

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560292
 研究課題名（和文） 22kV一般配電系観測用樹脂一体型電圧・電流センサ
 の実用化に関する実験的研究
 研究課題名（英文） Experimental Study on Feasibility of Voltage-Current Sensor
 of Resin Molded Type for 22kV General Power Distribution System
 研究代表者
 古川 達也 (FURUKAWA TATSUYA)
 佐賀大学・理工学部・教授
 研究者番号：90173525

研究成果の概要：本研究で提案する電圧・電流センサは、6.6kVならびに22kV一般配電系に通電状態で実装し、電力負荷状態の実時間観測ならびに、近年、半導体電力変換装置の発生する高調波成分が電力設備機器にダメージを与え、焼損事故等を起こす元凶となる問題を解決することを目的に研究開発されている。本研究課題では、6.6kV実配電系での実験から電力状態や高調波が計測できることを実証し、シミュレーションから22kV配電系にも適用できることを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
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

一般配電系における力率値、電圧・電流値およびそれらの実波形は、将来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るため、必須の計測対象であるが、送受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する計測技術の確立が急務とされている。

一方、昨今のパワーエレクトロニクス技術の産業機器ならびに家電、OA機器へ至るまでの急速な普及と相まって、インバータ等の半

導体電力変換装置から発生する高調波電流が配電系統の電流歪みを増大する傾向にあると言われている。

電力会社等での現場サイドでは、高調波成分の配電系への流入方向の同定等、高調波障害を事前に察知する計測技術革新が強く求められ、さらに、例年台風等の暴風に襲われる九州沖縄地区では、風水害時の地絡事故地点を速やかに特定する技術革新も強く望まれている。しかし、国内外を調査してもこのような複合技術を実現した一体型センサの報告例は皆無である。

2. 研究の目的

これまで、研究代表者は、本科学研究費ならびに民間等との共同研究の支援を受けて、図1のような樹脂一体型電圧電流センサを開発・試作し、変電所出口の6.6kV実配電線に実装した試験から、元来、実時間の基本波力率測定用に設計した電流センサであったが、配電線に含まれる高調波によって生ずる磁束を電流センサの構成要素である逆位相に直列接続された二つのコイルによって微分することで配電線電流に含まれる高調波成分を強調して、図2に示すように計測可能であることを理論的・実験的にも実証してきた。

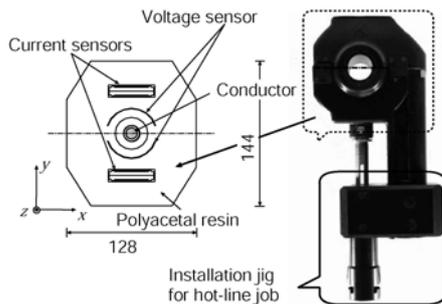


図1 試作した樹脂一体型電圧電流センサ

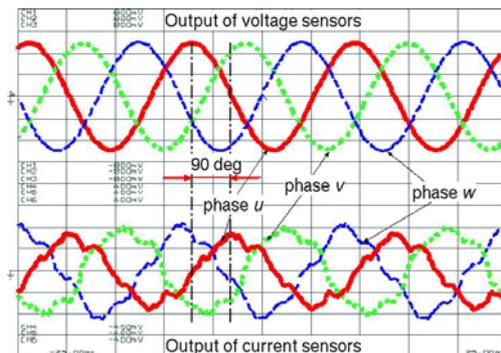


図2 6.6kV配電系における樹脂一体型センサの電圧電流出力

そこで、本研究課題では、実配電系でのフィールド実験を通して、電力会社の実運用サイドからの要望の強い、22kV配電系に実装する本樹脂一体型センサについて、絶縁設計を含めた設計定数を再検討し、有限要素法による電磁界シミュレーション結果に基づいて、検討し、実用上の問題点を解明する。

