

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月21日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560303

研究課題名（和文） 一般配電系における有害高調波及び電力負荷状態観測に関する実験的研究

研究課題名（英文） Experimental Study on Observation of Harmful Harmonics and Power Load Status in Power Delivery System

研究代表者

古川 達也 (FURUKAWA TATSUYA)

佐賀大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：90173525

研究成果の概要（和文）：省エネルギーや環境保護の観点から一般配電系統の電力負荷状態ならびにインバータ電源等が発生する高調波成分の実時間観測が重要な技術課題となっている。本研究では、まず、筆者が考案した樹脂一体型電圧電流センサの電圧計測部を用いたキャパシタ分圧法の妥当性を有限要素法による電界解析によって証明した。ひき続いて、本センサを用いて、精度の高い力率計測ならびに高調波源の同定が行える計測システムの構築を試みた。

研究成果の概要（英文）：From point of energy saving and greening, the real-time observation of the power status and the identification of harmonic resources from power conditioning apparatuses becomes an important engineering issue. In this study, first, the author has proved the validity of the capacitor voltage divider measurement method using his devised voltage-current sensor of resin molded type through the electric filed analysis based on finite element method. And he has tried to develop the measurement system, where the high accuracy power factor estimation and the identification of harmonic resources are feasible.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気有効利用、電力工学、配電工学、力率計測、高調波計測

## 1. 研究開始当初の背景

1973年の第一次オイルショックを受けて、1977年から声高に叫ばれた「省エネルギー」と言う言葉は、ここ30年以上の間死語になっていたが、深刻化する地球温暖化問題、昨今の原油価格高騰に伴う社会問題の突出等で再び注目されている。

今日の社会生活において、不可欠な産業機器、空調装置に関して、「省エネルギー実現」の救世主と言われた半導体電力変換装置は、その急速な普及と相まって、高出力電磁波を使う通信機器が視聴覚機器や他の通信機器に悪影響を及ぼすと同様、配電系に高調波を拡散させ、力率改善用コンデンサや直列リア

クトルの焼損事故等を引き起こす原因となっている。これらの焼損事故は、元来 50 もしくは 60Hz の商用周波数での動作を念頭に設計されている絶縁材料や磁性材料に高調波が電歪、磁歪、ヒステリシス損等の高調波損失を生じさせる結果、加熱事故等に至らせるものである。

## 2. 研究の目的

一般配電系における電圧・電流波形の同時実時間計測は、半導体電力変換装置に起因する高調波の流入や力率のリアルタイム観測を実現できるため、現在だけでなく将来の「省エネルギー」を視野に入れた、配電設備計画や電気エネルギーの有効利用を図れるが、現状の電力供給系では、送電端での値しか計測できないのが現状であり、配電途中でしかも非接触で正確に電圧波形と電流波形を同時に検出し、位相差検出、高調波成分を随時電力監視系へ配信する計測技術の確立が急務とされている。

そこで、本研究課題では、まず、筆者が考案した樹脂一体型電圧電流センサによる電圧計測に用いたキャパシタ分圧法の妥当性を有限要素法による電界解析によって証明し、次に、本センサを用いて、基本波力率計測用波形と高調波を実時間で計測し、インターネットを介したデータ配信が可能となる遠隔計測系を構築することを目的とする。

## 3. 研究の方法

以下に、樹脂一体型電圧電流センサの電圧センサ出力をキャパシタ分圧法で計測する際の理論的裏付けを行う、「計測分圧回路を考慮した配電系電力状態計測センサの数値電界解析法」と本センサ出力を遠隔へ配送する「配電系用電圧・電流波形遠隔計測システム」について述べる。

### (1) キャパシタ分圧法妥当性の論証

本研究で用いる電力状態観測センサは、民間等との共同研究の成果として、試作機が製作され、科学研究費の支援によって発展を遂げており、実三相配電系でのフィールド実験からも有効性が実証されている。

