自励式位相調整器の瞬時値解析による検討

正員 千田 卓二 (東北電力株式会社)

正員 佐藤 佳彦 (東北電力株式会社)

正員 菅原 洵 (東北電力株式会社)

正員 森川 竜一 ((株) 東芝)

正員 田村 吉章 ((株) 東芝)

正員 色川 彰一 ((株) 東芝)

Simulation Study of Unified Power Flow Controller

Takuji CHIDA, Member, Yoshihiko SATO, Member, Jun SUGAWARA, Member
(Tohoku Electric Power Company)

Ryuuichi MORIKAWA, Member, Yoshiaki TAMURA, Member, Shoichi IROKAWA, Member
(Toshiba Corporation)

The increasing complexity of AC power networks requires a high performance power flow control system in order to obtain a desired power flow and enhance static and dynamic stability. One of the most effective power electronic systems to satisfy these requirements is a UPFC(Unified Power Flow Controller) employing self-commutated converters.

This paper presents basic control strategies and simulation results for the UPFC using EMTP(Electro-Magnetic Transients Program). The simulations were carried out for start and stop operations, power flow change operations in normal system conditions, as well as operations during system fault conditions. Thyristor based bypass switches are used for the protection of the series compensator of the UPFC from system fault currents, and satisfactory protection capability was confirmed.

キーワード：自励式位相調整器，FACTS，直列補償，潮流制御，系統事故，バイパススイッチ

1. ま え が き

電力系統へのパワーエレクトロニクス技術の適用は、これまで直流送電および静止形無効電力補償装置(SVC)など、他励式変換器によるものが主体であった。しかし、自己消弧形の電力用半導体素子とその適用技術の進歩により、自励式変換器の大容量化が進み、自励式SVCや可変速揚水発電機の自励式励磁装置にも適用が広がってきている。

送電線や電源の立地難から系統の安定度は厳しさを増しているが、パワーエレクトロニクス技術を用いて送電線の熱容量の限界まで送電可能とすることを目的としたFACTS(Flexible AC Transmission Systems)の概念が注目を浴びている⁽¹⁾。その中でも自励式位相調整器は、系統の電圧の大きさ、位相、インピーダンスの3要素を高速かつ連続的に調整し、電圧の安定化、電力動揺の抑制および

自在な潮流制御を可能とする装置として、FACTSの中心的役割を果たすものと期待されている。

自励式位相調整器に関して、これまで実効値レベルでの解析により系統に及ぼす効果の検討結果が報告されている⁽²⁾。しかし、自励式位相調整器を装置として製作し、実際の系統に適用するには、瞬時値レベルの解析により詳細な回路動作を検討し、様々な運転状況にも対応したシステム構成とすることと、制御保護技術の確立が不可欠である。特に系統事故時には、自励式位相調整器を構成する機器が過電流や過電圧とならず、極力運転を継続して、系統安定化に寄与できることが好ましい。

本論文ではEMTPを使用した瞬時値シミュレーション解析を行い、自励式位相調整器の起動・停止や潮流制御などの通常時の運転、および様々な系統事故時の運転が安定に行えるための、具体的な制御保護方式とシステム構成検討

図1 モデル系統 (50Hz-5000MVA-500kV base)
Fig.1. Model system used for studies.

図2 自励式位相調整器の構成と諸元
Fig.2. System configuration of UPFC.

時に留意すべき点を明らかにした。

2. システム構成

図1は解析に用いたモデル系統でノード1とノード9は無限大母線とした。これらのノードを結ぶ2つのルートの一方に、5,000MVAの系統容量の5%に相当する250MVAの自励式位相調整器を設置することを想定した。ノード6とノード2との間に自励式位相調整器を設置することで、どちらか1回線が切り離された場合でも潮流制御能力が発揮できるようにしている。

図2に本論文で解析の対象とした自励式位相調整器モデルの構成および諸元を示す。自励式位相調整器は、系統に並列に接続する並列補償部と、系統に直列に接続する直列補償部とから構成され、各々の直流部は結合され共有され

図3 制御構成
Fig.3. Configuration of the controller.

