

高電圧直流送電向け直流遮断器

常世田 翔* 藤田大輔*
 稲垣卓志*
 亀井健次*

DC Circuit Breaker for High Voltage DC Systems

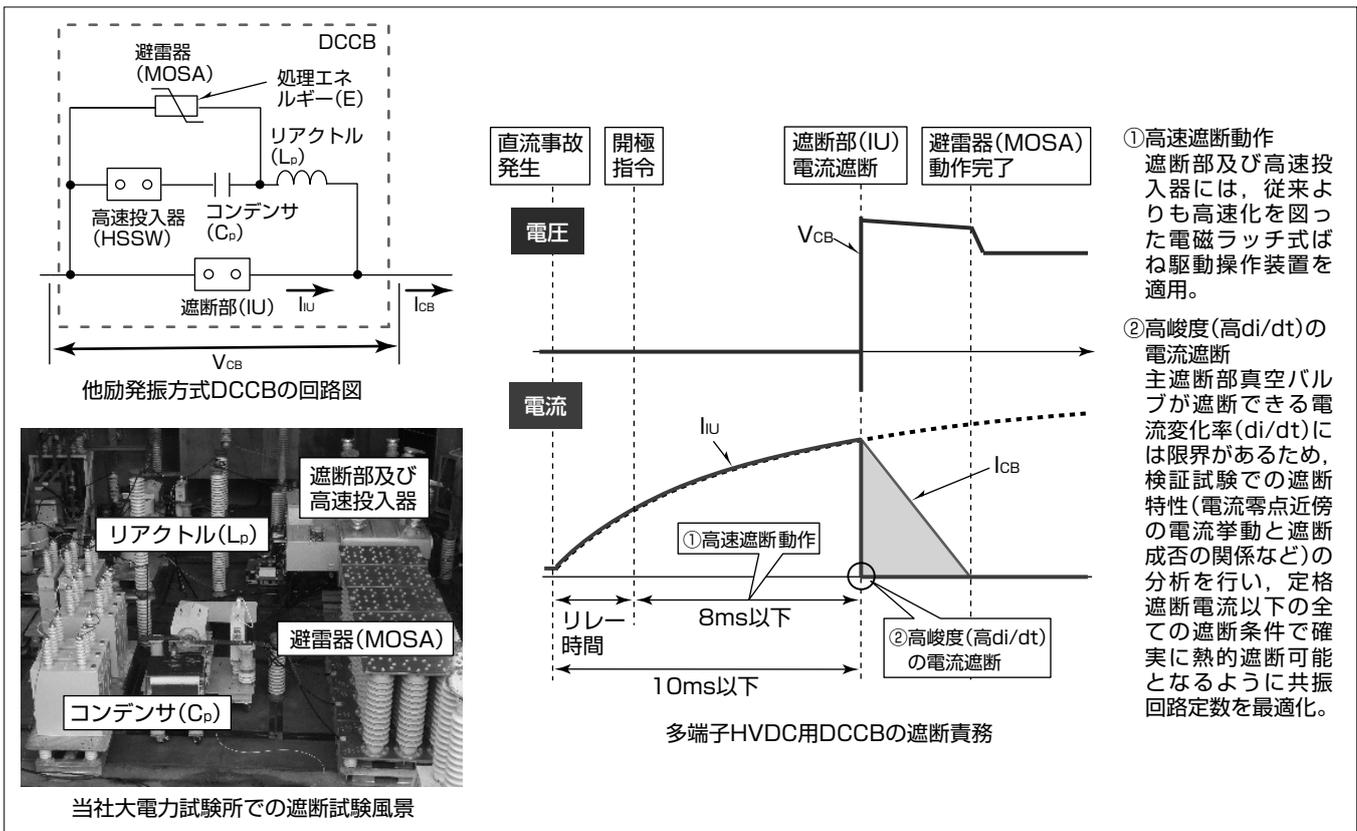
Sho Tokoyoda, Takashi Inagaki, Kenji Kamei, Daisuke Fujita

