

共振型無線電力伝送システムの伝送効率最大化

小坂 修平[†] 石崎 俊雄[‡] 栗井 郁雄[‡]

[†] 龍谷大学理工学部 〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5

[‡] 株式会社リューテック 〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷 1-5

E-mail: [†] ishizaki@rins.ryukoku.ac.jp, [‡] awai@ryutech.com

あらまし 共振型無線電力伝送システムにおいて、伝送効率を最大化するために損失要因の解析を行った。スパイラル共振器とループ寸法の関係により、スパイラル共振器の無負荷 Q 値や共振周波数がどのように変化するかを観測することによって、スパイラル共振器とループの結合の状態を推測した。その結果に基づき、強結合の場合のシステムの損失はループ金属体の表面に流れるループ電流の抵抗損であるという仮説を立てた。抵抗損を減らすために、ループ導体を直径の太い銅パイプに置き換えることにより、無負荷 Q 値が改善されることを確認した。

キーワード 伝送効率, 無負荷 Q, 損失, ループ, 銅パイプ

Maximization of Transmission Efficiency for Resonator-coupled WPT System

Syuhei KOSAKA[†] Toshio ISHIZAKI[†] and Ikuo AWAI[‡]

[†] Faculty of Science & Technology, Ryukoku University 1-5 Yokotani, Seta Oe-cho, Otsu, Shiga, 520-2194 Japan

[‡] Ryutech Corporation 1-5 Yokotani, Seta Oe-cho, Otsu, Shiga, 520-2194 Japan

E-mail: [†] ishizaki@rins.ryukoku.ac.jp, [‡] awai@ryutech.com

Abstract The transmission efficiency of the resonator-coupled wireless power transfer system is studied. The loss factors are analyzed based on variations of the unloaded Q-factor and the resonance frequency of the spiral resonator due to the effect of the loop size. The coupling mechanism through the electromagnetic field is estimated from the results. We make the hypothesis which tells that the main cause of the loss is due to the ohmic loss of the surface current on the thin loop metal, when the coupling is very strong. Then, by replacing the thin loop metal with copper pipe, we confirm the improvement of unloaded Q-factor of the spiral resonator.

Keyword Transmission efficiency, unloaded Q, Loss, Loop, Copper pipe

1. まえがき

共振型無線電力伝送システムは、電磁誘導方式と比べるとかなりの距離を低損失で伝送できるのが特徴である。また、使用する共振器の無負荷 $Q(Q_u)$ と結合係数 (k) の積が大きいほど伝送効率が高いことが知られている [1]。しかし、システム構築時の Q_u の低下に対する配慮が足りないと、いくら共振器を近づけて k を大きくしても効率が上昇しないという結果を招くことになる。

著者らは、共振型無線電力伝送システムで 96.7% の効率を達成したことを既に報告している [2]。しかし、それ以上の効率向上はなかなか難しく、本質的な損失原因の追究が不可欠であった。そこで今回、さらなる伝送効率の向上を目指し、損失のメカニズムを検討したので、その結果について報告する。

まず、スパイラル共振器の直径とループ・スパイラル共振器間の距離を固定し、ループの直径を様々に変えて、無負荷 Q 値、外部結合係数、共振周波数の変化

を測定する。また、異なる直径のスパイラル共振器について同様の測定を行い、スパイラル共振器の直径で規格化したループの大きさで比較することにより、ループが共振器とやり取りをしている電磁界エネルギーについて考察を行う。その結果に基づき、エネルギー損失の原因を割り出し、低損失化、すなわち伝送効率の向上を目指す。

2. 共振型無線電力伝送システムの構成

図 1 に共振型無線電力伝送システムの構成を示す。図 1 左方にある信号源から入力された高周波エネルギーはまず送信側ループに供給され、距離 a に対応する結合度でインピーダンス変換されて、送信側スパイラル共振器に伝達される。送信側共振器と受信側共振器は、伝送距離 d に対応する結合度でエネルギーが伝送される。さらに、受信側ループへインピーダンス変換されて伝達され、最終的に負荷抵抗でエネルギーは消費される。

