

過渡安定度改善のための最適再閉路に関する検討

学生員 矢神 雅規*

正員 村田 年昭*

正員 田村 淳二*

An Analysis of Optimal Reclosing for Enhancement of Transient Stability

Masaki Yagami*, Student Member, Toshiaki Murata*, Member, Junji Tamura*, Member

In a power system, the auto-reclosing schemes are applied in order to enhance the transient stability. However, conventional auto-reclosing techniques adopt fixed time interval reclosing, that is, the circuit breakers reclose after a prescribed dead time. Since the transient stability is dependent on the generator state of reclosing instance, this method may cause an unstable state when unsuccessful reclosing occurs. Therefore, the method to determine the optimal reclosing time is needed in order to enhance the transient stability of power system effectively.

This paper proposes the method to determine an optimal reclosing time by using the kinetic energy of synchronous generators. The significance of this method is that it uses the kinetic energy of each generator which can be obtained easily. Consequently, this technique may be implemented for the on-line application. The proposed method is verified by simulation study using EMTP/ATP.

キーワード：最適再閉路、無電圧時間、再閉路失敗、運動エネルギー

Keywords : optimal reclosing, dead time, unsuccessful reclosing, kinetic energy

1. はじめに

多様化しつつある今日の電力系統において、電力品質を維持し電力供給の信頼度を向上させるには現行の事故復旧操作をより効率よく、また適確に実施することが重要である。現在、基幹系統を代表とする高電圧系統では再閉路操作が自動化され事故復旧の迅速化に大きく貢献している⁽¹⁾。しかし、再閉路の投入時間は電圧階級ごとに一律に定められており、必ずしも過渡安定度の改善に配慮した最適な投入設計が成されているとは言えない。一般に、電力系統に外乱が生じると同期発電機が動揺するが、再閉路の瞬間の発電機状態に依存して再閉路後の動揺が大きく変化する。そのため、現行の再閉路方式において再閉路失敗が生じると、場合によっては著しく安定度を阻害する可能性がある。最適再閉路とは、故障が過渡的あるいは永久的なものかによって異なるが、一般には再閉路失敗時（永久故障時）の動揺が最も抑制される再閉路時間のことを指し、発生確率

は低い再閉路失敗による過大な動揺の抑制を目的としている⁽²⁾⁽³⁾。電力系統の信頼度をより向上させるには、この最適再閉路時間（Optimal re-closing time：以下 ORCT と略記）を検出し、随時再閉路投入時間を変更する操作が必要であると考えられる。

近年、この ORCT に関する検討例として、(i) ニューラルネットワークを利用した ORCT の決定方法⁽⁴⁾、(ii) 短絡故障時に発生する高周波電圧の特性から ORCT を決定する方法⁽⁵⁾、(iii) 発電機の内部相差角の特性から ORCT を決定する方法⁽⁶⁾等が提案されている。しかし、(i)はニューラルネットワークを適用した系統での広範囲な試験データを必要とすること、(ii)は一機系統モデルでの検討であり多機系統を対象とした検討が行われていないこと、(iii)は事前にシミュレーションによる計算が必要でありオンラインへの応用が難しい等の問題がある。そこで本論文では、オフラインはもとよりオンライン応用の可能性も有し、更に多機系統での使用が可能な ORCT の決定に関する一手法を提案する。

著者らは再閉路失敗確率の低減を目的として限流器による無電圧時間の延長に関する研究を行っているが⁽⁶⁾、この過程において、一機無限大母線系統においては発電機の回転角速度が最も低いときに再閉路すると再閉路失敗時の動揺

* 北見工業大学 電気電子工学科
〒090-8507 北見市公園町 165 番地
Department of Electrical and Electronic Engineering,
Kitami Institute of Technology
165, Koen-cho, Kitami 090-8507

が最小となることがわかった。そこで、本研究では回転角速度が最小となる瞬間を ORCT と考え、過渡安定度改善の面からシミュレーションによる検証を行った。また、多機系統においては発電機ごとに回転速度の変動が異なることになるので回転角速度ではなく運動エネルギーを利用することとし、各発電機の運動エネルギーの総和が最小となる瞬間を ORCT と仮定した。本稿では、初めに一機無限大母線系統モデルを基に ORCT の決定方法および安定度の改善効果を示し、その後、多機系統モデルに対する本手法の有効性を確認する。シミュレーションには EMTP/ATP を使用した。

2. 最適再閉路時間の決定方法

図 1 に示す一機無限大母線系統モデルを基に ORCT の決定方法を述べる。同モデルの発電機定数を表 1 に示し、発電機制御系として一次遅れの AVR およびガバナーモデルを用い、それを図 2 に示す。シミュレーション条件は、図 3 に示すタイムシーケンスに従い、#2 送電線発電機至近端で $t=0.1s$ に 3LG 故障発生、 $t=0.2s$ に遮断器(CB)により#2 故障線両端を遮断、その後、各無電圧時間を経て再閉路（失敗）し、再閉路の $0.1s$ 後に再遮断とした。なお、実系統では、永久故障の対策として再閉路は 1 度しか行われていないため⁽²⁾、本解析でも再遮断後は再再閉路を行っていない。

