

電力系統における最適再閉路の一検討

A Study of a Optimal reclosing in power system

小島 大輔[†] 神谷 高志[†] 松下 郷志[†] 植田 綾子[†]
申 真淳[†] 藤田 淳也[†] 雪田 和人[†] 後藤 泰之[†] 一柳 勝宏[†]

Daisuke KOJIMA, Takashi KAMIYA, Satoshi MATUSHITA, Ayako UEDA
Masatsu SIN, Junya FUJITA, Kazuto YUKITA, Yasuyuki GOTO, Katsuhiko ICHIYANAGI

Abstract This paper proposes the optimum reclosing operating method. The proposed method calculates the optimum time, taking the case as a standard in which the reclosing is not done. And, the execution of reclosing time is calculated considering the fault time and the acceleration/deceleration energy got in stores in the generator in the fault. It can be expected that the generator phase angle is suppressed by this optimum reclosing operation. Therefore, the system stability improvement system effect can be expected by carrying out the optimum reclosing, when the fault arose. At present, it has been set at the value which seems to be optimum considering various problems in the reclosing time. However, in this method the system stability improvement effect can not be expected. It was demonstrated that the optimal reclosing method have depression effect of the δ of generation in the computer simulation using Impavt Ver 2.2..

1. はじめに

電力の生産・輸送・分配からなる電力系統は、社会生活や産業の高度化および多様化に伴い、安定で信頼性の高い電力供給が益々要求されている。近年、電力市場の規制緩和や自由化^{1)~4)}に伴い、今後系統内には、太陽光発電システムや風力発電などの分散電源や独立系発電事業者 (Independent Power Producer: IPP) などが増加してくるものと思われる。また、これまで地域独占であった電力の売買も他地域からの電力の売買も可能となり、系統全体がより複雑化の傾向になるものと思われる。このような系統において、大小規模の発電所や分散電源などと連系している送電線に故障が発生した場合、その故障が一時的な故障なのか、あるいは永久的な故障なのかを判断するために、送電線を再閉路する必要がある。この再閉路方式としては、自動再閉路方式などが導入され、無電圧時間などを考慮し、高速度、中速度、低速度に区分されている。さらに、相数や故障種類により単相再閉路、多相再閉路、三相再閉路などが実施されている。また、この再閉路方式の選択としては、系統の重要度、発電機に及ぼす影響を考慮して最適な方式が選択されているのが現状である。ここで、系統における再閉路操作は、一度除去した故障を再度発生させることと同様であるので、多重故障が発生した場合と等価であると言える。従って、事故点でのアークの再点弧などの要因を考慮して無電圧時間に注目して慎重に実施されているのが現状である。現在高速スイッチによる強制消弧によ

る、絶縁回復時間の短縮などが計られている^{5)~7)}。

著者らはこれまでに、故障発生後の再閉路実施方法により、再閉路を実施しない場合に比べ、系統安定度が向上あるいは低下することを報告してきた^{8)~9)}。これまでの報告においては、一機無限大母線系統において限流器が導入された場合とされていない場合であり、自動電圧調整器 (AVR) や調速機 (GOV) を考慮していないものであった。

そこで本論文では、限流器が導入されていない場合での AVR と GOV を考慮した一機無限大母線系統を用いて、最適再閉路操作時間の算出方法について提案をし、その有効性について検討を行った。さらに多機系統での有効性を示すために、電気学会標準モデル系統である西日本10機系統¹⁰⁾を参考にした系統においても検討を行った。

2. 再閉路操作方法

再閉路操作については、現在、高速再閉路、中速再閉路、低速再閉路方式などが実施されている^{5)~7)}。本論文においては、高速再閉路に着目し検討を行う。一般に、最適再閉路操作実施に関しては、無電圧時間や二次アーク電流の発生などを考慮して、電圧階級ごとに実施時間が異なっている。

例えば、500kV において3相再閉路の場合、50 サイクル、275kV~187kV においては30 サイクルなどである。また、自動再閉路操作の成功率についても、500kV や275kV~187kV においても90%以上での報告がある。しかしながら、再閉路操作後の安定度に関しては、十分な検討がなされていない⁶⁾。

