66 kV 級整流型限流器モデルの開発

正員 大熊 武* 正員 佐藤 礼文*
 正員 高橋 芳久* 正員 徳田 憲昭**
 非会員 村井 正樹** 非会員 長崎 則久**
 非会員 湯口 恭介**

Development of a 66 kV Class Rectifier Type Fault Current Limiter System

Takeshi Ohkuma*, Member, Yoshibumi Sato*, Member, Yoshihisa Takahashi*, Member,
 Noriaki Tokuda**, Member, Masaki Murai**, Non-member, Norihisa Nagasaki**, Non-member,
 Kyoussuke Yuguchi**, Non-member

A fault current limiter (FCL) is extensively expected to suppress fault current, particularly required for trunk power systems heavily connected high-voltage transmission lines, such as 500 kV class power system which constitutes the nucleus of the electric power system. By installing such FCL in the power system, the system interconnection is possible without the need to raise the capacity of the circuit breakers, and it is expected that FCLs may be used in more efficient power system design. For these reasons, FCLs based on various principles of operation have been developed in the world.

In this paper, we have proposed a new type of FCL system, consisting of solid-state diodes, DC coil and bypass AC coil, and described the specification of distribution power system and 66 kV class FCL model. Also we have proposed a 66 kV class prototype single-phase model and the current limiting performance of this model was evaluated using a short circuit generator.

キーワード：限流器，整流器，直流コイル，66 kV 単相モデル，短絡発電機，検証試験

Keywords: fault current limiter, rectifier, DC coil, 66 kV single model, short circuit generator, experiment result

1. まえがき

限流器は、電力系統に故障が発生した時に系統に流れる故障電流を抑制する装置で、直列機器などの短絡容量の軽減が可能となり、系統運用面からも系統安定度の向上などの効果が期待されている⁽¹⁾⁽²⁾。このため特に故障電流の大きな基幹系統などにおいて効果が大きいことが想定される⁽¹⁾。

これまで主に基幹系統などの電源集中箇所において故障電流の増加傾向があったが、電力の小売市場の部分自由化により新規事業者が参入できるようになり、IPP (Independent Power Producer) 等の独立した電源が系統へ連系されることにより短絡容量が増大することも想定される。こ

れらの要求に対して、超電導特有のクエンチ現象を利用した限流器⁽³⁾や、整流回路と超電導リアクトルを組み合わせた整流型超電導限流器など^{(4)~(6)} これまでにも種々なタイプの限流器が開発されている⁽¹⁾。

なかでも、整流型限流器は、基本的には超電導のクエンチ現象を利用しなくても直流リアクトルのインダクタンスのみで十分な限流効果が期待でき、故障時の系統安定度確保が期待できるなどの性能を持っている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

我々はこの直流リアクトルのインダクタンスによる限流効果のみを利用した整流型限流器について、これまでに 6.6 kV 級単相モデル器を試作し、限流動作検証試験を実施した⁽⁹⁾。本論文では、更なる高電圧化を目指し 66 kV 級単相モデル器を試作し、基本動作検証試験および短絡発電機を使用した限流動作検証試験を実施し⁽¹⁰⁾、本方式の有効性を明らかにしたので報告する。

2. 整流型限流器の構成と動作原理

〈2・1〉 整流型限流器の回路構成 図 1 に整流型限流器の回路構成図を示す。本限流器は、整流回路部と直流リア

* 東京電力 (株) 技術開発研究所
 〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1
 R&D Center, Tokyo Electric Power Company
 4-1 Egasaki-cho, Tsurumiku, Yokohama 230-8510

** 日新電機 (株) エネルギーソリューション事業部
 〒101-0024 東京都千代田区神田和泉町 1
 Energy Solution System Div., Nissin Electric Co., LTD
 1, Kandaizumi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0024

図 1 限流器構成図

Fig. 1. Configuration of rectifier type FCL.

