

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420396

研究課題名(和文)非接触電力伝送の効率化に向けた電力計測技術の確立

研究課題名(英文)Study of Power Measurement Technologies for Wireless Power Transfer

研究代表者

桐生 昭吾 (Kiryu, Shogo)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：00356908

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：精密デジタルマルチメータを用いた分圧器評価システムを構築し、10 k 10個からなる10:1の分圧器の評価を行った。この結果、周波数を大きくするにつれて、分圧器の分圧比に大きな差が生じることが明らかになった。この差の原因については、デジタルマルチメータの入力容量によるものと判明した。デジタルマルチメータの入力容量は100 pF以上あり、これにより、周波数を大きくすると負荷効果により、大きな差を生じることが明らかとなった。この影響は、接続するケーブルの長などによっても異なり、ケーブルの長さを数十cmにすると、数100 kHzでも大きな差(10%以上)を生じることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a electric power measurement method in a frequency range from 100 kHz to 10 MHz, a voltage divider has been investigated. It was found that the voltage ratio was significantly degraded due to the stray capacitance of the resistance used in the divider. The divider should be composed from the accurate resistance whose stray capacitance is well matched. One kind of the accurate chip resistance had about 1% variation of the stray capacitance. A 10:1 voltage divider was manufactured with the resistances whose nominal value was 10 k. Using accurate digital multi-meters, a evaluation system was constructed. The measurement values were significantly degraded at a high frequency due to the input capacitance of the meters. In order to evaluate the effects of the input capacitance in the meter, the load effect of the meter was calculated. It was found that the 10 k resistors were not suitable for the divider and the lower (< 100 ) resistance should be used.

研究分野：電気計測

キーワード：非接触電力伝送 電力測定 分圧器 誤差解析 浮遊容量

## 1. 研究開始当初の背景

共鳴型非接触電力伝送は 2006 年 MIT の Kurs 等が 2 m の距離で効率 40%以上の電力伝送（1 m では 90%以上）に成功し[1]、世界中で様々な機関・企業で研究開発が行われている。この共鳴型非接触電力伝送は数 10 cm～数 m 程度で効率の良い電力伝送が可能であり、電気自動車の充電、携帯電話、ノートパソコンへの充電、小型医用機器への電力伝送など幅広い分野での応用が期待されている。送電電力は数 mW～数百 W が想定されている。これらの機器では、当然、高効率な電力伝送が求められる。機器開発に当たって、電力効率を評価するためには、各部位で高精度な電力測定が不可欠である。上記の電力伝送で主に使用される周波数は数百 kHz から数十 MHz であり、この周波数領域での電力計が必要になる。現在、共鳴型非接触電力伝送では既に電力伝送効率が 90%を超える場合もある。このような高効率な電力伝送機器開発に使用される電力測定器には少なくとも 1 %程度の不確かさが必要と考えられる。なお、現在、市販電力測定器の確度は 1 MHz で数%～10 %程度である。

## 2. 研究の目的

これまで、数 kHz 程度までの低周波領域では確度 1 %以内の高精度電力計が存在しており、機器開発等にも広く用いられている。また、数 MHz 以上の高周波領域ではインピーダンス整合を前提とした高精度の電力計が存在しており、高周波機器の開発等に広く用いられている。電力伝送の場合、信号伝送とは異なり、50 Ω や 75 Ω の信号源インピーダンスは電力効率を大きく下げる。また、共鳴型非接触電力伝送においては回路の Q 値の低下は電力伝送効率を下げる。従って、効率を上げるためには、信号源インピーダンスは可能な限り小さくしなければならない。このことにより、電力測定器としてはインピーダンス整合を前提としない測定が必要となる。インピーダンス整合を前提としない低周波領域での電力測定器は、電圧の測定と電流の測定および位相差から電力を求める、電圧と電流の瞬時値の測定およびその平均値の算出から電力を求める、のどちらかの方法で電力測定を行うことが主流となっている。どちらも電圧および電流の高精度測定が必要となる。この低周波領域での電力測定器では、周波数を上げるにつれて以下のことが測定の不確かさを大きくする原因となる。

