

非接触給電装置の効率改善

Improvement in efficiency of non-contact power supply equipment

片平 洋一※
Yoichi Katahira
小川 恭史※
Yasushi Ogawa

1. はじめに

非接触給電装置とは電線等の機械的な接触なしで、電力を伝送する装置である。特長は、機械的接触がないため、水中や粉塵の多い場所でも感電・短絡の心配がなく安全に電力供給ができる。これまで、電動歯ブラシ、電気シェーバーやコードレス電話などの一部の機器には非接触給電による充電機能が利用されている。

最近では、非接触給電技術に関する業界団体「Wireless Power Consortium (WPC)」により標準規格が制定され、携帯電話等のモバイル機器をメーカーや機種に関係なく充電台に置くだけで充電できるようになった。これら普及が進んできた非接触給電装置の殆どが、電磁誘導方式によるものである。

当社は1998年より電磁誘導方式による非接触給電装置の研究開発に取り組んできた。当初開発したのは、家庭用イルミネーションランプ等への給電用として十数Wの小容量の製品を開発・販売し、その後も用途開発を継続している。その中で、使用用途を産業機器用にも拡大するために、数百Wから1kWを超える大容量の製品の開発を行ってきた。

大容量の製品になる程、損失による発熱が大きな問題となるため、高効率の非接触給電技術が求められる。

本稿では、当社の非接触給電装置の概要と、今回開発した3kWの大容量非接触給電装置の効率改善の手法について解説する。

2. 非接触給電装置の概要

2.1 小容量非接触給電装置

電磁誘導作用により給電側から受電側に電力を伝達する。電力の伝達原理は変圧器と同じであるが、鉄心は給電側と受電側で分離されており、給電側コイルと受電側コイルは磁氣的結合が非常に悪く、電力伝達の妨げとなっている。これを解決するために受電側コイルに共振コンデンサを設け、LC共振により漏れインダクタンスの影響を低減し、電力伝送を実現している。また給電コイルを高周波駆動することで、受給電のカプラ(コア、コイル、磁気遮蔽板を組合せたユニット)を小型化している。この方式は部品点数が少ないという利点があるが、出力安定度において欠点がある。出力負荷変動および給電側の入力電圧変動に対して、出力電圧の変動率は数百%になる場合もあるため、後段にワイ

ドレンジの電圧安定化回路を設ける必要がある。この安定化回路には、DC-DCコンバータを使用して高効率化を図っているが、入力電圧範囲が広いため電力損失が多くなる。この電力損失は、小容量品では許容できる程度でも、大容量の非接触給電装置では、放熱部が大きくなり、実用的な小型化ができない。またシステム効率低下の原因ともなる。

図1に小容量非接触給電装置の基本構成を示す。

2.2 大容量非接触給電装置

小容量非接触給電装置の課題を解決するために、大容量非接触給電装置は、受電側コイルにも給電側コイルと同様の駆動回路を設け、給電側のスイッチングに同期させて駆動し、出力を得る方式を採用している。本稿ではこの方式の非接触給電装置を同期スイッチング方式非接触給電装置と呼ぶ。同期スイッチング方式の回路構成は、カプラ駆動部が給電側と受電側で同様の回路となっている。給電側と受電側のスイッチング周波数は同じであり、給電コイルのスイッチングと受電コイルのスイッチングの位相差を制御することにより、受電部の出力電圧を安定化することができる。同期スイッチングを行うために、給電側から受電側へ同期信号を送る必要がある。図2に大容量非接触給電装置の基本構成を示す。

