

# 鉄鋼プラントにおける高調波の発生とその抑制対策

柴田 岩郎(しばた いわお)

有年 隆男(ありとし たかお)

## 1 まえがき

富士電機の鉄鋼プラント部門では最新のパワーエレクトロニクス技術をいち早く導入し、高性能の交流可変速装置や大形静止電力変換装置を数多く納入してきている。最近の工場全体の駆動設備は種々のパワーエレクトロニクス製品群で構成されている。

パワーエレクトロニクス機器の増大および容量の拡大により、高調波の発生量増加による障害発生の機会増大という問題を派生的に生じてきている。

本稿では鉄鋼プラントのうち、特に高調波の発生量が多く、その対策が必要な製鋼アーク炉プロセスと、圧延設備などの電動力応用プロセスについて、発生する高調波の実態および富士電機の高調波対策設備計画技術について概要を紹介する。

## 2 製鋼アーク炉プロセス

製鋼アーク炉は、溶解炉として直流アーク炉（DC炉）または交流アーク炉（AC炉）のいずれかに、溶鋼をとりべ内でスラグ精錬する交流アーク式炉外精錬炉（LF炉）を組み合わせる例が大半である。いずれの炉も負荷力率が0.7~0.85程度であり力率改善の必要に迫られるが、負荷容量が大きいことから、力率改善用のコンデンサも数万kVA以上になる例が多い。また、上述のアーク変動に伴う無効電力変動によって発生する電圧フリッカも無視できないことが大半であることから、製鋼アーク炉プロセスでは、力率改善・高調波対策およびフリッカ対策を共通の課題として構築することが必要である。AC炉およびDC炉の電源システム構成例を図1と図2に示す。

生産性の向上とフリッカや騒音などの低減を狙いとした

図1 AC炉の電源システム構成例

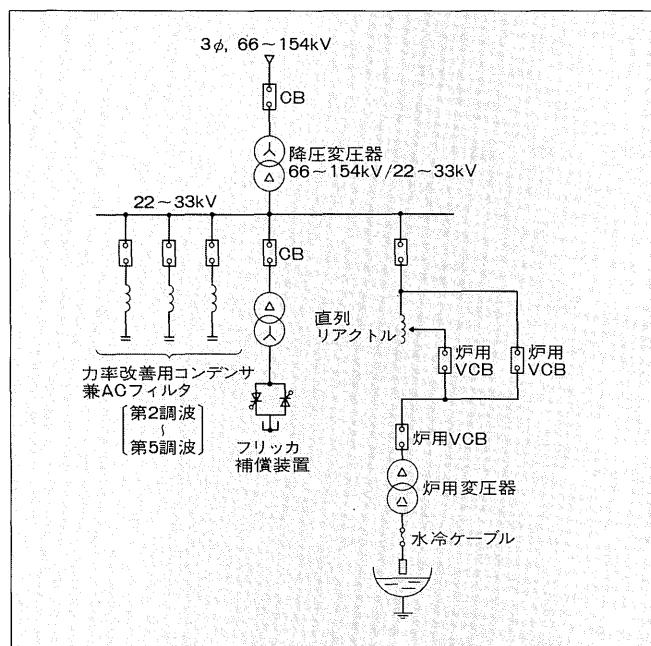
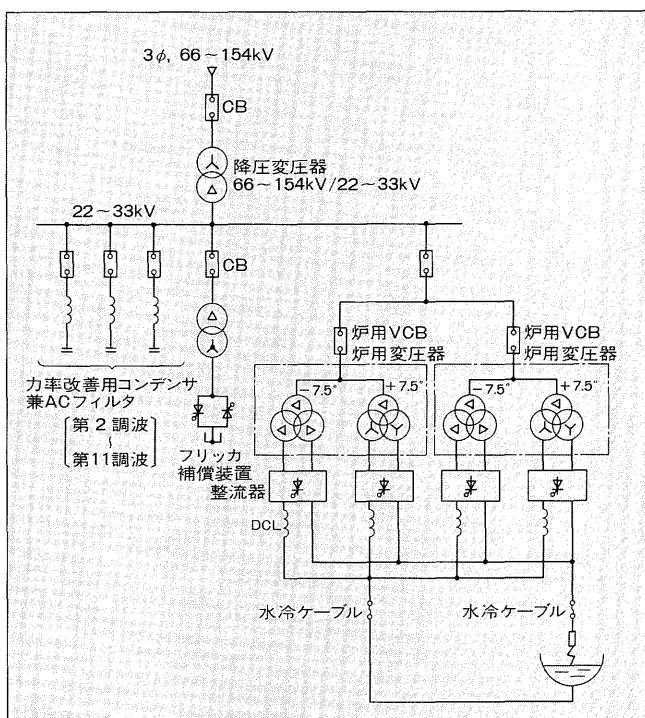


