

## リアルタイムシミュレーターを用いた HVDC 制御・保護システム試験技術

Technologies to Test HVDC Control and Protection Systems for Power Grid Operation Using Real-Time Simulator

奥田 実 OKUDA Minoru 正角 成泰 MASAKADO Nariyasu 金田 啓一 KANEDA Keiichi

イタリア-モンテネグロ間の電力システムを連系する高圧直流送電 (HVDC) システムは、アドリア海を挟む両国間を全長約 400 km の海底ケーブルで接続しており、モンテネグロ側から 1 GW の大電力を送電できる。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、イタリアのテルナ社から受注した、HVDC システムの制御・保護システムを出荷した。ユーザーの送電計画や様々な系統現象に応じて安定に送電するための自動制御機能を多数装備していることから、両端の交流システムを含む HVDC システム全体を模擬した環境を構築し、リアルタイムで系統現象を模擬できるシミュレーターと組み合わせた試験を行った。その結果、制御・保護システムの高速応動や、系統擾乱(じょうらん)に対する制御安定性など、実際の応動に近い条件で有効性を確認できた。

A high-voltage DC (HVDC) power transmission system being developed by Terna Rete Italia S.p.A., connecting Italy and Montenegro across the Adriatic Sea via a submarine cable of about 400 km in length, will supply 1 GW of power from Montenegro to Italy.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has delivered HVDC control and protection systems for the converter stations at both the Italy and Montenegro sites. The HVDC control and protection system ensures smooth operations through multiple automatic control functions that realize stable power transmission in response to the user's transmission plans and the various phenomena that occur in a power grid. In order to verify these functions in our factory, we have constructed a test environment that can simulate the entire HVDC power transmission system including its associated AC systems, and have been conducting tests in combination with a real-time simulator. From the results of these verification tests, we have confirmed the performance of the system including high-speed response and control stability at the time of disturbances occurring in the grid under conditions similar to its actual operating conditions.

### 1. まえがき

高圧直流送電 (HVDC) システムの制御・保護システムは、エンドユーザーの送電計画に対応するとともに、様々な系統現象に対して安定に送電するための自動制御機能を多数装備している。そのため、HVDC システムの制御・保護システムの性能を検証するには、電力システムシミュレーターが不可欠になっている。リアルタイムで系統現象を模擬するシミュレーターと組み合わせた試験を行うことで、制御システムの高速応動性や、指令値に対する追従性、系統擾乱に対する制御安定性などを高精度に検証することが可能となり、信頼性の高い制御・保護システムが提供できる。

現在、東芝エネルギーシステムズ(株)は、イタリアのテルナ社から受注した、イタリア-モンテネグロ間を連系する大規模な海外 HVDC プロジェクトにおいて、変換所向け制御・保護システムの現地試験を進めている。

ここでは、電力システムリアルタイムシミュレーターを活用し

表 1. HVDC システムの一次機器定格諸元

Rated specifications of HVDC power transmission system

項目	仕様
他励式変換器構成	12相サイリスタ変換器
定格容量	500 MW × 双極
連続過負荷 定格容量	600 MW × 双極
定格直流電圧	±500 kV
定格直流電流	1,000 A
連続過負荷 定格直流電流	1,200 A
定格交流電圧	400 kV
変換用変圧器 (三相) 定格容量	690 MVA

