Overshoot Damping Control of DC Current at Deblock in AC-DC Interconnected System with Externally Commutated Converters

Keiji Kogiso Member (Chubu Electric Power Co., Inc.)

Takaaki Shimonosono Member (Chubu Electric Power Co., Inc.)

Keywords: externally commutated converter, FC, trigger delay angle, deblock, overshoot, EMTP

Higashishimizu Frequency Converter (FC) Station interconnects the 50 Hz system of Tokyo Electric Power Company with the 60 Hz system of Chubu Electric Power Company. The construction work was started in 1994, and all equipment installation work was completed in 2000. The completion of 275 kV power line on 60 Hz side was delayed, however, the construction to drive FC temporarily by connecting existing 154 kV power line to FC station was executed, and FC began to be operated in March, 2006. This paper introduces the steady driving strategy of FC in small short-circuit capacity.

Deblock of AC-DC interconnected system with externally commutated converters generally adopts soft start which makes trigger delay angle about 90 degrees and starts DC voltage from about 0 kV. However, High DC voltage is possibly caused by relation between the deblock signal and AC voltage phase at the commutation start of converter, resulting to overdue current. Consequently, overshoot of DC current is generated and transient AC voltage sag is caused especially under the condition of relatively weak AC system.

The main circuit diagram of Higashi-Shimizu FC is shown in Fig. 1. This is the system constitution that is similar to domestic other FC and BTB.

We resolved the generation mechanism of DC current overshoot at deblock. In addition, we reflected the mechanism in the control system of Higashi-Shimizu FC, and drew up overshoot damping control by EMTP simulation. Figure 2 shows a wave pattern when a commutation delay is maximum. It shows that direct current overshoot is restrained enough by Overshoot damping control, and undershoot is small.

Furthermore, we checked the effect of overshoot damping control at the commissioning test period and verified that result of measurement corresponded with EMTP simulation. Figure 3 shows a wave pattern observed in Commissioning test, and EMTP simulation.

Fig. 1. Main circuit diagram of Higashi-Shimizu FC

Fig. 2. Deblock waveforms at 60 REC maximum delay

Fig. 3. Deblock waveforms at 60 REC

他励式交直連系設備における起動時直流電流オーバーシュート抑制制御

正 員 小木曾慶治* 正 員 下之園隆明**

Overshoot Damping Control of DC Current at Deblock in AC-DC Interconnected System with Externally Commutated Converters

Keiji Kogiso*, Member, Takaaki Shimonosono**, Member

Deblock of AC-DC interconnected system with externally commutated converters generally adopts soft start which makes trigger delay angle about 90 degrees and starts DC voltage from about 0 kV. High DC voltage, however, is possibly caused by relation between the deblock signal and AC voltage phase at the commutation start of converter, resulting to overdue current. Consequently, overshoot of DC current is generated and transient AC voltage sag is caused especially under the condition of relatively weak AC system.

We resolved the generation mechanism of DC current overshoot at deblock. In addition, we reflected the mechanism in the control system of Higashi-Shimizu FC, and drew up overshoot damping control by EMTP simulation. Furthermore, we checked the effect of overshoot damping control at the commissioning test period and verified that result of measurement corresponded with EMTP simulation.

キーワード：他励式変換装置，FC，制御遅れ角，起動，オーバーシュート，EMTP

Keywords: externally commutated converter, FC, trigger delay angle, deblock, overshoot, EMTP

1. まえがき

東清水 FC は 50 Hz 側東京電力 154 kV 系統と 60 Hz 側中部電力 275 kV 系統を連系するべく 1994 年から建設に着手し、2000 年には全ての機器据付工事が完了した。しかしながら、60 Hz 側計画送電線に建設遅延が生じたため、2006 年に既設 154 kV 送電線を活用して連系する応急対策工事を実施した。

連系送電線の変更により FC 母線での短絡容量は当初の約 2300 MVA から約 730 MVA となり 275 kV 連系を予定して設計されたシステムにおいて短絡容量比 (SCR) は 2.4 程度で一般に必要とされる SCR 3.0⁽¹⁾ を下回った。

これを受け、高調波不安定現象、FC 応動による電圧変動、FC 設備加圧時の電圧変動等、種々の問題に対し事前検討を行った結果、適切な設備対策ならびに FC の融通量を

100 MW 上限とすることで安定運転できる見込みを得た。

本論では、応急対策工事で顕在化し、既存の制御方式では回避し難い問題であった FC 起動時の電圧変動対策について検討した結果について述べる。

周波数変換装置 (FC) などの他励式交直連系設備では、起動時の制御遅れ角 (α) を約 90° として直流電圧をほぼ零から運転を開始し、徐々に運転時の小さな α へと制御するソフトスタート方式を採っている。しかし、実際には、起動指令と交流電圧位相のタイミングによっては転流開始が数 ms 遅れるため、起動位相よりも小さな α で転流が開始される。この遅れ時間が長いほど高い直流電圧が直流リアクトルに印加され、大きな直流電流オーバーシュートが発生する。これは、交流母線側に遅れ無効電力のオーバーシュートとして現れ、過渡的な交流母線電圧の低下を招く。

