

ひずみ波電圧印加時におけるコンデンサ入力形 整流回路の交流側高調波電流特性

板子 一隆¹・森 武昭¹

¹ 電気電子工学科

Characteristics of Harmonic Currents on AC Side in a Capacitor-Filtered Rectifier Circuit with Nonsinusoidal Supply Voltage

Kazutaka ITAKO¹⁾, Takeaki MORI¹⁾

Abstract

The apparatuses with a capacitor-filtered rectifier circuit generate many harmonic components in the current on the AC side. These generated harmonics may cause various disturbances. And besides, recently, the distortion of supply voltage has been increasing.

So, in this paper, considering the circuit condition of a television set which occupies a majority of harmonic currents on the power distribution systems, we clarify the effects of the supply voltage including the third or the fifth harmonic voltage on the harmonic currents on the AC side in a capacitor-filtered rectifier circuit.

Key Words: Nonsinusoidal supply voltage, Harmonic currents, Capacitor-filtered rectifier circuit

1. まえがき

最近、コンデンサ入力形整流回路を含む機器の交流側に発生する高調波電流が配電系統の高調波障害の一要因となり、大きな問題となっている¹⁾。しかも、商用電源の電圧ひずみが無視できなくなっており、これまでの電源電圧が正弦波であることを前提とした検討²⁾では不十分となってきている。従って、電源電圧のひずみが機器の交流側高調波電流の発生にどのような影響を与えるかを定量的に把握する必要があると考えられる。そのため、コンデンサ入力形整流回路を含む機器として、比較的電力容量の大きいASD (adjustable-speed drive)ヒートポンプを例に取り上げ、その電源電圧に含まれる高調波電圧の交流側電流のひずみ率への影響が検討されている³⁾。しかし、配電系統の高調波障害の主要因となる機器は、普及率と同時使用性の高いテレビ受像機 (以下、単にテレビという) であることが指摘されている^{4, 5)}。そこで、筆者等は、テレビの数値例を用いて、電源電圧の高調波成分として、配電系統で特に問題となる第5高調波電圧、同じ受電設備で大きな負荷 (溶接機など) が接続されたときに無視できなくなる第3高調波電圧の2つをそれぞれ考慮し、

これらの高調波電圧の含有率と位相が交流側高調波電流へどのように影響⁶⁾するかについて検討したので以下に報告する。

2. 回路構成および回路解析

2. 1 回路構成

図1に、ひずみ波電圧を印加したコンデンサ入力形整流回路を含む機器の等価回路を示す。図中の e_1 は電源電圧の基本波、 e_n は電源電圧の第 n 次高調波を表している。また、 r および L は配電系統の等価抵抗及びインダクタンスと検討の対象としている機器の交流側等価抵抗及びインダクタンスとを合成したものである。 C は直流電圧平滑用のコンデンサ、 R は負荷を示している。なお、テレビにおいては、 C と負荷の間にスイッチングレギュレータが挿入されている。すなわち、一般に C によって平滑化された直流電圧からスイッチングレギュレータを用いて数種類の一定電圧を得て、その電圧源からそれぞれの負荷に電力が供給される。従って、直流側電力 P_d をほぼ一定とみなすことができる。しかも、そのスイッチング周波数は商用電源の周波数に比べて非常に高いため、 C 端子から右側を純抵抗 R とみなすことができる²⁾。さらに、 R は回

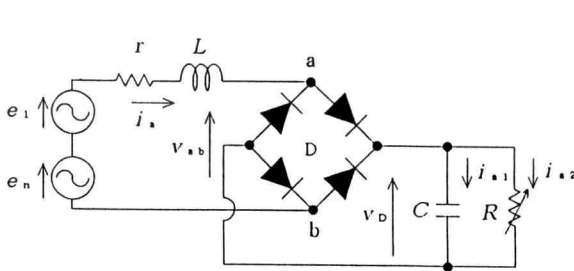


図1 回路構成

路条件の変化(電源電圧波形の変化等による V_D の変化)に対して P_d が一定となるように変化するので、可変抵抗として取り扱う。

以下に、この回路構成における回路の解析方法について示す。

2.2 回路解析

図1の回路構成における代表的な電源側電圧・電流波形を図2に示す。ただし、電源電圧として基本波電圧 e_1 のみを印加した場合である。同図からも分かるように、この回路構成における回路の動作状態には整流状態と阻止状態の2つの状態が存在する。そこで、各状態における等価回路を図3(a),(b)に示す。次に、これらの動作状態における回路方程式を以下に示す。