3. 研究の方法

以下、本提案センサの測定原理ならびにセンサ出力の電圧波形と電流波形から得られる位相差誤差が電力評価に与える影響、本センサシステムの校正実験について述べる。

(1) 測定原理

電圧センサは、図1に示すように、配電線を挟むように配置された上下一対の電極板か

ら構成されている。本電圧センサは、静電誘導型電圧センサであり、配電線印加電圧によって電極板に誘導される電位を計測する。図3に電圧センサを用いた計測方法を示す。

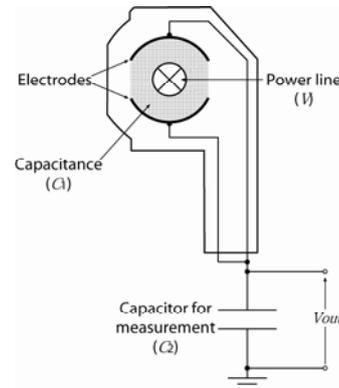


図3 電圧センサの計測原理

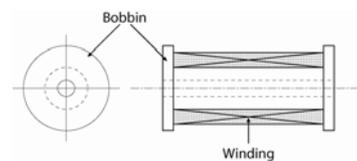


図4 電流センサ用空芯コイル

電圧センサは、電極からの電線を引き下ろし、測定用キャパシタを接続して、対地電位を測定する。そして、網掛け部で示した配電線、電極間の静電容量と対地間に挿入したコンデンサによって分圧した電圧を出力として計測する。図3のように、配電線、電極間の静電容量を C_1 、測定用キャパシタを C_2 、配電線の対地電位を V 、出力電圧を V_{out} とすると、出力電圧は(1)式となる。

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

図4は、非磁性体のポビンに電線が巻かれた空芯コイル構造の電流センサ部である。この空芯コイルによる配電線の電流波形検出は、配電線に電流が流れることによって発生する磁束がコイルに鎖交する際に巻線両端に生じる誘導起電力を利用して行う。ここで、コイルに鎖交する磁束を Φ とすると、次の(2)式で表されるFaradayの電磁誘導則から、誘導起電力 e は磁束 Φ の時間微分に比例する。すなわち、本電流センサは、(2)式の関係から出力を電圧として計測するため、配電線電流波形の微分値として計測する。

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

したがって、電流センサ出力電圧は、配電線電流波形を微分した波形になるため、実波形を得るためには、積分回路を要する。

図5は、相隣る相の配電線に本電流センサ

が配電線を挟み込むように配置され、左の相に電流が流れ、右側の相の電流が零となる瞬時の磁束の状態を図示したものである。本提案センサでは、上述した電流サーチコイルを逆位相に直列に接続する（以下、「逆位相直列接続型二連コイル」と称する）によって、図5(a)のように自相の磁束では、その起電力を二倍に出力し、同図(b)のように他の相では、起電力を相殺することで、自分以外からの他相からの磁束の影響をほぼ打ち消すことができる。

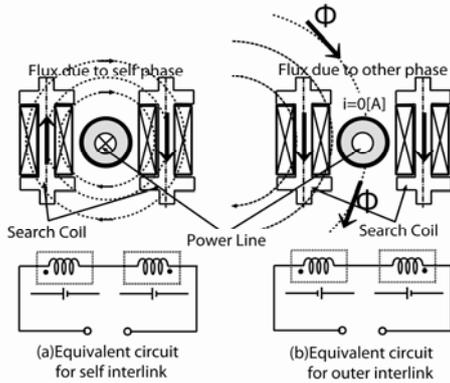


図5 逆位相直列接続型二連コイルの原理

(2) 位相ずれが電力評価に及ぼす影響

電圧・電流センサによって計測される電圧を V 、電流を I 、その位相差を φ （力率角）とする。ここで、計測位相に位相ずれ $\Delta\varphi$ が生ずると、これらの電圧、電流、誤差を含む力率角から計算される有効電力 P_a と無効電力 P_r は、それぞれ、次式で表される。

$$P_a = VI \cos \varphi + 2VI \sin \left(\varphi - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \quad (3)$$

$$P_r = VI \sin \varphi - 2VI \cos \left(\varphi - \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \quad (4)$$

したがって、(3)式と(4)式の右辺第2項が通常の電力評価値の誤差となる。この $\Delta\varphi$ を高力率 $\cos \varphi \cong 90\%$ と低力率 $\cos \varphi \cong 50\%$ の場合について、(3)式と(4)式に代入して、プロットしたものが図6である。

図6から、いずれの負荷状態でも、電力評価の相対誤差を10%以内にするには、位相ずれ $\Delta\varphi$ を電気角で3度以内にしなければならない。すなわち、厳密な電力計測を実現するには、センサ出力の位相特性を理論的にも実験的にも把握しなければならない。

本研究では、6.6kV実配電系で本提案センサの出力特性を確認すると共に問題点を明らかにし、さらに、22kV配電系でのセンサの再設計を視野に入れた、実用性の可否を議論する。

