

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560337

研究課題名(和文) 高調波発生源を同定する開閉器内蔵樹脂一体型電力状態観測センサに関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental Study on Resin Molded Power Status Sensor Embedded in Pole Switch Identifying Harmonic Noise Source

研究代表者

古川 達也 (Furukawa, Tatsuya)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90173525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で筆者は、一般配電系に設置された柱上開閉器がインターネット接続・制御されていることに着目し、鉄筐体からなる柱上開閉器内に従前から筆者が提案してきた樹脂一体型電圧電流センサを内蔵させ、電力状態ならびに高調波計測を可能にするシステムを開発した。

さらに、筆者は、模擬三相配電線に開閉器を模した鉄筐体を設計製作し、三相配電線を筐体に貫通させ、その内部にポリアセタール樹脂で絶縁した一対の電極ならびに逆位相二連直列接続電流センサを配置し、電圧センサに対して実配電線の3,600Vの三相電圧を印加、電流センサに対して300Aの三相短絡電流を通電し、電力状態並びに高調波を計測できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the author has paid attention to the pole switch, that is installed in power distribution systems, is connected to the Internet and remote-controlled, to introduce the resin molded voltage-current sensor, that observes and measures both the power status and the harmonics, into the pole switch. In practice, he has designed and implemented the simulated pole switch box made of iron and installed the above power status sensors, that have been molded in the polyacetal resin, in the simulated three power lines inside the iron housing.

The current sensor, that comprises a pair of two coils connected with reverse polarity for each other, has been examined under 300 A phase current condition to display the wave form of line current with harmonics successfully regardless of the inside of an iron box. Also, the voltage sensor with a pair of electrodes, has been examined under 3,600 V of line to line voltage to show the voltage wave form well.

研究分野：電力工学、電気機器学、計測工学

キーワード：電力状態観測 電圧電流センサ 配電系システム 電力開閉器

1. 研究開始当初の背景

平成23年(2011年)3月11日に起こった未曾有の東日本大震災をきっかけに引き起こされた福島第一原子力発電所の事故によって、「原子力は、安全」の神話は、脆くも崩壊し、本報告書執筆時点で、全国で定期点検運転停止中原子炉の運転が再開していない状態であり、平成23年3月以来、全国的に「節電」が声高に叫ばれ、「安全安心」な自然再生エネルギーに対する国民の期待は、以前にも増して高まっている。しかしながら、ますます高まる自然再生エネルギーの期待に反して、既存の電力網にとっては、それらが「好ましい物」とは、必ずしも言えない。

三相誘導発電機を用いた風力発電プラントの場合は、同期速度以上の速度さえ確保できれば、周波数変換は不要であるが、永久磁石型の同期発電機を用いた風力発電プラントでは、周波数制御には、定速運転が必要であるため、太陽光発電と同様に実用上パワーコンディショナで周波数変換をする必要がある。しかし、完全な正弦波出力のパワーコンディショナは、実質上不可能であり、高調波を含むコンバータ出力やPWM制御のための高調波発生は、家電用ならびに産業用半導体電力変換装置からの発生と同様に、既存の電力網に接続された場合は、高調波成分が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要因となっている。

今後、ますます普及が進むであろう所内発電システムを有する需要家からの売電やスマートグリッドの進展に応じて、電力供給会社等での現場サイドでは、先の実験事故で問題となった「末端電力停止」の迅速な察知と対処、ならびに、「配電系電力状態のリアルタイム観測・計測」や配電系への「高調波源の同定」や高調波障害を事前に予測に関する技術革新がより一層強く求められている。

2. 研究の目的

自然再生エネルギーに基づく電力は、供給電圧・電力量が不安定な状態で、既存の電力網に接続され、さらに、接続の際用いられるパワーコンディショナと呼ばれる半導体電力変換装置によって生ずる高調波成分も電力系統へ流入させるため、商用周波数仕様の電力機器に重篤な障害をもたらすことが問題視されている。本研究では、今後、ますます進展すると考えられるスマートグリッドにも必須の電力状態観測のために、「配電系統用柱上開閉器内蔵樹脂一体型電圧・電流センサ」を開発し、さらに、開閉器まで普及しているインターネットを介した計測システムへと発展させることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 樹脂一体型センサ

