

浮体式洋上風力向け HVDC変換器システム

灘 香帆*
Kaho Nada
畠尾昌弘*
Masahiro Hario
山中大輔*
Daisuke Yamanaka

Floating Offshore Wind HVDC Converter Station

*系統変電システム製作所

要 旨

2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けて、大量導入やコスト低減が可能で経済波及効果が期待される、洋上風力発電が再生可能エネルギーの主力電源と考えられている。これまで欧州を中心に洋上風力発電の導入が拡大しているが、洋上で生成された再生可能エネルギーを陸上の需要家エリアまで海底ケーブルを介して送電するために、浮体式洋上プラットフォーム上に高圧直流送電(HVDC(High Voltage DC))用変換器を設置する必要がある。

今回三菱電機は、浮体式洋上プラットフォームへの実装を想定し、HVDC変換器を構成する小型化・低損失化した単位変換器(サブモジュール:SM)の設計・製作とその検証試験及びバルブタワーの設計を実施し、HVDC変換器システムの開発に目途を得た。

1. ま え が き

近年、先進各国は、地球温暖化防止に向けてカーボンニュートラルの実現に向けた取組みを進めており、特に発電分野では大型再生可能エネルギー源として主に太陽光発電と風力発電の設置が進んでいる。しかし、陸上では開発可能な地点に限界があるため、洋上を利用した風力発電に期待が寄せられている。特に、欧州では各国の排他的経済水域を活用した洋上風力発電の実用化が既に始まっている。欧州と異なって遠浅海域の少ない日本では、欧州で主流の着床式洋上風力発電設備の建設に適した海域に限られるため、水深源が50mを超えるような海域に展開できる浮体式の洋上風力発電設備が望まれる。洋上の風力発電風車群から遠く離れた陸地までは海底ケーブルで送電することになるが、陸上で一般的な交流送電を海中で適用すると、導体と大地(海水)間でケーブルの絶縁を介して流れる充電電流が大きく、ケーブルの電流容量が制限されて長距離の送電ができない。効率良く海中で長距離送電を行うには、風車から送られてきた交流電力を洋上で集めて一旦直流に変換し、海中を送電した後、陸地で交流に再変換して電力系統に接続するHVDCシステムが必要になる(図1)。このシステムでは風力発電で得られた電力を効率良く交流/直流に変換できるHVDC変換器が、既存系統への接続点となる陸上と風力発電設備近傍の洋上に必要になるが、特に洋上のHVDC変換器は面積の限られた浮体式洋上プラットフォーム上に設置しなければならない。

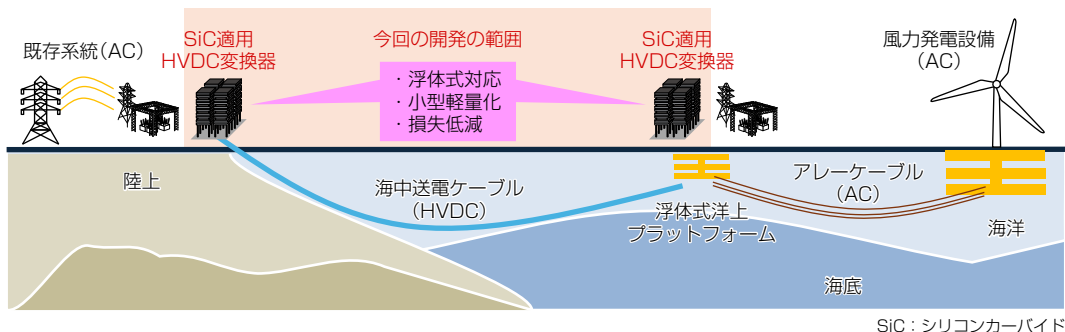


図1-浮体式洋上風力向けHVDC変換器システム

本稿では、当社がカーボンニュートラルへの貢献に向けて浮体式洋上風力向けHVDC変換器システム用に開発したSiCパワー半導体採用の小型で低損失なSMについて、その適用技術と検証試験結果を述べる。