図 4 は、再閉路なしの場合と再閉路時間 (RCT) を $0.5s$, $1.0s$, $1.5s$ とした場合の同期発電機の回転角速度応答である。同図より、再閉路投入時間の違いによって再閉路後の角速度の動揺が大きく変化することがわかる。また、再閉路失敗による角速度上昇の大きさが、故障発生時と同等であることもわかる。これは、再閉路失敗によって再閉路時に再度故障状態となるため、故障時と同じ加速エネルギー

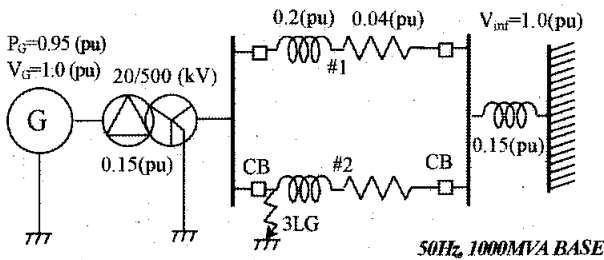


図 1 一機無限大母線系統モデル
Fig. 1. One generator – infinite bus system model.

表 1 発電機定数

Table 1. Generator parameters.

| MVA | 1000 | | |
|------------|-------|--------------|-------|
| R_a (pu) | 0.003 | X_q'' (pu) | 0.2 |
| X_l (pu) | 0.13 | X_o (pu) | 0.13 |
| X_d (pu) | 1.79 | T_{do} (s) | 4.3 |
| X_q (pu) | 1.71 | T_{do} (s) | 0.85 |
| X_d (pu) | 0.169 | T_{do} (s) | 0.032 |
| X_q (pu) | 0.228 | T_{go} (s) | 0.05 |
| X_d (pu) | 0.135 | H (s) | 2.89 |

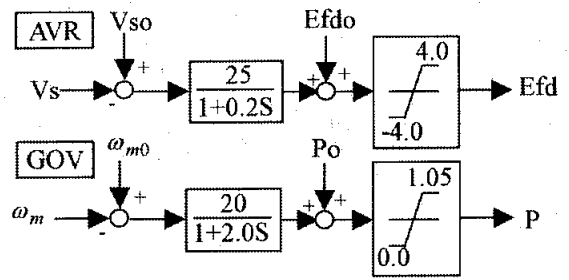


図 2 AVR とガバナーモデル
Fig. 2. AVR and governor models.

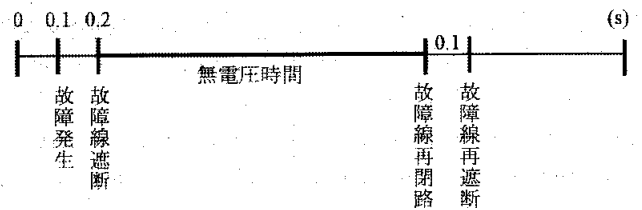


図 3 シミュレーションのタイムシーケンス
Fig. 3. Time sequence of simulation.

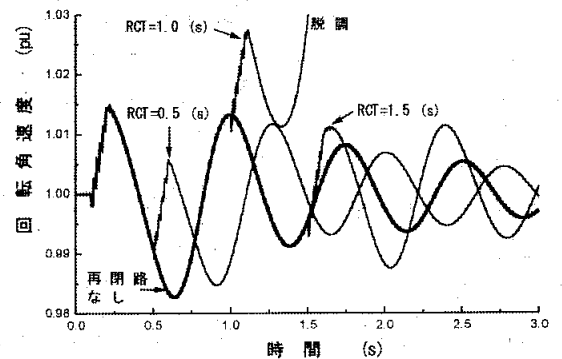


図 4 各再閉路時間における回転角速度応答
Fig. 4. Rotor speed responses in each case of reclosing time.

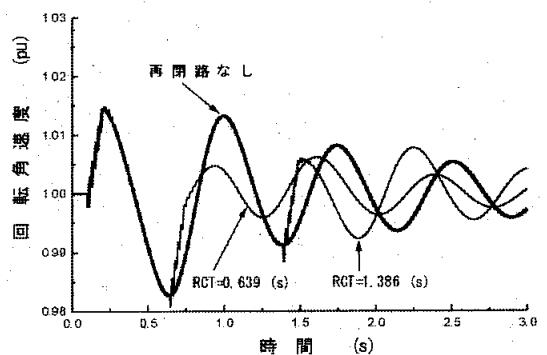


図 5 最適再閉路時間での回転角速度応答
Fig. 5. Rotor speed responses in the case of ORCT.

