

励振ループを用いた複数受電器への電力分配手法の実機検証

島田 晃郎[†] 宮路 祐一^{††} 上原 秀幸^{††} 大平 孝^{††}

[†] 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科 電気・電子情報工学専攻, 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

^{††} 豊橋技術科学大学大学院 電気・電子情報工学系, 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

E-mail: †shimada@comm.ee.tut.ac.jp

あらまし 本研究では磁界共鳴を用いたマルチホップ電力伝送における二つの受電器への電力分配手法を検討する。励振ループおよび共振コイルにより構成される他励型受電器を用い、コイル・ループ間距離により電力分配比を制御する。このとき、受電器と二つの結合器との結合を考慮し、軸ずれが生じた場合においても電力分配比の制御が可能であることを電磁界シミュレーションおよび実機実験によって示す。シミュレーションでは簡単化のために伝送損失を無視して電力分配手法を導出したが、損失を含む実験環境においても電力分配比の誤差が少ないことを示した。しかし、各受電器へのホップ数が異なる場合では、ホップ損失の差により誤差が大きくなる可能性が示唆された。

キーワード 無線電力伝送 (WPT), 磁界共鳴, マルチホップ, 複数受電器, 電力分配

Experiment of Power Division Method for Multiple Receivers Using Excitation Loop-coil

Akiro SHIMADA[†], Yuichi MIYAJI^{††}, Hideyuki UEHARA^{††}, and Takashi OHIRA^{††}

[†] Graduate Program of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka Tenpaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580

^{††} Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka Tenpaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580

E-mail: †shimada@comm.ee.tut.ac.jp

Abstract In this paper, we study a power division on multi-hop wireless power transfer via magnetic resonant coupling to two receivers. We use receivers which consist of an excitation loop-coil and a resonator, and control the PDR (Power Division Ratio) by adjusting the distance between the loop-coil and resonator. Then, it is possible to divide the power properly to two receivers by considering the coupling of a receiver with two couplers even when coaxial misalignment occurs. We can find from the results of the electromagnetic simulation and experiment that the method can control the PDR of the receiver coupling with two couplers. However, a difference between the hop counts to each receiver causes an error because our method ignores the transmission loss so far.

Key words Wireless Power Transfer (WPT), Magnetic Resonance, Multi-hop, Multi-receiver, Power Division

1. まえがき

我々の身の回りには携帯電話、ノートパソコンなどの持ち運び可能なモバイル機器があふれている。モバイル機器の充電を行う際は、電源コードに接続する必要があるため、モバイル機器であるにもかかわらずコードの長さによって移動が制限される。この問題を解決するため、磁界共鳴型ワイヤレス電力伝送が注目されている [1, 2]。携帯電話やノートパソコンなどのモバイル機器を同時に使用する機会は日常的に存在している。そのため、ワイヤレス電力伝送は、複数機器へ同時に電力伝送す

ることが要求される。磁界共鳴方式を用いた複数受電器への電力伝送は送受電器の自己共振周波数を統一することで可能となる [3, 4]。また、複数機器への電力伝送では、受電機器に応じた電力を供給することが必要となる。なぜなら、携帯電話、ノートパソコンといった受電機器はそれぞれ要求する電力量が異なるためである。この問題を解決するため、電力分配の検討がなされている [5-9]。著者らは、広範囲への電力伝送が可能なマルチホップ電力伝送における電力分配に関して報告しており [8, 9]、負荷抵抗の制御により電力分配比を制御できることを示している。

伝送効率の改善手法として、励振ループおよび共振コイルにより構成される他励型送受電器を用いた電力伝送が報告されている [10, 11]. 伝送距離に応じてコイル・ループ間距離を調節することで整合を取り、伝送効率を改善する. この手法は、コイル・ループ間距離に応じて共振コイルに誘導される負荷が変化することを利用している. そこで、本研究は負荷抵抗の制御方法として他励型受電器に着目し、コイル・ループ間距離の調節による電力分配比の制御手法を回路理論を基に提案する. そして、電磁界シミュレーションおよび実機実験により他励型受電器により電力分配できることを明らかにする.