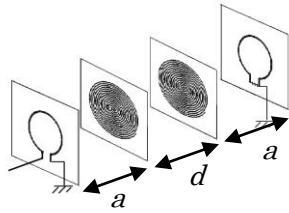


図 1. 共振型無線電力伝送システムの構成

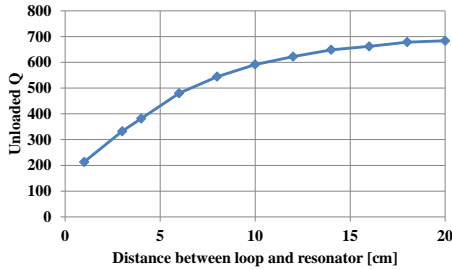


図 2. ループの影響による無負荷 Q 値の劣化

図 2 は、ループの影響による無負荷 Q 値の劣化の様子を示している。無負荷 Q 値の測定では、信号源抵抗によるエネルギー損失は除外されているので、この Q 値の劣化はそれ以外の何らかのエネルギー損失が発生していることを示している。

これまでの検討により、伝送効率 は結合係数と無負荷 Q_u 値の積で決まるが、段間結合係数 k と外部結合係数 k_e は等しくした場合に最小損失が得られるので、 $k_e * Q_u$ を最大化することが重要である[1]。外部結合係数 k_e はループ・共振器間距離が狭い時に大きくなるので、図 2 の Q 値の劣化が看過できないことになる。

そこで、ループ・共振器間距離が狭い時に無負荷 Q 値を高くする方法を、損失発生 のメカニズムを考えることによって検討する。

3. ループがスパイラル共振器に与える影響

スパイラル共振器の直径とループ・スパイラル共振器間の距離を固定し、ループの直径を様々に変えて、無負荷 Q 値、外部結合係数、共振周波数の変化を測定していく。共振器とループは共に線径 1mm の銅線で製作した。

図 3 は、ループ・スパイラル共振器間距離を 1cm とした時のループ・サイズを変化させた時の無負荷 Q 値を示している。スパイラル共振器の直径は、14.5cm、16.5cm、21.5cm の 3 種類について測定し、それぞれ 3 本の線で示している。横軸は、スパイラル共振器の直径で規格化したループの直径を示している。共振器上の電磁界分布がスパイラル直径でスケールされているとすれば、規格化サイズを用いれば、共振器の直径によらず、同一の傾向を示すはずである。測定結果を見ると、若干のずれは認められるものの、ほぼ同じ