クトル (DCL) およびバイパスリアクトル (ACL) から構成される。なお、ACL は無くとも限流効果は得られるが、故障時の連系解列が不可能な系統への適用や DCL の責務を低減させる目的で、スイッチ (SW) を開放することにより、故障電流を ACL へ高速転流させる場合に必要となる。

② 整流型限流器の基本動作 本限流器の基本動作は以下の通りである。

① 定常時の特性 定常時、整流回路部の DCL には直流電流 (I_D) が流れ、系統側から見ると限流器のインピーダンスが等価的に零に見える。よって、整流回路部の定常インピーダンスがほぼ零のため、ACL 側に流れる電流 (I_{BPL}) もほぼ零となる。

② 限流動作時の特性 系統に短絡故障が発生した場合、限流器の通過電流が急増しようとするが、過渡的な電流増大に対して DCL のインダクタンスによる電流変化抑制作用が働き自動的に限流される。即ち、系統側からは限流器が高インピーダンス状態になったように見える。

なお、この限流効果は故障継続時間が長くなると低下し、整流器部を通過する故障電流 (I_{BR}) は徐々に増加する。このため、故障電流 (I_S) が所定値に増加する前にできるだけ早く SW 開動作をさせることが望まれる。この点は超電導クエンチを用いた超電導 DCL 方式でクエンチ時の発熱抑制のため高速遮断が必要⁽⁷⁾であったことと理由は異なるが、直列に挿入された SW に高速遮断性能を必要とする点は同じと言える。この転流用 SW を高速に解列させることにより、ACL 側に電流転流させ限流効果を持続させている。

3. 66 kV モデル系統への適用検討

③・① モデル系統 今回対象としたモデル系統は、66 kV 系統における独立電源連系に伴う短絡容量増加対策を一例とした。図 2 に示すように独立電源連系の際にも母線 (変圧器) 連系運転を可能とするため、母線に限流器を適用した場合を想定している。

以下に本モデル系統の条件および限流器の仕様についての詳細事項を示す。

本モデル系統において、母線間 (限流器) を通過する常時潮流を $300 A_{rms}$ (限流器 1 回線あたり) とした。また、限流器無しで母線間を連系した場合、A 系統側の母線故障時には、図 2(a) に示すように B 系統より母線連系個所を通

(a) Without FCL

(b) With FCL

図 2 モデル系統

Fig. 2. Model of 66 kV power system.

表 1 モデル系統における限流器の仕様

Table 1. Specification of FCL.

	Specification
(1) Normal operation Current	3 0 0 A_{rms}
(2) Duty of FCL	Suppressing 13.8 kA_{rms} (short circuit current) below 8.3 kA_{rms}
(3) Impedance of FCL	normal operation : 0% at fault : 25% (1000MVA base)

して 13.8 kA_{rms} (1 回線あたり) の故障電流が流れ込み、故障点には 34.7 kA_{rms} の故障電流が流れることとなる。この故障電流を現用の遮断器の定格遮断電流 (31.5 kA_{rms}) 以下に抑制するためには、限流器動作後のインピーダンスは 25% 以上 (1000 MVA ベース) 必要となる。

すなわち、本モデル系統例においては、独立電源連系にともなう短絡電流の増加を現用の遮断器の定格遮断電流以下に納めるためには、図 2(b) に示すように故障時の母線間通過電流を 13.8 kA_{rms} から限流器により 8.3 kA_{rms} 以下に抑制する必要がある。なお、限流器のインピーダンスは系統安定度を考慮すると極力小さいことが望ましい。

これらのことから、本モデル系統における限流器への要求仕様をまとめると表 1 のように表わされる。

③・② モデル系統における限流動作解析 表 1 の限流器の仕様および図 2 のモデル系統条件における EMTP シミュレーション解析結果の波形を図 3 に示す。なお、DCL の責務を低減させる目的で故障後 1 サイクル以内に図 1 の SW を開放し、ACL に電流を転流させる条件で解析を行った。限流器が無い場合 (図 3(a)), B 系統から A 系統

図 3 限流動作シミュレーション解析結果
Fig. 3. Simulation results of FCL.

の故障点へ流れる電流は故障開始直後に、直流分を含んだ $13.8 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 相当の電流が連系点を流れる。

これに対して、限流器を挿入した場合（図 3(b)）には、B 系統からの流入する故障電流は限流器により限流され、 $8.3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ の所定の電流値以下に抑制されている。

4. 66 kV 級単相モデル器の開発

整流型限流器の 66 kV 系統への適用効果を見るために、66 kV 級単相モデル器を試作した。以下に単相モデル器の定格、構成/外観の概要と検証試験結果について述べる。

〈4・1〉単相モデル器の仕様定格 以上の解析結果を参考に求めた、66 kV 級単相モデル器の仕様を表 2 に示す。ACL インダクタンス値は、転流 SW 開放後 ACL のみによる母線間連系となることから、表 1 に示した限流器インピーダンス（25%）より 3.46 mH とし、DCL インダクタンスは、インダクタンス値をパラメータに DCL による限流後の故障電流を EMTP 解析により確認した結果、図 4 に示すように抑制短絡電流以下へ限流可能となる値として 20 mH とした。

