

半導体電力変換器が発生する高調波電流とその対策

福島職業能力開発促進センター 渡辺正夫

Semiconductor Power Converter occurrence High frequency Current and take measures
Masao WATANABE

要約 パワーエレクトロニクスの利用技術の進歩によって、高調波電流による電力系統の電圧ひずみが増大している。その結果、配電系統内に設置された電力用コンデンサの過熱などの障害が増えるなど、高調波対策が大きな問題となっている。本稿では、電気機器への高調波の影響と対策について述べる。

1 はじめに

名古屋市の科学館において、平成6年3月に高圧進相コンデンサ用直列リアクトル（定格容量6%）が機器の外部から進入した高調波電流により、定格容量を超えた電流が流れたため、焼損爆発事故と負傷者1名の事故が発生した。近年、このような焼損事故や絶縁破壊、加熱または異常音発生被害が多く発生している。本稿では、電力変換器が発生する高調波電流とその対策について述べる。

II 高調波とは

1 高調波の定義

高調波とは、基本波（一般には電源周波数）の整数倍の周波数をもつものと定義されており、1つの基本波と複数の高調波を合成したものをひずみ波と呼んでいる。図2に、ひずみ波の1例を示す。ひずみ波は、一般には高周波領域の高調波（kHz～MHz オーダ）まで含んでいるが、配電系統の高調波として取り扱うのは通常40～50次（～3 kHz）までである。図1は、図2のひずみ波を基本波と高調波に分解したものである。これより、図2のひずみ波は様々な周波数から成っていることがわかる。

例えばパソコンによる電波障害やノイズなどの問題は、機器ハードに密着したローカルな問題であり電力回路網を対象とする高調波とはその影響、対応手段共

に異なってくる。例として、項目別に高調波とノイズの関係を表1に述べた。

表1 高調波とノイズのちがい

項目	高調波	ノイズ
周波数	通常40～50次、3 kHz以下	高周波(約10kHz～MHz オーダ)
環境	対線路・電源インピーダンス	対空間、距離布線経路
定量的把握	理論計算が可能	ランダムに発生、定量的把握困難
発生量	負荷容量にほぼ比例	電流変化率による(高速スイッチングほど大)
被害機器の耐量	機器ごとに規格で明記	メーカーの機器仕様によって異なる
対策例	リアクトル(L)をつける	距離(ℓ)を拡げる

2 整流回路が発生する高調波電流の性質

配電系統内の高調波の発生源として、代表的なものに、整流路、交流電力調整器などがあり、はん用インバータのコンバータ部はダイオード整流回路から成り立っており多くの高調波が発生している。整流器回路には、表2に示すように主回路方式により種々のものがあり、はん用インバータでは三相ブリッジ方式が最も多く用いられる。高調波の発生次数 n は、理論上 $n = PK \pm 1$ (P = パルス数、 $K = 1, 2, 3 \dots$) となり、

$$i = i_0 + \sum_{n=1}^{\infty} i_n \cdot \sin(2\pi f n t + \phi_n)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$
 f : 基本周波数

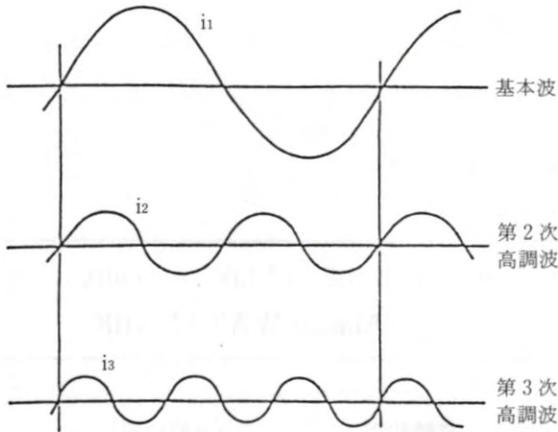


図1 基本波と高調波

三相ブリッジ方式のはん用インバータでは5、7、11、13次……の高調波が発生する。その高調波の大きさ(高調波含有率)は $1/n$ となり、高調波次数が大きくなるに従って発生量も少なくなり、単相電源入力のインバータでは $4K \pm 1$ 次(3、5、7、9次……)の高調波が発生する。

表2 整流波・回路方式と高調波

回路名	基本回路図	高調波次数	高調波含有率
単相ブリッジ		$n = 4K \pm 1$ $K = 1, 2, \dots$	$Kn \times 1/n$
単相混合ブリッジ		$n = 2K \pm 1$ $K = 1, 2, \dots$	$Kn \times 1/n$
三相ブリッジ		$n = 6K \pm 1$ $K = 1, 2, \dots$	$Kn \times 1/n$
三相混合ブリッジ		$n = 3K \pm 1$ $K = 1, 2, \dots$	$Kn \times 1/n$

