

事故除去後の次過渡および過渡電流の影響を考慮した電力相差角曲線の推定法

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、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(脱調)を起こす場合がある。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。この現象を対象に脱調を予測し発電機群の一部を遮断し残りを安定化する方法(電源制限)がある⁽¹⁾。

著者らは安定度判定および電源制限による発電機の遮断台数の推定法について報告したが、事故のケースによっては安定度判定の誤判定や、電源制限による発電機の過剰遮断や遮断不足などの誤差を生ずる場合があった⁽²⁾⁽³⁾。その原因は、事故除去後の次過渡状態における電流の影響であることを確認した⁽⁴⁾。そこで本研究では、安定度判定および発電機の遮断台数の推定の精度向上を目的とし、事故除去後の次過渡および過渡電流の影響を考慮した電力相差角曲線(P- δ 曲線)の推定法について提案する。

2. 事故除去後の電流がもたらす P- δ 曲線の推定への影響(2.1) P- δ 曲線と安定度判定

水力発電所などのように系統の負荷中心から遠隔地にある発電所の近端に系統事故が発生した場合を想定し、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として模擬する。図1の(a)は多機系統、(b)は等価回路を表し、ノード H から右側の系統側を一本の線路と無限大母線で表し、左側の発電所の発電機を等価な1台の発電機として表している。等価回路のインピーダンスの推定法は文献(2)を用いた。

事故発生後1秒程度の現象を対象とし、P- δ 曲線の推定には直軸過渡リアクタンス X_d' 背後の発電機内部電圧 V_g と無限大母線電圧 E の大きさを用いる。それぞれの値は図1のノード H で観測した電圧 $V \angle \theta$ と電流 $I \angle \phi$ 、発電機内部インピーダンス、推定した等価回路のインピーダンスを用いて(1)、(2)式で推定できる。

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

$$E \angle \delta_E = V \angle \theta - (R + jX) \cdot I \angle \phi \quad \cdots (2)$$

ここで、 R_a は発電機内部の電機子抵抗、 X_t は主変

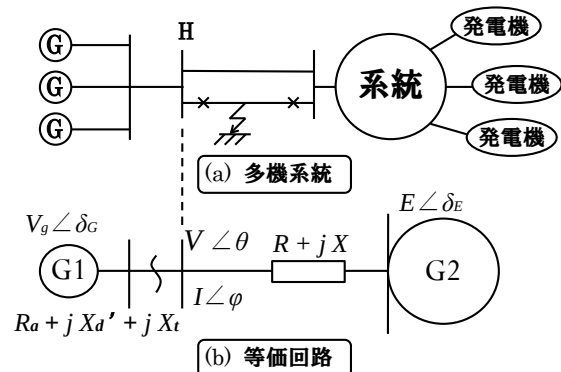
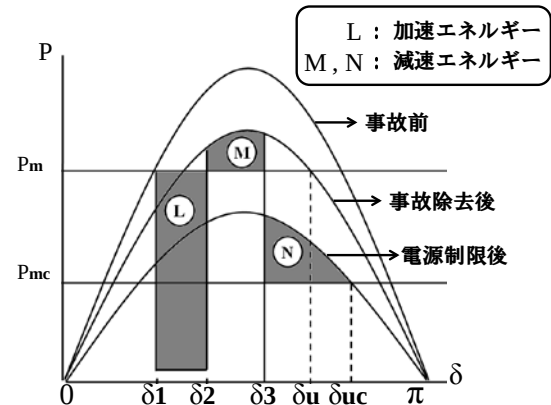


図1 一機無限大母線系統

$\delta 1$: 事故発生時	P_m : 機械入力
$\delta 2$: 事故除去時	P_{mc} : 電源制限後の機械入力
$\delta 3$: 電源制限時	δ_u : 不安定平衡点
	δ_{uc} : 電源制限後の不安定平衡点

図2 電力相差角曲線 (P- δ 曲線)