一方、電流センサ部に関しては、研究室レベルでの実験・校正ができるが、フィールド試験での電圧波形計測に従前から経験的に採用されていたキャパシタ分圧法に関しては、安全面を考えるとその妥当性の考証がこれまで、先送りされてきている。そこで、まず、本方法を理論的に裏付ける。

#### ① キャパシタ分圧法

本研究で採用した樹脂一体型電圧電流センサを装着した実配電系でのフィールド実験では、配電線の電圧波形は、図 1 に示すキャパシタ分圧法を用いて計測している。ここで、 $C_1$  は、配電線-電極板間の静電容量を、

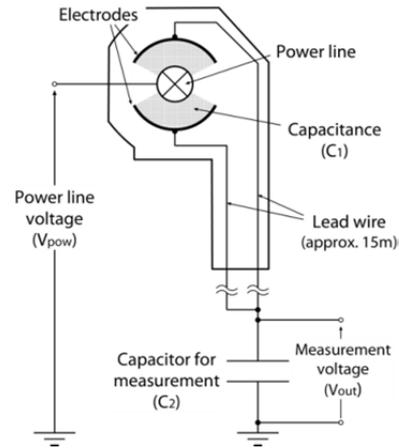


図 1 キャパシタ分圧法の原理

$C_2$  は、計測用のキャパシタをそれぞれ表している。

このとき、計測電位である  $V_{out}$  は、配電線の対地間電位を  $V_{pow}$  とすると以下の式で表される。

$$V_{out} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_{pow} \quad 1)$$

なお、 $C_1$  は、配電線-上側電極間と配電線-下側電極間それぞれの静電容量を図 1 のように並列接続として扱っている。

#### ② 電界解析に用いる計測回路

図 1 では、簡略化のため、引出線の線路抵抗およびオシロスコプの内部抵抗を省略していた。ここで、改めて、これらの要素を含んだ一相分の計測回路を図 2 に示す。図中の  $C_{1-upper}$  が配電線と上部電極板間の静電容量、 $C_{1-lower}$  が配電線と下部電極板間の静電容量、 $r_{upper}$  が上側引出線抵抗、 $r_{lower}$  が下側引出線抵抗、 $C_2$  が計測用キャパシタ、 $R$  がオシロスコプの内部抵抗をそれぞれ表している。

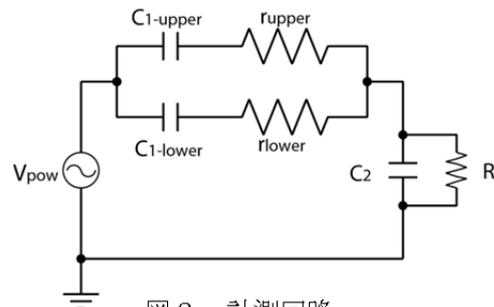


図 2 計測回路

さらに、実際には、他相配電線の印加電圧によっても電極板部分に電位が誘起されるため、この影響を考えると図 2 を三相分に拡張した等価回路が図 3 となる。この回路は、 $u$  相の上下電極板と三相の配電線との容量的な結合を表した図である。

同様の回路を  $v, w$  相についても考える必要

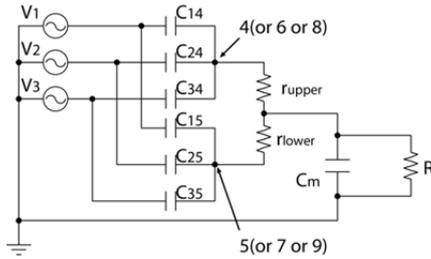


図3 他相からの影響を考えた等価回路がある。ここで、図2では、 $C_1$ として表していた配電線-電極板間の静電容量を、図4のように定義した導体番号を用いて $C_{14}$ などと表現している。例えば、 $C_{14}$ は、導体番号1であるu相配電線と導体番号4であるu相上側電極間の静電容量を意味している。計測用キャパシタ $C_2$ についても、添字が数字では分かりにくいいため、 $C_m$ と再定義した。また、配電線印加電圧は、それぞれ導体番号を用いて、 $\dot{V}_1$ 、 $\dot{V}_2$ 、 $\dot{V}_3$ とした。

