

450MVA GCT-STATCOMによる 定態安定度向上技術及び系統過電圧抑制技術

正城健次* 松田泰蔵***
天満耕司** 森島直樹†
原田英広***

Enhancement of Steady-State Stability and Suppression of Over-Voltage using 450MVA GCT-STATCOM

Kenji Masaki, Koji Temma, Hidehiro Harada, Taizou Matsuda, Naoki Morishima

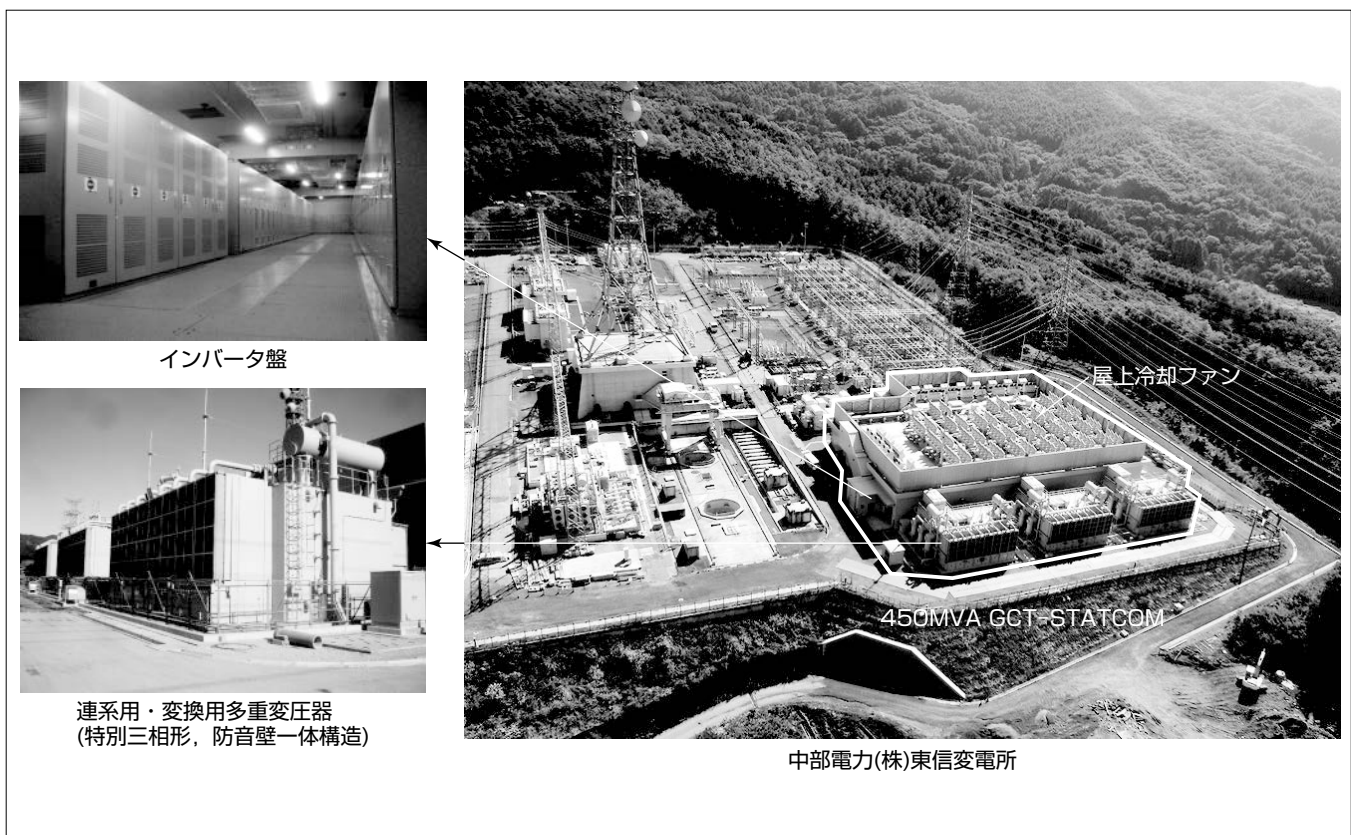
要 旨

パワーエレクトロニクス技術を応用したFACTS(Flexible AC Transmission System)機器の中で、STATCOM(STATIC synchronous COMPensator: 静止形自励式無効電力補償装置)は、顕在化する電力系統問題の対策として適用が進みつつある。

STATCOMは電力系統の要求に応じて進相から遅相まで無効電力を高速に連続的に補償することができる。そのため、長距離大容量送電系統などに懸念される定態安定度や電圧問題に対して、その制御性や応答性から複数の系統問題を同時に解決することが可能となる。さらに、系統安定化システムや他の安定化対策と組み合わせることで、大規模な送電線増強を行わずに送電可能容量を高めることが