(3) 電流波形復元のための積分回路

(2)式から電流センサ出力電圧が配電線電

流の微分波形であるため、その実波形を得るには、その出力電圧を積分する必要がある。

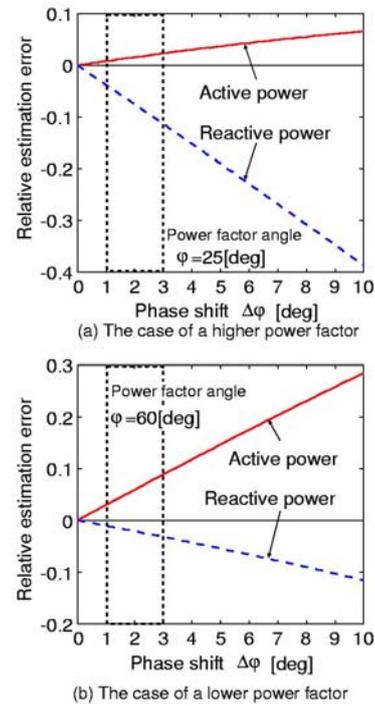


図6 位相ずれが電力評価に及ぼす影響

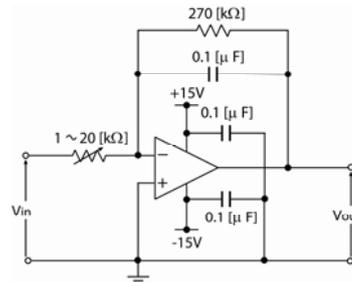


図7 電流センサのための積分回路

図7は、そのために使用した積分回路である。本回路は、センサ出力波形を増幅・積分・ローパスフィルタリングによって波形整形することを目的として設計・製作した。設計仕様としては、

- 60Hz正弦波信号の増幅ができる
- 60Hz付近で積分動作を正確に行える
- 60Hz付近での位相ずれを最小限に留める
- 60Hz以降の高調波を可能な限りカットする

ことである。以上の条件から、60Hz付近で積分動作を確実にを行うため、カットオフ周波数を積分動作周波数の1/10である6Hzに設定し、各パラメータを定めた。なお、本積分回路を使用することによって、基本周波数である60Hzでは、図8に示すように位相が5.6度進むため、厳密な力率計測の際にはその位相ずれを考慮して行う必要がある。

(4) 電流センサ出力のための校正実験

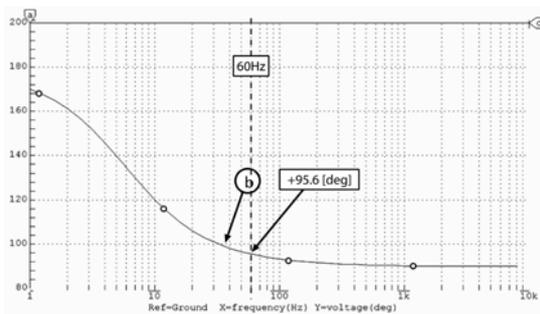


図8 電流センサ用積分回路の位相特性

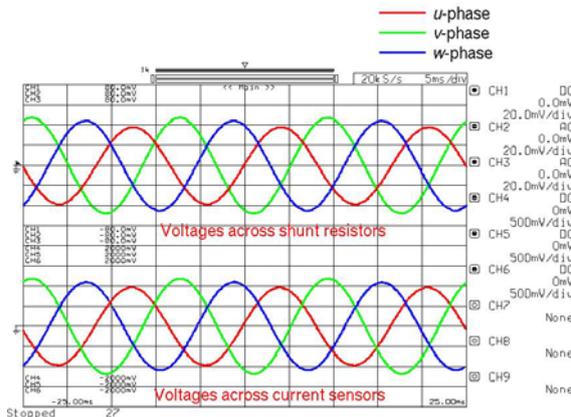


図9 電流センサの校正実験結果

図9は、研究代表者の研究室で先の科学研究費の支援を受けて製作した模擬配電線に実配電系に流れる電流と同レベルの電流を通電した場合の電流センサ出力と三相各相に挿入されたシャント抵抗の出力を比較したものである。

各相の電流波形センサ出力を図7の積分回路を通して計測したものである。ここで、配電線u相、v相、w相には実効値でそれぞれ、161A、201A、189Aの電流を流した。なお、積分回路では、増幅率が10倍であり、位相特性も60Hzで前述した通り5.6度程度進むため、センサ出力三相分は、その分進んでいる。

