

一般論文

半導体直流遮断器の開発

Development of DC Solid-State Circuit Breaker

麻 植 実 豊 田 玄 紀
M. Oe G. Toyoda
蓑 輪 義 文 高 野 知 宏
Y. Minowa T. Takano

概要

持続可能な社会の実現に向けた取組みとして再生可能エネルギーが積極的に活用され始めてきた。近年、太陽光発電が急速に普及し、そこから得られる直流をより効率的に活用するため、直流を交流に電力変換することなく直流のまま利用する直流配電システムが実証・検証されている。当社では直流配電システム内で発生する短絡事故保護を目的とした半導体式遮断器を開発したので紹介する。

Synopsis

Renewable energy has begun to be actively used as an effort to realize a sustainable society. In recent years, photovoltaics power generation has spread rapidly, and in order to use the direct current (DC) obtained therefrom more efficiently, DC distribution systems that use DC without converting the DC into alternating current (AC) has been verified. We introduce a solid-state circuit breaker that aims to protect against short-circuit accidents that occur in DC distribution systems.

1. はじめに

世界的な環境意識の高まりや自然災害による長時間停電の懸念から再生可能エネルギーやEV、リチウム電池の本格的な導入が進んでいる。それらの直流出力をそのまま利用するDCマイクログリッド構築が期待されている。

当社ではこれまで太陽光用・蓄電池用パワーコンディショナを販売しているが、更なる低炭素化を実現するため、直流を交流に電力変換することなく、直流のまま運用するための直流用機器類の開発を進めている。直流を扱う際の大きな課題は、短絡・地絡事故発生時に動作する遮断器内電極の直流アークによる破損や劣化である。そこで、当社では事故電流の立ち上がりで高速遮断できる半導体直流遮断器（以下、DCCB）の開発を行った。

本DCCBでは、電流遮断時に端子間に過電圧が発生するという課題をアクティブクランプで解決している。

本稿ではDCCBの機能・特徴を紹介する。

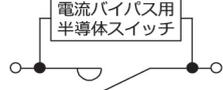
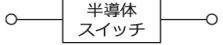
2. 直流遮断器の方式

表1に現在市販されている機械式遮断器、および開発事例が報告されているハイブリッド方式、および半導体方式の遮断器の特徴を示す⁽¹⁾⁽²⁾。

機械式遮断器は一般的に広く利用されており、機械接点を開放することで、アークが発生する。このアークを磁界などの作用空間にて引き伸ばすことで、事故時の短絡電流を限流させ遮断する。また、非直線抵抗に電流を転流させることによって、遮断する方式もある⁽³⁾。

ハイブリッド式遮断器は主に機械接点と半導体スイッチで構成され、事故時の短絡電流を機械接点から半導体スイッチに転流させて機械接点の電流をゼロにした後に、機械接点を開放することでアークによる機械接点の損傷を防ぐことを可能としている。

表1 直流遮断器の種類と方式

方式	機械式	ハイブリッド式	半導体式
回路構成			
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・導通損失が小さい ・短絡電流の開閉回数少ない 	<ul style="list-style-type: none"> ・アークレスで電流遮断可能 ・導通損失が小さい 	<ul style="list-style-type: none"> ・高速な電流遮断 ・半導体の導通損失が大きい
遮断時間	数ms~100ms程度	数ms程度	数ms以下
主な用途	<ul style="list-style-type: none"> ・電鉄 ・一般産業及び電力 	<ul style="list-style-type: none"> ・洋上直流送電 	<ul style="list-style-type: none"> ・一般産業向け ・船舶などの特殊工業品向け

半導体式遮断器は機械式遮断器に対し半導体スイッチで高速に事故電流を遮断できることから、以前より製品化が期待されている。今回開発したDCCBは半導体式遮断器に相当する。

3. DCCBの仕様と特徴

図1に内部回路構成を記す。表2に750V回路用DCCBと1500V回路用DCCBの仕様、図2に750V回路用DCCBの動作特性曲線を示す。DCCBの特徴を以下に記す。