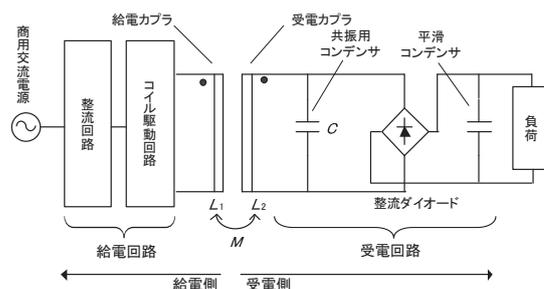


図1 小容量非接触給電装置の基本構成

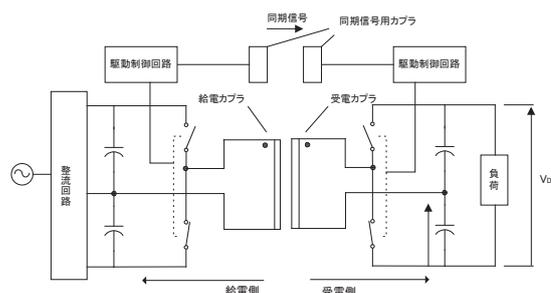


図2 大容量非接触給電装置の基本構成

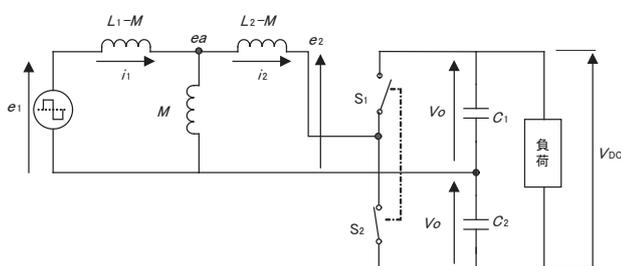
※ 機器事業部 技術部 製品戦略G

給電電力の制御は、給電コイルに加わる方形波電圧と受電コイルに加わる方形波電圧の位相差を $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で制御することによって行われる。

位相差の制御は、受電側で給電コイルの駆動タイミングを同期信号から検出し、受電コイル駆動回路のスイッチングタイミングを変えることにより行っている。

位相差は受電回路の出力電圧をフィードバックすることで決定される。これによって間隙距離の変動、入力変動および負荷変動に対して出力が安定化され、給電電力が制御される。受電側のカプラコイルをトランスと見たてた等価回路を図3に示す。

本方式では等価回路の e_1 と e_2 の位相差を $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で制御している。その電圧波形を図4に示す。



- e_1 : 給電カプラ印加電圧 (方形波)
- e_2 : 受電カプラ印加電圧 (方形波)
- i_1 : 給電カプラ入力電流
- i_2 : 受電カプラ出力電流
- V_0 : 平滑コンデンサ電圧 (直流値ではともに $1/2V_{DC}$)
- V_{DC} : 負荷電圧 (直流)

図3 同期スイッチング方式の等価回路

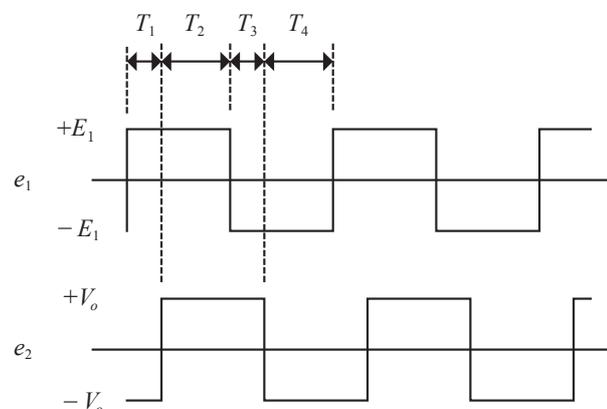


図4 カプラコイルの印加電圧波形

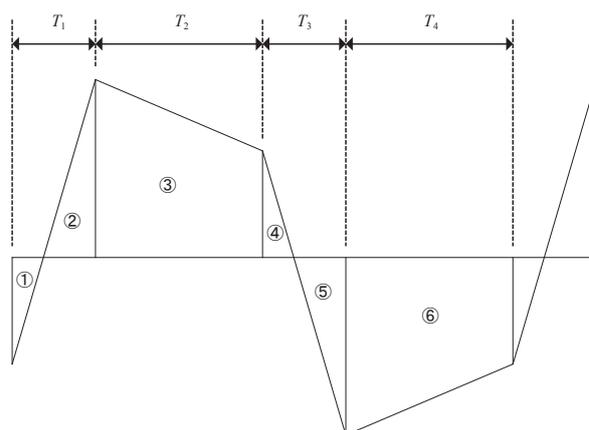


図5 受電コイル電流波形

等価回路から回路方程式を立て、 $T_1 \sim T_4$ の各区間の受電側コイルの電流 i_2 を求めると図5に示す電流となる。

等価回路において、 T_1 、 T_4 は、 S_1 がON、 S_2 がONの区間であるので、受電回路のそれぞれのコンデンサ(C_1 、 C_2)へ流れる電流は、図5に示す①②⑥および③④⑤である。この平均値が、出力電流として得られる。

