

省スペースで電力システムの安定運用に貢献する 新形STATCOM

New STATCOM to Save Space and Ensure Stable Operation of Electric Power Systems

福島 大史 FUKUSHIMA Daishi 田村 裕治 TAMURA Yuji 張 昊 ZHANG Hao 川村 弥 KAWAMURA Wataru

再生可能エネルギー（以下、再エネと略記）や新たな電力需要の増加により、電力システムの安定運用に向けた対策が必要になっている。有効な対策の一つであるSTATCOM（Static Synchronous Compensator）は、高速かつ無段階に変な無効電力出力で電力システムの安定度を向上させることができる。

東芝エネルギーシステムズ（株）は、MMC（Modular Multilevel Converter）方式を採用した新形STATCOMを開発し、四国電力送配電（株）中村変電所に納入した。この装置は、デルタオープン変圧器を採用することで、通常使用されるバッファリアクトル（BR）を不要にし、主回路機器の設置面積50%低減を実現した。また、電力システムの安定度を向上させるPSS（Power System Stabilizer）制御機能も搭載し、その有効性についても、系統連系試験などにより確認した。

The ongoing introduction of renewable energy systems and increasing demand for new electricity necessitates adequate measures to maintain the stability of electric power systems. Static synchronous compensators (STATCOMs), which can supply stepless variable reactive power at high speeds, have become essential for this purpose.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has developed a new STATCOM using modular multilevel converter (MMC) topology, which was delivered to the Shikoku Electric Power Transmission & Distribution Co., Inc. Nakamura Substation. By applying a delta open transformer for saving space, the new STATCOM main circuit equipment has a 50% smaller installation footprint compared to conventional STATCOMs using a buffer reactor. We have also included a power system stabilizer (PSS) to ensure electric power system stability, confirming its effectiveness via commissioning tests.

1. まえがき

近年、我が国ではカーボンニュートラルに向けた再エネ電源の導入拡大やデータセンターのような新たな需要により、電力システムにおける様々な変化や課題が生じている。例として、再エネなどに起因する送電量増加（重潮流）や送電方向の変化（逆潮流）が生じている地域では、送電線事故などにより電力システムが不安定になるといった問題がある。この不安定な状況（電力動揺）は、電力システムに接続された同期発電機（火力発電、原子力発電、水力発電など）と前述の事故などの相互作用によって発生しており、発電機が脱調して発電できなくなると、供給力や電力品質に悪影響を及ぼすことが懸念される。

この問題に対して、高速かつ無段階に無効電力を出力することで系統電圧を維持・制御するSTATCOMの導入は有効な対策となり、電力システムの安定度を向上させることができる。四国電力送配電（株）の中村変電所周辺の電力システム（以下、中村周辺系統と略記）においては、再エネの導入拡大に伴い電力システムが重潮流化・逆潮流化しており、系統安定度を向上させるためSTATCOMが必要となった。

これを受けて、東芝エネルギーシステムズ（株）は中村変

電所に設置するSTATCOM（以下、中村STATCOMと略記）を受注し、システム設計・系統解析から、各種装置設計、製作、工場試験、出荷、現地の据付工事、組み合わせ試験、系統連系試験までを完了させた。当該設備は、四国電力送配電（株）により、2024年8月末に運転が開始された。中村STATCOMは誘導性（遅相）40 Mvarから容量性（進相）40 Mvarまでの無効電力を可変かつ無段階に制御し、中村周辺系統の電圧変動を高速かつ適切に抑制することで、系統安定度を向上させる。また、最新方式であるMMC方式を採用した電力システム向けSTATCOMの納入実績の中では、現時点で国内最大規模の出力幅^(注1)を持っている。

