

論文

生活環境に調和した小型省エネルギー機器の開発

— 家電製品用高調波・力率改善装置の開発 —

三上 和正^{*1)} 小林 丈士^{*2)} 藤原 康平^{*2)} 清水 敏久^{*3)} 和田 圭二^{*3)}

The study of small-scale energy-saving apparatus harmonized with the living environment.
(An device with improved harmonics and power factor was developed for use
as a home electrical appliance.)

Kazumasa Mikami^{*1)}, Takeshi Kobayashi^{*2)}, Kohei Fujiwara^{*2)}, Toshihisa Shimizu^{*3)}, Keiji Wada^{*3)}

The number of OA devices, home electrical appliances and the electronic equipment is enormous in the big city. Furthermore, a lot of devices are used which exclude harmonics regulations. Most of these have low power factors. When the quantity of devices increases, electricity transmission efficiency decreases. Further side-effects include an increased distortion in the electric current in power lines, such as in indoor wiring, and an increase in electromagnetic noise. In addition, this is a cause for other devices to malfunction. We propose that the living environment is degraded due to the prevalence of OA devices in the big city.

We have developed a cheap, small-scale power factor improvement device. This device is compatible with general home electrical appliances and small electronic equipment. As a result, it possible to clean indoor electricity and save energy.

キーワード：力率改善装置，高調波，歪電流，屋内電力，電磁ノイズ，誤動作

Keywords：Power factor improvement device, Harmonics, Distortion current, Indoor electricity, Electromagnetic noise, Malfunction

1. はじめに

大都市のOA機器，家庭電化製品及び各種照明機器の数は膨大で，かつ高調波規制の対象外の機器類が多用されている。これらの多くは低力率の機器のため，その量が増加すると，電力の送電効率が低下するだけでなく，屋内配線などの電力線内の歪電流（図1）の増加や他の機器の誤動作等の要因にもなりえる。そして，この歪電流は従来の力率改善方式（進相・遅相調整）では改善が不可能である事等から，都市における小型照明機器やOA機器の普及が生活環境を害する可能性が想定される。

本研究は，「都産技研」と「首都大学東京」が連携し，家電製品や小型電子機器に利用でき，屋内電力のクリーン化実現を目的に，小型の力率改善装置を試作・開発した。

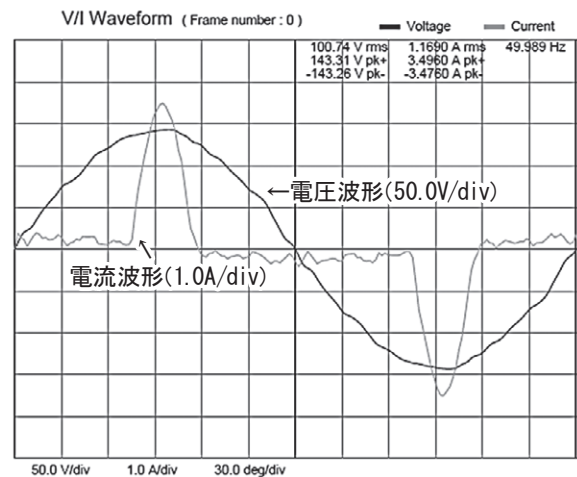


図1. LED照明器具の歪電流の実例

2. 低力率危機の実態調査と高調波電流

2.1 家庭電気製品の力率測定 一般家庭にある電気製品を対象に，力率，消費電力及び通電電流の測定を行った結果を表1に示す。

力率の判定基準として，◎印は97%以上で良好，○印は80%以上で普通，*印は60%以下の低力率機器，**印は低力率機器で長時間使用，一印は比較的低力率であるが使用時間が短いと判断した。

事業名 平成22,23,24年度 都市課題解決のための技術戦略プログラム

*1) 実証試験セクター

*2) 電子半導体技術グループ

*3) 首都大学東京

表1. 家庭電気製品の力率測定(一例)

