

# 産業向けアクティブフィルタ

漆原 信行(うるしはら のぶゆき)

木戸口 秀隆(きどぐち ひでたか)

小松木 和成(こまつぎ かずなり)

## 1 まえがき

パワーエレクトロニクス技術の発展により、家庭用電気品はもちろん、一般産業用電気品においてもサイリスタまたはトランジスタを使用した半導体電力変換装置が普及している。

一方、電気設備の電子化（コンピュータ、OA機器、FA機器など）の進展により、供給される電源には高品質が要求される状況にあり、半導体電力変換装置から発生する高調波による高調波環境レベルの悪化が問題となっており、法的規制も検討されつつある。

わが国では高調波による障害件数が年々増加していることから、電気協同研究会にて問題の検討が行われ、『電気協同研究』第46巻第2号「電力系統における高調波とその対策」としてまとめられ、表1に示す高調波電流の抑制目標が提案されている。また、逆変換装置を持つコーチェネレーション設備では系統へ流出する高調波電流は総合で5%，各次調波では3%以下とするよう義務づけられている。

高調波抑制対策としては、従来からL-C形フィルタが使用されているが、最近では優れた高調波補償能力、負荷に見合った連続的力率補償、電圧変動補償が可能で、系統インピーダンスに左右されない安定した動作、コンパクトな構造、およびオイルレスなどの特長を持ったアクティブフィルタ（以下、AFと略す）の採用が増しつつある。図1に用途別、補償項目別のAF適用例を示す。

表1 高調波電流の抑制目標値〔契約単位kWあたりの電流値(mA)〕の設定

次数		5	7	11	13	17	19	23	23以上	
系統	配電系統	6.6kV	3.5	2.5	1.6	1.3	1.0	0.9	0.76	0.70
特別高圧系統	22kV	1.8	1.3	0.82	0.69	0.53	0.47	0.39	0.36	
	33kV	1.2	0.86	0.55	0.46	0.35	0.32	0.26	0.24	
	66kV	0.59	0.42	0.27	0.23	0.17	0.16	0.13	0.12	
	77kV	0.50	0.36	0.23	0.19	0.15	0.13	0.11	0.10	

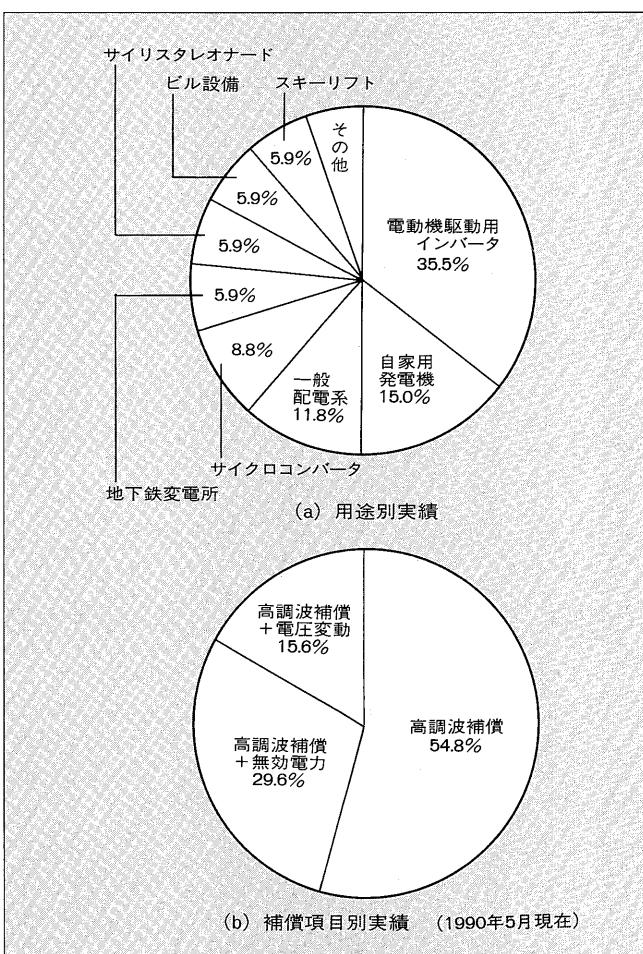
本稿では、今回開発した産業向けAFの原理、仕様、特徴、適用例などを紹介する。

## 2 AFの原理、用途、特徴

### 2.1 補償原理

図2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<sub>L</sub>*は図中④の方波電流となる。この負荷電流に含

