

LC フィルタ併用アクティブフィルタの補償特性

泉 勝 弘*・堀 部 信 吾**
辻 峰 男*・山 田 英 二*
小 山 純*

Compensation Performance of Active Filter System
with LC Harmonic Filter

by

Katsuhiro IZUMI*, Shingo HORIBE**, Mineo TSUJI*,
Eiji YAMADA*, Jun OYAMA*

This paper presents a compensation performance of active filter system with LC harmonic filter. The experimental system is composed of DSP controller, IGBT inverter, three-phase LC filter and a condenser input type three-phase diode bridge rectifier. In the experiment, values of the reactor for LC filter are fixed, and condensers of these are adjusted. The compensation effect of LC filter and an active filter with LC filter are confirmed by the experiment.

1 まえがき

近年の電力用半導体の進歩によって、パワーエレクトロニクス機器の大容量化、高効率化が可能となり、各種産業及び家電・汎用品分野に多種多様な電力変換装置が普及した。しかし、電力用半導体が適用された機器に制御性や利便性を与えた反面、パワーエレクトロニクス機器の発生する高調波電流が送配電系統へ流出している。これらの高調波電流は、電力用コンデンサやリアクトルなどに加熱焼損や異常音を発生させ、高調波障害を引き起こしている^{1)~3)}。

この系統に流出する高調波の発生量を抑制するために、高調波発生源の近傍にLCフィルタや電力用アクティブフィルタを設置する方法がある⁴⁾。その他に、高調波発生源である機器の主回路構成や制御法を改善する方法もある。

これまでの送配電系統の高調波対策はLCフィルタの設置が主流であった。LCフィルタはリアクトルとコンデンサを組み合わせた構成で、商用周波数の波形ひずみを改善する方法である。しかし、LCフィルタは、系統インピーダンスの影響を受け、系統との間に

反共振が存在し、上位系統からの高調波電流が流入するなどの短所がある。近年、高調波電流抑制のために多く利用されている電力用アクティブフィルタは、装置容量が補償対象の10%程度ですみ、多数の高調波発生源を一括して補償することができる。しかし、パワーエレクトロニクス技術の進歩につれ、アクティブフィルタに大容量で高速電流応答が求められている。しかし、アクティブフィルタは効率、価格に問題があり大容量化は困難であった。このため、LCフィルタとアクティブフィルタ両者の問題となる部分を解決する手段として、LCフィルタとアクティブフィルタを併用する方式がある。これにより、両者の間で高調波電流の補償を分担し、インバータの装置容量の低減や性能の補完ができる。

本論文では、高調波発生源として、コンデンサ入力形三相ダイオードブリッジ整流回路を用いる。実験では、LCフィルタのリアクトルを固定しコンデンサの容量を変化させることにより、最適な値を求め、この補償効果を検証する。また、三相電圧形PWMインバータを主回路とするアクティブフィルタを系統と並

平成12年4月21日受理

* 電気電子工学科 (Dept. of Electrical and Electronic Engineering)

** 大学院修士課程電気情報工学専攻 (Graduate Student, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science)

列に接続し、LCフィルタと併用した場合の補償効果についても実験により検証する。

2 LCフィルタ併用アクティブフィルタ

2.1 LCフィルタの構成

図1にLCフィルタと負荷回路を示し、図2にLCフィルタの構成を示す。LCフィルタは、同図のように電源に対してデルタ結線とし、5次、7次の同調フィルタと11次以降のハイパスフィルタで構成する。これは負荷回路から発生する高調波電流は5次が最も多く、次に7次、11次の順になっているからである。このハイパスフィルタの並列抵抗は高すぎるとただの11次の同調フィルタになってしまい、低すぎるとコンデンサのみと同じになる。

図3はアクティブフィルタを考慮した等価回路である。同図で、負荷回路は高調波の電流源とし、Zは整

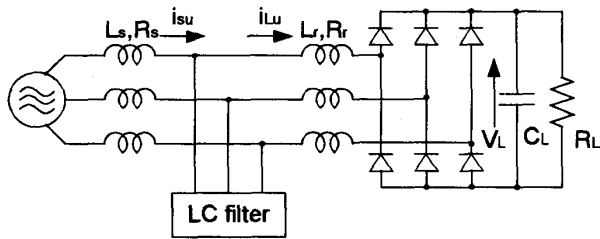


Fig.1 Load and LC filter.

