

大容量整流装置の発生する高調波とその抑制対策

神尾 明(かみお あきら)

1 まえがき

アルミニウムやソーダなどの電解用として必要な整流装置は、容量が数千 kW から数百 MW にも及び、そこから発生する高調波による電源系統や他の電気機器への影響は無視できない。過去にも電解用整流装置による高調波障害は国内外で少なからず報告されている。

欧米では高調波規制に関するガイドラインが早くから制定されている。わが国でも1994年9月に「高調波抑制対策ガイドライン」が制定され、整流装置新設時はもとより、増設時や更新時にも高調波対策を要求されるようになってきた。

本稿では、電解用に代表される大容量整流装置の発生する高調波の様相、機器への影響およびその実用的対策について述べる。

2 発生する高調波の次数と発生量

大容量整流装置はほとんどが図1に示す3相ブリッジ結線または6相二重星形結線が採用される。いずれも基本整流パルス数は6パルスであり、発生する高調波の次数と高調波の量はいずれの結線においても同じである。それらは次式で表され、整流回路の基本原理上、高調波の発生その

ものをなくすこととはできない。

ここに、 n ：発生高調波次数

p : 整流パルス数 (6, 12, 18, 24, ...)

また、

$$I_n = \frac{1}{n} \times I_F \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここに、 I_n ：理論高調波電流実効値 (A)

I_F ：基本波電流実効値 (A)

表1にその計算例を示す。

なお、式(1)は理論式であり、実際にはサイリスタの各相の点弧角のわずかなアンバランスなどにより2次、4次、6次などの偶数高調波や3次、9次などの非理論高調波が発生するから発生することに注意しておく必要がある。

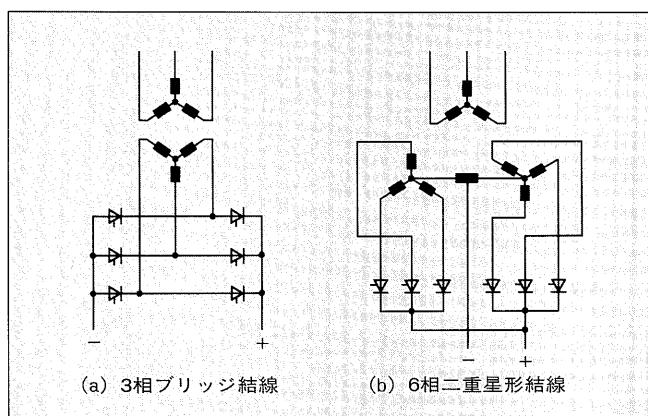
また式(2)の I_n は、電流の重なり角と位相制御角がともに零であって、直流電流リップルが完全に零の場合であり、実際にはこれらのいずれもが零ではなく、式(2)で求められる値よりも小さくなる。詳細は本特集号の別稿「パワーエレクトロニクス応用装置の発生する高調波」を参照いただきたい。

③ 機器への影響と障害例

一般に、整流装置の容量が大きくなるにつれて高調波の

表1 p パルス整流器の理論高調波発生量

次 数	6パルス	12パルス	24パルス
5	20.0	—	—
7	14.3	—	—
11	9.1	9.1	—
13	7.7	7.7	—
17	5.9	—	—
19	5.3	—	—
23	4.3	4.3	4.3
25	4.0	4.0	4.0



神尾 明

大容量電力変換設備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二部課長。

影響は大きくなる。表2に他の機器への高調波の影響を示す。これらのなかで、影響を受けやすくかつ大容量整流設備において大きな障害となる主な例について述べる。

3.1 コンデンサ設備への影響

コンデンサは容量性リアクタンスを持つため、図2(a)の場合のn次高調波におけるリアクタンスは、

$$X_n = -X_c \times \frac{1}{n} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ここに、 X_c ：基本波周波数におけるコンデンサのリアクタンス(%)