要 旨

複数の変換所とDC送電線路から構成される多端子送電が現在主に欧州や中国で計画されている。多端子高電圧直流(High Voltage DC : HVDC)送電の場合、健全回線への事故の波及を防ぐために、各変換所の送電端に直流遮断器(DCCB(DC Circuit Breakers))を設置して、事故電流を除去する必要がある。この多端子HVDC系統に適用されるDCCBの遮断責務は、CIGRE(国際大電力システム会議)などで多端子HVDC系統モデルを用いた解析検討と調査が行われ、地絡・短絡事故が発生すると、事故発生から約10ms後に、10kA以上の事故電流が流れることが分かっている。このとき、事故によるDC電圧低下が継続す

ると、多端子HVDC系統を構成する隣接変換所の変換器も停止に至る広域停電の可能性があることから、DCCBには事故電流を10ms以内に除去する高速遮断が要求される。また、DC事故電流は、AC事故電流と異なり、自然電流零点が存在しないことから、これを高速遮断するためには、速やかに電流零点を形成する必要がある。

三菱電機は、これらの要求仕様を満たす他励発振方式(高周波逆極性電流重畳による電流零点形成法)機械式DCCBの80kVクラスのプロトタイプ供試器を開発し、当社大電力試験所での直流遮断試験を実施した。



80kVクラス他励発振方式の機械式DCCBのプロトタイプ供試器

多端子HVDC用DCCBに要求される主な仕様として、①高速遮断動作と②高峻度(しゅんど)(高di/dt)の電流遮断が挙げられる。①については、当社独自技術である電磁ラッチ式ばね駆動操作装置を高速化改良して適用することで実現した。②については、遮断試験で遮断部(真空バルブ)の遮断特性を把握し、これに基づいて共振回路定数を最適化することによって、定格遮断電流以下の全ての遮断条件での遮断を可能にした。

1. ま え が き

各国で導入が増加している高電圧直流(HVDC)送電は、二地点のAC/DC変換所間を架空送電線又はケーブルで接続した二端子送電がこれまでの主流であったが、再生可能エネルギー(太陽光、洋上風力)による分散電源を統合する、多国間連系を視野に入れた、複数の変換所とDC送電線路から構成される多端子送電が現在主に欧州や中国で計画されている。二端子HVDC送電の場合、DC線路事故を変換所に接続される交流遮断器(ACCB)を遮断することで事故除去が可能であるが、多端子HVDC送電の場合、健全回線への事故の波及を防ぐために、各変換所の送電端に直流遮断器(DCCB)を設置して、事故電流を除去する必要がある(図1)。

多端子HVDCシステムに適用されるDCCBの遮断責務については、CIGRE(国際大電力システム会議)などによる多端子HVDCシステムモデルを用いた解析検討と調査が行われてきた⁽¹⁾⁽²⁾。その結果、自励式HVDC送電で、地絡・短絡事故が発生すると、事故発生から約10ms後に、10kA以上の事故電流が流れることが分かっている。このとき、AC/DC変換器の高速応動(電圧、電流変化に対して敏感

に反応)に起因して、事故によるDC電圧低下が継続すると、多端子HVDCシステムを構成する隣接変換所の変換器も停止に至る広域停電の可能性があることから、DCCBには事故電流を10ms以内に除去する高速遮断が要求される(84kVクラスの交流VCB(Vacuum Circuit Breaker)、GCB(Gas Circuit Breaker)の場合、定格遮断時間50ms程度)。また、DC事故電流は、AC事故電流と異なり、自然電流零点が存在しないことから、これを高速遮断するためには、速やかに電流零点を発生する手段が必要となる(図2)。

