

自己消弧形素子を用いた補償装置とその適用例

宇都 克哉(うと かつや)

山本 光俊(やまもと みつとし)

米田 和生(よねだ かずお)

1 まえがき

自己消弧形素子を使用した無効電力と高調波電流を補償対象とした装置としては、GTO (Gate Turn-Off Thyristor) を使用した大容量の自励式無効電力・フリッカ補償装置と、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) を使用した小中容量のアクティブフィルタがその代表的な装置である。

本稿では、自励式フリッカ補償装置およびアクティブフィルタの補償原理と特長・効果・適用例について述べる。

2 自励式フリッカ補償装置

2.1 特長

今回開発した自励式フリッカ補償装置（自励式 SFC）は、大容量逆導通 GTO を用いた電圧形インバータで構成され、製鋼用アーク炉などの負荷に並列に接続して、負荷の発生する無効電流、高調波電流を補償するものである。

フリッカ補償装置としては、従来からサイリスタ制御リクトル方式 (TCR) に代表される他励式補償装置が採用されている。この TCR は、単位容量あたりの価格が自励式に比べ安価なため、フリッカ対策だけでなく、大容量変動負荷の電圧変動に起因する系統障害対策や負荷側での消費電力の不安定解消対策として有効となる。反面、制御応答速度に一定の制約があり、補償対象が基本波無効電力にとどまるごと、高調波対策として大量のパッシブフィルタを必要とすることなど、利用面では慎重な扱いが必要であった。

これに対して自励式 SFC は、PWM 制御により高速に瞬時電流制御が可能なため、基本波無効電力だけでなく高調波電流や逆相電流の補償が可能であること、力率改善用コンデンサなしに進相運転が可能であることなどの特長があり、小容量の装置により高いフリッカ改善性能が得られる。

2.2 主回路構成

自励式 SFC の全体構成を図 1 に示す。インバータは、

単相インバータ 3 台で三相 1 多重インバータを構成し、これを変圧器を介して多重接続して大容量化を実現している。

表 1 に主な主回路仕様を示すとともに、特長を以下に記す。

(1) 逆導通 GTO の適用

パワーデバイスとして 4.5 kV 3 kA 逆導通 GTO を採用した。逆導通 GTO は、同一シリコンウェーハ上に GTO とフリーホイーリングダイオードを構成したデバイスで、このデバイスの採用により装置の小型化と高信頼度化を達成した。

(2) インバータの多重化

図 1 自励式 SFC の全体構成

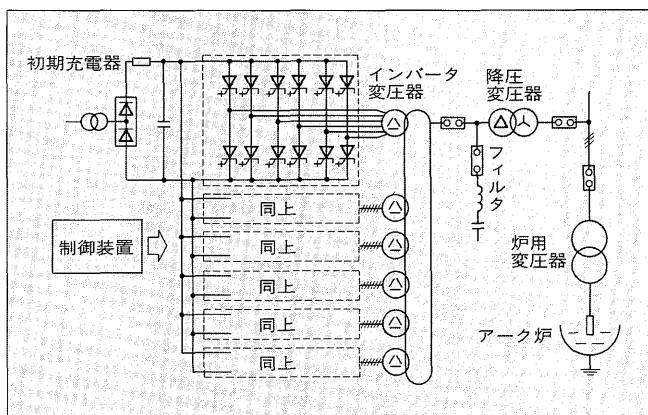


表 1 自励式 SFC の主回路仕様

出 力	容 量	13 MVA
	電 壓	20kV
	電 流	376 A
インバータ	構 成	単相インバータ × 3 相 × 6 多重
	電 壓	885 V
	電 流	816 A
	直 流 電 壓	1,900 V
	スイッチング	540Hz
	素 子	逆導通 GTO 4.5kV, 3kA EF3001RH-45A
	冷 却 方 式	純水水冷方式



宇都 克哉

製鋼用アーク炉電気設備の設計に従事。現在、システム事業本部産業システム事業部技術第二部主任。



山本 光俊

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発研究所電源システム開発グループ副主任技師。



米田 和生

パワーエレクトロニクス製品の開発、設計に従事。現在、神戸工場制御設計部主任。

PWM キャリヤに位相差を設けた 9 パルス PWM 方式を採用し、多重変圧器によるインバータ多重を行うことにより装置の大容量化を達成するとともに、1 多重あたりの出力電圧・電流の低高調波化を実現した。