圧器リアクタンス、 θ と ϕ は無限大母線を基準とした位相である。

事故除去後の有効電力 P は V_g と E の大きさとインピーダンスを用いて(3)式で推定できる。

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

ここで、 δ 、 r 、 x は下式で表される。

$$\delta = \delta_g - \delta_E \quad \cdots (4)$$

$$r = R_a + R, \quad x = X_d' + X_t + X \quad \cdots (5)$$

送電電力 P と相対的位相角 δ の関係は図2のような P- δ 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。面積 L は発電機の加速

エネルギーを、M と N 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なる。そこで、 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_u 、 δ_{uc} を推定し、面積 L、M、N を求め、安定度判定および発電機の遮断台数を推定する。各 δ や面積の推定法は文献 (3) を用いる。

〈2.2〉 安定度判定の誤判定

電気学会や IEEE などの論文で報告されている安定化システムでは、事故除去後 110 ms 間の観測値を用い、それ以降の区間は予測値を用いて各種計算を行う。また、電源制限までに CB 開閉やトリップ信号の伝送遅延があるため、各種の計算が終了した時点から 80 ms 後に発電機を遮断すると想定している⁽⁵⁾。本研究においても、これを前提に事故除去後 110 ms 間の観測値を用いて、等価回路のインピーダンス、P- δ 曲線、安定度判定および発電機の遮断台数を推定する。ここで、事故のケースによっては安定度判定の誤判定を生ずる場合があるため、P- δ 曲線の推定の精度を向上させることが課題である⁽²⁾⁽³⁾。

その原因を解明した結果について以下に述べる。

発電機の内部は図 3 に示すような制動回路、界磁回路、電機子回路から構成されている⁽⁶⁾。事故除去に伴う系統構成の変更の直後は 3 つの回路に電流が流れる。この次過渡状態は制動回路の時定数が短いため、制動回路の電流は短時間に減衰し、界磁回路と電機子回路の 2 つの回路に電流が流れ続ける。この過渡状態は約 1 秒程度である。その後、界磁回路に流れる電流は減衰し、電機子回路に電流が流れる定常状態となる⁽⁷⁾。一機無限大母線系統として模擬した系統側でも同様な現象が発生していると考えられ、観測するノードに流れる電流は発電機側と系統側の両方の影響を受ける。

図 4 の (a) に事故除去後の電圧の大きさ V_g と E を示し、(b) と (c) には横軸を δ とした P の観測値を実線、推定した P- δ 曲線 (推定式) を点線で表す。(b) は事故除去後 110 ms 間の観測値 V_g と E を用いた推定式、(c) は事故除去後 300 ms 間の V_g と E を用いた推定式を示す。(b) では次過渡電流の影響が大きく、観測値と推定式の誤差が大きい。それに対し、(c) では次過渡電流の影響は小さく、観測値と推定式が誤差が小さい。そのため、事故発生後 1 秒程度の現象を対象とする安定度判定には次過渡電流の影響が小さい過渡状態における電流 (過渡電流) を用いることが有効と考えられる。

