

HVDC用 高電圧・大容量マルチレベル変換器

High-Voltage, Large-Capacity Modular Multilevel Converter for High-Voltage DC Transmission Systems

新井 卓郎

中沢 洋介

爪長 正宏

■ ARAI Takuro

■ NAKAZAWA Yosuke

■ TSUMENAGA Masahiro

高圧直流送電 (HVDC : High Voltage Direct Current Transmission) は、大容量で長距離の送電に適した方式として世界中で実用化されている。しかし、HVDCシステムと既存の交流システムを接続するには、数十万V級の高電圧かつ大容量の交直変換器が必要である。

東芝は、フィルタなどの付帯設備が不要で、高電圧に適したモジュラーマルチレベル変換器 (MMC : Modular Multilevel Converter) を応用した独自の3巻線トランスMMCを開発した。これにより、受動素子を削減し設置面積を低減した高効率な交直変換器を実現できる。

High-voltage DC (HVDC) transmission systems are in practical use throughout the world for large-capacity and long-distance electricity transmission. However, the connection of HVDC and existing AC grid systems requires large-capacity AC-to-DC converters with a high voltage in the 100 kV class.

Based on its proprietary multilevel topology, Toshiba has developed a modular multilevel converter (MMC) equipped with three-winding transformers that has good performance for high voltage without the need for ancillary equipment such as filters. This high-efficiency converter makes it possible to reduce the number of passive elements and thus reduces the footprint of the system.

1 まえがき

地球温暖化や化石燃料の枯渇などエネルギー問題が叫ばれるなか、安定した電力供給を実現するために、電気を“使う”側と“創る”側だけでなく、“送る”側にも高品質、高効率、及び高信頼性が求められている。

高圧直流送電 (HVDC : High Voltage Direct Current Transmission) は、大容量で長距離の送電に適した方式として、大規模発電所から大都市への送電や、海底ケーブルを使用した系統連系を目的として、世界中で実用化されている。この送電方式は、通常の高圧交流送電と比較して、送電距離が長いほど (架空送電の場合は数百km以上、ケーブルの場合は数十km以上) 最適な送電方式となるからである。既にわが国でも、北海道・本州直流連系設備や紀伊水道直流連系設備が運転を行っている⁽¹⁾。今後は、HVDC技術を適用して、洋上の風力発電や砂漠地帯の太陽光発電、太陽熱発電など、大規模な再生可能エネルギーを大陸間で連系する構想もある。

既存の交流送電網にHVDCシステムを導入する場合、交流から直流に、又は直流から交流に変換するために、半導体スイッチを適用した交直変換器が不可欠である。更に、HVDCでは非常に高い電圧を変換する必要があり、数十万V級の高電圧かつ大容量の交直変換器が必要になる。

従来のHVDCシステムに採用されている交直変換器は、半導体スイッチにサイリスタを適用した他励式変換器が主流である。しかし、他励式変換器は、調相設備や低次高調波フィ

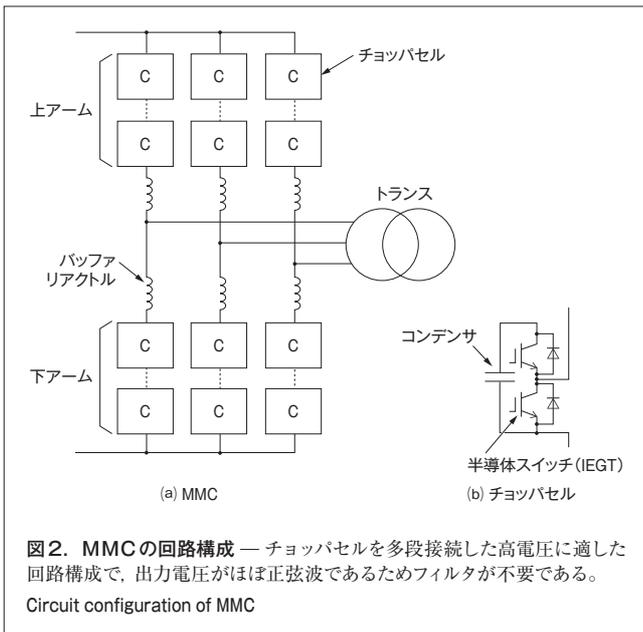
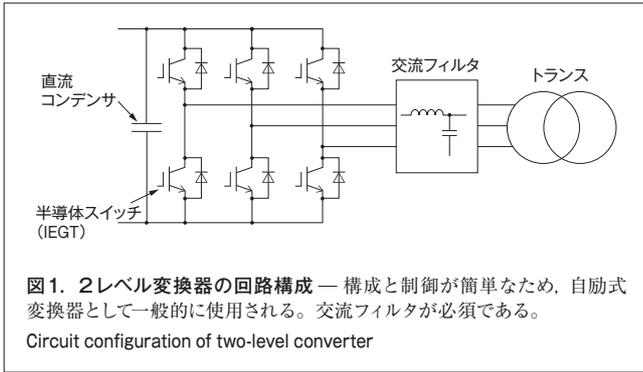
ルタなどの付帯設備による設置面積の増大が課題であり、交直変換器の動作が交流電源に依存することに対する改善が期待されていた。そこで近年、HVDCシステム向けに IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) など自己消弧型の半導体スイッチを適用した自励式変換器が注目を集めている。自励式変換器は、付帯設備の容量を低減するだけでなく、交流電源がない系統でも運転が可能で、いわゆるブラックスタート機能を備えており、交流システムの電圧安定化も可能である。

