

# 三相 12 コイル非接触給電システムの損失解析

日下 佳祐\*, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Loss Separation of Three-phase Inductive Power Transfer System with 12 Coils.  
Keisuke Kusaka, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

## 1. はじめに

著者らはこれまで非接触給電システムの大容量化に向けて、12 個のソレノイドコイルを用いた非接触給電システムを提案している。提案システムは 12 個のコイルを用いることで、コイル間の不要結合の影響なく電力伝送の三相化が可能である<sup>(1)</sup>。また、伝送コイルを対向配置させることで漏えい磁界の低減効果が得られる<sup>(2)</sup>。本論文では提案する三相 12 コイル非接触給電システムの効率評価及び損失解析を行ったので報告する。

## 2. システム構成

図 1 に提案する非接触給電システムの回路図を示す。提案システムは 1 次側スター結線-2 次側スター結線の 1 次側直列-2 次側直列補償 (S/S 補償) に基づいた三相非接触給電システムであり、各相には 2 つのソレノイド型コイルが 2 個直列に接続される。

図 2 に伝送コイルの配置図を示す。同相内で直列接続された伝送コイル (例えば  $L_{uv1A}$  と  $L_{uv1B}$ ) は差動接続となるよう接続し、対向配置する。対向配置したコイルは、放射磁界の測定を行う遠方ではそれぞれのコイルから生じる磁束が打ち消し合うため、放射磁界の抑制が可能となる<sup>(3)</sup>。また、各相のコイルを 120 度ずつ配置し、三相電流を流通することで、電力伝送に寄与しない不要結合に起因する誘起電圧をキャンセルする<sup>(2)</sup>。これにより、不要結合の影響を受けない。

## 3. 損失解析

3kW 試作機の損失解析を行う。表 1 にパラメータを示す。

### 3.1 1 次側インバータ

1 次側インバータを方形波駆動した際の 1 次側インバータの出力相電圧実効値は、1 次側直流電圧  $V_{DC1}$  を用いて(1)式となる。

$$V_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{DC1} \dots \dots \dots (1)$$

ここで損失が無視できるとすると、入出力電力は等しいので、出力電力  $P$  を使って 1 次側電流は(2)式で求まる。

$$I_1 = \frac{P}{3V_1} = \frac{\pi P}{3\sqrt{2}V_{DC1}} \dots \dots \dots (2)$$

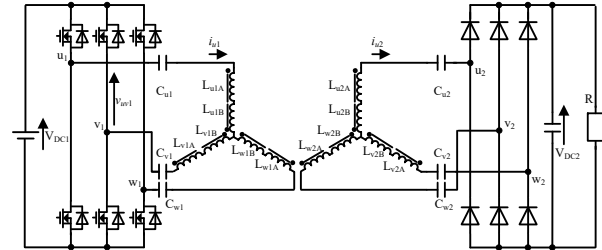
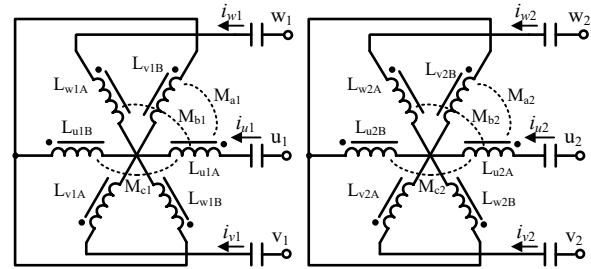


Fig. 1. Proposed three-phase IPT system with 12 coils.



(a) Tx. coils. (b) Rx. coils.  
Fig. 2. Placement and connection of coils.

Table I. Parameters of 3-kW prototype.

Parameters			
Output power		$P$	3 kW
DC voltage	Primary	$V_{DC1}$	400 V
	Secondary	$V_{DC2}$	400 V
Switching frequency		$f_{sw}$	85.5 kHz
Coupling coefficient		$k$	0.25
Inductance (average)	Primary	$L_{1s}$	107 $\mu$ H
	Secondary	$L_{2s}$	107 $\mu$ H
Capacitance (average)	Primary	$C_1$	16.4 nF
	Secondary	$C_2$	16.4 nF
Dead time		$T_d$	250 ns
Number of turn	Primary	$N_1$	17 turn
	Secondary	$N_2$	17 turn
Wire			Litz 2UEWSTC 784 / $\phi$ 0.1
MOSFETs			SCT3030AL (ROHM)
Diodes			VS-20ETF0 (Vishay)

これより、MOSFET のオン抵抗を  $r_{ds, on}$  とすると、1 次側インバータで生じる導通損失  $P_{p, cond}$  は(3)式で求まる。

$$P_{p, cond} = 3r_{ds, on} I_1^2 \dots \dots \dots (3)$$

次に、スイッチング損失を導出する。本システムでは誘導性負荷となるようにインバータの駆動周波数を設定することでターンオン時はゼロ電圧スイッチングとなり、ター

ンオン損失は発生しない。一方、ターンオフ損失はターンオフ時に MOSFET に通流する電流から求まる。共振周波数とスイッチング周波数が近接しており、正弦波状の電流が通流していると仮定すると、ターンオフ時の電流はデッドタイム  $T_d$  とスイッチング角周波数  $\omega$  (スイッチング周波数  $f_{sw}$ ) を用いて(4)式で近似できる。

$$i_{sw\_off} = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega T_d) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、スイッチングデバイスのターンオフエネルギー  $E_{off}$  を用いると、1 次側インバータで生じるターンオフ損失  $P_{p\_swoff}$  は(5)式で求まる。

$$P_{p\_swoff} = 6E_{off}(i_{sw\_off}) \frac{V_{DC1}}{V_n} \times f_{sw} \dots\dots\dots (5)$$

