

共振回路付きサーチコイルの直並列接続回路を用いた 非接触給電の異物検知法

学生員 宮島 奈那* 正員 金子 裕良

正員 阿部 茂 (埼玉大学) 保田 富夫 ((株) テクノバ)

Methods for Detecting Foreign Metallic Objects using Search Coil with Series and Parallel Resonant Circuit in Wireless Battery Charger

Nana Miyajima*, Student Member, Hiroyoshi Kaneko, Member
Shigeru Abe, Member(Saitama University) Tomio Yasuda (Technova Inc.)

In wireless power transfer systems for electric vehicles, if the foreign metallic objects are in the air gap of the transformer, it leads induction heating. We can detect a metal foreign object by lining up search coil on the top of the transformer but we need as many switches as search coil. This paper presents that using resonant circuit to reduce switches.

キーワード：電気自動車，非接触給電，誘導加熱，異物検知，サーチコイル，共振

Keywords : Electric vehicle, Wireless power transfer, Induction heating, Detecting foreign object, Search coil, Resonant

1. はじめに

近年，電気自動車やプラグインハイブリッド自動車が地球環境問題や燃費性能から注目されている。その給電方法はプラグとケーブルを用いた接触給電方式が採用されているが，利便性，保守性，安全性から，将来は非接触給電方式が有望視されている⁽¹⁾⁽²⁾。

しかし，非接触給電では，地上側と車載側のトランス間の磁界領域に金属異物が混入したまま給電を行うと，誘導加熱によって金属異物が加熱され，発煙・発火や筐体の変形，給電効率の低下に繋がり，実用化にあたっての課題となっている。金属異物の検知は電気自動車用の非接触給電において，必要不可欠の技術といえる。

電気自動車用非接触給電のための異物検知法には，(1)一次・二次の給電コイルに電流を流して検知する方法⁽³⁾，(2)サーチコイルを用いた方法⁽⁴⁾，(3)サーミスタを用いる方法⁽⁵⁾などが提案されている。(1)は，補助機構なく給電装置のみでの検知が可能であるが，硬貨のような小さな異物の検知が困難である。(2)は，異物があると給電中の磁束分布が不均一になることを多数のサーチコイルで検知する方法であるが，検知性能が不明な上，多数のスイッチが必要となる。(3)は，異物の発熱をサーミスタで検知する方法のため，検出の時間遅れに留意する必要がある。

本稿では，給電開始前に小さな金属異物まで検知可能な

手法として共振回路付きサーチコイルの直並列接続回路を用いた検知手法を提案する。

サーチコイルは近傍に金属異物が存在するとインピーダンスが変化する性質を持つ。多数の小さなサーチコイルをトランス上に敷き詰めて，コイル毎にインピーダンス変化を調べれば小さな金属異物でもどこにあるかまで検知できる。これにはインピーダンス測定のための別電源の他に，従来サーチコイル数だけの多数の切り替えスイッチが必要となっていた。

このスイッチの問題を解決するため，サーチコイル毎に共振コンデンサを付けて直列あるいは並列共振回路を構成し，この共振回路を並列あるいは直列接続して，二端子の共振回路付きサーチコイル列回路を構成する。各サーチコイルの共振周波数は，適度な値を隔てて異なる値に設定する。サーチコイル列回路に入力する交流電源の周波数を変化させると，異物が置かれたサーチコイルの共振周波数近辺で，インピーダンスが変化する。このためスイッチを設置することなく，異物の有無および位置の検知が可能となる。

本手法ではサーチコイルを地上トランス上とその周辺に設置する。給電中はサーチコイルを強い磁束が貫くため，コイルに大電流が流れ，許容電流値を超える恐れがある。そこで，前記のサーチコイルを用いる手法⁽⁴⁾と同様にコイル形状を 8 字形にし，誘起電圧を相殺し大電流を防止する。

ここでは共振回路付きサーチコイル列を試作し、金属異物検知の実験と給電時にサーチコイルに流れる電流の計測を行い、本手法の有用性を確認した。

2. 自動車用非接触給電装置と検知対象異物

〈2・1〉自動車用非接触給電装置 非接触給電システムの構成例を図 1 に示す。一次直列二次並列コンデンサ方式で高周波電源にはフルブリッジインバータ、トランスの 2 次側には全波整流器を用いている。一次・二次の給電トランスにはソレノイド型(H 型コア両側巻)を用いた⁽⁶⁾。本稿では、地上側トランス上に置かれた金属異物を、給電開始前に検知する方法について述べる。