東芝は、HVDCシステム用自励式変換器として、高品質かつ高効率で信頼性の高い3巻線トランスモジュラーマルチレベル変換器 (MMC : Modular Multilevel Converter) を開発した。ここでは、3巻線トランスMMCの原理と、試作したHVDCシステムモデルの検証結果について述べる。

2 HVDCシステム用自励式変換器

一般的な自励式変換器である2レベル変換器の回路構成を図1に示す。この回路は、上下アームの半導体スイッチと直流コンデンサ、及び交流フィルタで構成されている。実際の2レベル変換器の半導体スイッチは、高耐圧化のために多直列に接続し、一つのスイッチとみなして使用する。多直列の半導体スイッチを上下交互にオン/オフし、そのオン時間を調整することで交流電圧を出力する。

これに対し、HVDCシステム用自励式変換器としてMMCが注目されている⁽²⁾。MMCの回路構成を図2に示す。この回



路は、半導体スイッチとコンデンサで構成されたチョップセルと呼ばれる単位変換器を構成要素とし、チョップセルが多数直列に接続されたアームと短絡電流抑制用のバッファリアクトルで構成される。

2レベル変換器及びMMCの動作原理と出力電圧波形を表1に示す。2レベル変換器は各相1組の半導体スイッチだけで交流電圧を出力するため、出力電圧は短冊状の波形となり、正弦波の交流系統と接続するためには交流フィルタが必要になる。この交流フィルタはHVDCシステム用自励式変換器のコストの約60%を占めており、変換器のコストの増大を招いている。また、スイッチングを高速に行い、交流フィルタを小型にすることもできるが、損失が増加する。一方、MMCは、各チョップセルの動作タイミングをずらすことで階段状のマルチレベル電圧波形を出力でき、出力する交流電圧をほぼ正弦波にできるため、交流フィルタが不要になる。更に、MMCは比較的低電圧のチョップセル内にコンデンサを備えているため、2レベル変換器のような高電圧の直流端子に接続するコンデンサが不要になる。