Kn : 制御遅れ角、転流重なり角などによって決まる計数

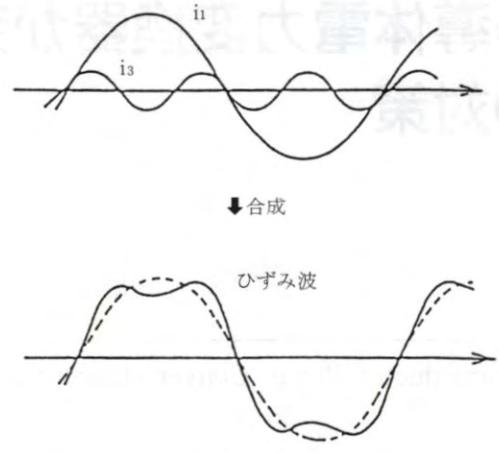


図2 ひずみ波

3 高調波の性質

交流回路計算手法が適用できる高調波は、基本的には重畳する回路現象の1つであり、重ねの理を用いることにより、各次数に分解して計算することができる。一般に、基本波成分の計算では、電源は通常内部インピーダンスが零の電圧源として扱うが、高調波成分の計算では、サイリスタなどの負荷(内部インピーダンスは無限大)が電流発電機となって電源に供給するため、大多数の高調波源は電流源として扱うことができる。ここで図3のような高圧需要家系統内に進相コンデンサ設備と高調波発生源が接続されている例について考える。高調波源は、電流源とみなせるから、この系統回路は図4で表わせる。これから系統母線の電圧ひずみ率及び、各機器に分流する高調波電流は(1)(2)(3)式で計算することができる。実際の系統では、配電系統内の複数の進相コンデンサ設備(リアクトル有り・無し)が、配電線路や変電所トランスの漏れインピーダンスなどと、複雑に影響し合うため図4等価回路のように簡単に解析できない場合が多い。このような場合でも、高調波伝播における基本特性そのものは変わらない。

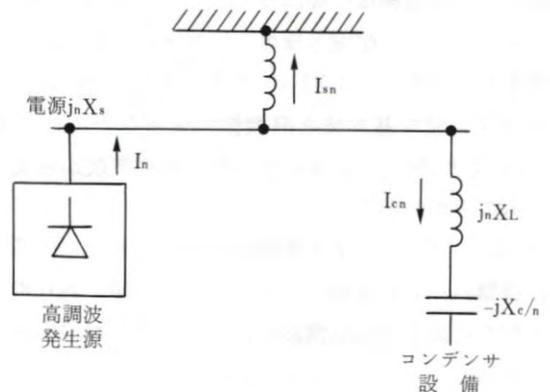


図3 系統図

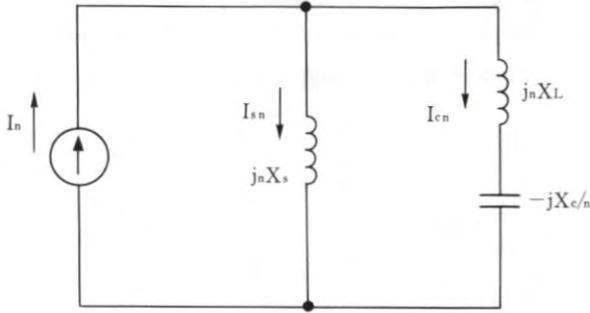


図4 等価回路

$$V_n = \frac{Z_{sn} \times Z_{cn}}{Z_{sn} + Z_{cn}} \times I_n \dots\dots\dots(1)$$

$$I_{sn} = \frac{Z_{cn}}{Z_{sn} + Z_{cn}} \times I_n \dots\dots\dots(2)$$

$$I_{cn} = \frac{Z_{sn}}{Z_{sn} + Z_{cn}} \times I_n \dots\dots\dots(3)$$

また、 Z_{sn} 、 Z_{cn} は

$$Z_{sn} = jn \cdot X_s \dots\dots\dots(4)$$

$$Z_{cn} = jn \cdot X_L - j \frac{X_c}{n} \dots\dots\dots(5)$$

ここに、

V_n ：母線 n 次高調波電圧

I_{sn} ：電源 n 次高調波電流

I_{cn} ：コンデンサ n 次高調波電流

X_s ：電源基本波インピーダンス

I_n ：発生源 n 次高調波電流

X_L ：リアクトル基本波インピーダンス

X_c ：コンデンサ基本波インピーダンス

Z_{sn} ：電源 n 次インピーダンス

Z_{cn} ：コンデンサ設備 n 次インピーダンス

表3 高調波障害の例

障 害 機 器	様 相 例	
電力用コンデンサ	本体、直列リアクトル	焼損、過熱、振動の発生
	ヒューズ	過大電流による熔断、誤動作
モータ用ブレーカ、漏電遮断器		誤動作
家電製品	ステレオ、テレビ	雑音の発生、映像のちらつき
そ の 他	モータ	振動、騒音の発生
	エレベータ	振動の発生、停止
	各種制御機器	誤動作
	高調波フィルタ	過大電流による停止