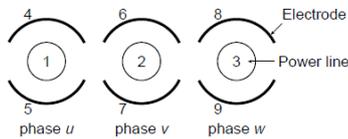


図4 電極板番号

### ③ 解析の手順

解析の手順の概要は、以下のとおりである。  
(a) 従来の電界解析と同様の解析モデルを用いる。

(b) 有限要素法を適用した電界解析を導体の個数だけ繰り返して、各導体間の静電容量を求める。これは、配電線-センサ電極板間、センサ電極板同士の間の静電容量がキャパシタ分圧法を構成する計測回路の一部であるため、提案手法を実施する際に必要な処理である。

(c) (b) で求めた静電容量を用いて計測回路を構成し、回路を解いて、センサ電極板電位 $V_{elect}$ や必要に応じて計測電位 $V_{out}$ など各部の電位を算出する。

(d) (c) で求めた三相上下それぞれの電極板電位 $V_{elect}$ を各相電極板の既知ポテンシャルとして適用、また、従来の電界解析と同様に配電線に三相平衡電圧を印加し、有限要素法による電界解析を行い、センサ内部の電位の分布を得る。

### ④ 静電容量の導出

キャパシタ分圧法を利用した計測回路として最終的には、図3のような回路を解くことになるが、配電線-電極板間の静電容量は、センサを取り付ける配電線の導体径や被覆径などによって変化するため一定ではない。そこで、各導体間の静電容量を有限要素法によって求める。

導体が $n$ 個存在するときの電荷と電位の関係は、導体の形状および位置関係に依存し、

次式のように表される。

$$Q_1 = C_{10}\dot{V}_1 + C_{12}(\dot{V}_1 - \dot{V}_2) + C_{13}(\dot{V}_1 - \dot{V}_3) + \dots + C_{1n}(\dot{V}_1 - \dot{V}_n)$$

$$Q_2 = C_{20}\dot{V}_2 + C_{21}(\dot{V}_2 - \dot{V}_1) + C_{23}(\dot{V}_2 - \dot{V}_3) + \dots + C_{2n}(\dot{V}_2 - \dot{V}_n)$$

$$Q_n = C_{n0}\dot{V}_n + C_{n1}(\dot{V}_n - \dot{V}_1) + C_{n2}(\dot{V}_n - \dot{V}_2) + \dots + C_{n,n-1}(\dot{V}_n - \dot{V}_{n-1}) \quad 2)$$

ここで、 $Q_i$ は導体 $i$ の電荷、 $\dot{V}_i$ は導体 $i$ の対地電位であり、 $C_{i0}$ は自己静電容量、 $C_{ij}$  ( $i \neq j$ )は、導体 $i-j$ 間の相互静電容量と呼ばれる。換言すると、 $C_{i0}$ は地面と導体 $i$ 間の静電容量、 $C_{ij}$ は導体 $i$ と導体 $j$ 間の静電容量を意味する。2)式の右辺を導体電位 $\dot{V}_i$ ごとにまとめると、次式のように書くことができる。

$$Q_1 = D_{11}\dot{V}_1 + D_{12}\dot{V}_2 + \dots + D_{1n}\dot{V}_n$$

$$Q_2 = D_{21}\dot{V}_1 + D_{22}\dot{V}_2 + \dots + D_{2n}\dot{V}_n$$

⋮

$$Q_n = D_{n1}\dot{V}_1 + D_{n2}\dot{V}_2 + \dots + D_{nn}\dot{V}_n \quad 3)$$

ここで、 $D_{ii}$ は、容量係数である。また、 $D_{ij}$ は静電誘導係数などと呼ばれ ( $i = 1 \dots n$ ;  $j = 1 \dots n, i \neq j$ )、導体 $i$ 以外の導体を接地(電位 $v = 0$  V)したとき、導体 $i$ の電位を1Vにするために導体 $i$ あるいは $j$ に与えるべき電荷量である。従って、1Vを与える導体を順に替えながら、その個数だけ電界解析を繰り返すことになる。3)式の右辺係数 $D_{ij}$ が求められると、次式に従って、2)式の自己容量や相互容量を求めることができる。すなわち、

