

# 自励式HVDCシステムの検証

Verification of VSC Based HVDC System

貞國仁志\*  
Hitoshi Sadakuni  
石黒純也\*  
Junya Ishiguro  
久世裕子\*  
Hiroko Kuse

山中大輔\*  
Daisuke Yamanaka  
菊地 健\*  
Takeshi Kikuchi

## 要 旨


世界各国では再生可能エネルギーの導入拡大や地域間連系の拡大に伴い、電力系統を安定化させるパワーエレクトロニクス機器を活用した製品や、発電した電力を無駄なく需要地へ運ぶ送電システムを支援する技術の需要が拡大している。パワーエレクトロニクスを適用して再生可能エネルギー大量導入に伴う課題解決に寄与できる機器又は技術として、HVDC(高電圧直流送電)システムが着目されている。その中でも自励式HVDCシステムは従来の他励式と比較して交流系統への制約が少ないこと、無効電力も積極的に制御可能なこと等の特長を持っている。自励式の中でも、モジュラーマルチレベル変換器(MMC)は高電圧化が容易であることから、HVDCに適しており、高調波

発生量が少なく、冗長性を確保できる。三菱電機は、自社製IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)を用いたMMC方式の自励式変換器を適用したHVDCシステムを開発し、当社系統変電システム製作所内に建設した容量50MWの直流送電システム検証設備で一連の検証を実施した。制御(通常起動、通常停止、緊急停止、ブラックスタート、電力融通試験、無効電力出力試験)、長期安定性(ヒートラン試験)、保護(DC母線短絡試験)、実用性能(耐震評価(解析、固有振動測定)、ラジオノイズ試験)のデータを蓄積するとともに、製品として提供可能なことを確認できた。

この実績を基に、更に小型化、低損失化となる新たなHVDCシステムの開発に進めていく計画である。


**●豊富な実績**

- 基本計画立案から実施設計まで対応できる系統解析技術を保有
- 豊富な系統安定化システム納入実績




**●総合的な技術・対応力**

- キーデバイスとなる大容量パワー半導体の自社開発
- フルターンキー工事にも対応(電気・制御機器、現地工事)



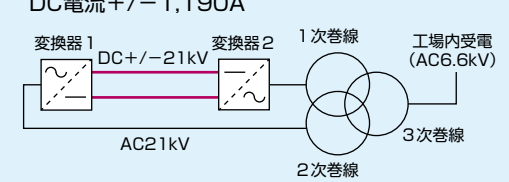
**●HVDC検証設備**



**●検証内容**

1. 制御検証
2. 長期安定性評価
3. 保護検証
4. 実用性能評価

有効電力50MW  
DC電流+/-1,190A



## HVDC検証設備

HVDC検証設備は兵庫県尼崎市の当社系統変電システム製作所内に建設し、2018年11月に運用を開始した。この検証設備の建設目的は、実機と同じ変換器や制御保護装置等を用いてMMCシステム全体での運転検証を実施しデータを蓄積することであり、一連の検証によって、制御、保護、長期安定性、実用性能のデータを蓄積するとともに、製品としての実証を行ってきた。現在は、社外の変換器対応の機器の検証等に活用している。

## 1. ま え が き

自励式変換器は他励式変換器と比較して交流系統への制約が少ないこと、無効電力も積極的に制御可能なこと等の特長を持っている。自励式の中でも、MMCは高電圧化が容易であることから、HVDCに適しており、高調波発生量が少ないこと、冗長性を確保できること等の特長を持つ<sup>(1)</sup>。近年、MMCを用いたHVDC(MMC-HVDC)の導入が進んでおり、当社でもその開発を進めてきた<sup>(2)</sup>。そして、当社のシステムであるHVDC-Diamondを検証するHVDC検証設備(図1)を建設し、一連の検証を実施した。今回はその検証結果概要を述べる。