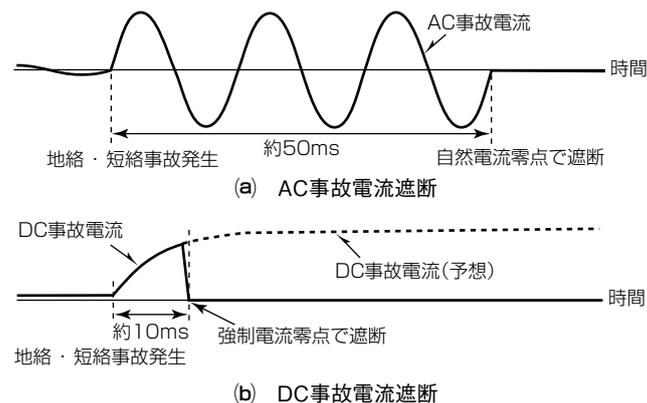


図2. AC遮断とDC遮断の違い

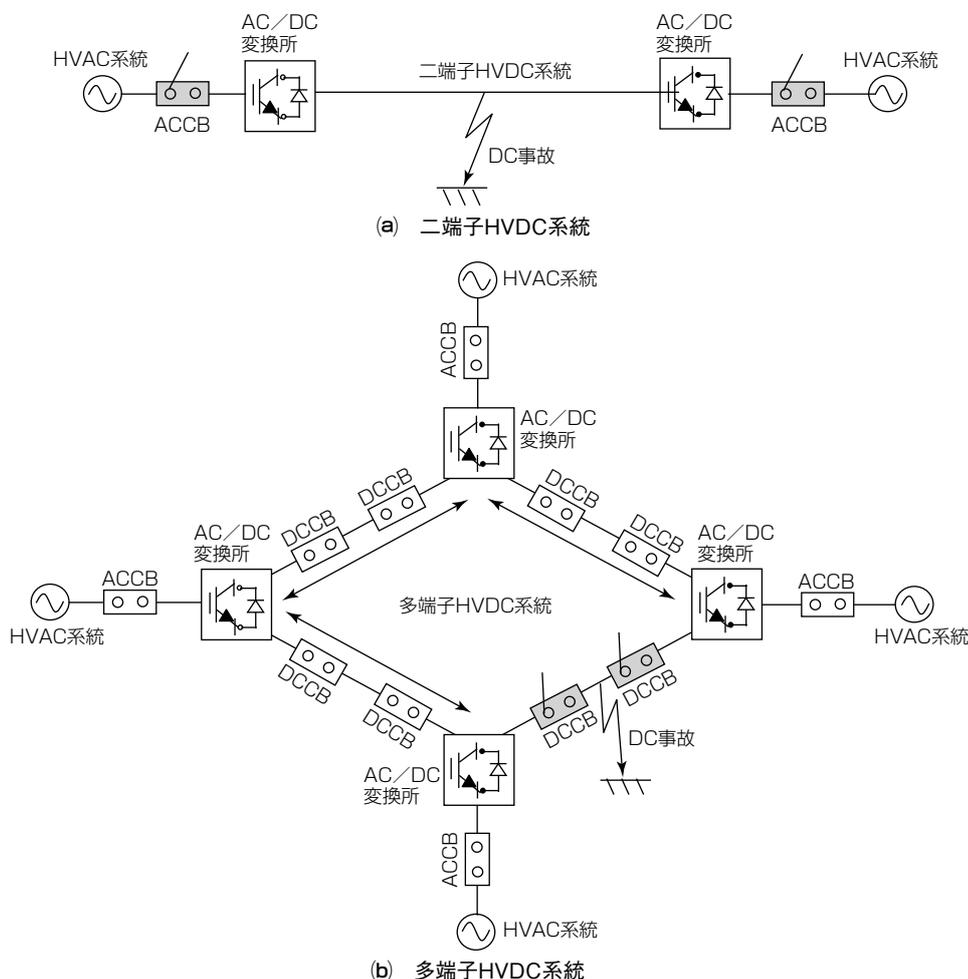


図1. 二端子及び多端子HVDCシステムのイメージ

これらの背景から当社は、事故発生から10ms以内で10kA以上の事故電流の高速遮断が可能であり、さらに低損失・低コストの長所を持つ、他励発振方式(高周波逆極性電流重畳による電流零点形成法)の機械式DCCBを開発した。