著者らは、東清水 FC 応急対策工事の実施にあたり、起動時の直流電流オーバーシュートの発生メカニズムを明らかにし、それを抑制するための新たな制御方式を提案し、それを EMTP 解析により検討するとともに、その成果を既設 FC 制御装置に取り込んだ。さらに、系統連系試験において、起動時の直流電流オーバーシュート抑制制御が設計通りに動作することを確認するとともに、解析結果と試験実測結果が合致することを検証した。

* 中部電力 (株) 流通本部 工務部
〒461-8680 名古屋市東区東新町 1
Electrical Engineering Dept., Chubu Electric Power Co., Inc.
1, Higashi-Shincho, Higashi-ku, Nagoya 461-8680

** 中部電力 (株) 工務技術センター
〒456-0022 名古屋市熱田区横田 2-3-24
Electrical Engineering Technology Center, Chubu Electric Power Co., Inc.
2-3-24, Yokota, Atsuta-ku, Nagoya 456-0022

2. FC の構成と起動方法

〈2・1〉 主回路構成 Fig. 1 に東清水 FC の主回路構成を示す。国内 2 箇所の FC や南福光 BTB と同様に、低圧段は Y/△、高圧段は Y/Y 結線とした変換装置用変圧器 2 台を介して、三相ブリッジを 2 段直列にした 12 パルス構成とし、定格 300 MW (DC125 kV × 2400 A) の光直接点弧サイリスタバルブを接続する⁽¹⁾。

東清水 FC の最低運転電力は、定格 × 10% の 30 MW (125 kV × 240 A)、電力刻み幅は 1 MW である。なお、融通量は前述のとおり東清水 FC 応急対策では、100 MW (125 kV × 800 A) を上限としている。

〈2・2〉 制御装置の構成 Fig. 2 に東清水 FC 制御装置の構成を示す。国内の他のサイトと同様に、全デジタル、常時 A・B の 2 系列運転方式とし、片系故障時にも残りの健全系で運転継続できるように信頼性の向上を図っている。

FC の融通方向と運転電力指令値、起動/停止の操作は、FC 回線単位制御盤 (DAC) にて行うこともできる。起動/停止制御、潮流反転制御、電力変化速度制御などの機能を有する共通制御装置は、指令に応じて融通電力設定値 (Pdp)

Fig. 1. Main circuit diagram of Higashi-Shimizu FC.

Fig. 2. Control system of Higashi-Shimizu FC.

Fig. 3. Deblock sequence of Higashi-Shimizu FC (60 REC-50 INV).

を演算し定電力制御 (APR) を行い、直流電流指令値 (Idp) として両端子の 12 相制御装置に出力する。12 相制御装置は、端子間の時間協調を取りながら Idp に基づいたサイリスタバルブの点弧タイミングを決定する位相制御を行い、順変換器 (REC) 運転時は定電流制御 (ACR)、逆変換器 (INV) 運転時は定電圧制御 (AVR) または定余裕角制御 (AγR) を自動的に選択して α を決定し、点弧パルス信号をゲートパルス発生装置 (PG) に出力する。その信号は、PG にて光ゲートパルスに変換し、ライトガイドを介して全サイリスタに伝送する。

〈2・3〉 起動方法 東清水 FC の起動は、Idp を最低運転電力の 0.1 PU (240 A)、起動位相 α を 60 Hz 側は 88° 、50 Hz 側は 87° としておき、まず REC 側の 12 相制御装置が両端 BPP 状態を確認した後に自端の起動 (DEB) 指令を出力し、INV 側の 12 相制御装置は REC 側からの DEB 信号を受けた後に自端 DEB 指令を出力する。また、両 12 相制御装置とも、DEB 指令出力と同時に α リミッタをある時定数で上・下限値に開き、各変換器の α を制御することで、直流電圧・電流を目標値とする。60 Hz REC (50 Hz INV) 時の東清水 FC 起動シーケンスを Fig. 3 に示す。

3. 起動時のオーバーシュート発生要因

〈3・1〉 転流開始タイミング ここでは、Fig. 1 のうち 60 Hz 側サイリスタバルブの転流開始タイミングについて述べる。起動 BPP アームは高・低圧段ともに U、X 相であり、起動転流開始アームは U または X 相パルス確認後の次の相、すなわち高圧段が ZH または WH 相、低圧段では ZL または WL 相としている。これより、60 Hz 側における DEB 指令から第 1 相の転流開始までの BPP 解除遅れ時間 (Fig. 3 の①に相当) は、下記ようになる。

- (i) 最小遅れ = 60° (2.8 ms) : 例えば DEB 指令が UH 相の直前ならば、UH 相パルス確認後 ZH 相から転流開始
- (ii) 最大遅れ = 210° (9.7 ms) : 例えば DEB 指令が UL 相の直後ならば、XH 相パルス確認後 WH 相から転流開始

Fig. 4. Deblock waveforms of 60 REC.