力率判定	家電品名	力率 [%]	消費電力 [W]	通電電流 [A]
**	電球型LEDランプ(60W相当)	58	7	0.12
**	電球型蛍光灯(23W)	60	22	0.36
**	蛍光灯(サークライン40W)	52	48	0.90
**	蛍光灯(サークライン30W)	62	33	0.53
**	蛍光灯(インバータ式22W)	62	18	0.29
-	DVDレコーダ(ON待機)	65	20	0.30
-	DVDレコーダ(稼働)	79	43	0.54
◎	液晶TV(38インチ)	98	187	1.85
*	石油ファンヒータ(強風時)	72	148	2.06
**	石油ファンヒータ(微弱風時)	59	16	0.27
*	全自動洗濯機(最大360W)	58~74	244	3.29
**	冷蔵庫PAM(モータ153W)	71	73	0.95
◎	電子レンジ(出力800W)	98	1371	14.09
◎	電子レンジ(出力600W)	97	985	10.00
◎	電磁調理機(IHI)	99	1310	13.44
-	掃除機(最大1kW)	71	895	12.60
○	エアコン(2.2kW)インバータ式	84	405	4.82
*	FAX電話器(待機)	59	1	0.02
*	FAX電話器(通話)	51	7	0.14
*	インクジェットプリンタA4(ON待機)	57	5	0.09
*	インクジェットプリンタA4(待機)	56	1	0.03
*	ノートパソコン	55	27	0.48

力率測定の結果、蛍光灯等の照明器具は低力率であり、特に事務所等では長時間点灯させている事、更に低力率のノートパソコンも多く使用されており、力率改善の必要性が求められる。

2.2 小型電気機器への高調波規制 国際規格等(IEC/JIS C61000-3-2)により、電気・電子製品の高調波限度値は厳しく規制されており、その一例として、照明機器(クラスC)で消費電力が25W以上についての限度値を表2⁽¹⁾に示す。なお、表2において、最大許容高調波電流とは「照明機器の基本波入力電流の百分率として表される最大許容高調波電流」の事である。しかし、家庭用照明器具では消費電力が25W以下、及び小型電子機器では75W以下の機器においては、その限度値を規定しないとしている。したがって、今日普及が拡大している25W以下のLED照明機器類には、現時点で限度値の適応が無いと言える。なお、我が国の高調波規制ガイドラインにおいては、更に家庭用照明器具に限って25W以下の場合を、35W以下に置き換えて適応するとしている。

表2. 照明器具(クラスC)の相対的限度値

高調波次数 n	最大許容高調波電流 (%)
2	2
3	$30 \times \lambda$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$	3
注: λ は回路力率。	

注: 本限度値は、JIS C61000-3-2表2の一部を引用した

2.3 高調波電流(歪電流)による悪影響

(1) 過電流による効率の低下 低力率機器への線路電流は、高調波成分の重畳により実質的に大きな電流値(過電流)となる。そして、この過電流を供給するため、配電系統を構成する機器全てを増強する必要があり、過剰設備の設置や各機器内での損失の増大等、設備効率の低下となる。例えば配電系統においては、線路の抵抗R、通電電流Iとすると、その損失Pは、通電電流の2乗に比例($P=I^2R$)して増加し、損失分は熱として消費される。これらの損失は、電力系統として非常に大きいため、最近においては損失低減法などが研究⁽¹⁾されている。

(2) 高調波電流による発熱問題 同配電系統に接続されている力率改善用コンデンサには、インピーダンス的に高い周波数成分が流れやすくなるため、誘電体内の損失が増加し、発熱や振動などによる不具合の発生が問題となる。実例として、平成6年に博物館で受電設備内のコンデンサが焼損や爆発する事故⁽²⁾も発生している。

(3) 周辺電子機器の誤動作 位相角制御を行う機器においては、歪波形により制御ポイントに誤差が生じ、誤動作や制御不能に至る場合もある。また、半導体を用いた保護継電器等においては、高周波感度特性が良好なため、逆に誤動作に繋がる事がある。そのため、これらのノイズ対策を施した商品もある。

(4) 高調波障害の実態 表3は、最近の高調波障害の発生件数⁽³⁾を「調相設備」、「家電汎用品」、「その他」毎にまとめたものであり、家電汎用品に関しては増加傾向にある事を示している。

そして、表1に示されている様に電球型LEDランプは低力率であり、ここ数年その出荷個数⁽⁴⁾が飛躍的に増加している事を表4に示す。図1に示す様な高調波歪の発生源でもあるLED照明器具の場合、個々の高調波発生量は微小でも、その総量が膨大となる事が予想される。

