

分散型電源が導入された電力系統における 限流器の効果に関する研究

システム工学技術分野 佐藤孝雄

1. はじめに

電力需要の長期的な安定確保をしていくために、需給両面における対策が不可欠となってきた。供給面の対策としては、大規模電源の開発に取り組む一方、分散型電源の導入を積極的に推進することも重要となっている⁽¹⁾。分散型電源は、電力系統と連系されることで安定した電力を得ることができ、また分散型電源の余剰電力を有効に活用することができる。しかし、電力系統へ分散型電源が連系されることで母線の短絡容量が増加し、故障電流が増大する。その結果、遮断器の遮断容量不足、瞬時電圧低下(瞬低)等を生じる恐れがあり、系統の電力品質、保護面で悪影響を及ぼすことが懸念される。

筆者らは、電力系統の故障電流を抑制するための超電導限流器を分散型電源が導入された配電系統に適用⁽²⁾⁻⁽⁵⁾して、上記の問題点について改善することを提案した。

本研究では、配電系統における EMTP を用いた解析と、模擬系統を用いた検証試験により、分散型電源が導入された電力系統における超電導限流器の効果について検討を行った。

2. 配電系統における解析

新潟市内に実在する配電系統を模擬した解析モデルを設定し、この配電線路に三相短絡故障が発生した場合について、汎用回路解析プログラム EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) による解析を行った。ここで、各定数は実在の配電系統の数値を使用した。本解析は、分散型電源の導入が有る場合と無い場合について、それぞれ超電導限流器の適用が有る場合と無い場合で行った。解析結果として、故障回線の線路電流と健全回線の負荷電圧を出力し、故障電流の抑制と瞬低対策に関する超電導限流器の効果を検討した。

2.1 解析モデル

本研究で検討した配電系統モデルを図 1 に示す。配電用変電所に設置された配電変圧器より、1バンク7回線のフィーダが引出されている。この中で、A, B

2組の配電線に注目し、解析を行った。A, B共に、こう長2 kmの配電線路を介して、末端にそれぞれ負荷 Z_A , Z_B が接続されている。そして、A配電線には、引出口に筆者らが提案した三相リアクトル型超電導限流器⁽⁶⁾⁽⁷⁾を設置し、B配電線には、負荷点に分散型電源として、同期発電機Gが逆潮流無しで連系されている。この配電システムモデルのパラメータを表1に示す。

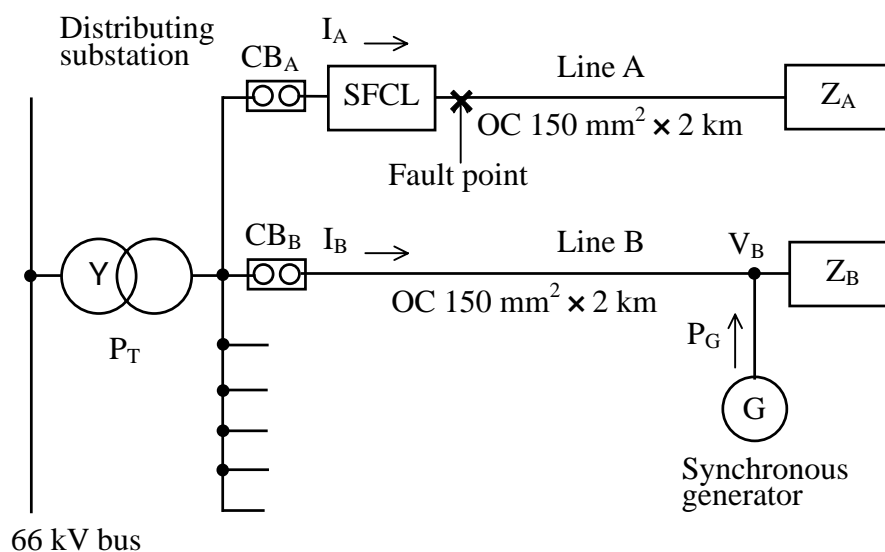


図1 配電システムモデル

表1 配電システムモデルのパラメータ

項目	記号	設定値
配電変圧器の容量	P_T	66 kV/6.6 kV, 20 MVA
配電変圧器の%インピーダンス	% Z	7.5 % (10 MVA base)
同期発電機の実出力	P_G	6.6 kV, 1.9 MVA
線路 A, B の抵抗	R_A, R_B	0.26 Ω
線路 A, B のインダクタンス	L_A, L_B	2.04 mH
線路 A の負荷容量	Z_A	2 MVA (pf = 0.95)
線路 B の負荷容量	Z_B	2 MVA (pf = 0.95)