III 進相コンデンサ設備への影響と高調波許容限度

1 進相コンデンサ

進相コンデンサの高調波許容限度は、これに起因する過電流と過電圧による熱的限度と電圧の限度により決定され、高圧進相コンデンサの JIS 規格で規定している。ここで、これらについて記述されている JIS C 4902は以下のとおりである。

4. (2)最大許容電流：最大許容電流は定格電流の130%とする……
 解説図2：第5高調波だけを含有する場合……

以上をまとめると表4となる。

表4 進相コンデンサの高調波許容限度

含有率 \ 次数	第3次調波	第5次調波	第7次調波
電流 (%)	71.4	83.1	83.1
電圧 (%)	23.8	16.6	11.9

2 直列リアクトル

直列リアクトルの場合は、主に高調波が流入して損失増加による熱的限度で決まる。JIS 規格で6%直列リアクトルについてつぎのように規定している。

(JIS C 4081抜粋)

4. (1)最大許容電流：最大許容電流は定格電流の120%とする。ただし、これはリアクトルの回路に第5高調波を含む場合、その含有率が基本波電流に対し35%以下の合成電流の実効値である。

直列リアクトルの場合は、高調波の次数により損失が大幅に変化するために、JIS では、第5次調波を対象にして決めている。その他の次数についても許容限度の目安を示すと表5となる。

表5 直列リアクトルの高調波電流の許容限度

含有率 \ 次数	第3次調波	第5次調波	第7次調波	第11次調波
電流 (%)	45~58	35~44	25~35	16~26

(注) 電気協同研究第37巻第3号「配電系統の高調波障害防止対策」より抜粋

IV 進相コンデンサ用直列リアクトルの選定

1 高調波拡大現象 (表6 参照)

進相コンデンサを設置する場合、配電システムを含めた退路の電源が基本波成分のみであれば問題は特に生じない。しかし、高調波成分が回路に存在すると回路の条件によっては、この高調波成分が発生量よりも拡大し各種の障害を発生させる場合がある。この現象がどのような回路条件の時に発生するのかを次に述べる。図5のような高圧需要家系統内に進相コンデンサ設備と高調波発生源が接続されている例について考える。前述のように高調波源は、定電流源として扱うためこの系統回路は図6の等価回路で表せる。発生した高調波

は電源及びコンデンサ設備回路へ分流することになり、そのインピーダンス (リアクタンス) の比をパラメータにして(2)、(3)式を書きかえると、

$$\frac{I_{cn}}{I_n} = \frac{1}{1 + \frac{(nx_L - \frac{XC}{n})}{nx_s}} \dots\dots(6)$$

$$\frac{I_{sn}}{I_n} = \frac{\frac{(nx_L - \frac{XC}{n})}{nx_s}}{1 + \frac{(nx_L - \frac{XC}{n})}{nx_s}} \dots\dots(7)$$

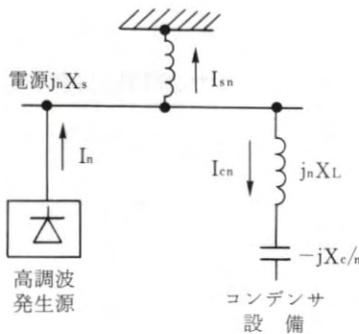


図5 系統図

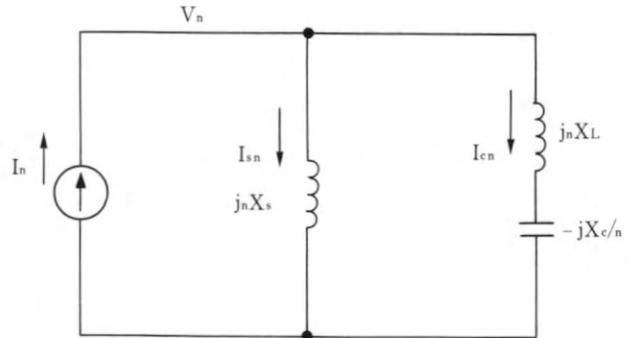


図6 等価回路

表6 高調波拡大現象

拡大有無	リアクタンス比条件	コンデンサ回路リアクタンス条件	分流の状況	説明
非拡大	$\frac{nx_L - \frac{XC}{n}}{nx_s} > 0$	$nx_L - \frac{XC}{n} > 0$ (誘導性)		コンデンサ回路を誘導性にしておけばコンデンサ電源回路共に拡大しない。最も望ましい条件であり、直列リアクトルのリアクタンス選定の必要条件である。
非拡大	$\frac{nx_L - \frac{XC}{n}}{nx_s} = 0$	$nx_L - \frac{XC}{n} = 0$ (直列共振)		コンデンサ回路が直列共振の状態であり、拡大はしないが発生した高調波はすべてコンデンサ回路に吸収される。フィルターとしての用途以外は避けねばならない。
拡大	$\frac{nx_L - \frac{XC}{n}}{nx_s} < -2$	$nx_L - \frac{XC}{n} < 0$ (容量性)		電源側電流が拡大される電源 (母線) 電圧のひずみも増大するので避けねばならない。