が発電機に加わるためである。従って、この再閉路失敗によって上昇した角速度が同期速度付近になるように再閉路時間を選定すれば、再閉路後の動揺は抑制され安定度が改善されると考えることができる。図5は、再閉路なしの応答から角速度が最小となる点を再閉路時間に選定した場合の角速度応答である。0.639sは最初に角速度が最小となる時間であり、1.386sは第二波目の最小点の時間である。図4の各再閉路時間での応答と比較して、角速度最小点で再閉路した場合の方が動揺が抑制されているのがわかる。

多機系統の場合には、発電機ごとに回転角速度の変動の様相が異なるため、前記の方法をそのまま用いることはできない。そこで、回転角速度の代わりに運動エネルギーを利用し、全ての発電機の運動エネルギーの合計量の応答からORCTを決定する方法を提案する。これにより、発電機ごとの速度変動の相違を考慮できることに加え、容量の違いも結果に適切に反映されると考えられる。

発電機の運動エネルギー W は以下の式で表される。

$$W = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad (J) \quad \text{.....(1)}$$

ここで J は慣性モーメント (kgm^2)、 ω_m は回転角速度 (rad/s) である。前述のシミュレーションにおいて、(1)式より再閉路なしの場合の運動エネルギーを図示したものが図6である。これより、運動エネルギーが最小となる点をORCTと決定する。なお、本ケースは一機系統を扱っているので運動エネルギーと角速度応答とは同様な波形になり、故にORCTは図5で決定したものと同じになる。多機系統の場合には、各発電機の運動エネルギーを合算してORCTを決定するが、これは第3章において詳述する。

図7は、安定度判定のための指標として次式に示す運動エネルギーの変化分絶対値の累積積分値を計算し、これを系統ベース容量で割って秒の単位としたものを W_c とし、各再閉路時間に対してグラフにしたものである。但し、ここでは $T=5.0s$ とした。

$$W_c \text{ (sec)} = \int_0^T \left| \frac{d}{dt} W \right| dt / \text{系統ベース電力} \quad \text{.....(2)}$$

W_c は、発電機の回転子と系統との間でやり取りされるエネルギーの変化分の累積積分であり、従ってこの値が小さいほど過渡的な動揺が小さいことを意味し、過渡安定度が高いことを示している。同図から、他の再閉路時間に比べORCT₁、ORCT₂共に安定度が効果的に改善されていることがわかる。なお、 W_c が発散しているケースは発電機が脱調したことを表している。

次に、どちらのORCTを使用するか決定するため、故障点の絶縁回復時間について検討する。以下に絶縁回復時間(無電圧時間) T_R を算出するための式⁽⁸⁾を記す。

$$T_R = 10.5 + \frac{kV}{34.5} \text{ (cycle)} \quad \text{.....(3)}$$

ここで kV は送電線電圧(線間)である。故障点の絶縁回復時間は、故障電流の大きさや系統電圧、故障条件等によつ

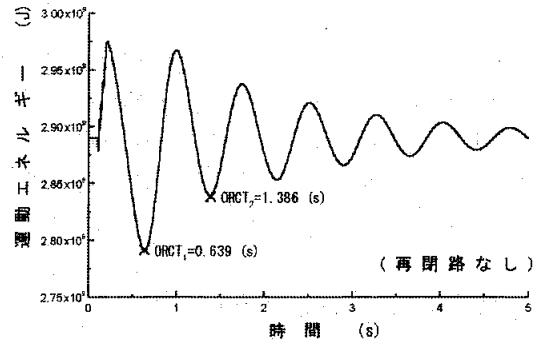


図6 同期発電機の運動エネルギー
Fig. 6. Kinetic energy of synchronous generator.

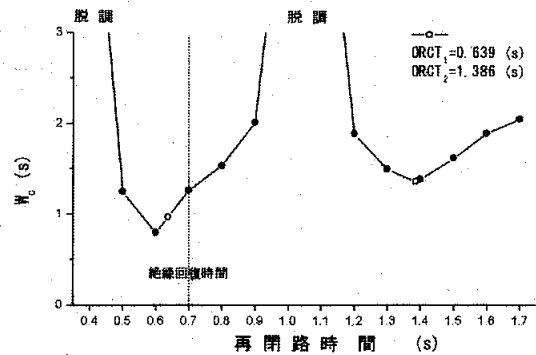


図7 各再閉路時間に対する W_c
Fig. 7. W_c in each case of reclosing time.

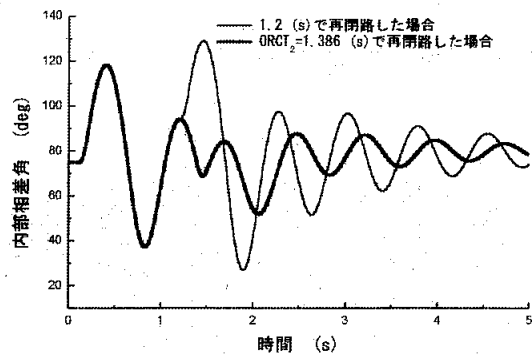


図8 各再閉路時間での内部相角応答
Fig. 8. Internal phase angle waveforms in each case of reclosing time.