$$C_{i0} = D_{i1} + D_{i2} + D_{i3} \dots + D_{in} \quad 4)$$

$$C_{ij} = -D_{ij} \quad 5)$$

である。3)式で求めた右辺 $D_{ij}$ は、⑥の有限要素法の式と組み合わせる際に用いられ、4)、5)式で求めた $C_{i0}$ および $C_{ij}$ は、計測回路を構成する静電容量として用いられる。

### ⑤ 計測回路の計算

考慮すべき計測回路は、図3に示した計測回路図であるが、複雑な回路となるため、重ねの理から、電源を一つずつに分けて考える。ここで、電源を $u$ 相だけとし、回路素子についても単純な並列接続を一つにまとめて表すと図5のようなになる。

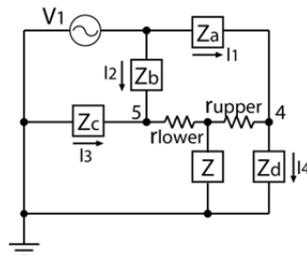


図5 簡略化した計測回路

たとえば、図中の $Z_a$ は、 $u$ 相配電線と $u$ 相

上側電極間の静電容量( $C_{14}$ )、 $\dot{Z}_b$ は、 $u$ 相配電線と $u$ 相下側電極間の静電容量( $C_{15}$ )、 $\dot{Z}_c$ は $u$ 相下側電極と $v$ 、 $w$ 相配電線それぞれとの静電容量の並列接続( $C_{25}$ と $C_{35}$ )、 $\dot{Z}_d$ は $u$ 相上側電極と $v$ 、 $w$ 相配電線それぞれとの静電容量の並列接続( $C_{24}$ と $C_{34}$ )、 $\dot{Z}$ は計測用のキャパシタとオシロスコープの内部抵抗の並列接続( $C_m$ と $R$ )をそれぞれ表している。同様の回路を、残りの電源についても考え、結果を足し合わせる。このとき、図5に示すように、 $\dot{Z}_a \sim \dot{Z}_d$ に対して、それぞれ電流 $i_1 \sim i_4$ を仮定し、回路方程式を立て、マトリクス表示をすると、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_a & 0 & 0 & \dot{Z}_d \\ \dot{Z}_a + r & -Z_b - r & -r & -r \\ \dot{Z} & \dot{Z} + r & \dot{Z}_c + \dot{Z} + r & -\dot{Z} \\ -\dot{Z} - r & -\dot{Z} & -\dot{Z} & \dot{Z}_d + \dot{Z} + r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

左辺のインピーダンスマトリクスの逆行列を求め、両辺の左からかけることで各素子の電流 $i_1 \sim i_4$ が求められる。各素子の電流が求められると、それらを用いて、計測電位 $\dot{V}_{out}$ および電極板電位 $\dot{V}_{elect}$ は、それぞれ次式で表される。

