

HVDC制御保護装置のシミュレータ 検証環境

宇田涼介*
今田倫行*
藤澤昂征*

Simulator Test Facility for HVDC Control and Protection Equipment

Ryosuke Uda, Noriyuki Imada, Takayuki Fujisawa

要旨

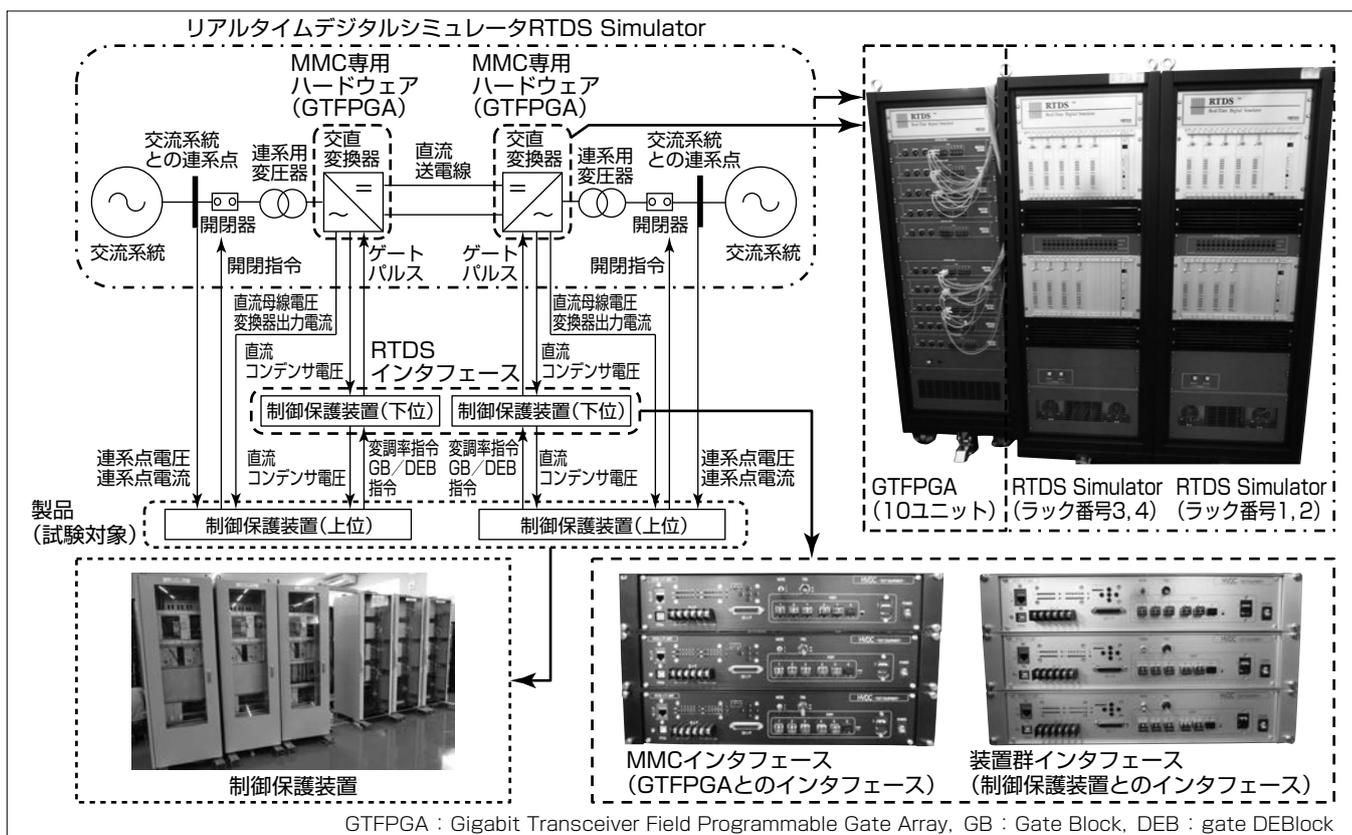
近年、洋上風力発電を始めとした再生可能エネルギーの電力系統への大量導入が世界的に進められている。直流送電(High Voltage Direct Current: HVDC)システムが長距離送電に適している理由の一つに送電線コストがあり、特に長距離海底ケーブル送電を必要とする洋上風力発電にHVDCシステムが多く適用されている。また日本国内では、東日本大震災以降、非同期・異周波数連系が可能なHVDCシステムによる周波数変換設備の強化が検討されている。