ここでは、中村STATCOMの構成と特長、設置効果の一例について述べる。

2. 中村STATCOMの構成と特長

2.1 中村STATCOMの構成

図1の変換器室内の配置図と、図2の航空写真に示すように、中村STATCOMは、主に自励式変換器と変圧器に

(注1) 2025年2月現在、一般送配電事業者向けMMC方式STATCOMとして、当社調べ。

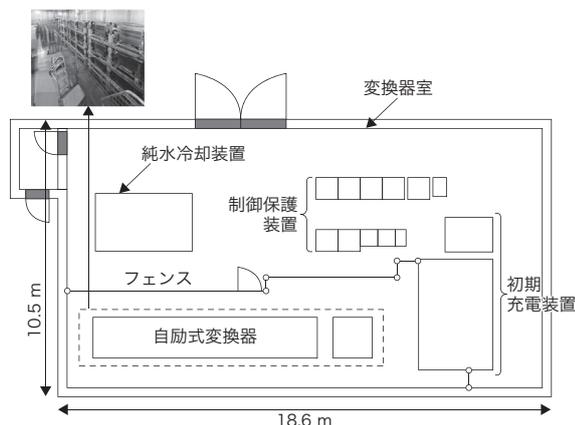
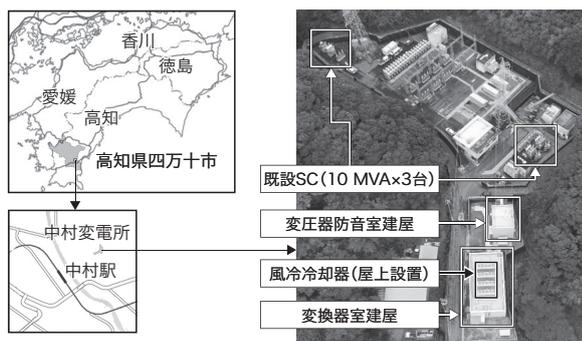


図1. 変換器室建屋内の機器配置及び変換器室内に設置されたSTATCOMの外観

機器の保守や据付工事のスペースを確保しつつ、コンパクトなレイアウトを実現した。

Layout of converter hall including STATCOM



*所在地の地図は、国土地理院「地理院地図」¹⁾の白地図を基に作成

図2. 中村変電所の航空写真

STATCOMは変換器室建屋内の機器、屋上の風冷冷却器、及び変圧器防音室建屋内の変圧器などで構成される。既設のSC (Shunt Capacitor) との協調運転機能も備えている。

Overview of Nakamura Substation

よって構成され、付帯機器として自動式変換器を充電する初期充電装置、変換器冷却装置（純水冷却装置及び風冷冷却器）、制御保護装置などで構成される。変圧器を除く各機器は変換器室建屋に配置し、変圧器は、変換器室建屋とは別の防音室建屋に配置した。また、風冷冷却器は、変換器室建屋の屋上に設置した。

図3に示すように、中村STATCOMは、MMC方式を採用した新形の自動式変換器を当社として初適用したSTATCOM（以下、MMC-STATCOMと略記）であり、1相当たり6台のフルブリッジセル（以下、セルと略記）で構成した。セル内の直流コンデンサーに充電した直流電圧を用いて、STATCOMは無効電力を出力する。その出力は、圧接型 IEGT (Injection

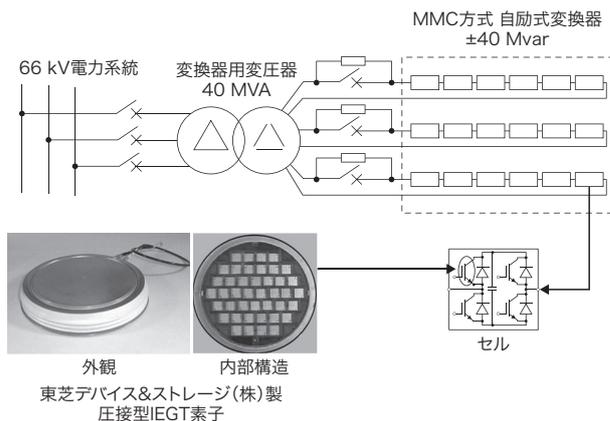


図3. 中村STATCOMの構成

デルタオープン変圧器と、圧接型 IEGT 素子を適用した MMC 方式の自動式変換器で構成される。

Block diagram of new STATCOM

Enhanced Gate Transistor) 素子のスイッチングにより制御される。6台のセルの直列接続により、線間電圧は13レベルまで出力でき、従来の2レベルや3レベル自動式変換器と比較して、STATCOMの発生高調波と運転損失を低減できる。また、万一の素子故障時に、IEGTは短絡モードになる特長があるため短絡スイッチは不要であり、冗長セルを配置しておけば運転継続も可能となり、システムの信頼性を高められる。