て異なるため正確な値を求めることは困難である。そこで本稿では系統電圧だけを考慮する簡便な(3)式を使用して絶縁回復時間を算出した。本モデル系統の送電線電圧は500kVに設定しており、これより絶縁回復時間は25cycle(0.5s)となる。従って、実際に再閉路を投入できる時

間は $t=0.7s$ 以降となるため ORCT1 は使用できず ORCT2 が最適時間なる。図 7 より、 $t=0.7s$ 以降では、ORCT2 に対応する W_c が最小であることが分かり、安定度の改善効果が最も高い。図 8 は、 $t=1.2s$ で再閉路した場合と ORCT2=1.386s で再閉路した場合の発電機の内部相角の応答を示している。内部相角の応答からも、ORCT2 においては再閉路失敗にもかかわらず動揺が非常に抑制されていることが明らかである。

3. 多機系統モデルによる検証

次に、多機系統モデルを用いて本手法の有効性を確認する。一機系統では回転角速度が最小となる点を ORCT としたが、多機系統では系統全体の安定度を改善するように ORCT を決定する必要があることから、上述のように発電機の運動エネルギーを利用して ORCT を決定する。各発電機の運動エネルギーを足し合わせることで、発電機ごとの容量の違いも適切に考慮した形で系統全体の運動エネルギーが得られる。従って、この運動エネルギーから ORCT を決定すると系統全体の安定度改善効果が最大になると考えられる。

総運動エネルギー W_{total} は、発電機総数を N として以下のように表すことができる。

$$W_i = \frac{1}{2} J_i \omega_{mi}^2 \quad (J)$$

$$W_{total} = \sum_{i=1}^N W_i \quad (J) \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、多機系統に対する安定度判定のための指標 W_c は、(2) 式と同様に次式より得られる。

$$W_c \text{ (sec)} = \int_0^T \left| \frac{d}{dt} W_{total} \right| dt / \text{系統ベース電力} \quad \dots\dots\dots (5)$$

以下にシミュレーション結果を示す。

(3-1) 9 母線系統モデルによる検証 図 9 は、シミュ

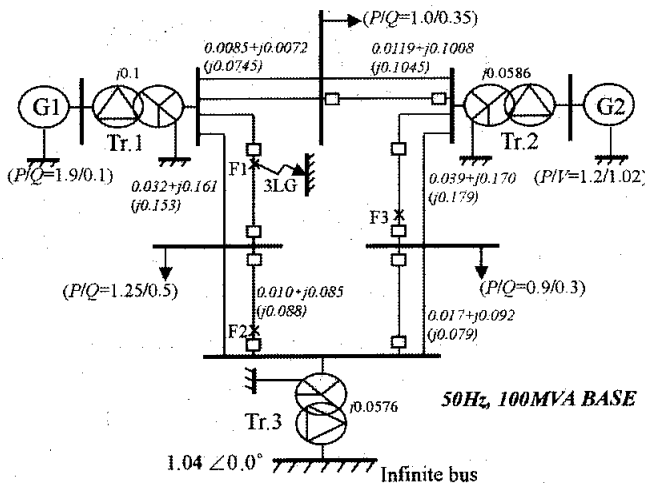


図 9 9 母線系統モデル

Fig. 9. 9 Bus system model.

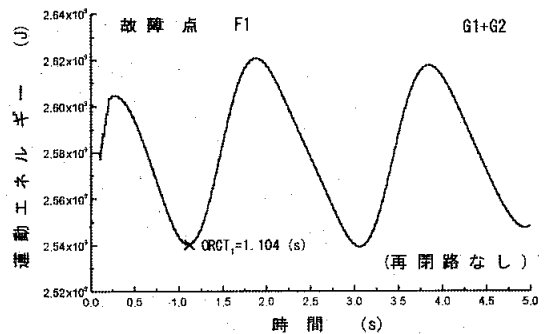
レーションに使用した 9 母線系統モデル⁽⁹⁾である。各発電機定数は表 2 のものを使用し、AVR およびガバナーは図 2 のモデルを使用した。シミュレーション条件は、図 3 のタイムシーケンスにおいて図 9 中に示した F1, F2, F3 の 3 点においてそれぞれ 3LG 故障が発生したとして、各ケースに対して ORCT の決定および安定度の判定を行った。なお、 $T=5.0s$ として W_c を求めている。

表 2 G1, G2 の発電機定数

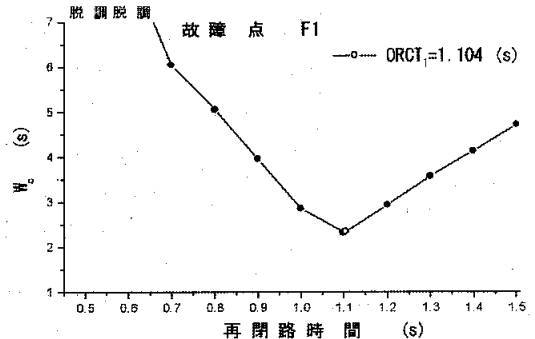
Table 2. Generator parameters of G1 and G2.

