

再生可能エネルギーの導入拡大に貢献する HVDCシステム向け自励式交直変換設備

Voltage-Sourced Converter for High-Voltage DC Power Transmission Systems Facilitating Further Introduction of Renewable Energy

石黒 崇裕 ISHIGURO Takahiro

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、2023年に電力広域的運営推進機関(OCCTO)から「広域系統長期方針(広域連系系統のマスタープラン)」が示された。この中で、高圧直流送電(HVDC: High Voltage Direct Current)の導入が、複数計画されている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は2019年に、新北海道本州間連系設備(以下、新北本連系設備と略記)(第1極)のHVDCシステム向けに、我が国初^(注1)の自励式交直変換設備を実用化した。主要部品の自励式交直変換器にMMC(Modular Multilevel Converter)方式を適用し、高調波除去フィルターや調相設備を省略した。また、新北本連系設備の第2極増設工事向けの自励式交直変換設備も受注するなど、電力供給の安定化や再生可能エネルギー(以下、再エネと略記)の導入拡大に貢献している。

The movement to achieve carbon neutrality by 2050 has been gaining speed in line with the long-term vision of cross-regional network development proposed by the Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators, Japan (OCCTO) in 2023. The vision details plans for multiple high-voltage DC (HVDC) link construction projects in Japan.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has developed Japan's first voltage-sourced converter (VSC) for HVDC power transmission systems, featuring modular multilevel converters (MMCs) without AC filters or reactive power branches, which was delivered to Pole 1 of the New Hokkaido-Honshu HVDC Link in 2019. We have also been awarded a contract for a VSC at Pole 2 of the New Hokkaido-Honshu HVDC Link. Our expertise in developing VSCs contributes to ensuring a stable electricity supply and expansion of renewable energy.

1. まえがき

カーボンニュートラルの実現に向けた施策の一つとして、再エネの導入拡大が挙げられている。我が国は電力需要の高い地域から離れた箇所にも多くの再エネのポテンシャルがあり、また出力変動が大きい再エネを適切に活用するために、地域間の系統連系強化が必要とされている。このため2050年カーボンニュートラル実現に向けた広域連系系統の長期展望、及びこれを具体化する取り組みをまとめた「広域系統長期方針(広域連系系統のマスタープラン)」がOCCTOから発表されており、その中で、直流送電による新規系統連系ルートの建設が示されている。

直流送電には、電力系統で一般的に用いられている交流送電と比較して、長距離送電や電力ケーブルを用いた送電に適しているなどの特長があり、我が国でも北海道-本州間や本州-四国間の連系設備に利用されてきた。直流送電には、交流送電網との接続のために直流と交流を変換する交直変換器が必要であり、その方式は他励式と自励式に大別される。従来の電力系統向け用途では、大容量化が容易な

(注1) 2019年3月時点、当社調べ。

サイリスターを用いる他励式が一般的であったが、近年は、半導体デバイス技術などの進歩に伴いIGBT(絶縁ゲート型バイポーラトランジスター)やIEGT(電子注入促進型絶縁ゲートトランジスター)などの自己消弧型素子を用いる自励式の適用も進められてきた。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、北海道電力ネットワーク(株)の新北本連系設備のHVDCシステム向けに、我が国で初めての自励式交直変換設備を納入した。これは、2025年2月現在、我が国で唯一^(注2)商用運転している自励式交直変換設備を適用した地域間連系用のHVDCシステムである。自励式交直変換器にはMMC方式を適用し、高調波除去フィルターや電圧調整用の調相設備を不要にした。