表3. 2011年度電力系統における高調波の実態

	2008年	2009年	2010年
調相設備(リアクトル)	35	15	44
調相設備(コンデンサ)	16	12	12
家電汎用品	5	13	26
その他	24	5	4
合計	80	45	86

したがって、LED照明器具の普及拡大、ノートパソコンの多用により、一般住宅や小規模の事務所等における高調波電流は増加傾向にあり、これに基づいて配電系統全体としての高調波障害は、今後より一層顕著になると考える。

表4. LED電球の出荷個数

年度	出荷個数(個)
2010	300万
2011	1200万
2012	3000万

3. 並列型アクティブフィルタ(AF)による検証実験

3.1 AFによる力率改善効果の検証 図2に示す電子回路で構成したアクティブフィルタ(AF)を高調波発生源となる実験用負荷に並列に接続し、発生する高調波電流に対し逆相の高調波電流を注入する事で、系統電流の高調波歪を低減させる効果を検証するため、実験用AF基板を作成した。本基板は、系統及び負荷電流を検出し、逆相の高調波電流を発生させるための制御器、フルブリッジインバータ、並びに連系リアクトルより構成した。

AFの制御器にFPGAを用い、サンプリング周期10 μ sとし、系統電圧 V_s の位相同期はゼロクロス点を利用した。なお、本AFの詳細は参考文献^{(4)~(6)}にて解説している。

実験回路において、系統電流 i_s 、負荷電流 i_L 、補償電流(AFの出力) i_{AF} として、補償前と補償後の各波形を図3に示す。

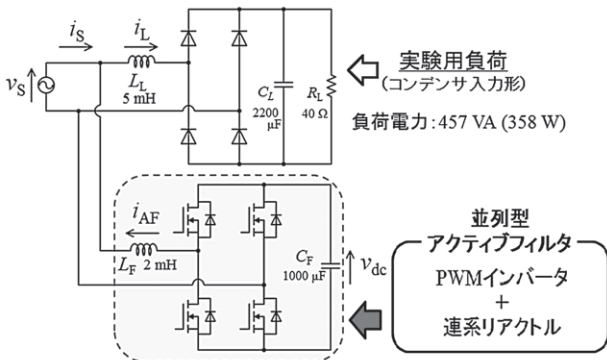


図2. 力率改善効果の検証実験回路

本実験において、補償後の系統電流波形が系統電圧波形とほぼ同一となった事、更に総合歪率 (THD) においても補償前の53.6%から補償後の2.6%とほとんど無歪状態となった事などから、並列型アクティブフィルタによる補償(力率改善)手法が有効である事が検証できた。また、この実験において、補償前の電力容量は457 VA (消費電力358 W)であり、補償後の所要容量 (AFの作動容量) は270 VAを要した事で、今後の小型化への検討課題とした。

3.2 AFの所要容量低減への検証 製品化を含むより小型化を目的に、AFの出力電流を制限する手法として、次の3つの制限方法を提案した。

①「ピーク値制限」は、最も一般的な手法で、回路素子が低容量化でき小型化や安価な装置への有効性が高い。しかし、出力電流を定値で抑制するため、補償後の電流が非線形となり、高調波電流の増大が想定される手法である。

②「実効値制限」は、前項の様なピークカットは行わず、補償電流全体を可変ゲインで制御し、AFの出力電流の振幅を制御する手法で、各高調波の実効値を指令値通りに自動調整する事が可能となる。したがって、各高調波は減少させる事ができても、全ての高調波の残存が想定される。