また、図2(b)の直列リアクトル付きの場合は、

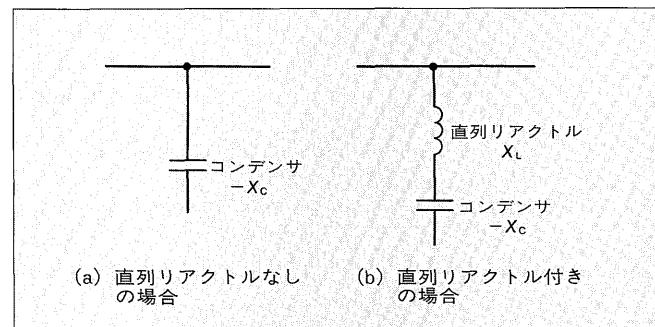
$$X_n = n \times X_L - \frac{X_c}{n} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここに、 X_L ：基本波周波数におけるリアクトルのリアクタンス(%)

表2 電気機器における高調波の影響

機器名	影響
コンデンサおよびリアクトル	高調波に対する回路の直列共振により過大電流が流入し、過熱、焼損、うなりの発生などが起こる
発電機	ダンパ巻線の過熱
変圧器	鉄心の磁わい現象によるうなりの発生 鉄損、銅損の増加に伴う巻線・油の温度上昇
蛍光灯	力率改善用コンデンサやチョークコイルへの高調波電流の流入による過熱・焼損
ケーブル	三相4線式回路の中性線に高調波電流が流れることによる中性線の過熱
通信線	電磁誘導による雑音電圧の発生
誘導電動機	定常振動トルクの発生により回転速度の周期的変動 鉄損、銅損などの損失の増加
積算電力計	測定誤差の増大 高調波電流の過大流入による電流コイルの焼損
音響機器(テレビ、ラジオ)	ダイオード、トランジスタ、コンデンサなど部品の故障、寿命の低下、性能の劣化 雑音、映像のちらつき
コンピュータ	コンピュータ動作に悪影響
整流器などの制御装置	制御信号の位相のずれによる誤制御など
負荷集中制御装置	制御信号の乱れによる受信器の誤不動作
繼電器	設定レベルの超過あるいは位相変化による誤不動作
電力ヒューズ	過大な高調波電流による溶断
配線用遮断器	過大な高調波電流による誤動作

図2 コンデンサ設備の回路図



このため、高調波電流がコンデンサに流入しやすくなったり、電源インピーダンスとの並列共振が起こることがあり、次のような障害が発生する。

(1) 特定次数の高調波による直列共振現象

コンデンサへの高調波電流流入量の増大による過熱とコンデンサ端子電圧の上昇が起こる。

(2) 特定次数の高調波による並列共振現象

電圧ひずみの著しい増大、高調波電流の拡大を招く。

いずれも、避けなければならない重大な障害であり、整流装置が数千kWを超える場合は、入念な事前検討を必要とする。

3.2 発電機への影響

整流装置から発生した高調波電流は、そのほとんどが電源側とコンデンサ設備に流入することになる。需要家のなかには自家用発電機を備え、電力会社の電源と連携している例が多いが、その場合、高調波電流は発電機にも流入する。発電機に流入した高調波電流は、ダンパ巻線などの損失を増大させ過熱させる。

その影響の度合いは「等価逆相電流」に換算して評価され、次式で表される。

$$I_{eq} = \sqrt{\sum_{\nu} \left(\sqrt{\frac{\nu}{2}} \times I_{\nu}^2 \right)} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ここに、 ν ：ダンパ回路の高調波次数 = 6n (ただし、 $n \geq 1$)

I_{ν} ： ν 次のダンパ回路電流 (高調波流入量)

発電機の等価逆相電流の許容値は一般的に10~15%であり、整流装置の容量に対して発電機の容量が比較的小さい場合は注意が必要である。

3.3 変圧器への影響

変圧器の高調波の影響は主に次の二つである。

(1) 高調波電流による損失の増大

(2) 鉄心の磁わい現象

前者は、導体の表皮効果により負荷損が増大し、また値としては小さいが鉄心のヒステリシス損と渦電流損が増大するもので、これらの損失の増大によって変圧器の巻線と油の温度上昇をもたらす。したがって、電源変圧器の容量が負荷側の整流装置の容量に近い場合は、その電源変圧器の冷却器の冷却容量をあらかじめ考慮しておく必要がある。