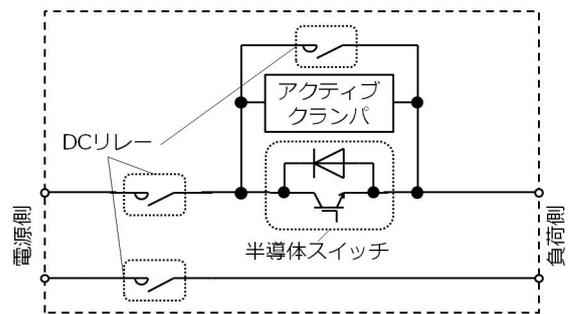


図1 DCCB回路構成図

3. 1 インテリジェントな遮断制御

DCCBは半導体スイッチのオン/オフ操作により通過電流を高速に遮断できることが特徴である。一般的に遮断器には事故電流保護・過負荷保護の両立が求められるため、DCCBは過度な導通損失によるデバイスの発熱を防止し、デバイスの定格電圧・定格電流及び安全動作領域（以下、SOA）などのデバイス性能範囲内で動作させる必要がある。そこで、これらを解決するために当社ではCPUと高速ロジックICにより通電電流量を監視し、電流量に応じて遮断する時間を柔軟に変化させ、デバイス性能範囲を超えないような制御を行っている。今回開発した動作特性曲線を図2に示す。定格電流（100%）以上の電流が流入した場合でも、即遮断することなくある程度の時限を持たせて遮断するようにしている。

表2 開発仕様

項目	仕様	
	750V	1500V
定格電圧	750V	1500V
定格電流	135A	
定格遮断容量	2kA	
遮断時間	2ms以内	
遮断方向	片方向 (通電は双方向)	
極数	2	

3. 2 アクティブクランプによるサージ吸収機能

半導体遮断器のように短絡電流の遮断を高速に行うと、配線のインダクタンス成分がもつ逆起電力によりサージ電圧が発生する。サージのエネルギーは配線が長くなると大きくなり、市販のサージアブゾーバやスナバではそのエネルギーを消費しきれない懸念がある。当社では半導体スイッチの端子間に発生する過電圧が一定電圧以上に上昇しないよう抑制するアクティブクランプ回路を開発し、DCCBに適用した。

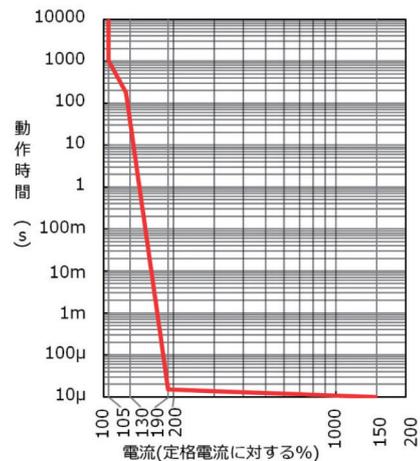


図2 動作特性曲線



W290×D200×H300(mm)

図3 750V回路用DCCB外観

図3に今回開発した750V回路用DCCBの外観図を示す。冷却方式は強制風冷である。

4. DCCBの基本動作と動作波形

DCCBによる事故電流遮断シーケンスを図4に示す。DCCB内蔵の電流センサーで事故電流を検出した場合、半導体スイッチをオフにすることで、事故電流を遮断する。この時、配線のインダクタンス成分により半導体スイッチにサージ電圧が印可されるが、アクティブクランパによりサージ電圧を吸収し、あらかじめ定められた過電圧上限値を超えないように抑制する。図4の区間①がアクティブクランパが過電圧抑制動作を行っている期間である。半導体スイッチが電流を遮断すると同時に、同スイッチの両端には過電圧が印加されるが、事故電流はアクティブクランパ回路にバイパスされ（区間①中のアクティブクランパ電流 i_b ）、同回路内抵抗で消費される。完全に電流がゼロまで抑制されることを確認し、DCCB内蔵DCリレーを開放し（区間②）遮断動作を完了する。

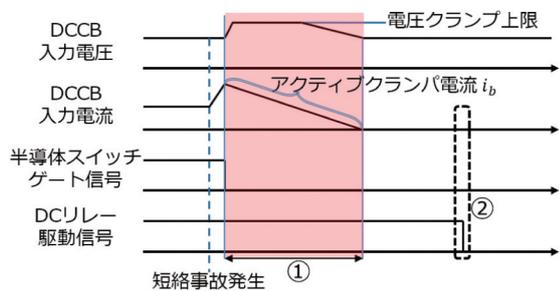


図4 DCCB遮断シーケンス

アクティブクランパの構成図を図5に示す。アクティブクランパは半導体スイッチ両端に並列接続される。回路は、複数のエネルギー消費用抵抗と、それら

の抵抗に事故電流を選択流通させるための半導体の高速スイッチにより構成される。

今回の開発では配線長1kmまでの距離で利用されることを前提に部品を選定した。配線長1kmで事故電流通過時の配線インダクタンスによるエネルギーを計算し、サージエネルギーを2ms以下で吸収できるようにしている。配線長と配線インダクタンスの関係は日本電線工業会の2芯一括電線の定数をもとに計算している⁽⁴⁾。