2.2 三相リアクトル型超電導限流器

本研究で使用した三相リアクトル型超電導限流器 SFCL を図 2 に示す。

この構造は、線路に挿入された直列変圧器 2 次側巻線の全波整流部に限流素子として超電導コイルが接続された形となっている。通常時は、変圧器 2 次側が短絡状態であり、ほとんど損失無く電流を流すことができる。次に、線路に短絡、地絡故障が発生した場合には、急激な電流の上昇を超電導コイルのインダクタンスにより抑える方式である。

本限流器の特徴は、1 個の超電導コイルにより三相回路に適用することが出来、コンパクト化と低コスト化が計られる。

2.3 解析結果

図 1 に示す配電系統モデルにおいて、表 1 に示すパラメータを設定し、A 配電線の変電所近傍で三相短絡故障が発生した場合の解析を、EMTP を使用して行った。

図 2 に、線路 A の電流 I_A の解析結果を示す。ここで、(a) は分散型電源としての同期発電機 G が連系無しで、超電導限流器 SFCL を使用しない場合、(b) は G が連系有りで、SFCL を使用しない場合、(c) は G が連系有りで、SFCL を使用した場合を示している。

この波形より、 $t = 100 \text{ ms}$ で三相短絡故障が発生し、(a) では I_A は、第 1 波ピーク値で 24 kA に上昇している。そして、過電流継電器 (瞬時要素) OCR-H が動作することで、故障発生から 140 ms 後、遮断器 CB_A により I_A は遮断されている。一方、(b) では G より故障点に流入する電流が加算され、 I_A は、第 1 波ピーク値で 26 kA まで上昇している。これに対して、(c) では、SFCL のインダクタンスにより、 I_A は第 1 波ピーク値で 1.6 kA 、最大ピーク値で 16 kA に上昇が抑制されている。そして、この場合には過電流継電器 (限時要素) OCR-L が動作し、故障発生から 300 ms 後、遮断器 CB_A により、 I_A は遮断されている。

これらの解析結果より、分散型電源が連系された本配電系統モデルに SFCL を導入することで、故障電流を最大値で 60% まで抑制できることが示された。

次に、図 4 に線路 B の負荷電圧 V_B の解析結果を示す。(a) では V_B は、故障発生と同時にピーク値で 5.2 kV から 1.2 kV に、(b) では 1.9 kV まで低下している。これに対して、(c) では、 V_B は SFCL のインダクタンスにより緩やかに低下し、故障発生から 300 ms 後、 2.1 kV まで低下した時点で CB により故障電流が遮断されることで、また元の電圧に復帰している。

