

電力系統の安定化対策のための発電機解列台数の推定法

日大生産工（院） ○飯村 勇人
日大生産工 佐藤 正弘

1. まえがき

発電所の近端に落雷等の系統事故が発生すると、事故時の電圧低下に伴い有効電力が大きく減少し、発電機群の回転子が加速され、同期運転を保つことができずに同期はずれを起こす場合がある。事故により発電機の回転子の位相角が動揺し開き続けて 180 度を超えると脱調となり、これを放置すると広範囲に事故波及し大規模な停電へと発展する可能性があるため、発電機を系統から切り離さなければならない。このような現象を対象に脱調を予測し発電機群の一部を解列し残りを安定化する方法（電源制限）がある⁽¹⁾。

本論文では、脱調と判定した場合の安定化に必要な発電機の解列台数の推定法を検討した。

2. 安定度判定

〈2.1〉 系統縮約

対象とする発電機の位相角が残りの発電機群に対して変動する現象を一機無限大母線系統（動的等価回路）の現象として模擬する。図 1 の上の図は多機系統、下の図は等価回路を表している。ノード B から見た系統側を、一本の線路と無限大母線で表し、電圧 V と電流 I を測定することで等価インピーダンスを推定する。等価インピーダンスの推定法は文献（2）を引用した⁽²⁾。そして、ノード B から見た発電所側を等価な 1 台の発電機として表し、実際の系統のパラメータを用いる。ここで、 δ 、 θ 、 ϕ は E を基準としたときの位相角である。

〈2.2〉 電力相差角曲線

一機無限大母線の線路を二回線とし、発電機近端において三相二回線送電線の片方に系統事故が発生し、一回線を解放して事故を除去した場合を想定する。このとき、送電電力 P と位相角 δ の関係は図 2 のような電力相差角曲線（以後 $P-\delta$ 曲線）で表され、発電機の動揺は等面積法により評価することができる。 P_1 は事故発生前の電力、 P_2 は事故除去後の電力、 P_3 は電源制限後の電力、 P_m は機械入力、 P_{mc} は電源制限後の残った発電機の機械入力である。図 2 の面積 A は発電機の加速エネルギーを、 B と C は減速エネルギーを表しており、加速エネルギーの方が大きければ脱調、減速エネルギーの方が大きければ安定と判定することができる。そのため、面積 A 、 B 、 C を求めるために、 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_u 、 δ_{uc} を推定することが必要となる。なお、 δ_1 は事故発生時、

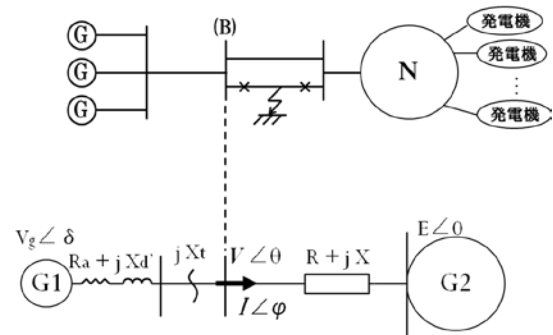


図 1 一機無限大母線系統（動的等価回路）

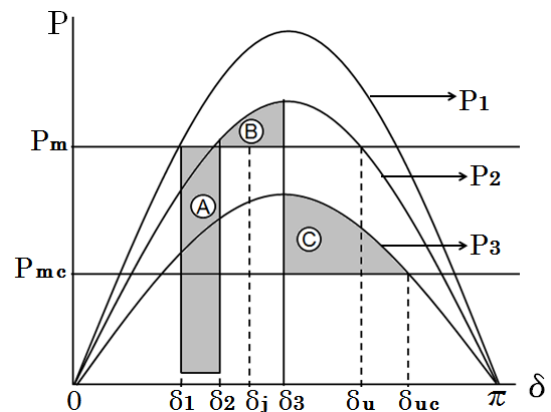


図 2 電力相差角曲線（ $P-\delta$ 曲線）

δ_2 は事故除去時、 δ_3 は電源制限時、 δ_u は不安定平衡点、 δ_{uc} は電源制限後の不安定平衡点、 δ_j は安定度判定や解列する発電機の台数の推定などを計算する時点である。