## 2. HVDC検証設備

この検証設備は兵庫県尼崎市の当社系統変電システム製作所内に建設し、2018年11月に運用を開始した。この検証設備の建設目的は、実機と同じ変換器や制御保護装置等を用いてMMCシステム全体での運転検証を実施しデータを蓄積することにある。現在は当社内での検証を終えて、社外の変換所対応の機器の検証等に活用している。

図2に主回路の概略を、表1に定格事項を示す。このシステムは2台の変換器を接続した構成であり、主変圧器を介して交流系統と接続している。変圧器には3巻線変圧器を用いて、1次巻線と2次巻線の間で変換器電力を循環させることによって、工場内交流系統からHVDC検証設備

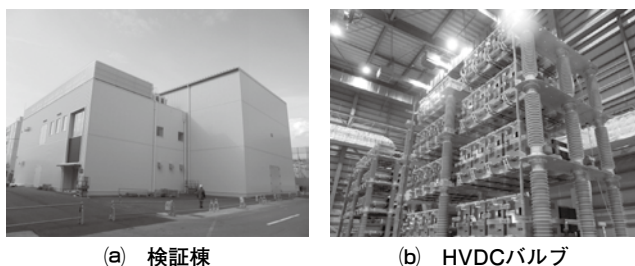


図1. HVDC検証設備

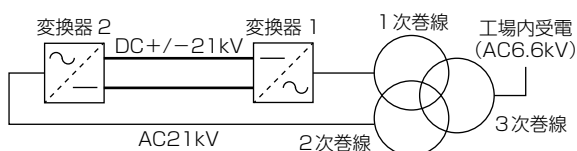


図2. 主回路構成

表1. システム定格事項

定格電力	50MW
工場内受電AC電圧	6.6kV
検証設備側AC電圧	21kV(60Hz)
定格DC電圧	±21kV
定格DC電流	±1,190A

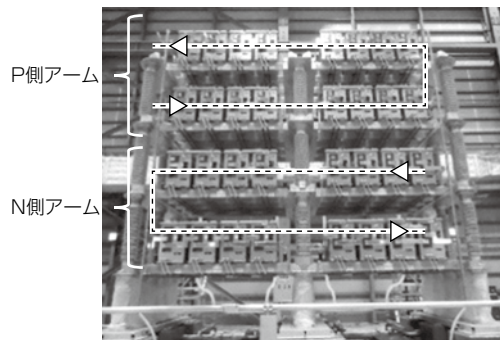


図3. 変換器

の運転損失分の電力を供給するだけで50MW送電試験を実施できる。

図3に変換器を示す。変換器は単位変換器であるサブモジュールを複数直列接続し構成される。スイッチング素子には当社製の高耐圧・大電流パワー半導体モジュール(IGBT)を採用し、サブモジュール数削減によって、変換所の小型化と低損失化を実現している。

制御保護装置は機器の操作や状態監視を行う共通HMI(操作卓)、変換器の制御を行う制御装置、保護を行う保護装置、変換器と各装置間の信号を中継する光中継装置から成る。

## 3. HVDCシステム検証

### 3.1 起動・停止試験<sup>(1)</sup>

通常起動、通常停止、緊急停止、ブラックスタートの四つの試験で問題なく動作することを確認した。

代表としてブラックスタート試験の結果を図4に示す。ここでは、まずブラックスタート側に見立てた変換器を変圧器から切り離し、健全系統側に見立てた変換器を交流側から充電、続いて①健全端変換器を制御して直流線路とブラックアウト側変換器を充電、②ブラックアウト側変換器の制御を開始、充電完了後に③ブラックアウト側変換器で交流電圧を発生、という手順でブラックスタートを模擬した。

### 3.2 電力融通試験<sup>(1)</sup>

図5に有効電力を送電し、潮流反転した電力融通試験結果を示す。最大50MWの有効電力を、指令値どおりに安定して送電できることを確認した。

### 3.3 無効電力出力試験<sup>(1)</sup>

STATCOM運転試験及び有効・無効電力同時出力試験を行い、指令値どおりに安定して運転できることを確認した。図6に、有効電力13MW・無効電力7Mvarの同時出力試験の結果を示す。