③「周波数制限」は、基本波に加え第3高調波も検出し、

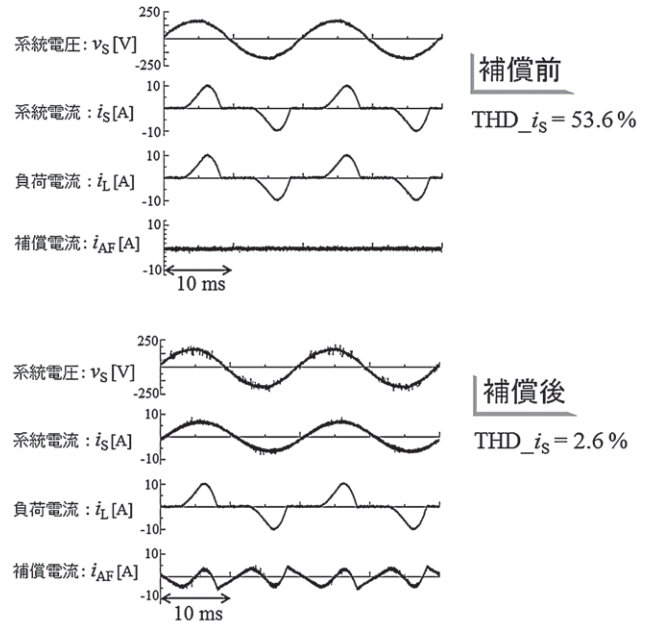


図3. 補償前及び補償後の検証回路の各部の電流波形

負荷電流からこの2つの成分を減算し補償対象とした。したがって、全ての高調波の補償ではなく、第5次以降の高調波電流を補償する手法のため、第3次高調波は補償されない。

以上の3つの制限方法について、その補償効果等を検討するため、図2の実験用負荷を使用し、各手法において残存する高調波電流値 (3次、5次、7次)、及びその時の所要容量を実測し比較を行った。その結果を表5に示す。

表5. 所要容量低減手法の検証

制限手法	高調波電流 [A]			所要容量 [VA]
	第3次	第5次	第7次	
最大補償 (通常動作)	0.1	0	0	270
ピーク値制限 (1.4A)	1.8	0.6	0.2	73 (27%)*
実効値制限 (1A)	1.5	0.5	0.2	101 (37%)*
周波数制限 (3次無補償)	2.4	0.1	0	91 (34%)*

注) *印は、最大補償時に対する各所要容量の比率である。

3.3 三相交流系統への周波数制限法の検証

(1) 第3次高調波の挙動 近年の三相3線配電系統では柱上変圧器側と Δ - Δ 結線が用いられているため、第3次高調波の挙動は他の高調波成分と異なる。例えば、平衡負荷の場合、図4の Δ 結線において第3次高調波電流は、矢印の様に還流し相殺されるため、第5次や第7次高調波成分に比べ小さくなる。

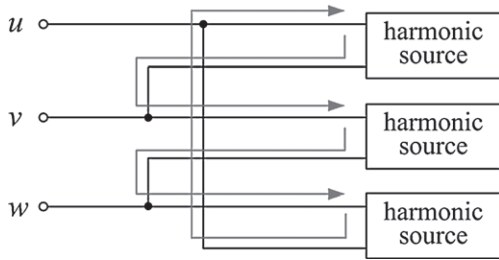


図4. 第3次高調波の流れ

即ち、3相交流系にAF装置を適応する場合、第3次高調波よりも第5次以降の高調波成分を補償する事が容量削減などに有効な手法と考えられる。

(2) 三相交流系への適応実験 AF装置を3台使用し、 Δ 結線した負荷(ダイオードブリッジ回路)3組を図5に示す回路において、周波数制限機能を有するAFの各動作状態における系統電流の波形とその高調波成分を測定した(図6と表6)。

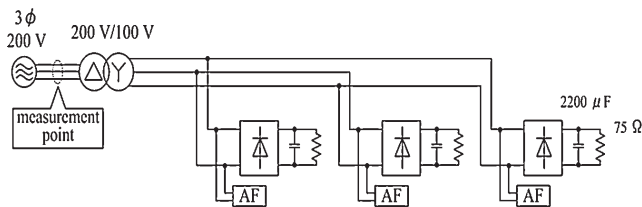


図5. 三相交流への適応回路

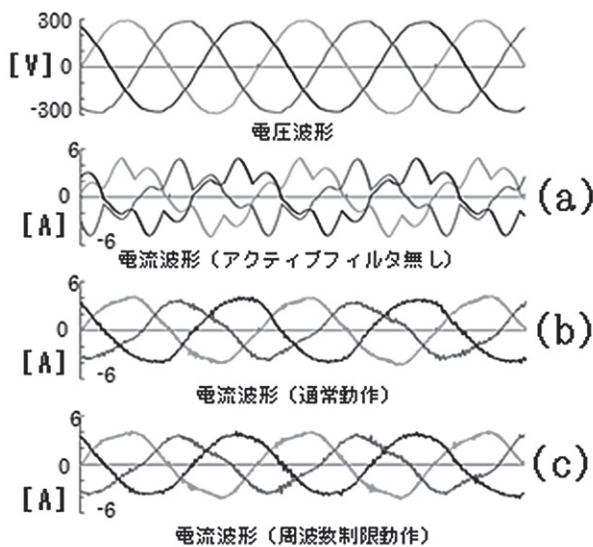


図6. AFの各動作における系統電流波形(三相)