次に位相差(T_1)と出力について考察する。

平滑コンデンサへ流れる電流の平均値から出力電流を求めると、

$$(\text{出力電力}) = \frac{V_0 \cdot e_1 \cdot k}{\sqrt{L_1 \cdot L_2} \cdot (1 - k^2)} (d - d^2) T \dots \dots \dots (1)$$

$$T : T_1 + T_2$$

$$d : T_1 / T$$

となる。

この式により、出力電力は d を変化させることで制御でき、 $d = 0.5$ つまり位相差 90° のときに最大出力が得られることが分かる。

さらに、 L_1 、 L_2 のインダクタンス値が小さく、結合係数 k が1に近いほど、高い出力電力が得られることが分かる。

3. 大容量非接触給電装置の効率改善

大容量の非接触給電装置を開発するにあたり、損失による発熱を低減することが課題となる。損失を低減させるには、エネルギーの伝送効率を向上させることが不可欠である。非接触給電装置の伝送効率を向上させるには、一次側と二次側のカプラコアの結合の度合いを高め、漏れ磁束を低減することが必要である。またインバータ部のスイッチング損失を低減することも、システム全体の効率を改善する上で必要である。

3.1 カプラコアの効率改善

式(1)より、インダクタンス値が小さく、結合係数 k が1に近いほど、高い出力電力を得られることが分かる。実験により、図6のように、コアに巻いたコイルの一次側と二次側と対向しない側に、空間距離を設けることで、結合係数が増加し、インダクタンス値が低減することが確認できた。