ここでは、MMC方式の自励式交直変換器、これを適用した新北本連系設備の概要、及び自励式変換器技術に関する最近の当社の取り組みについて述べる。

2. MMC方式を適用した自励式交直変換器

2.1 MMC方式の概要

MMC方式を適用した自励式交直変換器(以下、MMC

(注2) 2025年2月現在、当社調べ。

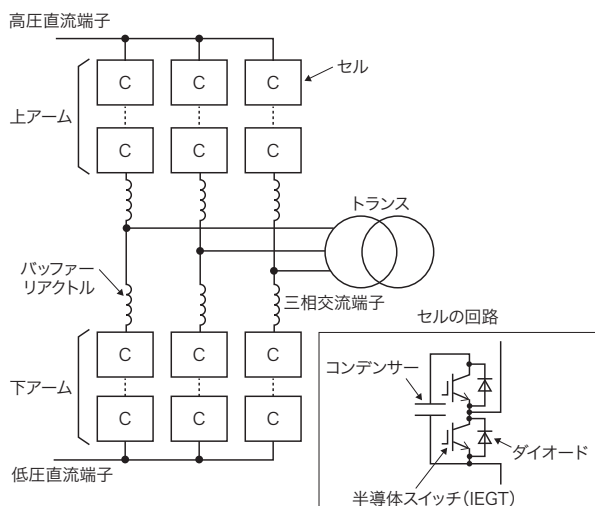


図1. MMC変換器の構成例

MMC変換器は、多数のセルを直列接続することで、容易に高電圧・大容量化を実現可能である。

Typical MMC circuit diagram

変換器と略記)は、パワー半導体とコンデンサーから成るセルを多数用いて構成する(図1)。MMC変換器は高圧・低圧の直流端子及び三相の交流端子との間に接続され、直流・交流間の電力変換を行う。MMC変換器の高圧側又は低圧側の1相分の回路をアームと呼び、各アームはセルを多数直列接続して構成する。各セルは、コンデンサー1個、半導体スイッチ2個、及びダイオード2個から成り、その出力電圧は半導体スイッチの制御によりコンデンサーの電圧又はゼロのいずれかが適切な方が選択される。

HVDCシステム向けのMMC変換器は、一つのアームは100程度若しくはそれ以上のセルで構成され、各セルの出力電圧は独立に制御可能であることから、MMC変換器は高調波成分の少ない直流・交流電圧を出力できる。そのため、高調波除去フィルターを省略若しくは小型化可能である。また、他励式変換器では必要な調相設備も不要になる。

2.2 MMC変換器を適用したHVDCシステム特有の機能

MMC変換器を含む自励式交直変換器を適用したHVDCシステムには、交流系統の安定化や再エネ導入拡大に貢献する特有の機能がある。

(1) 有効電力・無効電力制御機能 自励式交直変換器は、交流系統電圧によらず任意の電圧を出力可能であり、これにより定格の範囲内で有効電力と無効電力の出力を高速かつ自由に制御できる。

(2) 直流本線の架空線地絡事故時の高速再起動機能

MMC変換器を適用したHVDCシステムで直流線路の地絡事故が発生すると、セル内のダイオード

を通じて事故点に過大な電流が流れるが、半導体スイッチをオフすることでコンデンサーの放電は避けられる。直流架空線事故では、落雷などによる一過性の地絡事象であるケースもあり、このような場合は、一度交流遮断器を開放して事故除去した後に、MMC変換器の再充電不要で速やかに再起動し、送電を再開できる。

(3) ブラックスタート機能 自励式交直変換器は、交流系統電圧によらず任意の電圧を出力可能であることから、ブラックアウトが発生した場合にも健全系統の電力を用いて停電系統に電力を供給できる。また、この機能を活用して元々電力系統の存在しない洋上風力システムと接続して風力発電機を起動し、陸上まで送電を行うことも可能である。

3. 新北本連系設備

3.1 新北本連系設備の概要

新北本連系設備は、北斗変換所(北海道)と今別変換所(青森県)の間を直流送電線で接続する設備である。

北海道-本州間では、定格容量600 MW (300 MW × 2)の既設連系設備が運転されており、新北本連系設備の運転開始により合計900 MW (300 MW × 3)の直流連系設備で北海道と本州の電力系統が連系されることになった。新北本連系設備の主要定格を表1に、自励式交直変換器の外観を図2に示す。

新北本連系設備に適用される制御・保護システムの概略構成を、図3に示す⁽¹⁾。最上位には総合共通制御装置や系統制御装置などの共通制御・保護装置(Common Control & Protection Panels)があり、極単位の制御保護は、極制御装置(Pole Control)、VBE (Valve Base Electronics)^(注3)、極保護装置(Pole protection)などが担う。これらの装置が協調して動作する。