[†] 愛知工業大学 工学部 電気工学科 (豊田市)

そこで本論文では、故障発生後の系統安定度向上を目的とした最適再開路操作開始時間算出法について、一つの提案をする。まずは、一機無限大母線システムにおいて、提案法を述べる。故障の種類としては、一線地絡、二線地絡、三線地絡故障などが考えられるが、本論文では、故障が一番過酷な三線地絡故障を基準とする。このときの再開路を実施しない場合の位相動揺特性の概念図を図 1 に示す。

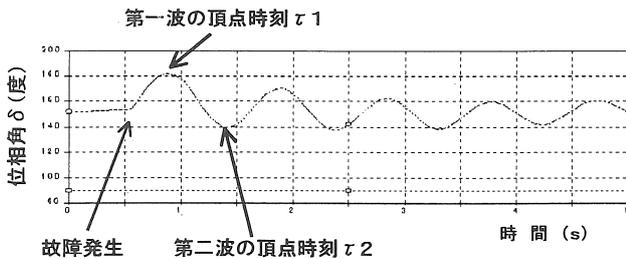


図 1. 一機無限大母線システムにおける三相地絡故障時の位相動揺特性の概念図

本論文で提案する最適再開路操作開始時刻 Tr_s および再開路操作終了の時刻 Tr_f は、再開路操作をしなかった場合の位相動揺特性を予め用いて、以下のように算出するものとする。図 1 において、故障除去後の第一波の頂点の時刻を τ_1 とし、第二波の頂点になる時刻を τ_2 とする。最適再開路実施開始時刻 Tr_s は、次式となる。

$$Tr_s = (\tau_1 + \tau_2) / 2 \quad \dots (1)$$

ただし、この仮定は第一波と第二波の関係が以下のときに成り立つものとする。

$$\text{第一波の最大値} \geq \text{第二波の最大値} \quad \dots (2)$$

従って、N波で脱調をするような場合は考慮していない。ここで、再開路実施終了時刻 Tr_f は、故障時間に発電機に蓄えられる加速エネルギーと減速エネルギーの消費バランスを考慮し、故障発生から故障除去までの時間と同一で行うものとする。

$$Tr_f = Tr_s + (\text{故障継続時間 } T_f) \quad \dots (3)$$

図 2 に本論文で提案する最適再開路手法のタイムシーケンスを示す。

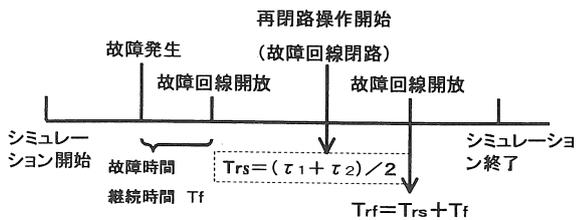


図 2. 提案する最適再開路操作のタイムシーケンス

3. 一機無限大母線システムにおける最適再開路操作

本論文では、発電機が二回線送電線を介して無限大母線に接続されている一機無限大母線システムモデルにおける再開路操作を考える。図 3 にモデルシステムを示す。ここで、発電機には、図 4 に示す自動電圧制御(AVR)、調速機(GOV)、系統安定化装置(PSS)が付加されている。

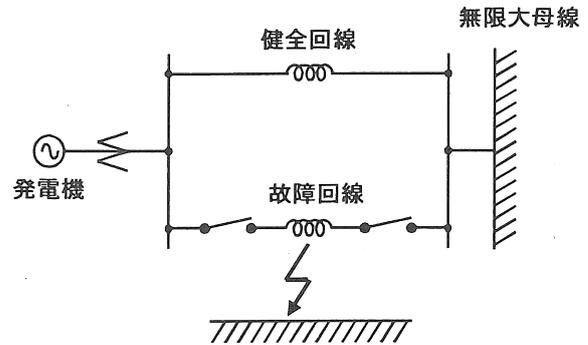
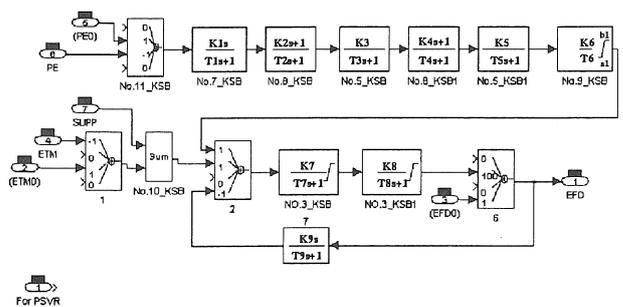
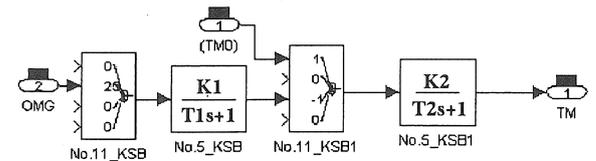