2 直列リアクトルの目的

高調波を拡大させないためには、設置するコンデンサ回路が対象となるn次高調波に対してリアクタンスが常に誘導性（プラス）になっていることが条件となる。コンデンサ本体のみの場合、リアクタンスは誘導性（プラス）にならないので、リアクトルを直列に設置し高調波に対しては誘導性にする方法が採用される。このことが直列リアクトルを使用する主目的である。

V 高圧進相コンデンサ設備における高調波障害事例

1 事故状況

1991年5月11日高圧キュービクルにより異常音発生との通報が入り調査したところ、No.1直列リアクトル9kVAが異常音発生しているのを発見した。

2 直列リアクトル調査報告

表7 直列リアクトル調査結果

部 位	点検内容	結 果
コイル	損傷、過熱の有無	コイル表面が過熱炭化。又鉄芯表面が過熱により変色している。
構 造	損傷、変形の有無	コイル固定板が外れている（U相上部右側、W相上部両側）

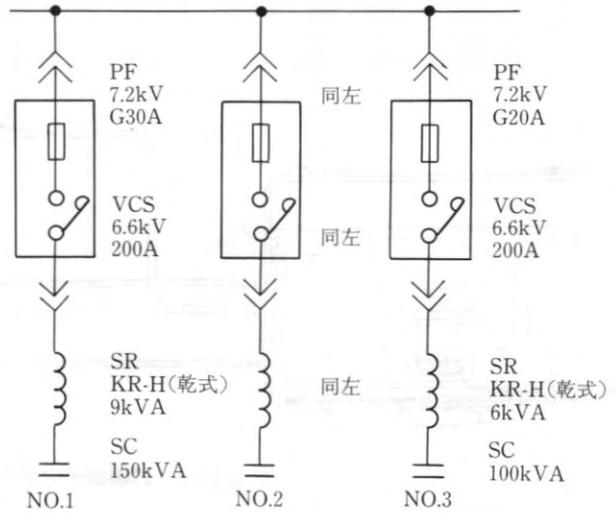


図7 高圧キュービクル系統

3 測定場所

東京都内のA株式会社高圧受電の某ビルで測定した。

4 測定回路図

3相(低圧)、試験端子、高圧の場合の接続図をそれぞれ図8、図9、図10に示す。

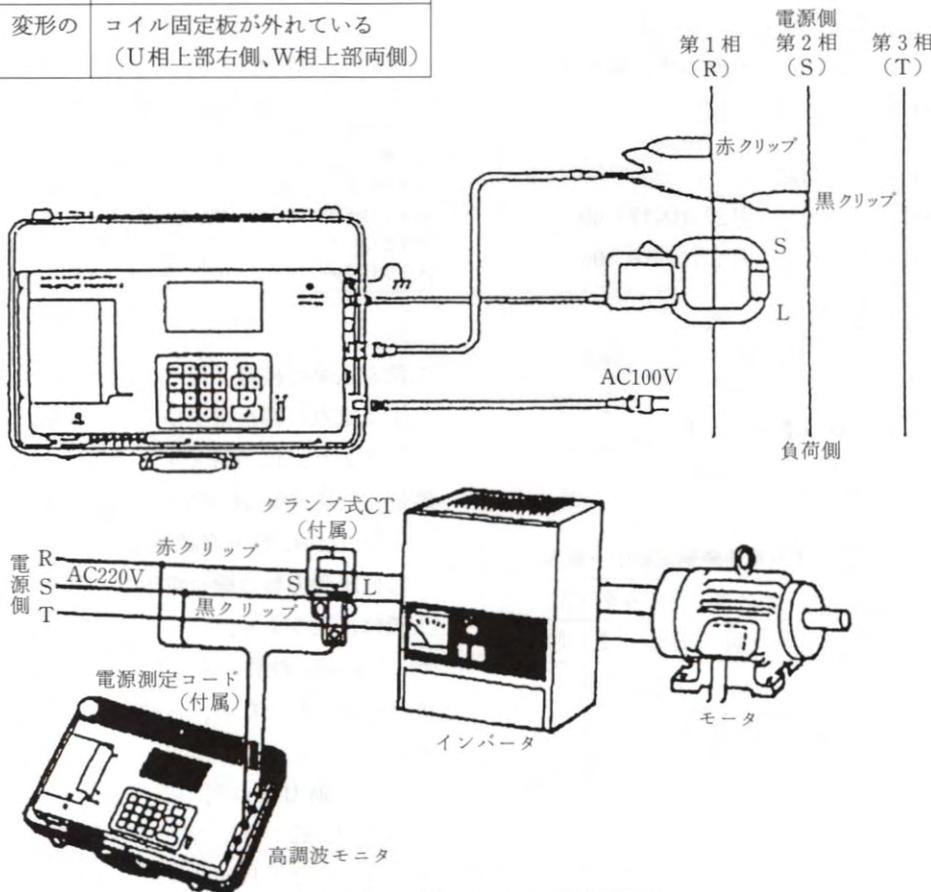


