

共振を使う磁気結合ワイヤレス給電技術の効率について

安倍 秀明 小笠原 潔 西村 太 太田 智浩 北村 浩康 鈴木 真美

パナソニック電気株式会社 〒571-8686 大阪府門真市大字門真 1048

E-mail: abe.hideaki-@jp.panasonic.com

あらまし 小出力で近接型のワイヤレス充電システムが市場に普及しはじめ、中・長ギャップ間を給電する共振を積極活用したワイヤレス給電技術については、研究開発が加速している。これらは今後高出力化の研究開発が進められると考えられる。一方、無接点で空間を介して給電されるイメージにより効率の低さが心配されている。しかし、電磁誘導を利用するワイヤレス給電では効率重視の視点でシステム構成や設計を最適化すれば、スイッチング電源等の高周波インバータを利用するシステムと同等レベルの効率に近づけられる。本稿では効率の一般論を述べた後、スイッチング電源とワイヤレス給電の本質的な差異を述べ、効率に関わる要素とその特性を述べる。kHz帯、MHz帯での実証特性を示し高効率が可能なことを示す。

キーワード ワイヤレス電力伝送, 磁気結合, 総合効率, 伝送効率, 磁気共鳴

Efficiency of Wireless Energy Transfer System Using Resonance

Hideaki ABE Kiyosi OGASAWARA Futoshi NISHIMURA

Tomohiro OTA Hiroyasu KITAMURA and Mami SUZUKI

Panasonic Electric Works Co.,Ltd. 1048, Kadoma, Osaka 571-8686, Japan

E-mail: abe.hideaki-@jp.panasonic.com

Abstract Wireless energy transmission technique, which is the transmission of electrical energy from a power source to an electrical load without interconnecting conductors, is attracting attention as improvement of convenience. A short-distance wireless charging system of low power becomes widely used in the market, and a middle -distance wireless transmission technique with resonant coupling has been developed toward high power. With wireless energy transfer, efficiency is more significant problem. Efficiency of wireless energy transfer by electromagnetic induction can be improved close to a high-frequency inverter system such as switching power supply through system design with emphasis on efficiency. In this paper, we describe an efficiency characteristic of wireless energy transfer and a difference between switching power supply and wireless energy transfer. It is shown that wireless energy transfer can be obtained the high efficiency of more than 80 percent through the measured results in kHz and MHz range.

Keyword Wireless energy transfer, Magnetic coupled, Total efficiency, Transmission efficiency, Magnetic resonance

1. まえがき

ワイヤレス給電技術の開発や実用化が加速している。一方近年の省電力化の要請に対して、電気機器の民生用途への実用化には一般に高効率を維持する必要がある。電磁誘導利用のワイヤレス給電では、無接点で絶縁物や空間を介して電力伝送する形態から、有線式に対して効率が大きく低下するイメージをもたれがちである。数mm～数cm間の給電を対象にする近接型と、数cmから数十cm程度を対象にする空間型のタイプがあるが、効率重視の視点でシステムや要素技術設計を最適化すれば、高い効率の達成も可能である。電磁誘導利用の商品は1980年代前半に登場した電動

歯ブラシ用が初と考えている。当時の効率は数%程度であったようだ。1990年代から応用が増えると共に高効率の高周波スイッチング電源技術、共振を使う負荷整合技術、コイル間の磁気結合度を上げる技術等が研究開発され部品性能の向上とともに最適設計により効率は飛躍的に向上してきた。^[1]特に近接型では同じ高周波を利用する有線式のスイッチング電源やインバータと同等レベルになり90%を超える設計も可能である。本稿では効率に関する一般的留意点を示した後、ワイヤレス給電システムとスイッチング電源との本質的な差異を示し効率向上の重要要因を示す。これらを踏まえてkHz帯とMHz帯における実証結果を示す。

2. 効率の定義と留意点

2.1. 効率の定義

通常使われる効率とは入力電力（有効電力）に対する出力電力（有効電力）の比である。入力電力は出力電力と損失の和である。実際の系では無効電力が介在するが、効率の定義上では、この成分は無関係である。