図2 DC炉の電源システム構成例



柴田 岩郎



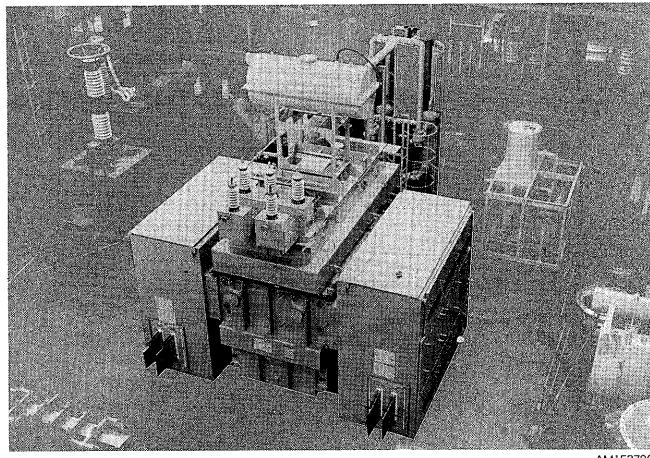
製鋼アーク炉設備のプラントエンジニアリングに従事。現在、システム事業本部産業システム事業部技術第二部主査。

有年 隆男



鉄鋼プラント用電機・制御システムのエンジニアリング業務に従事。現在、システム事業本部産業システム事業部技術第一部主査。

図3 DC炉用変圧整流装置の外観



DC炉は、富士電機でも1988年の開発導入以来現在までに、総容量2,015MVA、DC2,130kAのDC炉用変圧整流装置(図3)を22セット製作・納入し、高調波発生量低減の観点からも大きな効果が得られている。

## 2.1 アーク炉から発生する高調波

製鋼用アーク炉は、電極と鉄スクラップや溶鋼の間に数百V・数万A以上の大電流アークを発生させて鉄を溶解・精錬している。アークは、直流によるものと三相交流によるものがあるが、いずれも高速かつ不規則な挙動を示し、高調波発生メカニズムを複雑にしている。以下にそれぞれの特徴を述べる。

### 2.1.1 AC炉から発生する高調波

AC炉からの発生は、アーク抵抗の非直線性が基本にあるが、その特性はスクラップ溶解過程に従って激変するアークの雰囲気温度により変化すること、アークの挙動が発弧点の変動や電磁力などの影響を受けることなどの理由により様変わりする特性を有している。これらは、電流の波形ひずみや三相間の不平衡に現れるが、その発生メカニズムを次に述べる。

アーク抵抗の非直線性は、その電圧電流特性において図4に示すように、①飽和特性、②ヒステリシス特性、③正負非対称性、を有し、①、②の特性が奇数次高調波を、③の特性が偶数次高調波を発生させている。

三相間の不平衡は、主に以下の外部要因により生じる。

- (1) スクラップの崩れ落ちによるアーク長の拡大、またはアークの消滅
- (2) スクラップと電極の接触による短絡現象
- (3) 溶鋼かくはんによる溶鋼面の揺動によるアーク長変動
- (4) 溶鋼温度測定や溶鋼サンプリングなどの作業時に発生する単相運動や電極の折損による単相運動
- (5) 炉内均一溶解を目的とした不平衡電力投入