2. 等価回路による検討

本節では、マルチホップ電力伝送における負荷抵抗と電力分配比の関係を示し、励振ループを用いた電力分配手法を提案する. このとき、受電器の設置自由度を高めるため、受電器が2つの結合器と結合した場合を考慮する. 磁界共鳴方式の結合器は等価的に LC 直列共振回路と表現することができるため [4], 等価回路を用いて説明する.

2.1 複数の結合器と結合した際の電力分配比

受電器が複数の結合器と結合した際に生じる影響を述べ、電力分配比を示す. 各受電器への伝送電力は、受電器の電流値と負荷抵抗により求めることができる. 結合器に損失がなく、送電器および中継器を等間隔に配置したマルチホップ電力伝送では、ホップ数の偶奇性によって2状態に分けることができる [8]. そこで、偶数または奇数ホップにおける受電器の電流値を導出する. 偶数ホップおよび奇数ホップ電力伝送の等価回路は図1であり、複数結合器との結合の影響を検討するため受電器は2つの結合器と結合している. 等価回路においてキルヒホッフの電圧則を用いると、奇数ホップは式 (1)、偶数ホップは式 (2) となる.

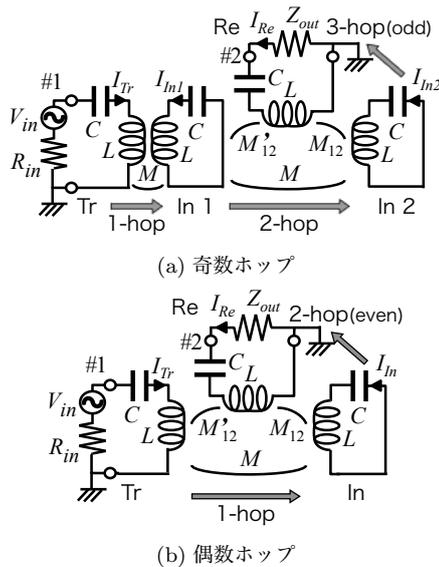


図1 マルチホップ電力伝送の等価回路 (Tr: 送電器, In: 中継器, Re: 受電器)

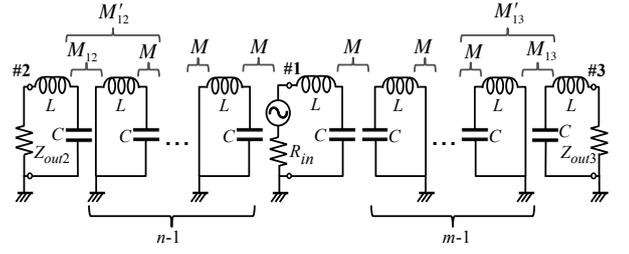


図2 複数受電器におけるマルチホップ電力伝送の等価回路

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{in} + \alpha & j\omega M & 0 & 0 \\ j\omega M & \alpha & j\omega M & j\omega M'_{12} \\ 0 & j\omega M & \alpha & j\omega M_{12} \\ 0 & j\omega M'_{12} & j\omega M_{12} & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Tr} \\ I_{In1} \\ I_{In2} \\ I_{Re} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\alpha = j\omega L - j\frac{1}{\omega C}$$

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{in} + \alpha & j\omega M & j\omega M'_{12} \\ j\omega M & \alpha & j\omega M_{12} \\ j\omega M'_{12} & j\omega M_{12} & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Tr} \\ I_{In} \\ I_{Re} \end{bmatrix} \quad (2)$$

この式において受電器の電流 I_{Re} を共振周波数において算出すると、偶数および奇数ホップに分けて以下の式となる [9].

$$I_{Re} = \begin{cases} \frac{\omega_0 M_{12}}{R_{out2} - j2\omega_0 M_{12} M'_{12}/M} I_{Tr}, & (n : \text{odd}) \\ \frac{M}{M_{12}} I_{Tr}, & (n : \text{even}) \end{cases} \quad (3)$$

偶数ホップにおける受電器の電流は M'_{12} を含んでいないため、複数結合器との結合の影響を受けない. 一方、奇数ホップにおける受電器の電流は M'_{12} を含んでいるため、複数結合器との結合の影響を受ける.