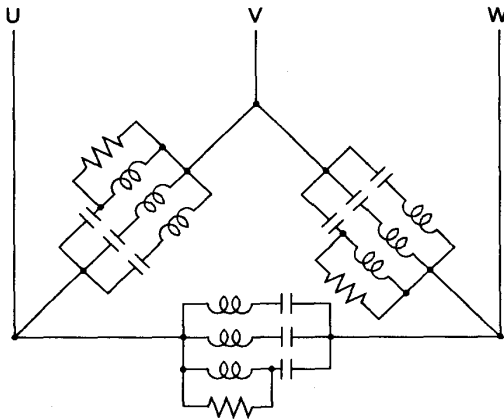


Fig.2 LC filter for the compensation.

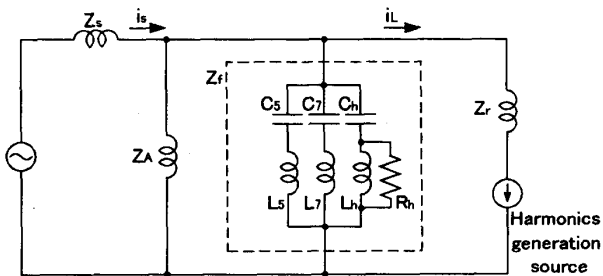


Fig.3 Equivalent circuit of AF with LC filter.

流器リアクトル、Zsは系統インピーダンス、ZAはアクティブフィルタである。Zfs, Zf7, Zfnをそれぞれフィルタの各インピーダンスとおくと、

$$Z_{f5} = \frac{1}{j\omega C_5} + j\omega L_5 + r_5 \quad (1)$$

$$Z_{f7} = \frac{1}{j\omega C_7} + j\omega L_7 + r_7 \quad (2)$$

$$Z_{fn} = \frac{1}{j\omega C_n} + \frac{(j\omega L_n + r_n)R_n}{j\omega L_n + r_n + R_n} \quad (3)$$

$$Z_s = j\omega L_s + r_s \quad (4)$$

$$Z_A = j\omega L_A + r_A \quad (5)$$

ここで、LCフィルタの合成インピーダンスを

$$Z_f = \frac{Z_{f5}Z_{f7}Z_{fn}}{Z_{f5}Z_{f7} + Z_{f7}Z_{fn} + Z_{fn}Z_{f5}} \quad (6)$$

とすれば、

$$I_s = \frac{Z_f Z_A Z_s}{Z_f Z_A + Z_A Z_s + Z_s Z_f} I_L \quad (7)$$

となる。hは11次であるから、LCフィルタの共振条件

$$\sqrt{L_n C_n} = 1/(n\omega_0) \quad (8)$$

ここで、 $n=5, 7, 11$, $\omega_0 = 2\pi f_0$ (系統の周波数)

