

直流高電圧用ブレーカの遮断技術

Interruption technology of breakers for high-voltage direct current

森合 浩 MORIAL Hiroshi

近年、太陽光発電など再生可能エネルギーやデータセンターの普及とともに直流送配電の適用が増えている。富士電機では、市場の要求に対応し、直流回路専用ブレーカの適用範囲を拡大させてきた。今回、太陽光発電設備のパワーコンディショナに使用される直流高電圧（DC750V、DC1,000V）用ブレーカを開発した。遮断シミュレータと遮断試験によるアーク電圧の検証、磁界解析と遮断試験によるアーク駆動の検証によりブレーカの消弧室構造を最適化し、従来品よりも高電圧に対応し高い遮断安定性を獲得した。

Applications for direct current distribution have been increasing with the spread of data centers and renewable energy applications such as photovoltaic power generation. Fuji Electric has been expanding the application scope of its breakers intended for DC circuits in order to meet market demands. This time, it developed breakers for high-voltage direct current (DC 750 V, DC 1000 V) used in the power conditioners of photovoltaic power facilities. By verifying the arc voltage using interruption simulators and interruption testing, and verifying the arc drive through magnetic field analysis and interruption testing, Fuji Electric optimized the structure of the arc-extinguishing chamber and achieved a better level of interruption stability at high voltage than previous products.

1 まえがき

近年、世界的な環境・エネルギー問題に対する意識の高まりと、地球温暖化防止のためのCO₂の大幅な削減に向けて、再生可能エネルギーの一つである太陽光発電が注目されている。富士電機では、2009年に発売したグローバルツインブレーカ「G-TWINシリーズ」において、開閉器を含む直流回路専用ブレーカの適用範囲を市場要求に応じて拡大してきた。産業用太陽光発電設備では、システムの大容量化に伴い、エネルギーの利用効率の改善、コスト低減を目的にシステムの高電圧化が進められている。この高電圧化の要求に応えるため、直流高電圧（DC750V、DC1,000V）用ブレーカを開発した。

本稿では、太陽光発電設備への直流ブレーカの適用例、直流高電圧用ブレーカの主な仕様と特徴、ラインアップおよび要素技術について紹介する。

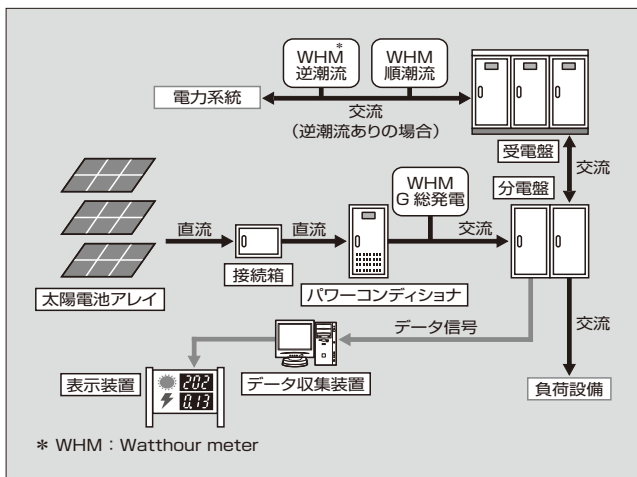


図1 太陽光発電設備の概要

2 太陽光発電設備へのブレーカの適用

図1に、一般的な太陽光発電設備を示す。太陽電池アレイ側から順に、接続箱、パワーコンディショナ（PCS）、分電盤で構成する。それぞれの部分におけるブレーカと開閉器の適用について述べる。

2.1 接続箱

図2に示すように、太陽電池アレイで発電された直流電力を、接続箱（集電箱）に集め、パワーコンディショナに送る。接続箱は、太陽電池アレイが故障したときに波及範囲を極小化することと、保守・点検時に回路を分離して絶