次に、マルチホップ電力伝送における複数受電器への電力分配比を導出する. 図2に複数受電器における電力伝送の等価回路を示す. 図2の等価回路では、受電器2へ n ホップ、受電器3へ m ホップで電力伝送する. 電力分配比 $\eta_{21} : \eta_{31}$ を受電器の電流 I_2, I_3 および負荷 Z_{out2}, Z_{out3} を用いて以下のように定義する.

$$\eta_{21} : \eta_{31} = |S_{21}|^2 : |S_{31}|^2 = |I_2|^2 Z_{out2} : |I_3|^2 Z_{out3} \quad (4)$$

式 (4) に式 (3) を、 n, m がそれぞれ偶数および奇数の場合を代入すると式 (5) となり電力分配比が求まる. 電力分配比は Z_{out2} および Z_{out3} に依存しているため、 Z_{out2}, Z_{out3} を調節することにより電力分配比を制御することができる. 他励型受電器を用いる場合は、コイル・ループ間距離によって Z_{out2} および Z_{out3} を変化させ、電力分配比を制御できる. ホップ数 n, m のどちらかが奇数である場合は、複数結合器との結合 M'_{12} を考慮し電力分配を制御する必要が生じる.

$$\eta_{21} : \eta_{31} =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{\omega_0 M_{12}}{Z_{out2} - j2\omega_0 M_{12} M'_{12}/M} \right|^2 Z_{out2} \\ \vdots \\ \left| \frac{\omega_0 M_{13}}{Z_{out3} - j2\omega_0 M_{13} M'_{13}/M} \right|^2 Z_{out3}, \quad (m, n: \text{odd}) \\ \left| \frac{\omega_0 M_{12}}{Z_{out2} - j2\omega_0 M_{12} M'_{12}/M} \right|^2 Z_{out2} : \frac{M^2}{M_{13}^2} Z_{out3}, \\ (n: \text{odd}, m: \text{even}) \\ \frac{Z_{out2}}{M_{12}^2} : \frac{Z_{out3}}{M_{13}^2}, \quad (n, m: \text{even}) \\ \frac{M^2}{M_{12}^2} Z_{out2} : \left| \frac{\omega_0 M_{13}}{Z_{out3} - j2\omega_0 M_{13} M'_{13}/M} \right|^2 Z_{out3}, \\ (n: \text{even}, m: \text{odd}) \end{array} \right. \quad (5)$$

2.2 他励型受電器による電力分配

励振ループと共振コイルで構成される他励型受電器の等価回路は図 3(a) に示すように 2 つの直列共振回路で表すことができる。図 3(a) において L, C は共振コイルの自己インダクタンスおよび線間容量, L_l, C_l は励振ループの自己インダクタンスおよび共振周波数を調節するために挿入されたキャパシタである。共振周波数において励振ループと共振コイルにトランスの回路変換 [10] を用いると図 3(b) となり, 共振コイルに誘導される負荷 Z_{out} は以下の式で表される。

$$Z_{out} = \frac{\omega_0^2 M_{cl}^2}{R_{out}} \quad (6)$$

Z_{out} は励振ループと共振コイルの相互インダクタンス M_{cl} に依存するため, コイル・ループ間距離によって共振コイルに誘導される負荷を制御できる。そこで, 共振コイルに誘導される負荷 Z_{out} による電力分配手法を導出する。電力分配比 $\eta_{21} : \eta_{31}$ を $R_{21} : R_{31}$ とし, 奇数対偶数ホップおよび偶数対偶数ホップの場合を検討する。この際の電力分配比は式 (5) の ($n: \text{odd}, m: \text{even}$) および ($n, m: \text{even}$) である。まず, 奇数対偶数ホップにおいて Z_{out2} について解くと,

$$Z_{out2} = \frac{R_{31}\omega_0^2 M_{12}^2 M_{13}^2 \pm \omega_0 M_{12} \sqrt{X}}{2R_{21} M^2 Z_{out3}} \quad (7)$$