これらの解析結果より、SFCL を配電系統に導入することで、健全回線で発生する瞬低にも効果があることが示された。

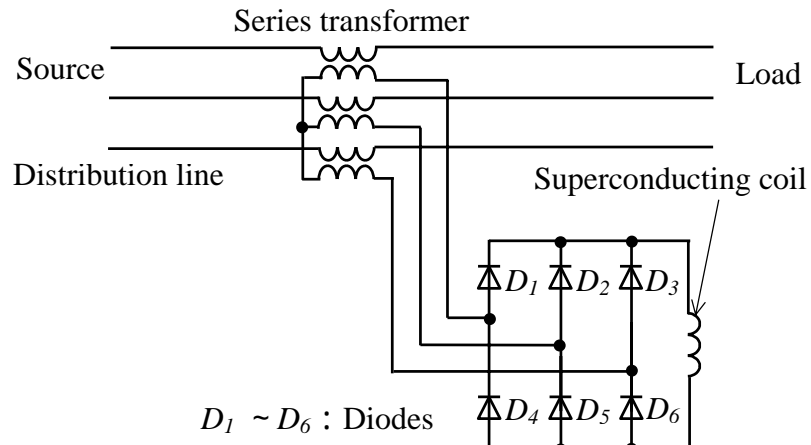
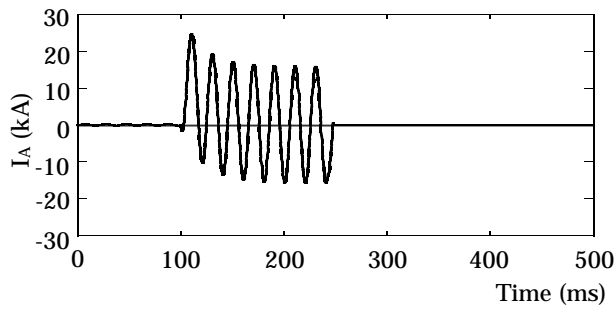
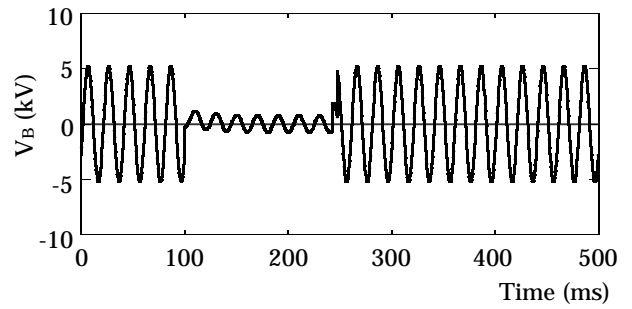


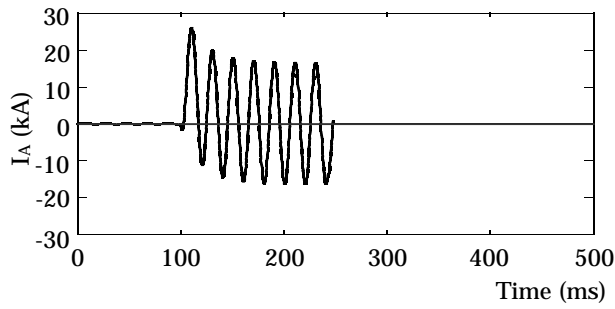
図2 三相リアクトル型超電導限流器



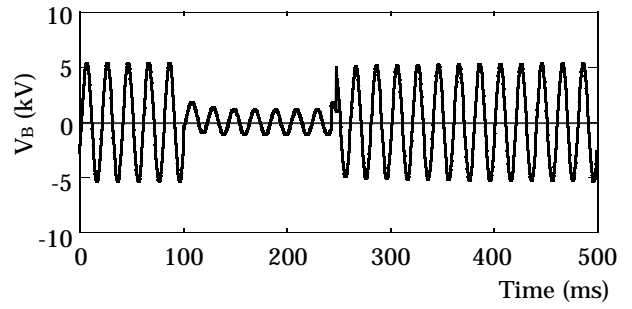
(a) Without both FCL and G



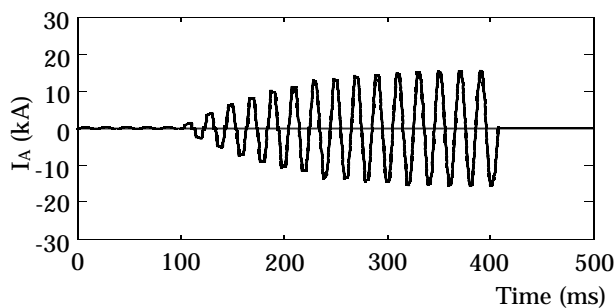
(a) Without both FCL and G



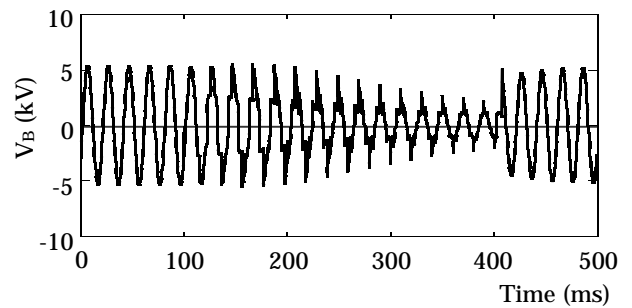
(b) Without FCL and with G



(b) Without FCL and with G



(c) With both FCL and G



(c) With both FCL and G

図3 3相短絡故障時の線路電流(解析結果)