(1) 整流状態($t_1 \leq t \leq t_2$)

この状態における回路方程式は以下になる。

$$e_1 + e_n = r i_s + L \frac{d i_s}{d t} + v_D \quad (1)$$

$$i_s = C \frac{d v_D}{d t} + \frac{v_D}{R} \quad (2)$$

ただし、式(1)の e_1 および e_n は次式で定義される。

$$e_1 = E_1 \sin \omega t \quad (3)$$

$$e_n = E_n \sin (n \omega t + \theta_n) \quad (4)$$

ここで、本検討での n の値は3あるいは5となる。なお、この状態は、 $i_s = 0$ で終了し、阻止状態に移移する。

(2) 阻止状態($t_2 \leq t \leq t_1'$)

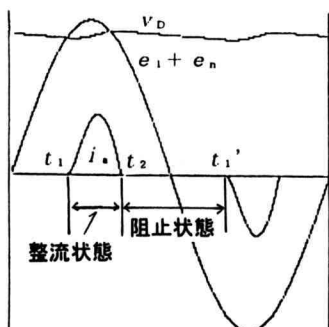
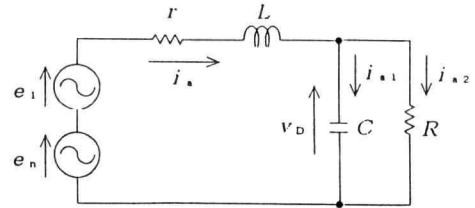
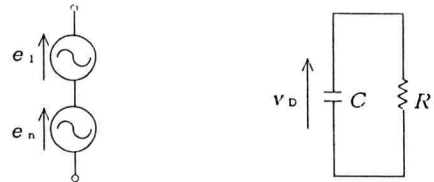


図2 電源電圧・電流の計算波形例



(a) 整流状態



(b) 阻止状態

図3 等価回路

$$-C \frac{d v_D}{d t} = \frac{v_D}{R} \quad (5)$$

$$i_s = i_{s1} + i_{s2} = 0 \quad (6)$$

この状態における回路方程式は以下になる。なお、この状態は、 $|e_1 + e_n| = v_D$ で終了し、整流状態に移移する。

次に、これらの各状態における回路方程式から構成される連立微分方程式の解を解析的に求めることは不可能であるため、ルング・クッタ法を用いて数値計算を行うこととした。そこで、式(1)~(6)から各部の電

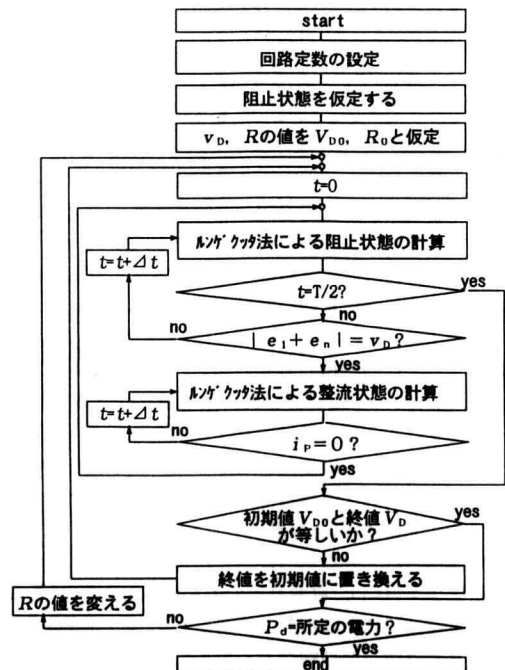


図4 計算流れ図

圧・電流を求めるための計算流れを示すと図4のようになる。まず、回路定数を設定し、阻止状態を仮定し、 $t=0$ における v_D の値 V_{D0} を仮定する。また、負荷抵抗 R の値を R_0 と仮定する。次に、阻止状態から計算を開始し、遷移条件に従って整流状態と阻止状態における各部電圧・電流の計算を半周期($T/2$)まで行い、そのときの v_D の値が仮定した V_{D0} と一致するまで終値を初期値に置き換えて繰り返し計算を行う。さらに、終値と初期値が一致したときに P_d が所定の電力でない場合には R の値を変えて、同様の計算を行い、 P_d が所定の電力になったならば計算を終了する。