これまで、筆者は、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6,600V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。

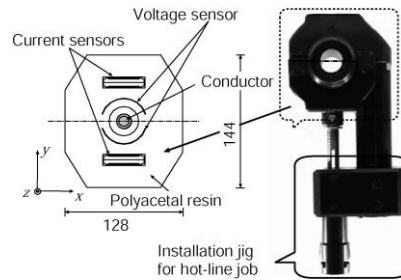


図1 試作した樹脂一体型電圧電流センサ

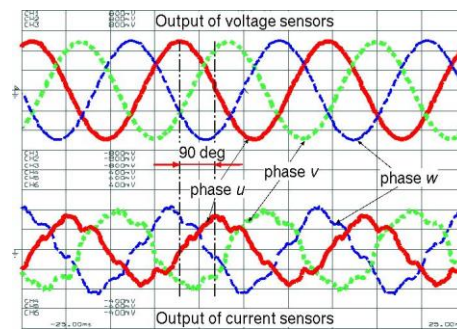


図2 6.6kV配電系における樹脂一体型センサの電圧電流出力

しかしながら、図1のセンサは、1個当たりの総重量が7kgと重く、一時的な計測には、活線工事が可能であるメリットがある反面、常設には、全く不向きであった。

そこで、本研究では、図1のセンサの取付治具部を廃止し、絶縁耐力を数値電界解析によって予め計算し、形状を考慮して設計した図3のような形状のポリアセタール樹脂の中に二つの電流センサ用コイルと電圧センサ用の一対の電極を埋め込むことを考えた。

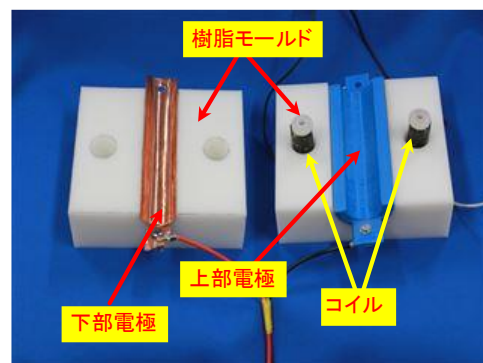


図3 完成した樹脂一体型電力センサ

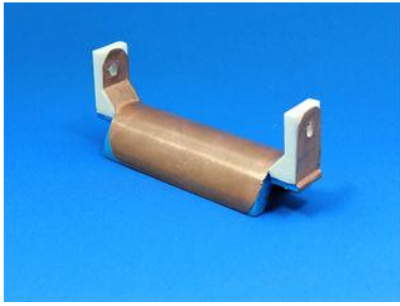


図4 上部電極

同図左部が下部電極を支える樹脂部でこれに電極が両面テープで固定されており、上部電極は、右部樹脂に詰め込まれた青色のスペーサの裏に貼りつけてあり、配電線に装着する際は、右部樹脂を左部に被せる。青色の電極部は、図4のような構造を取る。

(2) 模擬開閉器

図5は、国内の一般配電系に設置されている柱上開閉器の平均的な大きさを参考に作成した鉄管体の模擬開閉器である。

この開閉器を貫通するように模擬三相配電線が配置され、電源設備の都合で、実配電線規模の電圧と電流を個別に印加、通電することができる。また、図5の管体に図3のセンサを三個収納した状態を示したのが図6である。