このシャント抵抗器の電圧出力、センサ出力電圧、通電した電流値との関係から、後述するフィールド実験の電流計測値を知ることができる。具体的には、電流波形センサ出力は、v相電流の値を基準にすると、電流波形センサ出力の120mVが配電線電流201A(RMS)に相当する。

(5) 架空地線なしの水平配置配電系での電圧センサ出力実験

後述するフィールド実験の結果は、「架空地線が配置された一般的な配電系」で、三相各配電線がそれぞれ等間隔で、水平に配置されたものであるが、図10に示す測定結果は、電圧波形センサの出力の確認だけのために実施した、「架空地線が存在しない特殊な水平配置の配電系」での結果である。

この場合、三相配電系からV結線変圧器で線間電圧とY-Δ変換された電圧波形センサ出力を比較したものである。各相電圧波形を比較したところ、表1に示す柱上V結線変圧器二次側の電圧と電圧波形センサ出力電圧の位相ずれを得た。なお、図中の V_{ab} 、 V_{bc} 、 V_{ca} は、V結線変圧器の線間電圧であり、 V_{uv} 、 V_{vw} 、と V_{wu} は、電圧センサ出力の相間電圧とする。

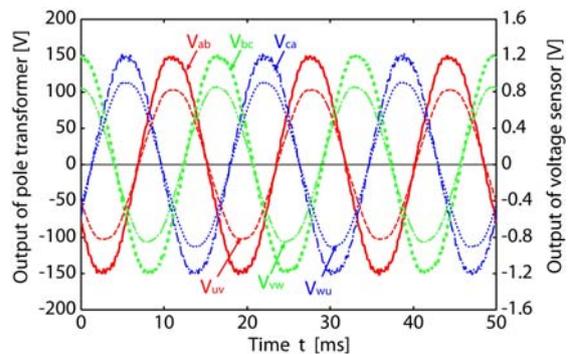


図10 電圧センサの出力確認実験結果

表1 電圧センサにおける位相ずれ

Phase to phase	phase shifting [deg.]
$u - v$	-2.34
$v - w$	+2.88
$w - u$	-1.05

なお、位相ずれは、線間ごとに計算したものであり、 V_{ab} と V_{uv} 、 V_{bc} と V_{vw} 、 V_{ca} と V_{wu} をそれぞれ比較した。いずれの相の位相差も電気角で3度以下になっており、上記の(2)で指摘した電力評価誤差10%以内となる位相ずれにほぼ収まっている。いずれにせよ、V結線変圧器出力は、計器用変圧器と違って、二次出力の位相ずれも考えられ、さらに、静電誘導型センサである電圧波形センサの固有の位相ずれは不可避であることを鑑みれば、妥当な電圧波形センサの出力であるものと確信する。

4. 研究成果

以下に、本研究課題で得られた成果について、6.6kV実配電系フィールド実験でのセンサ出力の検証ならびに22kVで配電系を想定したシミュレーション結果に基づく樹脂モジュールの再設計と絶縁耐力再評価について述べる。

(1) フィールド実験

図11は、本提案センサを九州電力佐賀支店配電課の支援を受け、工業団地近傍の6.6kV水平配置配電系に設置している様子を示したものである。図12に示すように、配電線三相分に本センサは、活線(通電)状態で実装される。

間接治具によって、センサを活線状態で取

り付けるには、センサと別途機構を設けるため、重心位置が偏倚し、現場でのセンサの配置は、図12のように水平を保つことが極めて困難であった。しかしながら、逆位相直列接続型二連コイルを使用すれば、この傾きの影響は、前述した模擬配電線に傾けた状態で電流センサ出力を確認したところ、出力に問題がないことが判明している。