(3) スナバ回生方式

PWM パルス数の増加に伴い、素子スイッチング時の保護回路として設けたスナバ回路、アノードリーアクトルの損失が増大し、インバータ効率の低下の要因となる。このため、スナバおよびアノードリーアクトルのエネルギーを直流中間回路に回生するスナバエネルギー回生方式を採用し、インバータ効率で 98% 以上を達成した。

2.3 制御方式

自励式 SFC の制御方式は負荷電流から補償対象の変動無効電流成分（無効電流、高調波電流、逆相電流）を高速検出して電流指令値とし、インバータ出力電流を電流検出とする瞬時電流制御方式を採用している。制御装置の概略構成を図 2 に示すとともに、主な特長を以下に記す。

(1) 高速・高精度電流制御方式

電流制御方式として、PI 調節器によるフィードバック制御にフィードフォワード制御を付加する方式を採用した。これにより、インバータ電流を補償電流指令値に高速・高精度に追従させる電流制御を実現した。

(2) 高機能補償電流演算

アーク炉などの負荷電流から自励式 SFC が補償すべき補償電流を演算する機能として、無効電流、逆相電流、高調波電流などについて種々の演算機能を備えている。これにより、最適な補償電流成分の演算が可能となり、補償性能の高性能化を達成した。

(3) 全ディジタル制御

制御装置として CPU+マルチ DSP 方式全ディジタル制御を採用し、制御の高速、高精度化に加え、自己診断機能、故障時のデータトレースバック機能、各種定数のディジタル設定機能などの高機能化を図り、試験、保守点検の効率化、高信頼度化を実現している。

2.4 適用例

自励式 SFC の設置例を図 3 に示す。アーク炉変圧器容

量 75 MVA（短絡容量：120 MVA）に対して、基本波無効電力変動抑制用に 85 MVA TCR 形補償装置が設置されている系統に、瞬時無効電力変動と高調波補償を目的として 13 MVA 自励式 SFC を適用した。このときのフリッカ補償効果試験結果を図 4 に示す。補償率 10.8%（炉短絡容量に対する補償装置容量）で、フリッカ改善率 36% を