また上述の要因により、AC炉からの発生量は、一義的なモデル式などにて表現することが困難であり、いずれの発表データも統計的手法によってまとめられたものである。代表的なデータとしては、高調波抑制対策技術指針(日本電気協会 JEAG 9702-1995)に記載されているが、さらに

図4 アーク抵抗の電圧電流特性

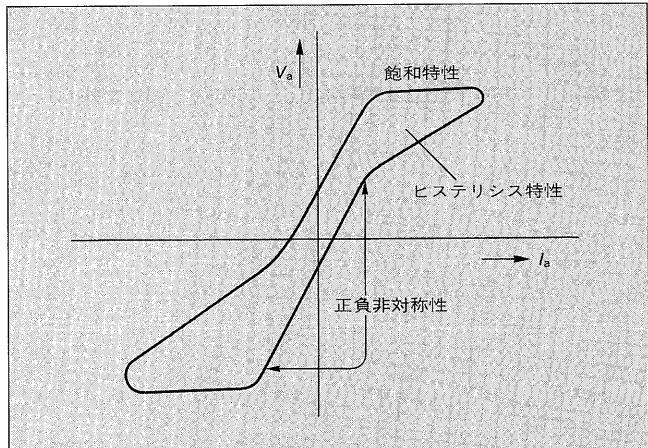


表1 AC炉高調波発生量計測例

高調波次数 計測時間	2	3	4	5	6	7
2秒	20.4	18.9	8.2	8.2	3.9	3.1
20秒	9.9	13.1	4.9	5.8	2.6	2.2
2分	7.4	9.1	3.5	5.0	1.9	1.9
10分	5.7	7.2	2.5	4.3	1.5	1.7

(値は定格電流値に対する%値)

詳細な例としては日本電熱協会の調査データなどが公表されている。

日本電熱協会の調査結果は、表1に示すとおりであるが、下記の事象を表している。

- (1) 低次の発生量が多い。
- (2) 測定時間を長くすると発生量は平均化されて低い値となる(2秒、20秒、2分、10分の比較)。
- (3) 多くの偶数波成分が発生する。
- (4) 三相不平衡の結果として第3調波が観測される。

### 2.1.2 DC炉から発生する高調波

DC炉に採用されるサイリスタ整流装置は、三相純ブリッジ結線が一般的であり、装置容量によって複数台のユニットで構成され、整流器用変圧器に位相を設けて12相(パルス: p)以上の多相化を図っている。

交流アークは半サイクルごとに点弧するが、直流アークは一度点弧すればそのまま持続するため安定している。またDC炉の高調波発生次数とその発生量は、一般的な整流装置と同じく整流相数に大きく支配されるが、アーク挙動に従ってサイリスタの点弧位相角を数ms以上の応答速度にて制御し続けなければならないという必然性が要求される。これがために、一般的な理論式にて算出される発生次数とはかなり様相が異なった値が観測される。AC炉と同様の手法にて日本電熱協会の24相整流装置によるDC炉の調査結果は、表2に示すとおりであるが、AC炉に比較すると次の事象がいえる。

- (1) 低次調波の低減が大きい。
- (2) 等価逆相電流値への換算例では、18相以上の整流装置の場合DC炉の優位性が顕著である。

表2 24相整流DC炉の高調波電流計測例

高調波 次 数	発生量 (%)		高調波 次 数	発生量 (%)	
	溶解期	精錬期		溶解期	精錬期
2	0.67	0.45	11	1.25	1.31
3	0.45	0.39	13	0.87	0.93
4	0.23	0.21	17	0.09	0.09
5	0.31	0.15	19	0.15	0.14
6	0.17	0.17	23	1.37	1.44
7	0.20	0.18	25	1.19	1.23

計測法：おのの高速フーリエ(FFT)アナライザによる80ms間2,048回  
計測の平均値(定格基本波電流に対する%値)