2.2. 効率の特性と損失成分について

図1に出力電力に対する効率 η の関係を示す。損失は、無負荷損失（一般に固定損）と負荷損失（変動損）に分けられる。損失はパワー回路の抵抗や半導体素子の電圧降下分が小さいほど小さくなり、同じ負荷電力を得る場合、一般に系の電圧が高く電流が小さい程小さくできる。電磁誘導利用のシステムでは、負荷電流とは別に1次コイルに磁束を発生させるための励磁電流を流す必要がある。1次、2次コイル間の磁気的な結合が高い場合には、負荷電流値に無関係にほぼ一定値とみなせるが、低い場合には、回路構成に連動して変化する。励磁電流成分による損失は無負荷損であり1次コイルの励磁損失（銅損と鉄損）と、高周波の励磁電流を流すための回路損失が主成分である。制御回路や補助回路の損失も無負荷損にあたる。負荷損は、負荷電流の増加に比例するコイルや回路の損失である。

一般に無負荷損と負荷損が同値の時、最大効率値となるとされるが、これは負荷損失が抵抗損失のみの場合であり、実際は回路構成等で最大効率率は変化する。無負荷損が小さいほど、そして負荷損が小さい程最大効率値は上がる。励磁電流の大半は無効電力成分を作る無効電流である。無効電力自体は効率に影響しないが、無効電流は線路や回路にて損失となり無負荷損増大の原因になる。なお、ここで対象にする周波数は十数MHz程度までとし放射損の無視できる範囲を扱う。

2.3. 効率向上に関する留意点

励磁電流や負荷電流が大きくても、抵抗や電流と同相の電圧降下成分がなければ損失は生じない。しかし実用上は必ず存在する。これらを小さくするために部品の材料や構造、形状の工夫、回路や駆動方式の工夫がなされ効率が着実に上がってきた。一方、効率と回路サイズや回路コストとはトレードオフの関係が強い。

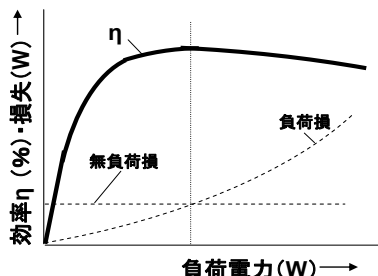


図1 効率-出力特性

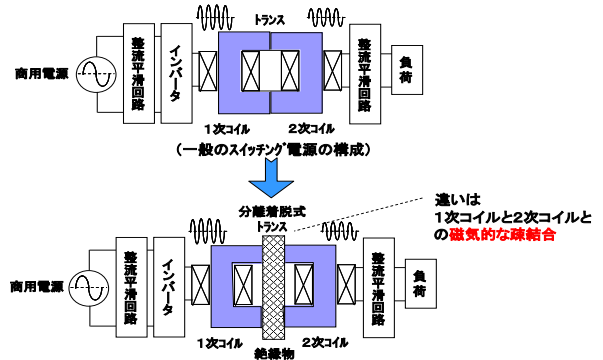


図2 スイッチング電源とワイヤレス給電の相違

3. ワイヤレス給電の電力収支と効率に関して

3.1. スイッチング電源とワイヤレス給電の相違

磁気結合給電ではkHz帯、MHz帯の高周波磁界を利用するため、1次側（送電側）の主回路は高周波インバータである。図2にスイッチング電源とワイヤレス給電の構成図を示す。1次側と2次側とを機械的に分離しギャップを設けて磁気結合するコイルを利用すること以外は、一般のスイッチング電源と同じ構成となる。すなわち、磁気結合が疎結合になることのみが本質的な違いとみなせる。疎結合とは1次コイル電流により発生する磁束のうち、2次コイルに交鎖する割合が少ないことを意味する。この定量的な指標には、2つのコイル間の相互誘導に基づく結合係数 k が使われる。 k は巻き数には無関係で各コイルの形状、材質や相対的な位置関係で決まる。1次コイルが発生する磁束が全て2次コイルに交鎖する場合、 k は1となり、疎結合になるほど0に近づく。一般に近接型では $k > 0.1$ 、空間型では $k < 0.1$ 程度を対象とする。