三菱電機はHVDCシステム事業への参入を目指し、MMC(Modular Multilevel Converter)方式の自励式交直変換器を適用したHVDCシステムの開発を進めてきた。HVDCシステムに対しては、有効・無効電力の高速制御

機能や交流系統事故に対する運転継続性能など、様々な機能や性能が要求されるが、これらの機能・性能の検証には、リアルタイム電力系統シミュレータを用いたHVDCシステムの制御保護装置の検証試験が不可欠である。これを実現するため、HVDC制御保護装置のシミュレータ検証環境を構築した。

シミュレータ検証環境は、HVDC制御保護装置の基本機能を確認するためのハイブリッドシミュレータによる検証環境と、製品検証を目的としたリアルタイムデジタルシミュレータRTDS^(注1) Simulatorによる検証環境の二つからなる。

(注1) RTDSは、Manitoba Hydro International Ltd.の登録商標である。



HVDC制御保護装置のシミュレータ検証環境

HVDC制御保護装置のリアルタイムデジタルシミュレータRTDS Simulatorによる検証環境の構成を示す。交流・直流系統やHVDCシステムの主回路部(交直変換器、連系用変圧器など)はリアルタイムデジタルシミュレータで模擬される。特にMMC方式の交直変換器は専用ハードウェア(GTFPGA)で詳細模擬される。また当社製品である制御保護装置とRTDS Simulatorとのインタフェース装置であるRTDSインタフェースを開発・適用している。

1. ま え が き

近年、洋上風力発電を始めとした再生可能エネルギー電源の電力系統への大量導入が進んでいる。直流送電(HVDC)システムが長距離送電に適している理由の一つに送電線コストがあり、特に長距離の海底ケーブル送電を必要とする洋上風力発電へのHVDCシステムの適用が進んでいる。また国内でも、HVDC適用による周波数変換所設備強化の検討が進められている⁽¹⁾。

当社はMMC方式の自励式変換器を適用したHVDCシステムの開発を進めてきた。HVDCシステムには有効・無効電力の高速制御機能や、交流系統事故に対する運転継続性能などが要求される。これらの機能・性能を検証するため、リアルタイム電力系統シミュレータを用いた当社HVDCシステムの制御保護装置の検証環境を構築した。

本稿では、当社HVDCシステムの概要や今回構築したシミュレータ検証環境について述べ、さらにこのシミュレータ検証環境を用いた検証試験の一例について述べる。

2. HVDCシステムの概要

当社HVDCシステムの構成を図1に示す。HVDCシステムの構成要素は大きく二つに分けられる。一つ目は交流-直流の電力変換を行う交直変換器や交流系統と連系するための連系用変圧器などの主回路部であり、二つ目はHVDCシステムが所望の運転状態で安定動作するように交直変換器の出力電圧を制御する制御保護装置である。主回路部での交流系統電圧や変換器出力電流などの計測信号が制御保護装置に伝送され、制御保護装置はそれらの計測信号を用いて、HVDCシステムが所望の動作をするように交直変換器の出力電圧を制御する役割を持つ。また、システム内外での故障を検出し、機器を適切に保護する役割を持つ。

交直変換器については、MMC方式の自励式変換器を適用した。MMC方式の交直変換

器の構成を図2に示す。MMC方式ではサブモジュールと呼ばれる単位変換器を複数個直列接続した構成である。複数のサブモジュールの半導体素子を適切にスイッチングすることで、図2に示すような高調波の少ない、正弦波に近い交流電圧を出力することが可能である。また、多数のサブモジュールを直列接続することで、直流母線電圧を容易に高くできるので、送電損失の少ない長距離送電が可能である。

3. 制御保護装置のシミュレータ検証環境

制御保護装置は、HVDCシステムに要求される性能、例えば指定された交流系統電圧・周波数の変動範囲内で所望の有効電力・無効電力を出力可能であることや、交流系統で故障が発生した際にもシステムが解列することなく運転を継続可能であることを実現する上で非常に重要な役割を担う。したがって、工場試験で制御保護装置の機能・性能を十分に検証することが不可欠である。しかしながら、工場試験の段階で図1のシステムを構成して検証試験を行うことは、現実的にはほぼ不可能である。