図8 3相(低圧)の場合の接続図

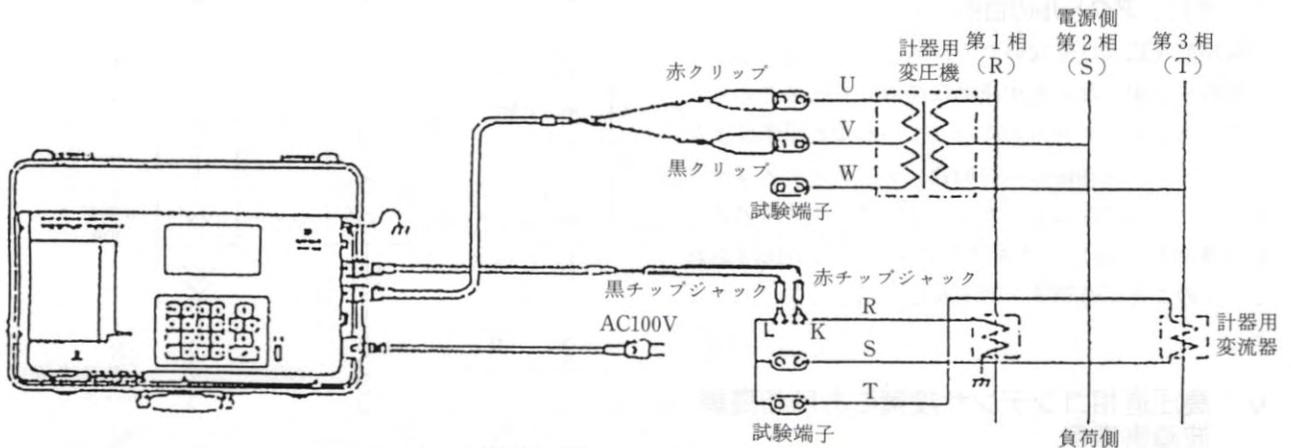


図9 試験端子の場合の接続図

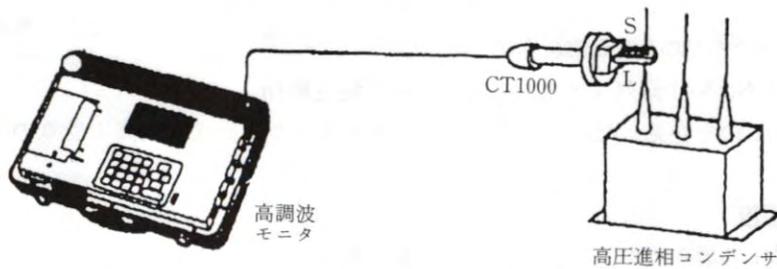


図10 高圧の場合の接続図

5 高調波測定結果

大きな異常音が発生していることから推定して、高調波電流の流入が原因と推定されたので、現地で高調波の測定を実施した。

(1)測定日時 (但し、連続測定)

1991年5月18日(土)00:00~5月23日(木)17:00
5月27日(月)15:00~6月3日(月)16:00

(2)使用計測器 高調波モニタ 1台

(3)測定箇所 受電点の電圧、電流
低圧動力盤の電圧、電流

(4)測定結果

表8 受電点総合電圧ひずみ率連続測定結果一覧表

測定日時	総合電圧ひずみ率 (%)		
	平均値	最大値	最大値時刻
5月18日(土)00:00~24:00	5.1	9.4	22:39
5月19日(日)00:00~24:00	6.8	11.5	20:49
5月20日(月)00:00~24:00	3.9	7.6	22:40
5月21日(火)00:00~24:00	3.8	8.3	22:26
5月22日(水)00:00~24:00	3.9	7.6	22:43