傾向を示し、ループの規格化直径 0.7~0.8 において無負荷 Q 値は最低となり、それより大きくても小さくても劣化は少ないことが分る。

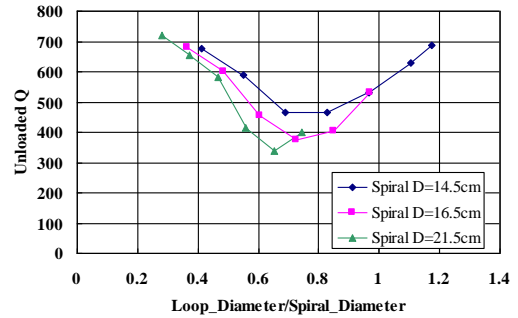


図 3. ループ・サイズと無負荷 Q の関係

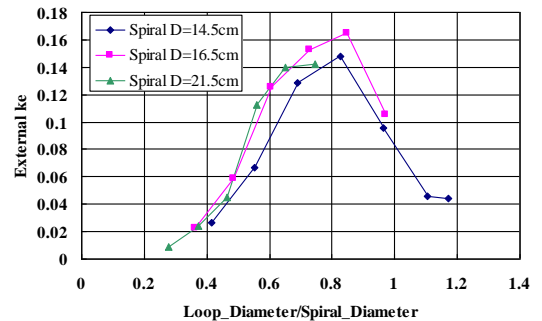


図 4. ループ・サイズと外部結合係数 k_e の関係

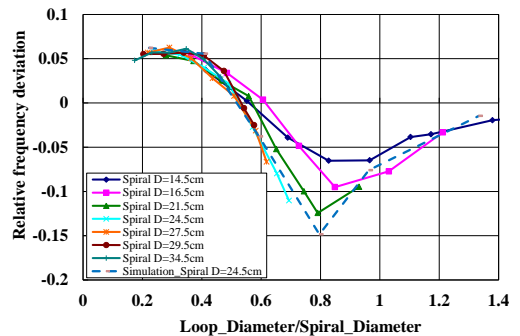


図 5. ループ・サイズと規格化共振周波数変化の関係

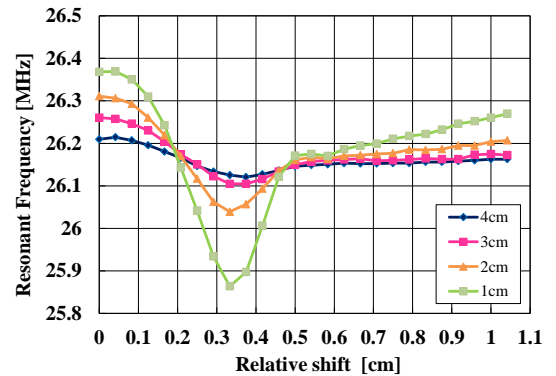


図 6. 金属板を近づけたときの共振周波数の変化

図4は、ループ・サイズと外部結合係数 k_e の関係を測定した結果を示している。グラフの見方は、図3と同じである。図4を見ると、外部結合係数 k_e は、ループの規格化直径 0.7~0.8 において最大となっており、図3における無負荷 Q 値の最小点と一致している。このことは、無負荷 Q 値の劣化の要因がループに由来するものであることを示唆している。

同様に、図5ではループ・サイズと規格化共振周波数変化の関係を測定した結果を示している。図の見方は、前2図と同じであるが、縦軸は、ループ・スパイラル間距離が 11cm から 1cm まで近づけたときの共振周波数変化を 11cm の時の共振周波数で割り算して規格化したものである。これについては、ループの規格化直径 0.8~0.9 において最も共振周波数が低くなっている。また、これよりループが大きい領域ならびに小さい領域では変化は小さくなっている。0.8 から 0.9 というポイントは、前2図と比べると 0.1 程度のずれはあるが、ループの規格化直径が 0.8 付近で何か特徴的な現象が起きていることは間違いない。ループ・サイズが小さくなって、0.6 付近ではほとんど共振周波数の変化が起きない特異点がある。これよりループが小さいと、逆に共振周波数は高くなっている。さらに、図中で Simulation と書かれている線は、直径 24.5cm の共振器に対して境界要素法を用いて電磁界シミュレーションから求めた結果である。共振周波数の挙動は、シミュレーションでもよく再現できていることがわかる。

さらに、図6は、大きさ 5cm 角の銅板をスパイラル共振器の面に平行に近づけた時の共振周波数の変化を測定したものである。銅板の大きさがループの線径に比べるとはるかに大きいため一概に比較はできないが、周波数変化の傾向としては中心から上がって下がって元に戻るというところが一致しており、ループが金属体として共振器に影響を与えていることが考えられる。

4. パイプ型ループによる損失の低減検討

以上の結果を総合的に考えると、ループが金属体として共振器の周辺の電界分布あるいは磁界分布と相互作用することによって共振器の無負荷 Q 値を劣化させているという可能性が大である。そのような仮説を立てると、規格化サイズ 0.8 のループは共振器の磁界分布が最も強い場所に位置しているため、磁界と直交する誘導電流がループの周回方向に流れて抵抗損を発生させているという結論に帰着する。スパイラル・コイルは巻線の両端を開放としているため、コイルの中央部と円周部で電界が最大となり、巻線の中央部で磁界が最大になっていると考えられる。その巻線の中央部

がちょうどコイル直径の 0.8 倍付近にくることからも仮説の正しさが裏付けられる。

さらに、共振周波数の変化についても、電界でループと結合している中央部と円周部についてはループのインダクタンスが結合のキャパシタンスを介して共振器にぶら下がることによって共振周波数が上昇し、磁界で結合している 0.8 付近ではインダクタンスを介してぶら下がることによって共振周波数が下降するという説明がつけられる。

そこで、この仮説が正しいとすると、無負荷 Q 値を劣化させないためには、ループの周回電流に対する抵抗損を小さくすることが有効であろうと推測される。そのためにはループ巻線を太くすれば良い。実際には表皮効果があるため、銅パイプを用いることにする。

直径 1cm の銅パイプを用いて作ったループを使って、スパイラル共振器の無負荷 Q 値を測定した。測定結果を図7に示す。銅パイプと銅線で若干外部結合係数 k_e に違いが生じるので横軸は外部結合係数 k_e として表示した。