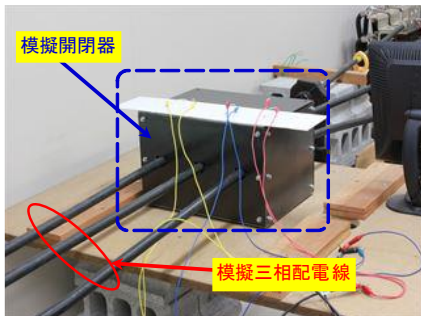


図5 模擬開閉器と模擬三相配電線



図6 模擬開閉器に収められた樹脂一体型電力センサ

(3) 高電圧発生装置

筆者の所属する機関には、高電圧大電流の発生装置がないため、これまでは、巻線比の大きい(40:1)ダウントランスを用いて、200V三相電圧を降圧して低電圧とし、三相短絡状態で実配電系規模の電流(300A程度)を通電して、電流センサ部の実験を行っていたが、実配電系規模の3,000Vクラスの電圧を印加

させての電圧センサの実験は、不可能であった。

本研究では、鉄管体からなる柱上開閉器内での樹脂一体型電力センサの可否を調査研究することが主目的であるので、3,000Vクラスの配電系を模した実験は必須であった。

そこで、筆者は、図7に示す二個の変圧比60:1の計器用変圧器をV結線し、三相構成として、本来の計器保護目的である降圧機能を変更して、昇圧器として用い、60倍の電圧を発生させることができる。今回の実験では、40~60Vの三相電圧を印加したので、2,400~3,600Vまでの線間電圧を印加できた。

なお、図8は、その一次側と二次側の結線図とそれらに対応した電圧フェーザ図である。V結線することによって、高価な計器用変圧器を二個だけ使い、本来の一次・二次を逆に使うことで、三相高電圧電源(最高13,200Vまで発生可能)を安価に作成することができた。また、一次側と二次側の電圧位相は、揃っているので、電源と同相の高電圧が配電線に印加されることになる。

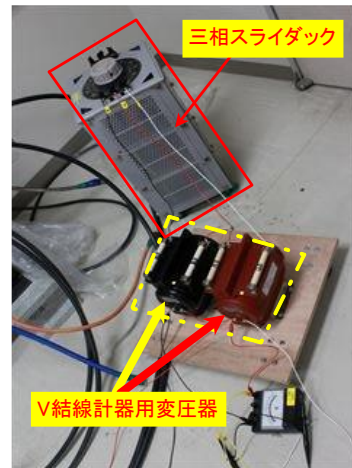
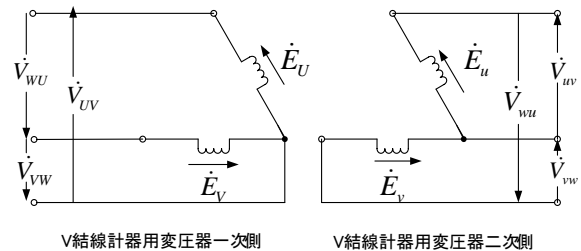
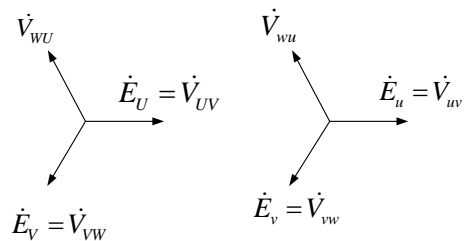


図7 三相高電圧発生装置



V結線計器用変圧器一次側 V結線計器用変圧器二次側



V結線計器用変圧器一次側フェーザ V結線計器用変圧器二次側フェーザ

図8 V結線計器変圧器の等価回路と電圧フェーザ図

#### (4)計器用変圧器の $\Delta$ -Y 結線による線間電圧計測装置

図8のように V 結線した二個の計器用変圧器一次側（低圧側、本来は二次側）は、図7の三相スライダックに接続されるので、線間電圧が三相間に掛かることになり、当然、高圧側も線間電圧として電圧が現れる。

しかしながら、配電線に印加される三相電源は、 $\Delta$  結線として、電圧を供給しているので、三相の電位の基準が取れず、通常のオシロスコープでは、二相分の電圧しか計測ができない。そこで、2:1 の変圧比を持つ計器用変圧器を三個使い、 $\Delta$ -Y 結線することによって、Y 側中性点を接地して、電源側線間電圧を間接的に計測する装置を作成した。