とフィルタの特性インピーダンス

$$Z_n = \sqrt{L_n / C_n} \quad (9)$$

より、フィルタのL, Cは次式となる。

$$L_n = Z_n / (n\omega_0) \quad (10)$$

$$C_n = 1 / (n\omega_0 Z_n) \quad (11)$$

2.2 併用系の構成

図4にLCフィルタ併用アクティブフィルタの制御系を示す。同図のLCフィルタは図2の構成であり、アクティブフィルタと共に負荷（高調波発生源）に並列接続している。アクティブフィルタの出力電流は、インバータの出力電圧 V_u, V_v, V_w と電源電圧の差がインバータリアクトルに印加されることにより流れる。このため、コンデンサ電圧 V_{dc} と負荷電流 I_u, I_w を検出し、補償電流 I_u, I_w の指令値を求めて、インバータの出力電圧を決定している。また、電源位相との同期をとるために、電源電圧からデジタルPLLにより電源位相角 θ を求めている。本制御系ではこの θ を用いて、補償電流、負荷電流を三相量からdq二相量に変換している^{5)~7)}。従来のアクティブフィルタでは負荷電流をフィルタに通すことによって補償すべき電流を求めているが⁸⁾、本システムではこのフィルタを用いない構成にしている。このため、コンデンサ電圧を一定に保つためのPI制御の操作量を、二相変換した負荷電流と加算することで、補償電流検出と同等の機能を果している。この加算値のインバータ出力電流指

令値とインバータ電流から PI 制御演算によりインバータ電圧指令値を求め、PWM パターンを IGBT に与えることによってアクティブフィルタの制御を行っている。

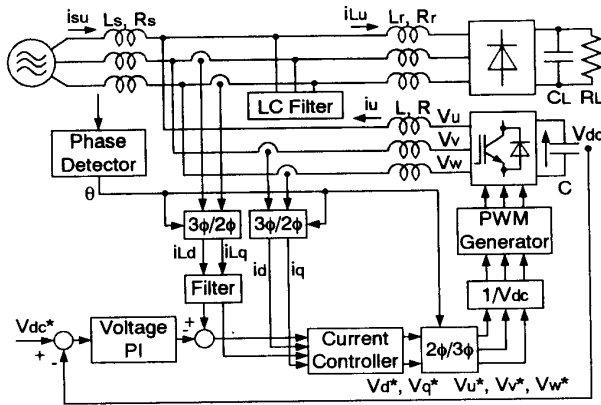


Fig.4 Control system of AF with LC filter.

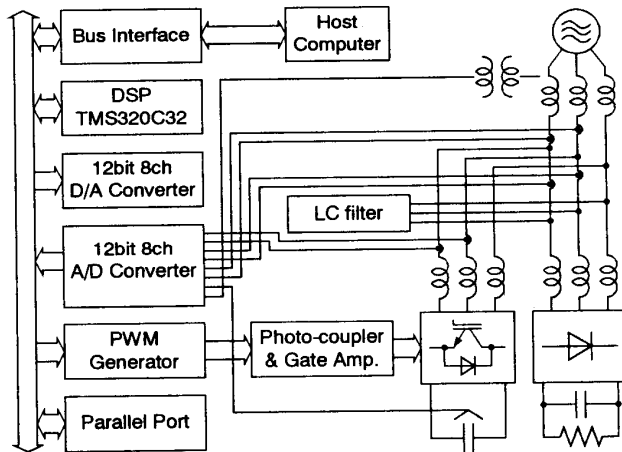


Fig.5 Experimental system of AF with LC filter.

Table 1 Circuit constants.

Supply voltage	100V
Line reactor	0.1mH
Inverter reactor	1.0mH
Rectifier reactor	1.0mH
Inverter condenser	3000μF

Table 2 LC filter parameter by calculation.

	5 th	7 th	11th
Reactor [mH]	15.915	11.368	7.234
Condenser [μF]	17.684	12.631	8.038

Table 3 Reactor values of LC filter.

	UV	VW	WU
5 th [mH]	15.930	15.890	15.915
7 th [mH]	11.343	11.409	11.398
11th [mH]	7.246	7.246	7.267

3 実験

3.1 実験装置

図5に実験装置を示す。このシステムではLEMモジュールにより、負荷電流、アクティブフィルタ電流、コンデンサ電圧を検出している。電源の位相情報は線間電圧をトランスにより絶縁して検出している。これらの信号はA/DコンバータによりDSP(TMS320C32)に取込まれる。さらに、これは内部状態量を出力するD/AコンバータおよびPWM発生回路を持っている。また、制御はDSPボードで行う。パソコンはDSPボードへの制御プログラムのダウンロード、DSPのコントロール、制御指令の入力、制御ゲインの変更、状態表示等を担当する。DSPは制御用周辺回路の初期化、パソコンとの通信、制御演算、インバータの制御を担当する。本システムのPWM発生はデジタル回路による三角波比較形である。この回路定数を表1に示す。