3. 高調波電流特性

3.1 計算条件

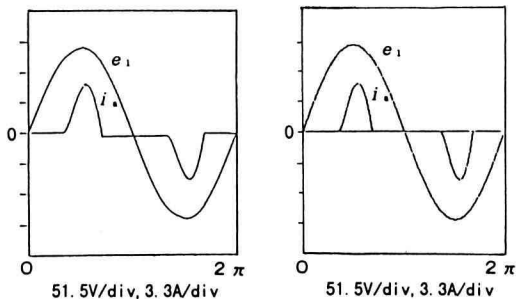
今回検討に用いたテレビの回路条件を表1に示す。ただし、ひずみ波電圧の実効値 $E=100V$ とし、基本波電圧 e_1 の周波数は $f=50Hz$ とする。また、 R の値は直流側電力 $P_d=130W$ 一定となるような値とする。以上の条件で諸特性の計算を行う。

3.2 第5高調波電圧重畳時の高調波電流特性
本節では、基本波電圧 e_1 に対し、第5高調波電圧 e_5 を10%~30%(含有率) 重畳させ、 e_1 に対する e_5 の位相差 θ_s は $0^\circ \sim 360^\circ$ まで変化させたときの電圧・電流波形について計算および実測を行った。

図5(a),(b)に e_1 のみ印加した場合、図6(a),(b)には e_1 に e_5 を含有率30%, $\theta_s=171.5^\circ$ で重畳した場合の実測および計算波形を示す。両図より、計算波形と実測波形が良く一致していることがわかる。また、他の条件における計算波形と実測波形も良く一致することを確認している。また、図6からわかるように、 e_5 を

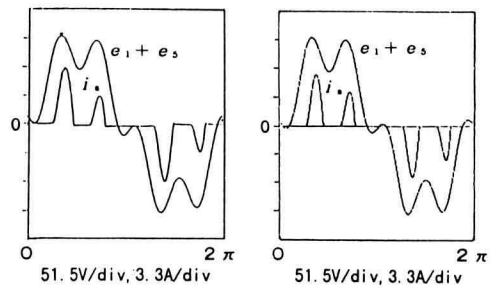
表1. テレビの回路条件

E	100V
r	2.18 Ω
L	2.0mH
C	990 μ F
直流側電力 P_d	130W



(a)実測波形 (b)計算波形

図5 e_1 のみ印加時の交流側電圧・電流波形



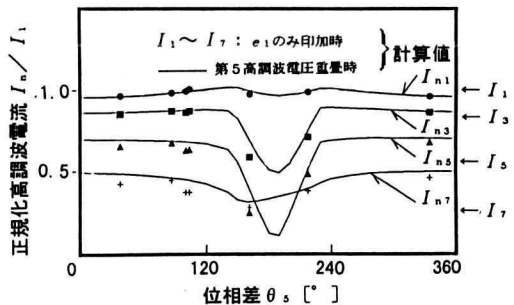
(a)実測波形 (b)計算波形

含有率30%, $\theta_s=171.5^\circ$

図6 第5高調波電圧重畳時の交流側電圧・電流波形

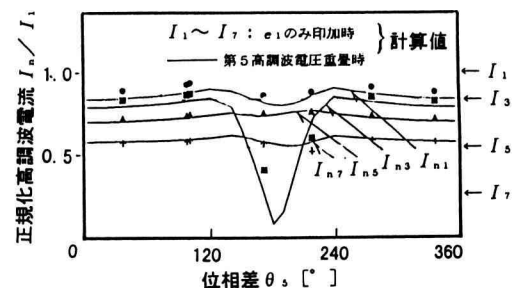
含有率30%, $\theta_s=171.5^\circ$ で重畳した場合、半周期中にコンデンサの充電が2回行われるという特異な現象を生じることが明らかになった。この現象は、 e_5 を15%以上重畳し、 θ_s を $150^\circ \sim 220^\circ$ に変化させた範囲で現れることを確認している。