表1. 2レベル変換器とMMCの比較

Comparison of principles and waveforms of two-level converter and MMC

方式	2レベル変換器	MMC
動作原理		
出力電圧波形		

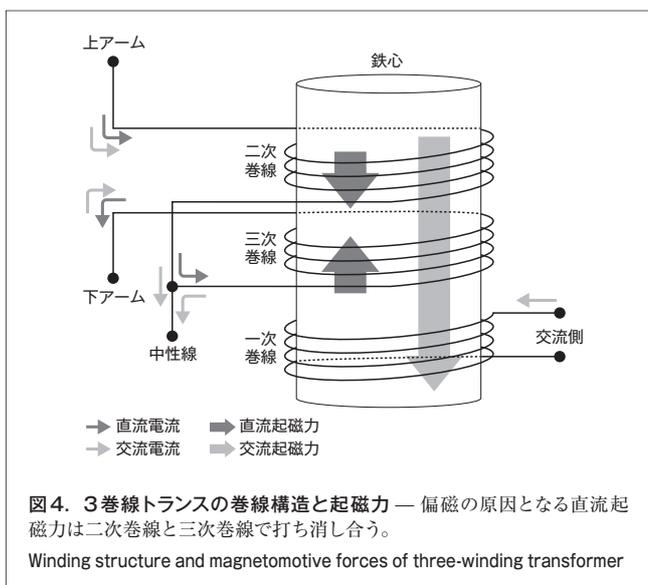
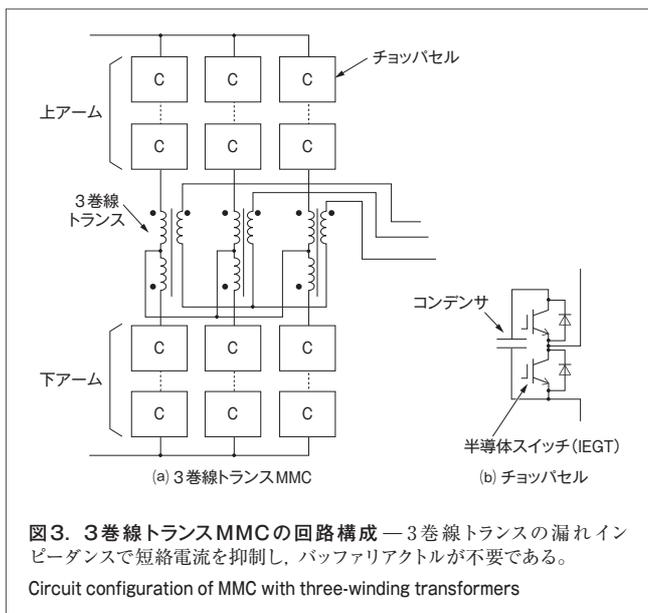
このように、交流フィルタと高耐圧のコンデンサが不要なMMCは2レベル変換器よりコストを低減できる。しかし、2レベル変換器が半導体スイッチだけを多直列化する構成であるのに対して、MMCは多段接続したチョップセルとバッファリアクトルで構成するために、部品点数が多い。そのため、設置面積やコストの更なる低減のために、部品点数の削減が求められている。

3 3巻線トランスMMCの概要

当社は、フィルタが不要で高効率なMMCの基本原理を応用し、部品点数を削減した独自の3巻線トランスMMCを開発した。

当社が開発した3巻線トランスMMCの回路構成を図3に示す。この回路は、上下アームそれぞれの多段チョップセルと交流系統が3巻線トランスで接続されることに特徴がある。3巻線トランスの漏れインピーダンスで短絡電流を抑制するため、従来のMMCで必要であった6台のバッファリアクトルが不要になる。このとき、回路動作上は3巻線トランスの漏れインピーダンスとバッファリアクトルは同様の働きをする。したがって、従来のMMCと同様の制御アルゴリズムによって3巻線トランスMMCを制御できる。受動素子であるリアクトルが不要になるため、変換器の設置面積とコストが低減できる。また、3巻線トランスは、多段チョップセルによって正弦波に近い電圧が印加されるため、高調波に対する特別な対策は不要である。

3巻線トランスの巻線構造と鉄心に生じる起磁力を図4に示す。二次巻線と三次巻線は減極性になるように接続され、同一鉄心に巻かれる。その際、ターン数、構造、及び寸法は等しくさ