た、HVDC の変換所向け制御・保護システムにおける工場試験の概要について述べる。

### 2. 変換所機器・システム構成

このプロジェクトにおける、直流双極一回線送電方式(中性点両端接地) HVDC システムの一次機器定格諸元を表 1

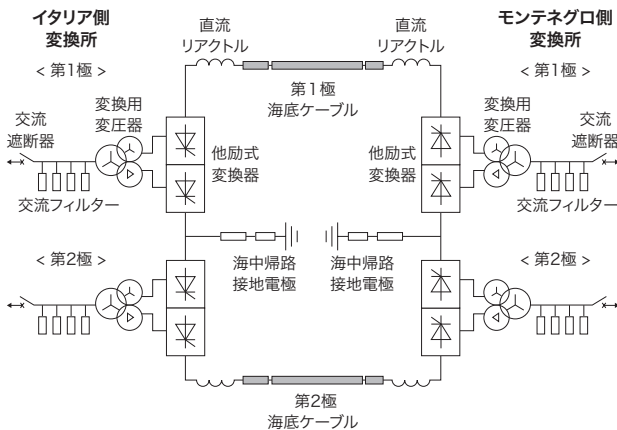


図1. HVDCシステムの全体構成

海外では一般的な直流双極一回線送電方式(中性点両端接地)である。

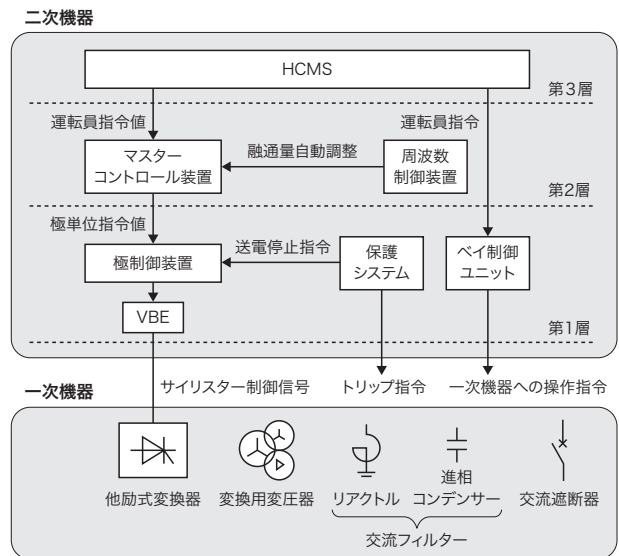
Overall configuration of HVDC power transmission system

に、簡単なHVDCシステムの全体構成を図1に、それぞれ示す。変換所の主要な一次機器には、電力の交直変換を行う他励式変換器及び変換用変圧器、変換器から発生する高調波の吸収と変換器の運転に必要な無効電力の補償とを行う交流フィルター、交流側の主系統と変換所を連系する交流遮断器などがある。

### 2.1 制御・保護システムの階層構造

一次機器を監視、制御、保護する二次機器としての制御・保護システムの階層構造を図2に示す。この制御・保護システムは、次に述べる3層の構成を採用している。

サイリスターブリッジで構成される他励式変換器は、サイリスターの点弧(ターンオン)タイミングを変えることで送電電力量を制御する。制御システムの中で、このプロセスを制御する第1層の極制御装置は、第2層のマスターコントロール装置から入力される極単位指令値である目標電力・電流値に従い、交流系統側の電圧に同期して送電電力量を高速制御する機能を持つ。周波数制御装置は、交流系統の周波数変動や電力動揺を検出し、動揺を抑制する系統間の送電電力融通量を算出する。マスターコントロール装置は、直流送電設備の運用状況に応じて最適な直流回路を半自動で構成し、周波数制御装置の計算結果も考慮した双極あるいは単極の送電電力バランスを調整する。第3層には、送電システムの状態を運用者に伝える表示機能と、運用者がシステムを操作する機能を持つ変換所監視制御システム(HCMS: HVDC Control and Monitoring System)がある。遠方の給電指令所とのインターフェース機能も、このHCMSに含まれている。



VBE: Valve Base Electronics

図2. 制御・保護システムの階層構造

一次機器に近い階層ほど、高いリアルタイム応答性が要求される。

Hierarchical structure of control and protection system

保護システムは、交流系統故障と変換所内一次機器の故障発生時の機器損傷を最小範囲に抑える責務を持っている。この保護システムは、制御システムとは独立して系統事故を検出し、送電停止指令及び交流側の交流遮断器トリップ指令を出力する構成としている。交流側と直流側に装置を分け、交流側には一般的な保護リレー(送電線保護、交流フィルター保護、母線保護、変圧器保護)を適用した。直流保護装置は専用に設計したもので、直流送電線路の運用方式を考慮して、一次機器ごとに保護装置を設けた。

制御・保護システムを構成する機器は、各階層で二重化されており、一方の機器が故障してももう一方の機器で運転継続が可能である。

### 2.2 事故記録システム

イタリア側とモンテネグロ側の変換所には、事故記録サーバーと事故記録ユニットから成る事故記録システムが設置されている。事故記録システムは、一般的なオシログラフ機能に加え、第50次高調波まで計測可能な周波数分析機能と海底ケーブルの事故点標定機能を持つほか、変換器でのサイリスター制御角をはじめとする各種制御パラメーターの動きを、ms間隔で常時記録可能である。更に、保護リレー要素動作時に発行されるGOOSEメッセージ<sup>(注1)</sup>を受信して