| G1 | | | |
|------------|-------|--------------|-------|
| MVA | | | 200 |
| R_a (pu) | 0.003 | X_g (pu) | 0.171 |
| X_1 (pu) | 0.102 | X_d (pu) | 0.13 |
| X_d (pu) | 1.651 | T_{do} (s) | 5.9 |
| X_q (pu) | 1.59 | T_{qo} (s) | 0.535 |
| X_d (pu) | 0.232 | T_{d0} (s) | 0.033 |
| X_q (pu) | 0.38 | T_{qo} (s) | 0.078 |
| X_d (pu) | 0.171 | H (s) | 9 |

| G2 | | | |
|------------|-------|--------------|-------|
| MVA | | | 130 |
| R_a (pu) | 0.004 | X_g (pu) | 0.134 |
| X_1 (pu) | 0.078 | X_d (pu) | 0.13 |
| X_d (pu) | 1.22 | T_{do} (s) | 8.97 |
| X_q (pu) | 1.16 | T_{qo} (s) | 1.5 |
| X_d (pu) | 0.174 | T_{d0} (s) | 0.033 |
| X_q (pu) | 0.25 | T_{qo} (s) | 0.141 |
| X_d (pu) | 0.134 | H (s) | 6 |



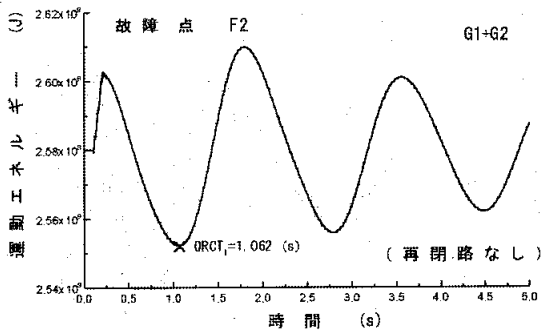
(a) 運動エネルギー



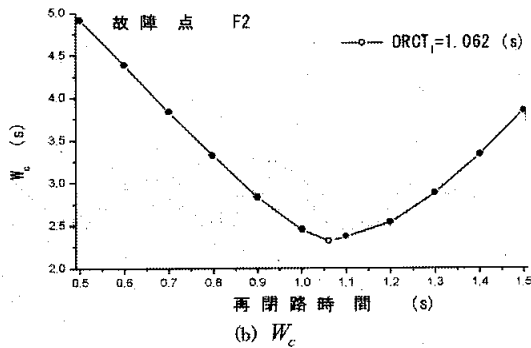
(b) W_c

図 10 F1 点故障時の ORCT と W_c

Fig. 10. ORCT and W_c in the case of F1 fault.



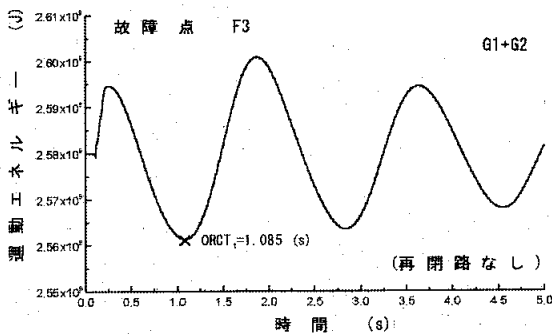
(a) 運動エネルギー



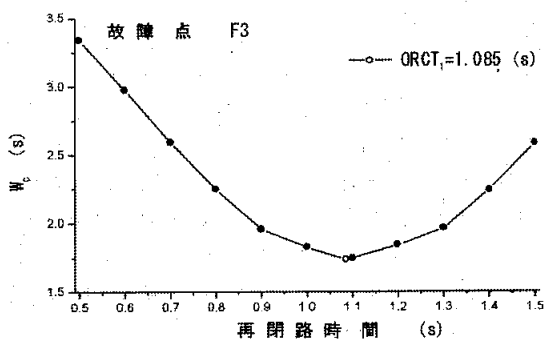
(b) W_c

図 11 F2 点故障時の ORCT と W_c

Fig. 11. ORCT and W_c in the case of F2 fault.



(a) 運動エネルギー



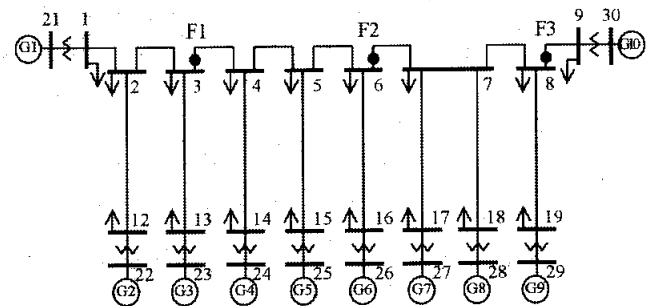
(b) W_c

図 12 F3 点故障時の ORCT と W_c

Fig. 12. ORCT and W_c in the case of F3 fault.