### 2.1.3 LF炉から発生する高調波

高調波の発生メカニズムは、基本的にAC炉と同一であるものの、雰囲気温度が1,000°C以上でかつ安定していること、およびほぼフラットな溶鋼面と電極間の比較的の安定したアークであることから、高調波発生量はおむねAC炉の50%以下のレベルとなっている。

### 2.1.4 変圧器投入時の高調波成分

AC炉、DC炉およびLF炉のいずれの装置でも作業の安全性確保のために、各変圧器の一次側を数十回/日以上の高頻度にて開放しなければならない。開閉に伴う変圧器投入時には、変圧器定格電流の数倍以上の励磁突入電流が流れ、かつこの電流中には、直流分、第2調波、第3調波成分などが高い比率で含まれていることはよく知られている。

高調波対策を実施する際にはこれらの成分を十分に考慮する必要がある。

## 2.2 高調波障害対策

高調波障害対策として、製鋼アーク炉プロセスにて採用されている方法は、

- (1) 発生量の低減
  - (2) 高調波吸収装置の設置
  - (3) 他の負荷との分離
- のいずれか、あるいはこれらの組合せによるものである。

### 2.2.1 発生量の低減

AC炉では、炉用変圧器一次側へのリアクトル挿入や装入スクラップの予熱などが理論的には低減の対策として挙げ得るが、その効果はほぼ測定誤差に近い程度であり、顕著な効果を得られる対策が考案されていない状況にある。

他方、表1と表2の比較にて分かるように、DC炉への転換は低減のために大きな効果があるが、さらにDC炉での低減は前述のように整流装置の多相化が効果的となるので、設置スペースやイニシャルコストなどの制約を考慮しながら可能な限り整流相数を増やす構成としている。

### 2.2.2 高調波吸収装置の設置

前述のように、製鋼アーク炉プラントは力率改善機能が不可欠であり、かつ必要な進相容量も大量になることが挙げられる。

この進相容量を高調波吸収装置兼用とすることが最も多

表3 高調波フィルタ兼力率改善用コンデンサの構成例

構成 仕様	2次	3次	4次	5次	6次	7次
電源仕様 三相 60Hz 33kV						
定格容量(kvar)	18,000	16,000	11,000	10,000	9,000	16,000
直列リアクトルL(%)	28.6	11.5	6.5	4.2	2.9	2.1

く採用されており、AC炉、DC炉に共通した方法となっている。

具体的な装置としては、LCフィルタを利用したいわゆるパッシブ形と自己消弧形素子を利用したアクティブ形が多く採用されており、その特長は以下のとおりである。

#### (1) パッシブフィルタ

古くから利用されている装置であり、大容量の装置がより経済的に構築できることから、現在までの半がこの方式となっている。表3に構成例を示すが、この方式は採用上、下記のような注意点を考慮する必要があり、より慎重なシステム設計を必要とする。

(a) 系統条件の変化(インピーダンス、同調波など)に伴う共振現象や性能低下の可能性検討と阻止

(b) 複数のフィルタアームの同調周波数を最適化し機能を上げること

(c) 変圧器投入時の過渡的現象に対し安定的であること

(d) 大量の進相成分によるフェランチ現象の見極め  
なお、富士電機ではデジタルシミュレーションなどを組み入れることによって、より高性能で信頼性の高いシステム設計を実行している。

#### (2) アクティブフィルタ

近年、GTOやIGBTなどの自己消弧形素子の大容量化が進んでおり、これに伴ってアーク炉負荷に対応可能な大容量のアクティブフィルタの構成が可能となってきている。このフィルタの詳細説明は、本特集号の別稿(自己消弧形素子を用いた補償装置とその適用例)に譲るが、現状の課題は経済性にあるので単に高調波吸収の目的だけでなく、フリッカ対策の機能と兼用させることによって効果を高めている。

## ③ 電動力応用プロセス

鉄鋼プラントのなかで、代表的な電動力応用プロセスとして圧延設備があげられる。設備規模によるが、数十~数百台以上の数kW~数千kWの範囲にわたる電動機を駆動するシステムによって構成され、大半が圧延プロセスに応じて可変速制御されている。