$$\dot{V}_{out} = \dot{Z}(i_1 + i_2 + i_3 - i_4) \quad (7)$$

$$\dot{V}_{elect} = \dot{Z}_d i_4 \text{ (or } -\dot{Z}_3 i_3) \quad (8)$$

ここで、 $\dot{V}_{elect}$ が二種類存在しているのは、上側電極板(導体4)電位と下側電極板(導体5)電位をそれぞれ意味する。

#### ⑥ 計測回路と有限要素法の連成問題

有限要素法の式と併せて解く3)式について考えると、左辺の $Q_i$ が未知数であり直接的には求められない。そこで、導体の有する電荷 $Q_i$ を未知数として方程式に取り入れる。そこで、導体を囲う閉領域にガウスの電束定理を適用し、関係式を作る。導体個数分の未知数を追加したため、方程式も導体個数分追加し、マトリクス表示をすると次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} [P] & [0] \\ [D] & [E] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\varphi\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{K\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここで、 $[P]$ は有限要素法の係数行列、 $\{\varphi\}$ は各部の電位、 $\{K\}$ は境界条件を処理することによって現れる定数である。また、 $[D]$ は3)式の係数 $D_{ij}$ に同式の $\{Q\}$ を移項する際に生じる負号を加えてマトリクス表示したもの、 $[E]$ は単位行列、 $\{Q\}$ は未知数として追加した各

導体の電荷をそれぞれ表す。9)式を解くことで、解析領域全体の電位分布を得ることができる。

9)式の電位 $\{\varphi\}$ のうち、センサ電極板該当部については、従来、未知等ポテンシャル境界条件を適用して電界解析を行ってきた。しかしながら、本手法では、センサ電極板を計測回路を接続した際の電位とするため、電極間静電容量等を利用し、予め算出することが可能となっており、電極板電位を用いて既知ポテンシャルとして扱い、より現実的なモデリングを可能とした。

#### (2) 遠隔計測システム

以前の計測システムでは、SH-4 CPUを用いた高性能産業用ボード・コンピュータを採用しており、多機能ではあるものの、比較的高価なシステムであったため、本研究課題では、より低廉なSH-3 CPUを用いた汎用ボード・コンピュータを使用して、機能を絞り込んで再設計を行った。さらに、従来、遠隔計測システムの電源には、アルカリマンガン電池または、鉛蓄電池ベースのポータブル電源が利用されてきた。しかし、どちらの場合も配電線に設置した状態での長期計測に耐え得るものではなかったため、本提案計測システムの計測対象である配電線から電力を供給することも試みた。

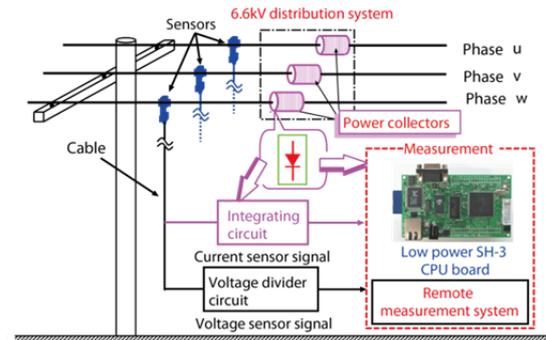


図6 計測システム概要

#### ① 遠隔計測システム概要

図6は、本研究の目指すシステム構成である。三相高電圧側は、配電線に間接的に設置された三つの樹脂一体型電圧電流波形計測センサと計測システムに電源を供給するための集電コイルから構成される。低電圧側は、集電コイルから供給される電力を整流、安定化する電源部と計測回路、さらに、計測用のボード・コンピュータからなる。ボード・コンピュータは、ネットワーク・インタフェースを具備しているため、TCP/IPに準拠したデータ配信が可能である。

#### ② 集電コイルの設計・試作

配電現場において、計測システムを駆動するための電源として、配電線に設置した集電コイル、直流安定化電源とレギュレータ回路を用いることを念頭に設計を行っている。試

作した集電コイルを図7に示す。



図7 試作した集電コイル

図7の集電コイルを電力線へ装着して、システムが駆動できることを確認するために、研究室に設置した模擬配電線で実験を行った。模擬配電線の三相のうちの一相に集電コイルを設置し、配電線に電流を流した時の集電コイルからの出力電圧を確認した。このとき、鉄心にカットコアを用いたので、集電コイルはC型クランプで図8のように固定した