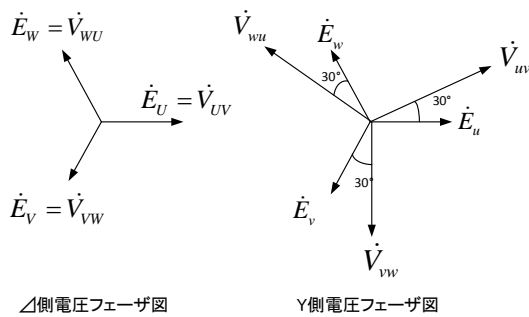


図9  $\Delta$ -Y 結線計器変圧器の電圧フェーザ図

図9は、計器用変圧器  $\Delta$ -Y 結線時の  $\Delta$  側と Y 側の電圧フェーザ図である。Y 側の線間電圧は、 $\Delta$  側の線間電圧（相電圧と一致）に対して、位相が  $30^\circ$  進むが、Y 側の相電圧は、 $\Delta$  側の線間電圧と同位相になることがわかる。即ち、Y 側の中性点を接地すれば、通常のオシロスコープで電源の全ての線間電圧を間接的に計測することができることになる。

したがって、配電線に設置される電圧センサの電極に生ずる電圧は、対地間の相電圧であるから、電圧センサ出力と  $\Delta$ -Y 結線した計器用変圧器（電源電圧と同位相）の出力とを比較するには、 $30^\circ$  の位相差を考慮する必要がある。

図10は、V 結線計器用変圧器と  $\Delta$ -Y 結線計器用変圧器を用いた高電圧発生装置と線間電圧計測装置である。先に述べたように、V 結線計器用変圧器は、一次と二次を入れ替えており、変圧比が 1:60 であるので、三相スライダックの定格最大電圧 220V を印加すると 13,200V までに昇圧することができる。

一方、 $\Delta$ -Y 結線計器用変圧器は、変圧比が 2:1 であるので、最大 110V となり、さらに、中性点で接地しているので、内部で各計測チャンネルが共通アースのオシロスコープを用いても、安全に配電線に印加されている三相線間電圧波形を計測することが可能となっている。

#### 4. 研究成果

##### (1)高電圧発生装置と線間電圧計測の実験結

#### 果

図11は、図10の高電圧発生装置の計器用変圧器  $\Delta$ -Y 結線の Y 側の中性点からの相電圧と V 結線計器用変圧器の低圧側の相電圧（線間電圧）の出力をアース非共用の 6 チャンネル・オシロスコープで同時に計測した結果である。ただし、機器保護のため V 結線計器用変圧器は、高電位側（高巻線側）を三相スライダック電源に繋いで実験を行った。この結果から、一次と二次を入れ替えた高電圧発生時には、 $\Delta$ -Y 結線の Y 側の中性点からの相電圧で V 結線接続時の高圧側線間電圧波形を計測できることが明らかになった。