る。各補償部は種々の構成が考えられるが、ここでは高調波低減の観点から、両補償部とも9パルスでPWM(Pulse Width Modulation)制御された4つの電圧形自励式変換器の出力を、変換器用変圧器によって交流側で4段多重化する構成とした。

さらに直列補償部は、変換器用変圧器の出力を系統に直列に直接挿入するのではなく、別に設けた直列変圧器を介して挿入する構成とした。この2つの変圧器の間にサイリスタを用いたバイパススイッチを接続しているが、これは後述するように、系統事故時の過電圧・過電流から変換器を保護するとともに、変換器故障時に系統が分離することを防止するためである。したがって直列変圧器の巻線比は、系統故障時の過電流をバイパススイッチのサイリスタの電流定格に適した電流に変換するように選定される。また直列変圧器の変換器側の結線も、後述するように系統の不平衡事故時に零相電流を変換器用変圧器に流さないようにデルタ(Δ)としている。

また直列補償部が発生する高調波は、系統のインピーダンスに無関係にそのまま系統に直列に挿入されるため、並列補償部に比較して高調波低減の必要性が高い。ここでは変換器用変圧器と直列変圧器の間に高次の高調波を除去するためのハイパスフィルタを設けている。直列変圧器の極間に設けられた遮断器CB2は、直列補償部の起動・停止に重要な役割を持ち、これについても後述する。

3. 自励式位相調整器の制御方式

本論文で解析に使用した自励式位相調整器の制御構成を図3に示す。並列補償部の制御方式は、自励式 SVC と同様に出力電流 I_M を制御して交流電圧の制御と変換器の直流リンク電圧の制御を行う。自励式位相調整器の機能特徴を

図4 直列補償部の補償モード

Fig.4. Compensation mode of series compensator.

けるのは直列補償部の制御である。直列補償部は、直列変圧器を介して系統に挿入する直列補償電圧 V_c の大きさと位相を自由に制御し、系統の潮流の制御などを行う。

実際には図3の電圧制御器の直列補償電圧指令 V_c^* を決定する系統潮流制御器が上位制御としてさらに必要であるが、ここでは検討の対象から除外した。本論文では直列補償部の基本となる電圧制御器についての検討に着目したためである。この直列補償電圧の挿入方法の違いにより分類される次の2つのモードについて検討を行った。

(1) 位相変圧器モード : (図4(a))

母線電圧 V_M を位相基準ととり、 V_M に対して位相が 90° 異なった電圧 V_c を挿入する補償モード。従来の位相変圧器に相当する。

(2) 直列コンデンサモード : (図4(b))

線路電流 I_c を位相基準とし、 I_c に対して位相が 90° 異なった電圧 V_c を挿入する補償モード⁽³⁾。直列の可変コンデンサ、可変リアクトルと見なせる。

直列コンデンサモードでは直列補償部と系統との間で有効電力の授受がないため、並列補償部は直列補償部で発生する損失分を補償するだけの僅かな有効電力を直列補償部に供給するだけで良い。しかし系統の通過電流を位相の基準とするため、軽負荷時は基準位相が得にくい。一方、位相変圧器モードでは系統電圧を位相の基準とするため上記のような問題はない。しかし潮流の力率が低いときは、直列補償部と系統との間で有効電力の授受が増大し、直流リンク電圧維持のために並列補償部によって直列補償部が授受した有効電力を補償する必要がある。これによる制約のため、並列補償部の出力可能な無効電力が減少する。また上記2種類の動作モードの他に、直列補償部の出力電圧の大きさと位相を自由に变化させて系統潮流を制御するフリーモードもある⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。

4. 定常運転

〈4・1〉 起動・停止 自励式位相調整器の起動・停止シーケンスを図5に示す。ただし、図中の時刻および具体的数値は後記の解析に使用した値である。図5に示すよう

図5 起動・停止シーケンス

Fig.5. Sequence of start and stop operations.