3. $P-\delta$ 曲線と位相角の推定

〈3.1〉 データの測定

動的等価回路のインピーダンスの推定には、事故除去後 40 ms 経過した後の 70 ms 間に測定したデータを用いる⁽³⁾。この事故除去後 110 ms 時点（以下判定時点）でインピーダンスの推定、安定度判定、解列台数を推定する。また、電源制限には CB 開閉やトリップ信号の伝送遅延時間があるため、各種の計算が終了した時点から 80 ms 後に発電機が解列されると想定し⁽³⁾、発電機内部電圧 V_g は端子電圧 V と電流 I を用いて判定時点から 80ms 後の大きさを予測する。

〈3.2〉 P-δ 曲線の推定

(1) 発電機内部電圧の推定

事故発生後 1 秒程度の現象を対象とするので、P-δ 曲線の作成に、直軸過渡リアクタンス X_d' 背後の発電機内部電圧 V_g $\angle \delta$ の大きさを用いる。値は図 1 より (1) 式で求められる。

$$V_g \angle \delta = V \angle \theta + (R_a + jX_d' + jX_t) \cdot I \angle \varphi \quad \cdots (1)$$

ここで、 R_a は発電機内部の電機子抵抗、 X_t は主変圧器のリアクタンスである。

(2) P-δ 曲線の推定

事故除去後の電力 P_2 は (2) 式のように 3 つの項から構成され、第 1 項と第 2 項をまとめると (3) 式のようになる。

$$P_2 = \frac{xV_g E}{r^2 + x^2} \sin \delta - \frac{rV_g E}{r^2 + x^2} \cos \delta + \frac{rV_g^2}{r^2 + x^2} \quad \cdots (2)$$

$$= \frac{\sqrt{(xV_g E)^2 + (-rV_g E)^2}}{r^2 + x^2} \sin \lambda + \frac{rV_g^2}{r^2 + x^2} \quad \cdots (3)$$

ただし r 、 x 、 λ 、 β はそれぞれ下式で表される。

$$r = R_a + R, \quad x = X_d' + X_t + X \quad \cdots (4)$$

$$\lambda = \delta - \beta \quad \cdots (5)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(-\frac{r}{x} \right) \quad \cdots (6)$$

ここで、 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 を求めるために δ_j を求める。

一般的に r は x に比べて小さいので無視して考えることが多いが、(2) 式のように抵抗分 r を含めて考えると、P-δ 曲線は図 3 のようになり $\pi/2$ で対称にならないが、 λ の関係にすると対称となる。判定時点の電力の測定値を P_j とすると、判定時点の λ_j は (7) 式で表される。

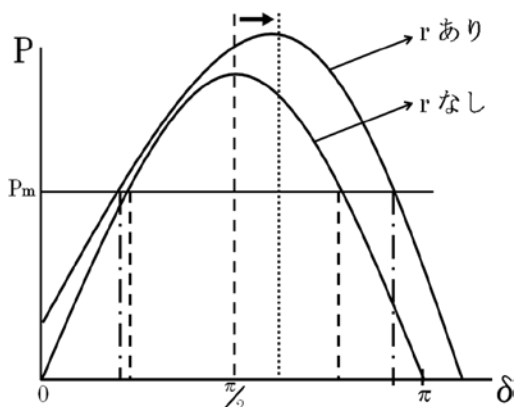


図 3 P-δ 曲線の違い

$$\lambda_j = \sin^{-1} \left\{ \frac{P_j \cdot (r^2 + x^2) - rV_g^2}{\sqrt{(xV_g E)^2 + (-rV_g E)^2}} \right\} \quad \cdots (7)$$