3.2. 等価回路と特有の性質

図3に汎用的な2次側換算等価回路を示す。1次側コイル間の磁気結合が無視できる場合、2次換算等価電圧源 E_0 に、2次換算漏れインダクタンス L_0 が直列に接続される回路として表せる。 E_0 および L_0 は式(1)で示される。特に1次コイルが1個の場合には図4の基本等価回路となる。これは電磁誘導給電の本質を的確に現わしている。ギャップの増加は k の低下となり、 E_2 の低下と L_{02} の増加として顕著に現れてくる。

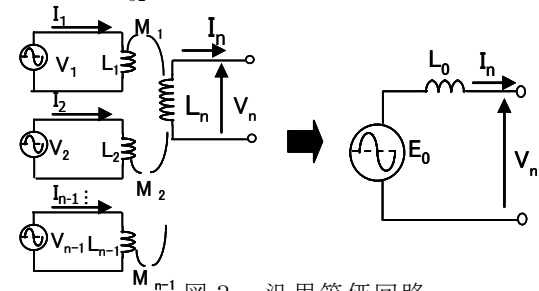


図3 汎用等価回路

$$V_n = E_0 - L_0 \cdot \frac{dI_n}{dt}$$

$$E_0 = k_1 \cdot \sqrt{\frac{L_n}{L_1}} \cdot V_1 + k_2 \cdot \sqrt{\frac{L_n}{L_2}} \cdot V_2 \dots + k_{n-1} \cdot \sqrt{\frac{L_n}{L_{n-1}}} \cdot V_{n-1}$$

$$L_0 = L_n \cdot (1 - (k_1^2 + k_2^2 + \dots + k_{n-1}^2))$$

$$k_1 = \frac{M_1}{\sqrt{L_1 \cdot L_n}} \quad k_2 = \frac{M_2}{\sqrt{L_2 \cdot L_n}} \quad k_{n-1} = \frac{M_{n-1}}{\sqrt{L_{n-1} \cdot L_n}} \quad (1)$$

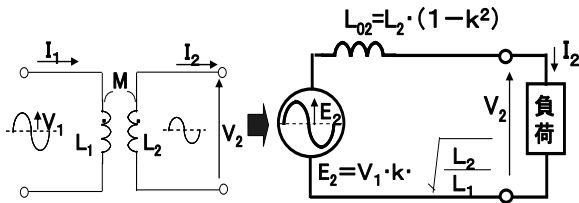


図4 基本等価回路

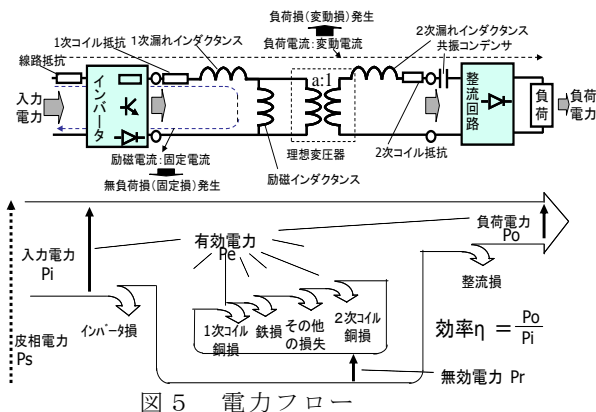


図5 電力フロー

電圧振幅の大幅な低下は負荷に与えるべき定格電圧を与えられない。\$L_{02}\$ は損失に寄与しないが、線路でのインピーダンス（誘導リアクタンス）となり負荷電流に比例して負荷電圧を低下させる。これら不具合の対策のために2次側や1次側に各コイルのインダクタンスとコンデンサで共振回路を構成する。[2][3] なお効率を定量的に考える場合には損失成分の入った他の等価回路や実用回路での解析が必要である。