図1 AFの用途別、補償項目別実績



漆原 信行



昭和50年入社。石油、石油化学分野の電動力応用、受電などのプラントとりまとめ技術に従事。現在、電機事業本部電機システム事業部産業技術第一部課長補佐。

木戸口 秀隆



昭和56年入社。パワーエレクトロニクス製品の開発・設計に従事。現在、神戸工場設計部課長補佐。

小松木 和成



昭和50年入社。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本部電力変換技術開発部主査。

まれる高調波電流  $i_{LH}$  は、図中③の波形である。AF より、この  $i_{LH}$  とは逆位相の電流  $i_c$  (図中②) を電源側から入力することで、電源側電流  $i_s$  (図中①) を高調波電流を含まない正弦波電流に改善する。

## 2.2 基本構成

AF は図 2 に示したような高周波で急しゅんな電流波形を精度よく出力するため、高周波 PWM インバータが用いられる。図 3 にその主回路構成例を示す。

インバータは、スイッチング素子として高性能 IGBT を

図 2 補償原理

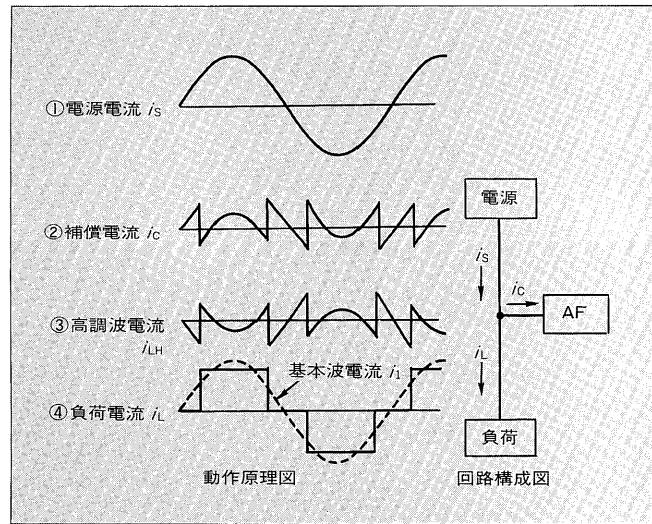


図 3 主回路構成例

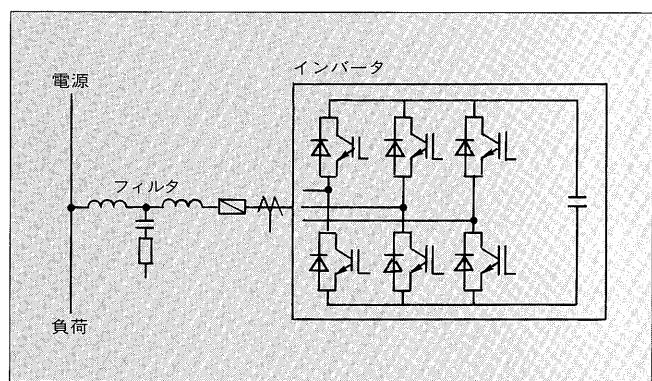
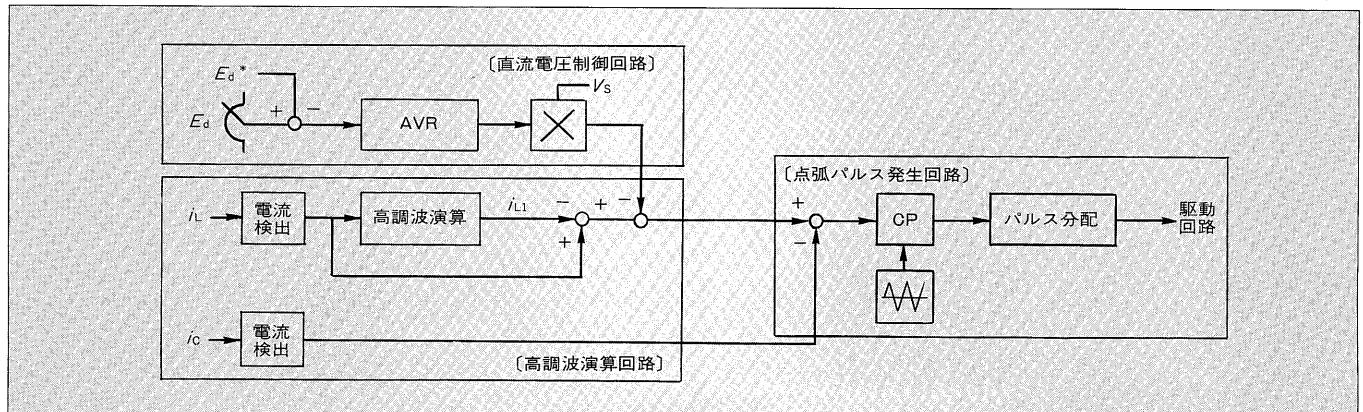