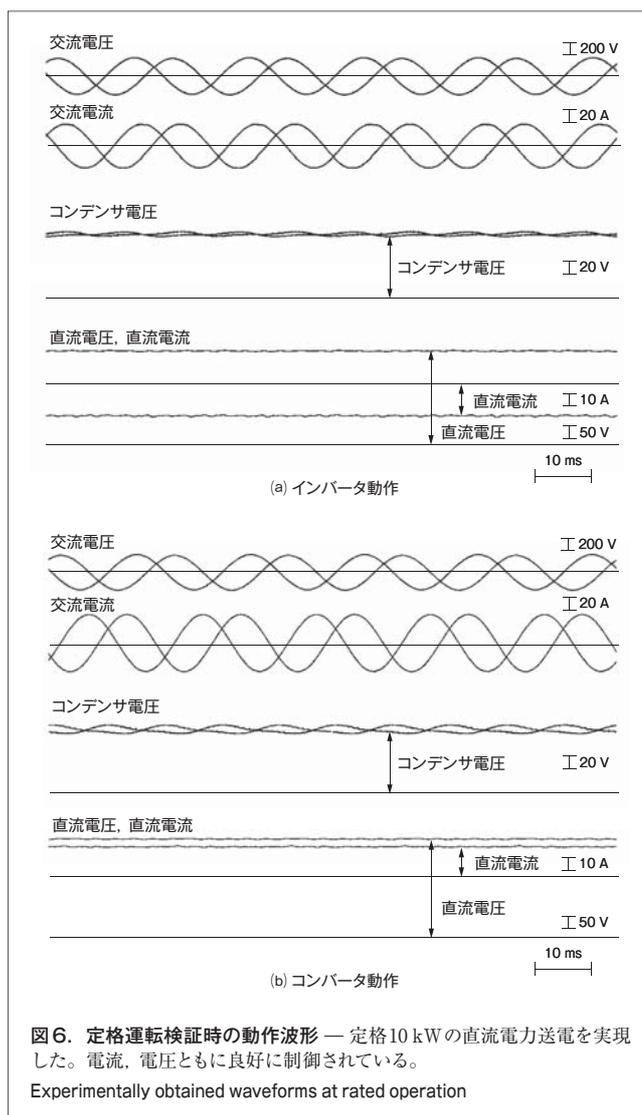
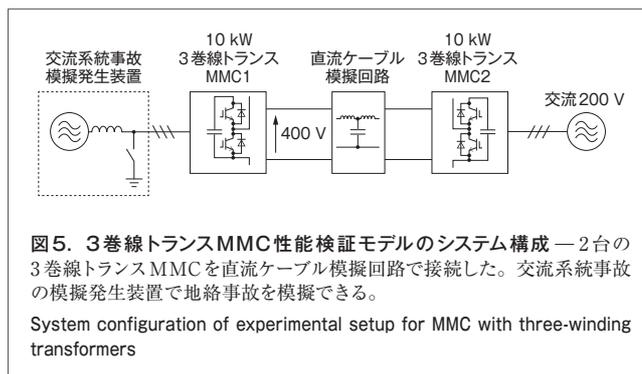


れる。MMC内の直流電流は、上側のアームから二次巻線と三次巻線を通り下側のアームへ流れる。したがって、二次巻線と三次巻線をそれぞれ流れる直流電流による直流起磁力は、互いに逆極性になって打ち消し合い、鉄心内に直流磁束は生じない。更に、同一相内で直流起磁力を打ち消すことができるため、事故時などに交流系統に不平衡が生じた場合でも、トランスの鉄心は偏磁や飽和せずに動作できる。

4 HVDCシステムモデルによる性能検証結果

4.1 性能検証モデルの仕様

開発した3巻線トランスMMCの動作を確認するために、HVDCシステムの性能検証モデルを試作した。性能検証モデル



ルのシステム構成を図5に示す。変換器は定格電力10 kW、直流電圧400 Vで、1アーム当たり4段のチョッパセルで構成した。2台の変換器は、T型等価回路による直流ケーブル模擬回路を介して接続した。