図7(a),(b)に θ_s に対する交流側高調波電流の特性を示す。ただし、各高調波電流は、 e_1 のみ印加時の交流側電流の基本波の実効値で正規化している。図7(a)の含有率10%において、 θ_s が $0^\circ \sim 150^\circ$, $220^\circ \sim 360^\circ$ では、 I_{n3} が5%, I_{n5} が30%増加し、第7高調波電流 I_{n7} は、20%~90%程度増加する。これは、 e_5 のみ印加時の電流波形に比べて、幾分導通時間が短くなり、ビ



実測値(●:基本波, ■:第3調波, ▲:第5調波, +:第7調波)

(a)含有率10%



実測値(●:基本波, ■:第3調波, ▲:第5調波, +:第7調波)

(b)含有率30%

図7 θ_s に対する高調波電流の特性

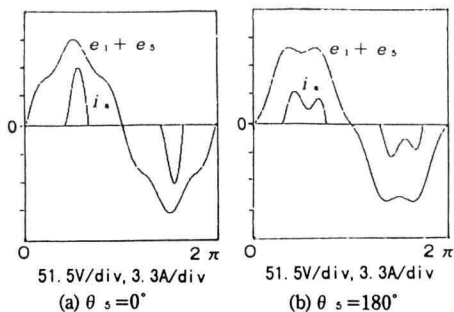


図8 交流側電圧・電流の計算波形

ーク値も高くなるためである。すなわち、大部分の位相差で、 I_{n5} と I_{n7} は増加し、 I_{n3} はほとんど増加しない。ただし、例外として θ_s が 180° 付近のごく一部では、第3高調波電流 I_{n3} は、 e_1 のみ印加時の第3高調波電流 I_{n3} に比べ約41.5%、第5高調波電流 I_{n5} は e_1 のみ印加時の第5高調波電流 I_{n5} に比べ、約75%減少している。これは、図8(a),(b)に示すように、含有率10%、 $\theta_s = 180^\circ$ の電流波形が $\theta_s = 0^\circ$ のときよりも導通時間が長く、しかもピーク値が低くなることに起因している。

次に、図7(b)の含有率30%において、 I_{n5} と I_{n7} は全ての位相差において10%重畳時を上回っており、 e_1 のみ印加時に対して I_{n3} は35%、 I_{n7} は120%増加している。しかし、 I_{n3} は全ての位相差で10%重畳時より減少する。特に、 θ_s が約 $150^\circ \sim 220^\circ$ では、図6に示したように、電源電圧波形にピークが2つ生じ、それに伴ってコンデンサの充電が2回行われるため、交流側電流の導通時間が長くなり、その結果、 I_{n3} は e_1 のみ印加時に対して80%程度と著しく減少する。

以上より、第5高調波電圧を重畳すると、 I_{n3} は減少するが、 I_{n5} と I_{n7} は増加し、含有率が増すとその傾向がさらに強くなり、第5、7高調波電流に関しては厳しくなることが明らかになった。

3.3 第3高調波電圧重畳時の高調波電流特性

一般に、配電系統では、前節で検討した第5高調波電圧が特に問題となっているが、同じ受電設備内で大きな負荷（溶接器など）を使用したときに、第3高調波電圧も無視できないことがある。そこで、前節と同様に、 e_1 に第3高調波電圧 e_3 を重畳した場合の交流側高調波電流の特性を実測し、計算結果と比較検討した。

本節では、基本波電圧 e_1 に対し、第3高調波電圧 e_3 を10%~30%重畳させ、 e_1 に対する e_3 の位相差 θ_s を $0^\circ \sim 360^\circ$ まで変化させたときの電圧・電流波形について計算および実測を行った。

図9(a),(b)は、 e_1 に e_3 を含有率30%、 $\theta_s = 347.1^\circ$ で重畳した場合の交流側電圧・電流の実測および計算波形を示している。両図より、計算波形と実測波形が良く一致していることがわかる。また、他の条件にお