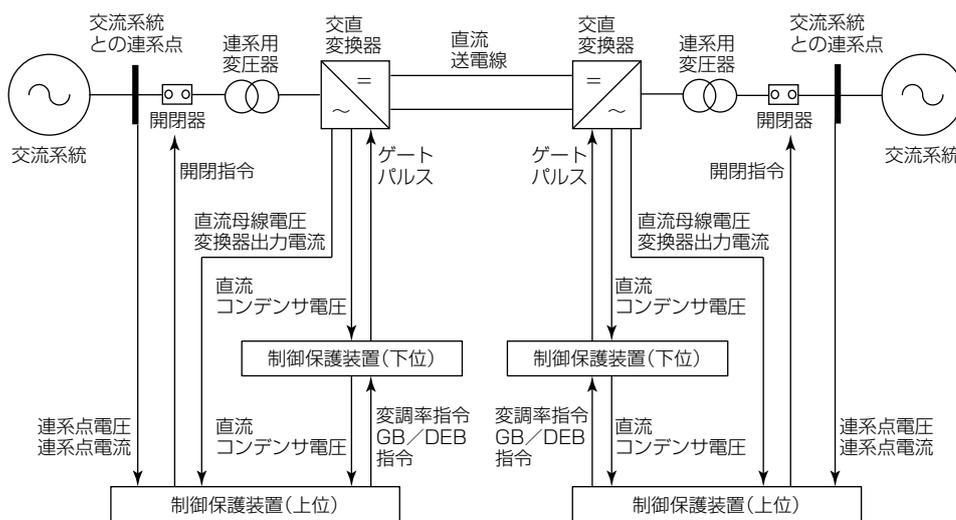


図1. HVDCシステムの構成

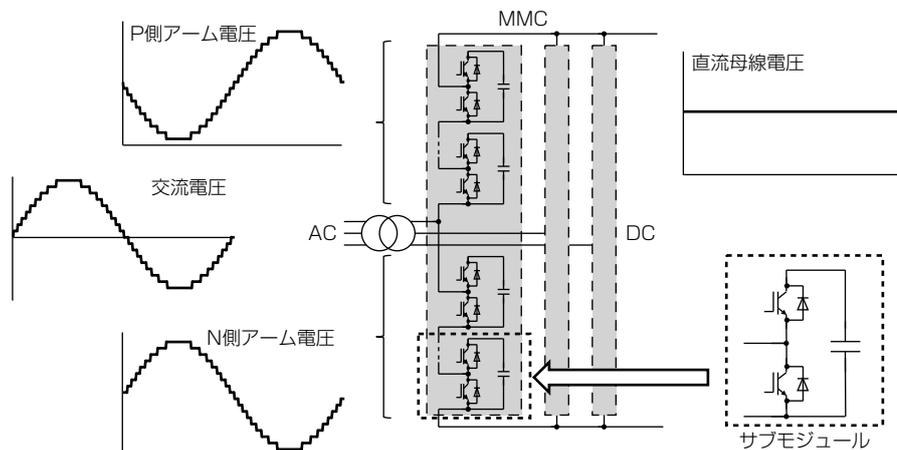


図2. MMC方式の交直変換器の構成

このような背景から、当社は工場試験で制御保護装置の検証を行うためのシミュレータ検証環境を構築した。シミュレータ検証環境では、工場試験の段階では利用できないHVDCシステムの主回路部やHVDCシステムが連系する交流システムをリアルタイムシミュレータと呼ばれる電力システムの諸現象を実時間で再現する装置で模擬し、実機(製品)の制御保護装置と相互接続することで、HVDCシステムの挙動を再現し、制御保護装置の機能・性能を検証できる。

当社は次の二つの検証環境を構築した。一つ目は開発した制御保護装置の基本確認を目的とした、ハイブリッドシミュレータによる検証環境であり、二つ目は製品検証を目的とした、多数のサブモジュールに対応したリアルタイムデジタルシミュレータによる検証環境である。それぞれのシミュレータ検証環境について次に述べる。