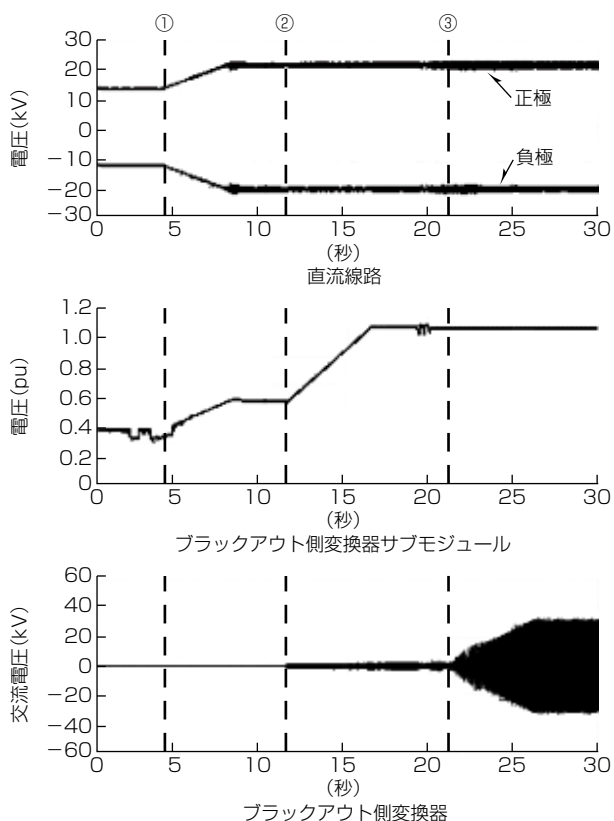


図4. ブラックスタート試験

### 3.4 長期安定性試験

機器温度が安定するまで定格出力で連続通電するヒートラン試験を行った。ヒートラン試験では、8時間にわたって有効電力50MW・無効電力0 Mvarで連続通電し、機器の温度上昇が適正であること、局所加熱等の異常が発生しないことを確認した(図7)。

### 3.5 DC母線短絡試験

DC母線短絡事故時には、変換器のIGBTを全てゲートブロックしても上流の遮断器によって遮断するまでの間、IGBT素子と逆並列のダイオードを通して事故電流が流れ続ける。内蔵ダイオードを流れる電流は定格電流に対して極めて大きいため、短時間(1サイクル程度)にダイオードのジャンクション温度が所定値を超過し、ダイオードの破壊に至る。これに対して、図8のようにIGBT内蔵ダイオードに並列に過電流バイパス用ダイオード(Bypass Diode : BPD)を設け転流させることで短絡事故時の事故電流をBPDへ担わせることができ変換器の保護が可能になる。

この検証では検証設備でDC母線短絡事故を発生させ、BPDによる変換器保護動作確認を行った。図9に示すとおり、DC母線の短絡事故発生時にBPDに事故電流を転流させることで変換器への事故電流の流入を防ぎ、変換器のコンデンサに発生する過電圧も抑制され正常な保護動作が確認できた。