図 3. 一機無限大母線システムモデル



(a) PSS ならびに自動電圧調整器



(b) 調速機

図 4. 自動電圧調整器ならびに調速機

図 5 に本論文で検討したタイムシーケンスを示す。シナリオとしては、図 3 に示すモデルシステムにおいて、0.5s に発電機至近端で三線地絡故障が発生し、故障発生後 70ms 後に故障回線開放を行う。

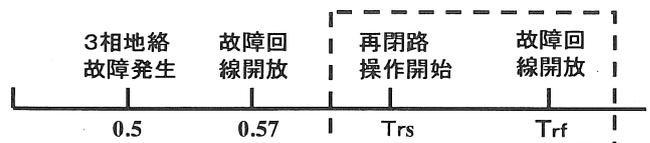


図 5. タイムシーケンス

図6に、再閉路をしなかった場合の発電機位相角特性を示す。本論文では、まずこの特性から最適再閉路操作開始時刻を算出する。図6により第一波での $\tau_1=0.89s$ 、第二波での $\tau_2=1.42s$ より最適再閉路開始時刻 T_{rs} は、第(1)式を用いて $1.16s$ として算出される。また、故障継続時間は $70ms$ なので、最適再閉路終了時刻 T_{rf} は第(3)式を用いて $1.23s$ と算出できる。この時刻を用いて、最適再閉路操作を実施した場合と再閉路操作を50サイクル後に行った場合(本論文では従来法と呼ぶ。)の発電機位相角動揺特性を図7に各々示す。同図に示すように、最適再閉路操作を実施することにより、位相動揺が抑制され良好な特性であることがわかる。

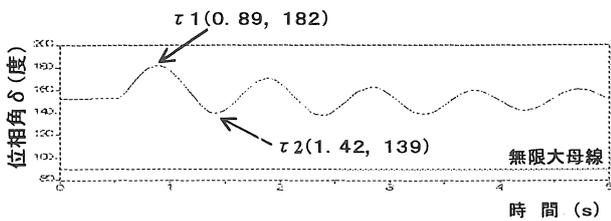


図6. 一機無限大母線系統において再閉路なしの場合

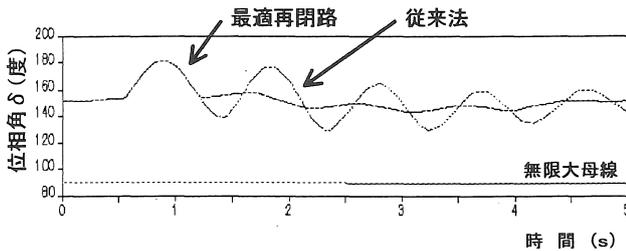


図7. 一機無限大母線系統で再閉路を実施した場合

図8は、図3のモデル系統において一線地絡故障発生時の場合である。この場合においても、最適再閉路操作をすることによって良好な特性を得ることができた。

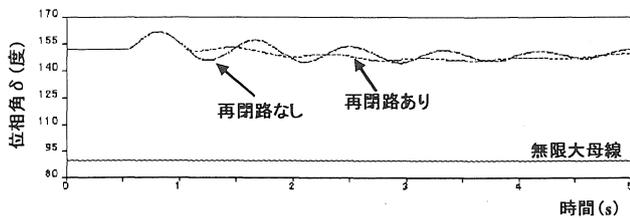


図8. 一機無限大母線系統で一線地絡故障が発生した場合

4. 再閉路実施時間が変化した場合の検討

一機無限大母線系統において、再閉路実施時間が変動したときの場合について検討を行った。一般に再閉路実施時間は設定されているリレーなどにより一定であるが、何か

しらの理由によりこの時間が長くなった場合について検討を行って見た。このとき故障継続時間を $100ms$ とした。このとき再閉路操作実施時間を、故障継続時間 $100ms$ と同じ場合と短くした場合の $50ms$ と長くした場合の $150ms$ について検討を行った。この特性を図9に示す。同図に示すように故障継続時間と再閉路実施時間については、発電機に蓄えられる加速エネルギーと減速エネルギーの関係により同一での時刻が最適だということがわかる。