3.1 ハイブリッドシミュレータによる検証環境

開発した制御保護装置の基本機能を確認するためのハイブリッドシミュレータによる検証環境を構築した。システム構成を図3に、シミュレータ検証設備の外観を図4に示す。交流システムや交直変換器を除くHVDCシステム主回路は、当社が所有するハイブリッドシミュレータで模擬される。ハイブリッドシミュレータは電力システムの構成要素のうち、送電線、変圧器、負荷などはアナログモデルで模擬し、発電機などの交流電源をデジタルモデルで模擬する。交直変換器については、MMC方式の交直変換器のミニモデル(MMCミニモデル)を製作した。制御保護装置については、上位機能を担当する装置群は製品相当の実機を使用した。下位機能を担当する装置は、サブモジュールの内部に組み込まれるため、全く同等の機能をMMCミニモデルに組み

込む構成とした。

この検証設備は、対応可能なサブモジュール数に制限はあるが、MMC方式の交直変換器の挙動を詳細に再現でき、HVDCシステムの基本動作の検証や、3.2節で述べるリアルタイムデジタルシミュレータによる検証環境自体の検証に大いに貢献した。

3.2 リアルタイムデジタルシミュレータによる検証環境

制御保護装置の製品検証を目的とした、より多数のサブモジュールに対応したリアルタイムデジタルシミュレータによる検証環境を構築した。システム構成を図5に示す。HVDCシステムの主回路部と交流システムはリアルタイムデジタルシミュレータ(RTDS Simulator)で模擬される。特に、MMC方式の交直変換器の模擬に専用ハードウェア(GTFPGA)を適用したことによって、多くの演算量を必要とするMMC方式の交直変換器を詳細に模擬できるのが