図4 3相短絡故障時の負荷電圧(解析結果)

3. 模擬系統による検証試験

前項の解析結果を検証するため配電系統モデルに対応した模擬系統を試作し、線路に三相短絡故障が発生した場合の試験を行った。試験条件は、解析と同一ケースの設定とし、故障回線の線路電流と健全回線の負荷電圧を測定し、故障電流の抑制と瞬低対策に関する限流器の効果について検証を行った。

3.1 模擬系統

本研究の検証試験に使用した模擬系統の構成を図5に示す。母線として大学構内の3 200 V電源を使用し、配電変圧器に相当するY- 接続の三相変圧器からA, B 2回線の線路が引出されている。

線路Aには、引出し口に遮断器としてサイリスタスイッチ S_A 、その直後に三相リアクトル型限流器FCL(限流リアクトルとして常電導コイルを使用)、故障発生をさせるための短絡スイッチ S_G が接続されている。そして、線路リアクタンスに相当するリアクトル L_A を介して、末端に負荷装置 Z_A が接続されている。

同様に、線路Bには、遮断器 S_B 、リアクトル L_B を介して、末端に負荷装置 Z_B 、および分散型電源として同期発電機 G が接続された構成となっている。尚この G は、サイリスタレオナード装置で制御された直流電動機により、定トルクで運転されている。

ここで S_A , S_B , S_G は、実系統と同様のタイムシーケンスで、事故発生から遮断までの動作が制御されている。この模擬系統のパラメータを表2に示す。

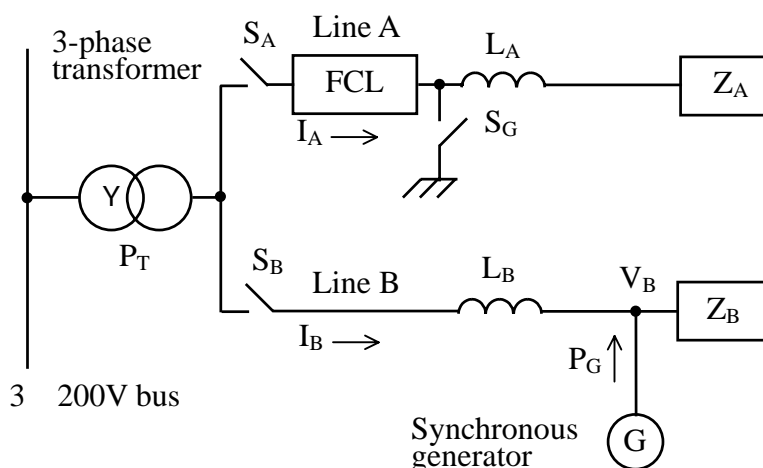


図5 模擬系統の構成

3・2 検証試験

図 5 に示す模擬システムを使用して，表 2 に示すパラメータを使用し，発電機出力 $P_G = 1.0 \text{ kW}$ ，負荷電流 $I_A = 4.0 \text{ A}$ ， $I_B = 4.0 \text{ A}$ という値を設定し，線路Aに三相短絡事故が発生した場合の試験を行った。

図 6 に，線路Aの電流 I_A の試験結果を示す。ここで，(a)は同期発電機Gが連系無しで，限流器FCLを使用しない場合，(b)はGが連系有りで，FCLを使用しない場合，(c)はGが連系有りで，FCLを使用した場合を示している。

この波形より， $t = 100 \text{ ms}$ で三相短絡故障が発生し，(a)では I_A は，第 1 波ピーク値で 61 A に上昇している。そして，故障発生から 140 ms 後，遮断器 S_A により遮断されている。