期待できる。

本稿では、定態安定度向上及び系統過電圧抑制を目的として中部電力(株)東信変電所に納入した世界最大級容量450MVA GCT-STATCOMについて、システム仕様、適用する主回路技術や系統問題を解決するSTATCOM制御技術について述べる。さらに、STATCOM設置系統である長野方面系統を詳細に模擬した電力系統シミュレータによる制御装置の検証試験及び長野方面系統安定化(Integrated Stability Control: ISC)システムとの協調試験、実系統での系統連系試験を実施し、STATCOMによる効果確認を行った内容について述べる。



中部電力(株)東信変電所の450MVA GCT-STATCOM

GCT(Gate Commutated Turn-off)サイリスタを適用した世界最大級の450MVA STATCOMである。進相から遅相まで無効電力を高速に連続的に補償することができるため、定態安定度向上と系統過電圧抑制を一つの機器で実現できる。コンパクト性にも優れ、図中の枠内に囲まれた建屋と変圧器を合わせた敷地面積は2,982.5m²である。2012年11月から運用を開始しており、大容量送電系統の安定化に寄与している。

1. ま え が き

大規模電源の新設に伴い送電線の増強が必要となる場合、STATCOMはその機能の柔軟性から系統安定度や電圧変動といった複数の系統課題を解決することが可能であり、送電設備として有効な手段である。

本稿では、定態安定度向上及び系統過電圧抑制を目的として中部電力(株)東信変電所に納入した世界最大級容量450MVA GCT-STATCOMについて、その構成や適用した制御技術について述べる。またSTATCOMの動作検証として、電力系統シミュレータを用いたSTATCOM制御装置の検証試験やSTATCOMと長野方面系統安定化(ISC)システムとの協調試験、実系統での系統連系試験を行ったので、その内容について述べる。

2. システム概要

2.1 送電対策とSTATCOM仕様

長野方面系統は、図1のように500kV基幹系統から約300km離れた地点に大容量2,380MWの上越火力発電所が新設され長距離大容量送電系統となるため、重潮流時の一般的な問題である定態安定度が懸念される。その定態安定度対策として、STATCOMによって発電機の内部相角度の変動に伴う系統電圧低下を検出し無効電力を補償することで、発電機の同期化力を保ち定態安定度を向上させる方法が採用されることになった。

また、ルート断故障によって長野方面系統が分離系統となった場合に過電圧の問題が懸念される。長野方面系統では500kV基幹系統への送電が重潮流となる断面で、長距離送電による無効電力損失を補償するため、大量の電力用コンデンサが投入されている。このような系統でルート断故障が発生すると、並列していた電力用コンデンサによって分離系統に過電圧を引き起こすフェランチ現象が発生する。その過電圧対策にもSTATCOMは有効であり、STATCOMによって高速に遅相無効電力を出力し過電圧抑制に貢献することが可能である。

これら定態安定度向上及び過電圧抑制に対して系統解析を行い冗長性なども考慮しSTATCOMシステムを容量

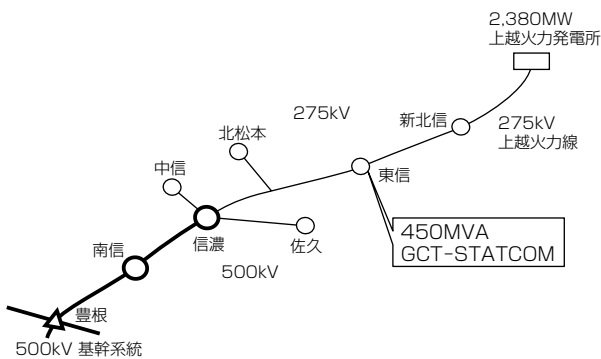


図1. 長野方面系統

450MVA(単器150MVA×3台)と決定した。STATCOM設置点は、定態安定度向上に最も効果的な上越火力発電所と基幹系統との電気的中間地点に位置する東信変電所とした⁽¹⁾。

2.2 主回路構成

450MVA GCT-STATCOMの主回路構成、3レベルGCT変換器ユニットの外観と6kV-6kA GCTサイリスタ素子の外観を図2に示す。450MVA GCT-STATCOMは、150MVA STATCOM 3台で構成している。150MVA STATCOMは連系用変圧器と変換用7段多重変圧器によって275kV系統と接続している。変換用7段多重変圧器によって3レベル変換器の7段直列多重接続を実現している。多重変圧器を使った3レベルGCT変換器の多重化や、スナバレスの大容量6kV-6kA GCTサイリスタを用いた変換器を適用することで、高効率・高性能・高信頼度・コンパクト・高調波フィルタレスを実現することができる。表1にこのSTATCOMの主な仕様を示す。インバータ盤・制御盤等を配置した建屋と変圧器とを合わせた敷地面積は2,982.5m²であり、コンパクト性にも優れている。