2. HVDC変換器のシステム構成

洋上風力発電設備は1GW程度の容量があり、直流側端子で $\pm 250\text{kV}/2,000\text{A}$ 、変圧器の変換器側で交流 $250\text{kV}/2,300\text{A}$ 程度の電圧/電流を制御できる自励式の変換器として、モジュラーマルチレベルコンバーター(MMC)型HVDC変換器が採用されている。MMC型HVDC変換器システムは図2左に示すとおり、変換器用三相変圧器1台と変換器を構成する各相の上下アーム3対の合計6アーム、及び各アームを制御するデジタル制御装置と変換器を保護するデジタル保護装置から構成されている。デジタル制御装置とデジタル保護装置は光中継装置を介して光ファイバーによって各SMと結ばれている。回路はフェーズリアクトルとアーム中の数百台規模のSMが直列に接続された構成(図2左)であるが、物理的にはSMを40~60台ごとにまとめて対地絶縁したバルブタワー(図2右下)(詳細は3.3節を参照されたい。)に搭載する構成になっている。変換器容量に応じてバルブタワー台数が異なるが、変換器システム全体としては、絶縁距離を含めて10m四方で高さ20m近いバルブタワーを多数並べる必要があり、バルブホール(図2右上)と呼ばれるサッカーグラウンドにも匹敵する巨大な構造物になる。

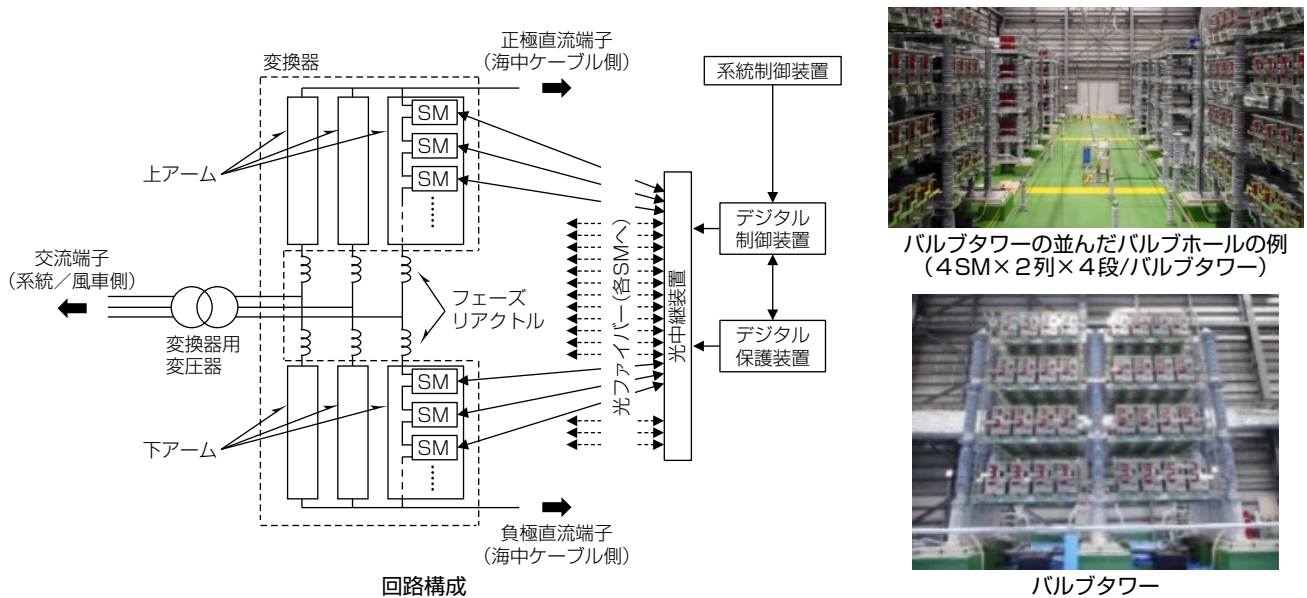


図2-MMC型HVDC変換器システム

3. SMの開発

この章では、SMの開発について述べる。

3.1 SMの小型化・低損失化

浮体式洋上プラットフォーム上にMMC型HVDC変換器を設置する際、変換器を構成するSMのサイズの小型化が求められる。従来のSMは半導体素子にSi(シリコン)モジュールを適用したハーフブリッジ構成が一般的であるが、今回の開発では半導体素子のサイズが小さくスイッチング損失が低いパワー半導体で、かつ電力事業以外で使用実績のある当社製SiCパワーモジュールを適用し、ハーフブリッジを上下対称に直列接続したデュアルハーフブリッジ構成として半導体素子部分の小型化を実現するとともに、スイッチング周波数の向上とリップルの削減制御によって構成部品のキャパシタの容量を下げることで、SM体積の低減を実現した。低損失化は、SMの半導体素子にSiCパワーモジュールを適用して半導体損失を低減したことに加えて、SM内の電力給電回路を多段直列接続したDC/DCコンバーター方式として変換効率を向上させたことで実現した。多段直列接続のDC/DCコンバーターは段間の電圧バランスを取るのが難しいという課