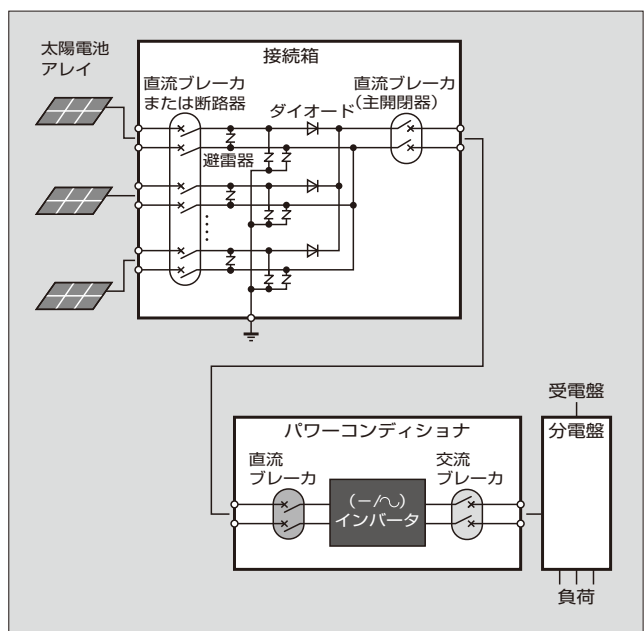


図2 接続箱とパワーコンディショナ

縁することで、作業者の安全を保障するものである。太陽電池の直流電圧の断路、通電電流と短絡電流の遮断能力を持つブレーカや開閉器を使用する。

2.2 パワーコンディショナ

パワーコンディショナは、接続箱から送られてきた直流電力を扱い、インバータにより交流電力に変換する。系統連系型のパワーコンディショナでは接続箱側（入力側）に直流ブレーカ、分電盤側（出力側）に交流ブレーカを使用する。入力側には、IEC 60364-7-712 により、作業者の保守・点検時の安全を確保するために開閉器の設置要求があ

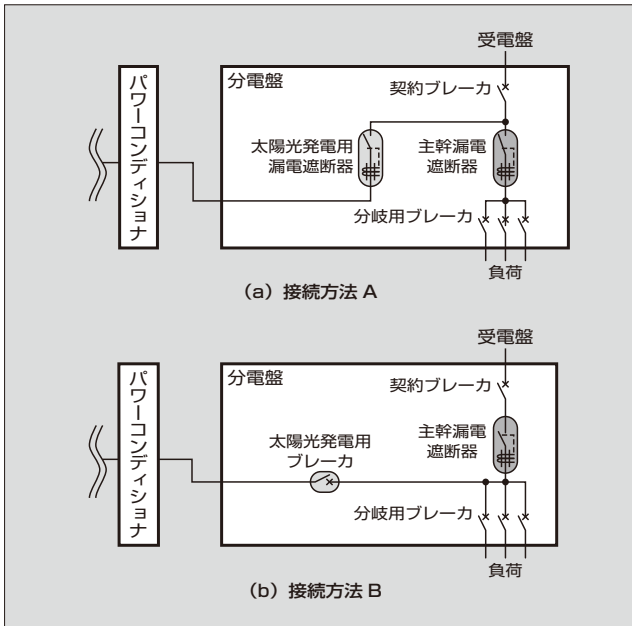


図3 分電盤の接続方法

り、国内では一般的に直流ブレーカを使用している。太陽光発電システムの容量の拡大により、従来よりも高電圧、大電流の直流ブレーカが求められている（DC750V、DC1,000V）。

2.3 分電盤

分電盤は、パワーコンディショナで交流に変換した電力を受け、建物内の各電気負荷に分配する。また、太陽光発電系統と受電盤からの商用電源系統との連系点となる。パワーコンディショナの電力の入力部に設置する太陽光発電用の漏電遮断器は、分電盤の一次側につなぐ接続方法 A（図3(a)）と、負荷側につなぐ接続方法 B（図3(b)）がある。接続方法は、系統連系規定および内線規定により次のように定められている。

(a) 接続方法 A

- 太陽光発電用漏電遮断器：過電流保護装置付漏電遮断器，3P3E または 3P2E 型，逆接続可能型，中性線欠相保護付
- 主幹漏電遮断器：過電流保護装置付漏電遮断器，3P3E 型，中性線欠相保護付

