

# パワーエレクトロニクス応用装置の発生する高調波

元吉 攻(もとよし おさむ) 大沢 博(おおさわ ひろし)

## 1 まえがき

パワーエレクトロニクス応用装置は、各種電動機の駆動用電源、化学用整流電源、系統連系装置、無停電電源装置、その他の産業用電源など各種の用途に広く使用され、その単器容量の大容量化が進み、また使用台数も年々増大している。

パワーエレクトロニクス応用装置はパワーデバイスのスイッチング作用を利用して、電圧、電流、電力、周波数などを調整する装置であるため、一般にその入出力の電圧、電流には高調波成分が含まれる。

この高調波に起因する障害、例えば電動機や進相コンデンサなど並列機器の過熱あるいは電力系統での異常高調波電圧の発生などの障害が、パワーエレクトロニクス応用装置の大容量化、用途の拡大、使用台数の増大に伴って顕在化している。

障害を避けるためには発生する高調波の性質と、電源系統インピーダンスの大きさ、その分布状態などを綿密に調査検討して適切な高調波対策を講ずる必要がある。そこで、本稿ではその基本とするために、代表的な電力変換装置の発生する高調波について述べる。

## 2 サイリスタ整流器の発生する高調波

サイリスタ整流器は直流レオナード<sup>1</sup>、化学用電源、および各種インバータ装置用の整流電源として最も広範に使用されている。

この整流器の代表例として、変換装置用変圧器の結線が一次、二次とも△結線の場合、またそれぞれが△、Y結線の場合における交流側電流の概略波形を図1に示す。図1の(a)と(b)の場合について、電源の相電圧  $v_a$  を基準位相として波形解析する。ただし、解析に際して次の仮定をする。

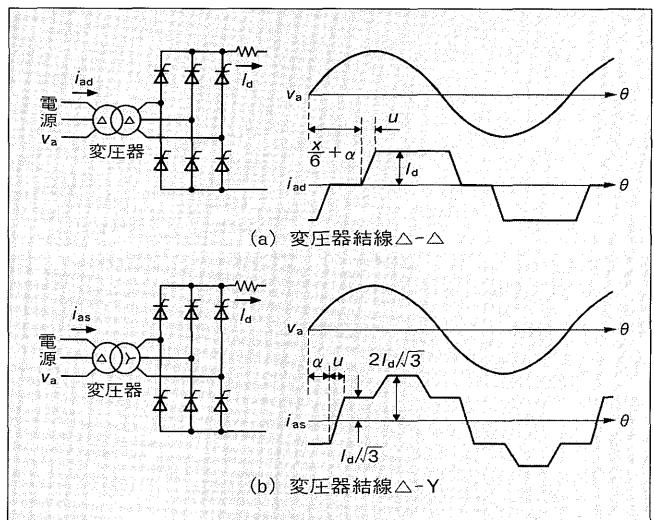
(1) 直流電流は完全に平滑である。

(2) 転流期間の電流は直線的に変化する。

交流電流の瞬時値はそれぞれ次式で示される。

$$i_{ad} = A_{11} \sin \theta + B_{11} \cos \theta$$

図1 6パルス整流器の交流側電流波形



$$+ \sum_{n=5}^{\infty} (A_{n1} \sin n\theta + B_{n1} \cos n\theta) \dots \quad (1)$$

$$i_{as} = A_{12} \sin \theta + B_{12} \cos \theta$$

$$+ \sum_{n=5}^{\infty} (A_{n2} \sin n\theta + B_{n2} \cos n\theta) \dots \quad (2)$$

ここで、

$$A_{11} = A_{12} = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi} \frac{\sin(u/2)}{u/2} \cos(\alpha + \frac{u}{2})$$

$$B_{11} = B_{12} = \frac{-2\sqrt{3}I_d}{\pi} \frac{\sin(u/2)}{u/2} \sin(\alpha + \frac{u}{2})$$