後者は、高調波電流磁束による磁わい現象のため騒音が増大する。

3.4 計器への影響

一部の計器においては、特定周波数（例えば3次高調波）に対する影響がJISにより規定されているが、ほとんどの計器にはその規定はない。特に、複数の次数が同時に含まれる場合には、量的にどの程度の影響が出るのか正確な把握は困難である。

また、汎用のいわゆるパネルメータは、整流形やトランズデューサ形などが普及しており、これらは正弦波で校正

されているので高調波を多く含んだ波形に対しても誤差が非常に大きくなることがある。可動鉄片形、電流力計形などの旧来の原理方式の方が高調波による誤差は実用上差し支えない程度に小さいので、5次、7次高調波の量が多い6パルス整流装置の1次側に使用される計器には、それらを採用されるとよい。

3.5 その他の機器への影響

上述以外の機器については、ほとんどが規格に定められていないし、深く解明されていないのが実態である。そのため一つの目安として、前述の「高調波抑制対策ガイドライン」にあるように「配電系統の総合電圧ひずみ率5%以下」を管理レベルと考えるとよい。

また、電源系統や配電系統において電力ケーブルの総こう長が長い場合、ケーブルの対地キャパシタンスが大きくなり、これが特定周波数において回路の誘導性リアクタンスと並列共振を引き起こすことがある。並列共振は、前述の3.1節にあるとおり、電圧ひずみが過大になり重大な障害を招くので、整流設備の新設時や増設時の重要な検討課題である。

4 高調波の抑制対策

高調波の抑制策としては一般的に図3に示すような方法が考えられるが、大容量整流設備用としての実用的な対策は次のとおりである。

4.1 整流パルス数の多パルス化による発生量の低減

大容量設備では古くから採用されてきた最も一般的な方法であり、発生量を総合的に低減することができる。

前述の表1から分かるように、整流パルス数（最小単位は6であり、それ以上は6の倍数となる）を増やせば低次の高調波は発生せず高次だけとなり、次数が高ければ発生量そのものが小さくなることが分かる。

多パルス化は、表3に示すように何台かの6パルス整流装置に位相差を設けることによって可能となるが、最近では、単器12パルスを採用するケースが増えてきており、より効果的な低減を行うことができる。また、大容量器では単器24パルスを採用することもある。

4.2 高調波の吸収

多パルス化では低減しきれない場合や特定高調波次数を低減するために、前述の多パルス化とともに一般的に採用されているのが、直列リアクトルとコンデンサを組み合わせた高調波フィルタ（LCフィルタ）である。これは式(4)に示す原理を積極的に利用して高調波を吸収するフィルタであり、通常図4に示すように整流装置と同一電源母線に設置される。コンデンサを利用するので力率をも改善できるメリットがある。一方、電源系統は、一般的に周波数に対して特有の非直線性インピーダンス（高調波インピーダンス）を大なり小なり持っており、このインピーダンスに