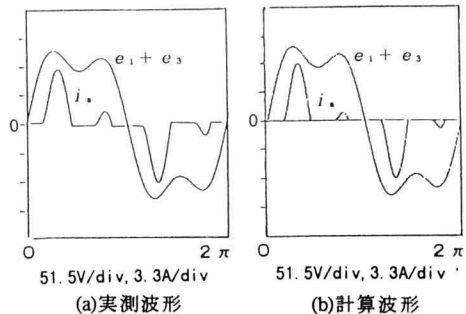
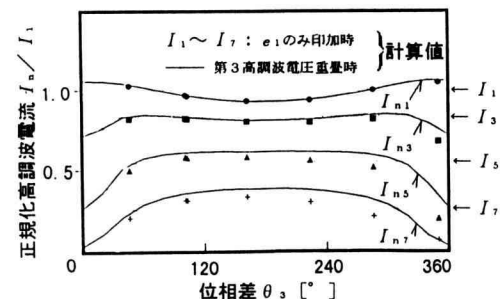


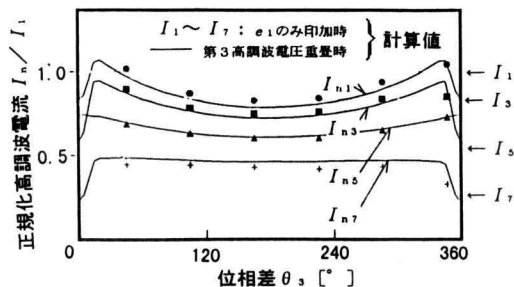
図9 交流側電圧・電流波形

る計算波形と実測波形も良く一致することを確認している。また、図9からわかるように、 e_3 を含有率30%、 $\theta_s = 0^\circ$ で重畳した場合、半周期中にコンデンサの充電が2回行われるという特異な現象を生じることが明らかになった。この現象は、 e_3 を17%以上重畳し、 θ_s を $0^\circ \sim 20^\circ, 340^\circ \sim 360^\circ$ に変化させた範囲で現れることを確認している。

図10(a),(b)に θ_s に対する交流側高調波電流の特性を示す。ただし、各高調波電流は、 e_1 のみ印加時の交流側電流の基本波の実効値で正規化している。図10(a)の含有率10%において、 θ_s が $50^\circ \sim 310^\circ$ では、図11(b)に示すように、電源電圧のピークが高く波形が鋭くなり、交流側電流のピーク値も高くなり導通時間も短くなるため、第3高調波電流 I_{n3} は、 e_1 のみ印加時とほぼ同様であるが、第5高調波電流 I_{n5} は e_1 のみ



(a) 含有率10%



(b) 含有率30%

図10 θ_s に対する高調波電流の特性

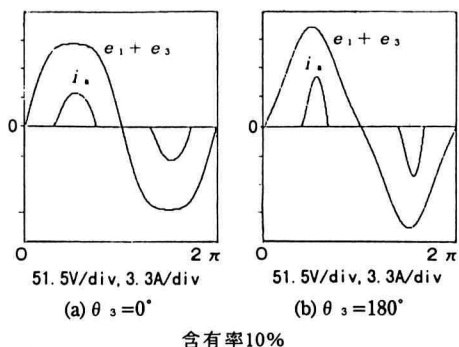


図 1-1 交流側電圧・電流の計算波形

加時の第5高調波電流 I_5 に対して約5%, 第7高調波電流 I_7 は e_1 のみ印加時の第7高調波電流 I_7 に対して約40%増加する。すなわち, 大部分の位相差で, I_{n5} と I_{n7} は増加し, I_{n3} はほとんど増加しない。ただし, 例外として θ_s が 0° 付近のごく一部では, 交流側電流波形が図 1-1 (a) のように, ピーク値が下がり導通時間が長くなるため, e_1 のみ印加時に比べて全ての高調波電流が減少する。

次に, 図 1-1 (b) の含有率30%では, I_{n5} と I_{n7} は全ての位相差において10%重畳時を上回っており, e_1 のみ印加時に対して I_{n5} は10~28%, I_{n7} は90%増加する。 I_{n3} は大部分の位相差で10%重畳時より減少するが, 例外としてコンデンサの充電が2回行われるときと1回行われるときの境界となる $\theta_s = 20^\circ$ と 340° で, e_1 のみ印加時に対して14%増加する。