$$A_{n1} = A_0 (-1)^k \cos n(\alpha + u/2)$$

$$B_{n1} = -A_0 (-1)^k \sin n(\alpha + u/2)$$

$$A_{n2} = A_0 \cos n(\alpha + u/2)$$

$$B_{n2} = -A_0 \sin n(\alpha + u/2)$$

$$A_0 = \frac{2\sqrt{3}I_d}{n\pi} \frac{\sin(nu/2)}{nu/2}$$

$$n = 6k \pm 1, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

$I_d$  : 整流器の直流出力電流平均値

$\alpha$  : 整流器の制御遅れ角

$u$  : 整流器の転流重なり角

また、各次高調波電流の実効値は変換装置用変圧器の結線方式とは無関係に一定となり、次式で示される。



元吉 攻

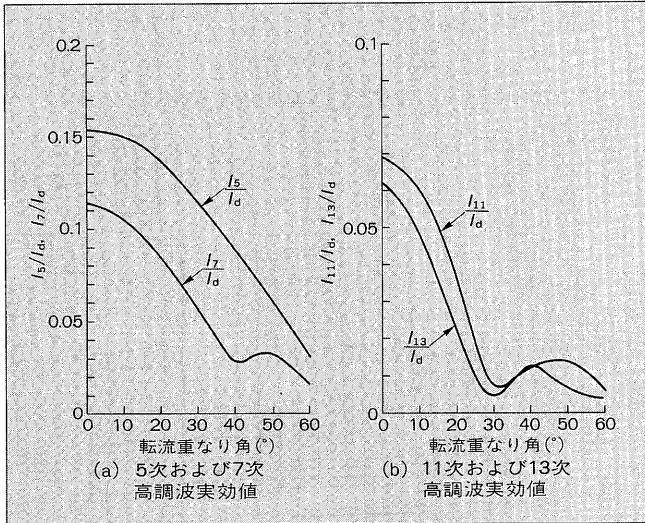
パワーエレクトロニクス技術の研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所パワーエレクトロニクス開発研究所主席技師。



大沢 博

可変速駆動装置の研究開発に従事。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主任技師。

図2 6パルス整流器の交流側電流高調波



$$\begin{aligned} I_n &= \sqrt{(A_{n1}^2 + B_{n1}^2)/2} = \sqrt{(A_{n2}^2 + B_{n2}^2)/2} \\ &= \frac{\sqrt{6}}{n\pi} \frac{I_d}{nu/2} \end{aligned} \quad \dots \quad (3)$$

このように、変換装置用変圧器の結線方式の差異によって交流側電流の波形は異なるが、含まれる高調波電流の次数と大きさには差異がなく、単に各次高調波電流の位相が異なるに過ぎないことが分かる。

各次高調波実効値の計算結果を図2に示す。

なお、電解用整流器としてよく使用される二重星形整流器の交流側電流の高調波は[2]章で述べたものと同じである。

### ③ サイクロコンバータの発生する高調波

サイクロコンバータは主として低速・大容量の交流機駆動装置に使用されるもので、その主回路基本構成を図3に、また電源電流波形を図4に示す。

サイクロコンバータは各単位整流器の位相制御角を周期的に変化させて、その出力を正弦波電流とするものであるが、入力と出力間にエネルギー蓄積要素がないため、電源電流に含まれる高調波の周波数は入力と出力との両方の周波数の影響を受けその様相は複雑になる。高調波解析結果は相当複雑となるので誌面の都合上割愛する。解析の詳細については参考文献(1)を参照されたい。

定性的には、整流器の電圧を上昇させる期間では位相制御角が小さくなつて転流点間の幅が狭くなるため見掛け上高周波数成分が発生し、一方、電圧を減少させる期間では位相制御角が大きくなつて転流点間の幅が広くなるため見掛け上低周波数成分が発生し、結果として、図3に示す6パルス整流器を単位整流器とするサイクロコンバータの電源電流には、次式に示されるように元来の高調波周波数に加えてその側帯波成分が発生する。

$$\text{高調波周波数} = f_s \pm 6mf_0 \text{ および} \\ (6n \pm 1)f_s \pm 6mf_0 \quad \dots \quad (4)$$