3. 事故除去後の次過渡および過渡電流の影響を考慮した P- δ 曲線の推定法

〈3.1〉 過渡電流の近似と P- δ 曲線の推定法

過渡電流の推定法について説明する⁽⁴⁾。図 5 に示すように事故除去後の電流の斜線部から指数関数の

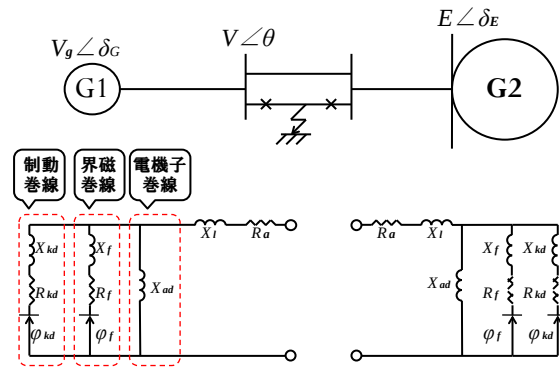


図 3 発電機内部の電流と磁束の関係

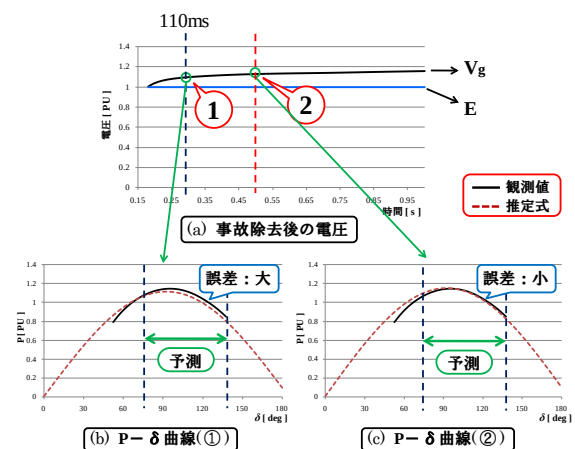


図 4 電圧と P- δ 曲線との関係

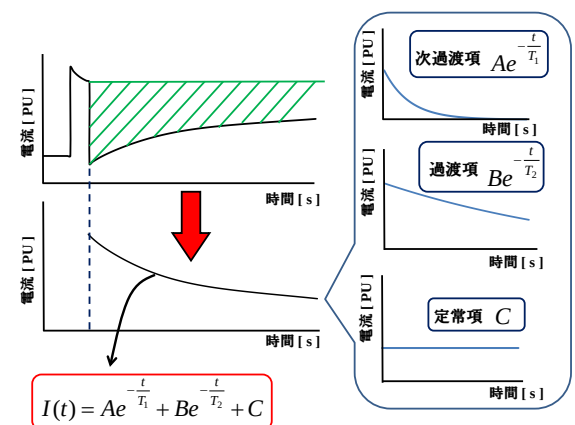


図 5 電流の分析と近似

ような波形を取り出し、(6) 式のように 3 つの項で表現できるものと仮定する。

$$I(t) = Ae^{-\frac{t}{T_1}} + Be^{-\frac{t}{T_2}} + C \quad \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式の第 1 項は時定数が短く、短時間に減衰する次過渡項、第 2 項は時定数が長く、なだらかに減衰する過渡項、第 3 項は定常項とし、各パラメータを推定する。

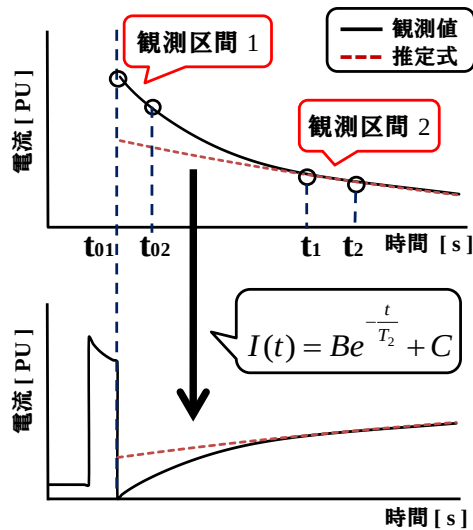


図 6 過渡電流の推定

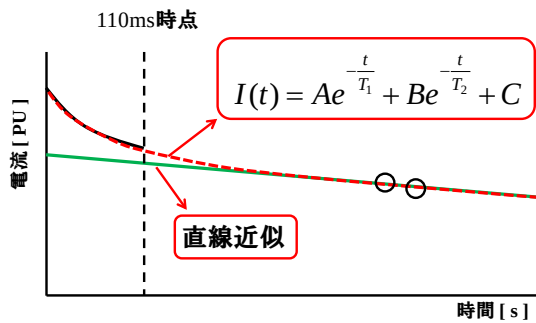


図 7 過渡電流の直線近似

図 6 に示すように、事故除去直後を観測区間 1、次過渡項が減衰したと想定する区間を観測区間 2 とし、観測区間 1 では 3 つの項の和、観測区間 2 では次過渡項を除いた 2 つの項の和で電流の推定式を表す。次に、それぞれの観測区間ごとに観測値の傾きと関数の傾きを求め、その傾きが等しくなるように各パラメータを推定する。そして、次過渡項を除いた過渡項と定常項の和を過渡電流と仮定し、事故除去後 110 ms 時点の値を $P-\delta$ 曲線の推定に用いる。文献 (4) では、あるケースで観測区間 2 に事故除去後 500 ms 以降の観測値を用いて過渡電流を推定した場合では、 $P-\delta$ 曲線の推定の精度は向上したが、事故除去後 110 ms 間の観測値を用いて過渡電流を推定した場合は、次過渡電流の影響が大きく、 $P-\delta$ 曲線の推定の精度が低いことを確認した。