このように、12相制御装置のDEB指令と交流母線電圧位相の関係により、サイリスタバルブの転流開始が遅れるため、転流が開始した時は既に α リミッタが上・下限値に向けて開き始めていることになる。この結果、REC側は起動位相よりも小さな α での転流開始となり、BPP解除遅れ時間が大きいほど転流開始 α は小さくなる。

よって、REC側が最大遅れ時間で転流を開始した場合、開始直後に発生する直流電圧が最大となって直流リアクトルに印加されるため、直流電流のオーバーシュートが最大となる。この結果、FCが消費する遅れ無効電力のオーバーシュートが最大となり、交流母線の過渡的な電圧低下が最大となる。

〈3・2〉 起動時の直流電流オーバーシュート 60 REC 起動時のBPP解除遅れ時間と転流開始 α 、直流電圧、直流電流および消費無効電力などの関係について確認するため、EMTP解析を実施した。60 REC側が最小および最大遅れ時間で起動した場合の各部の波形をFig. 4に示す。なお、

50 INV側は、60 DEB指令から20 ms後に転流を開始するものとして解析した。

同図(a)より、最小遅れ時間で起動できたとしても、既に α リミッタが開いているために約 80° での転流開始となり、定常値240 Aの2倍程度の直流電流オーバーシュートが発生する。この結果、交流母線側には、65 MVarの遅れ無効電力のオーバーシュートが発生する。

一方、同図(b)の最大遅れ時間の場合、転流開始 α が 70° 近くまで小さくなり大きな直流電圧が立上る。この結果、約710 Aの直流電流、約90 MVarの遅れ無効電力のオーバーシュートが発生する。さらに、ACRが過大な直流電流オーバーシュートを抑え込むため、その後のアンダーシュートも厳しくなる。

なお、Fig. 4最下段には連系点における電圧値(実効値)を示す。また、最過酷起動条件であるBPP解除遅れ最大となった場合の対策前電圧変動値を100%とし、これを当該系統での許容値となる68%以下程度にすることを目標に以

降の対策検討を実施した。

4. オーバーシュート抑制制御の検討

〈4・1〉 起動位相での転流開始 前章で、転流開始 α が小さくなるほど、直流電流のオーバーシュートが大きくなることを明らかにした。したがって、 α リミッタの開き動作を遅延することにより、起動位相で転流を開始させれば、オーバーシュートを抑制できると考えた。

そこで、Fig. 4(b) と同一タイミングの 60REC 最大遅れ時間起動について、60REC の α リミッタ動作を DEB 指令から 10ms 遅らせて EMTP 解析を行った。その結果を Fig. 5 に示す。

60REC 側を起動位相である $\alpha = 88^\circ$ で転流開始させることにより、現状制御の最小遅れ時間起動 (Fig. 4(a)) とほぼ同一の波形となった。しかし、過度に α リミッタ動作を遅延させると、両端子の正常かつ安定な協調動作が確保できない場合があるため、遅延時間の選定に注意が必要となる。

〈4・2〉 起動時の Idp 低減 次に、起動時の Idp を最低運転量の 0.1PU よりも小さくしておけば、直流電流のオーバーシュートを抑制できると考えた。前節と同様に Fig. 4(b) と同一タイミングの起動について、Idp 事前値を 0.05 PU とし、オーバーシュート発生後に 0.1 PU に立上げることとして EMTP 解析を行った。その結果を Fig. 6 に示す。

前節の Fig. 5 と比較すると、転流開始 α は約 10° 小さくなるが、直流電流のオーバーシュートはより抑制できることが確認できる。しかし、その後のアンダーシュートは大きく悪化した。したがって、この制御を採用する場合は、直流電流の断続が発生しないよう、Idp 事前値と 0.1 PU への立上げ方法に注意が必要となる。

〈4・3〉 オーバーシュート抑制制御 前節の事象を踏まえながら、両端子の BPP 解除遅れ時間、 α リミッタ遅延時間、起動用 Idp 低減量と立上げ方法をパラメータとして、

Fig. 5. Deblock waveforms of limiter delay control.