(b) 接続方法 B

- 太陽光発電用ブレーカ：配線用遮断器，3P3E または 3P2E 型，逆接続可能型，中性線欠相保護付
- 主幹漏電遮断器：過電流保護装置付漏電遮断器，3P3E 型，逆接続可能型，中性線欠相保護付

③ 直流高電圧対応ブレーカの仕様と特徴，ラインアップ

(1) 仕様と特徴

表1 ブレーカ，開閉器の仕様

(1) ブレーカ仕様一覧

フレームの大きさ (AF)		400		630		800	
基本形式		BW400RAG		BW630RAG		BW800RAG	
極数		3P	4P	3P	4P	3P	4P
定格絶縁電圧 U_i (DC V)		750	1,000	750	1,000	750	1,000
定格インパルス耐電圧 U_{imp} (kV)		8					
定格電流 (A)		250, 300, 350, 400		500, 600, 630		700, 800	
定格遮断容量 (kA) I_{cu} / I_{cs}	JIS	DC1,000 V	—	5/5	—	5/5	—
	IEC/EN	DC750 V	10/5	10/5	10/5	10/5	10/5
過電流引外し方式		熱動一電磁式					

(2) 開閉器仕様一覧

フレームの大きさ (AF)		400		630		800	
基本形式		BW400RAS		BW630RAS		BW800RAS	
極数		3P	4P	3P	4P	3P	4P
定格絶縁電圧 U_i (DC V)		750	1,000	750	1,000	750	1,000
定格インパルス耐電圧 U_{imp} (kV)		8					
定格電流 (A)		400		630		800	
定格短時間耐電流 I_{cw}		5kA・0.3s		10kA・0.3s		10kA・0.3s	

表 1 に、太陽光発電設備のパワーコンディショナに要求される DC750 V、DC1,000 V のブレーカ、開閉器の仕様を示す。

主な特徴は次のとおりである。

- (a) ブレーカの使用環境を考慮し、標準品で熱帯/寒冷地向けの仕様とした。
- (b) 基本構造を、G-TWIN 400 AF、630 AF、800 AF と同一とし、オプション（補助スイッチ、警報スイッチ、電圧引外し装置、不足電圧引外し装置など）を共用可能とした。
- (c) 国内・海外規格 [JIS, IEC, EN (CE マーキング)] に対応した。
- (d) TN-S 接地方式と IT 接地（非接地）方式に対応した DC750 V 用、DC1,000 V 用の 4 種類をシリーズ化した（図 4）。

(2) ラインアップ

富士電機では、開閉器の 30 ～ 800 AF のシリーズ化、適用電圧の高電圧化や盤の小型化に貢献する太陽光発電設

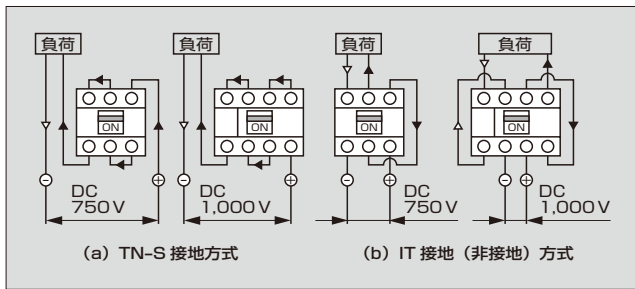


図 4 接地方式と接続

表 2 ブレーカ・開閉器機種一覧

(1) ブレーカ機種一覧 (DC250 ～ 1,000 V)

定格電圧 DC (V)	接続 方式	定格電流 (A)																		遮断容量 I_{cu} (kA)
		5	10	15	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	300	350	400	500	600	
250	2極	BW32 □ AG-BW800 □ AG C2																		2.5 ～ 40
400	3極	BW32 □ AG-BW100 □ AG C4																		2.5 ～ 5
500	3極	BW50SAG, BW100EAG (-02015, -02025), BW125 □ AG-BW800 □ AG C5																		6 ～ 40
600	4極	BW125RAG C6 ～ BW800 □ AG C6																		25 ～ 40
750*	3極	BW400RAG ～ BW800RAG C8, D8																		10
1,000*	4極	BW400RAG ～ BW800RAG C9, D9																		5

*: 拡大した範囲

(2) 開閉器機種一覧 (DC250 ～ 1,000 V)