各故障点に対する計算結果を図 10, 11, 12 にそれぞれ示す。同図(a)は発電機 G1 および G2 の運動エネルギーを足し合わせた総運動エネルギーの応答であり、(b)は各再閉路時間に対する安定度指標 W_c である。これより、いずれのケースにおいても安定度がほぼ最良となる ORCT が得られているのがわかる。なお、本システムモデルにおける送電線電圧は不明であるが、500kV としても絶縁回復時間は 0.5s であるので、ORCT₁ をそのまま ORCT として問題ない。

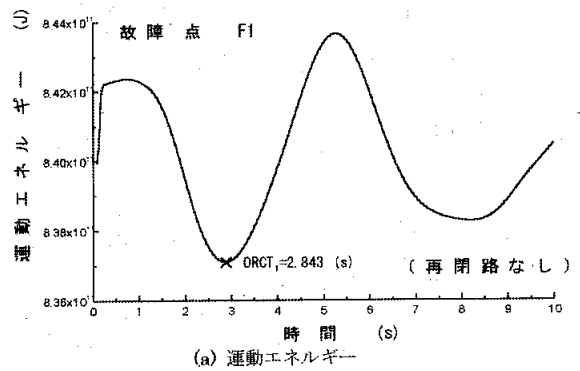
〈3・2〉電気学会標準モデルによる検証 続いて電気学会標準モデルである WEST10 機系統モデル⁽¹⁰⁾で検証する。図 13 は、シミュレーションに使用した WEST10 機系



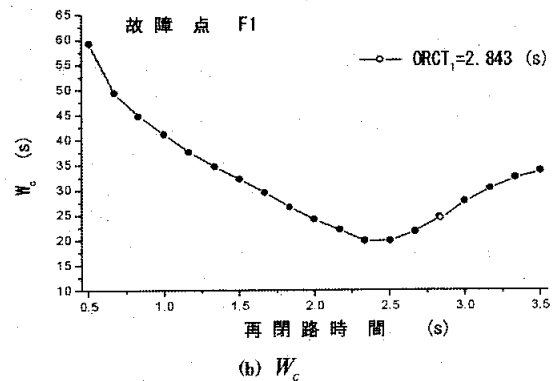
*送電線は全て 2 回線

図 13 WEST10 機系統モデル

Fig. 13. WEST10 machines system model.



(a) 運動エネルギー



(b) W_c

図 14 WEST10 機系統モデルにおける F1 点故障時の ORCT と W_c

Fig. 14. ORCT and W_c in the case of F1 fault in WEST10 machines model.

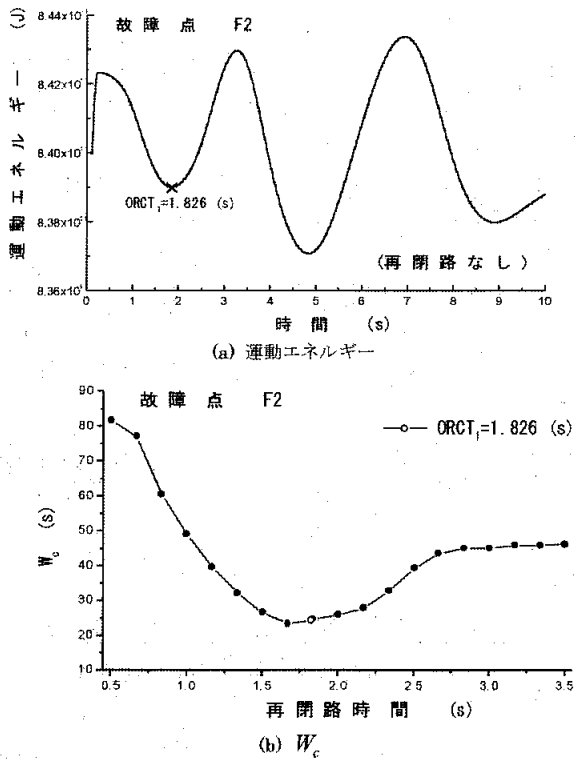


図 15 WEST10 機系統モデルにおける F2 点故障時の ORCT と W_c

Fig. 15. ORCT and W_c in the case of F2 fault in WEST10 machines model.

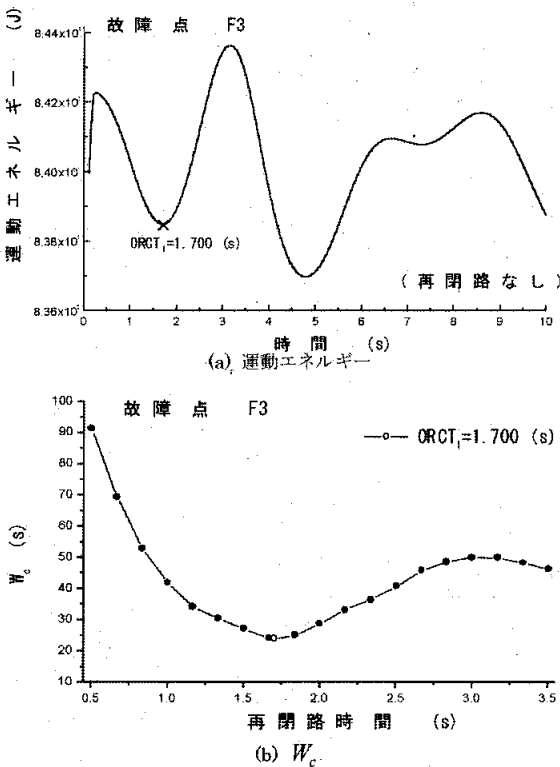


図 16 WEST10 機系統モデルにおける F3 点故障時の ORCT と W_c

Fig. 16. ORCT and W_c in the case of F3 fault in WEST10 machines model.