3.3. 電力収支

図5に基本回路例と電力フローを示す。電源から負荷までは、有効電力成分の他に保存される無効電力成分が存在し、回路やコイル内でエネルギーが蓄積・変換され、また外部とでエネルギーが出入りする。これらは容量やインダクタに蓄積されるエネルギーである。ワイヤレス給電では1次コイルと2次コイルの疎結合に起因して漏れインダクタンス成分が大きくなり無効電力成分は増加する。負荷電流による電圧降下の補償や、昇圧効果を得るために各コイルに直列や並列にコンデンサを入れて共振回路を構成することが必要になるため、さらに無効電力が増大する。しかし無効電力が増えても、これが通る線路や回路の抵抗、電圧降下分が小さければ損失は小さくできる。

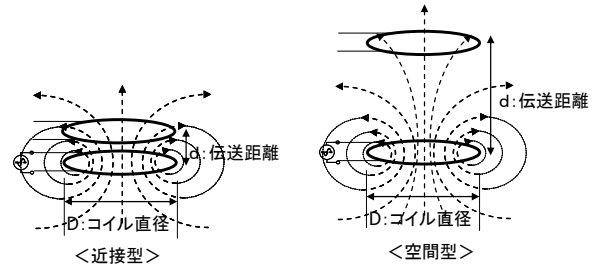


図6 コイル直径 \$D\$ と給電距離 \$d\$ の関係

3.4. コイル間伝送効率と \$k \cdot Q\$ について

共振回路を利用する磁気結合給電では、1次コイルと2次コイル間の電力伝達において、\$k\$ と \$Q\$ の積が伝送効率の指標として用いられる。\$k \cdot Q\$ が大きいほど効率が向上する。インダクタンスと抵抗成分を有する2つのコイルの磁気結合回路から解析的に導かれるが、定性的に考えても十分理解できる。\$k\$ の低下は発生させた磁束の利用率の低下を意味し、最適化した結果、利用率が高い方が効率が向上するのは当然である。また \$Q\$ は \$\omega L/r\$ であり、「抵抗に対する誘導リアクタンスの比」であり、コンデンサとの共振回路を考えた場合には「1周期間に損失となるエネルギーに対する蓄積するエネルギーの比」であるため、同じ数値のインダクタンスが得られるコイルに対し、抵抗成分が小さくできれば効率が向上するのは当然である。

ここで、図6に示すように伝送距離を \$d\$、送受電コイルサイズ（直径等）を \$D\$ と定義すると、結合係数 \$k\$ は、\$d\$ ではなく \$d\$ と \$D\$ との比、すなわち \$d/D\$ に相関があり、これが大きい程 \$k\$ は小さくなる。また \$Q\$ は \$D\$ の増大化で大きくできる。すなわち、同じ伝送距離の場合、\$k\$ と \$Q\$ を大きくするには結局コイルサイズの増大化というトレードオフを選択することに帰結する。これが多少のギャップがあってもコイル間の伝送効率が低下しないしくみである。なお近接型の範疇で設計する場合には、工夫でサイズアップ量も少なくできる。

3.5. 総合効率と伝送効率の関係について

総合効率は、1次側のインバータ効率、コイル間の伝送効率、2次側の整流効率等の積となる。電磁誘導利用のワイヤレス給電においては、一般にコイル間の伝送効率よりも回路部の効率が支配的である。回路部の効率向上テクニックは、通常のスイッチング電源の効率向上テクニックと同じである。その有力な手段であるソフトスイッチング技術がワイヤレス給電では安く簡単に利用できる。[4] 以上のような理由から電磁誘導を利用するワイヤレス給電では、高い総合効率を実現できる。特に \$kHz\$ 帯で動作する近接型のシステムではスイッチング電源やインバータシステムと同等レベルの高効率を実現できる。

