電力系統安定化のためのアクティブ型限流器のオンオフ制御

学生員 山田 浩* 学生員 藤田 淳也*
 正員 雪田 和人* 正員 後藤 泰之*
 正員 一柳 勝宏*

On-off Control of Active Type Fault Current Limiter for Power System Stabilization

Hiroshi Yamada*, Student Member, Junya Fujita*, Student Member, Kazuto Yukita*, Member,
 Yasuyuki Goto*, Member, Katsuhiro Ichiyanagi*, Member

In recent years, the electric power system becomes more and more complicated. Therefore, the supply of electric power with stability and high reliability is required. The increase of fault current has some possibility of causing step-out of generators and a large-scale blackout. Recently, the effectiveness of FCL (Fault Current Limiter) for suppression of fault current is examined. In this paper, Active type FCL which is carried out the on-off control after fault clearance is proposed. Computer simulations are carried out for 1-machine infinite bus standard model, and the system stabilization by active type FCL is confirmed.

キーワード：限流器，電力系統，過渡安定度，位相面解析

Keywords: fault current limiter, power system, transient stability, phase plane analysis

1. まえがき

近年，電力系統は電力需要の増加や電力の自由化による分散型電源の導入増加により，大規模で複雑となっている。このような状況下において，系統故障時の故障電流も増加傾向にあり，これを抑制し，良質な電力を安定に供給することは重要な課題となっている。最近の FACTS 機器の発達により，送電線路に対して並列に設置した機器に加えて，限流器，TCSC，高速位相器など，直列機器による安定化装置が検討されるようになった。故障電流抑制のための限流器（FCL：Fault Current Limiter）として，アーク抵抗利用方式，超電導利用方式，半導体利用方式，整流器型方式など種々の方法が提案され⁽¹⁾，計算機シミュレーションを中心として多くの検討がなされている⁽²⁾⁽³⁾。

また，系統動揺抑制を目的に，超電導限流器（SFCL）と超電導エネルギー貯蔵システム（SMES）とを協調制御する手法が提案されている⁽⁴⁾。文献⁽⁴⁾においては，主として発電機の角速度偏差の情報をもとに SMES を高速制御し，大擾乱時ならびに運転点回りの比較的小さな動揺を抑制しようというものである。本論文は，限流器の高速転流制御を行うことによる，いわゆるアクティブ型限流器を提案し，限流器単体で故障発生後の系統動揺を抑制可能であ

ることを確認している。系統故障後の発電機の位相面解析による安定化制御について計算機シミュレーションを実施し，比較的良好な結果が得られたので以下に述べる。

2. 限流器モデル

本研究において，検討の対象とする限流器の動作方式を半導体型限流器と想定し，限流素子としてはリアクトル型としている。従来の故障電流抑制に加えて系統安定化を目的とし，発電機の位相角および角速度偏差の情報を用いて限流器転流制御を実施するアクティブ型限流器としている。

限流器動作の第 1 段階としては，故障発生と同時に故障電流の急激な増加を検出し，半導体転流素子に信号を与えることにより限流リアクタンスを増加させ，限流動作をさせるものとする。以後，故障継続中は限流動作を維持させる。故障除去と同時に故障電流の減少を検出し，再び転流素子に信号を与えることにより限流リアクタンスをゼロとし，限流動作を終了させる。

限流器動作の第 2 段階として，故障除去後の系統動揺抑制のために，発電機の位相角および角速度偏差をもとに限流器のオンオフ制御を実施する。故障除去後，発電機が加速状態から減速状態（ $\omega \leq 0$ ）に転じたある時点において再び限流器を投入し，系統に加速エネルギーを与える。その後，再び発電機が加速状態（ $\omega \geq 0$ ）に転じた時点で限流器を解列し，制御終了とする。なお，限流器オンオフ時において，0.8 msec の動作遅延時間が発生するものとした。

* 愛知工業大学電気工学科

〒470-0392 豊田市八草町八千草 1247

Dept. of Electrical Engineering, Aichi Institute of Technology
 1247, Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota 470-0392

図 1 IEEJ 1 機無限大母線系統モデル

Fig. 1. IEEJ 1-machine infinite bus model system.

図 2 送電端電流（実効値）および発電機位相角

Fig. 2. Effective value of current at the transmission end and generator angle.