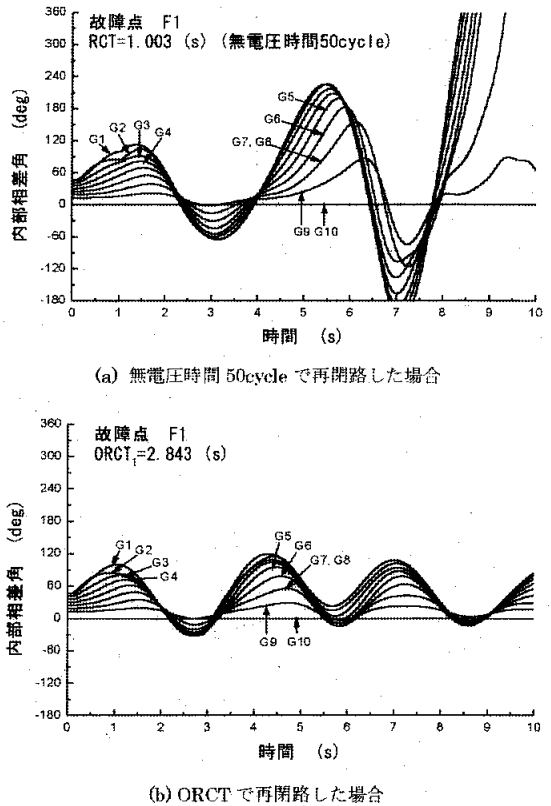


図 17 WEST10 機系統モデルにおける F1 点故障時の各再閉路時間での内部相差角の応答

Fig. 17. Internal phase angle waveforms for each case of reclosingtime in the case of F1 fault in WEST10 machines model.

統モデルである。発電機および系統定数等の諸量および制御系はオリジナルモデル(昼間断面)と同じである。但し、簡単のため負荷は全て定インピーダンスとした。シミュレーション条件は、同図中に記した故障点 F1 (オリジナル図では D 点)、F2 (G 点)、F3 (I 点) の 3 箇所それぞれ 3LG 故障が $t=0.1$ (s) に発生、 $t=0.17$ (s) に故障線を遮断、各無電圧時間を経て再閉路(失敗)し、再閉路完了から 0.07 (s) 後に再遮断とした。なお、 $T=10$ s である。

WEST10 機系統モデルにおける各故障点に対する計算結果を図 14, 15, 16 にそれぞれ示す。F1 点の故障に対しては、若干最適値から離れたが、他の故障点に対してはほぼ最良となる ORCT が得られた。図 17 は、現在、500kV 送電系統に採用されている無電圧時間 50cycle で再閉路した場合の各発電機の内部相差角(a)と ORCT で再閉路した場合の各発電機の内部相差角(b)をそれぞれ示している (G10 基準)。無電圧時間 50cycle で再閉路した場合発電機群は脱調したが、ORCT で再閉路した場合は同期が維持された。

4. オンライン応用

本手法は、シミュレーションによる事前の検討(オフライン)から ORCT を決定できることはもちろんであるが、

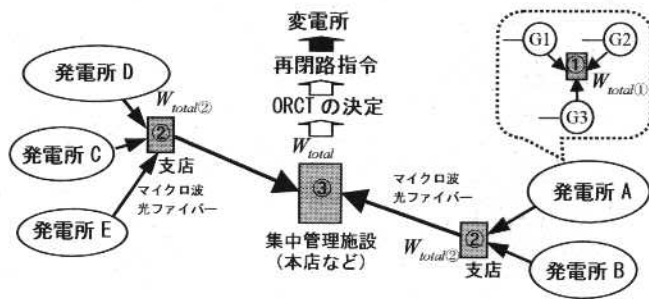


図 18 オンライン応用時における再閉路指令
が出されるまでの過程

Fig. 18. Algorithm to start the operation of
reclosing in the case of on-line application.

運動エネルギーの最小点を ORCT として決定するため、運動エネルギーをリアルタイムに算出し、絶縁回復時間等の制約条件を考慮すれば、オンラインで ORCT を決定できる可能性を有している。その実現には非常に多くの検討が必要であり、本論文ではその具体的方法を示すことはできないが、オンラインで再閉路指令が出されるまでの過程の一つの構想を図 18 に示す。以下に簡単に説明する。

- ① 各発電機の回転角速度データを発電所ごとに集積し、発電所内の総運動エネルギー $W_{total①}$ を求める。
- ② 各発電所で求めた $W_{total①}$ をマイクロ波、または光ファイバーを用いて伝送し、小規模な地域ごとに例えば支店などで集積して $W_{total②}$ を求める。
- ③ $W_{total②}$ を集中管理施設(例えば本店など)へ伝送し、集積することで W_{total} を求める。 W_{total} から ORCT を決定して再閉路指令を変電所(遮断器)に伝える。