そして、 λ から δ に直すことで δ_j は (8) 式で求められる。

$$\delta_j = \lambda_j + \beta \quad \cdots (8)$$

〈3.3〉 位相角変化分の計算

事故発生からの位相角の変化分の計算法を示す。発電機の機械入力 P_m 、慣性定数 M 、角速度 ω より、運動方程式は (9) 式となる⁽⁴⁾。

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P \quad \cdots (9)$$

また、 ω と δ の関係は (10) 式で表される。

$$\omega = \frac{d\delta}{dt} \quad \cdots (10)$$

一定間隔の時間刻みの順番を k 、時間の刻み幅を Δt とすると、(9) 式より、 Δt ごとの ω は (11)、(12) 式で計算できる。

$$\Delta \omega_k = \frac{(P_m - P_k) \cdot \Delta t}{M} \quad \cdots (11)$$

$$\omega_k = \omega_{k-1} + \Delta \omega_k \quad \cdots (12)$$

したがって、(10)、(11)、(12) 式より、事故発生時点からの δ の変化分は (13)、(14) 式で逐次加算して求める。

$$\Delta \delta_k = \omega_k \cdot \Delta t \quad \cdots (13)$$

$$\delta_k = \delta_{k-1} + \Delta \delta_k \quad \cdots (14)$$

Δt ごとの位相角の増加分 $\Delta \delta$ がわかるので、事故除去時から判定時点までの位相角の増加分を δ_j から引くことにより事故除去時点の位相角 δ_2 を推定することができる。 δ_1 も同様にして推定できる。また、インピーダンス推定時の 70 ms 間の各 Δt ごとに求めた $\Delta \delta$ から 80 ms 後の δ_3 を最小二乗法により予測した。

〈3.4〉 平衡点の推定と安定度判定

不安定平衡点 δ_u を求めるために λ_u を求める。 λ_u は (15) 式で表される。

$$\lambda_u = \pi - \sin^{-1} \left\{ \frac{P_m \cdot (r^2 + x^2) - rV_g^2}{\sqrt{(xV_g E)^2 + (-rV_g E)^2}} \right\} \quad \cdots (15)$$

そして λ を δ に直すと δ_u は (16) 式で求められる。

$$\delta_u = \lambda_u + \beta \quad \cdots (16)$$

δ_u が求められるので、電源制限前の減速エネルギー B は (17) 式のように P_2 を δ_2 から δ_u まで積分すれば求められる。

$$B = \int_{\delta_2}^{\delta_u} (P_2 - P_m) d\delta \quad \dots\dots\dots (17)$$

加速エネルギー A は、事故発生時から事故除去時まで Δt ごとに測定した P と計算した $\Delta \delta$ を用いて求める。求めた A と B の面積の大きさを比較して安定度判定を行う。

〈3.5〉 電源制限と 解列台数の推定

脱調と判定した場合に電源制限を行う。この節では電源制限時に解列する発電機の解列台数の推定法について述べる。

ここで、発電所内の発電機総台数を n、解列台数を m とする。この時の回路構成を図 4 に示す。発電機を解列すると、 R_a 、 X_d' 、 X_t 、 P_m 、 M は表 1 のように変化する⁽⁵⁾。したがって、(2) 式の r と x も変化するの、電源制限後の電力 P_3 と δ_{uc} が求められる。

電源制限を行う場合、B のエネルギーは P_2 を δ_2 から δ_3 まで積分した値となるが、発電機を解列するので、解列されない発電機のエネルギーは台数比だけ減少する。残った発電機のエネルギー A と B を A_c 、 B_c とすると、(18)、(19) 式で表せる。

$$A_c = A \cdot (n-m) / n \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$B_c = B \cdot (n-m) / n \quad \dots\dots\dots (19)$$

そして、電源制限後の減速エネルギー C は P_3 を δ_3 から δ_{uc} まで積分した値となる。

これより、加速エネルギーは A_c 、減速エネルギーは $(B_c + C)$ を用いて安定度判定を行う。

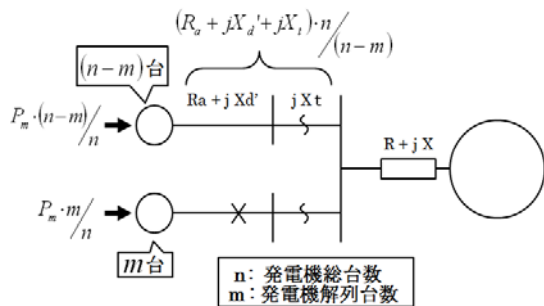


図 4 電源制限時の回路構成

表 1 電源制限によるパラメータの変化

	電源制限前	電源制限後
発電機内部インピーダンス	$R_a + jX_d'$	$(R_a + jX_d') \cdot n / (n-m)$
主変圧器リアクタンス	jX_t	$jX_t \cdot n / (n-m)$
機械入力	P_m	$P_m \cdot (n-m) / n$
慣性定数	M	$M \cdot (n-m) / n$