図 4 制御ブロック図



用い、キャリヤ周波数 8 kHz の高周波 PWM 制御の電圧形インバータを基本ユニットとし、キャリヤ周波数に起因する高周波のリップル電流は、L と C からなるフィルタで除去している。

また、基本ユニットのトランスレス並列接続とキャリヤ信号の多相化により、大容量化と高次高調波の補償を可能にするなど、幅広い対応を可能にしている。

図 4 は AF の基本制御ブロック図である。負荷電流中の基本波電流を求めて高調波電流を算出する高調波演算回路、変換器損失分を正弦波電流の形で電源側から補給し、かつ直流電圧を高調波補償に適した値に維持する直流電圧制御回路、ならびに高精度の波形追従制御を実現する高周波 PWM 制御のための点弧パルス発生回路の、三つの制御ブロックから主に構成されている。

## 2.3 L-C 形フィルタとの比較

表 2 は AF と L-C 形フィルタの特徴を比較したものである。インピーダンスタイプの L-C 形フィルタに比べ、

表 2 AF と L-C 形フィルタとの特徴比較

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

補償性能、適用性で次のような優れた特徴を備えている。

### (1) 補償性能

系統インピーダンスの影響を受けにくく、補償は安定で効果が高い。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、並列設置により増設も容易である。

### (3) システムパフォーマンス

負荷に合わせた遅れから進みの無効電力制御が可能で、軽負荷時での電圧上昇を生じさせない。また、非常用発電機の等価逆相電流補償による設備容量の低減も容易である。

## 2.4 用途

AF は補償対象の負荷電流中の基本波有効電流、基本波無効電流、ならびに高調波電流を抽出している。したがって高調波電流ばかりではなく、遅れから進みの無効電流を流入制御できることから、高調波電流補償のみならず無効電流制御による力率補償、電圧変動補償など高機能な無効電力補償装置としても使用できる。

特に、力率補償、電圧変動補償では負荷の無効電力変動に対応した無効電力制御が必要であるが、L-C 形フィルタや力率改善用コンデンサ（以下、SC と略す）では固定もしくは段階的な無効電力の抑制となり、夜間など軽負荷時での進み力率による電圧上昇の一因ともなっている。