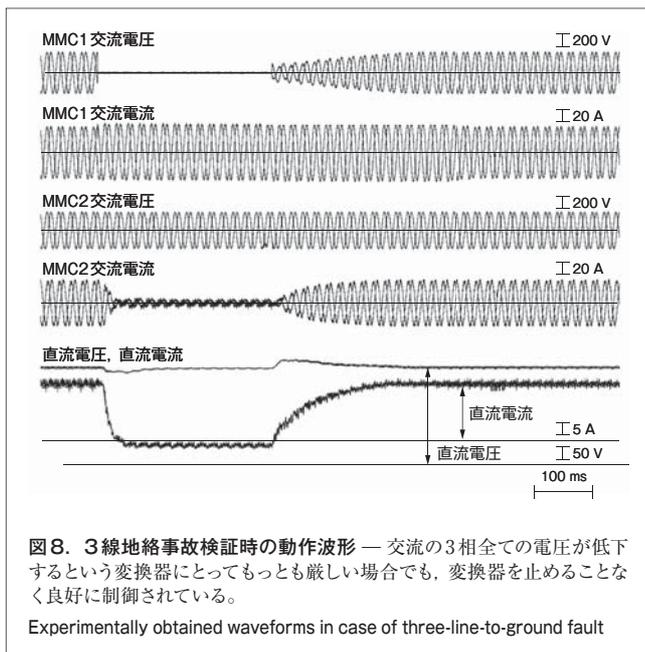
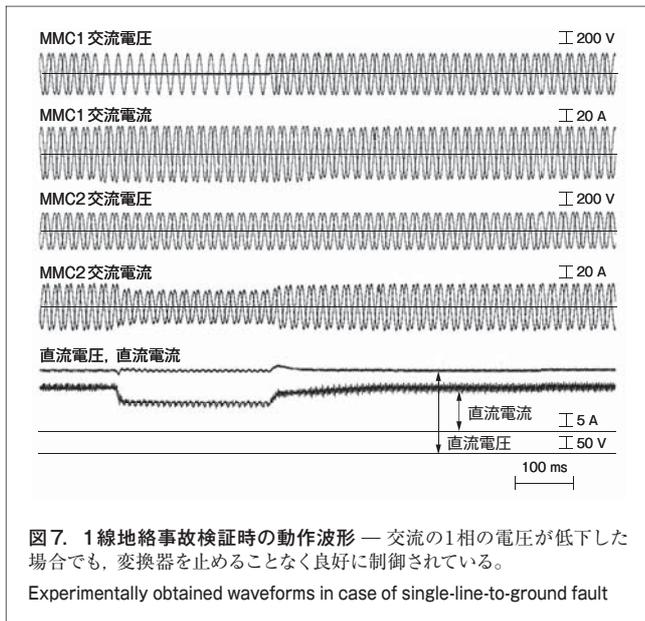
4.2 性能検証結果

定格10 kW運転時の動作波形を図6に示す。交流電流は、

交流フィルタがなくてもひずみの小さい正弦波に制御されている。3相で24あるチョッパセルのコンデンサ電圧は、全て良好にバランスしている。直流電圧は400 V、直流電流は25 Aに制御され、10 kWの直流電力送電が実現した。

1線地絡、残電圧0%の交流系統事故時の動作波形を図7に示す。交流の1相だけ電圧が低下した場合でも、交流電流は正弦波に制御されており、不平衡事故が生じて過電圧や過電流で変換器が停止することはない。事故が除去されると、速やかに定格10 kW運転へ移行する。

3線地絡、残電圧0%の交流系統事故時の動作波形を図8に示す。交流の3相全ての電圧が低下するという変換器に



とってもっとも厳しい事故の場合でも、交流電流は正弦波に制御されており、変換器が停止することはない。3線地絡事故が生じると、交流側から電力を供給できないため、一時的に直流電流がゼロ付近まで低下し、直流電力送電を停止する。事故が除去されると、1線地絡事故と同様に速やかに定格運転へ移行し、運転継続を実現した。

5 あとがき

HVDCシステム用 交直変換器として、マルチレベル回路方式を応用した3巻線トランスMMCを開発した。3巻線トランスを適用した回路構成にすることで、高効率化と部品点数の削減を実現した。今後、今回得られたMMC技術を発展させ応用し、複数の交流系統をHVDCで接続するHVDCグリッド用の変換器を開発していく。

文 献

- (1) 堀内恒郎 他. 広く適用されている高電圧・大容量基幹系統用パワーエレクトロニクス装置. 東芝レビュー. 55, 8, 2000, p.8-15.
- (2) Lesnicar, A.; Marquardt, R. "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range". 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, vol.3. Bologna, Italy, 2003-06, IEEE, 2003.



新井 卓郎 ARAI Takuro

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワーエレクトロニクス開発部。パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。電気学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



中沢 洋介 NAKAZAWA Yosuke

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワーエレクトロニクス開発部長。電気機器・パワーエレクトロニクスの研究・開発に従事。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



爪長 正宏 TSUMENAGA Masahiro

社会インフラシステム社 電力流通システム事業部 パワーエレクトロニクスシステム技術部長。電力系統用パワーエレクトロニクスシステムのエンジニアリング業務に従事。
Transmission & Distribution Systems Div.