〈2・2〉検知対象異物 異物検知では、身近に存在する金属物で、トランス間(最大ギャップ 200mm)に入り得る大きさで、3kW 給電時に発熱し危険温度に達する物を対象とする。自然発火温度が 225°C 以上 (IUCOLID2000) であること、トランスカバーに使用される合成樹脂の融点が 120°C 程度であることから、危険温度を 100°C に設定した。さらに、本論文では一次・二次の給電コイル本体を用いる方法⁽⁹⁾で検知が難しい小さな金属異物を検知対象とする。

大きな異物は本手法でも検出可能であるが、給電コイルを用いる方法と組み合わせて検知しても良い。給電中の非接触給電装置のトランス間に異物を混入させ、温度を測定した結果、給電コイルを用いる方法では検知が難しい図 2 の釘と硬貨を試験対象異物に選定した。

まず、各異物を地上側トランスの各部に置いた場合の温度上昇を調べた。給電条件は、85kHz, 3kW, ギャップ長 150mm, 位置ずれなしの標準状態とした。各異物を図 3 の A~E の位置に置いた場合の温度上昇結果を表 1 に示す。表 1 より、磁極上の A, B, C に置かれた異物が危険温度に達し、特に磁極端 C では短時間に温度が上昇することが分かる。これは給電中の磁束密度と相関関係があるので、磁極上及びその周辺に本提案のサーチコイル列を設置する。

〈2・3〉異物検知システムの動作条件 異物検知は①駐車前、②駐車後・給電前、③給電中に行うことが考えられる。本手法は主に給電前(①, ②)に異物検知を行う方法であるが、給電中に異物検知が必要な場合は、一定間隔で短時間給電を停止しその間に異物検知を行うことが可能である。

3. 共振回路付きサーチコイルを用いた異物検知法

〈3・1〉回路構成 サーチコイル毎に共振コンデンサを接続して直列あるいは並列共振回路を構成し、この共振回路を並列あるいは直列接続して、二端子の共振回路付きサーチコイル列回路を構成する。回路図を図 4 に示す。図の $L_1 \sim L_n$ がサーチコイルである。図 4(a)は n 個の直列共振回路を並列接続した回路 (SnP と記す) で、図 4(b)は n 個の並列共振回路を直列接続した回路 (PnS と記す) である。SnP 回路と PnS 回路中の各共振回路の共振周波数は、適当

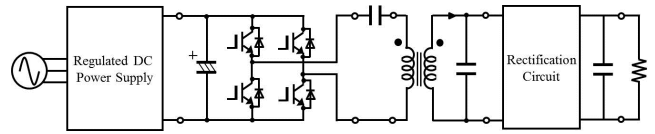


図 1 非接触給電システム
Fig.1. Wireless Transfer System

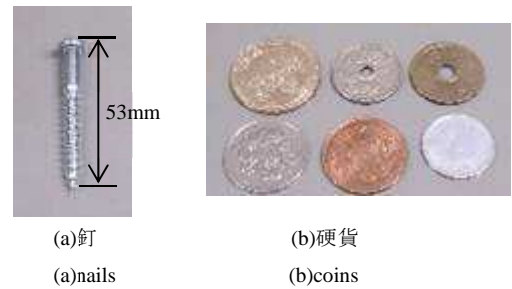


図 2 金属異物
Fig.2. Foreign Metallic Objects

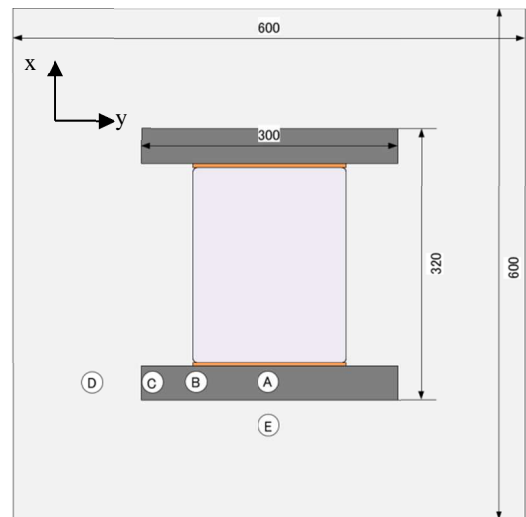


図 3 異物配置位置
Fig.3. Installation Position

表 1 温度上昇実験結果

Table 1. Experimental Results of Temperature Rise Test

異物位置	釘	100円硬貨
A	over 100°C (3'28")	over 100°C (8'37")
B	over 100°C (2'48")	over 100°C (4'52")
C	over 100°C (2'19")	over 100°C (2'2")
D	48°C	35°C
E	60°C	41°C