に自励式位相調整器の並列補償部は、自励式 SVC と同様に変換器のゲートブロックやデブロックにより、容易に系統への併入、運転停止および解列が可能である。

一方、直列補償部は系統に直列に接続されているため、変換器をゲートブロックすると変換器のフリーホイーリングダイオードを介して系統の電流が直流回路に流れ込み、直流リンク電圧の上昇による装置の破壊や系統の分断につながる。このため、直列補償部を停止するには、変換器のゲートブロックを行う以前に、直列変圧器の系統側に接続した遮断器 CB2 を投入することで系統電流をバイパスしておく必要がある。逆に、起動を行う際には、ゲートデブロックの後に遮断器 CB2 を開放する。

〈4・2〉 潮流制御 系統の潮流は、直列補償部が出力する補償電圧 V_c を調整することにより制御されるが、前記の直列補償部の動作モードにより制御結果が異なる。位相変圧器モードおよび直列コンデンサモードでは、補償電圧 V_c の位相が制限されているため、 V_c の大きさだけを制御して有効電力潮流を制御する。この際、無効電力潮流は系統の有効電力潮流を制御したことにより一義的に決定される。これに対し、フリーモードでは補償電圧 V_c を自由に制御できるため有効電力潮流と無効電力潮流が独立に制御できる。ただし、フリーモード動作により直列補償部が系統

図6 直列補償部の起動・停止

Fig.6. Waveforms of the UPFC in the start and stop operations.

と有効電力の授受を行うと、位相変圧器モードと同様に並列補償部により直列補償部が系統と授受した有効電力を補償する必要がある。

〈4・3〉 定常運転に対する解析結果 図5に示した時間シーケンスで直列補償部の起動と停止をシミュレーションした波形を図6に示す。ここで、図(a)は位相変圧器モード、図(b)は直列コンデンサモードでの解析波形であり、時刻0では並列補償部を既に起動させてある。

直列補償部において PWM 制御器の変調度を零として変換器のゲートをデブロックしたのち、時刻 20msec の地点で遮断器 CB2 を開放したことで、直列補償部の変換器電流 I_N が流れはじめている。時刻 40msec では直列補償電圧指令 $V_c^* = 0$ として直列補償部の電圧制御を動作させたことで、直列補償電圧 V_c が零に制御されている。その後の V_c^* のステップ変化に対しては、5msec 程度で V_c が応答するとともに、位相変圧器モードでは有効電力 P_{32} が約 0.11p.u. 増加し、直列コンデンサモードでは約 0.09p.u. 増加している。時刻 150msec 以降の停止動作では、直列補償電圧 V_c を零に絞った後に遮断器 CB2 を投入し、ゲートブロックにより停止している。この結果から、図5のシーケンスにより位

相変圧器モード、直列コンデンサモードとも過電圧や過電流を引き起こすことなく、起動・停止できることが確認された。

直列補償電圧を変化させたときの潮流の変化に関しては、2つの補償モード間で差異が生じている。直列補償電圧を変化させたときの有効電力 P_{32} の変化幅は両補償モード間で大きな差はないが、無効電力 Q_{32} の変化幅は大きく異なる。位相変圧器モードでは、直列補償電圧を変化させる前と後とは Q_{32} は殆ど変化していない。これに対し、直列コンデンサモードでは、約 0.06p.u. 変化している。これは、各補償モードが出力する直列補償電圧の基準位相の違いが系統への補償効果の違いとなって現れたものであり、一般的に直列補償電圧の変化に対して有効電力のみが応答する位相変圧器モードの方が扱いやすい。ただし、系統の力率が高くなると両補償モード間の差は顕著ではなくなり、力率1ではほぼ同一となる。

5. 系統事故時の過電圧・過電流抑制

〈5・1〉 バイパススイッチ 並列補償部は自励式 SVC と同様な構成であり、事故時の運転継続性について様々な論文で報告されている⁽⁶⁾。一方、直列補償部は系統に直列に接続している構成上、系統事故により送電線に地絡電流が流れると、変換器にも地絡電流に対応した過電流が流れる。そこで、送電線に流れる電流 I_c を検出し、装置の定格電流を超えた過大な電流が流れると、図2に示すバイパススイッチをオンして変換器を過電流から保護する。万一、変換器の故障などによる過電圧の発生時にも、それを検出してバイパススイッチをオンすることにより、故障の拡大や系統の分離を防ぐことができる。バイパススイッチのスイッチ素子には、VBO (Voltage Break Over) フリー光サイリスタが適している。VBO フリー光サイリスタは、所定の電圧でスイッチするようにブレイクオーバー電圧が設計された光トリガサイリスタである。このサイリスタの使用により、万一の回路不動作時などに発生する過電圧を自動的に抑制することが可能となる。