定格電圧 DC (V)	接続 方式	定格電流 (A)										遮断容量 I_{cu} (kA)
		30	40	50	63	100	125	250	400	630	800	
250	2極	BW32 □ AS ～ BW800 □ AS										-
400	3極	BW32 □ AS ～ BW100 □ AS C4										-
500	3極	BW50SAS		BW100EAS		BW125 □ AS ～ BW800 □ AS C5						-
600	4極	BW125RAS ～ BW800RAS C6										-
650	3極	BW50SAS										-
750*	3極	BW400RAS ～ BW800RAS C8, D8										-
1,000*	4極	BW400RAS ～ BW800RAS C9, D9										-

*: 拡大した範囲

備用 DC650 V 対応小型開閉器、並列通電ブレーカなどラインアップを拡充し、要求に随時対応してきた。

今回の開発によりパワーコンディショナで要求される DC750 V、DC1,000 V 直流ブレーカの機種拡充を行った。これにより適用できるブレーカの範囲は、表 2 に示すように拡大した。

4 要素技術

4.1 直流遮断技術

短絡事故が起きてブレーカに短絡電流が流れると、内部の電流検知装置がブレーカの開閉機構を動作させて、可動子が開極し、可動接点、固定接点間に電流遮断アークが発生する。アークを消弧グリッドへ駆動することによって、可動接点、固定接点間のアーク電圧を上げて、回路インピーダンスを瞬時に増加させて短絡電流を遮断する。

一般に交流回路では電流ゼロ点が周期的に存在し、ゼロ点において内部の絶縁が確保できていれば電流を遮断することが可能であるが、直流回路では前述のゼロ点が存在しない。そのため、直流回路に使用するブレーカでは接点間に発生するアーク電圧を電源電圧以上に上げることで電流を遮断する（ゼロ点を作る）技術が必要となる（図 5）。

4.2 アーク電圧の検証

アーク電圧を決める主な因子は、可動子の開極スピード、開極距離、アブレーション効果、グリッド枚数、アーク駆動力である。経済性と遮断性能の両立のため、開極機構を既存構造の流用とし、グリッド枚数の最適化とアー

ク駆動力の向上を狙いとした。これまでの直流ブレーカにおいて、定格電圧の最大値は、3極品でDC500V、4極品でDC600Vであり、単純計算すると1極のアーク電圧は、約170V以上の性能を持っている。しかし、3極品でDC750V、4極品でDC1,000Vの遮断性能を満足するためには、1極250V以上のアーク電圧が必要となる。