2.3 STATCOM制御

このSTATCOMの基本制御方式を図3に示す。定態安定度向上のためのAVR(Automatic Voltage Regulator)制御及び過電圧抑制のための無効電流フィードフォワード型スケジューリング制御を採用した。有効・無効電流は一般的な電圧形自励式変換器で採用されている回転座標系を適用して制御する。また、各段キャリア位相シフトPWM(Pulse

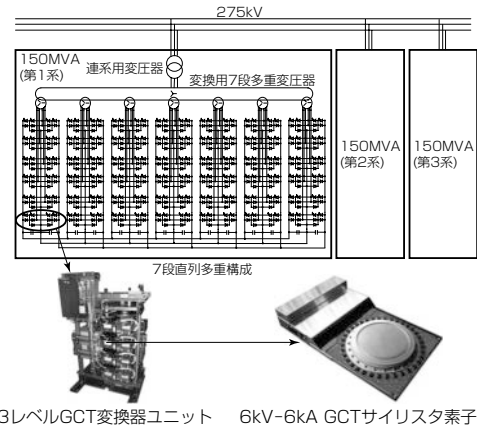


図2. 主回路構成及び6kV-6kA GCTサイリスタ素子

表1. 東信STATCOMの主な仕様

装置構成	7段多重×3系	変圧器構成	連系用変圧器+変換用変圧器
定格容量	150MVA×3系	連系用変圧器	結線 Y/Y/Δ
定格交流電圧(系統接続側)	275kV		定格電圧 275kV/77kV/33kV
過電圧運転範囲	1.85pu	変換用変圧器	定格容量 150MVA
適用素子	6kV-6kA GCT		結線 Y/7段ブロークンY
インバータ方式	単相3レベル×3相	定格電圧 77kV/3.326×√3kV	定格容量 150MVA
定格直流電圧	±3,000V	変圧器インピーダンス	35%
PWMパルス数	3パルス		

Width Modulation)を適用することで、低パルスでありながら系統故障時の過電流防止に対して十分な高速応答性を持つ。

2.3.1 定態安定度向上制御

定態安定度向上のためのAVR制御としてSTATCOMに不感帯付Vref形AVR制御を採用している。AVR制御ブロック及びAVR特性を図4に示す。送電線1回線開放時や系統故障時等、系統電圧に大きな変動が生じたときにはAVRのスローブ特性に従って高速に無効電力を出力する。また、平常時の系統電圧範囲に不感帯を設けることで常時の無効電力出力を零に抑え、系統安定化システムの平常時電圧・無効電力制御との協調を図り、かつ常時損失も低減している。不感帯上下限を設定変更することで必要に応じて平常時の無効電力出力量を制御できる⁽²⁾。さらに、通常運用時や系統状況、分離系統時や上越火力発電機運転状況に応じて複数のAVR特性パターンを設定しておき、系統状態に応じてAVR設定を切り替える。それによって、高速応答が必要となる重潮流時の定態安定度に寄与するとともに、低短絡容量状況でもSTATCOMの安定運転が可能となる。また過酷な条件下では発電機の軸ねじれ振動が励振されるSSTI (Sub-Synchronous Torsional Interaction) 発生可能性があるが、AVR特性切替えによってSSTIの回避も可能となる⁽³⁾。

2.3.2 系統過電圧抑制制御

無効電流は基本的にAVR制御の出力指令を受け制御されるが、さらに、高速な応答性を確保し系統過電圧抑制するために、AVR制御に加えフィードフォワード型スケジューリング制御を導入している。系統過電圧を検出する

と無効電流指令値を遅相側に制限し過電圧抑制指令値の無効電流に切り替えるものであり、この制御方式によって極めて高速な遅相無効電力出力が可能となり、系統過電圧を抑制することができる。

3. 性能検証試験

3.1 シミュレータ試験

実機のSTATCOM制御装置とSTATCOM主回路ミニモデルを、長野方面系統を詳細に模擬した電力系統シミュレータに接続し、STATCOM制御機能の検証を行った⁽⁴⁾。

3.1.1 定態安定度向上確認試験

定態安定度向上効果を確認するため、上越火力線(上越火力発電所-新北信変電所)1回線開放試験を実施した。1台停止時でも定態安定度を維持できることを確認するため、この試験ではSTATCOM1台停止状態を模擬した。シミュレータ試験結果を図5に示す。