図 3 自励式 SFC の設置例

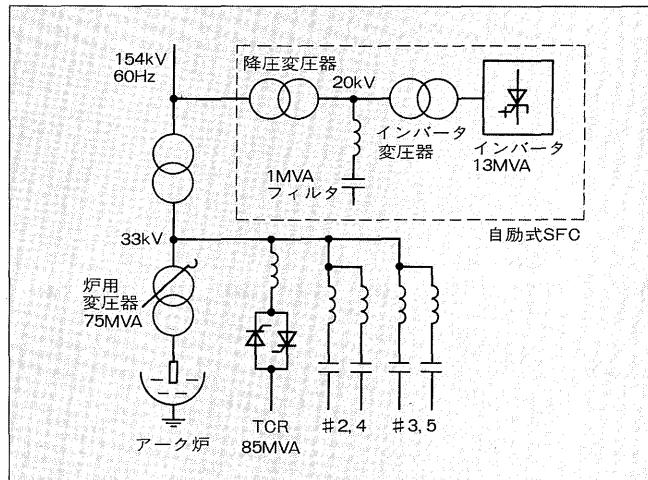


図 4 補償性能確認試験結果

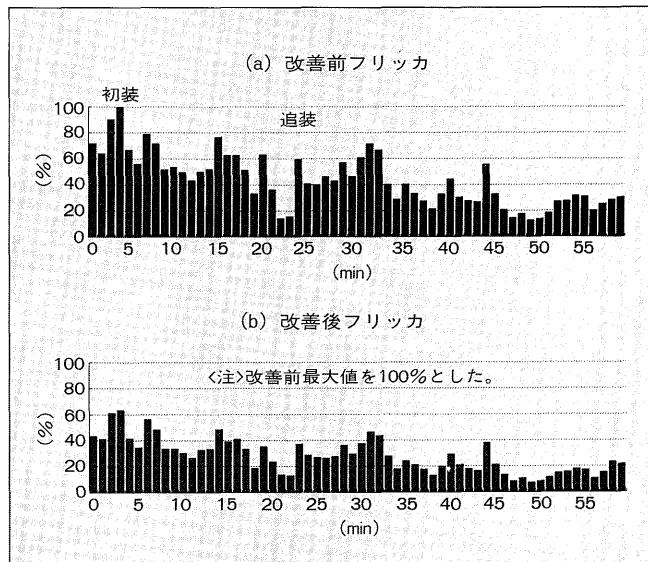
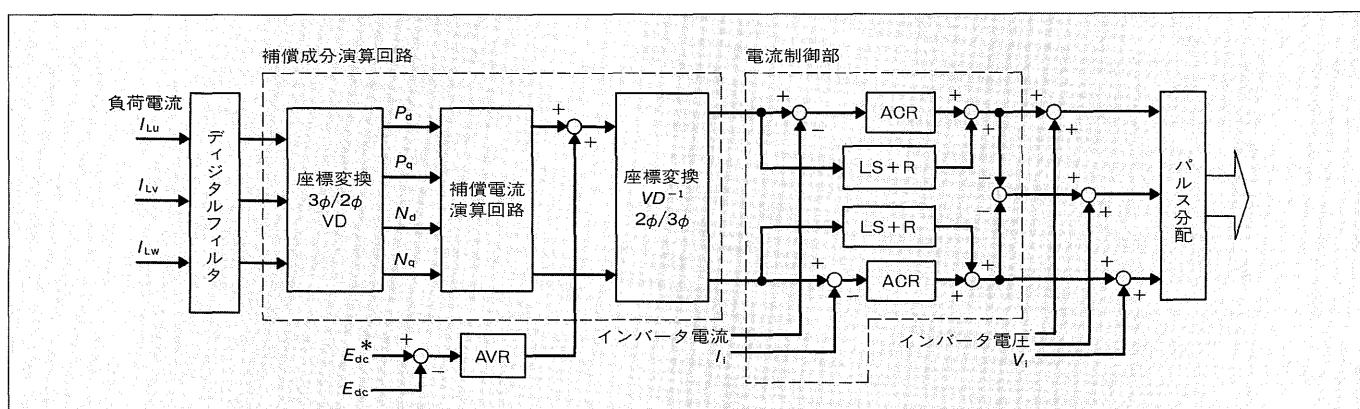


図 2 制御装置の構成



達成している。

③ 富士電機のアクティブフィルタ

3.1 高調波の補償原理

アクティブフィルタ（AF）は、高速の自己消弧形素子IGBTを用いた自励式インバータで構成され、任意波形の電流を出力する可変電流源である。図5に6パルス整流器が発生する高調波電流をAFで補償する場合の補償原理を示す。6パルス整流器の交流入力電流 i_L は、図中①の方波電流となる。この負荷電流に含まれる高調波電流 i_{LH} は、図中②の波形である。AFから、この i_{LH} とは逆位相の電流 i_c （図中③）を負荷に流せば、電源側電流 i_s （図中④）を高調波電流を含まない正弦波電流に改善することができる。

3.2 特長

高調波抑制装置として、従来はパッシブ形LCフィルタが多く利用されており、一定の効果を得ている。このLCフィルタとAFの特徴は、表2に示すような比較が可能であるが、特にAFは、LCフィルタに比べ補償性能、適用性で次のような特長を備えている。

図5 AFの補償原理

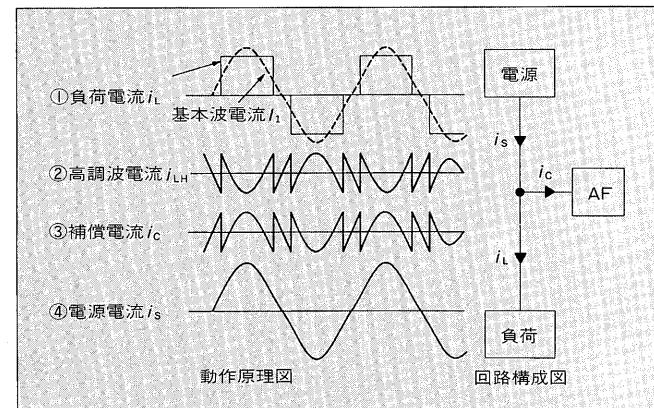


表2 AFとLCフィルタとの特徴比較

項目		AF	LC フィルタ
高調波	低次調波	・複数調波の一括補償 ・任意の次数の補償可能	・各次調波ごとに設置要
	高次調波	・高次調波は比較的苦手	・高次フィルタの構成容易
系統インピーダンス変更などの影響		・ほとんど影響なし	・補償能力の低下 ・フィルタ構成の変更
周波数変動の影響		・ほとんど影響なし	・同期ずれによる補償能力の低下
高調波負荷の増大		・過負荷にならない	・過負荷による加熱、焼損のおそれ
基本波無効電力の補償		・遅れから進みの連続した無効電力補償が容易	・固定した遅れ無効電力補償
増設の容易さ		・並列設置が容易	・高調波流入量などのバランス調整要
設置容積	小		大
損失	失	LC フィルタに比べ大	小