そこで、図 7 に示すように、事故除去後 110 ms 間の観測値を通る電流の推定式から、次過渡電流がほぼ減衰した区間が過渡状態と考え、過渡電流を 2 点を通る直線として表現し、 V_g と E を求めて $P-\delta$ 曲線を推定する。この提案手法は、推定した時定数 T_1 の 2 倍の値の推定値を用いて、次過渡電流の影響がほぼ減衰した過渡電流を近似する。

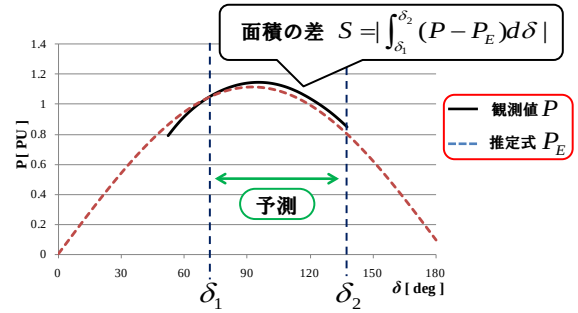


図 8 面積の誤差による評価

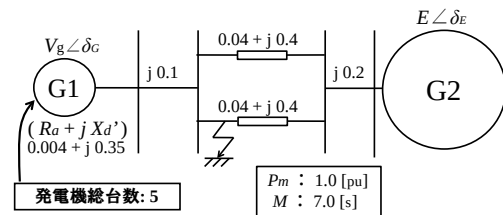


図 9 モデル系統図

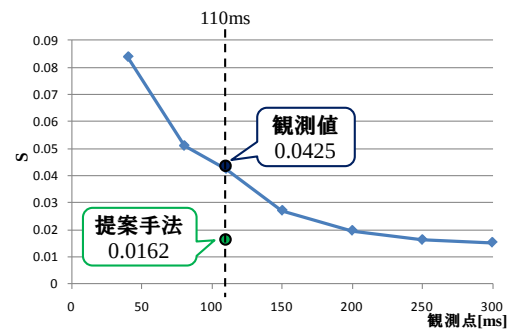


図 10 面積の差（事故継続時間 0.07s の場合）

〈3.2〉 $P-\delta$ 曲線の誤差の評価法

提案手法により $P-\delta$ 曲線の推定の精度が向上することを確認するために、 P の観測値と推定式との誤差を評価する。図 8 に示すように、事故除去後 110 ms 以降の δ_1 から δ_2 まで P の観測値と推定式を積分し、面積の差の絶対値 S を求め、精度を検討する。観測値と推定式が一致ならば S は零となる。

4. シミュレーションによる有効性の確認

提案手法の有効性を確認するために、 $P-\delta$ 曲線の誤差の評価と、一機無限大母線系統と電気学会 EAST10 モデル⁽⁸⁾を用いて、安定度判定と遮断台数が過渡安定度計算プログラムによる厳密解と一致する度合いを検討した。

〈4.1〉 $P-\delta$ 曲線の誤差による評価

図 9 に示すような、5 台の発電機で構成される発電所 G1 を無限大母線 G2 に接続した一機無限大母線系統のモデル系統図を用いて、事故継続時間 0.07s の場合の $P-\delta$ 曲線の誤差を評価した。結果を図 10 に示す。縦軸は S 、横軸は事故除去直後を 0 ms とし

た推定式に用いる V_g と E の観測点である。事故除去後 110 ms 時点の V_g と E を用いた場合の S の値は 0.0425 であり、事故除去後 200 ms 以降の V_g と E を用いた場合では約半分の 0.02 程度まで減少するため、この場合は事故除去後 200ms 以降の V_g と E を用いると $P-\delta$ 曲線の推定の精度が向上することがわかる。

これに対し、提案手法を適用すると S の値は 0.0162 となり、事故除去後 300 ms 以降の V_g と E を用いた場合とほぼ同等の値となることから、 $P-\delta$ 曲線の推定の精度向上を確認した。