図3 高調波の抑制対策

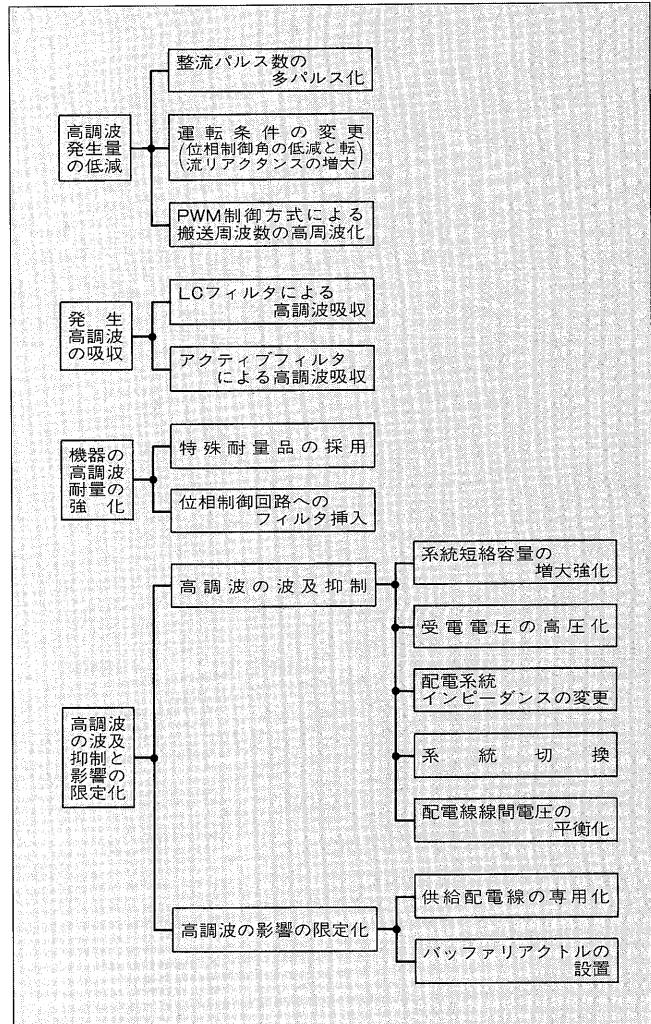


表3 多パルス化の方法（一例）

パルス数	位相差	変圧器一次結線
6	—	△または△
12	30°	△, △
18	20°	△(+10°) △(-10°) △(0°) または△(+10°) △(-10°) △(0°)
24	15°	△(+7.5°) △(-7.5°) △(+7.5°) △(-7.5°)
30	12°	△(+6°) △(-6°) △(0°) △(+12°) △(-12°)
36	10°	△(0°) △(+10°) △(-10°) △(0°) △(+10°) △(-10°) または△(+2.5°) △(+12.5°) △(-7.5°) △(+2.5°) △(+12.5°) △(-7.5°) または△(-2.5°) △(-12.5°) △(+7.5°) △(-2.5°) △(-12.5°) △(+7.5°)
48	7.5°	△(+3.75°) △(-3.75°) △(+11.25°) △(-11.25°) △(+3.75°) △(-3.75°) △(+11.25°) △(-11.25°) または△(0°) △(+7.5°) △(-7.5°) △(0°) △(+7.5°) △(-7.5°) △(+15°) △(-15°)

よって共振現象が発生する可能性も少なくないので、十分な事前検討が必要である。

高調波フィルタは、一般的には図5(a)の單一分路フィルタを各次数ごとに何台か組み合わせて設置される。図5(b)の高次分路フィルタは、単独または單一分路フィルタとの組合せて設置され、複数の高次次数の高調波を吸収する場