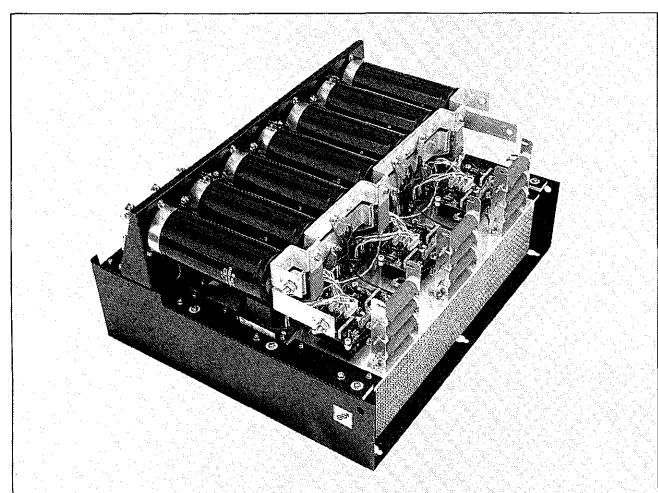
これに対し、AF では負荷の無効電力変動を時々刻々と検出し、かつ連続的な無効電力補償ができることからの確な力率補償、電圧変動補償が可能である。また、SC と組み合わせることで無効電力のベース分を SC が分担し、変動分を AF が分担制御することにより AF の無効電力補償分を少なくすることができる。

なお、制御装置では高調波補償と無効電力補償の個別の出力制限や補償優先度が調整でき、種々のニーズに対応できるものとなっている。

## 2.5 技術動向

AF の大容量化、小形化、低損失化を目的とした IGBT

図 5 100kVA 主回路ユニットの外観



など大容量・高周波デバイスの適用技術の進展、および L-C 形フィルタとの経済的な機能分担を図ったシステム構成・制御技術の確立が、今後の技術課題と考えられる。

## 3 富士 AF の特長と仕様

今回開発した産業向け AF は、下記の特長を備えている。

### 3.1 高次までの電流ひずみ補償

主回路スイッチング素子として IGBT（当社製 600V, 300A）を用いた高周波 PWM インバータを採用している。これを高周波の瞬時電流追従制御で駆動することにより、2 次から 25 次までの広帯域の補償を実現している。

### 3.2 多機能化

高調波電流補償だけではなく、無効電流制御機能も標準装備し、力率補償、電圧変動補償などにも効果を發揮できる多機能形 AF である。

### 3.3 高信頼度

これまで培ってきた無停電電源装置（UPS）および産業用高性能電源の技術を適用し、信頼性の高い装置を実現している。主回路部では、前述の IGBT を適用した主回路ユニットを開発し、他機種と共通化、標準化を図っている。図 5 に 100kVA 主回路ユニットの外観を示す。

制御回路では、特に基本クロックの発振・分周部やゲート信号分配部にはカスタム LSI を適用し、制御回路のシングル化、高信頼化を図っている。

### 3.4 最適化設計による小形・軽量化

主回路部の設計にあたっては、専用のコンピュータシステム開発プログラムを開発し活用している。これにより、高調波補償というきわめて複雑な電流波形に対して

表 3 AF の装置仕様

FUJIAC 200/400 シリーズ *							備考	
補 償 容 量 (kVA)	50	75	100	150	200	300	400	並列接続にて 2,000 kVA まで対応可能
電 壓	200/220V ± 10%, 400/440V ± 10%					3 kV, 6 kV は昇圧用 変圧器要		
基 本 周 波 数	50Hz または 60Hz ± 2 %							
相 数	三相 3 線							
補 償 高 調 波 次 数	2 ~ 25 次							
高 調 波 补 償 率	85% 以上					定格出力にて		
設 置 場 所	屋 内							
周 围 温 度	0 ~ +40°C							
相 对 湿 度	30 ~ 90%							
騒 音	70dB 以下							
絶 縁 耐 圧	AC2,000V 1 分間							
絶 縁 抵 抗	3 MΩ 以上(500V メガにて)							

\* : FUJIAC 400 シリーズ (400V 入力) は近日発売予定

も、スイッチング素子の損失やピーク電流、電解コンデンサのリップル電流、AC リアクトルの最適化など、主回路機器の電気設計を精度よく行い小形・軽量化を実現している。