ここで、 $f_s$ ：電源の周波数

図3 サイクロコンバータの主回路構成

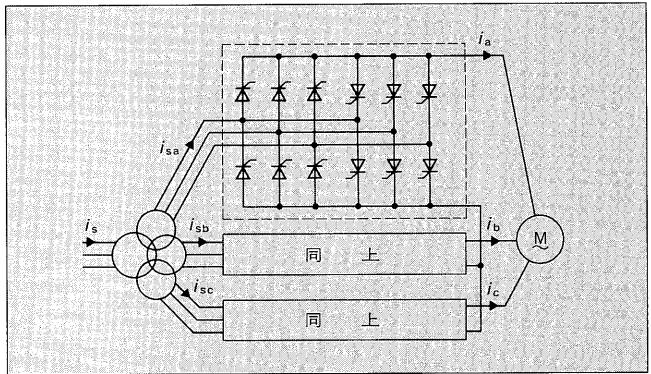


図4 サイクロコンバータの電源電流波形

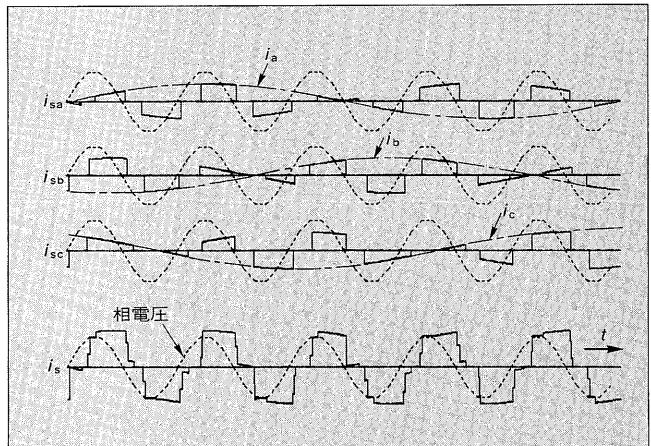
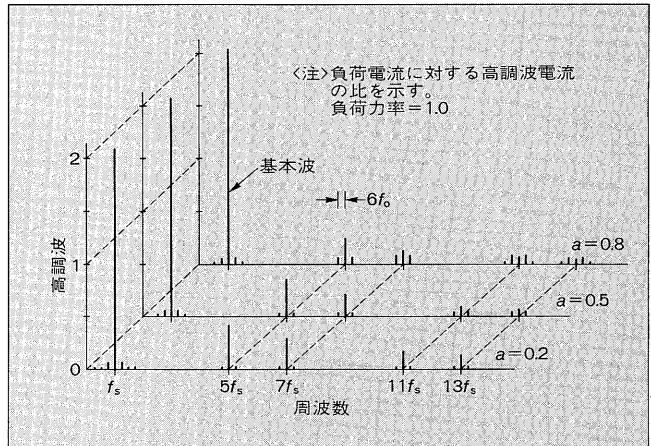


図5 サイクロコンバータの電源電流スペクトラム



$f_0$ ：サイクロコンバータの出力周波数

$n$  : 1, 2, 3, ...

$m$  : 0, 1, 2, ...

図3に示すサイクロコンバータの電源電流の高調波スペクトラムの計算結果を図5に示す。

### ④ 交流電力調整装置の発生する高調波

電源系統の電圧変動は主としてその点に流入する無効電力によって左右されるため、その無効電力を調整して電圧変動を抑制することができる。

電圧変動抑制に使用される無効電力補償装置には各種の方式があるが、本稿に述べる交流電力調整装置はサイリスタ制御式リアクトル（TCR）とも呼称され、実用上広範に使用されているものである。

主回路構成と動作説明図を図6に示す。

この装置の動作は図6に示すように、サイリスタの位相制御角を $90^\circ$ よりも大きい領域で調整し、リアクトルに流れる電流の大きさを調整して基本波無効電力を連続的に制御するものである。したがって、リアクトルに流れる電流には高調波成分が含まれ、その各次高調波電流の実効値は次式となる。

$$I_n = \frac{4E}{\pi Xn(n^2 - 1)} (\sin n\alpha \cos \alpha - n \cos n\alpha \sin \alpha) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $E$ ：電源の線間電圧実効値