3. アクティブ型限流器オンオフ制御のシミュレーション

検討の対象とした IEEJ 標準モデル（1 機無限大系統モデル）を図 1 に示す。同図において、送電端に提案するアクティブ型限流器が設置してあるものとする。故障条件としては、送電線中間地点における 1 回線 3 相地絡故障を想定し、再閉路操作は行わず、故障発生から 70 ms 後に故障線路を除去するものとした。なお、故障継続中には限流器を投入し、本来の限流動作をさせる。

図 2 に、故障発生時における送電端電流の実効値および発電機位相角の変化を示す。発電機の自動電圧調整装置（AVR）のゲインを小さくし、その制御効果の影響を小さくしてあるため、故障発生中は発電機端子の電圧が降下し、故障電流は徐々に小さくなっている。比較のため、故障中に限流器を投入した場合と投入しない場合を合わせて示しており、投入した場合には故障電流のピークを約 1/3 に抑えていることが確認できる。また、限流器再投入により、位相角は速やかに平衡点に収束していることが確認できる。

図 3 にアクティブ型限流器オンオフ制御のシミュレーション結果を $\delta - \omega$ 位相平面で示す。同図には、比較のため限流器の再投入を実施しない場合と合わせて示す。故障発生により発電機は加速し、 δ, ω ともに増加している。その後、故障除去により発電機は加速状態 ($\omega \geq 0$) から減速状態 ($\omega \leq 0$) に転じ、 $\omega = -50[\text{deg/sec}]$ となった時点で限流器を再投入している。これにより位相面軌跡は速やかに最終平衡点に収束していることが確認できる。対して、限流器を再投入しない場合、大きなミットサイクルを描く軌跡となっている。なお、両ケースとも、故障発生から故障除去までは、本来の故障電流抑制を目的として限流器を投入している。

図 3 アクティブ型限流器オンオフ制御のシミュレーション結果

Fig. 3. Simulation result of on-off control of active type FCL.

以上の結果より、限流器をアクティブ型として使用し、位相平面において適切なオンオフ制御を実施することにより、本来の故障電流抑制効果に加え、系統安定化効果が得られることが確認できた。

4. あとがき

本来の故障電流抑制に加え、系統動揺抑制を目的とした限流器の高速転流制御を行うことによる、いわゆるアクティブ型限流器を提案した。1 機無限大系統モデルを対象として、位相平面における限流器のオンオフ制御の計算機シミュレーションを実施したところ、系統安定化効果が確認できた。

今後の課題として、多機系統への応用が考えられるが、位相中心の考え方に基づく系統縮約法が提案されており⁽⁵⁾、多機系統においても位相平面に基づくオンオフ制御手法が適用可能であると考えられる。

（平成 15 年 10 月 15 日受付，平成 16 年 1 月 27 日再受付）

文 献

- (1) 故障電流抑制技術調査専門委員会：「故障電流抑制用限流技術の現状と展望」，電気学会技術報告，No.709 (1999)
- (2) M. Kubo and J. Tamura: "An Analysis Of Superconducting Fault Current Limiter For Stabilization Of Synchronous Generators", *T. IEE Japan*, Vol.119-B, No.1, pp.63-72 (1999-1) (in Japanese)
久保将朗・田村淳二：「超電導限流器による同期発電機の安定化に関する検討」，電学論 B，119，1，pp.63-72 (1999-1)
- (3) T. Verhaege, C. Cotteville, P. Estop, P.G. Therond, P. Thomas, Y. Laumond, M. Bekhaled, P. Bonnet, and V.D. Pham: "Investigations of HV and EHV Superconducting Fault Current Limiters", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.5, No.2, Pt 1, pp.1063-1066 (1995-6)
- (4) M. Tsuda, Y. Mitani, and K. Tsuji: "Power System Stabilizing Control by Coordination of Series Damping Resistor Operated by Superconducting Fault Current Limiter with Superconducting Magnetic Energy Storage", *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.7, pp.840-847 (2002-7) (in Japanese)
津田将岐・三谷康範・辻毅一郎：「超電導限流器による直列制動抵抗と超電導エネルギー貯蔵装置を協調させた電力系統安定化制御」，電学論 B，122，7，pp.840-847 (2002-7)
- (5) Y. Xue, T. Van Cutsem, and M. Ribbens-Pavella: "A Simple Direct Method for Fast Transient Stability Assessment of Large Power Systems", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.3, No.2, pp.400-412 (1988-5)