図4 系統図

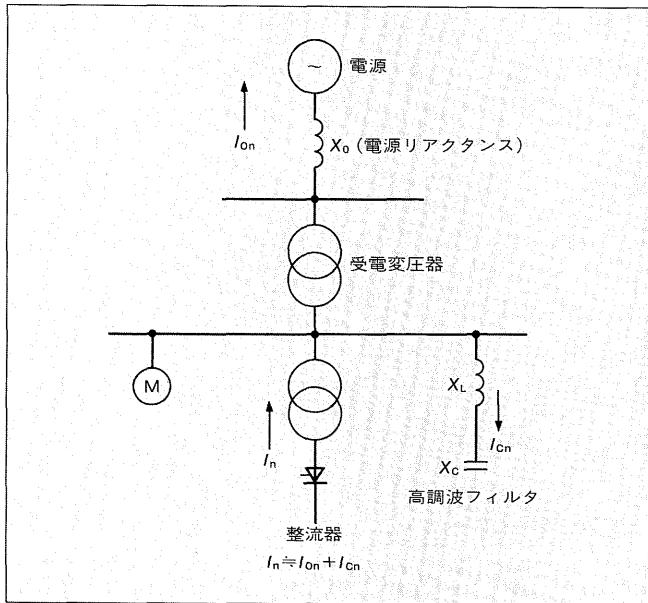
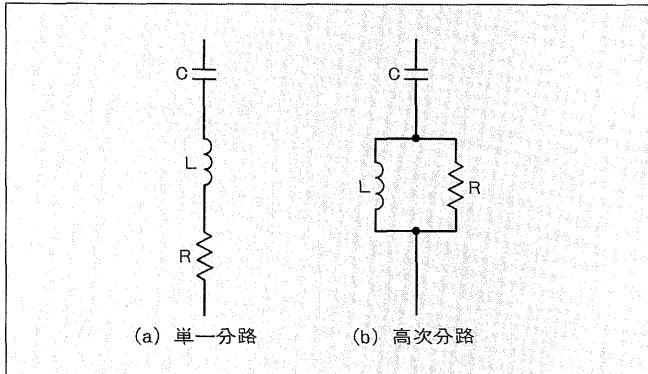


図5 LC フィルタの回路構成



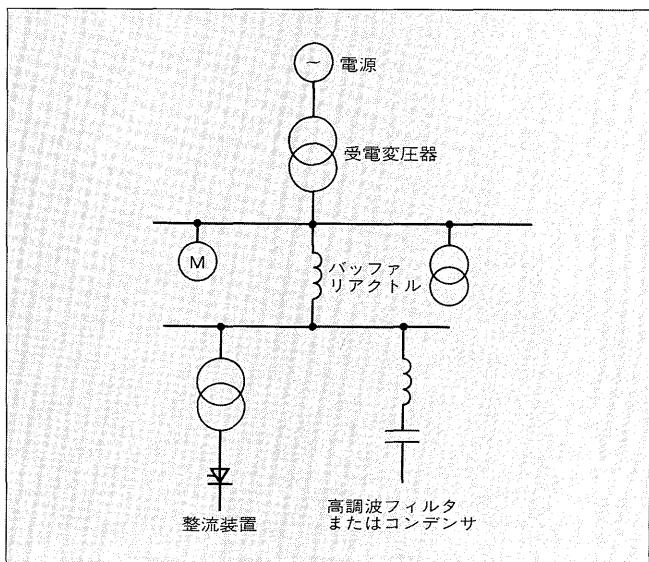
合に用いられるが、価格が高く、抵抗器の電力損失が少なからず発生する。

なお、最近LC回路を使用しないアクティブフィルタが普及しているが、大容量整流設備用としてはその大容量化が課題である。

4.3 高調波の影響の限定化

構内の高調波フィルタや既存のコンデンサ設備に電源側(他需要家)から高調波が流入するのを防ぐため、図6に示すようにバッファリアクトルを配電側か受電側に設置す

図6 バッファリアクトルの設置例



る。このリアクトルは、構内から発生する高調波をフィルタにより多く吸収させることにも有効である。

5 あとがき

電解用整流設備は、その容量の大きさゆえに発生する高調波量も多く、高調波対策は重要な課題である。富士電機は、整流装置の製作とともにこの対策技術にも古くから取り組んできたが、高調波抑制対策のガイドラインが具体化されたことから、今後ますますその重要度が高まつてくると思われる。今後とも豊富な経験を生かし、総合的に、より経済的なシステムを提供していく所存である。

参考文献

- (1) 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)
- (2) 工場電気設備における高調波の現状と対策: 電気学会技術報告II部, No.396 (1991)
- (3) 電気協同研究, Vol.37, No.3 (1981)
- (4) 電気協同研究, Vol.46, No.2 (1990)
- (5) 高橋満: 高調波電流負荷(整流器負荷など)の同期機に及ぼす影響, 富士時報, Vol.47, No.3, p.289-296 (1974)



*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。