題がある。このSMでは電圧調整回路を一つにまとめつつ、各段の電圧バランスを図れるDC/DCコンバーターを開発し、採用したことでその課題を解決している。事故時にSM出力を短絡するバイパススイッチについては、エネルギー密度が高いデュアルハーフブリッジ構成のSMの短絡電流を投入できる小型の真空遮断器を開発し、搭載している。図3に開発したSMの外形を示す。



図3-SMの外形

3.2 SMの高機能化

MMC型HVDC変換器システムの保護機能の一つとして、各アームに設けた電流センサーを用いた過電流保護機能がある。従来の過電流保護機能では、一部のSM内やSM間で発生する部分短絡等の過電流は保護できないため、部分短絡等の過電流が発生するとSMが破壊し、復旧までに長期間の運転中止を伴うリスクがあった。そこで、リスク抑制と稼働率の向上を狙って、SM内で短絡検出・保護を行うローカル保護機能を搭載した。4章で述べるSMの検証試験の結果、十分な保護機能を持っていることを確認した。

3.3 バルブタワーの設計

バルブタワーはMMC型HVDC変換器システムの構成要素であるSMを複数個搭載して対地絶縁を確保した構造物である(図4)。一般には搭載するSMの数が多い方が空間利用効率が高いが、対地絶縁を確保するためのステーションポストがいしにかかる応力が課題になる。また耐電圧仕様に準拠するために、電界緩和シールドや水冷配管の配線経路、支持構造の最適設計が重要である。さらに、浮体式洋上プラットフォームに設置する場合、陸上に設置する場合と耐振動要求が異なり、波浪による繰り返し振動と傾斜を考慮する必要がある。これらの設計条件を考慮し、直流±320kVのバルブタワーの設計を完了した。詳細は参考文献(1)を参照されたい。

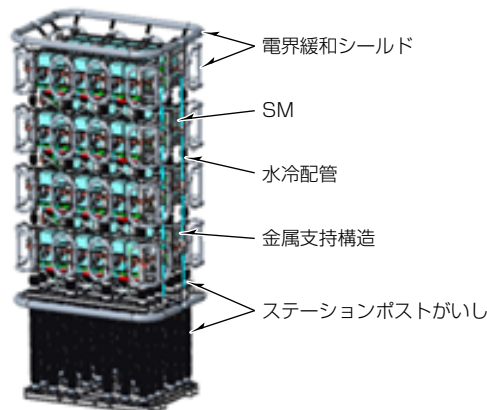


図4-バルブタワーの外形

4. SMの検証試験

この章では、SMの検証試験について述べる。

4.1 2SM試験

HVDCシステムの電気試験規格であるIEC 62501規格に基づいて、SiCを適用したSMの単体試験を行った。また、複数のSMを接続して試験を行う組合せ試験(Hブリッジ試験)の実施前に、Hブリッジ試験よりも少ないSM台数で実施でき、かつ定格運転相当の通電が可能である2台のSMを用いた主回路通電試験(2SM試験)を行った。2SM試験の回路を図5に示す。リアクトルを介して、2台のSMを対向させて、図5中に示すSM2を通電試験対象、SM1は試験設備として使用した。図6に試験結果を示す。試験対象のSM2は、MMC型HVDC変換器システムの定格運転時と同等の電圧・電流で動作しており、開発したSMが電氣的・熱的性能を満足していることを確認した。