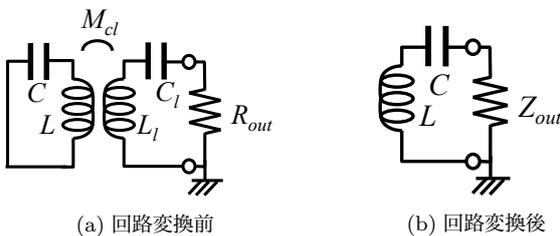


図 3 他励型受電器の等価回路

$$\text{where, } X = R_{31}^2 \omega_0^2 M_{12}^2 M_{13}^4 - 16R_{21}^2 M_{12}^2 M^2 Z_{out3}^2 \geq 0 \quad (8)$$

となる。 X が負となる場合は解が複素数となるが, Z_{out2} は式 (6) より実数となるため電力分配比を制御できない。 X が負となる原因は式 (8) の右辺第二項であり, 複数結合器との結合 M'_{12} によるものである。右辺第二項は Z_{out3} を含んでいるので, Z_{out2} が実数解となるよう Z_{out3} を制御することにより電力分配比の制御が可能となる。

次に, 偶数対偶数ホップにおいて Z_{out2} について解くと,

$$Z_{out2} = \frac{R_{21} M_{12}^2}{R_{31} M_{13}^2} Z_{out3} \quad (9)$$

となる。偶数ホップでは電力分配比に複数結合器との結合が影響しないため, Z_{out2} は M'_{12} に依存しない。式 (9) は常に実数解であるため, Z_{out2} がコイル・ループ間距離の制御により実現可能な範囲であれば, 片側の受電器により電力分配比を制御できる。

3. 電磁界シミュレーション

他励型受電器による電力分配手法を電磁界シミュレータ WIPL-D を用いてシミュレーションする。誘導抵抗により電力分配比を制御するためにコイル・ループ間距離と誘導抵抗の関係を知る必要がある。そこで, 他励型受電器のコイル・ループ間距離と誘導抵抗の関係を測定する。その後, 他励型受電器を用いた電力分配のシミュレーションを行う。シミュレーションでは表 1 のシミュレーション欄に示す結合器を使用する。

3.1 他励型受電器

励振ループに 50Ω を挿入した場合の共振周波数におけるコイル・ループ間距離 d と誘導抵抗 Z_{out} の関係をシミュレーションにより求める。励振ループと共振コイルを同軸上に配置し, コイル・ループ間距離を変化させた際の誘導抵抗を測定する。図 4 にシミュレーションより求めた誘導抵抗とコイル・ループ間距離の関係を示す。共振コイルの上部と共振コイルとの距離をコイル・ループ間距離 d とした。誘導抵抗とコイル・ループ間距離は反比例に似た関係となった。式 (6) より, コイル・ループ間距離が増加すると M_{cl} が低下するため, 誘導抵抗はコイル・ループ間距離の増加により低下する。

3.2 電力分配

他励型受電器を用いて, 奇数対偶数ホップおよび偶数対偶数

表 1 結合器の構成

	Simulation		experiment	
	Resonator	Loop-coil	Resonator	Loop-coil
Structure	16-cornered helical		Circular helical	
Diameter	30 cm			
Lead radius	1.5 mm			
Material	Perfect conductor		Copper	
Turns	7	1	7	1
Height	7.8 cm	-	9 cm	-
Resonant frequency	14.3 MHz			

ホップにおいて電力分配する。図5にシミュレーションする電力伝送モデルを示す。奇数対偶数ホップでは受電器2へ3ホップ、受電器3へ2ホップで、偶数対偶数ホップでは受電器2, 3共に2ホップで電力伝送する。送電器と中継器は7 cmで等間隔に配置する。受電器2を中継器1の同軸上から5 cm間隔で送電器方向へ30 cm移動させた。この時、電力分配比 $\eta_{21} : \eta_{31}$ が4 : 6となるよう複数結合器との結合を考慮した場合としない場合で誘導抵抗を算出する。そして、誘導抵抗が算出した値となるようコイル・ループ間距離を調節し電力分配を行った。