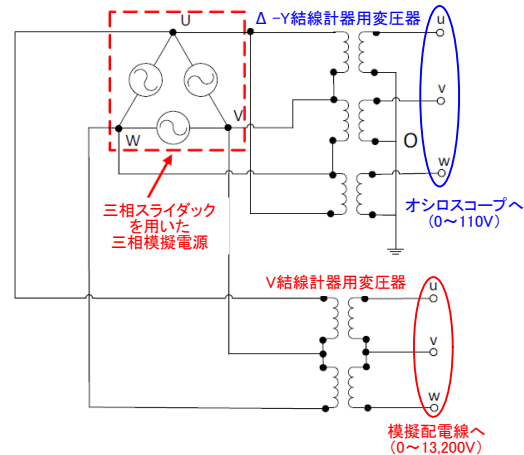


図10 高電圧発生装置と線間電圧計測回路

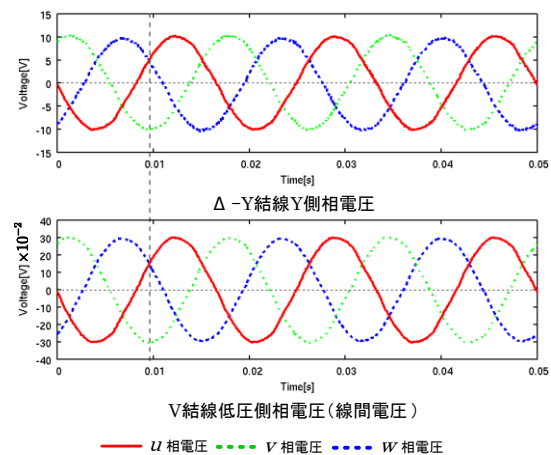


図11 高電圧発生装置の出力特性

##### (2)三相短絡状態での電流センサ出力試験

図12は、40:1 の巻数比を持つダウントランスを用いて実配電系規模の電流を流すことのできる模擬配電系の回路構成である。このダウントランスの容量は 20kVA であるので、巻数比で単純計算すると 1,000A を超える電流を流すことができるため、実配電系の 300A クラスをクリアできる。実験では、最大 300A まで実験を行った。

図13は、図12のように模擬三相配電線を三相短絡して、低電圧を印加した場合の電

流センサ波形と $\Delta$ -Y結線で印加線間電圧相当の電圧波形を計測したものである。

同図において、上部が電流センサの出力波形であり、下部が印加された線間電圧を $\Delta$ -Y結線された計器用変圧器で2:1に分圧した電圧波形である。

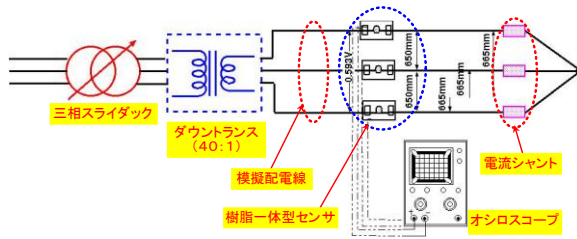


図 1 2 ダウントランスを用いた電流センサ計測回路

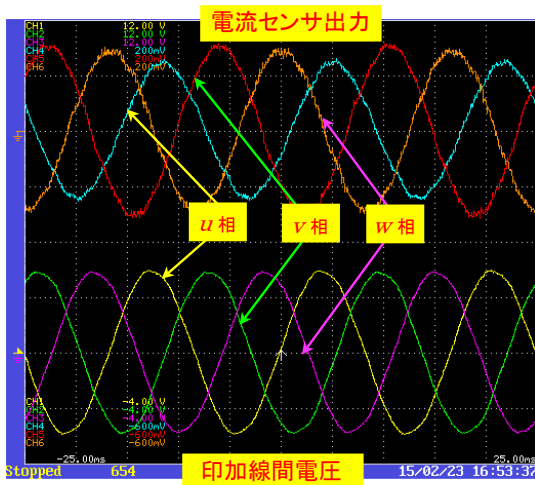


図 1 3 模擬配電線・線間電圧に対する電流センサ出力波形

図 6 に示される鉄管体内に樹脂一体型電圧電流センサを設置し、その上から鉄製の蓋を閉じて、実験を行ったが、従前の樹脂一体型電圧電流センサと同様に高調波成分も検出できる波形になっていることが図 1 3 からわかる。なお、磁性材料が通常の鋼板を用いているため、渦電流やヒステリシスの影響を受けて、管体全体がローパスフィルタの役目をして、樹脂単体に比べて高調波成分は、やや抑え気味になっている。

図 9 で示したとおり、線間電圧は、相電圧のベクトル差になるので、相電圧より必ず位相が $30^\circ$ 進む。電流センサの出力は、相電流に相似であるので、図 1 3 から約 $30^\circ$ 位相が遅れていることがわかり、本電流センサの出力は、電流波形を表していることが明白である。