### 3.5 メンテナンス性の向上

主回路ユニットの小形・軽量化、制御回路のワンボード化のほか、前面メンテナンスを基本構造とするなど、メンテナンス性の向上を図っている。

### 3.6 仕様および容量系列

表3に今回開発したAFの仕様および容量系列を示す。補償容量50kVA機から400kVA機までを系列化し、多様な補償対象に対応可能としている。

また、表4に標準盤の外形寸法・質量を示す。

## 4 AF 適用例

### 4.1 設置目的

図6にAFの設置例を示す。本設備は可変速駆動設備から発生する高調波電流をAFにて補償し、受電点側への流出を規制値以内に低減し、障害を防止する目的で設備され

表4 外形寸法・質量

補償容量 (kVA)	外形寸法 (mm)			質量 (kg)
	幅 W	奥行 D	高さ H	
50	700	600	1,550	400
75	800	700	1,750	500
100	800	700	1,750	550
150	1,000	800	2,150	800
200	1,000	800	2,150	900
300	2,000	800	2,150	1,600
400	2,000	800	2,150	1,800

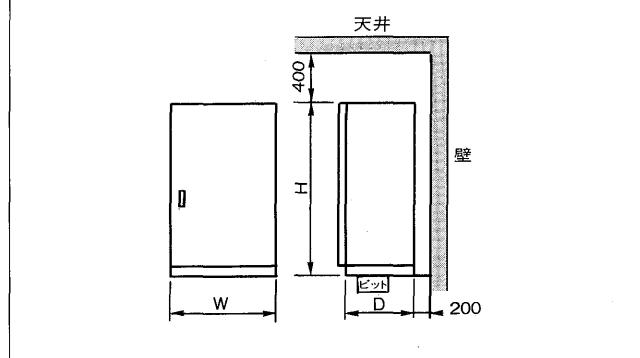


図6 400kVA AF の適用例

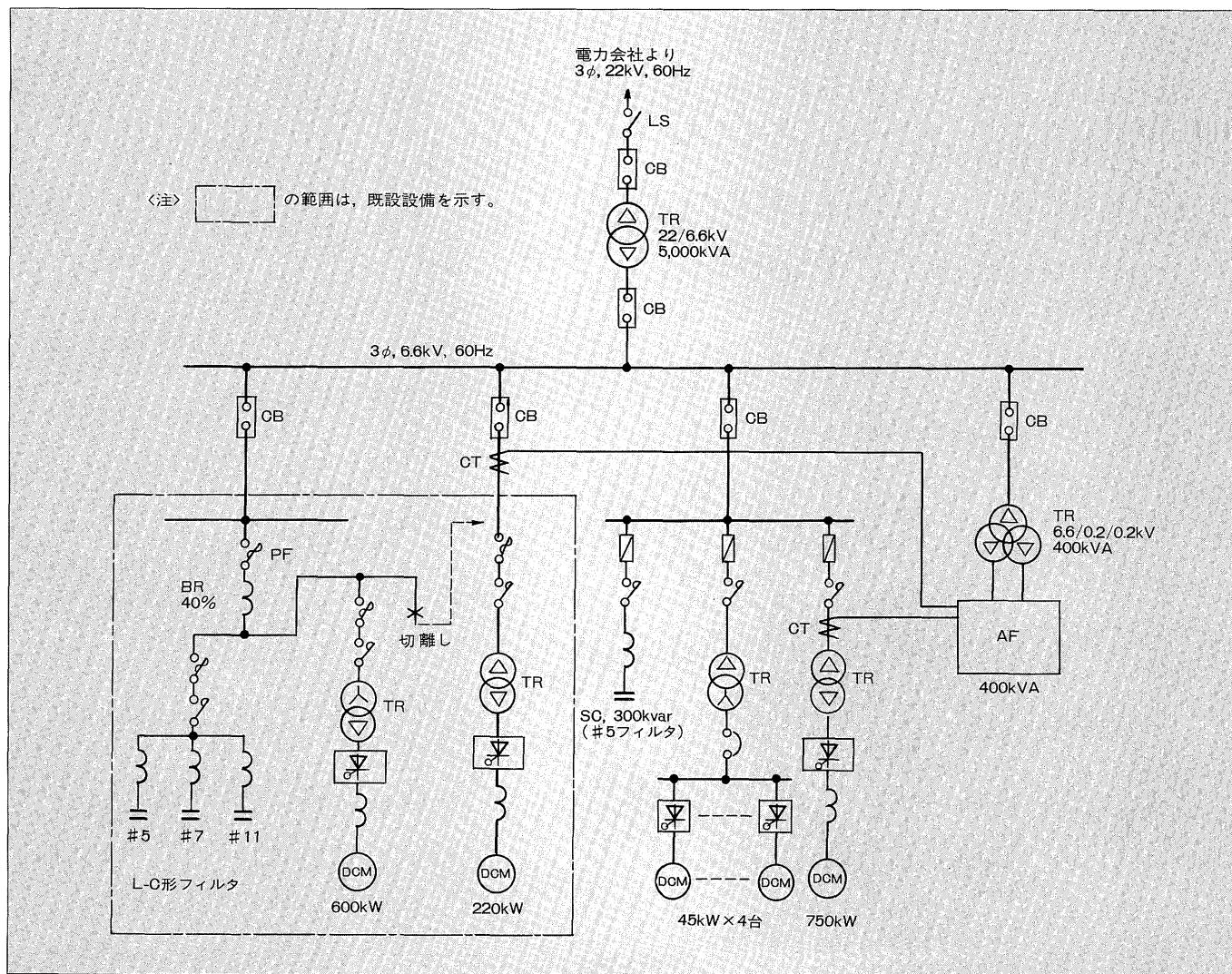


図7 400kVA AFの外観