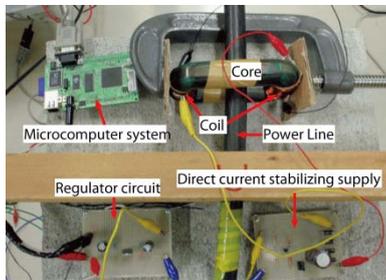


図8 配電線からの集電実験装置

#### 4. 研究成果

以下に、前節で説明した「計測回路を考慮した樹脂一体型電圧電流センサの電界解析と」と「電磁集電による計測システムの給電」について述べる。

##### (1) 電界解析結果

ここでは、図3に示した回路を用いた場合(6経路)について計算を行った例を以下に示す。

提案手法によって得られた電位分布から、等電位線を描くと図9に示すようになった。一方、図10が未知等ポテンシャルを考慮した有限要素法による電界解析結果で、単に、配電線に定格電圧を与え、計測回路を無視した電界解析結果を基に描画した等電位線図である。

このように、従前の手法では、配電線の電位が周囲に向かって徐々に降下してゆく様子が得られているが、これは電極板から計測機器側を考慮しておらず、実際の計測時の状態を完全には再現できていないものだった。

一方、図9の提案手法の結果では、実際の計測時の状態を再現することができており、配電線電位約3.8kVから電極板電位約2.7Vへ向かって高い電界が生じていることが、新たにわかった。

ここで、等電位線の線と線の間隔は、両図

で500Vであり、特に、計測回路を考慮することによって、電極の電位が計測装置処理レベルまでに引き下がった図9においては、配電線から電極板へ向かって平均0.2kV/mmの電界強度となる電位の変化となるが、使用するポリアセタール樹脂の絶縁耐圧20kV/mmを十分に満たしていることが判明した。

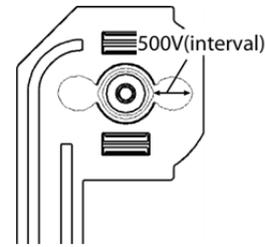


図9 本方法による電位分布

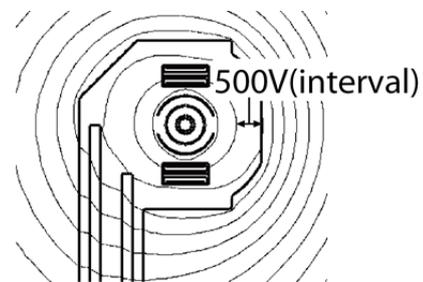


図10 従来法による電位分布

##### (2) 計測システムの実装と実験

###### ① 電磁集電によるボード・コンピュータ・システムの駆動実験

まず、模擬配電線に通電させる電流を徐々に大きくしてゆき、ボード・コンピュータ・システムが駆動したときの電源回路の出力電圧の波形を図11に示す。この時の配電線電流値は118.4Aであり、出力電圧は4Vであった。しかし、システムが安定して動作するには電圧出力が不足しており、十分安定して動作するためには、170A程度を通電させる必要があった。