### (3)線間電圧 3,600V 印加時の電圧センサの出力試験

図 1 4 は、樹脂センサの置き方を示したものである。コイル軸が水平になる向きを「縦置き」、コイル軸が垂直になる向きを「横置き」と称する。

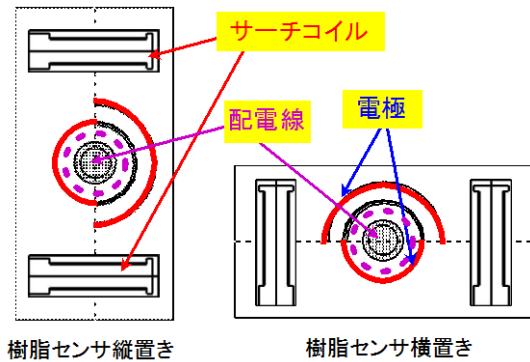


図 1 4 樹脂センサの置き方

図 1 2 で示した三相短絡に反して、電圧センサの実配電系規模の電圧印加には、三相短絡部を一度開放して、図 1 0 で示した高電圧発生装置を用い、三相スライダックから線間電圧 60V の三相電圧を印加した。

V 結線された変圧比 1:60 の三相変圧器が模擬配電線に印加する線間電圧は、3,600V の高電圧になる。模擬配電線に印加される電圧は、高電圧であるので、直接は計測できないため、スライダックの線間電圧を図 1 0 のように計器用変圧器を $\Delta$ -Y 結線して、中性点接地した相電圧として、計測した。Y 側の相電圧は、図 9 に示すとおり、V 結線された変圧器の線間電圧に相当する。

図 1 5 は、図 1 4 左のように三個の樹脂センサを縦置き（コイル軸水平）にして、鉄管体模擬開閉器に設置して、配電線に線間電圧 3,600V を印加した場合の線間電圧と電圧センサの出力波形を示したものである。

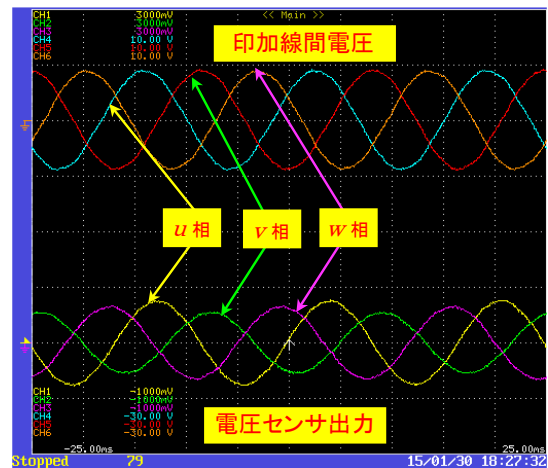


図 1 5 センサ縦置きの場合の線間電圧と電圧センサ出力波形

図 1 5 上部に示す線間電圧は、平衡であるが、下部の電圧センサ出力では、三相模擬配電線の中央の相である V 相の値が特に他の相に対して低くなっている。これは、図 1 に示した三つの樹脂一体型センサが 650mm 以上の配電線間隔で設置されるのに比べて、電線間距離 130mm の狭い管体に押し込んだ結果、隣の相からの静電誘導を強く受けているものと思われる。

また、センサ出力電圧の位相に関しては、先の議論から、線間電圧は、配電線相電圧に対して、 $30^\circ$ 進むことがわかっているの、配電線に電流が流れない状態では、相電圧は、線間電圧に対して、 $30^\circ$ 遅れる。図 1 5 の縦置き樹脂センサの場合は、 $u$ 相で  $2.3^\circ$ の遅れ、 $v$ 相で  $11.9^\circ$ の遅れ、 $w$ 相で  $15.3^\circ$ の進みになっている。

これまで筆者らがシミュレーションで明らかにしていたように、このような位相ずれ現象は、このタイプの静電誘導型のセンサ固有の問題であり、位相ずれがない配置は、三相配電線が幾何学的に対称な位置、すなわち、正三角形の頂点に配置しなければならないことがわかっている。しかしながら、そのような配置は、実際上不可能であるので、この位相ずれ現象を予め理論的・実験的に把握する必要がある。