(注1) IEC 61850で定義されており、機器間の情報送達確認を省略し、機器動作情報を高速で伝える機能。

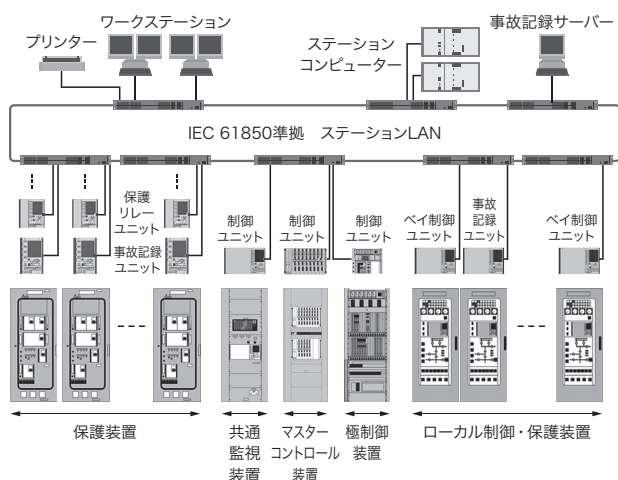


図3. 片側の変換所の制御・保護システムの構成

IEC 61850に準拠した制御・保護機器を多数採用することで、機器間の情報授受の詳細・高度化が図れる。

Configuration of one side of control and protection system

オシログラフとして記録・表示する機能を持ち、従来の接点出力では対応できないような、多数の保護リレー内部要素の動作信号を、オシログラフの記録上に電圧・電流波形と並べて表示し、確認できる。

### 2.3 IEC 61850プロトコルの適用

片側の変換所の制御・保護システムの構成を図3に示す。上記の各制御ユニットや、保護リレーユニット、事故記録ユニットをIEC 61850(国際電気標準会議規格 61850)のプロトコルを適用した冗長化LANで接続することで、サードベンダー製の機器を柔軟に組み込める制御・保護システムを実現した。

## 3. シミュレーターによる試験の目的

二つの交流系統間で50～1,200 MWの電力を高速融通制御するHVDCシステムの制御・保護システムは、交流系統をフィードバックループに含むクローズドループの一部を成している。また、潮流断面によって異なる各種系統運用シナリオや一次機器故障時の緊急制御を含む、制御・保護システムの制御特性と交流系統の整合性、及びフィードバック制御動作を、実システムを使用して検証試験することは非現実的である。このため、制御・保護システムの信頼性の高い性能評価には、電力系統リアルタイムシミュレーターと組み合わせた性能検証が不可欠である。

また、通常運用時はもちろん、機器異常時の警報出力や、画面の表示変化の視認性・デザイン、制御指令入力

の操作性などの評価には、運転員の視点からの検証も要求される。このプロジェクトでは、制御システムの実機動作を観察して改善に結び付けた事項も多く、制御システムの動作、HCMSの画面表示、更には直流保護リレーの整定協調についても、リアルタイムシミュレーターを活用した試験やデモンストレーションを通して、エンドユーザーからのフィードバックも反映した制御システムを作り込むことができた。

更に、一次機器の故障発生時には、保護リレーから、事故記録システム向けに大量のGOOSEメッセージが発行され、ステーションLAN上の通信負荷が一時的に激増する。この典型的なLAN負荷増大時における制御性能についても、リアルタイムシミュレーター試験により精度の高い検証が可能になる。

特に以下に述べる機能・性能は、電力系統リアルタイムシミュレーターの活用により、信頼性の高い検証を実現した。

- (1) 無効電力制御機能 定義されたシーケンスどおりに交流フィルターを開閉し、全電力範囲で、変換器が消費する無効電力が適切に補償されることを検証する。
- (2) ランバック動作 サイリスターバルブ冷却装置、交流フィルター、直流海底ケーブルの温度上昇など、異常発生時に送電電力を適切に抑制し、一次機器を熱による破損から保護する。
- (3) 系統事故・保護連動 保護リレーで事故検出し、適切な手順で送電停止し、変換所を交流系統から切り離す機能である。サイリスターバルブ内の短絡事故では、最速2ms以内に事故検出と送電停止の指令出力が要求される。
- (4) 高速潮流反転 交流系統の片側の変換所で異常な周波数変動が発生した場合に、送電方向を反転して系統周波数変動を緩和する緊急融通運転を行う。
- (5) 転流失敗発生時の制御性能 転流失敗が発生しても、運転を継続する性能を検証する。
- (6) 周波数動揺、電力動揺時の送電電力制御 交流系統の動揺を緩和する適切な潮流制御を実施する。
- (7) 電力指令値の大幅な自動/手動急変 運転員による、送電電力指令値の急激な変更に従従する。
- (8) 両側変換所間通信のレイテンシーの影響 両側の変換所の極制御装置間で、緊密な協調制御への影響を確認する。
- (9) 交流系統全停からの復電過程の変換器起動 極端な系統状態からの起動中に、不要な振動現象などが起きないことを確認する。