図6において、(a)ではAF停止状態のため各相とも歪電流が流れているが、(b)の通常動作と(c)の周波数制限動作では双方とも同様な波形状態となり、正弦波に類似している。更に、表6から第3次高調波電流は、いずれの状態においても小さな値であり、(b)と(c)の歪率(THD)も小さく同様の電流値であった。以上の結果から、 Δ 結線された平衡三相負荷において第3次高調波電流は想定通り Δ 結線内を還

流し、上流への流出量は減少した事がわかった。そのため、(b)と(c)の動作では、高調波電流の補償効果は同程度で、かつ所要容量は(b)の144 VAが(c)の49 VAへと約1/3に低減した。

表6. 三相交流系統での高調波成分

AFの動作状態	高調波電流 [A]			高調波歪 THD [%]	所要容量 [VA]
	第3次	第5次	第7次		
AF停止	0.1	0.7	0.3	29.4	-
通常動作	0.1	0.1	0	6.3	144
周波数制限動作	0.1	0.1	0	4.7	49

4. 力率改善装置の試作

本研究では、力率改善装置を2機種設計・試作した(図7)。最初に力率改善能力の実証のための3次モデルを試作し、その後に製品化を目的に小型化や安全性を検討してノイズ特性等の機能を付加した4次モデルを試作した。



図7. 機能優先の3次モデルと製品化を目指した4次モデル

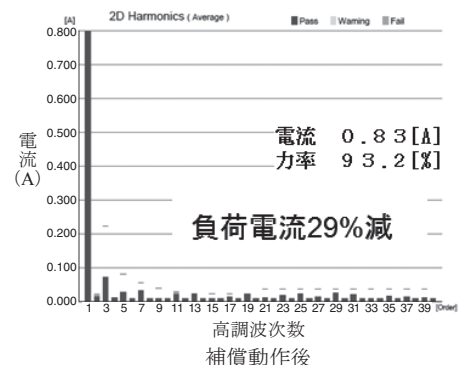
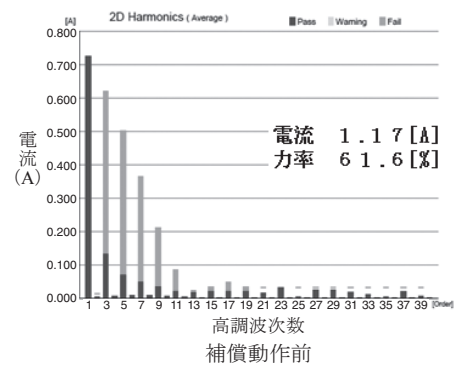
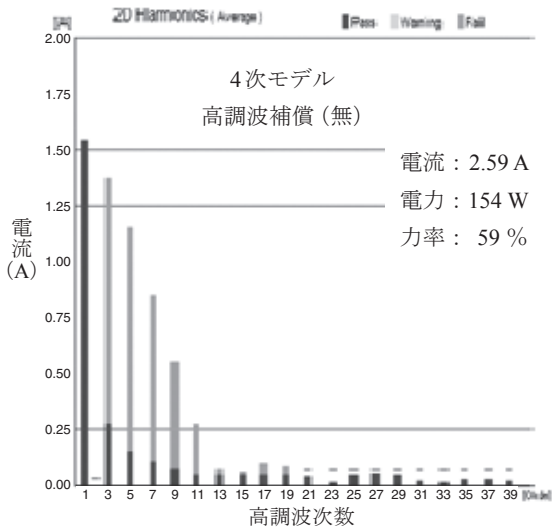
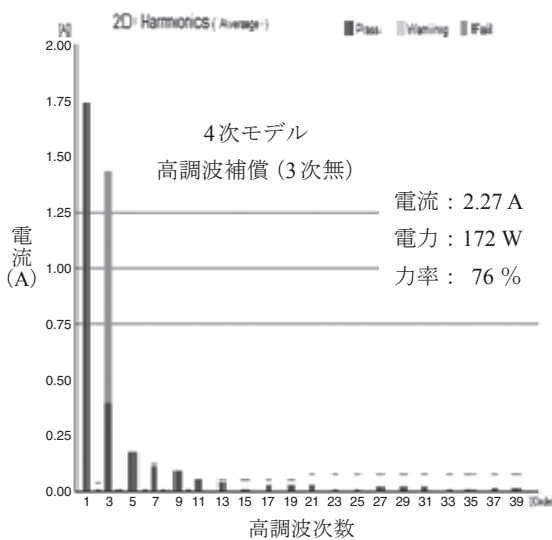