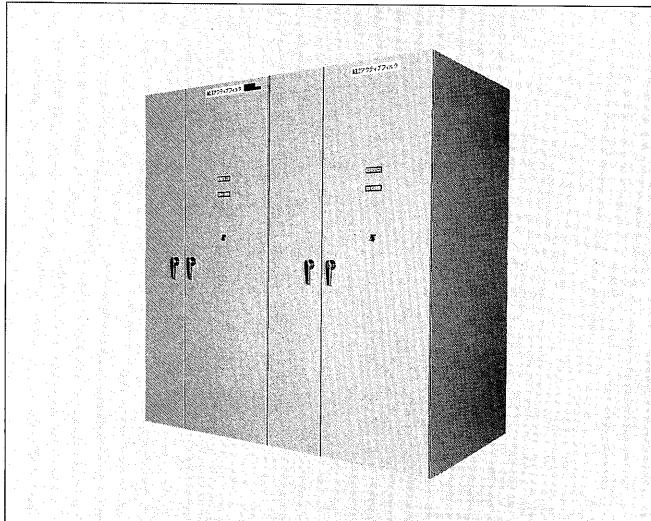


表5 AF設置効果の検討例

項目 ケース	高調波次数	系統 22kV 側		
		流出電流値 (A)	抑制目標値 (A)	電圧ひずみ (%)
ケース A AFなし	5	3.4341	1.732	0.9109
	7	4.4266	1.732	1.5591
	11	2.6694	1.732	1.4044
	13	2.3101	1.732	1.4162
	17	1.5596	1.732	1.2274
	19	1.2561	1.732	1.0978
	実効値	6.9181	2.886	3.1544
ケース B AF運転	5	0.9920	1.732	0.2631
	7	1.6094	1.732	0.5669
	11	0.9714	1.732	0.5111
	13	1.1524	1.732	0.7065
	17	0.9227	1.732	0.7262
	19	0.7208	1.732	0.6299
	実効値	2.6864	2.886	1.4405

〈注〉 抑制目標値としては、コーディネーションのガイドラインを採用している。算出式は下記による。

$$\text{電流ひずみ率(各次)} = \frac{I_n(\text{実効値})}{I_1(\text{実効値})} \times 100(\%) \leq 3\%$$

$$\text{総合電流ひずみ率} = \sqrt{\frac{(I_n)^2}{I_1(\text{実効値})}} \times 100(\%) \leq 5\%$$