$X$ ：リアクトルのリアクタンス値

$\alpha$ ：サイリスタの位相制御角

図6 TCR装置の主回路構成とリアクトル電流波形

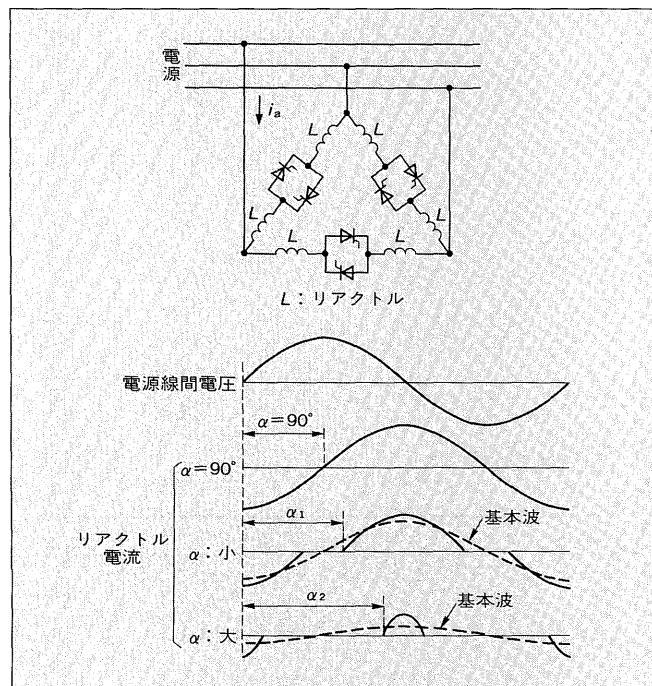
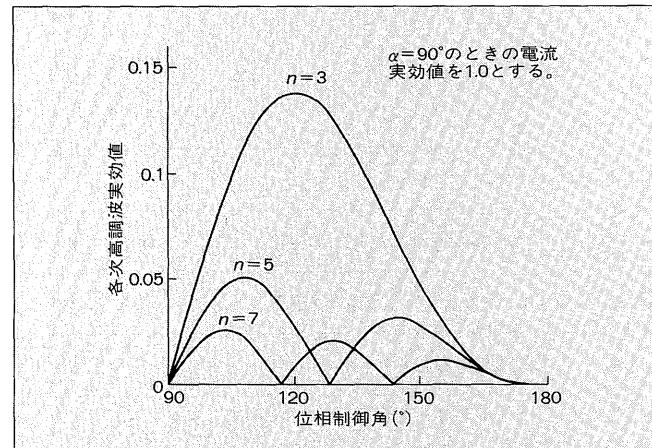


図7 TCR装置の電源電流高調波



$n$ ：高調波次数（奇数）

計算結果を図7に示す。

## 5 PWMインバータの発生する高調波

PWM（パルス幅変調）インバータは、通常は電圧形インバータを基本として構成され、図8に示すように交流出力電圧波形の半周期内でパルスを裁断し、個々のパルス幅を調整してインバータ自体で出力電圧値を制御するもので、低次の高調波の低減が可能、高速制御が可能などの特長から、交流可変速駆動装置や各種電源用として広範に使用されている。

これまで述べた電力変換装置が高調波電流源として作用するのに対し、PWMインバータは高調波電圧源として作用する。その電圧高調波は個々のパルスを制御する方式（変調方式）によって異なり、変調方式には変調信号比較方式、空間ベクトル変調方式、ヒステリシスコンパレータによる追従方式など各種の方式がある。図8はインバータの出力電圧を代表する正弦波の制御信号と三角波の変調信号との交点において、インバータ内の各アームをオンオフさせる変調信号比較方式の例を示す。この場合でも制御信号と変調信号とは任意の波形に選定できるので、方式数はさらに増大する。

電圧高調波は変調方式ごとに解析する必要があるが、特に正弦波－三角波変調信号比較方式における各次高調波成分は次のようになる。

$$\text{基本波成分の振幅} = \frac{\sqrt{3}}{2} a E_d$$

$$nf_c \pm kf_0 \text{ 成分の振幅} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{4E_d}{n\pi} J_k \left( \frac{an\pi}{2} \right) \dots \dots (6)$$