表9 低圧動力盤総合電圧ひずみ率連続測定結果一覧表

測定日時	総合電圧ひずみ率 (%)			高調波電流 (A)		
	平均値	最大値	最大値時刻	平均値	最大値	最大値時刻
5月29日(水)00:00~24:00	5.0	11.6	22:37	26.6	60.3	22:35
5月30日(木)00:00~24:00	4.7	9.0	22:37	25.0	52.7	22:37
5月31日(金)00:00~24:00	4.5	7.1	21:35	25.0	41.6	21:34
6月1日(土)00:00~24:00	4.0	6.6	21:04	24.9	38.3	21:04
6月2日(日)00:00~24:00	5.7	11.3	21:25	32.7	54.6	21:25
6月3日(月)00:00~15:00	4.5	6.7	7:12	24.3	38.5	7:12

(5)測定結果の検討

①受電点の総合電圧ひずみ率 (%) は、瞬時最大値は表8より、11.5% (5月19日20:49) で、平均 (12時間) の最大値は6.8% (5月19日00:00~24:00) であった。なお、含有高調波電圧は主に第5次であった。

②低圧動力盤の総合電圧ひずみ率 (%) は、瞬時最大値は、表9より、11.6% (5月29日22:37) で、平均 (12時間) の最大値は5.7% (6月2日00:00~24:00) であった。なお、含有高調波電圧は主に第5次である。

③低圧動力盤の高調波電流は瞬時最大値で60.3A (5月29日22:35) で、平均 (12時間) の最大値は、32.7A (6月2日00:00~24:00) であった。なお、含有高調波電流は、主に第5次である。

6 まとめ

現品の調査結果と現地での高調波測定結果等から考えると、配電線路から JIS 規格以上の第 5 次高調波電流 35% 以上 (第 5 次高調波電圧ひずみ率 3.5%) の流入が原因と思われる。従って、高調波対策としては、

- (1) 直列リアクトルのリアクタンスをアップする。なお、13% リアクトルを設置する場合、コンデンサの端子電圧が約 15% 上昇するため、コンデンサも定格電圧 6600 V のものでなく、7590 V の特殊定格のものを使用する。
- (2) 隣接のバンク品についても 13% リアクトル品に交換する。
- (3) 全バンクのコンデンサ回路用電力ヒューズも今回の事故発生に伴い、劣化していることが予想されるので、合わせて交換する。

VI 機器への影響と対策

単相負荷配電用の三相 4 線式電路に給電する変圧器の中性線に流入する過大電流現象と、その対策として、以下の項目がある。

1 三相 4 線式電路の中性線電流

図 11 のように、単相負荷への電力供給を目的として、変圧器の二次側結線を中性点付星形とした三相 4 線式配線が用いられる。単相の電気機器には、表 10 (社) 日本電機工業会の調査結果より、第 3 次調波電流を発生するものが多いが、三相 4 線式電路における基本波電流と第 3 次調波電流の関係を図 12 に示す。平衡負荷で、かつ基本波電流のみの場合は、各ラインに流れる電流は大きさが同じで向き (位相) が 120 度ずつずれているので、それらのベクトル和である中性線電流は $i_0 = 0$ となり、中性線に電流は流れない。しかし、第 3 次調波が含まれている場合には、図 12 に示す通り各ライン

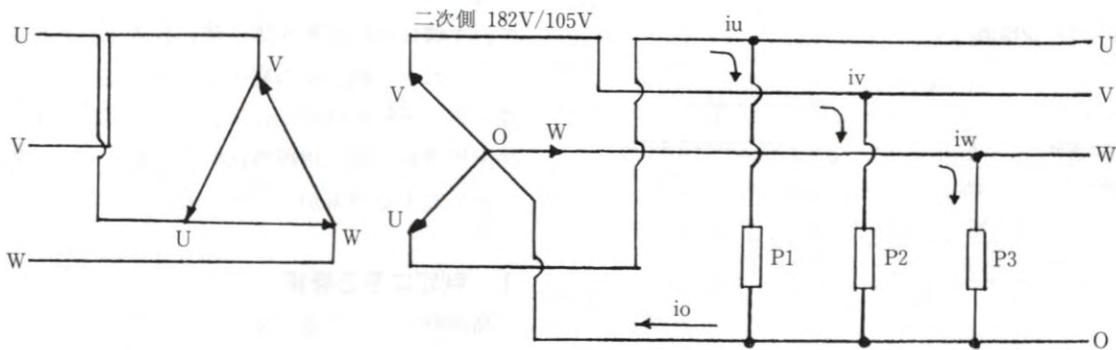


図 11 三相 4 線式配電

表 10 主な家電 (単相) の全負荷電流に対する第 3 調波成分の割合

	第 3 次調波	基本波
カラーテレビ	55.6%	69.9%
こたつ	48.6%	81.1%
毛布	36.1%	36.1%
ビデオ	62.9%	66.7%
インバータエアコン	54.0%	73.3%
インバータ蛍光灯	16.8%	98.2%