ただしここで  $V_n$  はデータシート記載の  $E_{off}$  測定時のドレインソース電圧である。

### 3.2 2 次側整流器

2 次側相電流は(2)式と同様に(6)式となる。

$$I_2 = \frac{\pi P}{3\sqrt{2}V_{DC2}} \dots\dots\dots (6)$$

ここでダイオードの順方向電圧降下を  $V_F$  とすると、ダイオードには 2 次側電流が半周期通流するため、(7)式で導通損失が求まる。

$$P_{s\_Dcond} = 6 \frac{1}{T} \int_0^T V_F \sqrt{2}I_2 \sin \omega t dt = 6 \frac{\sqrt{2}V_F I_2}{\pi} \dots\dots\dots (7)$$

### 3.3 伝送コイル

1 次側コイルの交流抵抗を  $r_1$ 、2 次側コイルの交流抵抗  $r_2$  とすると、各コイルで生じる銅損は(8)(9)式で求まる。

$$P_{p\_copper} = r_1 I_1^2 \dots\dots\dots (8)$$

$$P_{s\_copper} = r_2 I_2^2 \dots\dots\dots (9)$$

次に鉄損を導出する。伝送コイルに通流する電流は正弦波状となるので、各コイルの鉄心内部に生じる磁束密度は(10)式で求まる。

$$B_p = \frac{L_{1s}I_1 + MI_2}{N_1S_1}, B_s = \frac{L_{2s}I_2 + MI_1}{N_2S_2} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $L_{1s}$ 、 $L_{2s}$  は各相において 2 直列接続した各コイルの自己インダクタンス、 $M$  は 1 次側と 2 次側間の相互インダクタンス、 $N_1$ 、 $N_2$  はコイルの巻数、 $S_1$ 、 $S_2$  はコアの断面積である。磁束密度を元に、コアの鉄損をデータシートより鉄損を算出する。

## 4. 損失解析結果

図 3 に実験波形を示す。実験結果より、インバータ出力線間電圧に対してインバータ出力電流が 30 度位相遅れとな

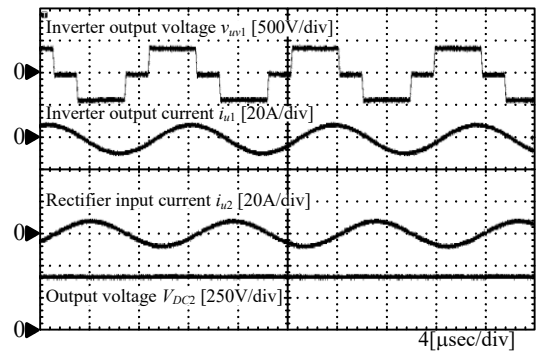


Fig. 3. Experimental waveforms.

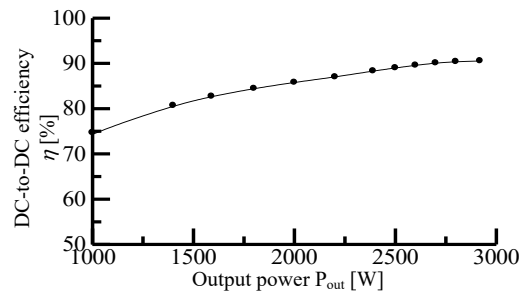


Fig. 4. Loss separation of proposed system.

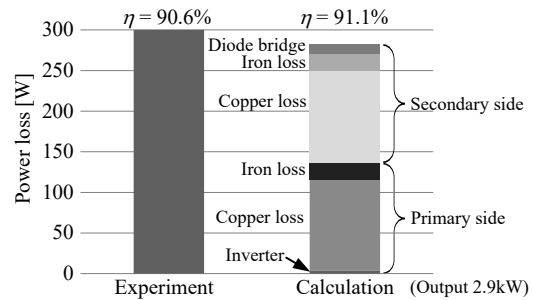


Fig. 5. Loss separation.

っており、力率改善動作が設計通り得られていることを確認した。

図 4 に実験機の効率特性を示す。本システムの最高効率は 2.9kW 出力時(入力電力 3.2kW)の効率 90.6% (DC-to-DC 効率) である。

図 5 に実験結果及び、計算により算出した損失解析結果を示す。実験時の測定損失 304W に対して、計算により算出した損失は 282W となり、誤差 7.3% で一致することを確認した。本解析により、最大の損失要因が伝送コイルの巻線抵抗であることが明らかになったため、今後銅損の低減手法を検討する。

### 文 献

- (1) 日下, 伊東, A. Gopal, 平成 29 年電気学会半導体電力変換研究会, No. SPC-17-127 (2017)
- (2) 日下, 伊東, A. Gopal, 電気学会産業応用部門大会, Vol. 1, No. 96 (2017)
- (3) 司城, 小川, 尾林, 中村, 竹内, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, Vol. 4, No. 10, pp. 105-108 (2016)