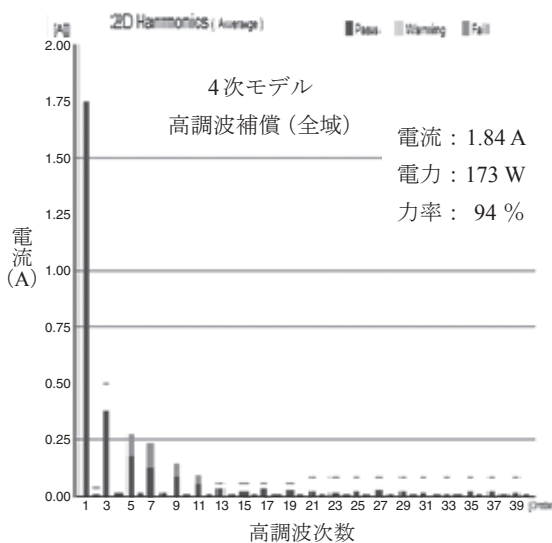
図8. 模擬負荷による補償動作(高調波測定結果)



(a) 補償動作前



(b) 3次無補償動作



(c) 全域補償動作

図9. 4次モデルの補償動作性能(中央は第3次高調波無補償)

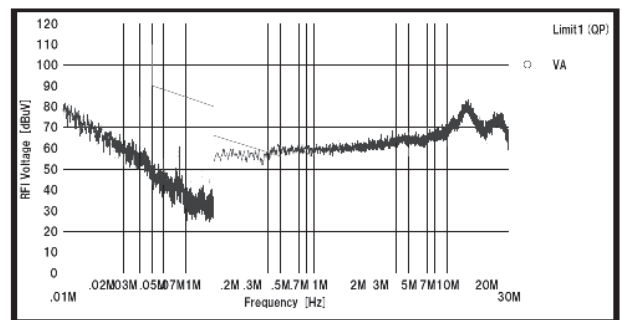
4. 1 3次モデルによる力率改善効果の実証 最初に試作した3次モデルによる高調波の抑制と力率改善効果を確認するため，一般的なインバータ機器と同様な歪波形を有する模擬負荷装置を用いて実験を行い，高調波次数及び力率測定の結果を図8に示した。

図8より，補償動作後の高調波成分が激減しており，力率も61%が93%へと30%以上も向上し，その補償能力として十分な性能である事が確認できた。更に，負荷電流も1.17Aが0.83Aへと29%の減少となり，配電系統での省エネ化・省力化が期待できる結果となった。

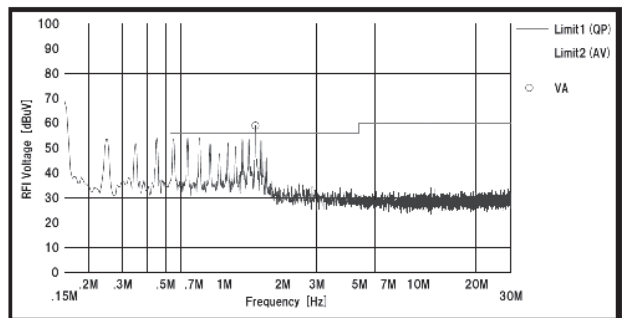
4. 2 4次モデルの性能評価 4次モデルは，小型化を実現した他に，3次モデルの機能に①第3次高調波無補償機能，②放射ノイズ特性の改善，③過電流防止機能などを付加し，製品化を目指したモデルとした。補償動作の性能評価結果を図9示した。