一方，(b)ではGより故障点に流入する電流が加算され， I_A は，第 1 波ピーク値で 109 A まで上昇している。これに対して，(c)では，FCLのインダクタンスにより， I_A は第 1 波ピーク値で 23 A ，最大ピーク値で 43 A に上昇が抑制されている。そして，故障発生から 300 ms 後，遮断器 S_A により遮断されている。

これらの試験結果より，本模擬システムの構成においては，FCL を導入することで，故障電流を最大値で 40% まで抑制できることが検証された。

次に，図 7 に線路Bの負荷電圧 V_B の試験結果を示す。(a)では V_B は，故障発生と同時にピーク値で 255 V から 16 V に大きく低下している。しかし，(b)では解析に比べてGの容量が大きいため， V_B は緩やかに低下し，故障発生から 140 ms 後， 126 V まで低下した時点で I_A が遮断され，元の電圧に復帰している。そして(c)では，FCLのインダクタンスにより， V_B はさらに緩やかに低下し，故障発生から 300 ms 後， 156 V まで低下した時点で I_A が遮断され，元の電圧に復帰している。

これらの試験結果より，解析結果と同様に FCL を導入することで，瞬低対策にも効果があることが検証された。

4. まとめ

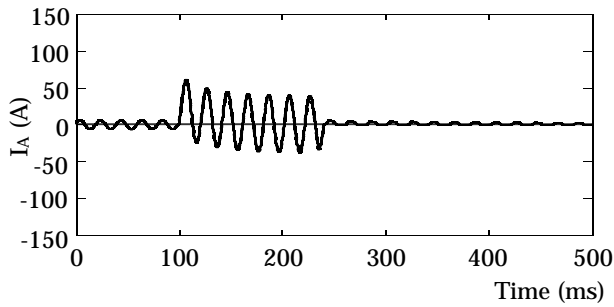
分散型電源が導入された電力システムに超電導限流器を適用することを提案し，その効果について配電システムにおける EMTP を用いた解析と，模擬システムを使用した試験により検証を行った。

その結果，分散型電源導入で増加する故障電流を超電導限流器により，抑制することができ，既存の電力システムに故障電流を増加させること無く，分散型電源導入が可能となることが示された。

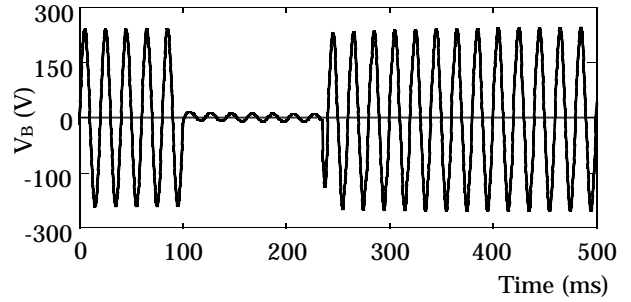
また，故障発生により健全回線で生じる瞬低に対しても，超電導限流器により低減できることが示された。

表 2 模擬系統のパラメータ

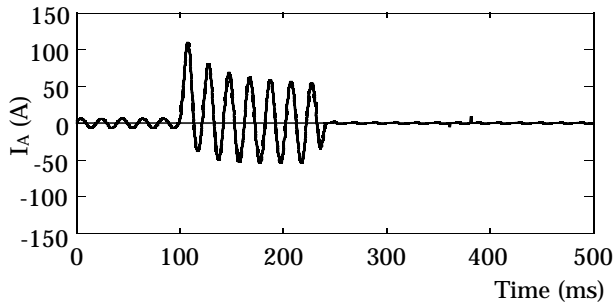
項目	記号	定格
3 変圧器	P_T	200 V/200 V, 4 kVA
同期発電機	P_G	200 V, 3 kVA
線路 A のインダクタンス	L_A	10 mH
線路 B のインダクタンス	L_B	10 mH
線路 A の負荷	Z_A	200 V, 3 kVA
線路 B の負荷	Z_B	200 V, 3 kVA
限流器のインダクタンス	L_F	6.5 mH