A_c よりも $(B_c + C)$ の値が小さい場合は脱調と判定し、m を 1 台増やして再度計算を行う。そして、 A_c よりも $(B_c + C)$ の値が大きいと判定したときの m の値が解列台数となる。また、 $n = m$ となった場合は全ての発電機を解列することになるので脱調と判定する。

4. シミュレーション

一機無限大母線系統と電気学会 EAST10 機系統モデルを用いて提案手法の有効性を検討した。なお、過渡安定度計算プログラムの計算結果を厳密解とする。

〈4.1〉 一機無限大母線系統

使用したモデル系統図および主な定数を図 5 に示す。発電機 G1 は 5 台の発電機から構成され、発電機出力を 1.0 [pu] とした。事故継続時間を徐々に長くして、安定度判定と安定化のための発電機の解列台数が、厳密解と提案法でどれだけ一致するか検討した。

結果を表 2 に示す。表 2 において S は安定、U は脱調を表しており、 $U \rightarrow S$ は対策なしでは脱調するが、発電機を解列することによって安定化できたことを示す。事故継続時間が 0.05 [s] から 0.11 [s] までのケースは、厳密解と提案法では解列台数が一致もしくは差が 1 台となり、良好な結果と考えられる。しかし、事故継続時間が 0.05 [s] の場合は、厳密解では安定であったが、提案法では脱調と判定し、解列台数は 1 台と誤判定したケースとなった。また、0.12 [s] 以降のように事故継続時間が長い場合は、提案法では解列台数が厳密解より 1 台少なく推定し、安定化できないケースとなった。

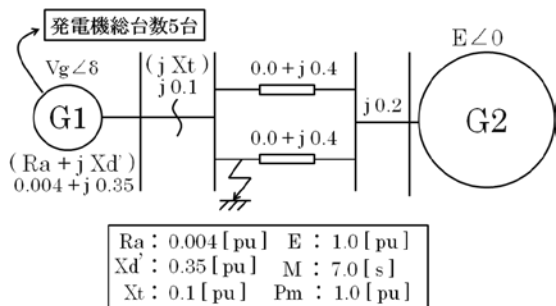


図 5 モデル系統図

表 2 検討結果（一機無限大母線系統）

事故継続時間	厳密解		提案法	
	安定度判定	解列台数	安定度判定	解列台数
0.05	S	0	$U \rightarrow S$	1
0.07	$U \rightarrow S$	1	$U \rightarrow S$	1
0.09	$U \rightarrow S$	2	$U \rightarrow S$	2
0.11	$U \rightarrow S$	3	$U \rightarrow S$	3
0.12	$U \rightarrow S$	4	$U \rightarrow S$	3
0.13	$U \rightarrow U$	5	$U \rightarrow S$	4

〈4.2〉 EAST10 機系統モデル

EAST10 機系統モデル図を図 6 に示す⁶⁾。図 6 の A 点において系統事故が発生した場合の発電機の位相角の動揺を図 7 に示す。この場合、発電機 G1 は脱調し、他の発電機は一群となり位相角の動揺が小さいので、一機無限大母線系統の現象とよく似ていることがわかる。G1 を対象に安定度判定と安定化のための発電機の解列台数が、厳密解と提案法でどれだけ一致するか検討した。なお、G1 は 7 台の発電機から構成され、発電機出力を 7.0 [pu] とした。また、スラックノードは G7 とした。図 8 に G1 を 7 台のうち 3 台を解列することにより安定化できた例を示す。