以上より, 第3高調波電圧を重畳すると, 全般的に, e_1 のみ印加時に比べて, I_{n3} は減少するが, I_{n5} と I_{n7} は逆に増加するという傾向がある。この傾向は含有率が高くなるほど強くなり, 第5, 7高調波電流に関しては厳しくなることが明らかになった。

4. 結論

本論文は, 配電系統の高調波障害の主要因であるテレビの数値例を用いて, 電源電圧として, 基本波電圧に第5高調波電圧または第3高調波電圧をそれぞれ基本波に対して最大30%まで重畳した場合の交流側高調波電流への影響について検討した。以下にその結果を要約する。

- (1) 重畳する高調波電圧の位相の変化に対して, 第3高調波電流はほとんど増加しないことが明らかになった。しかし, 第5, 7高調波電流に関しては, e_1 のみ印加時に比べて全般的に増加する傾向がある。すなわち, 含有率10%の条件で, 第5高調波電圧重畳時において, 第5高調波電流は30%程度, 第7高調波電流は20~90%, 第3高調波電圧重畳時において, 第5高調波電流は5%程度, 第7高調波電流は40%程度増加する。
- (2) 特に, θ_s が 0° 付近, あるいは θ_s が 180° 付近 (い

ずれも, 電源電圧波形のピークが高い) において, 電流波形のピークが高く, 導通時間が短くなるため, e_1 のみ印加時に比べると第5高調波電圧重畳時には第5高調波電流が30%, 第7高調波電流が90%程度, 第3高調波電圧重畳時には第5高調波電流が5%, 第7高調波電流が40%程度増加する。また, 逆に, 例外的に θ_s が 180° 付近, あるいは θ_s が 0° 付近 (いずれも, 電源電圧波形のピークが低い) において, 電流波形のピーク値が低く, 導通時間が長くなるため, 高調波電流が減少する場合がある。

- (3) 含有率を増すと (1) で示した傾向が強まることから明らかとなった。すなわち, 含有率を30%にすると, e_1 のみ印加時に比べて, 第5高調波電圧重畳時において第5高調波電流は35%程度, 第7高調波電流は120%程度, 第3高調波電圧重畳時において第5高調波電流は28%程度, 第7高調波電流は90%程度増加する。ただし, 例外的に, 第3高調波電圧重畳時において, コンデンサの充電が2回行われるときと1回行われるときの境界となる $\theta_s = 20^\circ$ と 340° で, I_{n3} は14%程度増加する。

以上より, 交流側高調波電流は, 重畳する高調波電圧の含有率と位相差に大きく影響を受けることが明らかになった。特に, 本検討の範囲内では, 第5, 7高調波電流に関してはごく一部の例外もあるが全般的にかなり厳しくなるので注意が必要である。

本論文では, テレビの数値例を用いて, 実測および理論計算の比較検討を行ったが, 今後, 実際のテレビにひずみ波電圧を印加した場合の交流側高調波電流を実測し, 今回行った検討結果と比較検討することが必要である。

参考文献

- 1) 加藤: 「高調波障害とその対策」電気設備学会誌, 第13巻, 1号, p.62~69, 平成5年11月
- 2) 金, 中島, 正田: 「線路インピーダンスを考慮したコンデンサ入力形電源の高調波解析」信学論B J 70-B巻, 11号, p.1316~1322, 昭和62年11月
- 3) A.Mansoor, W.M.Grady, R.S.Thallam, M.T.Doyle, S.D.Krein, M.J.Samotyj: "Effect of Supply Voltage Harmonics on the Input Current of Single-Phase Diode Bridge Rectifier Loads", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.3, July 1995
- 4) 紀村: 「ある変電所を流れる第5高調波電流の実測と解析」電学論B, 97巻, 8号, p.503~510, 昭和52年8月
- 5) 井上: 「配電線負荷の第5調波電流発生源と負荷の等価回路の推定法」電学論B, 101巻, 8号, p.451~458, 昭和56年8月
- 6) 森, 板子, 深江, 松橋: 「ひずみ波電圧印加時におけるコンデンサ入力形整流回路の高調波特性」平成4年電気学会全国大会, No.480, 平成4年3月