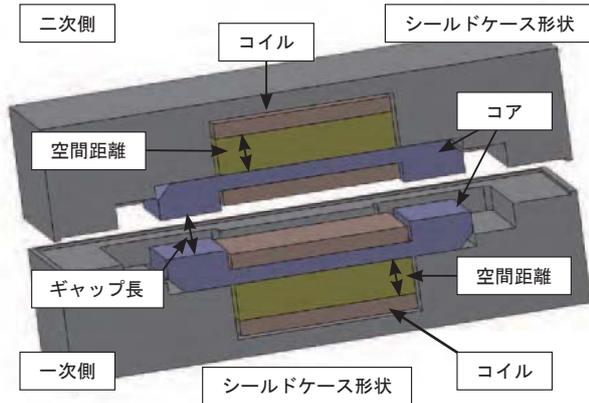


図6 カプラコアの構造図

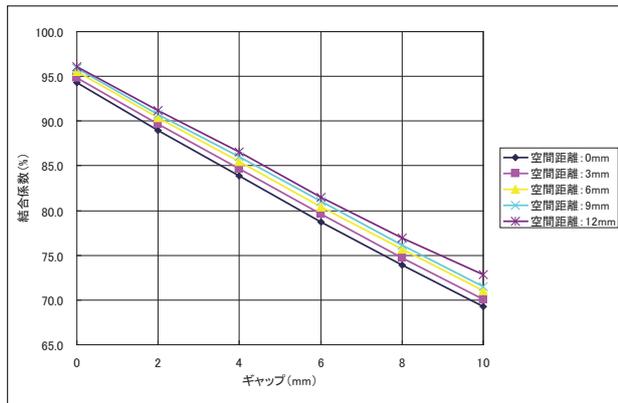


図7 結合係数測定結果

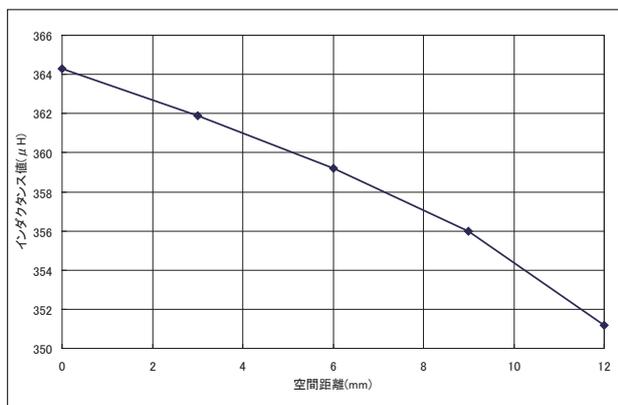


図8 インダクタンス値測定結果

そのときのギャップ長と結合係数の関係を図7に、空間距離とインダクタンス値に図8に示す。

コイルとコアの空間距離が離れることにより、一次コアから二次コアへ鎖交する磁束量を増加させることができ、結合係数を向上することができる。このとき空間距離が長いほど、結合係数を向上することができるが、シールドケース形状が大きくなり、小型軽量化することが困難となる。空間距離を長くすることは、コアの対向しない側へ鎖交する磁束を減少させることであるが、空間距離の代わりに銅またはアルミニウム等の非磁性体の金属を介在させることで同様の結果が得られることがわかった。

カプラコアの結合係数を上げるためには、コア形状、漏れ磁束を低減するためのシールドケース形状によって決まる。カプラコアは、下記の要素により、結合係数に影響を与える。その概略図を図9に示す。

- ・ コア脚部の厚み
- ・ コア脚間長
- ・ コア対向面積
- ・ シールドケース形状

最適な形状を決定するために、有限要素法による電磁場解析を用い、結合係数の高い、カプラコアの設計を行った。

大容量非接触給電装置を開発するにあたり、効率改善とともに軽量化も重視した。カプラコアの大きさは従来品の1kW出力のカプラコア1個(300W出力)と同等の大きさで、2倍の出力(600W)を開発目標とした。

解析したモデルは、形状と磁界に対称性があるため、1/4部分モデルを使用し、解析時間の短縮を図った。

解析は、二次側コイルをオープンにした状態で、一次コイルを鎖交する磁束と投入電流より、自己インダクタンス(L_{open})を求め、二次側コイルをショートした状態で、一次コイルを鎖交する磁束と投入電流から漏れインダクタンス(L_{short})を求める。その結果を以下の式より、結合係数 k を算出した。

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_{short}}{L_{open}}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

コアとシールドケース形状を変えた電磁場解析を繰り返した結果、コア脚部の厚み5mm、コア脚間長90mm、コア対向面積1,500mm²の時に、結合係数が一番良い結果となった。解析したモデルの磁束密度解析結果を図10に示す。

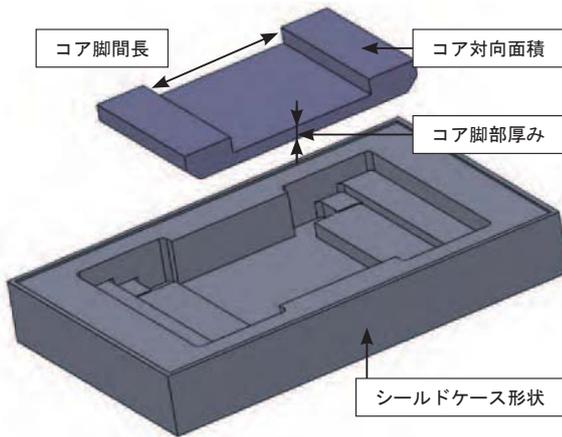


図9 カプラコイルの結合係数に与える要素

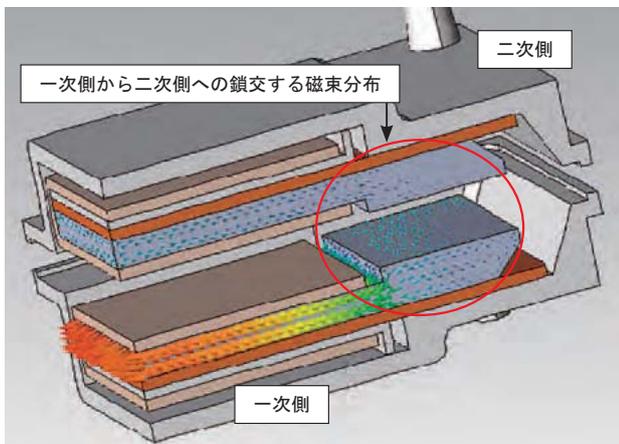


図10 カプラコアの磁束密度解析結果(1/4モデル)

表1 3kW 大容量非接触給電装置仕様

項目		仕様
定格入力		3φ 200V 50/60Hz
定格出力		DC300V 10A(3kW)
効率		90%以上(ギャップ5mm時)
寸法	幅	700mm
	奥行き	80mm
	高さ	170mm
重量(1次/2次)		7.0kg / 7.0kg