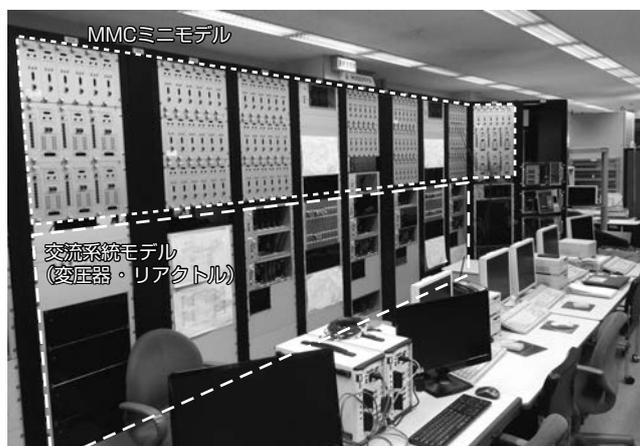


図4. シミュレータ検証設備の外観

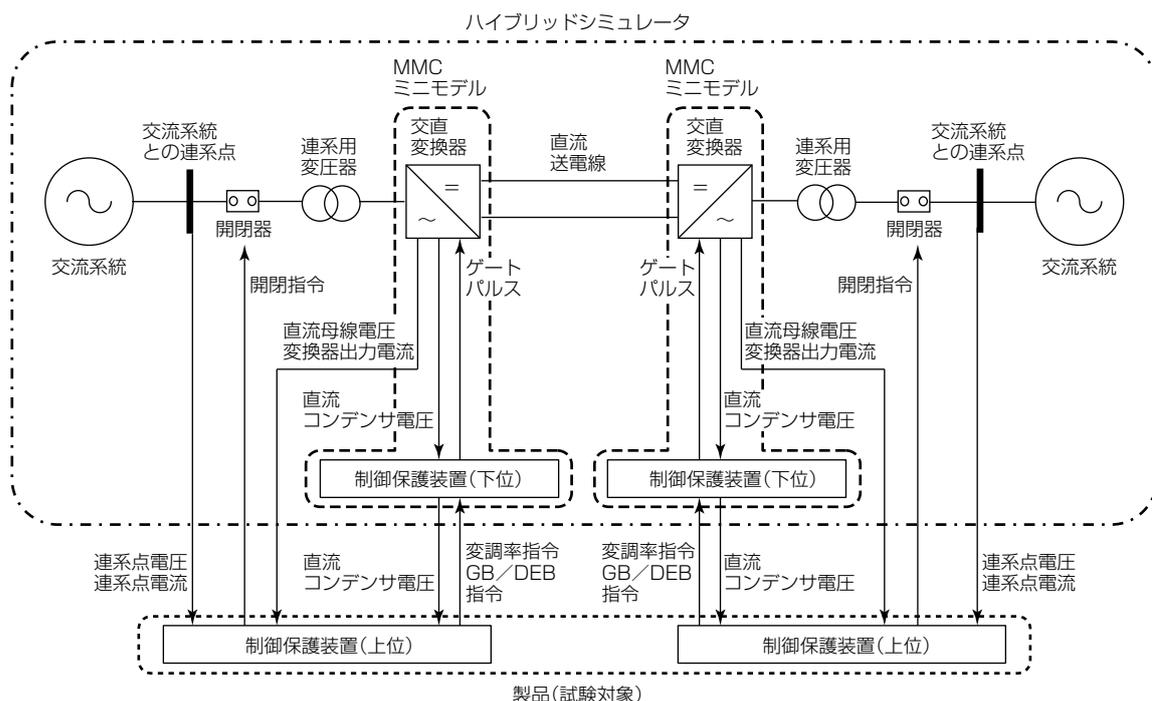


図3. ハイブリッドシミュレータによる検証環境のシステム構成

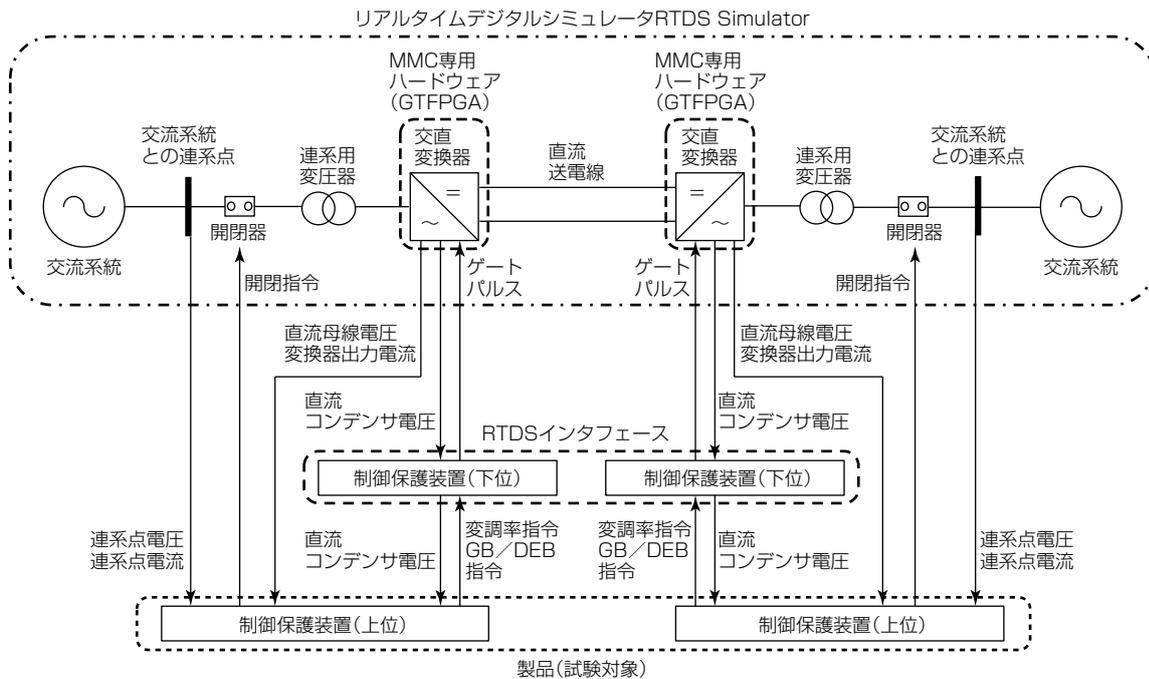


図5. リアルタイムデジタルシミュレータによる検証環境のシステム構成

特長である。制御保護装置については、その上位機能を担当する装置群を検証試験の対象とした。制御保護の下位機能を担当する装置は、サブモジュールの内部に組み込まれるため、その数量が非常に多くなることから、実機(製品)そのものではなく、全く同等の機能を持つインタフェース装置(RTDSインタフェース)で模擬する構成とした。またインタフェース装置はMMC専用ハードウェアと制御保護装置との間の高速通信のインタフェース機能を具備している。