2.2 省スペースな機器配置

中村変電所は機器設置スペースが限られていることから、設置するSTATCOMは省スペースなシステムであることが重要になる。省スペースを実現した施策は以下のとおりである。

- (1) デルタオープン変圧器の採用によるBRの省略
- (2) 初期充電に関わる各機器をキュービクルに収納することで接続導体をコンパクト化
- (3) 風冷冷却器（変換器冷却用）を屋上に設置することで変電所内の設置面積を低減
- (4) MMC-STATCOMの適用で発生高調波を低減し、高調波フィルター設備の設置を省略
- (5) 機器の保守や据付工事に要するスペースも考慮した建屋内レイアウトの最小化

これらの中で最も省スペース化に寄与した(1)の施策について以下に述べる。中村STATCOMの特長は、変圧器の結線を一次側デルタ結線、二次側オープン巻線とする工夫により、一般的なMMC-STATCOMで必要となるBRを省略したことである。デルタオープン結線の変圧器は、SVC (Static Var Compensator) において実績があり⁽²⁾⁻⁽⁴⁾、その知見を活用して回路構成を実現した。MMC-STATCOM

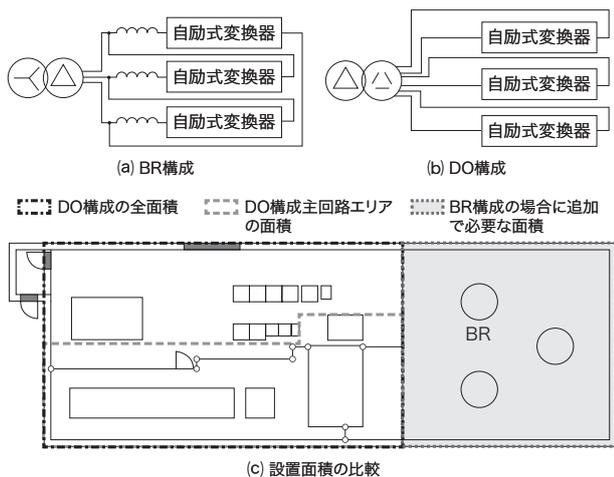


図4. STATCOMの回路構成による設置面積の違い

DO構成では、リアクトルから発生する磁界の影響を考慮した離隔の設定や据付・保守スペースの確保が不要となることから、空芯・乾式タイプのリアクトル3相分を屋内設置したBR構成と比較して、主回路機器の設置面積を約50%低減できる。

Comparison of installation area of STATCOMs using conventional buffer reactor and delta open transformer

は、通常、各セルのコンデンサー電圧値の均衡を保つための循環電流経路を確保する必要があり、図4(a)のように変圧器二次側はデルタ結線としている。この場合、デルタ結線に起因する不要な相間電流（横流）を抑制し、循環電流を適切に制御する目的でBRを設置する構成（以下、BR構成と呼ぶ）となる。他方、中村STATCOMでは、図4(b)のように変圧器二次側をオープン巻線としたことで単相回路となっており、変圧器一次側のデルタ回路を利用して循環電流の経路を確保可能な構成（以下、DO構成と呼ぶ）である。その電流経路に、変圧器のインピーダンス（リアクトル成分）があるため、BRなしで所望の性能が得られる。

中村STATCOMは前述の回路構成を採用することでBR設置スペースを不要とし、変換器室建屋面積を縮小した。図4(c)に示すように、変換器室建屋面積全体で約36%、変換器室建屋内の主回路機器エリアで約50%の縮小となる。BR省略構成の実現により、限られたスペースの中でも平屋で変換器室建屋（18.6（幅）×10.5（奥行き）m）を配置でき（図1）、建屋コストの低減に寄与した。

2.3 その他の特長

- (1) IEGT素子の適用 セル内のスイッチング素子として東芝デバイス&ストレージ（株）製の圧接型IEGT素子を採用した（図3）。IEGTは、大容量・高耐圧、素子両面からの効率的な冷却構造、及びバイパススイッチが不要なため高信頼性といった特長がある。
- (2) 変換器の制御機能 STATCOMで広く用いられる