(10) 最大通信負荷時のLAN性能 制御・保護システムのLANが最大の通信負荷を渋滞・遅延なく処理できる通信帯域幅を持っていることを確認する。

#### 4. リアルタイムシミュレーターの構成機器

リアルタイムシミュレーターの構成を図4に示す。

本体には、RTDS Technologies Inc.製のRTDS (Real Time Digital Simulator)を使用した。図1の変換所一次機器を含むHVDCシステム、その両側の交流システムの動作をRTDS上のモデルで模擬する。設備の経済性や試験時の操作性・作業性を考慮して、交流系統詳細モデルと直流系統詳細モデルを個別に用意し、試験内容に応じて適切なモデルを使用した。

周辺機器(入出力装置)には、シミュレーターが模擬する系統各地点の電圧・電流信号を制御・保護システムの実機(被試験装置)への入力信号レベルに増幅して出力する電圧・電流アンプや、補助接点で取り込む断路器や接地開閉器などの機械動作を模擬するPLC (Programmable Logic Controller)ユニットなどがある。

これらを組み合わせて、両端の交流系統を含むHVDCシステム全体を模擬する試験環境を構築した。

#### 5. 試験結果の評価方法

制御・保護システムの機能面から、開閉器の操作や、変換器の起動停止、運転モードの切り替えなどの自動シーケンシャル・スイッチング制御機能試験と、送電電力量制御や系統事故対応を中心としたダイナミックな制御機能試験と

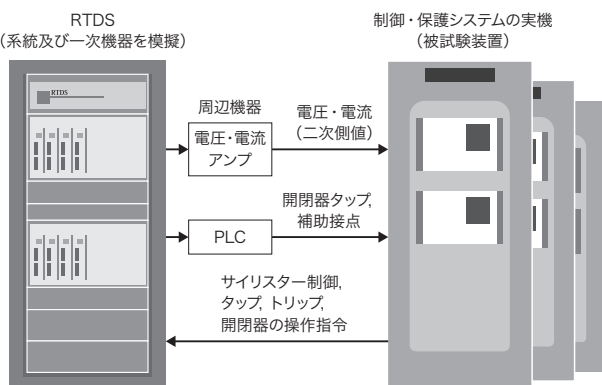


図4. リアルタイムシミュレーターを用いた試験構成

被試験装置の応動・出力をRTDSへフィードバックし、制御ループの特性を検証する。

Configuration of simulator test equipment

の、二つのフェーズに分けた試験を計画し、実施した。電力系統リアルタイムシミュレーターは、後者の試験において、より重要になる。

極制御装置の各種制御伝達関数は、プロジェクト初期に実施した制御システムの解析結果との整合性を電圧・電流波形で確認し、評価した。周波数制御装置は、周波数偏差から理論どおりの電力制御量が得られることを確認した。また、保護装置は、リレー動作値、動作時間を設計値と比較して評価するとともに、各種リレー要素間の適切な整定協調も確認した。

HCMSは、複数回のユーザー立ち会い試験を通して、運用者の視点から要求性能を満足するものとなるように改良を重ねた。

#### 6. リアルタイムシミュレーターを用いた試験結果

全30項目(約2,000ケース)の試験を実施して、良好な結果を得た。代表的な試験結果について述べる。

##### 6.1 ステップ応答試験

直流送電電力は、運転員の設定する電力・電流値と変化速度の指令値が主な目標として制御され、極制御装置には、ステップ状の指令値変化でも、最速で安定に追従する性能が要求される。シミュレーター試験では、様々な系統条件下で、50～1,200 MWの様々な電力・電流指令値のステップ変化に対して、安定に追従できる性能を確認した(図5)。