ここで、

$E_d$ ：直流電圧平均値

$J_k$ ： $k$ 次のベッセル関数

図8 三相PWMインバータの出力電圧波形

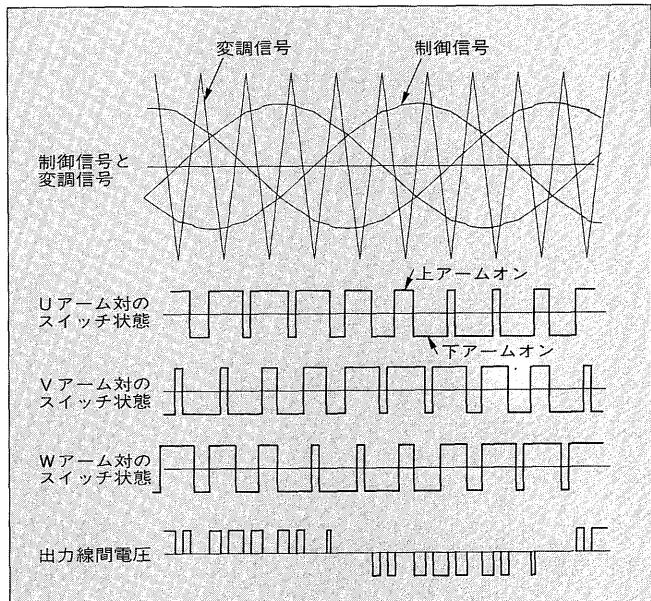
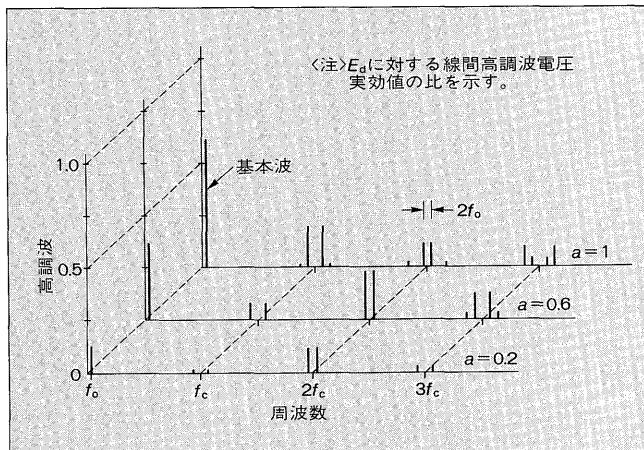


図9 三相 PWM インバータ出力電圧スペクトラム



$a$  : 変調度 (制御信号と変調信号の振幅比)

$n = 1, 3, 5, \dots$  のとき

$$k = 3(2m-1) \pm 1, m = 1, 2, \dots$$

$n = 2, 4, 6, \dots$  のとき

$$k = \begin{cases} 6m+1, & m = 0, 1, \dots \\ 6m-1, & m = 1, 2, \dots \end{cases}$$

解析の詳細については参考文献(2)を参照されたい。

正弦波-三角波変調方式における三相 PWM インバータ出力電圧のスペクトラムの計算結果を図9に示す。

## 6 あとがき

代表的な電力変換装置が発生する高調波について述べた。パワーエレクトロニクス応用装置の普及拡大に伴い、それが発生する高調波による障害が顕在化している。これらの障害を緩和するためには、高調波フィルタなど適切な外部的手段による高調波抑制と同時に、変換装置自体での対策も重要である。このような高調波発生の少ない変換装置の開発に向けて今後も努力する所存である。

## 参考文献

- (1) 大沢博ほか：ハイブリッド式 GTO サイクロコンバータ、電気学会論文誌 D, Vol.112-D, No.9 (1992)
- (2) 電気学会編：半導体電力変換装置、オーム社, p.114-120 (1987)

## 最近登録になった富士出願

### [特許]

登録番号	名 称	発明者	登録番号	名 称	発明者
2538795	電気集じん装置の洗浄方法	宮本 昌広 笹本 利治 春日井孝行	2540945	静止型電力変換装置のデジタル位相制御装置	伊奈 久 矢野 浩司
			2540948	インバータの2次元グラフによる機能設定方法	唐津 了三
2539521	硬貨処理機の硬貨通路	早野 八一	2540963	半導体装置の製造方法	谷口 春隆
2540202	発電機の多変数制御システムにおける補正制御方式	横川 純男 植木 芳照 花田俊一郎	2540970	差圧検出装置	谷津 隆弘 矢尾 博信
			2541283	電子写真用感光体	田村 幸久 風間 豊喜 藤村 順二
2540203	発電機励磁系の制御方式	横川 純男 植木 芳照			
2540903	真空バルブ	大沢 雪雄	2541288	燃料電池の運転停止方法	鴨下 友義
2540911	制御装置用操作盤の両面切換方法	松本 栄治 福原 正則	2541315	自動販売機の原料搬出同期方法	繁田 雅信
2540914	状態発生頻度表示機能付操作パネル	福原 正則 川崎紀久雄	2541321	自動販売機の商品支持機構	中村 雅昭
2540939	積層形圧電アクチュエータ	鎌滝 裕輝 松本 德勝 川村 幸則	2541331	飲料抽出装置	高木 利夫



\*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。