ている。

図7にAFの外観を示す。

AFを採用した動機は、次の2点である。

- (1) 電気設備の設置可能スペースが狭く、L-C形フィルタの採用が困難であった。
- (2) 対象設備では負荷変動が大きく、特に夜間軽負荷時には既設のL-C形フィルタでは力率が進み過ぎる。

#### 4.2 特徴

AFの適用に際し、受電点側への高調波分流および並列機器の過負荷検討シミュレーションを実施している。表5

図8 測定波形

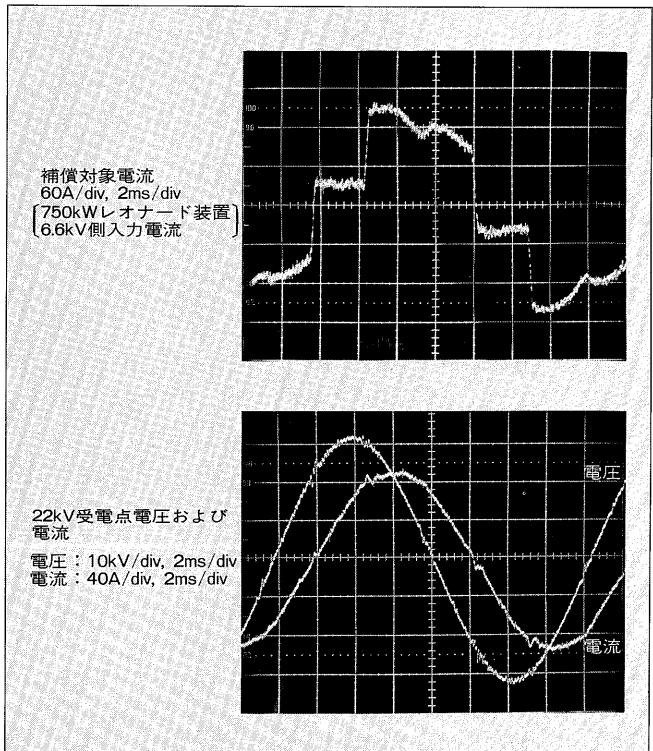
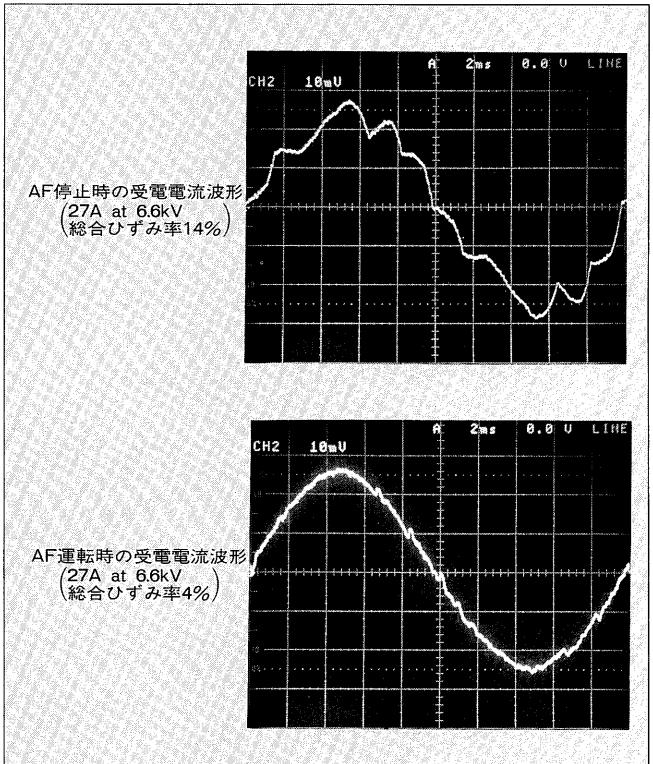