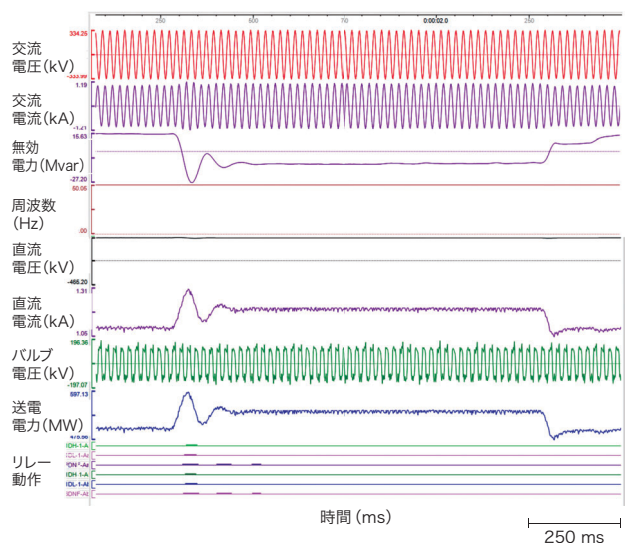


図5. シミュレーター試験結果の例

電力・電流指令値の急激な変化にも、安定に追従できていることを確認した。

Examples of results of simulator tests

## 6.2 転流失敗時の応動試験

他励式変換器は、交流系統側の電圧に同期して制御されるため、変圧器や調相設備投入時に発生する交流電圧変動や電圧波形歪み(ひずみ)の影響を受けやすい。逆変換器における転流失敗が代表的な現象であり、このとき、約400 kmにも及ぶ海底直流ケーブルの、浮遊静電容量からの放電電流は、変換器定格電流の7～8倍にも達する。単発転流失敗時には送電継続するが、サイリスターバルブの熱耐量を超えて電流が流れる連続転流失敗時には、これを適切に検出して送電停止が可能であることを確認した。また、連続転流失敗を未然に防止する $\gamma$ (ガンマ)制御(余裕角制御)機能の有効性も検証した。

## 6.3 高速潮流反転試験

交流系統での大幅な周波数変動に対して、これを適切に検出し、高速に潮流反転制御して周波数変動を緩和する機能が、設計どおりに動作することを確認した。

## 6.4 保護連動試験

系統及び一次機器における事故の状況に応じて、保護装置からは6種類の保護連動信号が出力される。これを受ける極制御装置では、ゲートシフト(GS)、ゲートブロック(GB)、バイパスペア(BPP)制御を組み合わせた適切な停止シーケンスが起動し、対向する変換所間通信の正常時、異常時ともに問題なく送電停止できることを確認した。

## 6.5 オープンラインテスト機能試験

片側の変換所の変換器単独運転で、変換器、直流母線、及び海底ケーブルの漂遊容量を徐々に充電して定格電圧まで課電し、直流回路の充電試験をする機能が適切に動作することを確認した。

## 6.6 直流送電回路の自動切り替え試験

単極運転、双極運転、海水帰路、金属線帰路など、様々な直流送電回路が選択でき、回路構成の自動切り替え機能が適切に動作することを確認した。

## 7. あとがき

海外市場における大容量長距離送電システムへのHVDC適用は、パワーエレクトロニクス機器・技術の進歩に伴い、今後も継続して成長拡大すると予想される。同時に、高度化するユーザーニーズに応じていくためには、技術と経験の蓄積が大きな力となる。

出荷した制御・保護システムは、現在、現地での調整試験が進められている。今後も、今回のリアルタイムシミュレーターを用いた試験で得られた、多くの貴重な知見を活用し、マーケット及び個別ユーザーの期待に応える高信頼の製品・サービスを提供していく。

## 文献

- (1) 電気学会直流送電専門委員会編. 直流送電技術解説. 電気学会, 1978, 246p.
- (2) 王 晁, ほか. “長距離直流送電技術”. 電気学会B部門・D部門 電力技術/電力系統/半導体電力変換合同研究会資料/宮古島, 2015-02, 電気学会, 2015, PE-15-027/PSE-15-049/SPC-15-080, p.7-12.
- (3) Wang, M. et al. "Commutation failure mitigation in long HVDC links". Proceedings of 2015 International High Voltage Direct Current Conference. Seoul, Korea, 2015-10, CIGRE Korea, 2015, p.31-36.
- (4) IEC TR60919-2:2008. Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters - Part2: Faults and switching.
- (5) IEC 61975:2010. High-voltage direct current (HVDC) installations - System tests.



奥田 実 OKUDA Minoru  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
電力流通システム事業部 電力系統技術部  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



正角 成泰 MASAKADO Nariyasu  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
府中工場 電力システム制御部  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



金田 啓一 KANEDA Keiichi  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
府中工場 電力システム制御部  
電気学会会員  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.