### (1) 分圧器の浮遊容量、浮遊インダクタンスによる分圧比精度の劣化

現在のデジタル式電力測定器では、AD 変換器により電圧がデジタル化されている。AD 変換器に入力できる電圧は数 V 程度なので、電力測定では分圧器が必要となる。分圧器には抵抗分圧器、誘導分圧器があるが、どちらも浮遊容量、浮遊インダクタンスにより

被測定電圧の周波数が大きくなるにつれて、測定不確かさが増加する。

### (2) 電流測定用シャント抵抗の浮遊容量、浮遊インダクタンスによる抵抗値精度の劣化

低周波での電力測定器では電流測定を行っている。電流測定では、シャント抵抗を回路に直列に挿入し、このシャント抵抗の値を既知として電流を電圧に変換し測定を行う。このシャント抵抗の値についても浮遊容量、浮遊インダクタンスにより測定不確かさが増加する。

また、非接触電力伝送に対する電力測定固有の問題（負荷効果）としては以下のものが不確かさを大きくする。

### (3) 分圧器、電流測定用シャント抵抗の挿入による回路の Q 値の変化

分圧器、電流測定用シャント抵抗はどちらも被測定回路にインピーダンスを挿入することになる。分圧器のインピーダンスが低い場合、電流測定用シャント抵抗が大きい場合は回路の Q 値を低下させ、見かけ上送電電力が小さくなるような効果を与える。

### (4) 分圧器、電流測定用シャントの浮遊容量、浮遊インダクタンスによる回路の共振周波数の変化

分圧器、電流測定用シャント抵抗の浮遊容量、浮遊インダクタンスは回路の共振周波数を変化させる。共鳴型非接触伝送回路では多くの場合送受電回路の無結合時の共振周波数を一致させるように設計する[2]。しかし、測定器の接続によって送受電回路で共振周波数が一致しなくなる恐れがある。送受電での共振周波数のずれは、伝送電力について敏感であることが我々の研究から明らかになっており[3]、測定器の付加によって見かけ上の電力が大きく変化する可能性がある。

## 本項目の参考文献

- [1] A. Kurs et.al., “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *Science*, Vol.317, No.5834, pp.84-86 (2007).
- [2] 萩原, “電磁結合による非接触電力伝送の原理について,” *電気学会論文誌 D*, Vol. 131, No. 5, pp.708-713 (2011).
- [3] 花輪、桐生、堂前, “対称型磁場共鳴非接触電力伝送回路における回路パラメータのバラツキの影響,” *電気学会リニアドライブ研究会*, LD-12, pp.37-42 (2012).

### 3. 研究の方法

まず、電力測定の中で、電圧測定に注目した。分圧器の具備すべき条件を明らかにする。浮遊インダクタンスが小さい精密チップ抵抗を用いて分圧器を構成する。この場合、浮遊容量に着目し、この影響が少ない分圧器について検討し、これを作製する。この分圧器について 10 MHz までの精密測定が可能な精密デジタルマルチメータを用いて分圧比を測定する。これについて、測定上の問題点などについて明らかにする。また、分圧器を挿入した時の  $Q$  値の変化について検討を行う。

### 4. 研究成果

(1) 中周波領域 100 kHz から 10 MHz における分圧器に要求される性能を理論計算した。その結果、2 個の抵抗器で構成される分圧器抵抗の浮遊容量を 0.01 pF 程度に抑えなければならないことを明らかにした。しかし、分圧器に二個の静電容量を逆比になるように接続することにより、分圧比を改善できる。しかし、静電容量は経時変化があり、これを定期的に校正しなければならず、簡便な測定器には、不向きであることが分かった。