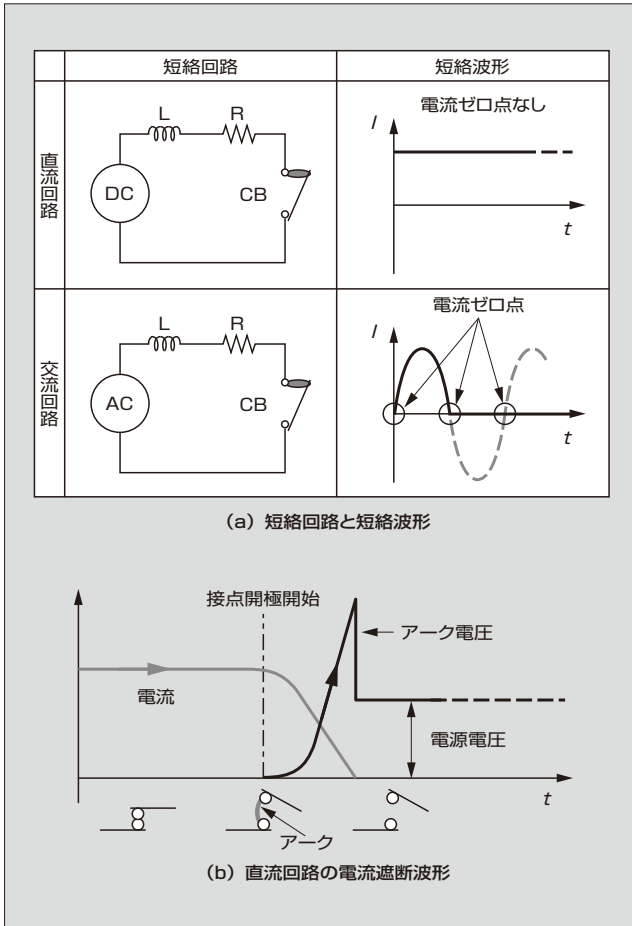


図5 電流遮断とアーク電圧

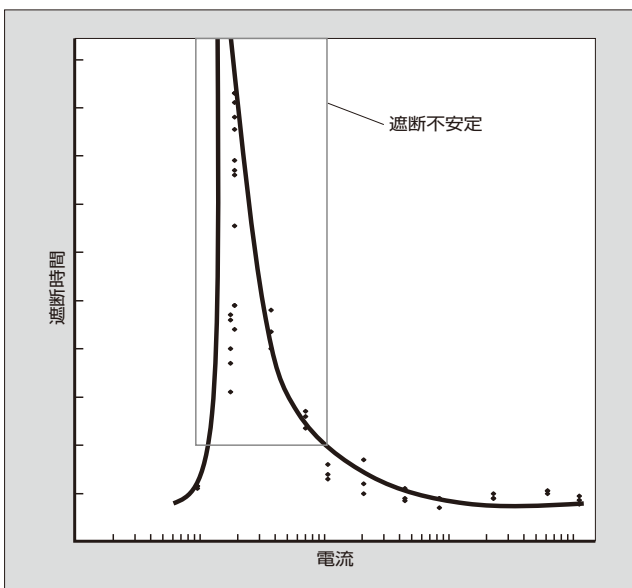


図6 GT800AF DC500V/2 直遮断結果

直流ブレーカの1極のアーク電圧の実力値について、遮断シミュレータによるアーク電圧の検討を実施した。解析結果では、アーク電圧は1,000V近傍の値を得る結果となったが、1極250V以上のアーク電圧には達していないため、消弧グリッドの枚数を増やすとともに、限られた開極距離の範囲で効率的にグリッドへアークを誘導できるような配置と形状を最適化した。実機での遮断試験の結果、短絡電流領域は遮断できるが、100A以下の小電流領域においてアークが消弧室グリッドへ駆動せず遮断が不安定な部分があるため、小電流領域においても安定した遮断性能を得られるように改善した(図6)。

遮断シミュレータによる検討結果は次のとおりである。

○解析条件：DC1,000V/20A 時定数2ms

○解析モデル：BW800RAG-4P

(消弧グリッド10枚)

○解析結果：アーク電圧 241V/1極、

964V/4極 <1,000V

4.3 小電流領域のアーク駆動

従来ブレーカの消弧グリッド、可動子、可動接点、固定接点の構造と接点間アークの関係を図7(a)に示す。

一般的にアークの駆動力は、ローレンツ力により、電流が大きくなるほど駆動力も大きくなる。小電流領域ではアーク駆動力が不足して消弧グリッドへアークを誘導できず、アーク電圧が上がらないことが、遮断が不安定となる主因である。