また、高速転流用 SW については、現状では 1 サイクル遮断可能な遮断器がまだ開発されていないため、整流回路部の一部にサイリスタを使用することにより転流 SW を模擬し、故障電流を ACL 側に転流する方式を採用した。

〈4・2〉結線図と外観 今回試作した 66 kV 級単相モデル器の結線図および外形図を図 5、図 6 に示す。

サイリスタは、通常ダイオードモードで運転しており、故障検出と同時に OFF するようにして 1 サイクル未満の高速遮断を模擬して、故障電流を ACL 側に転流させること

表 2 66 kV 級単相モデル器の仕様

Table 2. Specifications of rectifier type FCL.

(1) Rated voltage	66 kV
(2) Rated current	$300 \text{ A}_{\text{rms}}$
(3) Impedance of FCL (Inductance of ACL)	25% (1000MVA base) (3.46 mH)
(4) Rated short-circuit current	$13.8 \text{ kA}_{\text{rms}}$
(5) Limiting target	$8.3 \text{ kA}_{\text{rms}}$
(6) Insulation level ・ Rated short-duration Power-frequency withstand voltage ・ Rated lightning impulse withstand voltage	・ $140 \text{ kV}_{\text{rms}}$ ・ $350 \text{ kV}_{\text{peak}}$
(7) Inductance of DCL	20 mH

図 4 DCL インダクタンスによる限流効果
Fig. 4. Current limiting ratio by DCL-inductance.

図 5 66 kV 級単相モデル器結線図
Fig. 5. Circuit diagram of rectifier type FCL.

図 6 66 kV 級単相モデル器外形図
Fig. 6. Outline drawing of rectifier type FCL.

で、DCL 責務を大幅に軽減する設計としている。

これまでに試作・動作検証試験を実施してきた 6.6 kV 級小型モデル器では、整流回路およびリアクトルに気中絶縁構造を取り入れたが⁽⁹⁾、今回試作した 66 kV 級単相モデル器においては、各々の構成機器間の接続に既設機器との接続を考慮して、GIS 直結を考えたガス絶縁による管路接続構造とし、コイルおよび整流回路部などの各機器には油絶縁構造とすることにより、気中絶縁構造よりもシステムのコンパクト化を可能とした。図 7 に 66 kV 級単相モデル器の外観写真を示す。

〈4・3〉 検証試験 検証試験としては、基本動作検証試験と限流動作検証試験に分けて以下のように実施した。

(1) 基本動作検証試験 限流器として試験項目はまだ規格化されていないので、ここでは JEC-2420 (サイリスタ交流電力調整装置) および JEC-2410 (半導体電力変換装置) に準拠した。実施した試験項目と検証結果を表 3 に示すが、試験の結果すべての項目において設計通りの良好な結果が得られた。

基本動作検証試験項目のうち、低電圧通電試験において、システム全体 (ACL 無し) の定常時損失および定格電流通電時のリップル成分を求めた。その結果、システム損失については、DCL と整流部の損失は各々約 12.7 kW と約 11.3 kW

図 7 66 kV 級単相モデル器外観写真

Fig. 7. External view of rectifier type FCL.

表 3 基本動作検証試験項目と結果

Table 3. Results of rectifier type FCL.

Item	Contents of test	Result
(1) Construction	Exterior, dimensions	Good
(2) Peripherals	Applicable standards	"
(3) Withstand voltage	Main circuit grounded	"
(4) Protective operation	Sequence test and others	"
(5) Light-load operation	Rated voltage, low current	"
(6) Low-voltage operation	Rated current, low voltage	"
(7) Temperature-rise	In same mode as above	"
(8) Measurement of Loss	Below 1% of transmitted capacity	"
(9) Control performance	Dynamical tests at rated mode	"

程度であり、単相システムの通過容量 ($38.1 \text{ kV} \times 300 \text{ A} = 11.4 \text{ MW}$) に対して 0.2% と低い値であることを確認した。また、定格電流 (300 A) 通電時のリップル含有率は 2.6% 程度であることを確認した。