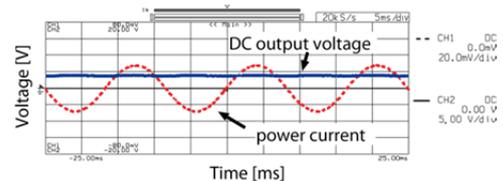


図11 電磁集電装置からの出力

###### ② 電流センサの高調波計測実験

模擬配電線の三相それぞれに設置した樹脂一体型電圧・電流波形センサを用いた三相分同時計測を行った。配電線u相に流れる電

流を 100A に設定して、模擬配電線に設置したセンサの出力を提案システムで計測した。計測した結果の例を図 1 2 に示す。

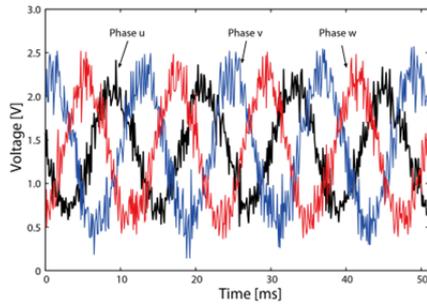


図 1 2 提案システムでの高調波計測結果

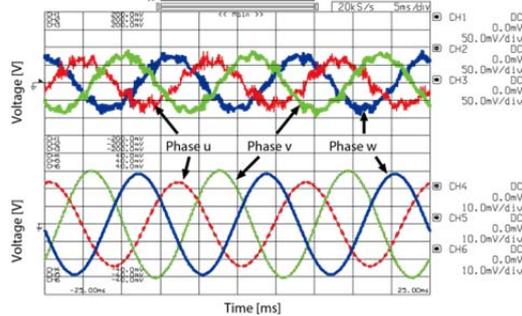


図 1 3 オシロスコープでの計測結果

本センサによって計測された電流波形はオペアンプを使った回路によって増幅しているため、位相が反転している。同様に、オシロスコープで計測した結果を図 1 3 に示す。図 1 2 の結果は、図 1 3 のオシロスコープの計測波形によく一致している。また、図 1 4 は、本計測システムから得られた *u* 相における電流波形計測結果から周波数スペクトルを求めたものである。基本周波数が 60Hz であり、それに高調波成分が重畳していることが確認でき、本システムで、配電系において、有害とされている第 5 次高調波を含む、10kHz 以下の高調波を検出することができることが確認でき、本研究の目標を達成できた。

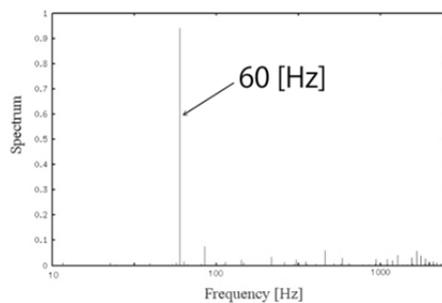


図 1 4 *u* 相電流の周波数スペクトル

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① Takuro Kubo, T. Furukawa, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto and Hiroshi Wakuya, "Numerical Electric Field Analysis of Power Status Sensor Observing Power Distribution System Taking into Account Measurement Circuit and Apparatus", 査読有, SICE Annual Conference 2011, pp. 2741-2746 (2011).
- ② 古川達也, 赤木圭太, 福本尚生, 伊藤秀昭, 和久屋 寛, 平田憲司, 相知政司, 「配電系用電圧・電流波形遠隔計測システムの検討」, 査読有, 電気学会論文誌 A, Vol. 131, No. 4, pp. 288 - 294(2011).
- ③ 久保卓郎, 古川達也, 伊藤秀昭, 福本尚生, 和久屋 寛, 相知政司, 「計測分圧回路を考慮した配電系電力状態計測センサの数値電界解析」, 査読有, 電気学会論文誌 A, Vol. 131, No. 3, pp. 171-177 (2011).
- ④ Takuro Kubo, Tatsuya Furukawa, Hisao Fukumoto, Masashi Ohchi, "Numerical Estimation of Characteristics of Voltage-current Sensor of Resin Molded Type for 22kV Power Distribution Systems", 査読有, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 4B17-3, DVD-ROM, pp. 5050-5054, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, JAPAN, August 21, (2009)

〔学会発表〕(計 2 件)

- ① 久保卓郎, 古川達也, 福本尚生, 築地浩, 相知政司, 中島美紀, 「配電系用電圧・電流波形計測システムへの電磁給電の試み」第 28 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 103D1, pp. 191-194 九州大学, 2009 年 11 月 28 日
- ② 平田憲司, 古川達也, 福本尚生, 相知政司, 「配電電力状態遠隔観測用組込みマイコンシステム」電気学会計測研究会資料, IM-09-48, pp. 7-10 佐賀大学, 2009 年 11 月 19 日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

古川 達也 (FURUKAWA TATSUYA)  
佐賀大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号：9 0 1 7 3 5 2 5

### (2) 連携研究者

福本 尚生 (FUKUMOTO HISAO)  
佐賀大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号：6 0 3 4 6 8 7 2