電力分配のシミュレーションより測定した軸ずれ a と共振周波数における電力分配比の関係を図6, 7, その際のコイル・ループ間距離 d を図8, 9に示す。図6, 7において、棒グラフは反射損失 η_{11} および受電器2, 3への伝送効率 η_{21}, η_{31} を、折れ線グラフは受電器2への電力分配比 R_{21} を表している。受電器2への電力分配比 R_{21} は $\eta_{21}/(\eta_{21} + \eta_{31}) \times 100\%$ であり、本シミュレーションでは目標値を40%としている。図6(a)より、奇数ホップにおいて複数結合器との結合を考慮しない場合では軸ずれが大きくなるにつれ電力分配比と目標値との差が大きくなる。一方図6(b)では、複数結合器との結合を考慮することにより軸ずれ0~25 cmにおいて誤差5%以内で電力分配比を制御できている。軸ずれが30 cmと大きい場合においても誤差は8%程度であった。この結果より、奇数ホップ電力伝送において電力分配する場合は、複数結合器との結合を考慮する必要があることが分かる。偶数ホップでは複数結合器との結合は電力分配比へ影響しないため、図7に示すように複数結合器との結合を考慮しなくても、軸ずれ0~20 cmにおいて誤差5%以内で電力分配比を制御できている。しかし、軸ずれが25~30 cmと大きい場合では電力分配比が目標値から外れている。この原因として、理論式を導出する際に簡単化のために無視したクロスカップリングなどが電力分配比へ影響したためだと考えられる。図6(b), 7において、軸ずれが大きくなると受電器2, 3への伝送効率が低下している。これは、不整合によって反射損失が増加したことが原因であり、伝送効率を維持するためには電源側において整合を取る必要がある。

4. 実機実験

他励型受電器による電力分配を実機実験により評価する。まず、実機実験に用いる他励型受電器のコイル・ループ間距離と誘導抵抗の関係測定する。その後、他励型受電器を用いて電力分配を行う。実機実験では表1の実験欄に示す結合器を使

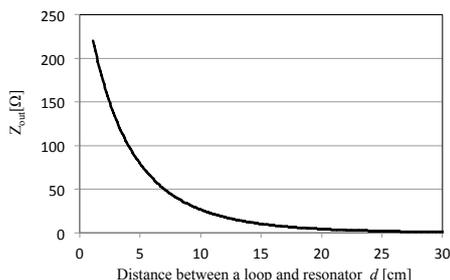


図4 コイル・ループ間距離と誘導抵抗 Z_{out} の関係 @共振周波数

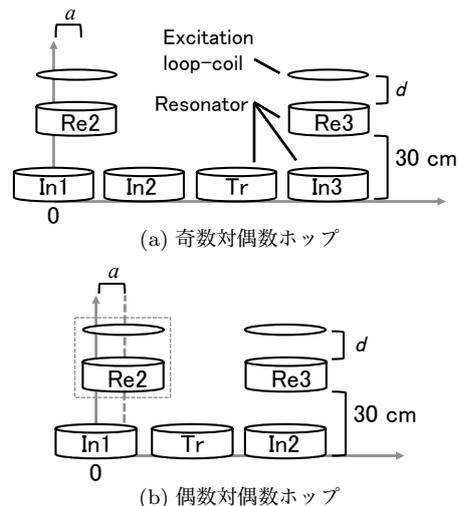
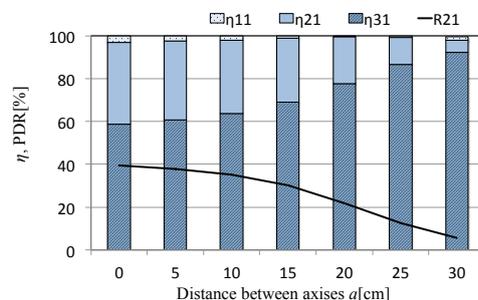
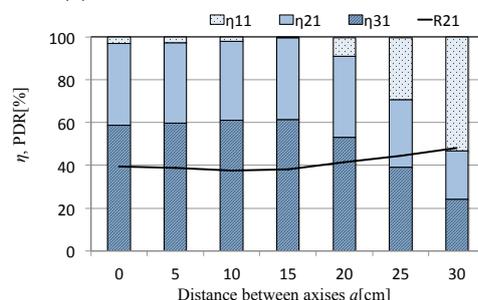


図5 電力伝送モデル (Tr: 送電器, In: 中継器, Re: 受電器)