(2) 限流動作検証試験

(a) 試験項目 短絡発電機を用いて下記の試験を実施した。

(i) 装置起動試験

・起動から定常状態までの各部電流、電圧特性および時間

(ii) 限流特性試験

・限流動作時の各部電流、電圧特性

・整流回路部遮断時の各部電流、電圧、過電圧特性

なお、短絡発電機は (財) 電力中央研究所横須賀研究所殿所有設備を使用した。

(b) 試験回路 試験回路は図 8 に示すように、短絡故障を遮断器 CB3 の投入により模擬し、モデル器による限流後の故障電流を系統遮断器に相当する CB2 によって切り離す回路構成とした。

なお、今回の試験回路は図 8 に示すように短絡発電機に 66 kV 級単相モデル器を直列接続した回路構成となるため、図 2 に示したモデル系統中の変圧器 1 バンク分+独立電源相当の模擬とし、試験回路条件としては表 4 の通りとした。

(c) 検証試験結果

(i) 装置起動試験 装置起動から定常状態までは 5~6 サイクルではば定常波形になることが確認でき、また、定常運転時の高調波電圧歪みは 0.04% 程度であることを確認した。

(ii) 限流特性試験 短絡位相、短絡電流値を各々変えて行った試験結果の一例として、図 9 に電圧零点近傍で短絡故障を起した場合の測定波形を示す。なお、[PT1][CT1~3] は図 8 中に示したように電圧、電流の測定箇所を示す。

図 8 限流動作検証試験回路

Fig. 8. Test circuit for current limiting operation.

表 4 試験回路条件

Table 4. Condition of test circuit.

(1) Test voltage	38.1 kV _{rms}
(2) Rated short-circuit current	10.8 kA _{rms}
(3) Limiting current	8.3 kA _{rms}

図9 限流動作検証試験結果

Fig. 9. Experiment results of rectifier type FCL.

(d) 考察 図9より、故障発生によりDCLによる限流効果が自律的に現れ、限流動作時の故障電流は、DCLとACLとで分担して限流している。その後、第1波でサイリスタによる遮断が行われて、全てACL側に電流転流し、故障電流を所定の電流値以下に抑制できている。なお、ACL電流の第2波が第1波より大きくなるのは、DCL側の開放によって、整流器側の電流がACLに転流したためである。

また、表5に今回一例として示した図9の試験結果とシミュレーションにて得られた解析結果との比較を示す。この表に示すようによく一致した結果が得られており、解析

表5 シミュレーション解析と試験結果の比較

Table 5. Compared simulation results with Experiment results.

	Simulation	Experiment
(1) Limiting current	8.3 kArms	8.4 kArms
(2) Rectifier current	3.6 kApeak	3.9 kApeak
(3) ACL current	19.5 kApeak	19.3 kApeak

どおりの限流性能を有していることが確認できた。

5. まとめ

DCLのインダクタンスによる限流効果を利用した整流型限流器について66kV系統への適用効果を見るために、66kV級単相モデル器を試作し、基本動作検証試験および短絡発電機を用いた限流動作検証試験を実施した。

その結果以下のことが確認できた。

(1) システム損失測定の結果、DCLと整流部の損失は各々約12.7kWと約11.3kW程度であり、単相システムの通過容量に対して0.2%程度。

(2) 定格電流通電時のリップル含有率は2.6%程度。

(3) 故障発生によりDCLは自律的に限流動作。

(4) DCLとACLによる限流後、第1波でサイリスタによりACLへの高速転流が行われ、故障電流を所定の電流値以下に抑制。

(5) 規約短絡電流10.8 kArmsを8.4 kArmsに限流成功。

以上のように、本限流器が理論通りの優れた限流効果・性能を持つことを明らかにした。

今後は、今回の結果をもとにして、システム構成の検討および検証試験方法、実用化に向けた課題抽出等を進めていく予定である。

最後に、検証試験を実施するに当たり御協力して頂いた(財)電力中央研究所横須賀研究所殿各位に深く感謝致します。

(平成14年9月19日受付、平成15年1月9日再受付)