本稿では、そのDC 80kVクラスのプロトタイプ供試器の開発及び当社大電力試験所での直流遮断試験について述べる。

2. 他励発振方式の機械式DCCBの遮断原理と遮断責務

2.1 遮断原理

交流遮断は周期的に現れる自然電流零点で電流遮断できるが、直流では自然零点が存在しないため、何らかの方法で強制的に電流零点を形成して遮断する必要がある。例えば、低電圧クラスではアーク限流方式や、国内の二端子HVDC送電システムでの帰線用直流遮断器(MRTB)のような自励振動方式が実用化されている⁽³⁾。しかしながら、これらの直流遮断方式は、いずれも10ms以内での事故電流遮断が困難であり、今回適用を想定する多端子HVDCシステムの要求仕様である高速遮断を満たすことができない。また、いずれの方式も遮断原理上、高電圧化に限界がある。そこで、これらの要求仕様に対応可能な、他励発振方式の機械式DCCBを開発した。図3の破線内にその回路構成を示す。この遮断方式は外部電源又は系統電圧で充電されたコンデンサ(Cp)とリアクトル(Lp)からなる共振回路が遮断部と並列に接続される。これを高速投入器によって放電して主遮断部に流れる直流電流に逆極性の高周波電流を重畳することによって、強制的に零点を形成して遮断するものである(図4)。遮断部は高峻度(高di/dt)の電流遮断能力に優れた真空バルブを適用する。

2.2 遮断責務

多端子HVDCシステムでの事故電流遮断過程では、主に次の三つのストレスがDCCBに課せられることが解析検討結果から明らかになっている。

- (1) 遮断部に流れる事故電流(I_{IU})
- (2) 遮断部電流遮断後のDCCB極間電圧(V_{CB})
- (3) MOSAの処理エネルギー(E)

ここで(3)は、DC電流遮断時にシステムのインダクタンスに残留する電磁エネルギー(1/2・L・I²)に起因してDCCB極間に発生する過電圧を避雷器(MOSA)が抑制する際にMOSAが吸収するエネルギーである。

現在、高電圧DCCBの規格は国内外共に存在しないが、これまでのCIGRE及び当社での遮断責務の調査検討結果を参考にし、今回開発を行った80kVクラスのDCCBの仕様として、開極指令入力から主遮断部が電流遮断完了までの遮断器動作時間(Breaker operation time)を8ms以下(リレー時間を2msと仮定)、I_{IU}の最大を16kA、V_{CB}

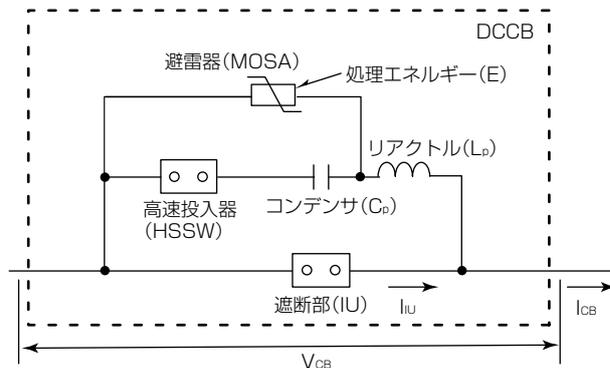


図3. 他励発振方式DCCBの回路図

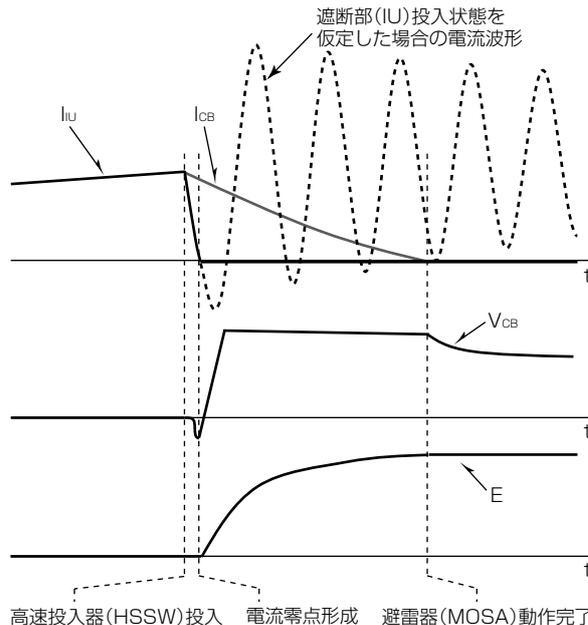


図4. 他励発振方式DCCBの遮断原理

の波高値を120kV(系統電圧の1.5倍と仮定)、MOSAの最大処理エネルギーを6MJ連続2回と仮定し、プロトタイプ供試器の設計と検証試験を行った。

3. プロトタイプDCCB

3.1 操作装置の高速化

2.2節で述べた遮断器動作時間(Breaker operation time)の仕様8ms以下を達成するため、主遮断部及び高速投入器の駆動操作装置には、従来よりも高速化を図った電磁ラッチ式ばね駆動操作装置を適用した。この操作装置の動作特性は、各種電流遮断条件での電流遮断後の絶縁回復特性の推定値、遮断成功に必要な極間距離、及びアーク時間に基づいて設定された。