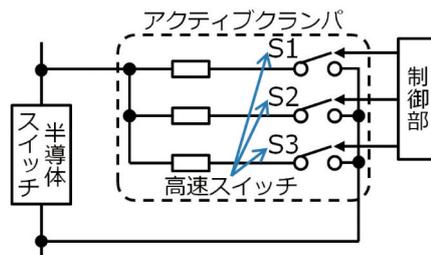


図5 アクティブクランパ構成図

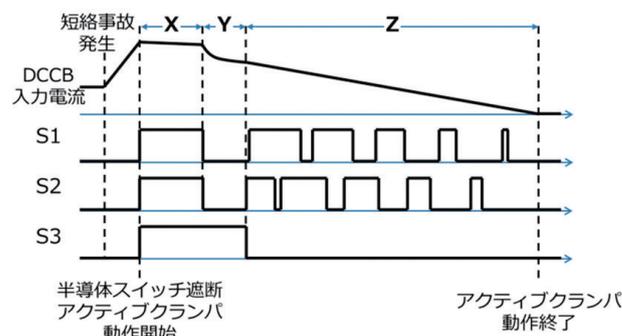


図6 アクティブクランパ動作

次に、アクティブクランパの各高速スイッチの動作を図6に示す。アクティブクランパは半導体スイッチが遮断されると同時に動作し、サージエネルギーは複数並列にした高速スイッチ（図5 S1～S3）の動作によって抵抗で消費される。高速スイッチは通過電流と温度上昇をSOA範囲内で動作させることができるようにした。

図6のアクティブクランパ動作を以下に説明する。

- 期間X：半導体スイッチ両端への急激な過電圧サージが発生してもアクティブクランパによってエネルギーを吸収できるようにS1～S3をすべてオンにする。
- 期間Y：アクティブクランパで吸収しているエネルギーの低下を通過電流の傾きから検出し、S1,S2をオフにし、S1,S2の温度上昇を防ぐ。
- 期間Z：サージエネルギーが十分に低減したのち、S3をオフ、S1,S2を相補的なオン/オフ動作に切替

え、半導体スイッチの両端電圧が所定の値を超えないように注意しながら、アクティブクランパ電流 i_b が0になるまでサージエネルギーを吸収する。

図7に試験回路、図8にその動作波形を示す。ここでは、電磁開閉器Ryを投入しパルス電流を発生させ、電流が定格の135Aに到達次第、遮断するようにDCCBの保護遮断設定をしている。DCCB出力電圧が一時的に負性値となっているのは誘導性負荷を接続しているためである。アクティブクランパはDCCB入力段の配線インダクタンス成分が小さく、サージエネルギーが小さいため、図6中の期間Zの動作のみとなっている。

これにより、DCCBの定格通電における遮断動作が確認できた。

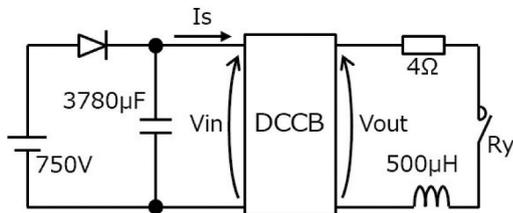


図7 試験回路

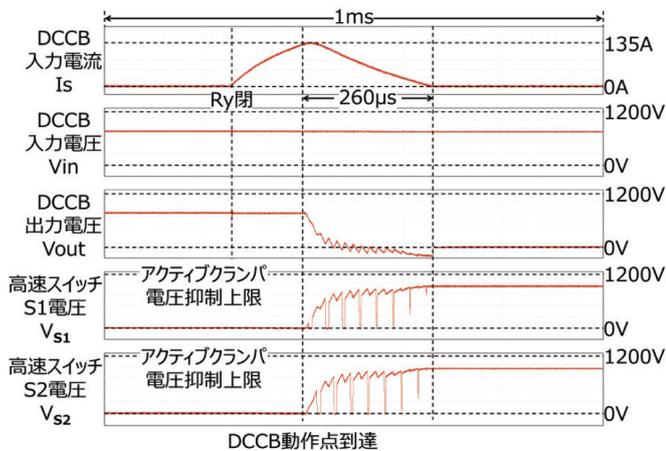


図8 動作波形

次に、アクティブクランパのクランプ能力の確認試験を行う。図9に試験回路、図10にその動作波形を示す。ここでもDCCBの保護遮断設定を135Aとしている。入力端にリアクトルを接続し、サージエネルギーを増やしている。図中Ryを閉としたときに一時的に入力側リアクトルに750Vが印加されるため、DCCB入力電圧が一時的に0Vとなる。その後、DCCBへの入力電圧が上昇し、電流が増加する。そして、DCCBの保護遮断設定値に電流量が到達したときにDCCBが遮断する。この時に入力電圧が急上昇するが、アクティブクランパにより入力電圧を1200V以下に抑制できていることがわかる。