(a) 複数結合器との結合を考慮しない場合



(b) 複数結合器との結合を考慮した場合

図6 奇数対偶数ホップにおける軸ずれと伝送効率および電力分配比の関係 @共振周波数

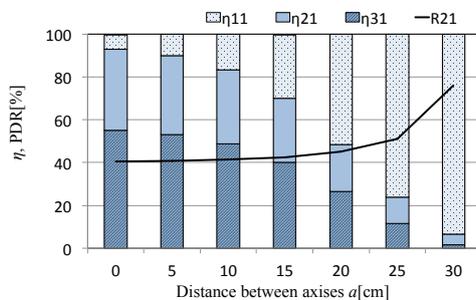
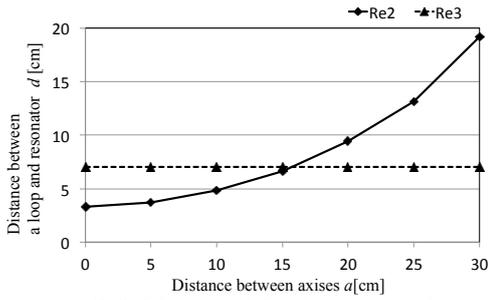
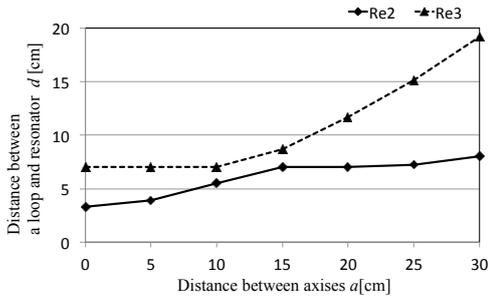


図7 偶数対偶数ホップにおける軸ずれと伝送効率および電力分配比の関係 @共振周波数

用し、ベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて測定する。



(a) 複数結合器との結合を考慮しない場合



(b) 複数結合器との結合を考慮した場合

図 8 奇数対偶数ホップにおける軸ずれとコイル・ループ間距離の関係

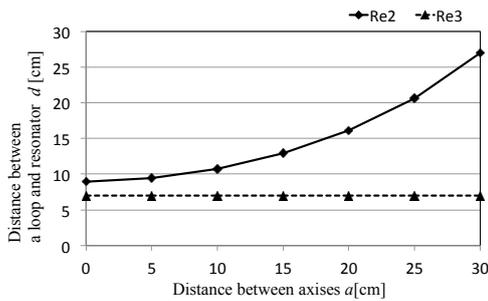


図 9 偶数対偶数ホップにおける軸ずれとコイル・ループ間距離の関係

4.1 他励型受電器

励振ループに 50Ω を挿入した場合のコイル・ループ間距離 d と誘導抵抗 Z_{out} の関係を実機実験により求める。励振ループと共振コイルを同軸上に配置し、コイル・ループ間距離を変化させた際の誘導抵抗を測定する。図 10 に実機実験より求めた誘導抵抗とコイル・ループ間距離の関係を示す。シミュレーションと同様に、誘導抵抗とコイル・ループ間距離は反比例に似た関係となった。

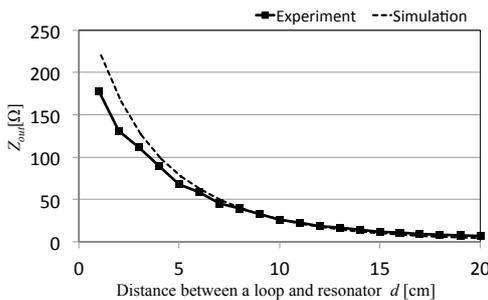


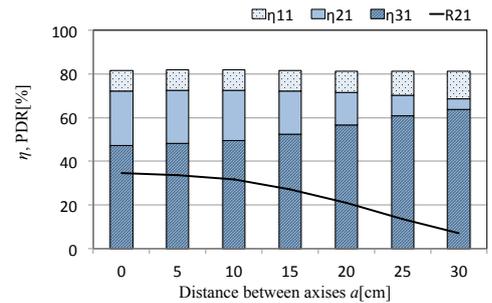
図 10 コイル・ループ間距離と誘導抵抗 Z_{out} の関係: 実機実験 @共振周波数