近年の傾向としては、サイリスタ素子はもちろん、自己消弧形素子を取り入れた交流可変速装置の大幅な導入が顕著な点にある。

以下に、可変速駆動装置で発生する高調波、設備計画時に高調波対策について検討する場合の留意点、および具体的な検討例について述べる。

### 3.1 可変速駆動変換装置から発生する高調波

変換器には、種々の方式・結線のものがあるが、PWMコンバータ方式の場合は発生高調波が少ないので、ここでは最も一般的なサイリスタやダイオードを用いた三相純ブリッジ結線で構成される変換器について述べる。

6パルス三相純ブリッジ結線の変換器の場合の交流側電流は、直流回路に十分大きなリアクタンスを有し、転流重なり角を無視すれば、式(1)で表される。

$$I_{ac} = 2 \sqrt{3} / \pi I_d [\sin \omega t \pm 1/5 \sin 5 \omega t \\ \mp 1/7 \sin 7 \omega t - 1/11 \sin 11 \omega t \\ + 1/13 \sin 13 \omega t \dots] \quad (1)$$

式(1)は、発生高調波の次数は5, 7, 11, 13…であり、その大きさは基本波電流の $1/n$ であることを示す。また、変換器用変圧器の結線により複号の項5, 7, 17, 19…次はその位相が反転することを示しており、変圧器の巻線位相の組合せにて上式の複号の項が相殺でき、高調波低減に寄与することを示している。

一般に $p$ パルス変換器の発生高調波を以下に記す。

$$\text{次 数: } n = mp \pm 1 \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

$$\text{発生量 (理論最大値): } In = I_1/n \quad (3)$$

(ただし、 $I_1$ は基本波電流、転流重なり角 $u = 0$ のとき)

### 3.2 設備計画時の高調波対策の留意点

#### 3.2.1 設備計画時の検討事項

高調波発生機器を含む電動力応用プラントの設備計画時に、検討する必要のある要件は以下のとおりである。

- (1) 既存設備の発生高調波と対策機器の把握
- (2) 計画設備実稼動時の高調波発生量の正確な推定
- (3) 高調波を抑制すべき点および流出量の規制認識の確立
- (4) 計画設備の電源支給点より上流側インピーダンスマップの認識
- (5) シミュレーションによる対策機器の決定と妥当性の確認

#### 3.2.2 高調波対策の仕様決定上の留意点

高調波対策の方法は、すでに良く知られているので、ここでは仕様決定上の留意点について主なものを述べる。

- (1) 整流回路の多パルス化と位相の異なる複数変圧器設置  
特に可変速駆動装置が多数設置される場合、各装置の容量や運転状態での負荷率を考えて、位相の異なる変圧器をバランス良く組み合わせることが重要である。20スタンド程度の連続圧延設備の例では、負荷容量により変圧器とコンバータを二分割か四分割して、それぞれの位相をずらすようしている。
- (2) パッシブフィルタの仕様決定

##### (a) パッシブフィルタの同調周波数の決定

受動形フィルタのうち單一同調形フィルタにおいては、直列共振周波数より低周波領域では容量性、高周波領域では誘導性のインピーダンスを持つ。よって基本波では進相コンデンサとして寄与するが、電源インピーダンスとの間で並列共振回路を形成する。

この並列共振周波数近傍の高調波発生源が存在しないことを十分に確認しておく必要がある。

##### (b) パッシブフィルタの容量の決定

一般にLCRフィルタが1回路だけで構成されることはほとんどなく、各次用の複数のフィルタや電力用の進相コンデンサと並列回路を形成することが多い。これらは互いに干渉しあい、一義的に容量決定するのは困難である。そこでパソコン用コンピュータ（パソコン）を用いて、高調波の分流計算を基にしたシミュレーションにより解を探す方法をとっている。シミュレーションの条件として、

- ① 系統電源インピーダンス
- ② 高調波発生量
- ③ 系統電源への高調波流出量規制値
- ④ 母線電圧と変動量
- ⑤ 定格周波数と変動量
- ⑥ 各次フィルタのQ