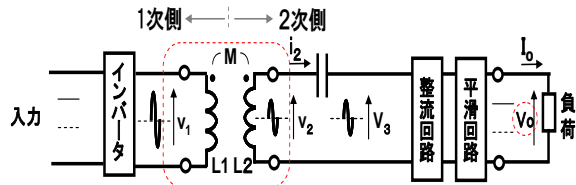


図7 システム構成

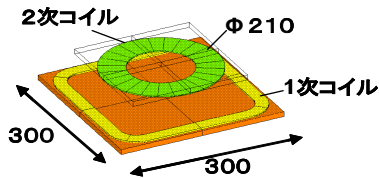


図8 コイル外観

4. kHz帯のワイヤレス給電の効率

4.1. ギャップ50mm 出力150W 伝送

4.1.1. システム構成

図7に実用システムの基本構成を示す。2次コイルに直列または並列に共振コンデンサを入れることが必須となる。1次側の入力電圧が高くとれる場合には図4のE₂も大きくできるため、特に1次側の共振を設定する必要がない場合も多い。入力電圧が低い場合には1次コイルとコンデンサで、直列共振や並列共振回路を構成しE₂を増大させる。図8にギャップ50mmで対向させる場合のコイルの外観を示す。結合係数kは0.26となり、1次側2次側の各コイルのQ ($\omega L/r$)は135と319であった。平面对向コイルとし、コイル直径を数十cmと広くしたことでd/Dを約0.2に下げ、kの低下を防ぎ、大きなQを実現している。

4.1.2. 150W 伝送実験と結果

DC160V 入力でハーフブリッジ型ソフトスイッチングインバータを50kHzで駆動する。2次側共振コンデンサを、2次換算の漏れインダクタンスと共振するように数値を選ぶ。図9に出力と効率の関係を示す。最大総合効率は出力125Wで85%に達しコイル間伝送効率は95.5%であった。図10に損失の内訳を示す。インバータと整流回路を併せた回路損失と1次2次コイルの銅損が主成分であるが、回路損失が最も大きいことに注目。無負荷損は2次側の負荷が軽負荷の場合であり、約8Wと推定。この損失の主成分は、励磁電流起因の回路損失と1次コイル銅損である。

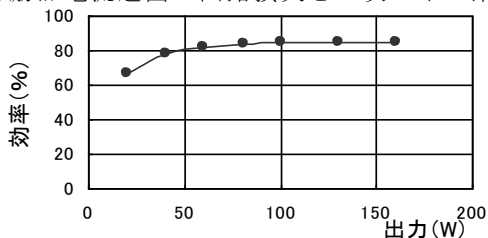


図9 出力と効率の関係

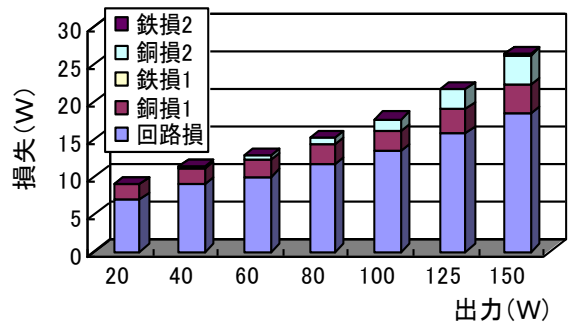


図10 出力150Wタイプの損失内訳
2次コイル

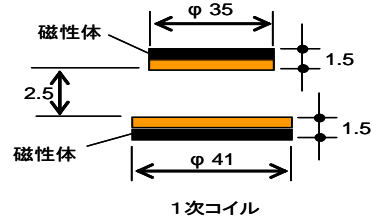


図11 コイル概観

表1 回路効率

	電圧[V]	電流[A]	電力[W]
入力	23.0	0.298	6.85
出力	5.57	1.03	5.74
全損失	-	-	1.11
効率	-	-	83.8%

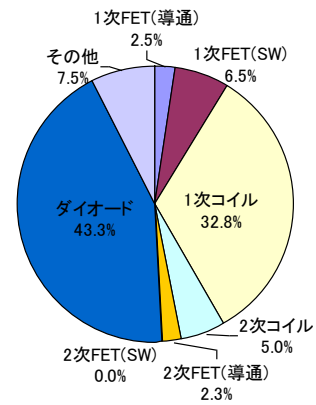


図12 損失分析

4.2. ギャップ2.5mm 出力5W 伝送

4.2.1. システム構成

モバイル機器への小出力給電では超薄型の平面对向コイルが要求される場合がある。図11に、1次2次コイルをギャップ2.5mmで対向させた場合の外観を示す。DC23Vを入力としフルブリッジ型のソフトスイッチングインバータを120kHzで駆動する。1次側2次側ともにコイルに直列共振するコンデンサを接続している。ギャップ長に対し大きな直径のコイルを使い、 $d/D \approx 0.07$ まで小さくできた結果、kは0.7と高値にできた。1次2次各コイルのQは48と131であった。