4.2 電力分配

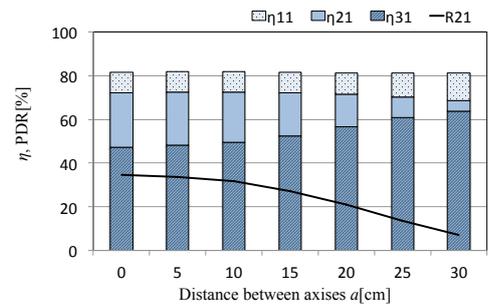
他励型受電器を用いて電力分配を行う。シミュレーションと同様の電力伝送モデル (図 5) を使用したが、送電器や中継器の間隔はシミュレーションと異なり 9 cm とした。これは、送電器を水平に並べて配置した際に整合が取れる距離であり、シミュレーションと結合器の構造が異なるため送電器や中継器の間隔が異なる。受電器 2 を中継器の同軸上から 5 cm 間隔で送電器方向へ 30 cm 移動させた際に、電力分配比 $\eta_{21} : \eta_{31}$ を $4 : 6$ に制御する。実験風景を図 11 に、実機実験より測定した軸ずれ a と電力分配比の関係を図 12, 13 に、その際のコイル・ループ間距離 d を図 14, 15 に示す。実験結果はシミュ



図 11 奇数対偶数ホップの実験風景



(a) 複数結合器との結合を考慮しない場合



(b) 複数結合器との結合を考慮した場合

図 12 奇数対偶数ホップにおける軸ずれと伝送効率および電力分配比の関係: 実機実験 @共振周波数

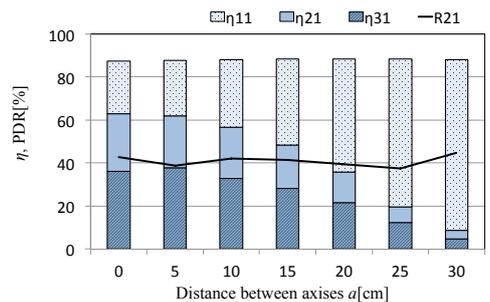


図 13 偶数対偶数ホップにおける軸ずれと伝送効率および電力分配比の関係: 実機実験 @共振周波数

レーションと同様の傾向となった。図 12(b) より、奇数対偶数ホップにおいて複数結合器との結合を考慮することによって軸ずれ 0~25 cm において電力分配比を誤差 6 % 以内に制御できた。奇数対偶数ホップ (図 12(b)) の軸ずれが小さい範囲 (0~20 cm) において受電器 2 への電力分配比 R_{21} が 40 % より低下している。これは、受電器 2 と受電器 3 へのホップ数の差により生じるホップ損失の差が原因の 1 つとして考えられる。ホップ数の差が更に増加すると、電力分配比が所望の値から大きくずれる可能性がある。そのため、損失が生じる実環境で電力分配を行う際はホップ数の差を考慮する必要があると考えられる。軸ずれが大きい範囲 (20~30 cm) では、受電器 2 への電力分配比が増加している。これは、電力分配比の制御において受電器 3 のコイル・ループ間距離が大きくなることにより受電器 3 への伝送損失が増加し、相対的に受電器 2 への電力分配比が増加したことが原因の 1 つと考えられる。したがって、電力分配比を制御するためにコイル・ループ間距離を大きくすることは伝送損失を増加させ、電力分配比の誤差を生む可能性がある。図 13 より、偶数対偶数ホップでは全範囲において誤差 5 % 以内に制御できた。実機実験においても偶数ホップでは複数結合器との結合を考慮する必要がないことを確認できた。以上の結果より、他励型受電器による電力分配比の制御が可能であることが実機実験からも確認できた。

5. まとめ

本研究では複数受電器へのマルチホップ無線電力伝送において他励型受電器を用いた電力分配手法を検討し、コイル・ループ間距離の制御により電力分配が可能であることを明らかにした。奇数ホップ電力伝送を含む場合では、複数結合器との結合を考慮してコイル・ループ間距離を調節することにより、実機実