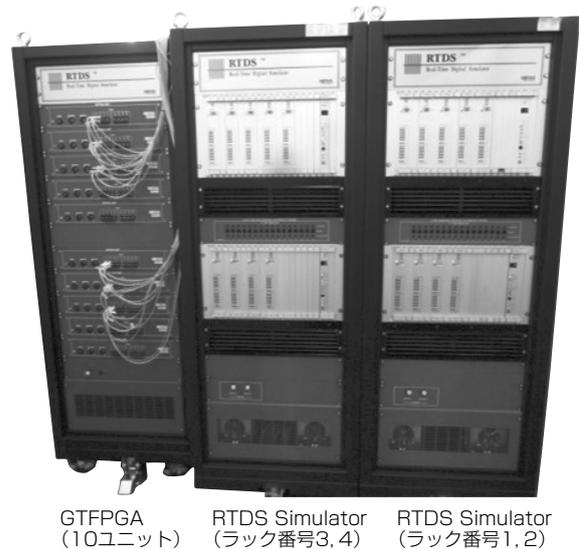
3.2.1 RTDS Simulator

このシミュレータ検証環境のリアルタイムデジタルシミュレータには、カナダのRTDS Technologies社が製造・販売するRTDS Simulatorを採用した。RTDS Technologies社は電力系統リアルタイムデジタルシミュレータのトップメーカーで、RTDS Simulatorは世界各国の多くの電力会社や重電機器メーカー、研究機関、大学などで採用実績がある⁽²⁾。

このシミュレータ検証環境のRTDS Simulatorの外観を図6に示す。RTDS Simulatorは演算用プロセッサ基板18枚、アナログ入出力基板14枚、デジタル入出力基板4枚で構成され、発電機や送電線、変圧器等を含む詳細な交流系統やHVDCシステムの主回路を模擬できる。また、MMC方式の交直変換器を詳細模擬可能な専用ハードウェアであるGTFPGAを10ユニット具備しており、最大512個/アームのサブモジュールを持つ交直変換器を2端子分、詳細模擬することが可能である。

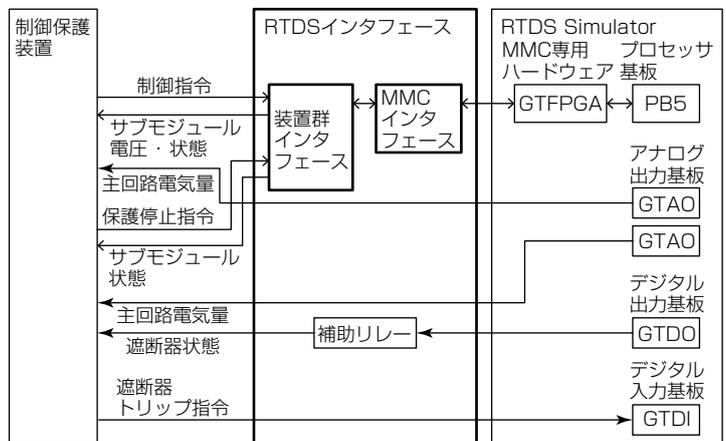
3.2.2 RTDSインタフェース

制御保護装置と交直変換器とのインタフェースは光通信を採用している。一方、このシミュレータ検



GTFPGA (10ユニット) RTDS Simulator (ラック番号3,4) RTDS Simulator (ラック番号1,2)

図6. RTDS Simulatorの外観



→ 電気信号
→ 光信号
PB : Processor Board
GTAO : Gigabit Transceiver Analog Output
GTDO : Gigabit Transceiver Digital Output
GTDI : Gigabit Transceiver Digital Input

図7. RTDSインタフェースの構成

表 1. RTDSインタフェースの主な機能

項目	主な機能
装置群インタフェース	・制御保護装置の通信プロトコルへの適応 ・各装置からのデータ集約
MMCインタフェース	・GTFPGAの通信プロトコルへの適応 ・制御保護の下位機能(PWM(Pulse Width Modulation)など)の模擬