重潮流断面では送電線が1回線開放されると同期化力の低下に伴い上越火力発電機の内部相角が系統に対して増加し、系統の電気的中間地点付近の変電所では電圧低下が生じ定態不安定によって脱調する。STATCOMを適用すると、1回線開放による電圧低下に応じてAVR制御が進相無効電力を出力し同期化力を向上させ、上越火力発電機の脱調を防止していることが分かる。この実機の制御装置を用いた試験結果によって長野方面系統でのSTATCOMの定態安定度向上効果が確認できた。

3.1.2 過電圧抑制確認試験

系統過電圧抑制効果を確認するため、重潮流断面で、過電圧が最も厳しくなる豊根開閉所(長野方面系統と500kV基幹系統との接続点に位置する)でのルート断故障ケースを実施した。シミュレータ試験結果を図6に示す。

豊根開閉所での3LG(3-Line-to-Ground)故障発生後、STATCOM接続母線電圧は0.6pu程度まで低下するものの、STATCOMは運転継続し、AVR制御によって進相無効電流を1.0pu出力している。故障除去によって長野方面系統は500kV基幹系統と切り離され分離系統となり、フェランチ現象による系統過電圧が発生している。STATCOMは故障除去後も運転継続し、過電圧検出によって無効電流フィードフォワード型スケジューリング制御が動作し、無効電流出力を高速に遅相側に制御している。さらに、遅相側の所定値(この場合1.0pu)に無効電流指令値を変更し故障除去後1サイクル以内に遅相無効電流1.0puを達成しており、STATCOMの高速な過電圧抑制効果が確認できた。

3.1.3 ISCシステムとの検証試験

長野方面系統には新たな統合型系統安定化システムである長野方面系統安定化(ISC)システムも導入されている。そのため、STATCOMとISCシステムが有機的に機能し、互いに適正に系統安定化を図れることを確認するため、検