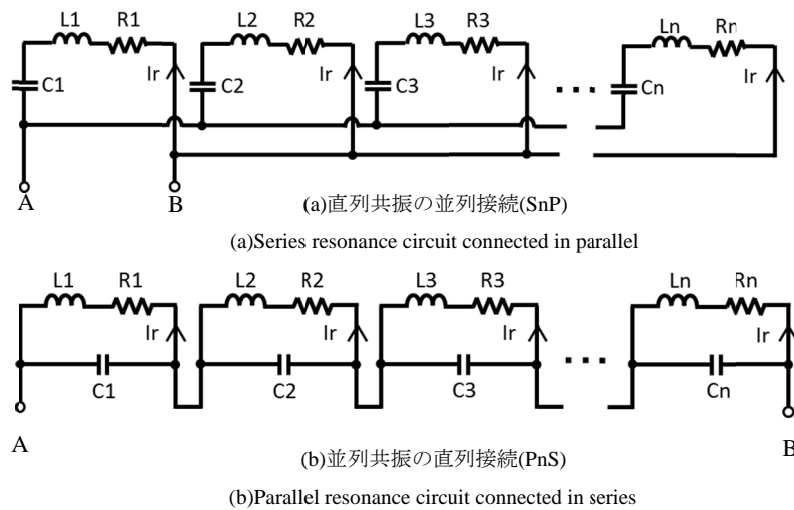


図 4 サーチコイルの接続方法

Fig.4. Method of the Connection of the Search Coils

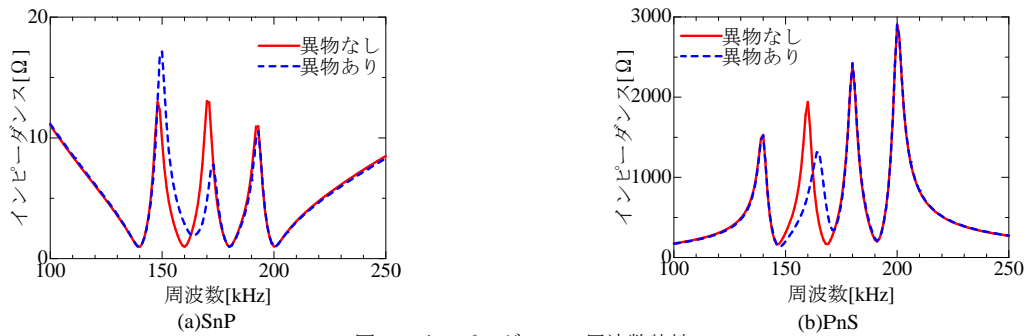


図 5 インピーダンスの周波数特性

Fig.5. Frequency Characteristics of Impedance

な間隔の異なる値に設定する。

SnP 回路および PnS 回路を用いて異物検知が可能であるか否かを調べるため、同一特性のサーチコイル 4 個からなる理想的な回路で異物検知シミュレーションを行った。各サーチコイル共振回路の共振周波数は 140kHz、160kHz、180kHz、200kHz とした。SnP 回路 と PnS 回路の周波数特性を図 5 に示す。

両回路のインピーダンスの絶対値は、各共振周波数において、SnP 回路では極小、PnS 回路では極大となる。160kHz で共振させているコイル 2 のサーチコイル上に金属異物を置いた場合の周波数特性は、160kHz 付近で特性が変化している。共振周波数でのインピーダンスの絶対値は、異物あり時は異物なし時に比べて SnP 回路では上昇し、PnS 回路では減少することがわかる。

〈3・2〉 主磁束対策 本手法では異物検知の時以外はサーチコイルの電源を切り離すため入力端子 AB 間を開放する。しかし、給電中は主磁束によってサーチコイルに誘起電圧が印加され、図 4 に示した循環電流 I_r が流れる。循環電流 I_r を抑制するため、図 6 に示す 8 の字形に配線したコイルを用いる。隣り合う 2 つのコイルを逆向きに接続することで 8 の字形コイルは形成される。このため給電中に鎖交する主磁束により発生した誘起電圧は相殺され循環電

流は大電流とならない。

〈3・3〉 異物検知手順 次の手順で異物を検知する。

- ① 各サーチコイルの共振周波数付近で SnP 回路はインピーダンスが極小、PnS 回路は極大となる。このため、SnP 回路では共振周波数の正弦波の定電流を順に流し、端子間に発生する電圧を測定する。PnS 回路では共振周波数の正弦波の定電圧を順に印加し、端子間を流れる電流を測定する。
- ② SnP 回路では事前に測定した異物なしの時の電圧値と①で測定された電圧値の比を求める。PnS 回路では事前に測定した異物なしの時の電流値と①で測定された電流値の比を求める。
- ③ ②で求めた比の値が閾値を越えた場合、該当する共振周波数のサーチコイル上に異物が存在すると判定する。