両試験での遮断時間は300µs未満であり、開発仕様(2ms)を満たしている。

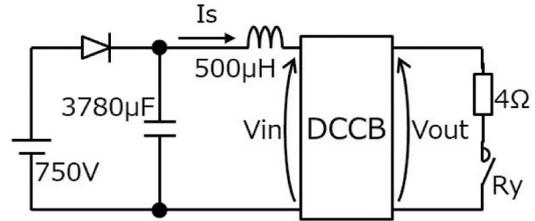


図9 試験回路

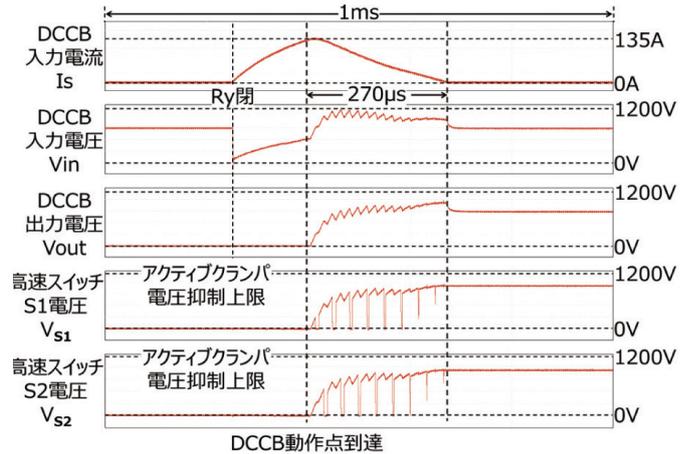


図10 動作波形

5. 解析技術紹介

当社は、試作器完成後に電圧電流の測定試験や、内部温度の各点計測を行うのではなく、シミュレータによる各種解析により効率的な開発設計を進めている。

試作器の構造設計に反映させるため熱流体解析を行った例を図11に紹介する。DCCBの冷却方式は強制風冷で、DCCBの下部より吸気し、上部より排気する構造となっている。解析結果より吸気した気流がスムーズに排気できる部材レイアウトを実現することができた。

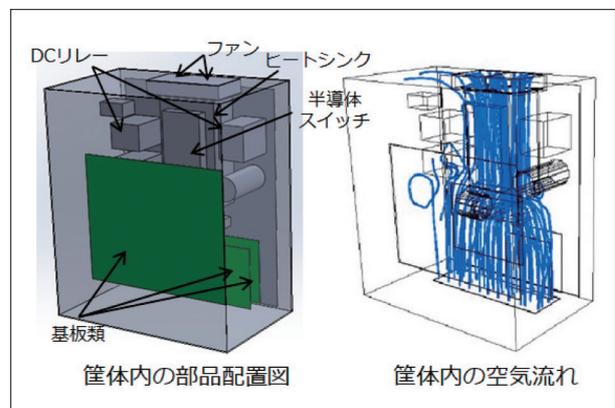


図11 流体解析一例

6. おわりに

直流配電システムの主要コンポーネントであるDCCBを開発した。

本稿ではその特徴と遮断メカニズムの説明を行ったが、引き続き耐久性の向上や高耐圧大電流化を進め、ラインナップを増やしていく予定である。

参考文献

- (1) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：「洋上風力向け直流送電システムの基礎検討」、NEDO、pp.89-99(2014)
- (2) 松本、飯尾：「大容量直流遮断器(DCCB)」、電気学会誌、137巻11号、pp.757-760(2017)
- (3) 金子：「真空遮断器を用いた直流遮断の技術変遷」、電気学会誌、138巻6号、pp.361-364(2018)
- (4) 日本電線工業会技術資料 技資第103号A

執筆者紹介



麻植 実 Minoru Oe
研究開発本部
技術開発推進センター



豊田 玄紀 Genki Toyoda
研究開発本部
技術開発推進センター



蓑輪 義文 Yoshifumi Minowa
研究開発本部
技術開発推進センター
主任



高野 知宏 Tomohiro Takano
研究開発本部
技術開発推進センター
主幹