3.2 直流遮断試験

3.2.1 交流短絡発電機法を用いた直流遮断試験

図5に交流短絡発電機法を用いた試験法の試験回路図を示す。この試験法ではHVDCシステムでの直流事故電流の上昇を商用又は低減周波(今回の試験では30Hz)短絡電流の上昇期間で模擬する(図6)。交流電流源には短絡発電機を

用いた⁽⁴⁾。

この試験法を用いてDCCBの80kVクラスのプロトタイプ供試器の性能検証試験を実施した(図7)。遮断電流は仕様での最大電流の10%条件である1.6kAから100%条件の16kAまでとした。図8及び図9に試験結果の代表波形例を示す。図8は今回の試験での最大電流遮断条件16kAを遮断成功した結果、図9は小電流遮断条件1.6kAを遮断成功した結果である。この方式のDCCBによる小電流遮断時は、電流零点での電流変化率(di/dt)が大電流遮断時よりも高い上に、遮断直後の共振回路コンデンサ(Cp)に初期充電電荷の大部分が残留することから、負極性に急峻

(きゅうしゅん)かつ高波高値の過渡回復電圧(TRV)が発生するため、厳しい遮断責務であるが、共振回路の定数最適化等によって第一電流零点での遮断を可能にした。

3.2.2 熱的遮断性能の向上

主遮断部真空バルブが遮断できる電流変化率(di/dt)には限界がある。今回の開発では、検証試験での遮断特性

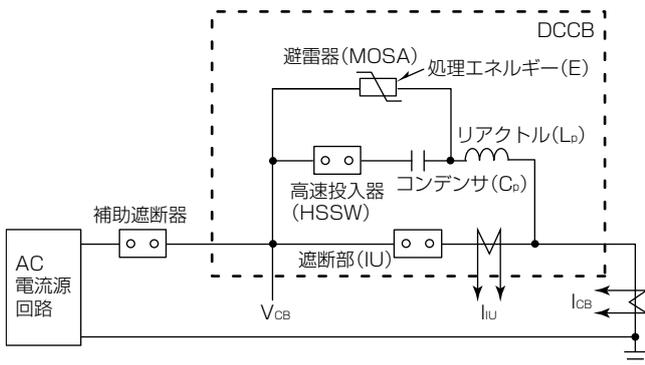


図5. 交流短絡発電機法による直流遮断試験回路

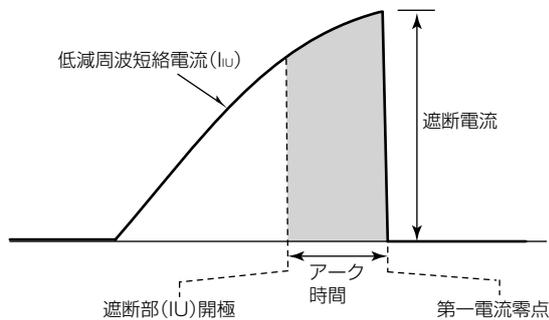


図6. 交流短絡発電機法による試験電流波形のイメージ

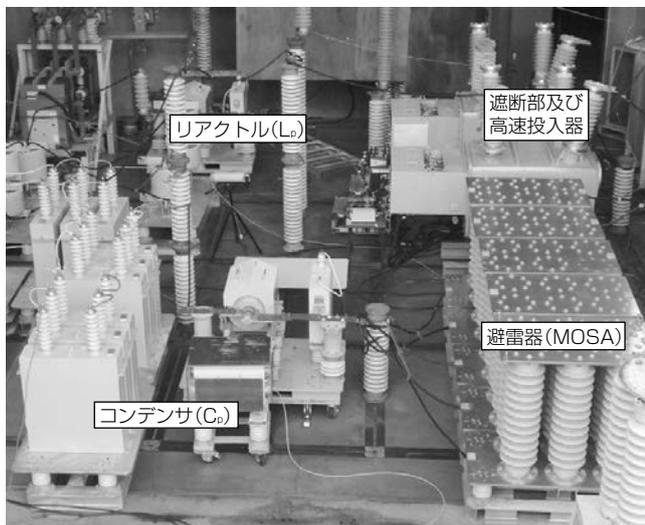


図7. 当社大電力試験所での遮断試験風景

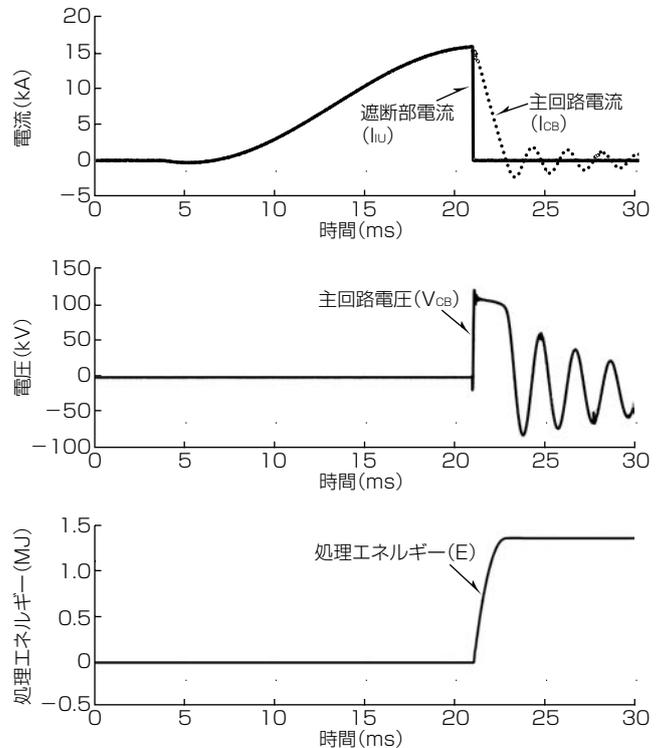


図8. 16kA遮断条件での試験結果波形

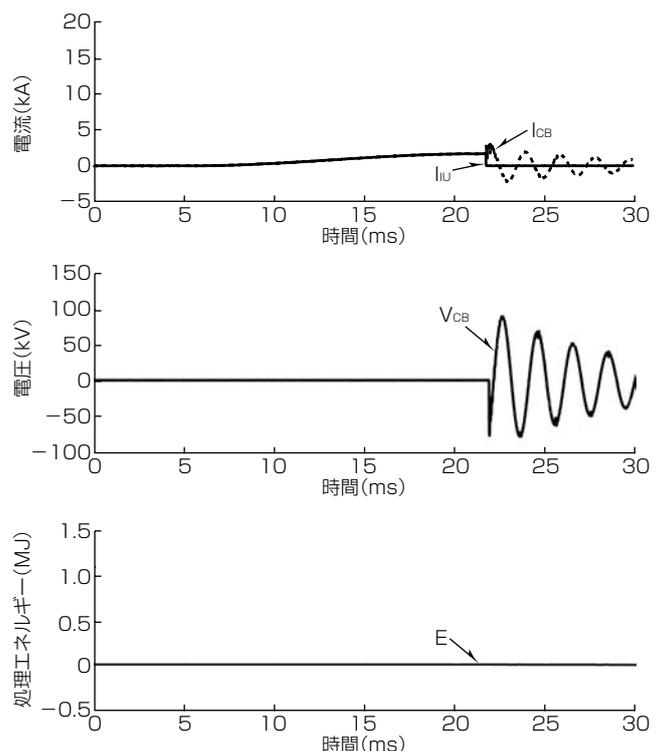
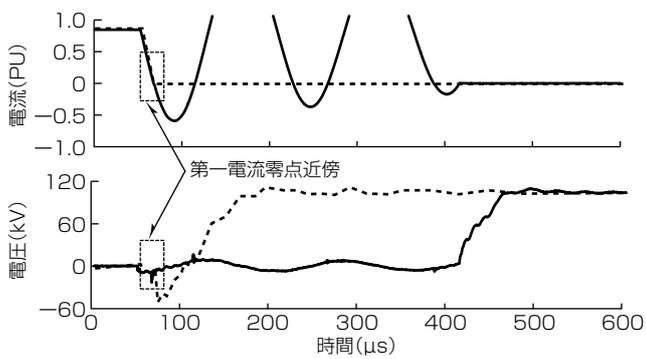
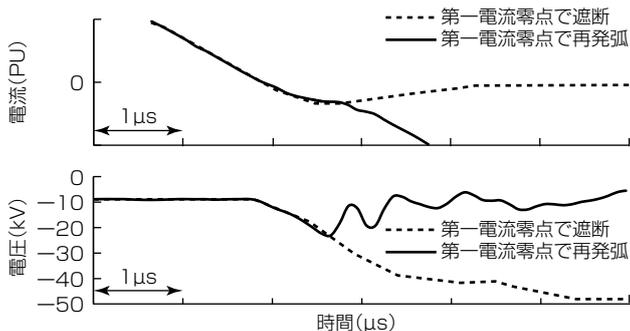