EMTP 解析を繰返し実施した。その結果、直流電流のオーバーシュート抑制 (電圧変動軽減) とアンダーシュート抑制 (断続防止) とともに満足させるため、Fig. 7 に示す制御シーケンスを東清水 FC の 60REC 起動制御として今回新たに採用し、FC 制御装置の改造を行った。

具体的には 50Hz 側との時間協調を考慮し、3ms の α リミッタ遅延タイムを 60Hz 12 相制御装置に挿入した (Fig. 7 の①)。この結果、BPP 解除遅れ最小の場合は、起動位相での転流開始となる。また、Idp 事前値を 0.06 PU とし、オーバーシュート発生後 (自端 DEB 指令 29ms 後) に 0.1 PU へ立上げるパターン回路を共通制御装置に挿入した (Fig. 7 の②)。

この 60REC 起動時の直流電流オーバーシュート抑制制御の効果を Fig. 8 に示す。これは、Fig. 4 と同一の起動タイミングについて、EMTP 解析を実施した結果である。

最小遅れ時間で起動させた Fig. 8(a) では、起動位相による転流開始と Idp 事前値低減の効果により直流電流オーバーシュートは大きく抑制できており、50INV の転流開始が

Fig. 6. Deblock waveforms of Idp reduce control.

Fig. 7. Overshoot damping control at 60REC deblock.

Fig. 8. Deblock waveforms of 60 REC overshoot damping control.

遅れば更に緩和されると推測できる。また、最大遅れ時間で起動させた同図 (b) は、現状制御の最小遅れ時間起動 (Fig. 4(a)) や Fig. 5, Fig. 6 の何れと比較しても、オーバーシュート、アンダーシュートともに良好に改善されていることが確認できる。さらに、電圧変動についても当初の目標である未対策時の 68% 以下となることを確認した。

5. 系統連系試験結果

東清水 FC の応急対策工事に伴う系統連系試験は、2006 年 1 月中旬から 2 ヶ月間で実施した。

すべての制御定数チューニング後の 60 REC 起動において、60 Hz 側 BPP 解除遅れ時間が最大 (7.7 ms) となったケースのオシロ測定結果を Fig. 9(a) に示す。これは、メモリハイコダに記録した 0.2 ms サンプルングデータをグラフ化したものである。この結果から、Fig. 7 に示した起動時オーバーシュート抑制制御の正常動作とその効果を確認することができた。なお、本ケースでは、50 Hz INV 側の BPP 解除遅れ時間も遅く (8.0 ms)、オーバーシュート最大値を経過した後の転流開始となっている。

Fig. 9(b) に、これと同一タイミングで実施した EMTP 解析結果を示す。同図 (a) のオシロ測定波形に比較し、FC の動作に関し良く一致することを検証できた。

また、電圧変動に関しても当初の目標値を十分に満足することを確認した。なお、電圧変動の実測と解析結果との

違いは、周辺系統水力発電所運転状況等の系統条件の多少の相違によるものと推定する。

6. むすび

本論文では、これまで触れられることが殆どなかった、他励式交直連系設備の起動時における直流電流オーバーシュート発生メカニズムを解明し、制御シーケンスを改善することで、これを効果的に抑制可能なことを EMTP 解析と東清水 FC 系統連系試験の実測波形で証明した。

この成果が、交直連系時の相互作用と電力品質確保の検討などに役立てば幸いである。

最後に、東清水 FC 応急対策工事の実施に向けて、ご協力いただいた各社関係者に謝意を表する。

(平成 18 年 7 月 31 日受付, 平成 19 年 5 月 21 日再受付)

文 献

- (1) 「直流送電の現況と適用技術」, 電気学会技術報告 (II 部), No.346 (1990-8)
- (2) Y. Hasegawa, K. Itou, and M. Egawa: "Reduction of Operation Limitation of Minami-Fukumitsu BTB and Higashi-Shimizu FC", 1999 National Convention Record IEE Japan, Vol.6, No.S.28-3 (1999-3) (in Japanese)
長谷川豊・伊藤賢二・江川正尚: 「南福光 BTB・東清水 FC の概要と運転範囲の拡大技術」, 平成 11 年電気学会全国大会, Vol.6, No.S.28-3 (1999-3)

Fig. 9. Deblock waveforms at 60 REC of Higashi-Shimizu FC.

小木曾 慶 治 (正員) 1971 年 10 月 26 日生。1996 年 3 月信州大学大学院工学系研究科電気電子工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月中部電力(株)入社。現在、工務部発電電グループ所属。主として変電所と機器の保守，設計に従事。

下之園 隆 明 (正員) 1971 年 12 月 31 日生。1994 年 3 月鹿児島大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月中部電力(株)入社。現在、工務技術センター技術グループ所属。主として変電所と機器の設計に従事。