負荷としての三相整流回路の直流側には220V、100Wの電球を20個使用している。この負荷に交流線間電圧100Vを印加したとき、交流側電流の基本波実効値は5.74Aとなるから、三相整流回路の基本波等価インピーダンスは10.1Ωとなる。LCフィルタが系統に接続されたとき、LCフィルタの特性インピーダンスが負荷の等価インピーダンスより低いと基本波無効分への影響が大きくなってしまふ。このため、両者は同じ値くらいが良いと思われる⁹⁾。これにより、三相デルタ結線のLCフィルタの特性インピーダンスを30Ωとした。このLCフィルタ値は表2になり、 $R_n=33\Omega$ とした。

3.2 実験結果

LCフィルタのリアクトルにはフェライトコアを用いている。フェライトコアは高周波用に優れ、高透磁率、低損失ではあるが、温度により特性が変わりやすく、飽和磁束密度が低いので、磁路に4mmのギャップを入れている。この値を表3に示し、計算値にかなり近いものとなっている。

LCフィルタの補償効果を実験により検討するため

に C_5 と C_7 以外を前記の値に保ち、 C_5 は $16.00\mu\text{F}$ から $17.70\mu\text{F}$ まで $0.05\mu\text{F}$ 刻みで変化させ、 C_7 は $11.40\mu\text{F}$ から $12.60\mu\text{F}$ まで $0.05\mu\text{F}$ 刻みで変化させて実験を行った。この結果を図6から図9に示す。同図はLCフィルタのみの5次、7次、11次、13次の電流スペクトルである。同様に図10にLCフィルタのみの総合ひずみ率を示す。

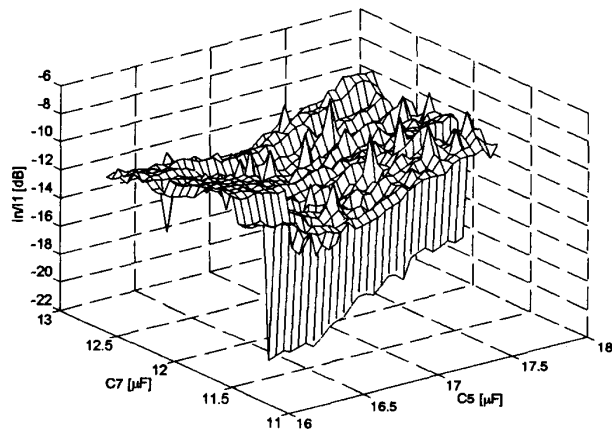


Fig.6 5 th order harmonic with LC filter.

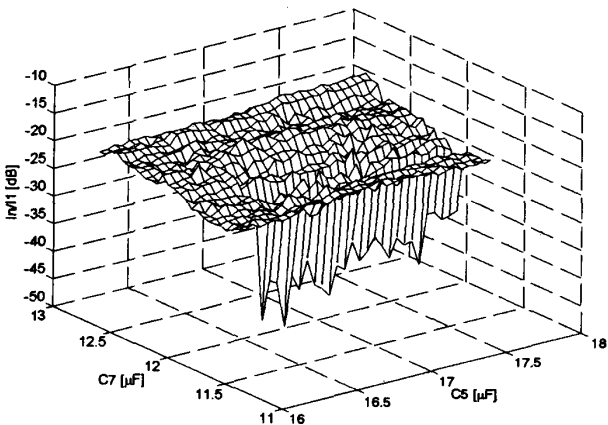


Fig.7 7 th order harmonic with LC filter.