電圧一定制御（AVR：Automatic Voltage Regulator）と合わせて、電力システムの安定度を向上させるPSS制御を採用した。PSS制御では、四国電力送配電（株）と協働した系統解析により、最適な制御定数を定めた。また、遠方装置より3パターンの制御定数から選択できる機能や、潮流条件によりPSS制御の使用・不使用を選択できる機能を設計し、系統運用の柔軟性を高めた。セルのスイッチング制御においては当社独自の方式を採用し、STATCOMの運転継続性の向上や運転損失の低減を実現している。

- (3) SC設備との協調運転 中村変電所には10 MVAの既設SC（Shunt Capacitor）が3台設置されており（図2）、これらのSCとSTATCOMが協調運転するためのSC制御装置を開発した。STATCOMの出力範囲を定め、範囲を超過した場合はSCの投入若しくは開放によりSTATCOM出力を補うといった、協調制御を採用した。この制御により、常時のSTATCOM出力を一定の範囲に待機させ、系統安定度を向上させるための緊急出力の余力を確保した。
- (4) 低騒音化 STATCOMの設置場所は敷地境界までの距離が短く、低騒音設計が必要となった。そのため、風冷冷却器のファンに低騒音タイプを採用して屋上設置することや、変圧器を防音室建屋内に設置することにより、低騒音なSTATCOMを実現した。

3. 中村STATCOMの設置効果

3.1 設置効果の検証方法

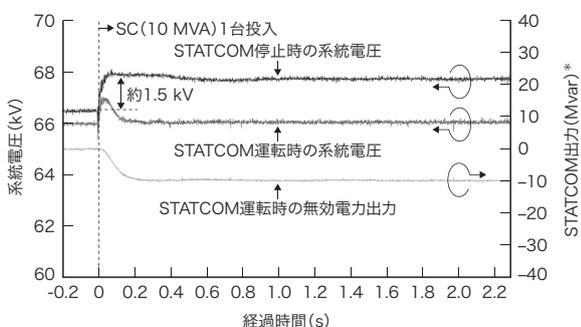
- (1) 系統解析 STATCOMの設置効果を確認するために、固有値解析と実効値解析の両方を実施し、PSS制御の有効性と系統安定度向上の効果を詳細に評価した。また、瞬時値解析により、系統事故時にSTATCOMの運転継続性や発生高調波に問題がないことを評価した。
- (2) 工場シミュレーター試験 電力系統や自動式変換器などの主回路機器をリアルタイムシミュレーターで模擬し、制御保護装置実器による各種動作を確認した。
主な確認項目は、STATCOMの起動停止、SCとの協調制御、系統事故時のSTATCOMの運転継続性能、PSS制御による系統安定度の向上効果である。
- (3) 系統連系試験 中村変電所への機器据付後の単体試験、組み合わせ試験を完了した後、実系統に接続してSTATCOMの動作を確認した。
主な確認項目は、①STATCOM起動停止、②ヒートラン試験による各種測定（温度上昇、高調波、騒音な

ど), ③変換器の制御機能 (AVR機能など), 及び④系統構成変更時のPSS制御による系統安定度向上効果である。このうち③と④の代表的な試験結果については, 3.2節で詳細に述べる。

3.2 系統連系試験による設置効果の主要な検証結果

3.2.1 AVR機能の検証結果

中村変電所の既設SCを投入した際の電圧変動の測定結果を, 図5に示す。STATCOMの停止時には系統電圧に約1.5kVの電圧上昇が発生するが, STATCOMの運転時にはSTATCOMが瞬時に動作し, 系統電圧の上昇を高速に抑制していることを確認した。その際に, 誘導性の10Mvarの無効電力を想定どおり出力しており, AVR機能