4.2.2. 5 W 伝送実験と結果

表 1 に実験結果を示す. 出力 5 W において総合効率は 84%, コイル間伝送効率は 93% であった. 図 12 に損失の内訳を示す. インバータと整流回路を併せた回路損失と 1 次コイルの銅損が支配的である. なお, 2 次側はブリッジ整流を用いており, 4 個のうち 2 個は FET を用いて同期整流している. 回路損失は残り 2 個の整流用ダイオードを同期整流すること, またオン抵抗が小さい FET の選定など通常のスイッチング電源で用いられる効率向上手段で削減可能であり, この併用で 90% 以上を狙えると考えられる. なお高効率化設計に対しては, 解析技術の併用が有効である. [5][6]

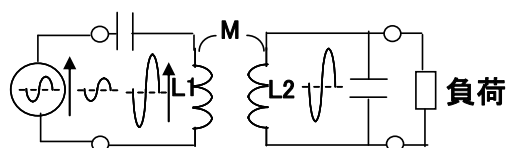


図 14 等価回路

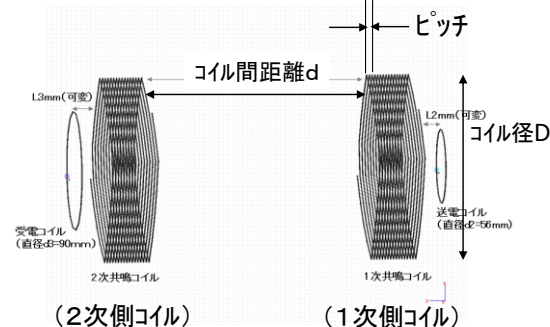


図 15. ヘリカル型磁気共鳴コイル

5. MHz 帯のワイヤレス給電の効率

5.1. 基本システム

図 13 に共鳴型と呼ばれる典型的な構成を示す. [7] 1 次側は励振コイルと 1 次側共鳴コイル, 2 次側は 2 次側共鳴コイルと受信コイルで構成される. 周波数は約 10 MHz である. 共鳴コイルは数ターンの端部の切れたヘリカル状の共振コイルであり, 容量成分はコイル線間の寄生容量を利用する. 一般にコイル直径の数倍の距離での伝送を狙いとしているため結合係数は 0.01 以下と極めて小さくなる. 従って伝送効率向上には, 数百以上の極めて高い Q 値の実現が必要となる. ωL は, 高周波化で大きくできるので MHz 帯での駆動が一般的である. 一方磁気共鳴モデルの設計・評価には, 一般的にアンテナなどの高周波デバイス設計に活用される高周波電磁界解析ツールが使われ, S パラメータを用いてコイル間の伝送効率特性を推定できる. S_{21} 成分は, 電源と負荷とで整合を行った条件での電力利得を示し, 最適化した場合の最大伝送効率を示す. なお, 等価回路は図 14 となり, 共振を使う kHz 帯の電磁誘導システムと類似する.

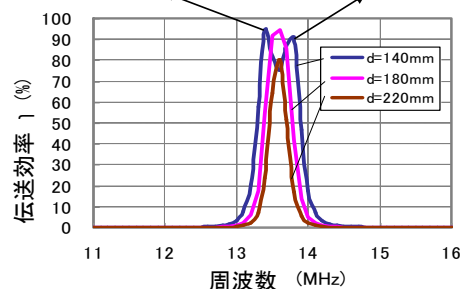
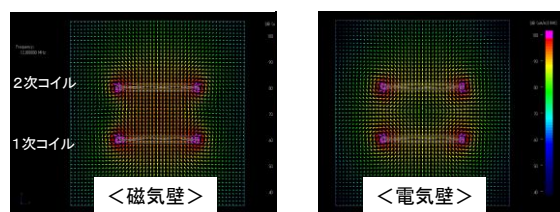