結果を見ると無負荷 Q 値が約 50%改善されており、銅パイプの効果を確認することができた。

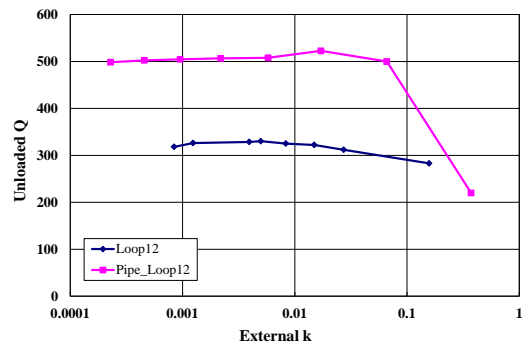


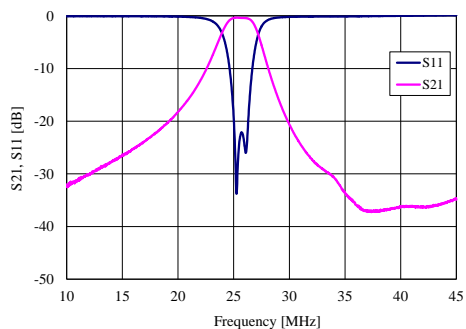
図7. 銅パイプと銅線ループの無負荷 Q 値の比較

5. システム特性の検証

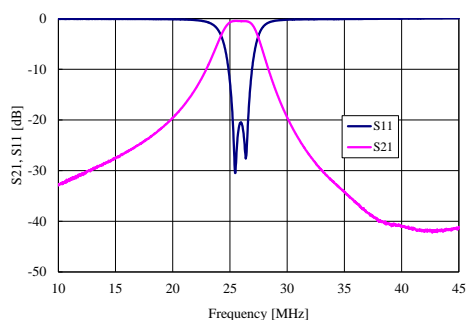
無負荷 Q 値改善の目途がついたので、これを用いて無線電力伝送システムでの動作を検証した。ただし、原因はわからないが前回[2]の報告で用いた共振器より図7の共振器は無負荷 Q 値が低いため、銅パイプと銅線の相対比較を行った。

図8に測定結果を示す。銅パイプの時の伝送損失は 0.343dB であり、効率は 92.4%であった。一方、銅線の時の伝送損失は 0.455dB であり、効率は 90.1%であった。両者の間には約 2.3%の効率差があり、銅パイプのほうが良くなっている。一方、フィルタの理論式から予測される伝送損失と効率を計算してみると、銅パイプの場合は 0.116dB と 97.4%、銅線の場合は 0.207dB と 95.3%となり、約 2.1%の効率改善が図られることになる。実測とシミュレーションの改善度合いはほぼ一

致しているため、これは銅パイプを用いて無負荷Q値が向上したことによる改善であると結論付けられる。



(a) 銅パイプ



(b) 銅線

図8. 銅パイプと銅線の伝送特性の比較

文 献

- [1] A. Karalis, J. D. Joannopoulos and M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", *Ann. Phys.*, vol.323, no. 1, pp.34--48, Jan. 2008
- [2] 小坂他, "共振器結合型 WPT システムの伝送効率最大化", 2011年電子情報通信学会総合大会, BS-2-8, S32-33, 2011年.
- [3] 栗井, 小森, "共振器結合型ワイヤレス給電の簡便な設計", *電学論 C*, 130, 12, pp. 2198-2202, Dec. 2010.

6. まとめ

共振型無線電力伝送システムにおいて、伝送効率を最大化するための損失要因の解析を行った。その結果、スパイラル共振器とループが磁界結合した時に生じる誘導電流による抵抗損が原因であることがわかった。スパイラル共振器とループ寸法の変えを繰り返して観測したスパイラル共振器の無負荷Q値や共振周波数の変化はこの結論を支持するものであった。ループの抵抗損を減らすため、線径1mmの銅線を直径1cmの銅パイプに置き換えて無負荷Q値を測定したところ、約50%の無負荷Q値の改善が見られた。これらのループを使って無線電力伝送システムの伝送効率を比較したところ、効率が約2.3%向上した。したがって、ループの抵抗損を下げることは、システムの伝送効率改善に有効であると言える。

今回は、用いたスパイラル共振器の無負荷Q値が低く伝送効率の最高値の更新はならなかったが、計算上は効率99%も期待できることがわかった。今後とも引き続き検討を続け、効率の最高値を追求していく。