3.2 新北本連系設備の機能検証

HVDCシステムは複数の主回路機器と制御・保護システムで構成されることから、システムの機能検証にあたっては

表1. 新北本連系設備の主要定格

Main specifications of New Hokkaido-Honshu HVDC Link

項目	定格
定格容量、無効電力	300 MW, +/-100 Mvar
定格直流電圧	250 kV
定格直流電流	1,200 A

(注3) 上位装置からの指令を受けて変換器への指令値を演算し、変換器に対して直接指令を出力する装置。



図2. 新北本連系設備向け自励式交直変換器

自励式交直変換器にはMMC方式を適用し、高調波フィルターや調相設備の省略を実現した。

VSC for New Hokkaido-Honshu HVDC Link

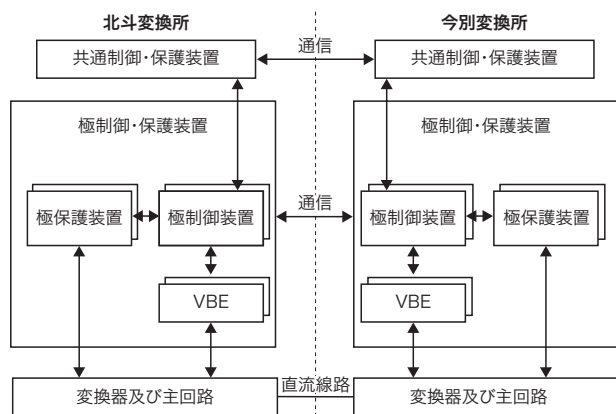


図3. 新北本連系設備向け制御・保護システムの概略構成

北斗変換所と今別変換所間の制御・保護装置は通信により接続し、各装置が協調して動作する。

Configuration of protection and control system for New Hokkaido-Honshu HVDC Link

各機器・装置単体の試験に加え、システム全体の総合的な健全性を確認する検証試験が必要である。新北本連系設備で実施した主な装置組み合わせ試験は、次のとおりである。

- (1) シミュレーター試験 HVDCシステムは、様々な系統状態に対して安定に動作して、有効電力や無効電力出力を適切に制御する必要がある。また、系統擾乱（じょうらん）が生じた場合には、高い運転継続性能と、適切な機器の保護が求められる。一方で、事故を含む様々な系統状態を実系統で再現することは非現実的であることから、一般的に、系統や主回路機器の動作を模擬するリアルタイムシミュレーターと制御・保護装置の実機とを組み合わせるシミュレーター試験により、制御・保護システムの

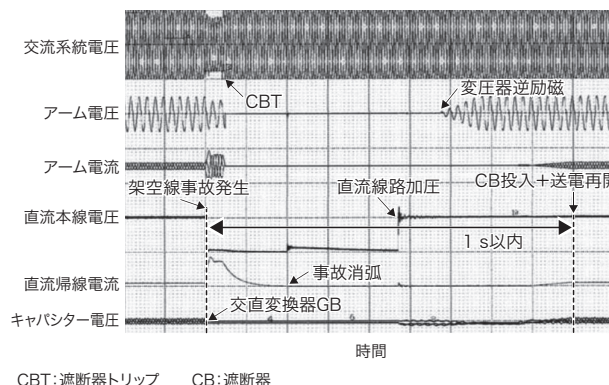


図4. シミュレーター試験による直流本線架空線地絡事故検証結果

直流本線の架空線部で地絡事故が発生した後、事故電流遮断のため自励式交直変換器がGBし、事故消弧後に変換器を再起動して送電再開する。

Waveform data obtained using simulator in case of line-to-ground fault of DC main line

機能検証を行う。

シミュレーター試験での検証結果の例として、直流送電線地絡事故試験を行った際の波形を図4に示す。直流本線の架空線部で地絡事故が発生して交直変換器がGB（Gate Block：全ての半導体スイッチをオフすること）した後、再起動シーケンスが正常に動作し、1 s以内に送電再開が可能であることを確認した。

- (2) 系統連系試験 HVDCシステムは、現地で各種主回路機器や制御・保護装置を据え付けた後、運転開始に先立って、システムを実系統に連系した状態で各種機能の検証を行うのが一般的である。

新北本連系設備で実施した系統連系試験結果の例として、ブラックスタート機能の検証結果を図5に示す⁽²⁾。試験では北海道側の変換所の所内電源を喪失した状態から、非常用電源を用いて所内電源を復旧した後に自励式交直変換器を起動し、ブラックアウトした系統に電力供給可能であることを確認した。この試験では、停電システムの模擬のために北海道側にある商用系統の一部の設備を用いた試験系統を構築し、それ以外の系統には影響を与えることなく検証を実施した。