(4.2) 安定度判定と遮断台数による評価

(1) 一機無限大母線系統

図 9 に示す系統図を用いて検討した。事故継続時間 0.05s から 0.10s までの 6 ケースについての検討結果を表 1 に示す。ここで、従来法は推定式に事故除去後 110 ms 時点の観測値 V_g と E を用いた場合の結果を表す。過渡安定度計算プログラムによる厳密解では、事故継続時間 0.06s までは安定、事故継続時間 0.07s 以降は脱調と判定し、発電機を遮断する結果となった。表の数字は発電機の遮断台数を表しており、厳密解と比較すると、従来法では事故継続時間 0.05s と 0.06s のケースで脱調と誤判定し、発電機を 1 台遮断する結果となった。それに対し、提案手法では厳密解と一致した。

(2) EAST10 モデル

図 11 に示す EAST10 モデルに発電機 4 台で構成される水力発電所を想定した G0 を接続し、G0 の近端における系統事故について検討した。事故継続時間 0.05s から 0.10s までの 6 ケースについての検討結果を表 2 に示す。厳密解では全てのケースにおいて脱調と判定し、事故継続時間 0.05s から 0.08s まで 2 台、0.09s から 0.10s まで 3 台の発電機を遮断する結果となった。厳密解と比較すると、従来法は事故継続時間 0.07s、0.08s、0.10s の 3 ケースで厳密解よりも 1 台多く遮断する結果となった。それに対し、提案手法は厳密解とよく一致し、誤差は事故継続時間 0.08s の 1 ケースであり、良好な結果となった。

5. まとめ

本研究では、安定度判定および発電機の遮断台数の推定の精度向上を目的とし、事故除去後の次過渡および過渡電流の影響を考慮した $P-\delta$ 曲線の推定法について提案した。

今回提案した手法の有効性は、 P の観測値と推定した $P-\delta$ 曲線の誤差の評価と、一機無限大母線系統と EAST10 モデルにおいて安定度判定と遮断台数の推定の精度を検討して確認した。また、EAST10 モデルのような大規模な系統に発電所が接続された場合でも良好な結果が得られたことを確認した。

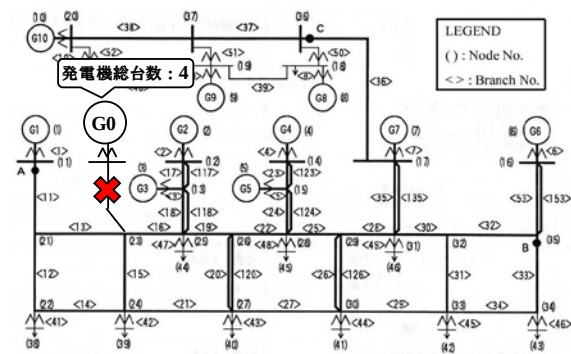


図 11 電気学会 EAST10 モデル

表 1 安定度判定と遮断台数（一機無限大母線系統）

事故継続時間[s]	厳密解	従来法	提案手法
0.05	安定	1	安定
0.06	安定	1	安定
0.07	1	1	1
0.08	1	1	1
0.09	2	2	2
0.10	2	2	2

表 2 安定度判定と遮断台数（EAST10 モデル）

事故継続時間[s]	厳密解	従来法	提案手法
0.05	2	2	2
0.06	2	2	2
0.07	2	3	2
0.08	2	3	3
0.09	3	3	3
0.10	3	4	3

「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) 飯村勇人・佐藤正弘：「実測データを用いた動的等価回路推定法と電源制限による安定化対策」，電気学会電力技術・電力系統技術合同研資，PE-10-177/PSE-10-176 (2010-9)
- (4) 飯村勇人・佐藤正弘：「安定度判定のための動揺中の電流予測と $P-\delta$ 曲線に関する検討」，電気学会電力技術・電力系統技術合同研資，PE-11-175/PSE-11-192 (2011-9)
- (5) 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)
- (6) 小向敏彦・色川彰一・加藤政一：「電力システム工学」，セメスター大学講義
- (7) 新田目 倅造：「電力系統技術計算の基礎」，電気書院
- (8) 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)