富士電機は、直流電流を遮断するさまざまな要素技術を持っている。その中で直流ブレーカの本体内部に永久磁石

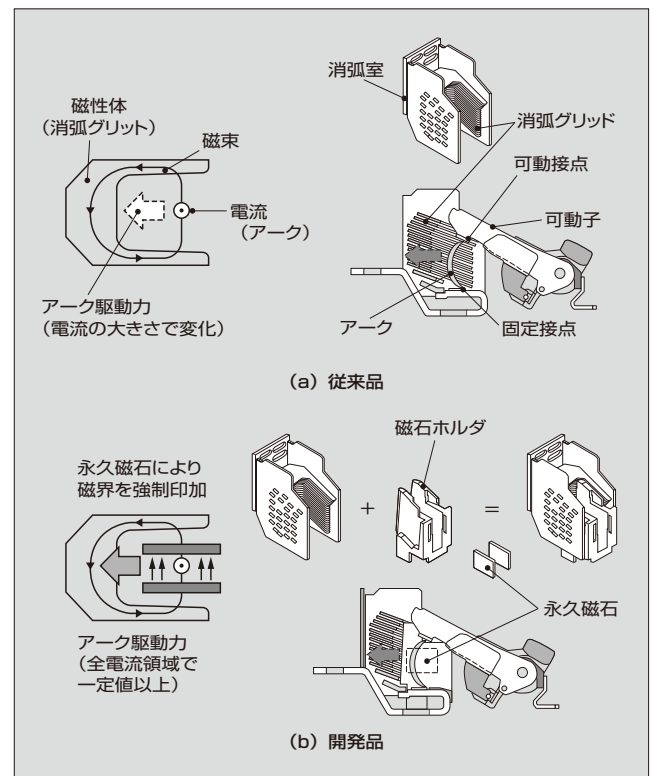


図7 ブレーカの基本構造

を搭載する方式を基本構造として採用した。

従来の消弧室に、永久磁石で磁界を強制印加してアーク駆動力を得る機能を追加し、さらに、アーク電圧を高めるため消弧グリッドの枚数を従来品 10 枚から 12 枚に増やした構造である (図 7 (b))。これを基本構造として、磁束密度やグリッド形状、永久磁石など部品の位置関係をパラメータとして最適化を追求した。

4.4 磁界解析

消弧グリッド、永久磁石、可動子、可動接点、固定接点、アークを三次元モデル化して、磁界解析により磁束密度のベクトル図およびアークに働く駆動力 (ローレンツ力) を算出した。解析結果により消弧室構造を決定し、遮断試験評価にて効果を確認した。さらに、実際に遮断試験を行ったブレーカを分解して、消弧グリッドや可動接点、固定接点の消耗具合とアーク痕を確認し、解析用の三次元モデルに形状、位置関係をフィードバックして解析結果と遮断試

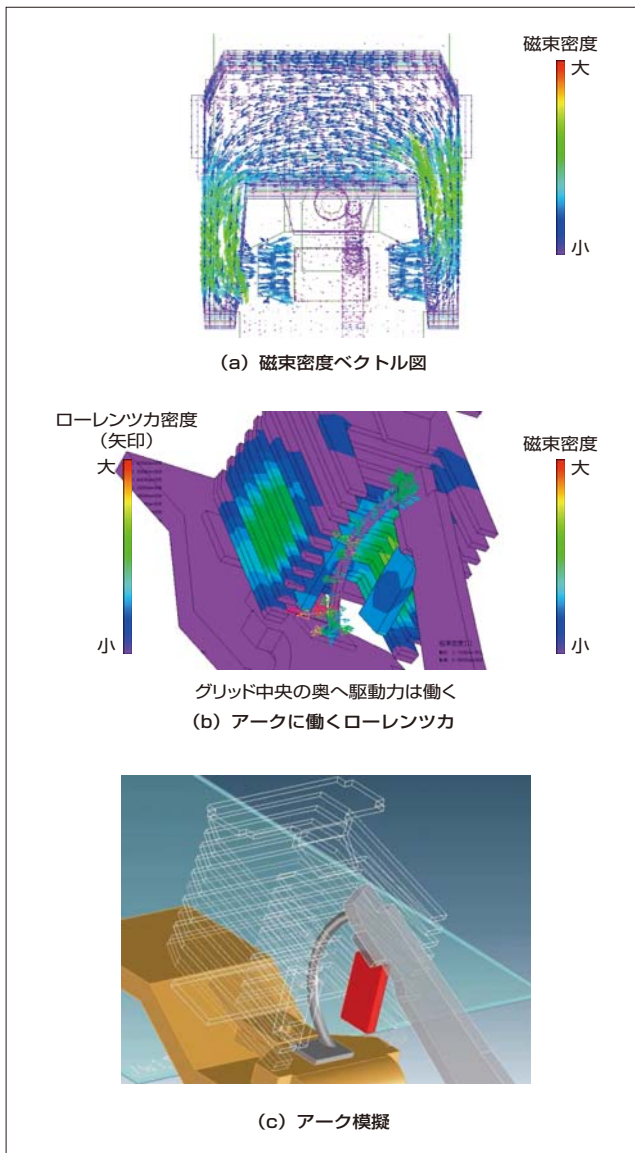


図 8 磁束密度とローレンツ力の解析

験結果の整合を図りながら構造の最適化を行った (図 8)。

図 9 に、遮断試験後の消弧室状況を示す。アーク痕を観察することにより、実際のアーク径やアークの経路が推定できる。最終構造では、磁界解析結果と遮断試験結果により永久磁石を搭載した磁石ホルダおよび消弧グリッドと可動子、可動接点開極後の距離を最適化した。