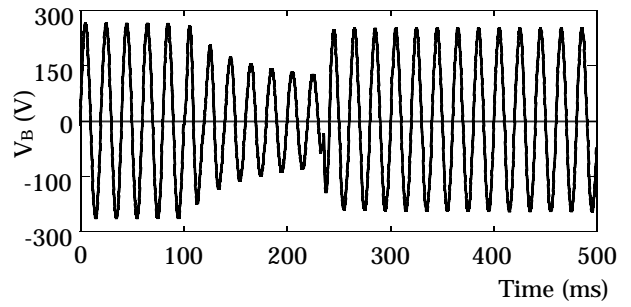
(a) Without both FCL and G



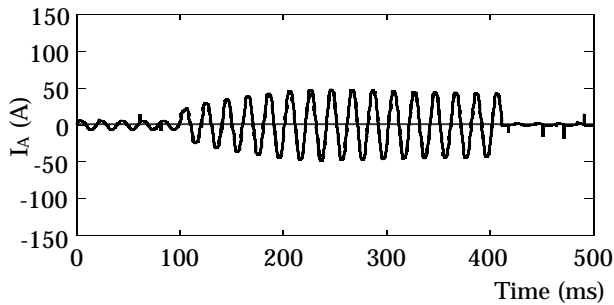
(a) Without both FCL and G



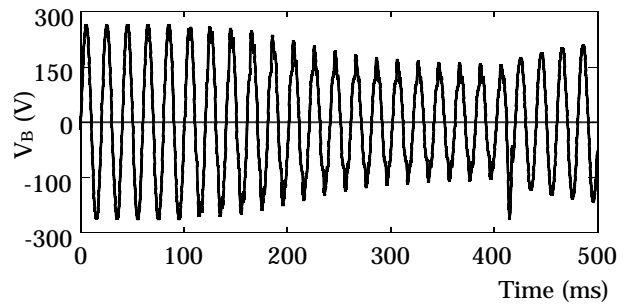
(b) Without FCL and with G



(b) Without FCL and with G



(c) With both FCL and G



(c) With both FCL and G

図 6 3 相短絡故障時の線路電流(試験結果)

図 7 3 相短絡故障時の負荷電圧(試験結果)

謝 辞

本研究の解析，試験データ収集に関して，ご協力を頂いた山口研究室の学生諸氏に感謝をする。解析に使用した配電システムのデータを提供して頂いた東北電力（株）新潟営業所の佐藤智之氏に御礼を申し上げる。

本研究の一部は，平成 17 年度科学研究費補助金（奨励研究 17918017）の助成により行った。

参考文献

- (1) 電気技術基準調査委員会編：「分散型電源系統連系技術指針」，（社）日本電気協会（1996-4）
- (2) 佐藤孝雄，寺嶋 亨，佐藤 工，山口 貢，福井 聡，小川 純，清水洋隆，佐藤智之：「分散型電源が導入された配電系統における超電導限流器の効果」，電気学会研究会資料，超電導応用電力機器・リニアドライブ合同研究会，ASC-06-11, LD-06-11, pp. 57-61 (2006-1)
- (3) 佐藤孝雄，寺嶋 亨，佐藤 工，山口 貢，福井 聡，小川 純，清水洋隆，佐藤智之：「分散型電源が連系された電力系統における限流器導入の効果」，第 73 回 2005 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集，1E-p19, p. 104 (2005-11)
- (4) 佐藤孝雄，山口 貢，福井 聡，小川 純，寺嶋 亨，佐藤智之：「分散型電源が導入された電力系統への限流器の適用」，第 72 回 2005 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集，3E-p30, p. 276 (2005-6)
- (5) 佐藤孝雄，寺嶋 亨，山口 貢，福井 聡，小川 純，佐藤智之：「分散型電源が導入された電力系統における限流器の効果に関する研究」，平成 17 年電気学会全国大会 6-208, p. 364 (2005-3)
- (6) K. Usui, T. Nomura, T. Satoh, M. Yamaguchi, S. Fukui, K. Yokoyama, and T. Nagasawa: “ A single dc reactor type fault current limiting interrupter for three-phase power system ”, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol.11, No.1, pp. 2126-2129 (2001-3)
- (7) 山口 貢，福井 聡，佐藤孝雄，蕪木康弘，堀川達弘：「一直流リアクトル型三相限流器に関する考察」，電学論 B 119, 11, pp. 1166 - 1173 (1999-11)