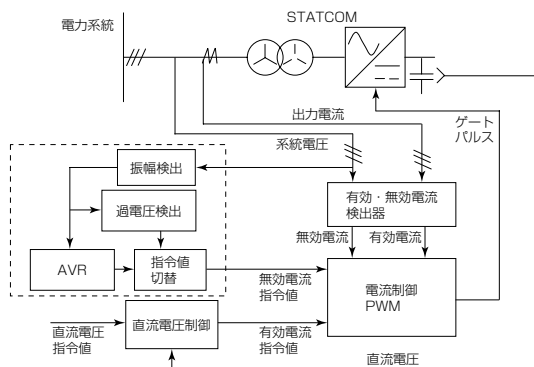


図3. STATCOM制御ブロック

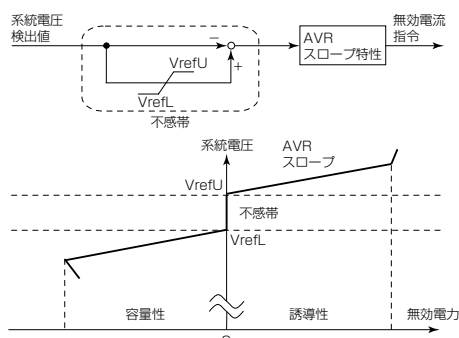


図4. AVR制御ブロック及びAVR特性

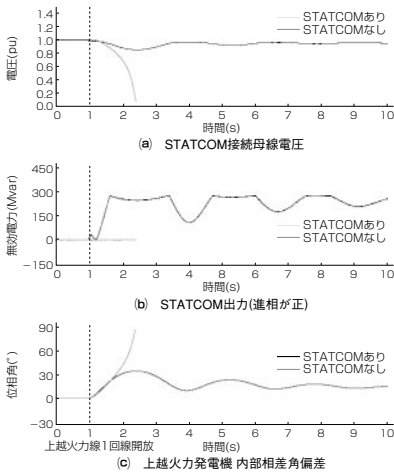


図5. 定態安定度確認試験の結果

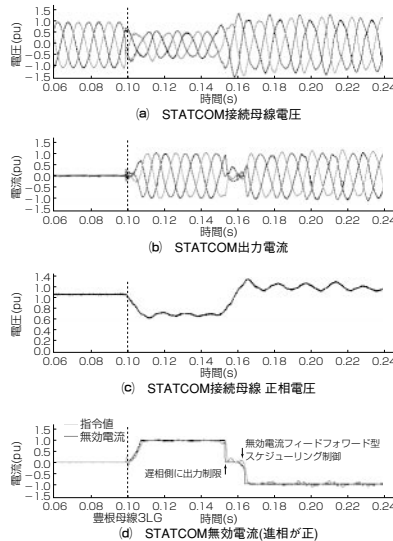


図6. 過電圧抑制確認試験の結果

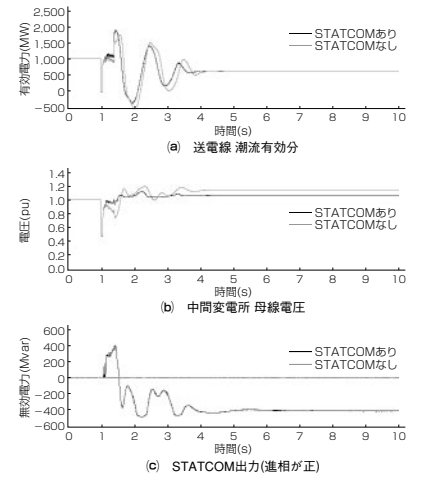


図7. ISCシステムとの検証試験結果

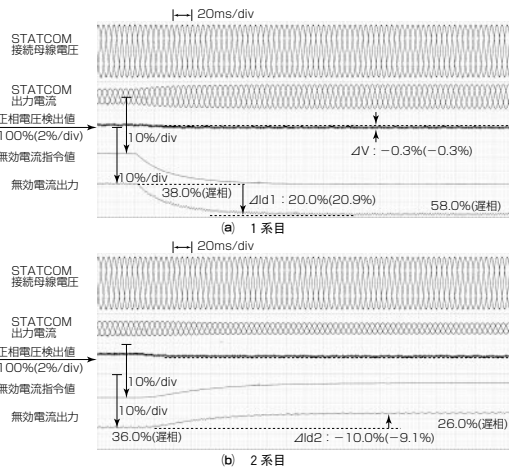


図8. AVR特性切替え試験の結果

証用ISCシステムを電力システムシミュレータに組み込み、検証試験を実施した⁽⁵⁾。

図7に非ルート断故障(送電線3相4線地絡故障)試験結果を示す。ISCシステムが故障後の発電機加速・減速エネルギーを的確に把握して過渡安定度維持を図るとともに、STATCOMによって電圧変動も抑制され、互いに適正に動作していることが確認できた。

3.2 系統連系試験

系統連系試験では、STATCOMのAVR制御特性を確認するため、実系統に連系した150MVA STATCOM 2系列を用いてAVR特性切替え試験を行った⁽⁶⁾。

150MVA STATCOM 2台をそれぞれ同じAVR制御定数に設定し、不感帯上限VrefUをSTATCOM接続母線電圧より低く設定しSTATCOMをリアクトル動作させた状態で、2台中1台だけAVR特性を切り替えた(1台のVrefUを1.0%低下)ときの母線電圧変動量 ΔV 、2台のSTATCOMの無効電流出力変動量 $\Delta Id1$ 、 $\Delta Id2$ を図8に示す。図中の()内の数値はシミュレーションによる事前検討値である。

AVR特性切替えによって、並列する2台のSTATCOM

のAVR特性が異なっても、2台のSTATCOMはそれぞれに備わるAVR制御に応じて動作し、出力変動量もほぼ事前検討値と同じであり、ハンチングを発生させることもなく安定動作することが確認できた。

4. むすび

定態安定度向上及び過電圧抑制を図る世界最大級容量450MVA GCT-STATCOMに適用した技術及びその性能検証について述べた。今後ますます重要となるSTATCOMなどのFACTS機器について、この開発で培った技術を基に更なる有用性の追求に尽力していく所存である。

参考文献

- (1) Akedani, T., et al.: 450MVA STATCOM installation plan for stability improvement, Proceeding of 2010 CIGRE, B4-207 (2010)
- (2) 下之園隆明, ほか: 450MVA GCT-STATCOM制御方式の検討, 平成22年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, 108 (2010)
- (3) 下之園隆明, ほか: 大容量STATCOMにおけるSSTI抑制検討, 平成24年電気学会全国大会講演論文集, 6-125 (2012)
- (4) 金澤 剛, ほか: 詳細模擬システムによる450MVA GCT-STATCOM制御装置検証, 電気学会電力技術研究会資料, PE-11-186 (2011)
- (5) 原田英広, ほか: STATCOMと長野方面系統安定化(ISC)システムのアナログシミュレータによる検証試験, 平成23年電気学会電力・エネルギー部門大会講演論文集, 129 (2011)
- (6) 守口聡一, ほか: 450MVA GCT-STATCOMの系統連系試験, 平成25年電気学会全国大会講演論文集, 6-258 (2013)