4.5 遮断性能検証結果

消弧室構造への永久磁石追加と消弧グリッド枚数の追加により、従来、遮断が不安定であった小電流領域においても安定した遮断性能を満足し、数 A ~ 10 kA の広範囲において遮断が可能となり、開閉安全性を確保した (図 10)。

永久磁石の追加により、小電流領域においても消弧グリッドにアークを誘導するアーク駆動力が得られる結果となった (図 11)。

また、消弧グリッドの枚数を 2 枚増やした効果として、遮断開始から遮断完了するまで安定したアーク電圧を維持することができるようになり、1 極 250 V 以上、4 極で 1,000 V 以上のアーク電圧を達成した。これにより、従来品で不安定要因であった遮断安定性が達成できた。

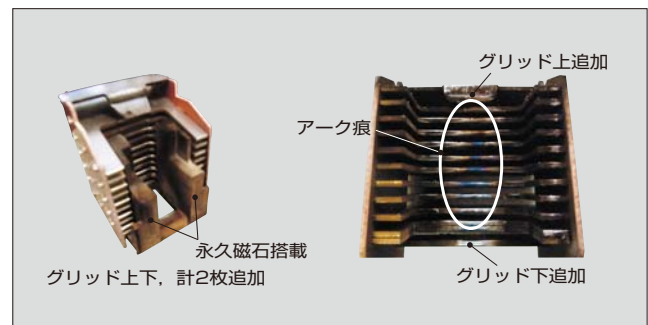


図 9 遮断試験後の消弧室状況

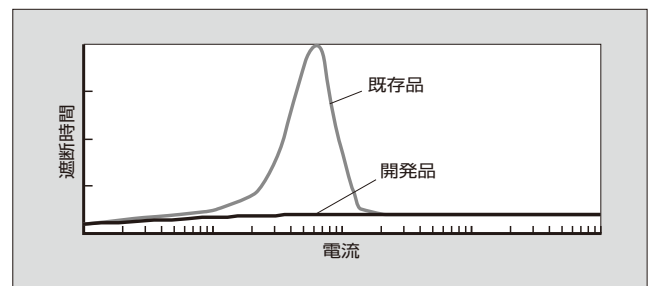


図 10 全領域遮断の結果

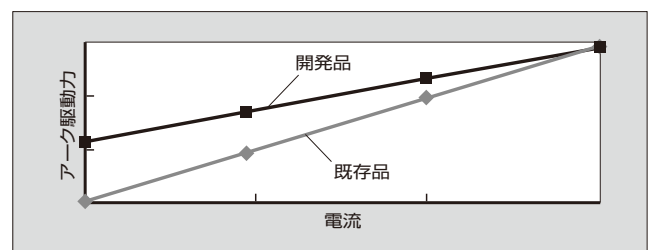


図 11 永久磁石追加の効果

5 あとがき

本稿では、今後導入が期待されている大容量太陽光発電設備（メガソーラー）に設置可能な直流高電圧用ブレーカの遮断技術について述べた。

今後は、国内外の新エネルギー発電関連設備やグリーンデータセンター関連設備など、直流配電設備の給電信頼性や安全性に対する要求が強まることが予想される。さらなる高電圧化への製品技術対応や海外規格認証取得など、市場やお客さまのニーズを的確に捉え、研究・開発を進めていく所存である。

参考文献

- (1) 岡本泰道ほか. グローバルツインブレーカ「G-TWINシリーズ」の新技术. 富士時報. 2010, vol.83, no.2, p.161-166.



森合 浩

低圧遮断器の開発・設計に従事。現在、富士電機機器制御株式会社技術・開発本部開発部アシスタントマネージャー。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。