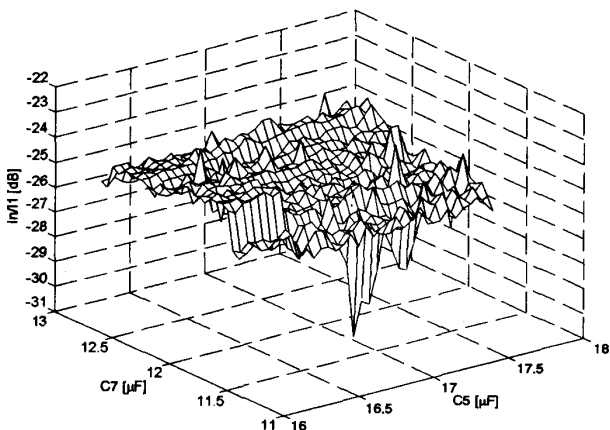


Fig.8 11 th order harmonic with LC filter.

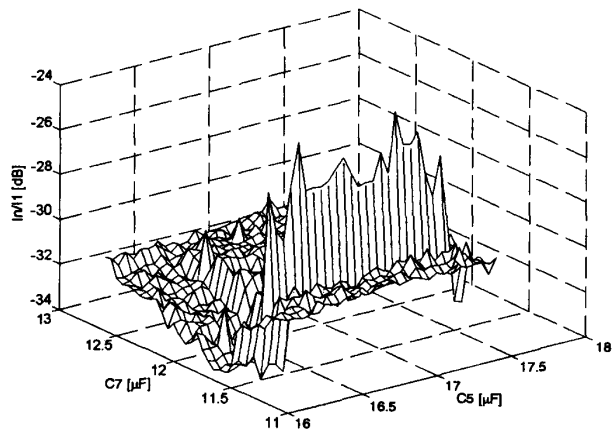


Fig.9 13 th order harmonic with LC filter.

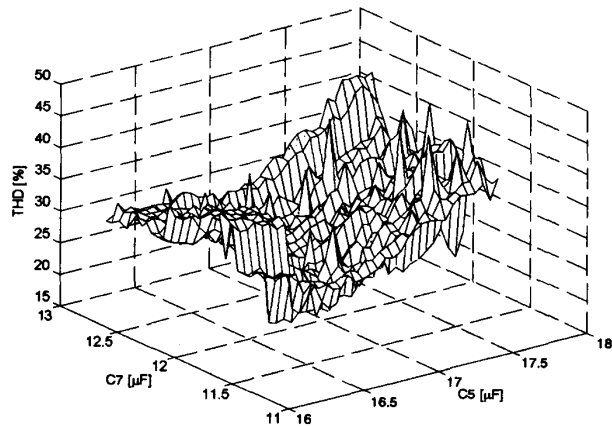


Fig.10 Total harmonic distortion with LC filter.

図6, 7より $C_7=11.7\mu\text{F}$ のときよく補償されているが、非常にシャープであり、温度によるコンデンサ値等の変化を考慮すると、この点に合わせるのは困難である。同様に図8ではあまり変化がみられず、図9では $C_7=11.7\mu\text{F}$ のとき悪化している。図10では $C_5=16.55\mu\text{F}$, $C_7=11.7\mu\text{F}$ のときがもっとも総合ひずみ率が改善されていることがわかる。

LCフィルタ併用アクティブフィルタの実験結果を図11から図14に示す。同図もLCフィルタのみと同様に5次と7次のコンデンサの値を変化させたときの5次、7次、11次、13次の電流スペクトルを示す。このときのアクティブフィルタの電流制御と電圧制御のゲインを表3に示す。同様に図15に総合ひずみ率を示す。

図11より5次の高調波は C_5 が小さくなればよく補償されていて、約 $16.5\mu\text{F}$ で最少になっている。 C_7 の影響はほとんど見られない。

図12より7次の高調波は C_7 が小さくなればよく補償されていて、約 $11.6\mu\text{F}$ で最少になっている。 C_5 の影響はほとんど見られない。

図13より11次の高調波は $C_5=17.0\sim 17.2\mu\text{F}$, $C_7=$

Table 3 Control gains.