(社) 日本電機工業会の調査より

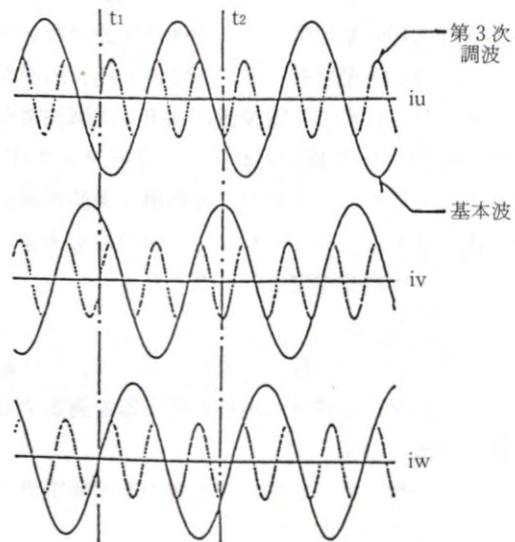


図 12 基本波電流と第 3 次調波電流

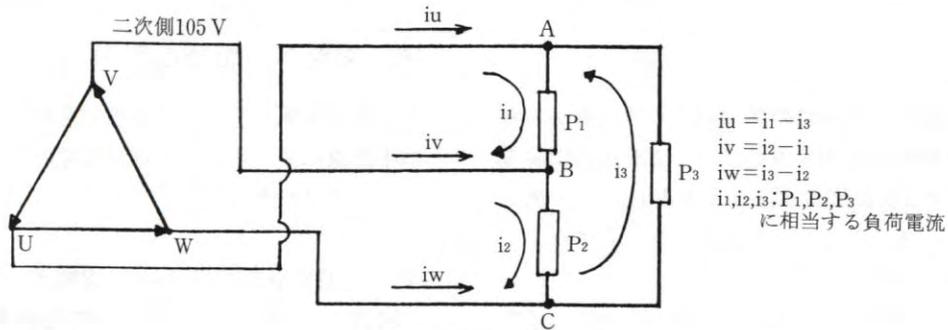


図13 三相3線式配電

に流れる第3次調波電流はいずれの瞬間をとってもその大きさと向き（位相）がまったく同一である。したがって中性線には、各ラインに流れる電流の3倍の第3次調波電流が流れる。この現象は第3次調波だけでなく、3n（1、2、…整数）高調波電流の場合にも起こる。すなわち、中性線電流 i_0 は各ラインに流れる3n次調波電流の合計したものと、基本波の不均衡分とが重なったものとなる。仮に表11のカラーテレビを例に中性線電流を計算すると、中性線はライン電流の約1.7倍になる。

表11 ライン電流

全電流	$i = 100$
基本波成分	$i_1 = 69.9$
第3次調波成分	$i_3 = 55.6$
第6次調波成分	$i_6 = 0.492$
第9次調波成分	$i_9 = 5.90$
第12次調波成分	$i_{12} = 0.221$

$$i_0 = 3 \times \sqrt{I_3^2 + I_6^2 + I_9^2 + I_{12}^2}$$

$$= 3 \times \sqrt{55.6^2 + 0.492^2 + 5.9^2 + 0.221^2}$$

$$= 168$$

($i_0 = i_v = i_w = i$ とする)

2 中性線電流への対応

(1) 三相3線配電

高調波負荷が予想される場合には、図13に示すように三相3線式100V配電とし、中性点を設けない方式とする。三相3線式配電では、負荷 P_1 、 P_2 、 P_3 が等しければA、B、C点より電源側には第3次調波電流は流れる。実際には、各線間の負荷はアンバランス ($P_1 \neq P_2 \neq P_3$) しているので、その差分の第3調波電流が電源側に流入することになるが、その値は最も大きい線間負荷の第3次調波電流より小さくなる。

(2) 定格アップ

高調波負荷による中性線電流を計算して、中性線電流に対しても余裕を持った定格の変圧器を選定する。

(3) 中性線電流の削減

負荷の不均衡を無くして、基本波の不均衡電流を無くし、中性線電流を減らす。

(4) 配線の容量アップ

中性線の配線を太くして通電容量を増やし、配線過熱を防ぐ。

VII 高調波抑制対策ガイドライン制定および事故防止対策

資源エネルギー庁公益事業部より平成6年10月3日付けで「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」および「家電・汎用品高調波抑制対策ガイドライン」が通達された。

近年のパワーエレクトロニクス技術の進歩によって、半導体応用機器が広く使われるようになってきたが、これらの機器から発生する高調波により、配電線等の電力系統の電圧が歪み、その結果、高圧用・特別高圧用機器、低圧用機器に障害が発生しているので、これに対する対策が示されたものである。