4. 最近の取り組み状況

- (1) 新北本連系設備第2極増設工事 2025年現在、新北本連系設備の第2極増設工事が進められており、定格容量が300 MWから600 MW（300 MW×2）に倍増する計画である。当社は、このうち交直

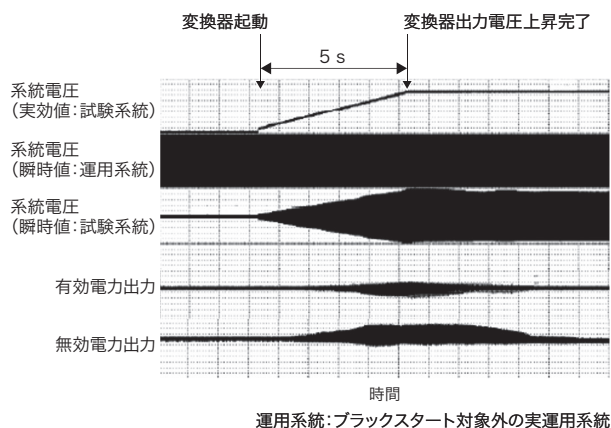
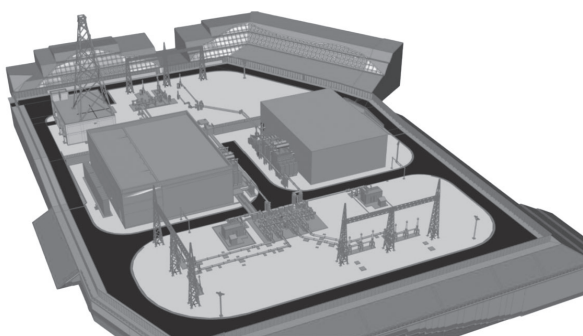


図5. 系統連系試験によるブラックスタート検証結果

試験系統を用いて、ブラックアウト時にも自励式交直変換器から電力供給が可能であることを確認した。

Waveform data measured in commissioning test in case of black start



画像提供:北海道電力ネットワーク(株)

図6. 北斗変換所完成予想図

新北本連系設備第2極増設後は、合計600 MWの定格容量に倍増する。

Bird's-eye view of Hokuto converter station

変換設備を受注した。既設の第1極と新設する第2極は直流帰線を共用する双極構成となり、また共通の交流系統に接続するシステムとなることから、シミュレーター試験や系統連系試験などを通じて第1極と第2極が協調して運転可能であることの検証が必要である。第2極増設後の北斗変換所予想図を、図6に示す。

- (2) 電力系統用STATCOM 当社は、MMC方式を適用した無効電力補償装置 (STATCOM) も実用化している。STATCOMは、再エネの出力変動に伴う電圧変動を改善する効果がある。2024年8月には、四国電力送配電(株)中村変電所納入のSTATCOM (出力容量 ± 40 MVA) が運転開始した。また、東北

(注4) 2025年2月現在、当社調べ。

電力ネットワーク(株)の上北変電所用として世界最大規模^(注4)のSTATCOMを受注し、2031年末までに運転開始を予定している。今後も再エネ導入の拡大に伴い、電力系統用STATCOMの需要は伸びていくことが予想されている。

5. あとがき

当社は、新北本連系設備の地域間連系用HVDCシステム向けに、我が国初の自励式交直変換設備を実用化した。商用運転前には、シミュレーター試験や系統連系試験などにより、特殊機能を含むシステム全体について健全性の確認を行った。更に、新北本連系設備第2極増設や、電力系統用STATCOM需要に向けての取り組みも進めている。

今後も、自励式交直変換技術により、カーボンニュートラルの実現に向けた再生可能エネルギーの導入拡大に貢献していく。

文 献

- (1) 新井卓郎, ほか, “新北海道本州間連系設備に適用した300 MW-250 kV自励式変換器の事故時運転継続機能”, 2019年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 長崎, 2019-08, 電気学会, 2019, 論文番号1-85.
- (2) 三浦昭彦, ほか, “新北海道本州間連系設備に適用した自励式変換器のブラックスタート機能”, 令和元年電力・エネルギー部門大会論文集, 広島, 2019-09, 電気学会, 2019, 論文番号111.



石黒 崇裕 ISHIGURO Takahiro

東芝エネルギーシステムズ(株)グリッド・ソリューション事業部
パワーエレクトロニクスシステム技術部
電気学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.