	Proportional gain	Integral time constant
Current control	9.1	0.001
Voltage control	0.1	0.22

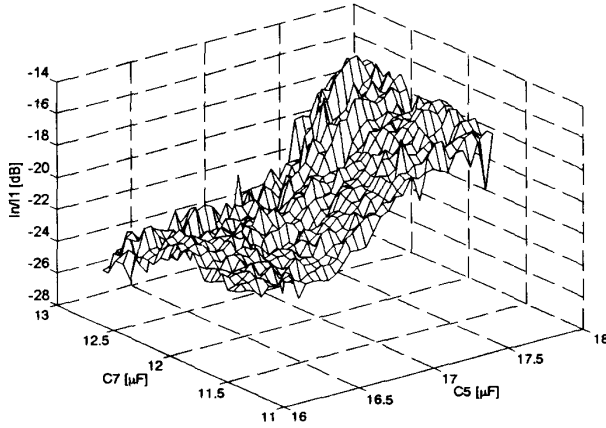


Fig.11 5 th order harmonic with LC filter and AF.

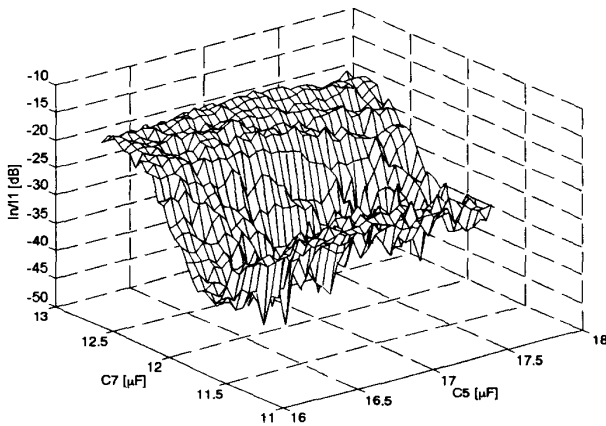


Fig.12 7 th order harmonic with LC filter and AF.

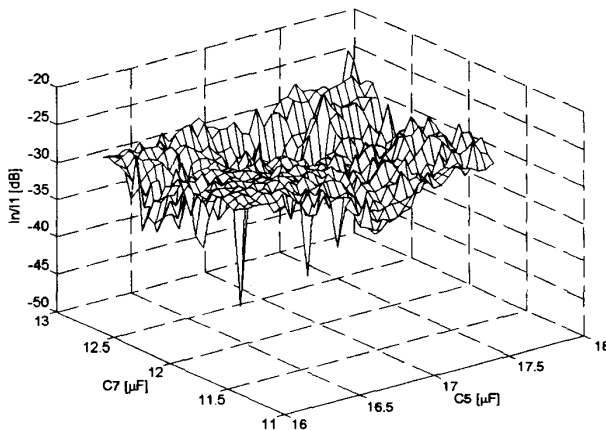


Fig.13 11 th order harmonic with LC filter and AF.

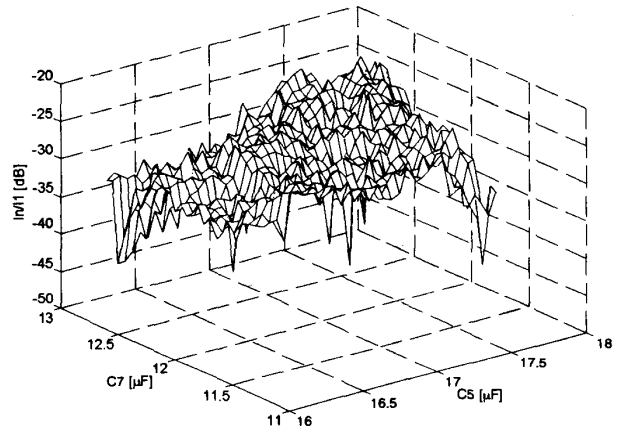


Fig.14 13 th order harmonic with LC filter and AF.