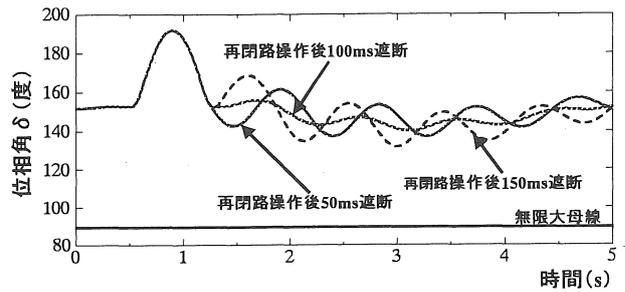


図9. 故障継続時間に対する再閉路操作実施時間との比較

5. 多機電力系統での検討

これまででは、一機無限大母線系統での検討であった。本論文では、図10に示すように電気学会標準モデル西日本10機系統を参考にしたモデル系統において、多機系統における最適再閉路操作について検討を行った。各発電機には、図11に示すAVRならびにGOVを考慮している。ここで本論文では送電線路をすべて2回線としている。

図13は、図10に示すF1で(くし形系統の中央)3相地絡故障が発生した場合において、再閉路を実施しないときの発電機位相動揺特性である。本論文では、この特性を基準にして最適再閉路実施時間を求めることにする。

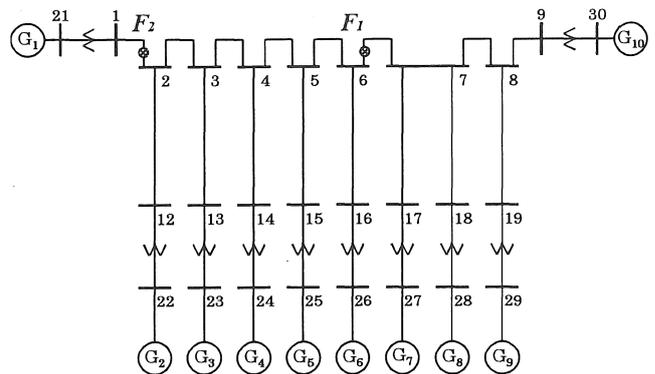


図10. 西日本10機系統モデル

図13に示すように、多機電力系統において、再閉路操作を実施する際には、どの発電機の位相をみて操作を実施することが問題となる。本論文では、系統すべての発電機位相特性を検討し、最適再閉路操作時刻について第(1)