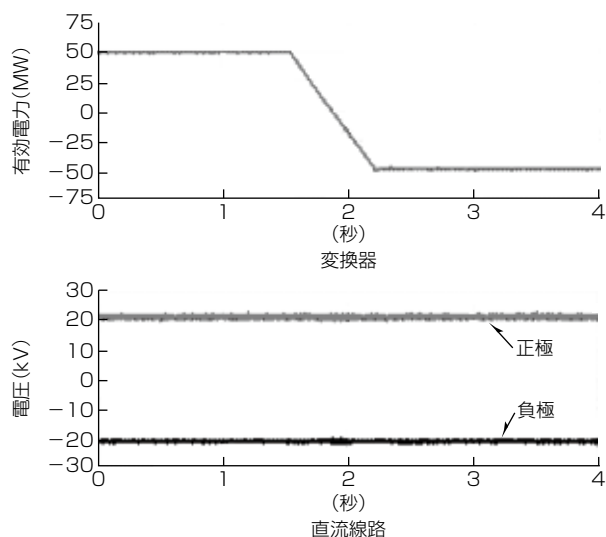


図5. 潮流反転試験

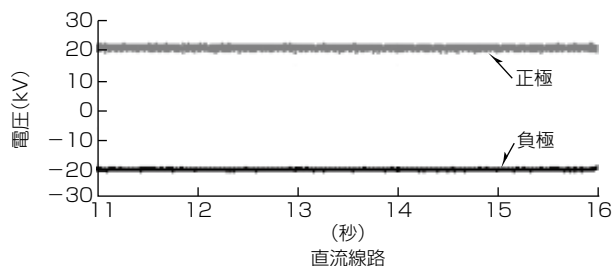
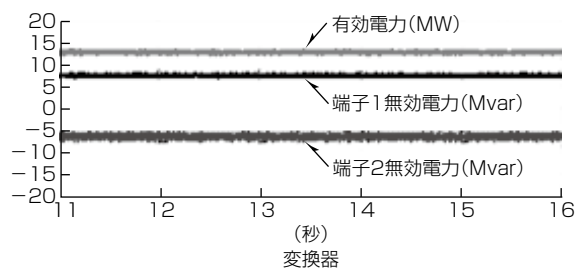


図6. 有効・無効電力同時出力試験

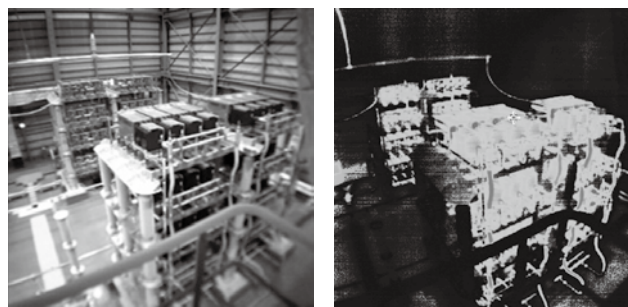


図7. ヒートラン試験での変換器サーモビューア画像

### 3.6 ラジオノイズ試験

変換器運転時に発生する電磁波ノイズは種々の周波数成分を含んでおり、変換所周辺の通信波に影響を及ぼすおそれがある。そのため、検証設備を用いて変換器運転時の電磁波ノイズをアンテナで測定を行った。図10に国内AMラジオの周波数帯での変換器の運転有・無での電磁波ノイ

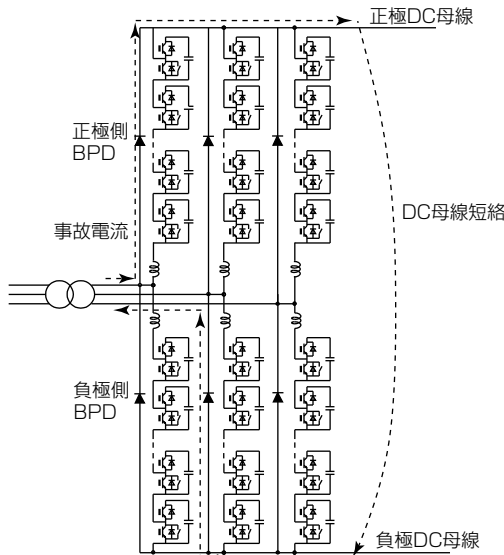


図8. 短絡保護動作原理

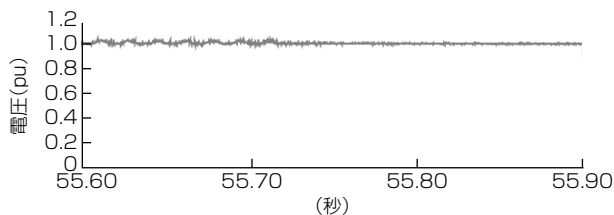
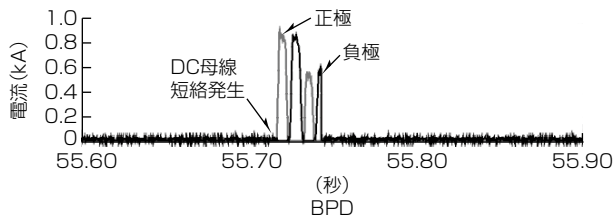