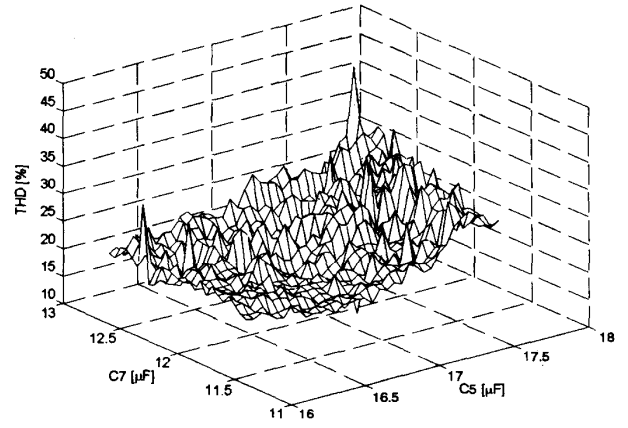


Fig.15 Total harmonic distortion with LC filter and AF.

12.15~12.4 μ F のとき補償効果がよいことがわかる。
 図14より13次の高調波は左右にいくほど低下している。

図15より総合ひずみ率は $C_5=16.90\mu$ F, $C_7=11.60\mu$ F で最少になっている。

図16は LC フィルタ併用アクティブフィルタの実験でもっとも総合ひずみ率が小さかった $C_5=16.90\mu$ F, $C_7=11.60\mu$ F ときの波形である。同図上から電源位相角 θ , LC フィルタを含む負荷電流 i_{Lw} , 補償電流 i_w , 電源電流 i_w である。同図より LC フィルタのみの電流波形より, 電源電流波形が正弦波となっており, アクティブフィルタにより補償されていることがわかる。

図17は図16の電流スペクトルである。同図(a)は負荷電流スペクトルであり, (b)は電源電流スペクトルである。同図から5次, 7次, 11次が補償されている。

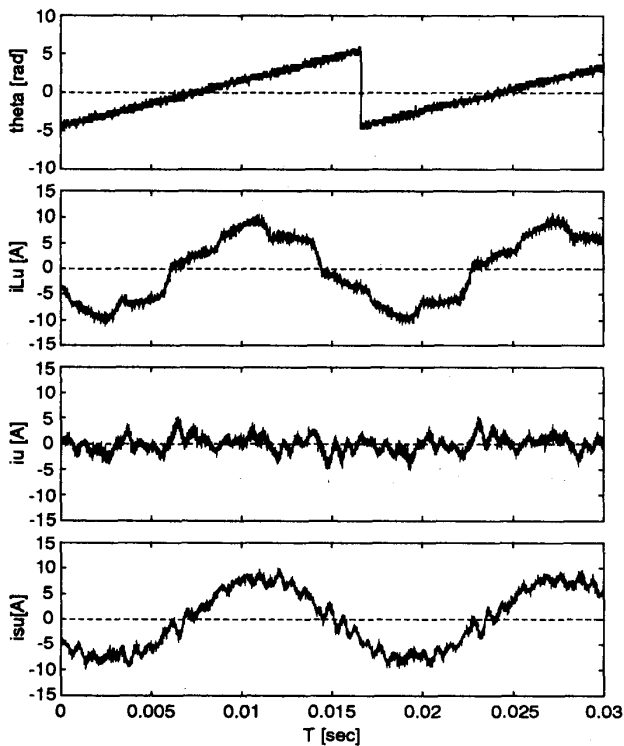
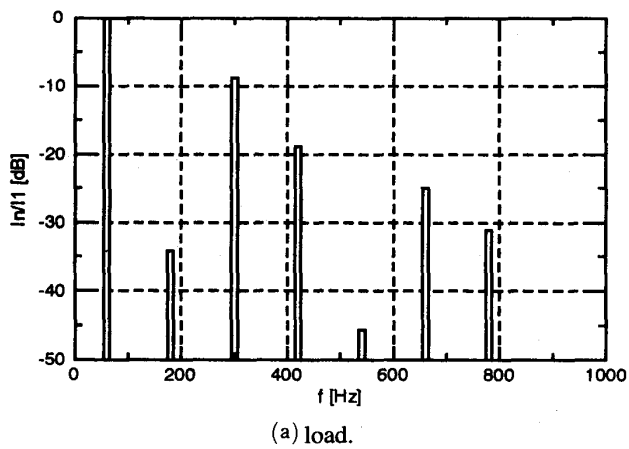
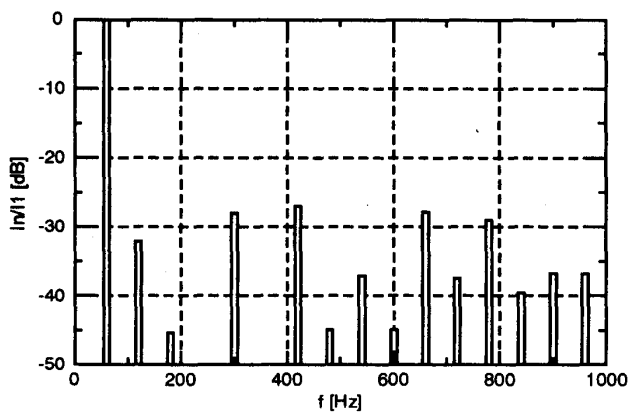