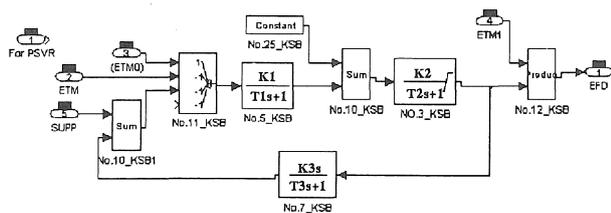


図 1 1 AVR

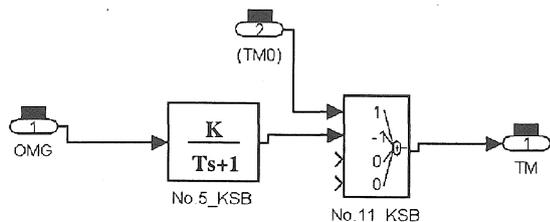


図 1 2 GOV

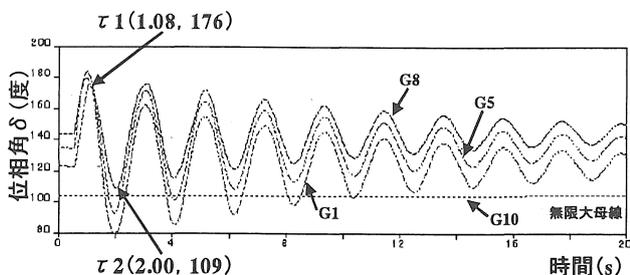


図 1 3. 再閉路なしの場合

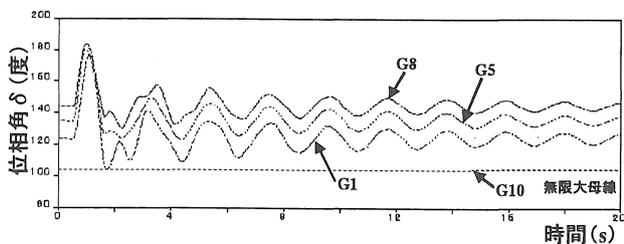


図 1 4 再閉路操作を実施した場合

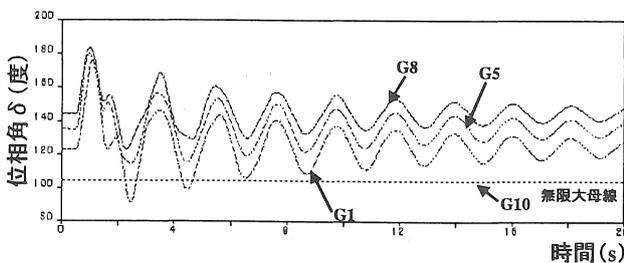


図 1 5 再閉路操作を実施した場合 (従来法)

式における τ_1 および τ_2 を以下のように算出する。多機系統においては, τ_1 を図 1 3 から故障後第一波に注目し,

同図に示すように, 無限大母線を除く動きが一番遅い発電機位相を τ_1 に採用する。つぎに, τ_2 についても故障後の第二波についても注目し, この場合においても動きが一番遅い発電機位相より算出する。これにより算出された τ_1 は 1.08 s であり τ_2 は 2.00 s である。従って最適再閉路操作実施時刻 $Trs = 1.54s$ 故障継続時間が 70ms であるので, $Trf = 1.61s$ となる。

図 1 4 は算出された最適再閉路時刻を用いて, 図 10 に示す故障線路 6-7 間を再閉路を実施した場合である。また, 図 1 5 は, 再閉路操作を故障後 50 サイクルで実施した場合である。図 1 4 図 1 3 と図 1 4 を比較すると, 最適再閉路操作を実施した場合, 動揺が抑制されていることがわかる。

6. 故障点を変更した場合の検討

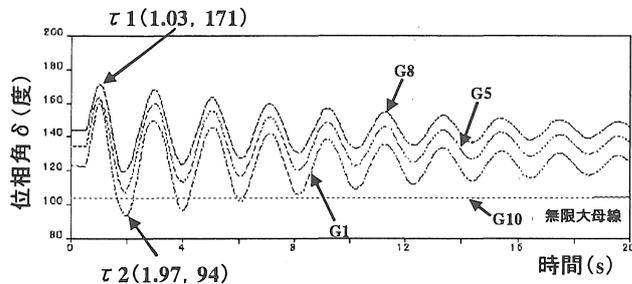


図 1 6. F2 地点での 3 線地絡故障

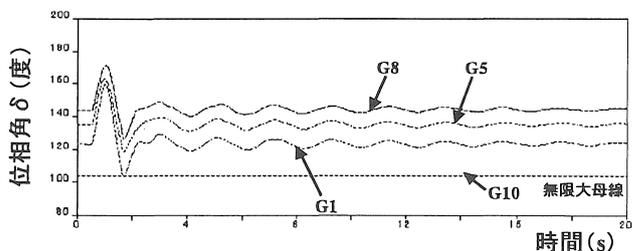


図 1 7. F2 地点で再閉路を実施した場合

図 1 6 は, 図 1 0 における F2 地点で三相地絡故障が発生した場合の再閉路操作を実施しなかった場合である。この特性より, 最適再閉路操作時刻 τ_1 および τ_2 は, 1.03s と 1.97 s となる。算出された時刻を用いて最適再閉路操作を実施した場合を図 1 7 に示す。図 1 7 と図 1 6 を比較すると最適再閉路操作を実施した場合, 位相動揺が抑制されていることがわかる。従って最適再閉路操作の有効性が伺える。