〈5・2〉 解析モデル バイパススイッチによる直列補償部の保護方式を採用するにあたっては、特に過電圧・過電流を引き起こすことなく、確実に短時間にバイパススイッチが投入・開放され、変換器を保護できるかが重要となる。このような事項を検証するため、図1～図3に示したシミュレーションモデルを使い、次に示す代表的な3種類の系統事故ケースについて解析を行った。

(1) 1回線3LG-3LO :

平衡故障に対する応動を確認するため、ノード7において3線地絡(3LG)を発生させ、70msec後に地絡点の両端の遮断器(CB67・CB78)を開放(3LO)する。

(2) 1回線1LG-1LO :

不平衡故障に対する応動を確認するため、ノード7において1線地絡(1LG)を発生させ、70msec後に地

(a) 1回線3LG-3L0

(b) 1回線1LG-1L0

(c) 2回線同相1LG-1L0 (欠相事故)

図7 系統事故時の電流波形

Fig.7. Waveforms of UPFC currents at system faults.

絡点の両端の遮断器 (CB67・CB78) の当該相を開放 (1L0) する。

(3) 2回線同相1LG-1L0 (欠相事故) :

事故除去後に大きく不平衡が残るケースとして、2回線同相1LG-1L0事故を想定する。ノード7とノード7'において同相1線地絡を発生させ、70msec後に地絡

(a) スター結線

(b) デルタ結線

図8 直列連系の構成

Fig.8. Configurations of the series transformer and the bypass switches.

点の両端の遮断器 (CB67・CB78, CB67'・CB78') の当該相を開放する。

〈5・3〉 シミュレーション結果

事故ケース(1)～

(3)の解析結果を図7に示す。事故発生により系統に地絡電流が流れると、その電流を検出してバイパススイッチをオンすると共に直列補償部の変換器をゲートブロックし、事故電流をバイパススイッチにバイパスさせている。事故点が開放されたことにより系統電流が減少すると、ゲートブロックを解除するとともにバイパススイッチにオフ指令を与え、その20msec後に電圧制御を開始している。事故後の電力動揺の抑制を効果的に行うためには、可能な限り短時間で定常運転状態へと復帰する必要がある。この復帰のためにはバイパススイッチに流れる電流が完全に零となるのを待つ必要があり、バイパススイッチへのオフ指令と電圧制御の開始間に20msecの待ち時間を置いている。この待ち時間は、通常系統電圧の半周期以上が必要であるが、ここでは時間余裕をとって20msecとしている。

ケース1～ケース3の事故形態の違いによる保護性能の差はなく、どのケースでも過電圧・過電流を引起こすことなく、良好な保護が行われている。

〈5・4〉 バイパススイッチと直列変圧器の結線方式

装置の耐圧の観点から変圧器の一方の巻線をスター結線とし、その中性点を直接接地することが一般的に行われる。自励式位相調整器の直列変圧器では、1次巻線はオープンスター結線であるために接地できない。そのため図8(a)に示すように2次側をスター結線として、その中性点を接地することが考えられる。その際、変換器用変圧器の中性点も接地し、系統の零相電流をバイパスさせる必要がある。この時のバイパススイッチの構成は、1アームのサイリスタがオンすれば直列変圧器の1相が短絡できるように、中性点を接地したスター結線となる。しかしこの構成では、系統事故時に重大な問題を引起こすことになる。

図9は、直列変圧器の2次巻線を中性線付きのスター結線とした場合についての、図7(c)の事故ケース(3)と同一条件での解析結果である。この解析ケースでは、事故点の開

図9 欠相事故時の電流波形（直列変圧器：スター結線）
Fig.9. Waveforms of UPFC currents at system faults.
(Series transformer: Y winding)

図10 欠相事故時の回路動作
Fig.10. Circuit behavior during system faults.