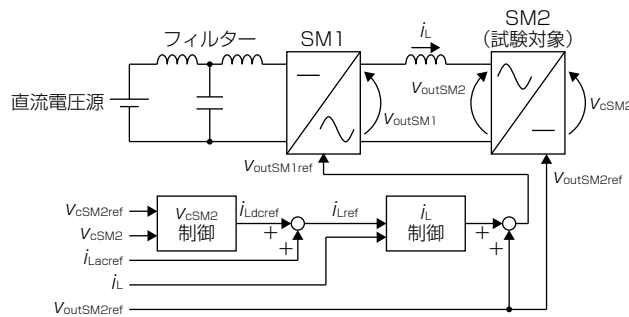


図5-2SM試験の通電試験回路

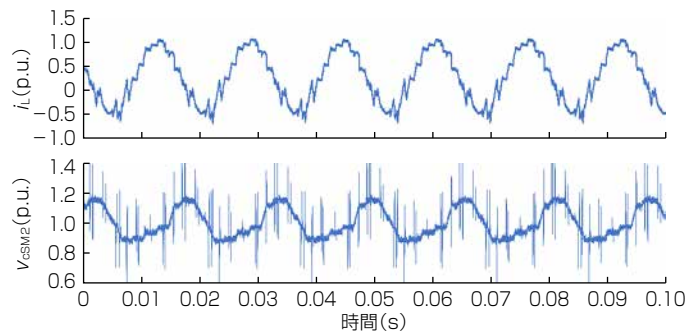


図6-2SM試験の試験結果

4.2 Hブリッジ試験

IEC 62501規格に基づいて、20個(10個×2組)のSMを接続した試験回路を構築し、実機最過酷電圧・電流に試験尤度(ゆうど)を加えた条件で連続運転試験を実施し、併せて損失測定も行った(Hブリッジ試験)。図7にHブリッジ試験の回路図と試験風景を示す。その結果、先に述べた条件での運転にSMが耐えられることを確認した。また、目標になるSM損失低減の実現を確認した。先に述べた規格要求に加えて、評価が必要と考えられる条件での試験や測定を実施し、その実力・性能を把握した。全ての試験結果が判定基準を満足しており、SM及び制御盤ソフトウェアは、HVDC変換器システムに対応した定格電流運転、連続安定運転など十分な性能を持っていることを確認した。

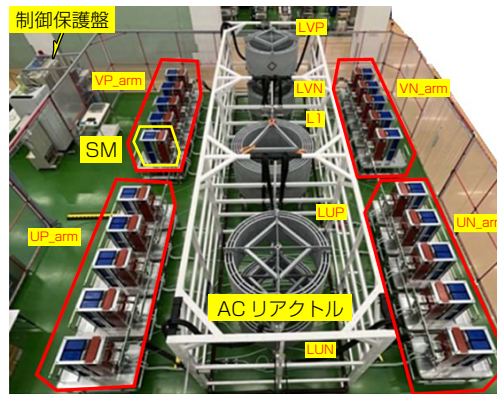
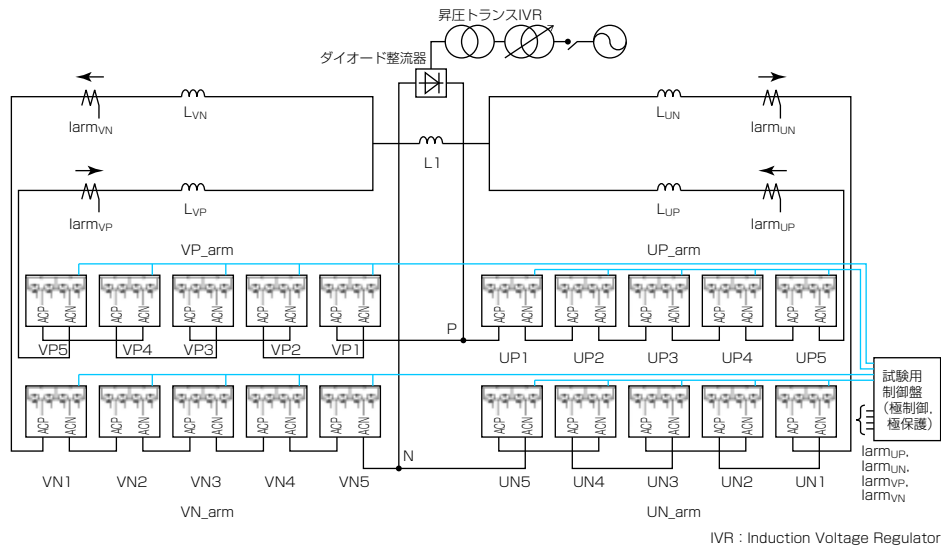


図7-Hブリッジ試験の回路図と試験風景

5. む す び

HVDC変換器システムを構成する小型化・低損失化したSMの設計・製作とその検証試験及びバルブタワーの設計を実施した結果、良好な結果が得られて、HVDC変換器システムの開発に目途を得た。この開発では定常時運転をベースとしたが、今後は実運用での過渡特性を考慮した製品化開発が必要になる。現在国内の浮体式洋上プラットフォームは水深1,000mに対応可能な変電所、及び変換所の開発を継続実施中であり、浮体構造に応じた耐振動要求をベースに設計が必要になる。

なお、この開発内容は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業(JPNP21015)として、2022年5月17日～2025年3月31日に実施した成果をまとめたものである。

参 考 文 献

- (1) 篠原信行, ほか: 低損失HVDCバルブタワーの基本設計, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集(Web) (2025)