図 16. 伝送効率の周波数特性

5.2. 共鳴コイルの仕様

図 15 に, ヘリカル型の磁気共鳴コイルを 1 対 1 に対向配置した解析モデルを示す. この解析モデルは, 最大対角距離が $D=140\text{mm}$ の八角形構造をしたヘリカルコイルで, 銅線直径は $d=1\text{mm}$ である. ヘリカルピッチを可変パラメータとして $p=1.5\sim 3.0\text{mm}$ の範囲で変化させ, コイルのターン数を調整して 13.6MHz が共振周波数となるように設計した.

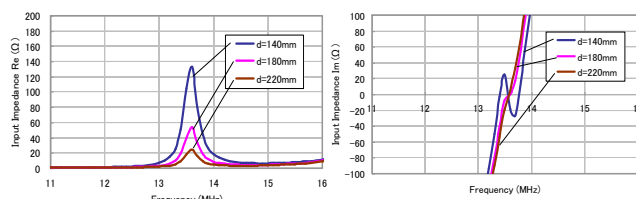


図 17. 入力インピーダンスの周波数特性

5.3. 効率特性

ピッチ $p=3.0\text{mm}$ のモデルにて, 送受電コイル間の d を変化させた場合の伝送効率の周波数特性を図 16 に示す. $d=140\text{mm}$ の時のように, 離隔距離が小さく磁気共鳴コイル間の結合度が大きくなると伝送効率のピークが 2 つの周波数で現れるが, d が大きくなるにつれて 2 つのピーク周波数は, 一つになることが確認できる. さらにコイル間の離隔距離が大きくなると, 伝送効率は低下していく.

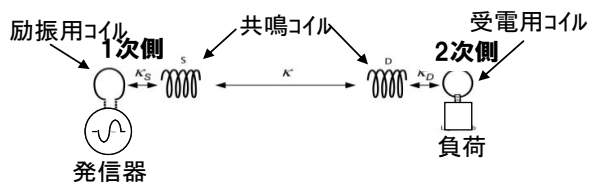


図 13 MHz 駆動共鳴型の基本構成

また、伝送効率と同様に、入力インピーダンスの周波数特性もヘリカルコイル間の離隔距離に応じて変化する。図17に入力インピーダンスの実数部と虚数部の周波数特性を示すが、 d の増大につれて共振周波数付近のリアクタンス特性に変化が現れ、 $d=180\text{mm}$ 以上では共振ポイントが1つになることが確認できる。

図18に、ピッチ p を $1.5\sim 3.0\text{mm}$ に可変させたヘリカルコイルを2個配置した伝送モデルにおいて、 d を変化させた際の伝送効率特性を示す。但し、観測周波数はコイル単体の共振周波数と同じ 13.6MHz である。この結果より、 p が大きくなるほど伝送効率がピーク（最大）となるコイル間距離が大きくなり、 $p=3.0\text{mm}$ のモデルでは、 d と D の比 d/D が 1.29 で伝送効率 95% の結果が得られた。表2には、共振周波数を 13.6MHz に調整した際のヘリカルコイルのターン数、及び、そのインダクタンスの計算値を示す。この結果より、 p が大きくなるほどインダクタンスは大きくなっていることが確認できる。即ち、最大伝送効率を示す伝送距離は、コイルのピッチやターン数から決まるインダクタンスの大きさに依存することが分かる。コイルサイズ以上の距離を伝送する場合でも、対向コイル間の伝送効率は 90% 以上を狙えることが確認できた。このように MHz 利用の空間型の給電でも、高効率化には、半径増大やターン数増加など、コイルサイズの増大を伴うことを許容しなければならない。^{[8][9]}

なお、総合効率は1次側の MHz 駆動のインバータ回路および励振コイルと、2次側の受信コイルおよび整流回路等を含めたものである。 d/D が1程度ならば共鳴コイル間の伝送効率が 90% 以上を確保できることから、総合効率は kHz 帯応用と同様に、高周波インバータ部や整流回路の効率が支配すると考えられる。