〈3・4〉 試作回路仕様 サーチコイルは金属異物が周囲に存在すると、インピーダンスが変化する。このときコイルの内径が小さく、巻数が多く、検知周波数が高い方がインピーダンスの変化が大きく検知感度が高くなる。釘や硬貨の異物の大きさ、トランスの磁極の寸法、異物の位置等を考慮して、図 8 に示す巻数 14 のコイル 12 個からなるサーチコイル列を試作した。隣接する 2 コイルを 8 の字に接続し、6 組の 8 の字形コイル（コイル 1～6）を構成した。

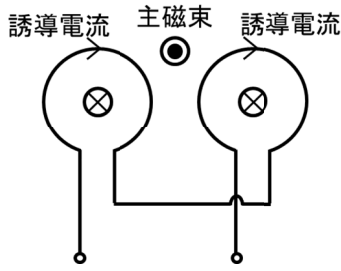


図6 8の字コイル
Fig.6. 8-Shaped Coil

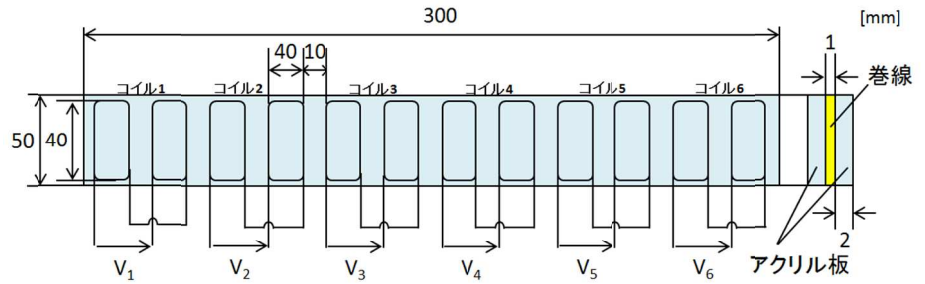


図7 試作サーチコイル構成図
Fig.7. Configuration of Trial Product Search Coil

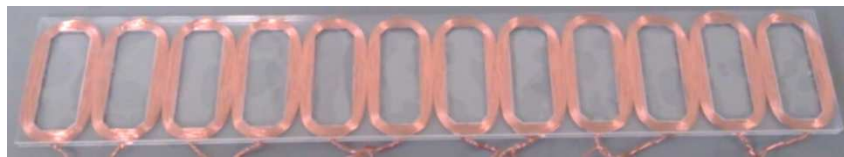


図8 試作サーチコイル
Fig.8.Trial Product Search Coil

表2 コイルの定数

Table 2. Coil's Parameters

f[kHz]	コイル No.	L[uH]	R[Ω]	Q
200	1	15.6	0.520	38
220	2	16.4	0.530	43
240	6	15.8	0.540	44
260	4	16.0	0.551	48
280	5	16.0	0.563	50
300	3	16.5	0.576	54

表3 作製したコンデンサ容量と共振周波数

Table 3. Capacitance and resonant frequency of condenser

	コイル No.	1	2	6	5	4	3
定数より導いた コンデンサ	共振周波数[kHz]	200	220	240	260	280	300
	コンデンサ容量[nF]	40.5	31.8	27.8	23.4	20.2	17.1
作製した コンデンサ	共振周波数[kHz]	206	220	244	266	286	306
	コンデンサ容量[nF]	37.4	31.8	26.9	22.3	19.4	16.4

接続方法を変更するのみで SnP, PnS 両回路を実現できる。各 8 字形コイル $L_1 \sim L_6$ が 200kHz から 20kHz 間隔で 300kHz までの共振周波数の共振回路と成るようにコンデンサ $C_1 \sim C_6$ を接続する。試作の 8 の字形コイルには特性 (L_i, R_i) にばらつきがあり、また周波数が高いほど検知感度が高くなるため、Q 値が高いコイルから順に共振周波数を低く設定した。各 8 の字形コイルの回路定数を表 2 に示す。

4. 異物検知実験

〈4-1〉 試作回路の基本特性 試作回路の共振周波数を表 3 に示す。共振コンデンサ C_i の値のばらつきは共振周波数を変えて補正した。試作回路の端子 AB 間のインピーダンスの周波数特性を図 9 に示す。理論通りインピーダンスの絶対値が各共振周波数において、SnP では極小、PnS では極大となることが確認できた。また、異物として 100 円硬