7. 一線地絡故障が発生した場合

図 1 8 と図 1 9 は, 図 1 0 の F1 地点で一線地絡故障が発生した場合の特性である。図 1 8 は再閉路をしなかった場

合であり、図19は再開路を実施した場合である。ここで、最適再開路時刻に関しては、本論文では最も過酷な故障である三相地絡故障が発生した場合を基準として、このときの時刻で実施をした。図18と図19を比較しても最適再開路操作を実施したときの有効性が示されている。

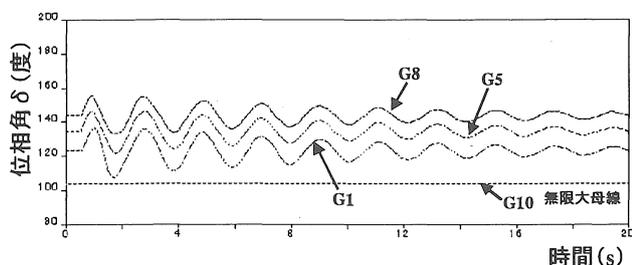


図18. F1地点での1線地絡故障

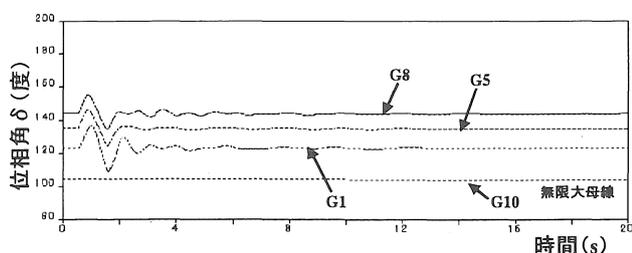


図19. F1地点での再開路を実施した場合

8. まとめ

本論文では、複雑化が進んでいる電力系統において、送電線に故障が発生した場合における再開路操作について検討をした。その際に、本論文では最適な再開路操作をするための時刻の算出式を提案し、提案手法の有効性について一機無限大母線検討ならびにくし形10機系統を用いて検討を行った。

今後は、エネルギー関数や等面積法などを用いた検討、ループ形系統、限流器が導入された場合での最適再開路操作について、小型発電機を用いて実験など多面的に行っていく予定である。

9. 謝辞

本論文のシミュレーションは、東京電力株式会社電力技術研究所で開発された ImpavtVer2.2 を用いた。シミュレーションを実行するにあたり、東京電力多田泰之様から多くのご助言を頂きました。ここに厚くお礼を申し上げます。

本研究は平成12年度科学研究費補助金(奨励研究A)課題番号12750248による研究助成の援助を受けた事を付記し、謝意を表する。

参考文献

- (1)資源エネルギー庁公益事業部：電力構造改革，通商産業調査会，2000
- (2)電気共同研究会：電気共同研究第55巻 第3号 電力品質に関する動向と将来展望 2000
- (3)横山，岡田：諸外国の電力市場における規制緩和の現状，電学論B，Vol.119-b, No.1, 1999
- (4)林：電力自由化に伴う電力システムの技術課題，OHM 3月号，2000
- (5)電気学会：電気学会技術報告(Ⅱ部)第354号 電力系統の事故時復旧操作
- (6)電気学会：電気学会技術報告 第801号 系統脱調・事故波及防止リレー技術 2000年10月
- (7)電気学会：電気学会技術報告 第717号 保護リレーシステム工学の体系化と技術者育成 1999年2月
- (8)加藤，山田，雪田，後藤，一柳，松村：“限流器導入系統における最適再開路の検討”電気学会静止器研究会資料 2000年11月
- (9)小島，加藤，雪田，後藤，一柳，松村：“電力系統における近似曲線を用いた最適再開路の検討”2000年3月
- (10)電気学会：電気学会技術報告 第754号 電力系統の標準モデル 1999年11月
- (11) <http://www.tepco.co.jp/index-j.html>

(受理 平成15年3月19日)