1 制定に至る経緯

高調波によって電力使用機器への障害など電力利用環境の悪化を防止する見地から「電力利用基盤強化懇談会」の報告書では、電力系統の高調波環境目標レベルを、総合電圧歪み率において6.6kV配電系5%および特高系3%が妥当であるとしている。「高調波専門委員会」において、前記方針に沿って高調波の発生量の抑制目標値として、現状から総量で家電・汎用品25%、需要家50%の抑制が示された。これらを踏まえ、(社)日本電気協会が、ガイドライン制定のための調査検討を行い、報告書として取りまとめた。以上の経緯を経て、前期「ガイドライン」が制定されたものである。特定需要家については、新設、増設、機器更新時、契約電力変更時から、家電・汎用品については、新製品の設計・製造時からガイドラインの遵守を目指すことになる。

2 「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」の概要

高圧または特別高圧の需要家のうち、高調波発生機器の容量（等価容量換算）が、

- (1)高圧系統6.6 kV で50 kVA
- (2)特別高圧系22～33 kV で300kVA、66kV 以上で2000kVA を超える場合に、このガイドラインが適用される。

契約電力1 kW 当たりの高調波流出電流上限値が表12のとおり定められている。これを超える場合は、対策を講じることが必要となる。

表12 契約電力1 kW 当たりの高調波流出電流上限値
(単位：mA/kW)

受電電圧	5次	7	11	13	17	19	23次	23次超過
6.6kV	3.5	2.5	1.6	1.3	1.0	0.9	0.76	0.70
22	1.8	1.3	0.82	0.69	0.53	0.47	0.39	0.36
33	1.2	0.86	0.55	0.46	0.35	0.32	0.26	0.24
55	0.56	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

3 「家電・汎用品高調波抑制対策ガイドライン」の概要

家電汎用品機器を設計・製造する際に必要となる。「発生する高調波電流の抑制レベル」と「測定方法」が示されており、300 V以下の商用電源系統に接続して使用する定格電流の20/相以下の電気・電子機器（家電・汎用品）に適用される。機器がA～Dクラスに分類され、それぞれのクラスごとに定められた高調波電流発生限度値以下とすることが必要となる。クラスC（照明機器が該当）の場合は、表13のとおりとなる。

表13 クラスCの限度値

高調波次数 n	照明装置の基本波入力電流の百分率として表される最大値 (%)
偶数高調波	
2	2
奇数高調波	
3	$30 \times \lambda^*$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$	3

* λ は回路の力率

4 高調波による事故の状況

名古屋市の科学館において、平成6年3月に高圧進相コンデンサ用直列リアクトル（定格容量6%）が、機器の外部から進入した高調波により、定格容量を超えた電流が流れたため、焼損爆発事故と負傷者1名の事故が発生した。このような焼損事故や絶縁破壊、加熱または異常音発生の被害が最近多く発生している（例えば、電気保安協会の受託需要家において6%以下のリアクトル設置軒数約7200に対し、都市部を中心に5年度42軒の何らかに被害が発生している。）

5 高調波による事故防止対策

高調波障害防止の抜本対策は、高調波発生源からの抑制を進めることであり、具体的な事故防止対策は、当面保安確保の観点から次のことが考えられる。

- (1)需要家への周知、特定需要家の個別管理、温度監視、高調波電流の測定等を行い、高調波の含有率に応じて、高調波耐量（高調波による発熱等に対する強度）が十分なコンデンサ、リアクトルを使用する。
 - (2)低圧側にリアクトル付きコンデンサを設置する。
 - (3)夜間（終業時）力率改善用コンデンサを開放する。
 - (4)温度監視リレー、高調波監視リレーなどにより、異常時に自動的に回路を遮断し機器の保護を行う。
- なお、リアクトルを外し、コンデンサだけで使用することは、突入電流により機器損傷の恐れがあるほか、高調波を拡大させることがあるので望ましくない。したがって、焼損すると思われるものに対する緊急処置として、改善されるまでの間、一時的にリアクトル、コンデンサを取り外しておく等の措置については、よく関係者と協議することが必要である。

VIII おわりに

パワーエレクトロニクス技術の急速な進歩により、高調波対策が大きな問題となっている中で、進相コンデンサ設備への影響と高調波許容限度、高調波障害事例、高調波抑制対策ガイドライン制定および事故防止対策について、まとめてみた。高調波問題の影響と対策について、皆様の一助となることを期待している。

（参考文献）

- (1) 電気共同研究第37巻第3号「配電系統の高調波障害防止対策」
- (2) ㈱日本電機工業会「主な家電（単相）の全負荷電流に対する第3調波成分の割合
- (3) 資源エネルギー庁公益事業部「高圧または特別高