などを入力しておき、フィルタ容量の目安の値を入れて系統の挙動を調べ、容量を決定する。

### 3.3 具体的検討例

#### 3.3.1 サイクロコンバータとインバータを含む熱間圧延設備での高調波フィルタの検討例

熱間圧延設備の電源系統例を図5に示す。

##### (1) 高調波対策仕様の検討方針

この設備の場合、以下の方針で高調波対策を考える。

- (a) 複数の駆動装置があるので、位相をずらした変圧器の組合せにより、高調波発生量を低減させる。
- (b) サイクロコンバータは力率が低いので、力率改善を考えて算出した進相コンデンサ容量を目安とした受動形フィルタ（5次、7次とハイパスフィルタ）を設置する。
- (c) サイクロコンバータは運転周波数の関数となる側波高調波も発生するため、その非整数次の高調波対策としてはアクティブフィルタの設置がより有効である。

##### (2) シミュレーションと仕様の決定

- (a) 各駆動装置の運転状況（圧延設備ではパススケ

図5 热間圧延設備の電源系統例

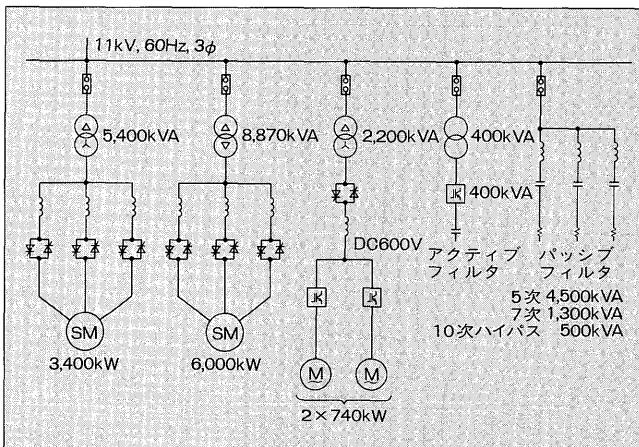
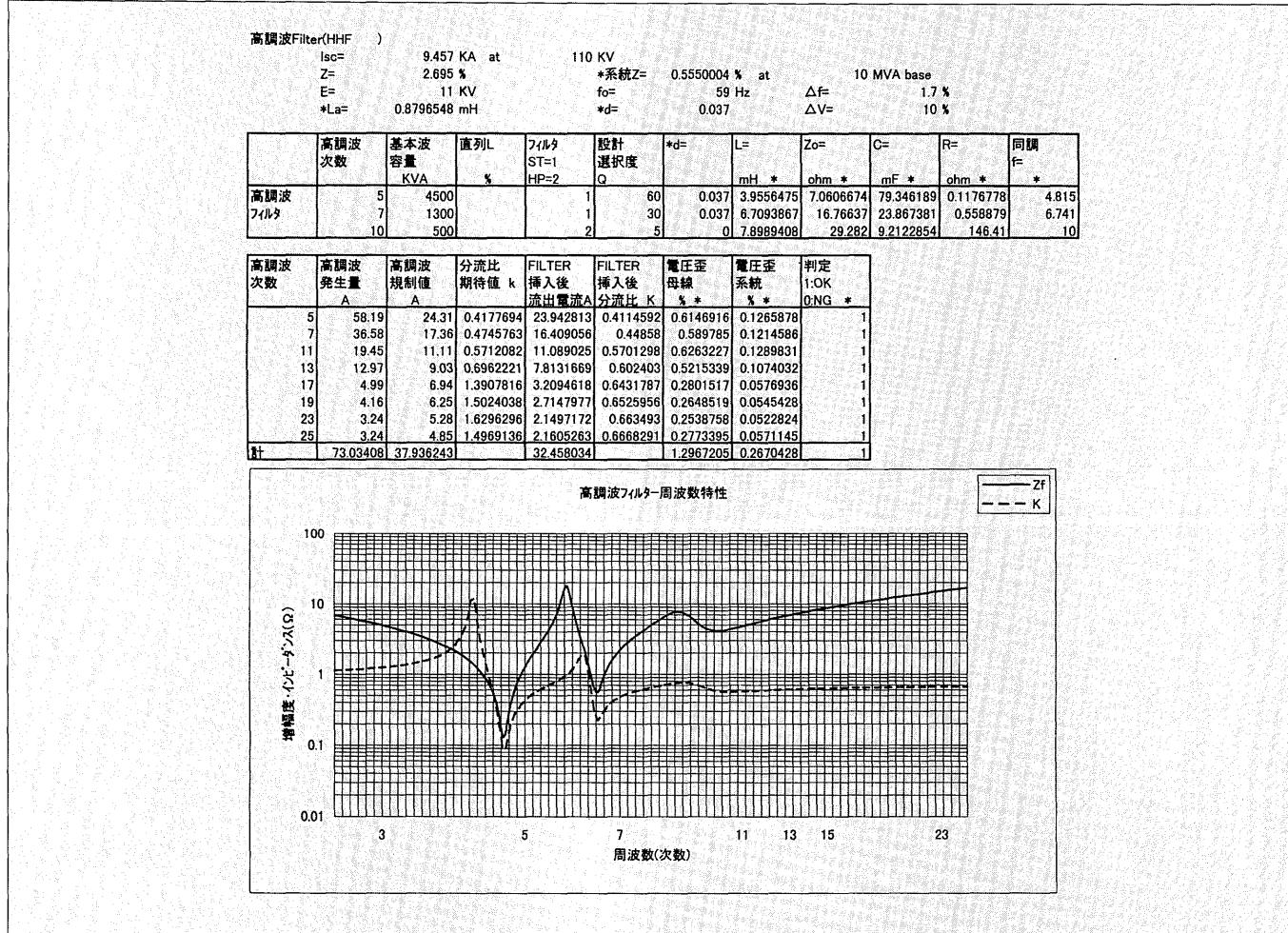