(1) 機能

系統インピーダンスの影響を受けにくく、補償は安定で効果は高い。また過負荷とならず機能停止のおそれがない。

(2) スペースファクタ

複数の高調波を一括補償しているので小形である。また並列設置による増設も容易である。

3.3 富士電機のAFシリーズ

すでに製品化されている「FUJI ACT200/400シリーズ（50～400 kVA）」に対して、今回、通商産業省から制定された「高圧または特別高圧で受電する需要家の高調波抑制対策ガイドライン」を受け、「汎用性」と「高性能化」を追求した「ACT-Miniシリーズ（10～50 kVA）」を開発した。このACT-Miniシリーズは下記のような特長を備えている。

(1) 高性能化

補償対象次数2～13次の高調波を一括補償し、また補償率（AFにより何%の高調波電流を抑制できるかを示すもの）は5次、7次が90%と高い値を実現している。

(2) シリーズ化、多機能化

機種が豊富で用途に合わせた機種選定ができる。装置容量は、10, 20, 30, 50 kVAで、それぞれ屋内用と屋外用を標準系列としている。定格周波数は50/60 Hz兼用で自

表3 AFの装置仕様

AFシリーズ 項目	ACT-Mini	FUJI ACT200/400
定格補償容量	10～50 kVA	50～400 kVA
定格電圧	400/440 V ±10%, 200/220 V ±10%	
定格周波数		50/60 Hz ±3%
相 数		三相3線式
補償高調波次数	2～13次	2～25次
高調波補償率	5, 7次：90%以上	85%以上
設置場所	屋内・屋外設置形	屋内
周囲温度		-10～+40°C
相対湿度		30～90%（ただし、結露なきこと）
絶縁耐圧		AC 2,000 V 1分間
絶縁抵抗		5 MΩ以上 DC 500 V メガーにて

図6 ACT-Mini（10kVA）屋内形の外観

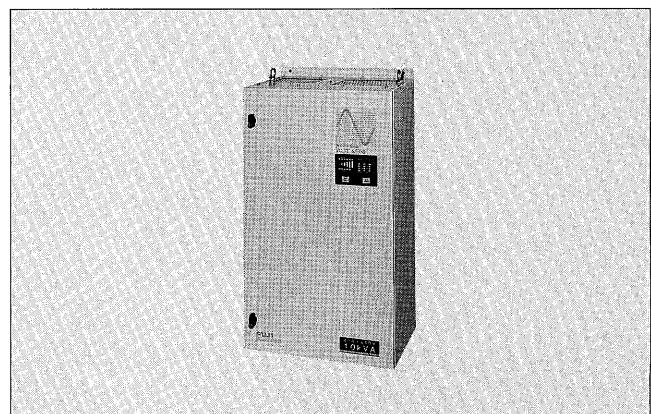


図7 ACT-MiNi (30 kVA) の適用例

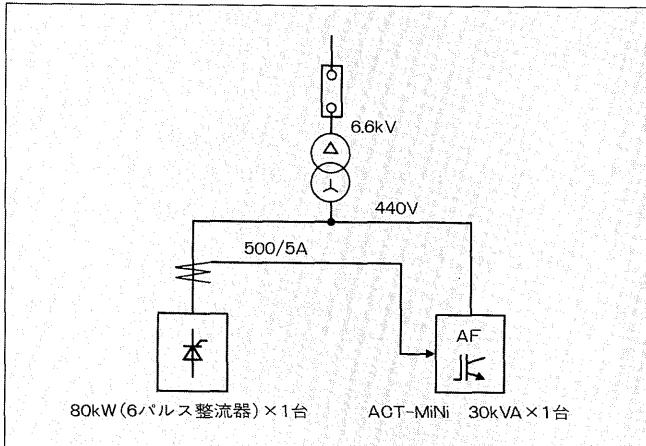
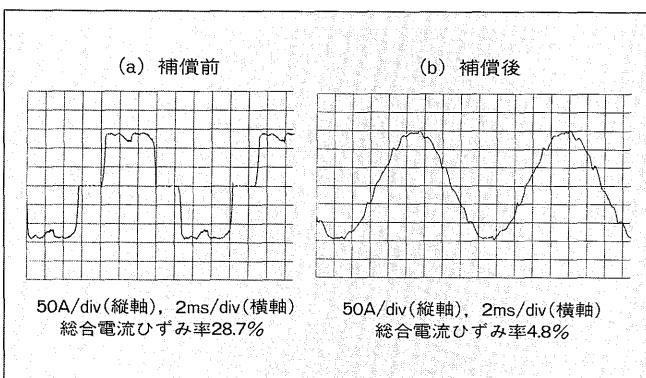