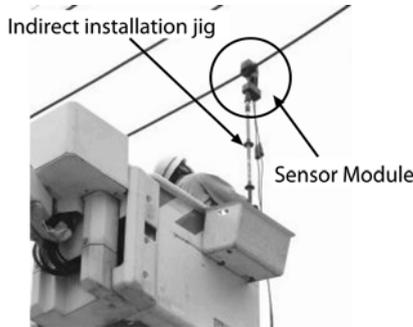


図11 センサの取り付け

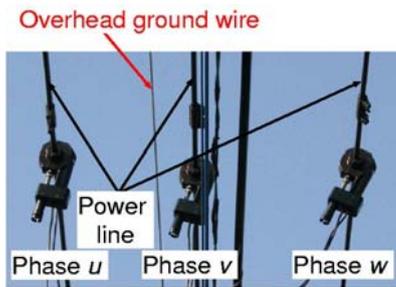


図12 水平配置 6.6kV 三相配電系に設置された提案センサ

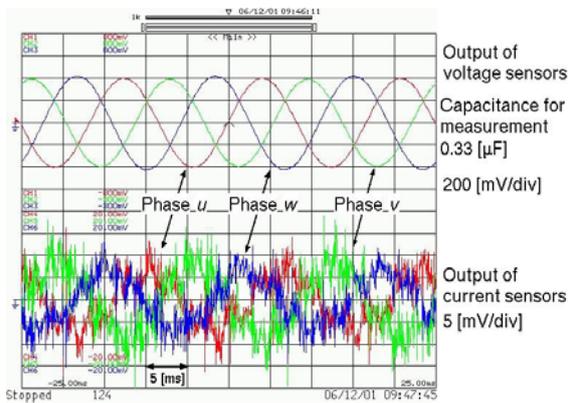


図13 工業団地内での高調波計測

図13と図14にそれぞれ、工業団地内での水平配置三相実配電系でのフィールド試験における高調波計測ならびに力率計測の結果を示す。

配電線電流に比例する磁束を(2)式にしたがって、微分波形として計測する本電流センサの波形は、その変化を強調したものとして計測されるのが明らかであり、この電流波形をスペクトル分析した結果が図15である。

半導体電力変換装置から生ずる第5次高調波成分を検出できていることが明白であり、実用に十分に供することが明らかになった。

また、図14から、各相の電圧・電流の位相差とその力率を求めると、表2の結果を得た。

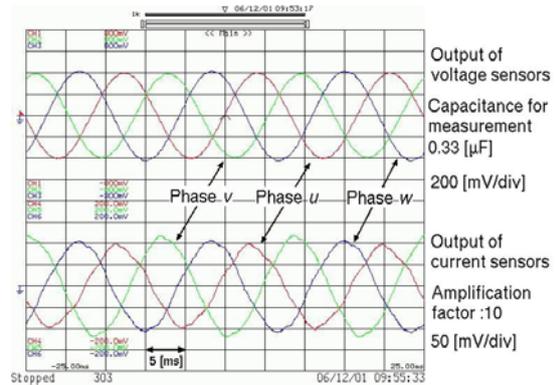


図14 工場団地内での力率計測

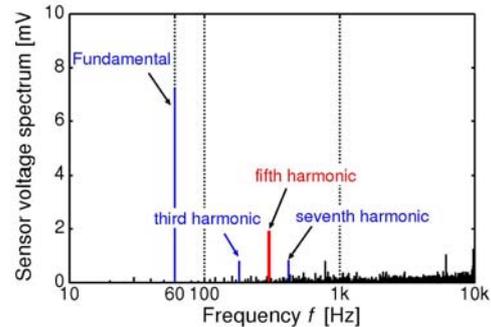


図15 工場団地内での電流高調波分析

表2 工業団地内での力率推定値

Phase	Power-factor angle [deg]	Power factor [%]
u	11.67(Current sensor lead)	97.9
v	9.38(Current sensor lead)	98.7
w	0.12(Voltage sensor lead)	99.9

本実験は、工業団地内であるので、進相コンデンサの使用は常識化しているはずであるから、力率の値としては、妥当な値であると判断できる。さらに、本書の研究の方法(4)で述べた電流センサ出力の校正値を基準にし、図14の電流値を換算すると配電系には、14A程度の電流が流れていたことがわかる。これは、早朝の作業前の工業団地内での計測だったため妥当な計測値と言えよう。

以上、フィールド実験の結果から、本センサで高調波、力率の計測が可能であることが実証された。

(2) 22kV 配電系への可能性

6.6kV 配電系用に設計された図 1 のセンサは、実際は、22kV での数分程度の耐圧試験をクリアしているが、長時間に渡る試験は、実施されていない。図 1 6 に絶縁耐圧の安全サイドを考慮して、樹脂部分を余裕をもって設計したセンサを示す。

22kV 系で問題となるのは、耐圧である。紙面の都合で省略するが電流センサそのものの特性は、電圧に依存しないので、以下、電界解析を有限要素法によって実施した結果から論ずる。