図6 高調波フィルタ仕様決定シミュレーション例



ジュール）について、条件を与えて高調波発生量を計算する。

(b) 高調波流出量規制値、各種条件を入力し、系統のシミュレーションを行い、電圧ひずみ、高調波電流の分布を確認して高調波フィルタ仕様の良否を検討する。

シミュレーション例を図6に示す。

(c) フィルタの作りやすさと経済性を加味して最終的に仕様を決定する。

### 3.3.2 ミニミル設備

ミニミル設備では、アーク炉と圧延設備が同一工場内に設置されることが多く、高調波発生レベルの高いアーク炉負荷の影響を圧延側が受ける機会に遭遇しやすい環境にある。特にアーク炉側には、前述のように変圧器投入に伴う高調波成分の発生があるので、定常的な高調波流出や分流に加えて過渡的な安定性の検討が必要となる。

シミュレーション結果は割愛するが、富士電機では多くの製鋼アーク炉電気品の納入経験がある。系統の解析にはシミュレーションを有効に活用し、アーク炉・圧延トータルのシステムとして迅速に対策を実施することができる。

## 4 あとがき

鉄鋼プラントのうち、鉄鋼アーク炉プロセスと電動力応

用プロセスにおける発生高調波と高調波対策設備について概要を紹介した。

対策設備の検討をする際に、パソコンによって手軽に高調波シミュレーションができるようになったことは大きな進歩である。

今後も半導体応用機器が多く使われ、電源品質の重要性はますます増加していくと考えられる。

富士電機では、鉄鋼プラントの各プロセス固有の技術研究に努めるとともに、高調波問題対応力のさらなる向上に努力していく所存である。

### 参考文献

- (1) アーク炉とフリッカ補償装置による高調波電流、日本電熱協会アーク炉委員会（1991）
- (2) 直流アーク炉の高調波電流、日本電熱協会アーク炉部会（1993）
- (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) 高調波抑制対策技術指針（JEAG 9702-1995）、日本電気協会電気技術基準調査委員会（1995）



\*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。