図9. DC母線短絡試験

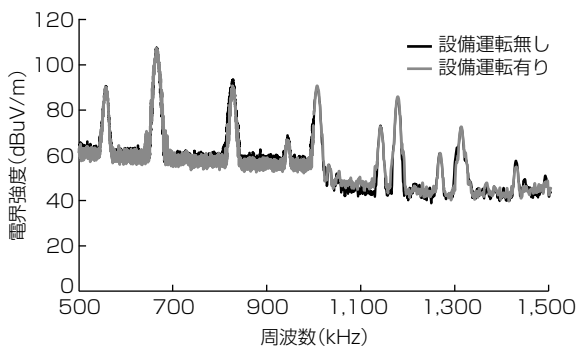


図10. ラジオノイズ試験

ズの測定結果を示す。この周波数帯では有害なレベルのノイズが発生していないことが確認できた。

### 3.7 耐震解析

HVDCシステムに適用する変換器は図3に示すように、サブモジュールを直列に接続することで高電圧化を図るこ

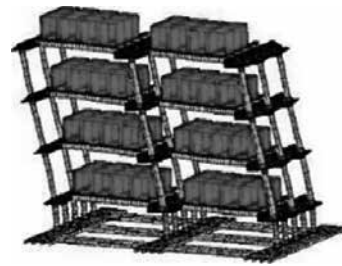


図11. 変換器の耐震解析結果(固有振動評価)

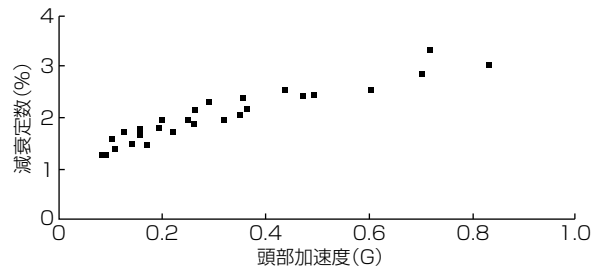


図12. 変換器バルブの減衰定数<sup>(3)</sup>

とができる。変換器の据付面積を縮小するためにはサブモジュールを段積みすることによって重心が高くなり、耐震性能が課題となる。

耐震仕様は国内ではJEAG-5003(変電所等における電気設備の耐震設計指針)が要求される。動的な耐震解析での評価によって、この仕様を満足することが確認できた(図11)。変換器には絶縁支持部材としてFRP(Fiber Reinforced Plastics)を構造部材としたポリマがいしを適用している。このポリマがいしの減衰定数には実機相当の検証で得られたデータ<sup>(3)</sup>を適用した(図12)。また、変換器の固有周波数測定を実施し、解析精度が十分に高いことを確認した。

## 4. むすび

当社のHVDCシステムであるHVDC-Diamondを検証する検証設備を建設し、一連の検証によって、制御(通常起動、通常停止、緊急停止、ブラックスタート、電力融通試験、無効電力出力試験)、長期安定性(ヒートラン試験)、保護(DC母線短絡試験)、実用性能(耐震評価(解析、固有振動測定)、ラジオノイズ試験)のデータを蓄積するとともに、製品として問題なく提供できることを確認した。

この実績を基に、更に小型化、低損失化となる新たなHVDCシステムの開発に進めていく計画である。

### 参考文献

- (1) 高橋達也, ほか: 自励式HVDC検証設備の完成, 平成31年電気学会全国大会, 6-338 (2018)
- (2) 高橋達也, ほか: 自励式HVDC検証棟での運転試験, 平成31年電気学会全国大会, 6-339 (2018)
- (3) 吉田良男, ほか: 500kV大容量サイリスタバルブの耐震性評価手法の検討, 電気学会論文誌B, 115, No.11, 1358~1364 (1995)