手法で推定した E、 θ 、X の結果を表 2 に示す。これより発電機出力が最大値を示す点での X の値を見ると 0.038 となっている。この値はブランチ 1 およびブランチ 11 のリアクタンスの和よりも小さく、間違いであると推測される。

そこで、今回の推定によって本来ならばどのくらいの X の値が得られるはずだったのかを一機無限大母線で、X の値を漸次変えながら潮流計算を行い、その発電機出力特性が、図 8 の E A S T 10 を用いて潮流計算を行った結果の電力特性と波形が近くな

るようにして、 X の値を求めた。その値は0.125であり、求めた電力特性を比較した波形を図9に示す。この値を見てからも分かるように今回の本手法で求めた X の値は非常に小さく適当な値でなかったと言える。今回の等価回路の推定において誤差を小さくし、より精度の高い等価回路を求めることが今後の課題である。

5. あとがき

本稿では、一機無限大母線系統、EAST10モデル系統と等価回路の推定を行ってきた。結果はそれぞれ誤差を含んでおり、その原因もまだ解明できていない。早急にこの原因を突き止めることが今後の課題である。また、今回の推定法には線路の抵抗分および対地静電容量含んでいない。そちらの件に関してもあわせて検討を進める。

参考文献

- (1) 加戸他：産業用電力系統のトラブルと解析
- (2) 小向他：電力システム工学，コロナ社
- (3) 長谷川他：電力系統工学，オーム社
- (4) 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」，電機学会技術報告，第754号（1999 - 11）

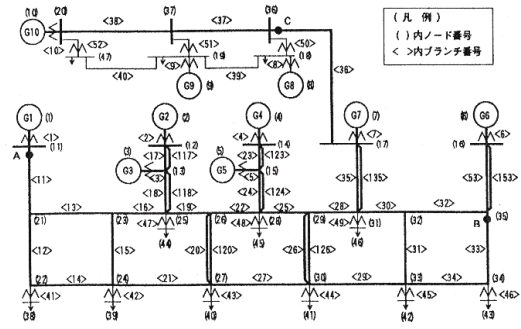


図7 EAST10モデル系統

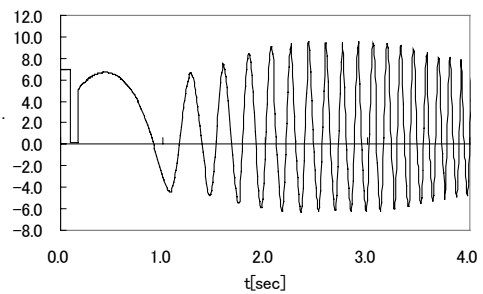


図8 1番発電機出力特性(EAST10)

表2 EAST10 計算結果

time	P	X	E	θ
0.430	6.716	0.035	1.111	-11.856
0.440	6.718	0.038	1.110	-12.847
0.450	6.714	0.040	1.108	-13.845
0.800	3.067	0.122	0.530	-60.923
0.810	2.833	0.125	0.493	-63.126
0.820	2.589	0.127	0.454	-65.419

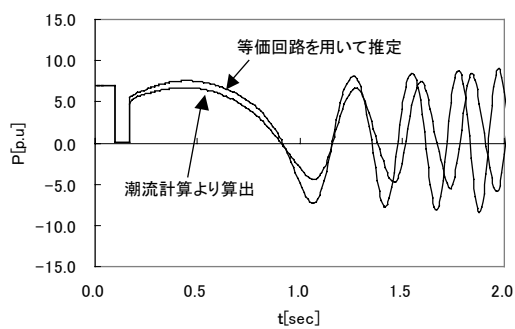


図9 出力特性の比較(一機無限)