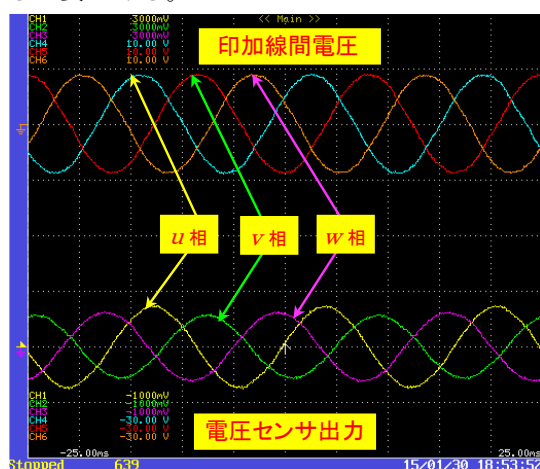


図 1 6 センサ横置きの場合の線間電圧と電圧センサ出力波形

図 1 6 は、図 1 4 右のように三個の樹脂センサを横置き（コイル軸垂直）にして、鉄筐体模擬開閉器に設置して、配電線に線間電圧 3,600V を印加した場合の線間電圧と電圧センサの出力波形を示したものである。

センサ出力は、縦置と違って、横置きの場合、 $V$ 相で 3%程度電圧が上がり、 $W$ 相は、6%程度下がったため、コンパラブルになっており、 $U$ 相に関しては、縦置きの場合と変わらなかった。

また、横置きでのセンサ出力電圧の位相に関しても先の縦置き樹脂センサと同様の理由で線間電圧に対して相電圧は  $30^\circ$ 位相が遅れるが、図 1 6 の場合は、 $u$ 相で  $0.3^\circ$ の遅れ、 $v$ 相で  $10.2^\circ$ の遅れ、 $w$ 相で  $12.1^\circ$ の進みになっている。この結果から、横置きの場合、縦置きに比べて、位相ずれが小さくなることがわかった。

#### (4)本研究成果の総括

本研究課題の「柱上開閉器内蔵樹脂一体型電力状態観測センサ」を 3,600V 実配電系規模を想定した末端開放状態の模擬三相配電系に装着し、研究経費で購入した計器用変圧器(変圧比 60:1)を用いて、3,000V を超える三

相高電圧発生装置を設計・作製し、2,400～3,600V の範囲で柱上開閉器内蔵型電力センサを模した模擬開閉器内の電圧センサ部出力実験を実施できるようにし、対地間三相相電圧波形を計測することに成功した。

従前の実験室での実験では、印加三相電圧の波形計測ができなかったが、別途、計器用変圧器(変圧比 2:1)を使って  $\Delta$ - $Y$  変換して、線間電圧を中性点接地の相電圧に変換し、間接的に印加三相線間電圧を計測できるようにした。さらに、同模擬三相配電系において、三相短絡状態で低電圧を印加して、300A 程度の実配電系規模の負荷電流を想定した電流センサの良好な出力特性を確認した。

#### 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). Tatsuya Furukawa, Shoichiro Muta, Hisao Fukumoto, Hideaki Itoh and Masashi Ohchi, “Simulation of Resin Molded Type Sensor in Pole Switch for Power Delivery Systems”, The 2014 International Power Electronics Conference, 21P5-11, pp.3067-3071, 査読有, International Conference Center Hiroshima, Hiroshima, Japan, 2014/5/21

(2). Yuki Hira, Tatsuya Furukawa, Seichiro Yakabe, Hisao Fukumoto, Hideaki Itoh and Masashi Ohchi, “Development of Power Measurement System in Simulated Micro Grid System for Education,” The 2014 International Power Electronics Conference, 19P14-4, pp.730-735, 査読有, International Conference Center Hiroshima, Hiroshima, Japan, 2014/5/19

[学会発表] (計 1 件)

(1). 久保康平・松永晃和・竹内健太郎・古川達也・福本尚生・伊藤秀昭・相知政司:「柱上開閉器に内蔵することを想定した樹脂一体型電力センサの実現可能性に関する研究」, 電気学会マグネティックス/リニアドライブ合同研究会, 2014年12月18日～2014年12月19日, 豊田工業大学

#### 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：90173525

(2)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：60346872