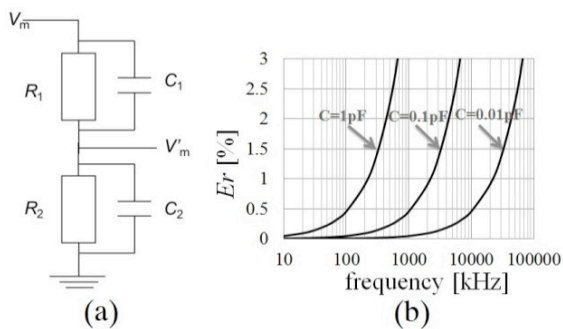


図 1 浮遊容量を付加した抵抗器を 2 個用いた分圧器の分圧比精度.  $c$  は浮遊容量を示す。

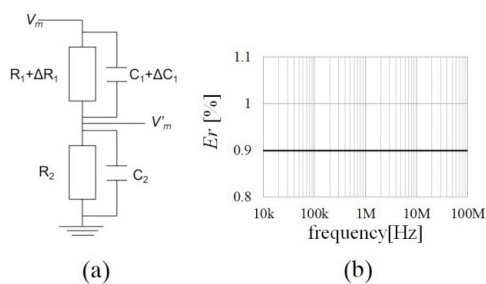


図 2 静電容量を付加した抵抗器を 2 個用いた分圧器の分圧比精度。

以上より、二個の抵抗器を用いた分圧器は精密な測定では不向きであり、分圧比の抵抗器を用いることにより、実現可能性を示した

(2) この計算を元に、精密デジタルマルチメータを用いた分圧器評価システムを構

築し、10 kΩ 10 個からなる 10:1 の分圧器の評価を行った。この結果、周波数を大きくするにつれて、分圧器の分圧比に大きな差が生じることが明らかになった。この差の原因について、詳しく調べたところ、デジタルマルチメータの入力容量によるものと判明した。デジタルマルチメータの入力容量は 100 pF 以上あり、これにより、周波数を大きくすると負荷効果により、大きな差が生じることが明らかとなった。この入力容量の影響は、接続するケーブルの長さや種類によっても異なり、接続するケーブルの長さを数十 cm にすると、数 100 kHz でも大きな差 (10 % 以上) を生じることが明らかになった。

以上の問題点を受け、測定器による負荷効果を考慮に入れた理論計算を行った。その結果、分圧器を構成する抵抗器が 10 kΩ の場合、実現不可能なほど入力容量を小さくしなければ、目標とする 1 % の不確かさを実現できないことが分かり、分圧器を構成する抵抗器の抵抗値を小さくしなければならないことが明らかになった。100 Ω の場合は、1 pF 以下の入力容量を持つ測定器で測定しなければ、評価自体ができないことが明らかになった。また、配線インダクタンスの影響を軽減するために、測定リードを cm 以下にすべきことが明らかになった。分圧器を構成する抵抗器を 100 Ω 以下にする場合は、別途、被測定回路に対する負荷効果を考慮する必要がある。1 pF 以下の入力容量を持つ測定器は、現在のところ、入手困難であり大きな研究課題となる。なお、1 pF 以下の入力容量の高速演算増幅器は入手可能であることを確認しており、これを用いれば初段増幅器の作製は可能である。

#### (3) 分圧器の負荷による $Q$ 値の変化

分圧器の負荷によって回路の  $Q$  値が変化する。分圧器の抵抗値が低いほど、浮遊容量の影響が小さくなる。現状、小電力用の非接触電力伝送回路の送電側については、数 Ω から数十 Ω の抵抗値を持つ。送電側は高電圧になるので、こちら側に分圧器が必要となると考えると、抵抗値のみを考慮した場合、 $Q$  値の変化を 10 % 以内に抑えたい場合 (結合係数にもよるが、これにより効率が数%程度小さくなる)、数 kΩ 程度の直列抵抗値を持つ分圧器が必要となる。上記の 100 Ω の抵抗器で 10:1 の分圧器を作製した場合、総抵抗値は 1 kΩ となり、この値が  $Q$  値を低下させない最小値と考えられる。なお、分圧比が大きい場合は、総抵抗値が大きくなり、 $Q$  値の低下については問題無い。