図9. 1.6kA遮断条件での試験結果波形



(a) 全体波形



(b) 第一電流零点近傍拡大

図10. 熱的遮断成否比較

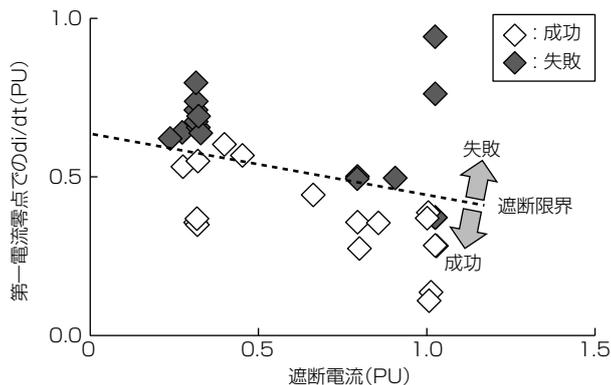


図11. DC遮断時の主遮断部真空バルブの遮断限界特性

(電流の零点近傍の挙動と遮断成否の関係など)の分析を行い、定格遮断電流以下の全ての遮断条件で1回目の電流零点(第一電流零点)で確実に熱的遮断可能となるように共振回路定数を最適化した。図10及び図11に遮断限界 di/dt の実測波形例及び分析結果例を示す。図10は同じ試験条件

での二回の試験のうち一方で遮断成功し、もう一方は第一電流零点で遮断失敗したものである。図11は遮断電流に対して、上記のように得られた遮断限界条件をまとめたグラフである。

4. むすび

HVDC向けDCCBのプロトタイプ供試器製作及び性能検証を行った。今回述べた供試器は、オランダ国際認証試験機関DNV-GL KEMAにおいて世界初^(注1)となる高電圧直流遮断器を用いた遮断試験を実施し、遮断電流責務16kA、避雷器エネルギー責務3.6MJまでの試験に成功した⁽⁵⁾。また今回開発した80kVクラスのプロトタイプ供試器をユニットとして直列多点接続することで高電圧化が可能である。

(注1) 2017年10月19日現在、当社調べ

参考文献

- (1) CIGRE JWG A3/B4.34 : Technical Requirements and Specifications of State-of-art HVDC Switching Equipment, CIGRE Technical Brochure, TB683 (2017)
- (2) Tokoyoda, S., et al. : DC circuit breakers for HVDC grid applications HVDC and Power Electronics technology and developments, CIGRE SC A3 & B3 joint colloquium Nagoya, No.122 (2015)
- (3) Hara, S., et al. : Fault protection of metallic return circuit of Kii channel HVDC system, IEE AC-DC Power Transmission, 132~137 (2001)
- (4) Tokoyoda, S., et al. : Interruption characteristics of vacuum circuit breaker and the application to DCCB, IET ACDC 2017, B4.1 (2017)
- (5) Horizon2020 PROMOTioN official HP press release (2017)

https://www.promotion-offshore.net/news_events/news/detail/eu-project-promotion-successfully-demonstrates-ac-short-circuit-generator-based-test-environment-for/