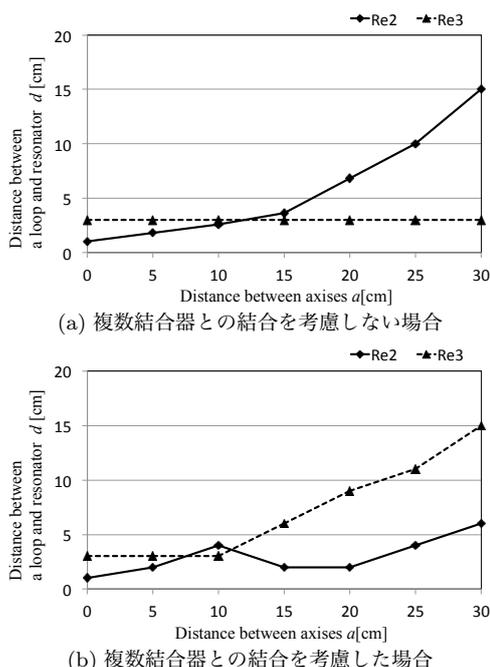


図 14 奇数対偶数ホップにおける軸ずれとコイル・ループ間距離の関係: 実機実験

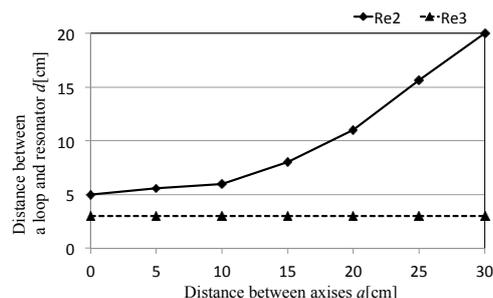


図 15 偶数対偶数ホップにおける軸ずれとコイル・ループ間距離の関係: 実機実験

験において軸ずれ 0~25 cm の範囲で電力分配比を誤差 6 % 以内で制御できた。偶数ホップ電力伝送のみの場合では、複数受電器との結合を考慮せずに電力分配比を制御でき、軸ずれが 30 cm 生じて誤差は 5 % 以内であった。しかし、各受電器へのホップ数が大きく異なる場合では、ホップ損失によって制御した電力分配比から大きな誤差が生じる可能性が示唆された。

文 献

- [1] Tadahiro Kuroda, "Wireless Power Transfer," IEICE, Vol. 93, No. 11, 2010. (in Japanese)
- [2] A.Kurs, *et al.*, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," SCIENCE, Vol. 317, 2007.
- [3] Benjamin L. Cannon, *et al.*, "Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means For Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 7, Jul. 2010.
- [4] Takehiro Imura, Yoichi Hori, "Optimization Using Transmitting Circuit of Multiple Receiving Antennas for Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling," INT-ELEC, Oct. 2011.
- [5] Koh Kim Ean, *et al.*, "Novel Band-Pass Filter Model for Multi-Receiver Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling and Power Division," WAMICON, Apr. 2012.
- [6] Koh Kim Ean, *et al.*, "Multi-receiver and Repeater Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling - Impedance Matching and Power Division Utilizing Impedance Inverter," ICEMS, Oct. 2012.
- [7] 早馬 道也, 他, "マルチホップ無線電力伝送を用いた複数受電器への電力分配," 信学ソ大 B-1-42, 2013.
- [8] Akio Shimada, *et al.*, "Effect of the Parity of the Hop Count on Power Division in Multi-hop Power Transfer via Magnetic Resonance," IWPTc, May 2013.
- [9] 島田 晃郎, 他, "複数の共振器と結合した受電器への磁界共鳴型マルチホップ無線電力伝送における電力分配," 信学ソ大 B-1-43, 2013.
- [10] Sanghoon Cheon, *et al.*, "Circuit-Model-Based Analysis of a Wireless Energy-Transfer System via Coupled Magnetic Resonances," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 7, Jul. 2011.
- [11] Huy Hoang, *et al.*, "An Adaptive Technique to Improve Wireless Power Transfer for Consumer Electronics," IEEE ICCE, Jan. 2012.
- [12] Chi Kwan Lee, *et al.*, "Effects of Magnetic Coupling of Non-adjacent Resonators on Wireless Power Domino-Resonator System," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 4, Apr. 2012.