放により系統電流 I_c が減少したことを検出してバイパススイッチにオフ指令を与え、その 20msec 後に直列補償電圧 V_c の制御を開始しているが、バイパススイッチが完全にオフしていなかったために変換器の出力が短絡状態となり、その過電流を感知して再びバイパススイッチをオンした後ゲートブロックしている。

図10は、図9の解析で生じた現象を説明した図である。1LGが発生する 20msec 以前では、変換器用変圧器に流れる直列補償部の出力電流 I_N に零相成分の重畳はなく、3相

平衡した電流が流れている。時刻 20msec にて 1LG が発生したことにより、期間 A では直列変圧器を介して変換器用変圧器の中性点には零相電流が流れ、過電流となっている。バイパススイッチ投入後の期間 B では、変換器用変圧器零相インピーダンスに含まれるインダクタンスに貯えられたエネルギーにより、零相電流は減衰しながらも直流電流として流れ続ける。サイリスタにより構成されたバイパススイッチは、期間 C で示すように、オフ指令が与えられても直流電流を遮断する能力はない。このため、期間 D においてオフできなかった相 (R 相) で V_c の制御開始時に出力が短絡状態となり、再び過電流を発生させている。

本論文で検討しているように自励式位相調整器の直列変圧器の巻線を図 8 (b) に示すようなデルタ結線とすることで、出力電流 I_N への零相電流の重畳は無く、このような問題は発生しない。

6. むすび

今回、自励式位相調整器の起動・停止動作や定常運転動作、系統事故時の動作について、特に直列補償部を中心に EMTF により瞬時値解析を行った。これにより、直列補償部の起動および停止が、過電圧や過電流を引き起こすことなく良好に行えることを示した。さらに、系統事故時の過電圧・過電流から自励式位相調整器の直列補償部を保護する方式として、サイリスタを使用したバイパススイッチによる保護方式を検討した。この結果、3LG-3LO、1LG-1LO、および欠相事故においても良好な保護特性が得られた。

(平成8年10月25日受付, 同9年2月24日再受付)

文 献

- (1) 嶋田 隆一 : 「パワーエレクトロニクス応用による新送電システム」 電学誌, 112巻 1号, 平成4年
- (2) 藤田, 紅林, 野原, 後藤 : 「高速位相器によるループ系統制御」 平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.5
- (3) L. Gyugyi, C. D. Schauder, K. K. Sen : "Static Synchronous Series Compensator A solid-state Approach to the Series Compensation of Transmission Line", IEEE, PES Winter Meeting, Paper No. 96 WM 120-6 PWRD, 1996
- (4) B. T. Ooi, S. Z. Dai, F. D. Galiana : "A SOLID-STATE PWM PHASE-SHIFTER", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.8, No.2, pp.573-579 (April 1993)
- (5) M. R. Iravani, P. L. Dandeno, K. H. Nguyen, D. Zhu, D. J. Maratukulam : "APPLICATIONS OF STATIC PHASE SHIFTERS IN POWER SYSTEMS", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.9, No.3, pp.1600-1608 (July 1994)
- (6) 常盤, 市川, 色川, 北原 : 「電力系統用自励式 SVC の開発」 電学論 B, 113巻 2号, 平成5年

- (7) 千田, 佐藤, 菅原, 森川, 田村, 色川: 「自励式位相調整器の瞬時値解析による検討」電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-96-114; PSE-96-114, 1996

千田 卓二 (正員)

1960年5月30日生まれ。1983年3月東京工業大学電気・電子工学科卒業。同年4月東北電力(株)に入社。主として電力系統の解析・制御に関する研究に従事。現在, 同社研究開発センター勤務。

佐藤 佳彦 (正員)

1955年7月9日生まれ。1980年3月東北大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月東北電力(株)に入社。主として電力系統の制御技術・自動化システムに関する技術業務に従事。現在, 同社電力システム部(制御技術)副長。

菅原 洵 (正員)

1937年9月24日生まれ。1962年3月岩手大学電気工学科卒業。同年4月東北電力(株)に入社。主として電力系統保護・安定化に関する技術業務に従事。現在, 同社電力システム部部長。

森川 竜一 (正員)

1967年12月2日生。1992年3月大分大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年4月(株)東芝に入社。主として電力用パワーエレクトロニクス装置の研究開発に従事。現在, 同社重電技術研究所勤務。

田村 吉章 (正員)

1942年12月13日生。1968年3月早稲田大学理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月東京芝浦電気(株)入社。主としてパワーエレクトロニクス, 半導体製造装置等の研究開発に従事。現在, エレクトロニクス技術開発部主幹。工学博士。

色川 彰一 (正員)

1950年3月30日生。1975年3月早稲田大学理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)東芝に入社。主として直流送電, SVCの開発に従事。現在, 電力変電技術部主幹。1988年論文賞。IEEE会員。