6. まとめ

以上に電磁誘導ワイヤレス給電に関し、理論と実験値で高効率の可能性を示した。以下にポイントを示す。

- 1) k は距離 d とコイルサイズ D の比 d/D に相関がある。
- 2) 近接型、空間型共に共振利用が不可欠である。
- 3) コイルサイズを大きくして k と Q を増大すればコイル間の伝送効率を向上できる。
- 4) 総合効率では回路効率が支配的な場合が多い。
- 5) kHz 帯駆動の近接型とみなせる給電では、スイッチング電源と同等レベルの総合効率が可能。
- 6) MHz 利用の共鳴型空間給電においては d/D が1程度であれば 90% 以上の伝送効率が見られる。

なおワイヤレス給電においては、効率の他に待機電力に関しても特有の考え方で対応する必要がある。^[10]

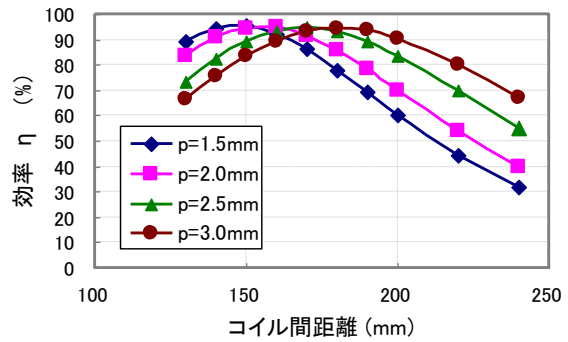


図18. 伝送効率のコイル間距離特性

表2. ヘリカルコイルのインダクタンス値

	ヘリカルピッチ p (mm)			
	1.5	2.0	2.5	3.0
ターン数(回)	15.50	16.88	18.25	19.63
インダクタンス (μH)	8.18	8.91	9.36	9.63

文 献

- [1] 安倍秀明 : 「家電用非接触給電装置」電気学会誌 Vol.128, pp808-811, No.12, 2008
- [2] 安倍秀明・北村浩康 : 「非接触給電用分離着脱トランスの近似等価モデルの実用性について」電学マグネティクス研資 Mag-02-203, (2002)
- [3] 安倍秀明, 坂本 浩, 原田耕介 : 「非接触充電システムにおける負荷整合」電学論 D, 119, 11, pp.536-543, (1999-4)
- [4] H. Abe, H. Sakamoto, and K. Harada, : “A Noncontact charger Using a Resonant Converter with Parallel Capacitor of the Secondary Coil.” IEEE Trans. on Industry Applications, VOL. 36, No.2, pp.444-451, MARCH/APRIL (2000)
- [5] T. Ota, T. Kida and K. Hirata, “Heat Transfer Analysis Method Taking Into Account Eddy Current and Hysteresis Loss for Non-Contact Charging System,” Proceedings of the 13th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation PB1-12, 2008.
- [6] 片桐弘雄, 河瀬順洋, 山口忠, 平田勝弘, 太田智浩, 鈴木智士 : 「三角柱辺要素有限要素法による非接触充電コイルの電磁界解析」電学静止器・回転機合同研資, SA-11-017/RM-11-017 (2011)
- [7] A. Kurs et al., “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, Science Magazine, Vol.317, No.5834, pp.83-86, 2007
- [8] 西村 太 安倍秀明 : 「磁気共鳴型ワイヤレス電力伝送コイルの伝送効率特性に関する検討」2011年電子情報通信学会 総合大会 BS-2-7
- [9] 居村岳広 他, “近傍界磁界アンテナの共振を利用した高効率電力伝送の解析と実験－基本特性と位置ずれ特性－”, 平 20 電学産業応用部門大会公演論文集 II, 2-62, pp.539-542, 2008.8
- [10] 安倍秀明 古川 薫 西村 太 太田 智浩 北村 浩康 : 「磁気結合ワイヤレス給電技術における効率と待機電力について」信学技報 EE2011-23(2011-10)