検討結果を表 3 に示す。事故継続時間が 0.05 [s] から 0.13 [s] までのケースは、厳密解と提案法では解列台数が一致もしくは差が 1 台となり、良好な結果と考えられる。しかし、事故継続時間が 0.14 [s] 以降の場合は、提案法では解列台数が厳密解より少なく推定し、安定化できないケースとなった。

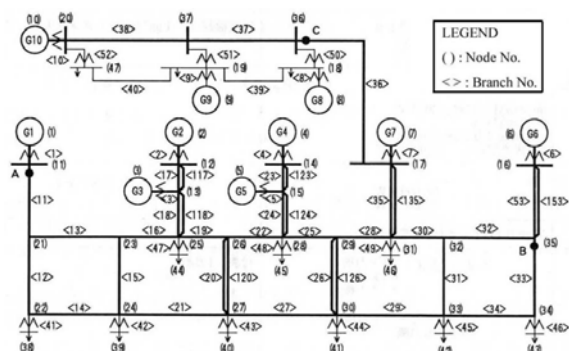


図 6 EAST10 機系統モデル図

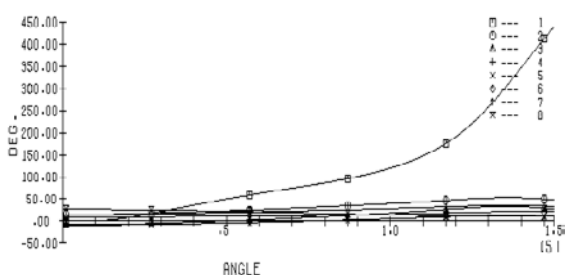


図 7 位相角の動揺

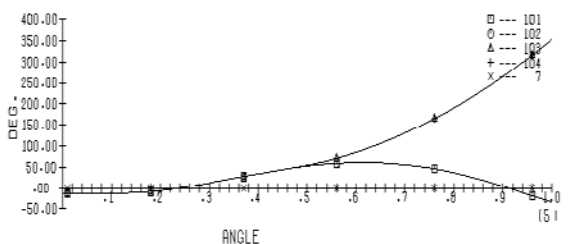


図 8 電源制限による安定化例 (EAST10)

表 3 検討結果 (EAST10)

事故継続時間	厳密解		提案法	
	安定度判定	解列台数	安定度判定	解列台数
0.05	U → S	1	U → S	2
0.07	U → S	1	U → S	2
0.09	U → S	2	U → S	3
0.11	U → S	3	U → S	3
0.13	U → S	4	U → S	4
0.14	U → S	5	U → S	4
0.15	U → S	6	U → S	4
0.16	U → U	7	U → S	5

5. まとめ

本論文では、脱調と判定した場合の安定化に必要な発電機の解列台数の推定法を提案した。EAST10 機系統モデルを用いた検討では、厳密解と提案法の解列台数の差は 1 台程度であり妥当な手法と考えられる。

しかし、厳密解よりも解列台数を少なく推定したケースもあった。事故継続時間が長い場合、推定は困難であると考えられる。今後の課題は精度を高める方法を検討することである。

「参考文献」

- (1) 系統脱調・事故波及防止リレーシステム技術調査専門委員会：「系統脱調・事故波及防止リレー技術」，電気学会技術報告，No.801 (2000)
- (2) 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」，電気学会電力技術・電力系統技術合同研資，PE-09-47/PSE-09-55 (2009-9)
- (3) 大浦好文・鈴木 守・柳橋 健・佐藤正弘・津久井良一・松島哲郎・小俣和也：「電源系統の事故波及防止システムの方式と構成」，電学論 B, **112**, 7, pp.593-601 (1992-7)
- (4) 長谷川淳・大山 力・三谷康範・斎藤浩海・北裕幸：「電力系統工学」，第 4 章，pp.63-87
- (5) 佐藤 正弘・津久井良一・小俣 和也：「電力系統の動揺把握を基にしたオンライン高速安定化方式とアルゴリズム」，電学論 B, **108**, 8, pp.489-496 (1984-8)
- (6) 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，No.754 (1999)