このとき、伝送、演算に要する時間遅れと遮断器の機械的投入時間遅れを考慮する必要があるが、これに関しては、例えば運動エネルギーと動揺周期は同じであるが任意の時間だけ位相を早めることができる予測関数⁽¹¹⁾を用いること等で対処可能ではないかと考えられる。しかし、これらの遅れは数サイクル程度のオーダーであり、運動エネルギーの変化がゆっくりしていることを考慮すれば、安定度の改善効果にそれほど影響を与えないとも考えられる。なお、オフラインの場合は、本手法で決定した ORCT から遮断器の投入遅延時間を差し引けばよく、容易に最適時間を決定することができる。

5. まとめ

本論文では、発電機の運動エネルギーを利用した最適再閉路時間(ORCT)の決定方法を提案し、本手法の有効性を検証するために多機システムを含む3つのモデルシステムを用いてシミュレーション解析を行った。その結果、全てのケースにおいて過渡安定度がほぼ最良となる ORCT が決定できた。また、本論文では、オフラインで ORCT を決定できることはもちろんであるが、運動エネルギーをリアルタイムに算

出し、絶縁回復時間等の制約条件を考慮すれば、オンラインで ORCT を決定できる可能性を有することを示した。但し、オンライン応用に関しては運動エネルギーの伝送、演算方法について実用面における詳細な検討が必要であり、今後の課題である。

最後に、本研究の一部は科学研究費補助金、基盤研究(C)の補助を受けたことを付記する。

(平成 14 年 1 月 31 日受付、平成 14 年 7 月 18 日再受付)

文 献

- (1) 電力系統の事故時復旧操作調査専門委員会:「電力系統の事故復旧操作」, 電気学会技術報告(II部), 第354号(1990)
- (2) 太田宏次:「電力系統の保護制御システム」, 電気書院(1975)
- (3) D. Kojima, Y. Yukita, K. Goto, and K. Ichihayashi: "A Study of an optimal reclosing in power system", PE-01-85, pp.59-63 (2001) (in Japanese)
小島・雪田・後藤・一柳:「電力系統における最適再閉路の一検討」, 電気学会電力技術研資, PE-01-85(2001)
- (4) R.K. Aggarwal, A.T. Johns, Y.H. Song, R.W. Dunn, and D.S. Fitton: "Neural-network based adaptive single-pole autoreclosure technique for EHV transmission systems", *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 141, No.2, pp.155-160 (1994)
- (5) Z.Q. Bo, R.K. Aggarwal, A.T. Johns, B.H. Zhang, and Y.Z. Ge: "New concept in transmission line reclosing using high-frequency fault transients", *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 144, no.4, pp.351-356 (1997)
- (6) M. Yagami, T. Murata, and J. Tamura: "A Consideration on the Extension of the Dead Time by Superconducting Fault Current Limiter", *T. IEE Japan*, Vol. 122-B, No. 1, pp.147-148 (2002-1) (in Japanese)
矢神・村田・田村:「超電導限流器による無電圧時間の延長に関する検討」, 電学論B, 122, 1, p.147-148 (2002-1)
- (7) IEEE Subsynchronous Resonance Task Force of the Dynamic System Performance Working Group Power System Engineering Committee: "First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-96, No.5, pp.1565-1572 (1977)
- (8) I.-D. Kim, H.-S. Cho, and J.-K. Park: "A variable dead time circuit breaker auto-reclosing scheme using artificial neural networks", *Electrical Power & Energy Syst.*, 21, pp.269-277 (1999)
- (9) 関根泰次:「電力系統過渡解析論」, p. 397, オーム社(1984)
- (10) 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, 第754号(1999)
- (11) B.H. Zhang, Z.Q. Bo, Y.Z. Ge, R.K. Aggarwal, and A.T. Johns: "The Design and Application of an Optimal Reclosure Technique for Transmission Lines", 1995 North American Power Symposium, Montana State University, Bozeman, MT, USA, pp.415-421 (1995)

矢神 雅規 (学生員)



1975年10月10日生。2000年3月北見工業大学大学院電気電子工学専攻博士前期課程終了。2001年4月同大学大学院システム工学専攻博士後期課程に入学、現在に至る。主として、EMTPを用いた同期機ならびに電力系統の解析に関する研究に従事。

村田年昭



(正員) 1943年4月27日生。1966年3月北海道大学工業教員養成所電気工学科卒業。同年合同容器(株)入社。1969年3月北見工業大学助手、1997年5月同助教授となり現在に至る。主として、誘導電動機の2次励磁制御による速度制御、最適制御理論を応用したベクトル制御系の制御系構成法の研究に従事。計測自動制御学会、システム制御情報学会会員。工学博士。

田村淳二



(正員) 1957年1月17日生。1984年3月北海道大学大学院博士課程修了。同年4月北見工業大学講師、1986年4月同助教授、1996年10月同教授となり現在に至る。電磁エネルギー変換工学分野担当。1991年9月より10ヶ月間米国テキサス大学アーリント校客員研究員。主として、同期機および電力系統の解析に関する研究に従事。電気設備学会、日本風力エネルギー協会会員。IEEE Senior

Member。工学博士。