3.2 インバータ部の効率改善

大容量非接触給電装置は、同期スイッチング方式を採用している。インバータ部は、50kHzの高周波スイッチングを行っており、スイッチング素子には、パワー MOSFETを採用している。パワー MOSFETにおいて重視される特性は、オン状態での導通抵抗(以下、オン抵抗と呼ぶ)がある。スイッチング部に使用するパワー MOSFETの電力損失

は、オン抵抗による導通損失が大部分を占める。今回、低オン抵抗のパワー MOSFETを採用し、導通損失を低減させた。

しかし、高周波スイッチングをするためには、パワー MOSFETのゲート容量は、小さいことが望ましいが、低オン抵抗のパワー MOSFETほどゲート容量が大きい。よって、パワー MOSFETのオン/オフを高速に行うために、ゲートドライブ抵抗の見直しを行った。スイッチング部では、上アームのパワー MOSFETと下アームのパワー MOSFETが短絡しないように、デッドタイムを設ける必要がある。ただし、この時間が長いとデッドタイム損失が発生する。今回選定したパワー MOSFETの特性に合わせ、ゲートドライブ抵抗を調整し、デッドタイムの最適化を行った。

3.3 試作品の製作

前記の解析結果を基に、コアとシールドケース形状を最適化したカプラコアを製作した。3kWの出力を得るために、1個600W出力のカプラコアを5個並列接続する構成とした。3kW大容量非接触給電装置の仕様を表1に、外観を図11に示す。

電磁場解析により、最適化したカプラコアの外観を図12に示す。

4. 試作評価

電磁場解析を用いて設計したカプラコアとスイッチング部の損失を改善した給電装置と受電装置を製作した。出力特性の評価試験を実施した結果、従来の1kW出力の非接触給電装置に対して、定格出力時のシステム全体の効率が7.6%向上した。従来の1kW出力非接触給電装置と今回製作した3kW出力非接触給電装置の比較表を表2に示す。

3kW非接触給電装置の試作品出力特性の図13に示す。



図11 3kW 大容量非接触給電装置の外観図



図12 最適化したカプラコアの外観

参考文献

- (1) 土本、近藤、大隈：「非接触給電装置」愛知電機技報 No.28(2007)
- (2) 細江、近藤：「エリア形非接触給電装置の電磁解析」愛知電機技報 No.24(2001)
- (3) 片平、駒田、里：「大容量非接触給電装置の開発」愛知電機技報 No.29(2008)

表2 従来品との比較

		1 kW出力 非接触給電装置	3 kW出力 非接触給電装置
寸法	幅	472 mm	700 mm
	奥行き	79 mm	80 mm
	高さ	172 mm	170 mm
重量(1次/2次)		5 kg / 5 kg	7 kg / 7 kg
出力		1 kW(DC100V、10A)	3 kW(DC300V、10A)
効率 (ギャップ5 mm時)		83.6 %	91.2 %

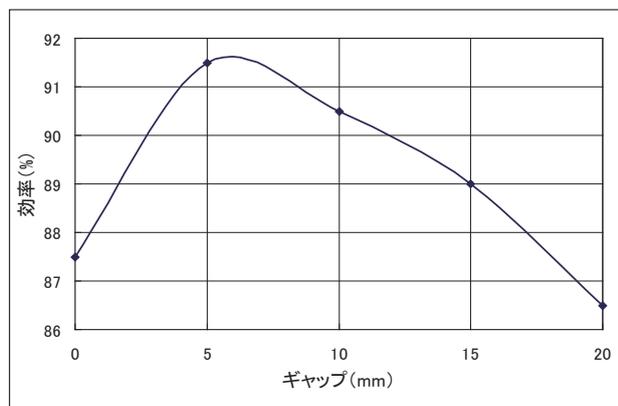


図13 3kW非接触給電装置の出力特性

5. あとがき

今回、3kW出力の大容量非接触給電装置を開発したことにより、フォークリフトや自動搬送台車等の産業機器の充電用途において、充電時間の短縮、それに伴う給電側装置の設置数量削減などの利点を生み出す。また今後は、産業機器のみならず、電気自動車の充電装置への用途も視野に入れ、営業活動を行い、市場投入を目指す。