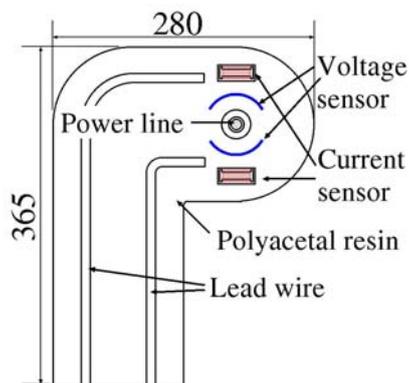


図 1 6 22kV 用樹脂一体型センサ

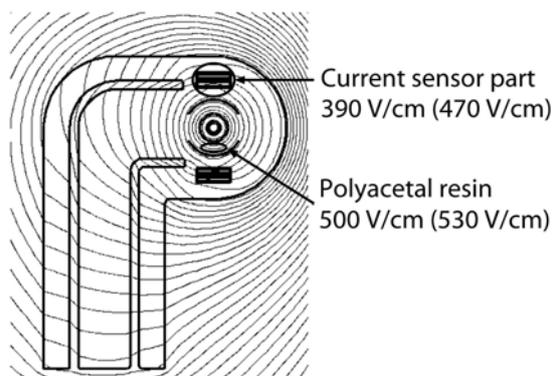


図 1 7 22kV 配電系での電界解析結果

図 1 7 に電界解析から得られた 22kV 用樹脂一体型センサの等電位線図と各地点の電位から算出した電界値を示す。ここでは、耐電圧について考えてゆくため、もっとも印加電圧が大きくなる瞬時での u 相の等電位線図を図示している。また、図中括弧内の数値は、6.6kV 用センサの解析モデルに 22kV の電圧を印加した場合の、対応箇所における電界の算定値を示したものである。

等電位線間は約 200[V] であり、センサ内の最も電界が強い場所で約 500[V/cm] であった。前述の試作された 6.6kV 用のセンサに用いられているポリアセタール樹脂の絶縁破壊電圧は、200[kV/cm] であり、図 1 6 のような大型のセンサを用いなくても、試作器で十分に耐え得ることが明白になった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

(1) 古川達也、平川正仁、福本尚生、吉野伸也、相知政司: 「一般配電系力率および高調波計測用樹脂一体型電圧・電流波形計測センサ出力の実証実験」電気学会論文誌 A, 査読有, Vol. 129, No. 4, 2009, pp. 197-04

(2) T. Furukawa, M. Ashikawa and M. Ohchi, “Steady State Analysis of Resin Molded Type Voltage-Current Sensor for Real-Time Observation of Power Factor in Power Distribution System“, IEEJ Trans. PE(電気学会電力部門論文誌), 査読有, Vol. 128, No. 6, 2008, pp.811-819

〔学会発表〕(計 5 件)

(1) 久保卓郎、古川達也、福本尚生、相知政司: 「22kV 配電系用樹脂一体型電圧・電流センサの電磁界解析」、平成 21 年電気学会全国大会、2009 年 3 月 17 日、北海道大学

(2) 久保卓郎、古川達也、福本尚生、相知政司、平川正仁、吉野伸也: 「6.6kV 用樹脂一体型電圧・電流センサの電圧センサ出力位相特性試験」、電気学会計測研究会、2008 年 11 月 3 日、佐賀大学

(3) 久保卓郎、古川達也、福本尚生、相知政司: 「22kV 配電系統用樹脂一体型電圧・電流センサの特性解析」、第 16 回電子情報通信学会九州支部学生会講演会、2008 年 9 月 26 日、大分大学

(4) 平川正仁、古川達也、相知政司、石場博昭: 「6.6kV 縦引き配電系モデルにおける樹脂一体型電圧・電流センサの電磁界解析」、第 26 回計測自動制御学会九州支部学術講演会、2007 年 12 月 1 日、鹿児島大学

(5) 平川正仁、古川達也、相知政司、石場博昭: 「樹脂一体型電圧・電流センサを用いた 6.6kV 配電系の高調波計測」、第 60 回電気関係学会九州支部連合大会、2007 年 9 月 19 日、琉球大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古川 達也 (FURUKAWA TATSUYA)

佐賀大学・理工学部・教授

研究者番号: 9 0 1 7 3 5 2 5

(2) 研究分担者

相知 政司 (OHCHI MASASHI)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号: 3 0 2 3 3 0 1 8

(3) 連携研究者

福本 尚生 (FUKUMOTO HISAO)

佐賀大学・理工学部・助教

研究者番号: 6 0 3 4 6 8 7 2