図9より，第3次高調波無補償機能が有効に動作しており，三相交流用としての利点を有している事がわかる。

図10及び図11は，2種類の放射ノイズを測定した結果を示し，3次モデルからの改善効果の比較を表している。



(a) 3次モデルの雑音端子電圧特性



(b) 4次モデルの雑音端子電圧特性

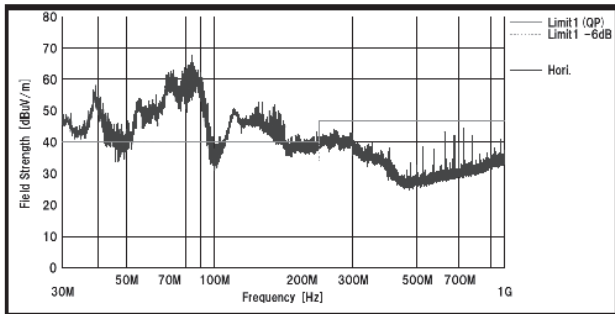
図10. 雑音端子電圧特性(3次モデルと対比)

図10は，電源ラインより放出される雑音端子電圧特性の測定結果を示し，3次モデルでは周波数0.3MHz以上の範囲において規格値をオーバーしていたが，4次モデルではノイズフィルタ等により規格値以内に減少できた。

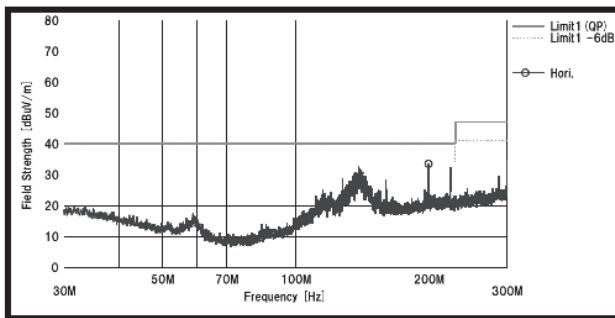
また，図11は，空間に放出される不要電波の放射電界強度特性の測定結果を示し，3次モデルでは周波数200MHz以下の範囲で，規制値を40dB程度オーバーしていたが，部

分密閉やシールド等の対策により、ノイズ低減効果が確認できた。

これら4次モデルの性能評価結果より、力率改善の効果の有効性やノイズ特性として規制値をクリアできた事で、製品化が可能となる性能を有していると判断できる。



(a) 3次モデルの放射電界強度特性



(b) 4次モデルの放射電界強度特性

図11. 放射電界強度特性(3次モデルと対比)

5. まとめ

今日、照明器具のLED化やOA機器の急激な普及により、住宅や事務所等の少規模電力需要家において、高調波電流の発生は増加傾向にあり、今まで適切な補償設備が無かった電力容量が数k~数十kVAの配電系での高調波抑制及び力率改善が、本研究により可能となった。そして、情報機器や家電製品の誤動作削減、並びに配電系統内の省エネ化と効率化等で屋内電力のクリーン化に貢献できると考える。今後、三相交流での利点を生かし、配電設備としての200V仕様を含め、製品化への企業支援を行う予定である。

謝辞

本研究は、東京都の「都市課題解決のための技術戦略プログラム」の支援により実施した。

(平成25年7月22日受付, 平成25年8月9日再受付)

文 献

- (1) 佐々木千陽, 他3名:「高調波に起因する受電用変圧器の損失解析と力率改善コンデンサの低圧側設置による損失低減効果の検証」, 電気学会半導体電力変換研究会資料, SPC-10-018 (2010)
- (2) 能見和司:「高調波講座」, 三松株式会社, p.58 (2006)
- (3) 電気事業連合会:「20011年度電力系統における高調波の実態」, 電気用品調査委員会, No.9-2, pp.6-7 (2011)
- (4) 吉田秀人, 和田圭二, 清水敏久, “住宅用アクティブフィルタの補償特性と所要容量に関する実験検討”, 平成24年度電気学会全国大会, 第4分冊, pp.274-275 (2012)
- (5) 吉田秀人, 和田圭二, 清水敏久, “補償制限機能を付加した住宅用アクティブフィルタの所要容量と補償特性に関する研究”, 電気学会半導体電力変換研究会, SPC-12-88, pp.51-56 (2012)
- (6) 吉田秀人, 和田圭二, “三相系統における3次高調波の挙動を考慮した単相アクティブフィルタ”, 平成24年度電気学会全国大会, 第4分冊, pp.265-266 (2013)
- (7) 特許出願:「高調波抑制装置」, (特願2012-2529332)