#### (4) オシロスコープによる電力測定の不確かさ推定

研究室では、簡便に、オシロスコープによる電圧測定と時間測定から電力を算出することが多い。そこで、オシロスコープによる電力測定で、どの位の不確かさがあるのかに

ついて、計算モデルを立て、評価を行った。電力  $P$  は、

$$P = VI \cos \theta$$

で表される。 $V$  は電圧、 $I$  は電流、 $\theta$  は位相差である。オシロスコープでは電流、位相差は直接測れないので、電流は電流検出用抵抗  $R$  の両端の電圧  $V_R$  から測定する。また、 $\theta$  は、ここでは、電圧波形、抵抗両端の電流波形の時間差  $T_1$  と周期  $T_2$  から算出するとする。これにより、上式は、以下のように不確かさ算出モデルとして表すことができる。

$$P = VV_R \cos(T_1/T_2) / R$$

二つの電圧は同じ測定器での測定であるので、相関があると考え。また時間も同時に同じ測定器で測定するので相関があると考え。ただし、Type A については、目視で振幅により測定を行なっているため、独立と考える。オシロスコープで測定できるのは、小型機器への応用を考えた数  $W$  以下の電力であり、この程度の電力測定では、電圧は 10 V 以下である。ただし、コイル間の電圧は 100 V 以上になる場合がある。Type A については、ノイズによる読み取り不確かさのみを考える。測定では、典型的には数 mV 程度の不確かさであった。また、包含係数を大体 2 とするために、不確かさ推定では、20 回以上の測定から Type A を見積もる。これは、正規分布と考える。Type B については、オシロスコープの確度から算出する。これは、説明書に載っている説明から計算する。 $R$  は通常、公称値を用い、通常 5 % 程度の誤差を考える。それぞれは、矩形分布とする。また、時間測定においては比となっていることから Type B はキャンセルできると考える。

不確かさの計算モデルから感度係数を算出し、合成不確かさを求めると 5 % 程度となった。また、拡張不確かさは包含係数を 2 とすると 10 % 程度となる。

以上より、高周波測定で度々用いられるオシロスコープでの電圧測定と時間測定から電力を算出する場合、10 % 程度の不確かさがあることを明らかにした。

#### (5) 研究と通して得られた他の知見

当初の不確かさを実現するには、かなり困難であり、浮遊容量の正確な把握や回路の基本から設計を考えなければならないことが分かった。

この期間を通して、非接触電力伝送の応用に関して、広い調査を行った。その結果、特にペースメーカー、人工心臓等、生体埋め込み機器に対し、外部から充電できれば、動作期間を大幅に改善できることが分かった。この場合、患者の QOL を考えると、衣服からの自然な形態を保ったままでの充電が重要である。これを実現するのに、衣服にフレキシ

ブル基板で作った平面コイルで給電する方法が考えられている。しかし、この方法では、コイルを形成する金属が薄く、大電流が流せない、フレキシブル基板の変形性は限られているなどの欠点がある。本研究でコイルの基礎特性を測定している時に、この周波数帯で多く使用されているリッツ線が良い可撓特性を有しており、裁縫技術により、布に直接コイルを形成できる着想を得た。これにより、シャツなどにコイルを縫い込むことにより、体の形に合った良好な変形性と比較的太い線も縫い込むことができるので、電流も多く流せることで、体内埋め込み型の機器への非接触電力供給に役立つことが期待される。今後は、こちらの方面でも研究を進めて行く。

#### 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 0 件)

[学会発表] (計 1 件)

秋山美郷、安池祐子、桐生昭吾、堂前篤志、  
“中周波領域における抵抗分圧器の誤差解析、” 高速信号処理応用技術学会 2014 年研究会 講演論文集、2014 年 8 月 7 日 高知工科大学 (高知県)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

桐生 昭吾 (KIRYU Shogo)  
東京都市大学・工学部・医用工学科・教授  
研究者番号：00356908

##### (2) 研究分担者

堂前 篤志 (DOMAE Atsushi)  
産業技術総合研究所・物理計測標準研究  
部門・応用電気標準研究グループ・主任研究  
員  
研究者番号：20357552