図9 12相整流負荷に対する補償波形



に、AFなしの場合とAF設置後の場合の、受電点側へ流出する高調波電流および電圧ひずみ率の検討結果を示す。

本設備では負荷の特徴を加味してシステム構成を決定しており、次のような特徴がある。

- (1) AFは母線設置とし、複数の高調波発生負荷に対し一括補償としている。
- (2) 設備容量の低減と設備費の経済化を図るため、進相用

コンデンサ（300kvar）を併用し、これを第5調波フィルタとし、第5調波以外の高調波をAFで補償する方式としている。

(3) シミュレーションの結果、既設L-C形フィルタへ高調波が過流入することが予想されたので、過負荷防止対策として、220kW設備の系統接続を変更している。

#### 4.3 高調波補償効果

本設備は、工場試験において高調波補償率85%以上を得ている。

図8は実設備での測定波形であり、補償対象電流、22kV受電点電圧、および22kV受電点電流を示す。

また、本設置例とは別に、12相整流負荷（450kW、VVVFインバータ）の高調波補償を行ったときの波形例を図9に示す。12相整流で比較的高次の高調波が多い場合でも、高調波の補償状況は良好で、電源側の電流はひずみの少ない正弦波が得られている。

#### 5 あとがき

AFは高調波補償装置として優れた性能を持っていること、高調波障害の顕在化による対策の必要性と高調波規制強化の動きから、ますますその適用が進むものと考えられる。また、高調波補償だけでなく、同時に無効電力補償も行ったり、L-C形フィルタとの併用、L-C形フィルタの

補償機能の向上を図るなど、装置容量や機能性、適用性の面でコストパフォーマンスの向上をねらった運用方法が増えてくると考えられる。

富士電機では200V入力、IGBT式AFを製品系列化している。さらに、より高い素子性能を持ったIGBTを適用した、高性能、小形、低騒音の400V入力機の製品化を行う予定である。また、高調波補償専用機ばかりではなく、昨今の電力事情の不具合解消の一助として夜間電力の貯蔵、電力ピーク時のピークカット運転と通常時のAF運転、ならびに停電時のUPS運転などの多機能インバータを用いた電力貯蔵形非常電源へのAF技術の展開を図り、電力の安定化、高品位化に向け努力してゆく所存である。

#### 参考文献

- (1) 小松木和成・井村輝夫：電力変換装置を用いた高調波補償装置、富士時報、Vol.57、No.10、p.635-638（1984）
- (2) Komatsugi, K. et al. : Harmonic Current Compensator Composed of Static Power Converter, PESC86 RECORD, p.283-290 (1986)
- (3) 電力系統における高調波とその対策、電気協同研究、Vol.46、No.2（1990）
- (4) 小松木和成：アクティブフィルタ、OHM、Vol.78、No.7（1991）
- (5) 田口保夫ほか、電力貯蔵形非常用電源システムの開発、電気学会全国大会、No.510（1992）

### 技術論文社外公表一覧

標題	所属	氏名	発表機関
21世紀のパワーエレクトロニクス 第6章 産業とパワーエレクトロニクス	富士電機総合研究所	中野 孝良	電気学会雑誌、112、9（1992）
フィルム・シート用β線厚さ計について	東京制御製作所	東 泰彦	合成樹脂、38、9（1992）
キャパシタンス法による半導体セラミック ス粒界の研究	富士電機総合研究所 〃	津田 孝一 向江 和郎	表面科学、13、4（1992）
これからの工場計画、最新モデル工場事例 編「制御システム工場の事例」（富士電機・ 東京工場）	東京工場	大山 泰司	これからの工場計画（1992-9）
Relationship between Surface Roughness and Barrier Uniformity	富士電機総合研究所 〃 〃 〃 〃 〃	松井 俊之 鈴木 健 木村 浩 津田 孝一 長野 恵 向江 和郎	Japanese Journal of Applied Physics, 31, 6B (1992)
Instantaneous Speed Detection with Parameter Identification for ac Servo Systems	富士電機総合研究所 〃	藤田 光悦 佐度 勝祐	IEEE Transactions on Industry Applications, 28, 4 (1992)
			The Japan Society of Applied Physics and the Physical Society of Japan
			IEEE



\*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。