文 献

- (1) 「故障電流抑制用限流技術の現状と展望」, 電気学会技報, No.709 (1999-1)
- (2) M. Nagata, J. Kida, and S. Sugimoto: "A Study on Effect of FCL on Power System Transient Stability", 2000 National Convention Record, IEE Japan, No.6-053 (2000) (in Japanese)
永田・木田・杉本: 「限流器の過渡安定度への影響に関する一検討」, 平成12年電気学会全国大会, No.6-053 (2000)
- (3) T. Ohkuma and Y. Iwata: "Superconducting Fault Current Limiter", *J. IEE Japan*, Vol.117, No.4, pp.222-226 (1997-4) (in Japanese)
大熊・岩田: 「超電導限流器」, 電学誌, 117, 4, pp.222-226 (1997-4)
- (4) 徳田・松原・浅野: 「整流器型超電導限流器の動作解析」, 電気学会静止器研資, SA-96-33 (1996)
- (5) 大熊・本庄・小林・岩田・徳田・松原・浅野: 「整流器型限流器の動作解析」, 平成9年電気学会全国大会, No.1407 (1997)
- (6) H.J. Boenig and D.A. Paice: "Fault Current Limiter using a Superconducting Coil", *IEEE T. Magnetics*, Vol.MAG-19,

No.3 (1983-3)

- (7) 大熊・本庄・小林・岩田・徳田・松原・浅野:「整流型限流器のフィーデビリティ・スタディ」, 電気学会静止器研資, SA-97-36 (1997)
- (8) T. Ohkuma, S. Honjo, N. Kobayashi, Y. Iwata, N. Tokuda, Y. Matubara, and M. Asano: "Evaluation of a Fault Current Limiter with a Rectifier for 500 kV Power System", *T. IEE Japan*, Vol.119-B, No.4, pp.474-482 (1999-4) (in Japanese)
大熊・本庄・小林・岩田・徳田・松原・浅野:「整流型限流器の500 kV 系統への適用検討」, 電学論 B, **119**, 4, pp.474-482 (1999-4)
- (9) T. Ohkuma, Y. Sato, Y. Iwata, N. Tokuda, Y. Matubara, and M. Asano: "Operating tests with a 6.6 kV-reduction model of Rectifying-Type Fault Current Limiter System", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.6, pp.858-863 (2000-6) (in Japanese)
大熊・佐藤・岩田・徳田・松原・浅野:「整流型限流器小型モデル (6.6 kV 級) の動作検証」, 電学論 B, **120**, 6, pp.858-863 (2000-6)
- (10) N. Tokuda, M. Murai, N. Nagasaki, K. Yuguchi, T. Ohkuma, Y. Sato, and Y. Takahashi: "Development of the 66 kV Fault Current Limiter (FCL) system with Rectifier model", *Proc. of Annual Conf. on Power & Energy Society, IEE Japan*, No.341 (2001) (in Japanese)
徳田・村井・長崎・湯口・大熊・佐藤・高橋:「66 kV 整流型限流器モデルの開発」, 平成 13 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.341 (2001)

徳田 憲昭 (正員) 1957 年 5 月 13 日生。1982 年 3 月金沢大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月日新電機(株)入社。現在, マーケット推進室にて新規事業開拓を中心に事業企画業務に従事。

村井 正樹 (非会員) 1966 年 12 月 24 日生。1989 年 3 月大阪電気通信大学工学部電子物性工学科卒業。同年 4 月日新電機(株)入社。現在, マーケット推進室にて新規事業開拓を中心に事業企画業務に従事。

大熊 武 (正員) 1963 年 4 月 18 日生。1988 年 3 月東京電機大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月東京電力(株)入社。1991 年同社技術研究所。1992-93 年 MIT 客員研究員。現在, 技術開発研究所送変電技術グループにて, 超電導限流器に関する研究に従事。

長崎 則久 (非会員) 1962 年 7 月 16 日生。1988 年京都大学工学部数理工学科中退。1991 年 5 月日新電機(株)入社。現在, エネルギーシステム・ソリューション事業部にて, 主に分散電源の系統連系および電力品質改善に関わる営業技術業務に従事。

佐藤 礼文 (正員) 1966 年 4 月 23 日生。1991 年 3 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月東京電力(株)入社。1996-97 年フランス電力公社研究開発局客員研究員。現在, 同社技術開発研究所知的財産管理グループに所属。博士(工学)。

湯口 恭介 (非会員) 1968 年 10 月 13 日生。1991 年 3 月大阪電気通信大学工学部電子機械工学科を卒業。同年 4 月日新電機(株)入社。現在, エネルギーシステム・ソリューション事業部にて, 主に分散電源の系統連系および電力品質改善に関わる営業技術業務に従事。

高橋 芳久 (正員) 1961 年 3 月 12 日生。1985 年 3 月慶應義塾大学工学研究科卒業。同年 4 月東京電力(株)入社。現在, 同社技術開発研究所送変電技術グループにて, 主として, 高温超電導ケーブルおよび超電導限流器の研究に従事。