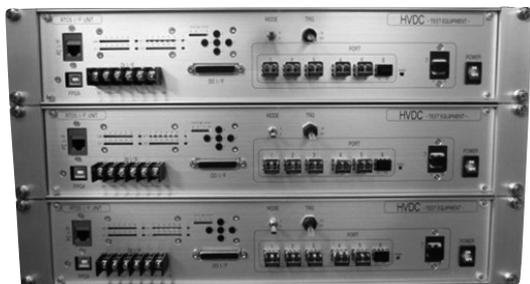


図 8. 装置群インタフェースの外観



図 9. MMCインタフェースの外観

証環境で交直変換器を模擬するMMC専用ハードウェア(GTFPGA)も同様に光通信を採用している。しかしながら、両者の光通信仕様は全く異なるため、制御保護装置とGTFPGAを相互接続するためのインタフェース装置(RTDSインタフェース)を開発した。RTDSインタフェースの構成を図7に示す。RTDSインタフェースは制御保護装置と接続される装置群インタフェースと、GTFPGAと接続されるMMCインタフェースで構成される。それぞれの主な機能を表1に示す。また、それぞれの装置外観を図8、図9に示す。

4. 検証試験の例

ここまで述べてきたとおり、当社ではHVDCシステムの制御保護装置の機能や性能を検証するためのシミュレータ検証環境を構築し、本設備を用いて制御保護装置の検証を行っている。ここではその検証試験結果の一例について述べる。

図10は、リアルタイムデジタルシミュレータによる検証環境でHVDCシステムを起動し、定常運転した時の、片端変換器の電圧・電流波形を示している。上から交流系統との連系点の電圧・電流波形、直流母線の電圧・電流波形、サブモジュール直流コンデンサ電圧のアーム平均値の

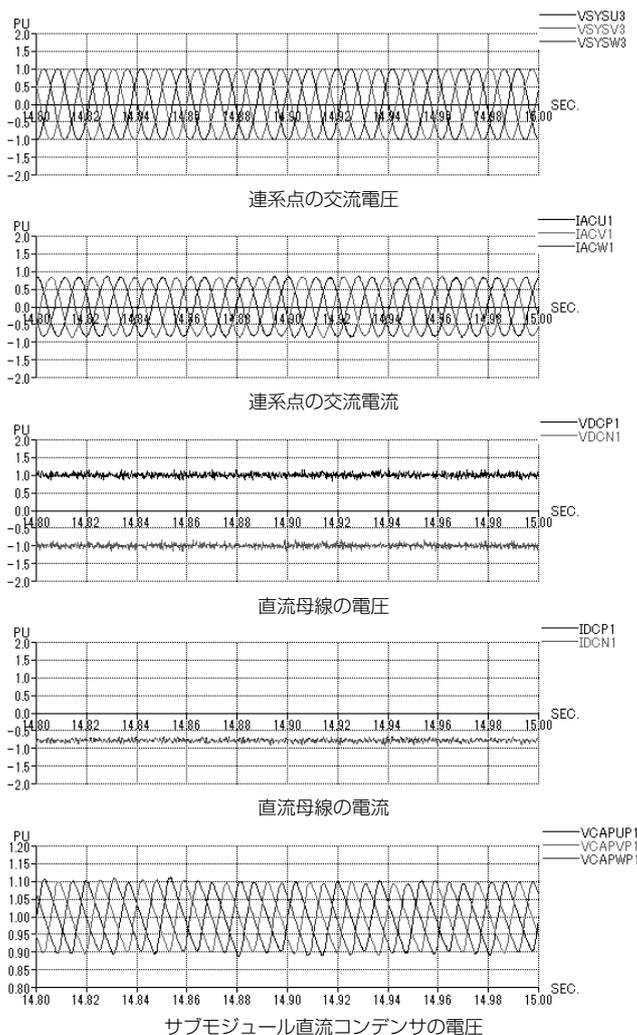


図10. 検証試験結果の一例

波形である。これらの波形から、HVDCシステムが所望の運転状態で安定に運転できていることが確認できる。

5. む す び

当社はHVDC制御保護装置のシミュレータ検証環境を構築した。本稿では、構築した二つのシミュレータ検証環境について述べた後、検証試験結果の一例を示した。今後はHVDCシステム事業へ参入するために、シミュレータ検証環境を活用して当社HVDCシステムの検証試験を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 宜保直樹, ほか: 直流送電技術, 電気設備学会誌 (2012)
- (2) ㈱JPビジネスサービス: RTDS社製品に関する国内独占代理店(電力系統解析シミュレータ)
<http://www.jpbs.co.jp/it/products/product03.html>