Fig. 16 Experimental waveforms with LC filter and active filter.



(a) load.



(b) source.

Fig. 17 Power spectra.

4 あとがき

本論文では、LCフィルタのみとLCフィルタ併用アクティブフィルタの補償効果を実験により検証した。このとき、実験装置の関係で、Lを固定し、Cを変化させて実験を行った。LCフィルタのみでは、共振による最少点が存在するが、そのときのコンデンサ値は計算値とは異なった値であった。また、その点は非常にシャープであり、調整するのが困難である。LCフィルタ併用アクティブフィルタでは、最少点の近傍がフラットであり、有効に補償が可能である。実験波形から、LCフィルタのみに比較して電源電流が正弦波に近づいている。これにより、本システムの補償効果を示した。

参考文献

- 1) D. Andrews, M. T. Bishop, and J. F. Witte, "Harmonic Measurements, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-32, no.3, pp.617-624, May 1996.
- 2) J. W. Gray and F. J. Haydock, "Industrial Power Quality Considerations When Installing Adjustable Speed Drive Systems", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-32, no.3, pp.646-652, May 1996.
- 3) T. S. Key and J. Lai, "Costs and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-Mode Power Supplies in a Commercial Office Building", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-32, no.5, pp.1017-1025, Sept. 1996.
- 4) アクティブフィルタ機能を有する高性能電力変換システム調査専門委員会: 「アクティブフィルタ機能を有する電力変換回路とシステム」, 電気学会技術報告第643号, (1997)
- 5) 水木: 「最近のアクティブフィルタ技術」, 平成8年電気学会全国大会, S. 14-3
- 6) 川端・中村・萩原・水木: 「アクティブフィルタ制御方式の検討と高調波抑制検証」, 平成7年電気学会産業応用部門全国大会, 189
- 7) 石川: 「交直変換回路とアクティブフィルタ」平成12年電気学会全国大会, 4-S20-3
- 8) 大野・鳥井・植田: 「移動平均HPFを用いたアクティブフィルタの電流検出方式と特性」, 平成12年電気学会全国大会, 4-104
- 9) 宮崎・泉・辻・山田・小山・永尾: 「アクティブフィルタ併用のためのLCフィルタの検討」, 平成9年度電気関係学会九州支部連合大会, 1020