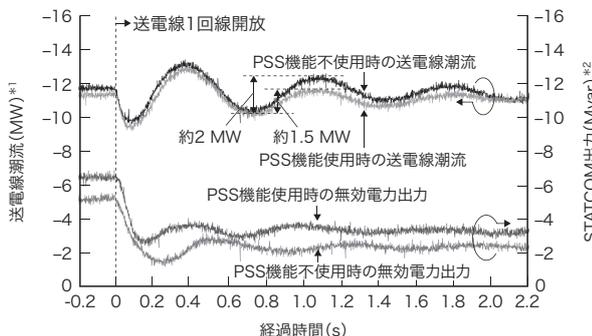


*マイナスの値は誘導性出力, プラスの値は容量性出力を示す

図5. 系統連系試験でのSC投入試験時の電圧変動測定結果

STATCOMの停止時には発生している系統電圧の急峻な上昇を, STATCOMの運転時には誘導性の無効電力の出力によって抑制できている。

Grid voltage waveforms obtained by on-site commissioning tests when connecting static capacitor with and without STATCOM operation



*1 マイナスの値は順潮流を, プラスの値は逆潮流を示す
*2 マイナスの値は誘導性出力を, プラスの値は容量性出力を示す

図6. 系統連系試験での送電線1回線開放試験時の電力動揺測定結果

PSS機能を不使用にした場合に発生した送電線潮流の動揺は, PSS機能使用時にはSTATCOMの無効電力出力により抑制されている。

Power oscillation waveforms obtained by on-site commissioning tests when opening one transmission line with PSS control enabled and disabled

による電圧維持性能を確認した。

3.2.2 PSS機能の検証結果

中村変電所に接続された送電線を1回線開放した際の有効電力の振動 (電力動揺) を測定した結果について, 図6に示す。電力動揺の2波目の振幅は, PSS機能不使用時は約2MW, PSS機能使用時は約1.5MWとなり, PSS制御による動揺抑制効果を確認した。PSS制御は, 将来想定される過酷な電力系統状況において最も機能するように調整されており, その際の有効性は, 系統解析で確認した。これらの結果により, PSS機能は, 今後の中村周辺系統の安定化に大いに貢献することが期待される。

4. あとがき

四国電力送配電 (株) 中村変電所に納入したSTATCOMの特長と, 主要な設置効果についてまとめた。中村STATCOMは, BR省略構成などによる省スペースな機器配置, 信頼性の高いIEGT素子を採用したMMC方式の自励式変換器, 電力系統の安定度を向上させるPSS制御機能などの特長を備え, 系統連系試験に至るまでの各種検証を経て運用を開始した。

電力系統の安定運用に有効なSTATCOMの需要は, 今後ますます高まることが予想される。ここで述べたSTATCOMの特長や対応実績を生かすことで, カーボンニュートラル社会の実現や電力レジリエンスの強化に貢献していく。

謝辞

中村STATCOMのシステム設計・解析や工場・現地試験などにあたり, 助言・指導いただいた四国電力送配電 (株) の関係各位に, 深く感謝の意を表します。

文献

- (1) 国土地理院. “地理院地図”. 国土地理院. <<https://maps.gsi.go.jp/#10/32.802859/133.680267/&base=std&ls=std&disp=1&vs=c1glj0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1>>, (参照2025-02-05).
- (2) 福島大史, 田村裕治. 再生可能エネルギーの導入に貢献する静止型無効電力補償装置. 東芝レビュー. 2020, 75, 3, p.59-63. <https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/corp/techReviewAssets/tech/review/2020/03/75_03pdf/f06.pdf>, (参照2025-02-05).
- (3) 田村裕治, 宮崎保幸. 遠隔地への交流ケーブル送電用 静止型無効電力補償装置. 東芝レビュー. 2008, 63, 8, p.48-52.
- (4) 金武茂幸, ほか. “SVCの長距離交流ケーブル連系系統への適用”. 平成20年電気学会全国大会論文集 分冊6. 福岡, 2008-03, 電気学会, 2008, 6-236, p.396-397. (CD-ROM).



福島 大史 FUKUSHIMA Daishi
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
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



田村 裕治 TAMURA Yuji, Ph.D.
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
博士(工学) 電気学会・CIGRE会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



張 昊 ZHANG Hao
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.



川村 弥 KAWAMURA Wataru, Ph.D.
(株)TMEIC
パワーエレクトロニクスシステム事業部 パワーエレクトロニクス部
博士(工学) 電気学会・IEEE会員
TMEIC Corp.