図8 整流負荷の測定波形



動切換となっている。また、補償対象の負荷電流検出入力を5回路分標準装備し、幅広いシステムに適用できるようになっている。その他、並列運転機能があり、同容量、異容量の組合せが可能である。

(3) 小形・軽量化

主回路電気部品およびインバータユニットの最適化設計により、大幅な小形・軽量化を実現した。

表3に富士電機のAFシリーズの装置仕様、図6に今回開発したACT-MiNiのうち、一例として10kVAの外観を示す。

3.4 効果

6パルス整流器(80kW)を負荷に、ACT-MiNi(30kVA)で、発生高調波をすべて補償対象として適用した設置例を図7に、その波形を図8に示す。補償後の電流は高調波の含有率の低い正弦波状の波形となり、総合電流ひずみ率は、28.7%から4.8%に改善されている。

3.5 適用例

図9にAFの設置例を示す。この設備では、AFはクレーンの直流電動機駆動設備から発生する高調波電流を補償し、受電点側への流出をガイドラインの上限値以内に低減する目的で設置されている。

図10に実設備での測定波形を示す。ガイドラインの上限値に対して必要とする高調波を補償し、その結果、総合電

図9 クレーン負荷に対する適用例

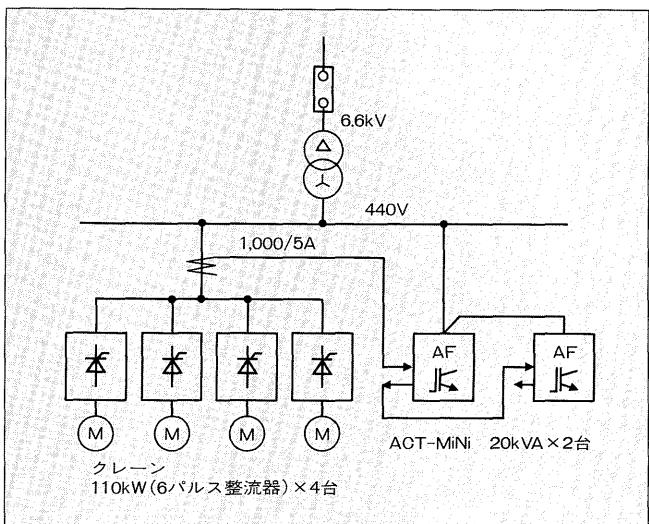
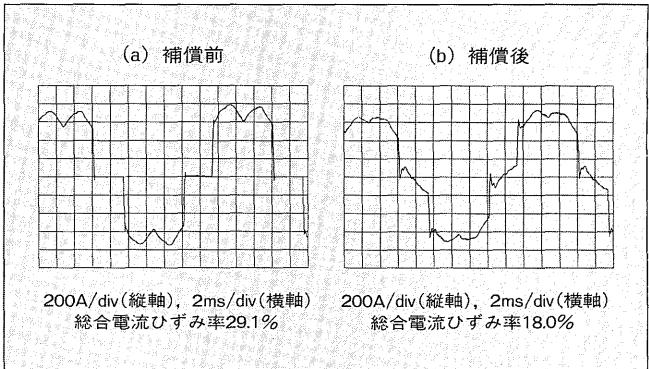


図10 クレーン負荷の測定波形



流ひずみ率を29.1%から18.0%へ改善している。

4 あとがき

自己消弧形素子を用いた補償装置の特長は、原理的に瞬時電力を自由に制御するものであるため、高調波電流・無効電力変動の抑制にとどまらず、逆相電流・有効電力変動などの電源じょう乱要因の抑制も可能であり、またLCフィルタと併用したり系統と直列接続するなどの技術の広がりを見せてきており、使用実績も年々増加している。

今後の装置技術の動向は、低コスト化、大容量化、高機能化(多機能化)、低損失化、補償性能の向上、小形化に向かっており、適用面での技術課題が主体となっている。

参考文献

- (1) 真野紳一ほか：フリック補償用自励式無効電力補償装置の開発、平成7年電気学会産業応用部門大会、No.190 (1995)
- (2) 漆原信行ほか：産業向けアクティブフィルタ、富士時報、Vol.65, No.10, p.683-688 (1992)
- (3) 米田和生ほか：公共プラントにおける高調波除去技術、電気学会研究会資料、PPE-96-11 (1996)
- (4) 電力用アクティブフィルタ技術、電気学会技術報告 (II部), No.425 (1992)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。