貨をコイル 2 のサーチコイル上に置いた場合の周波数特性も図 9 に示す。異物の有無によりコイル 2 の共振周波数 (220kHz) 付近のインピーダンスが変化し、異物あり時は異物なし時に比べて SnP 回路では上昇し、PnS 回路では減少することを確認した。

〈4-2〉 異物の種類による検知能力 まず、異物種類による検知感度を比較した。アルミ缶, 100 円硬貨, 釘を金属異物としてコイル 3 上に置いた場合の異物検知実験結果を表 4 に示す。実験は、SnP 接続で定電流 100mA を流したときの異物なし時と異物あり時の端子間電圧を測定し、その比を算出した。アルミ缶に比べ、100 円硬貨や釘の場合異物なし時とあり時の電圧の比が小さく、検知感度が低下することがわかった。アルミ缶と比べ、100 円硬貨や釘は材質や形状が磁束を妨げにくく、インピーダンス変化が発生しにくいためだと考えられる。

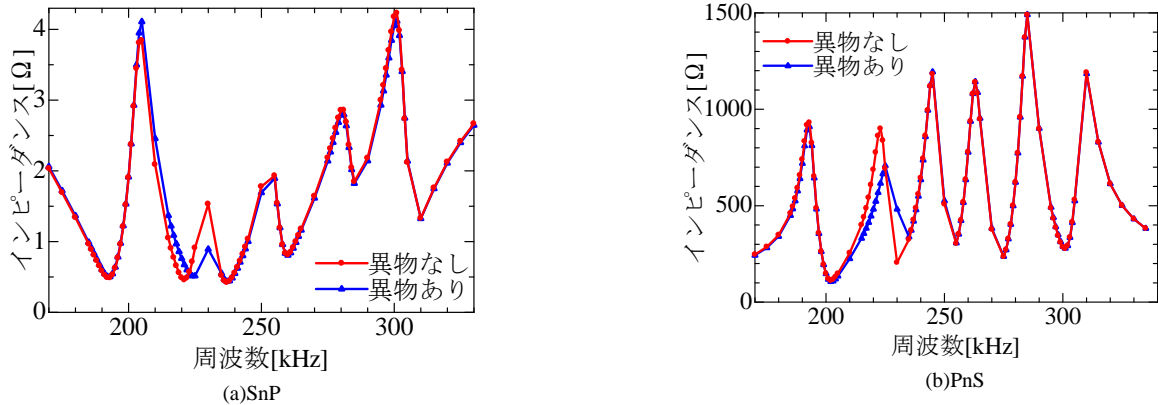


図 9 試作回路のインピーダンス周波数特性

Fig.9 Frequency characteristics of impedance

表 4 異物種類による検知能力 (SnP の場合)

Table 4. Detectable ability by foreign objects kind

	電圧[mV]	異物なし時との電圧比
異物なし	50	
アルミ缶	258	5.16
釘	63	1.26
100 円硬貨	72	1.44

表 5 100 円硬貨を異物としたときのコイルによる検知能力

Table 5. Detectable ability when foreign object is 100 yen coin

(a)SnP				(b)PnS			
f[kHz]	異物なし V[mV]	異物あり V'[mV]	V 比	f[kHz]	異物なし I[mA]	異物あり I'[mA]	I 比
191	61	74	1.21	192	6.4	8.79	1.37
220	75	101	1.35	222	7.02	8.65	1.23
235	85	110	1.29	244	4.77	7.31	1.53
258	91	123	1.35	261	4.06	8.1	2.00
285	78	157	2.01	283	8.78	20	2.28
305	146	341	2.34	310	5.67	11.8	2.08

表 6 釘を異物としたときのコイルによる検知能力

Table 6. Detectable ability when foreign object is nail

(a)SnP				(b)PnS			
f[kHz]	異物なし V[mV]	異物あり V'[mV]	V 比	f[kHz]	異物なし I[mA]	異物あり I'[mA]	I 比
189	85	130	1.53	186	29	37	1.28
200	131	183	1.40	200	40	53	1.33
219	100	122	1.22	220	28	33	1.18
233	98	143	1.46	237	28	31	1.11
256	273	340	1.25	256	43	53	1.24
277	176	242	1.38	277	31	38	1.23

〈4・3〉 各 8 の字コイルの検知能力 コイル 1~6 について異物検知実験を行った。異物は前節の実験より検知困難である 100 円硬貨と釘を選定した。実験は、まず異物がない状態での、SnP 回路では各共振周波数について定電流 100mA を流し AB 端子間電圧値を測定した。PnS 回路では、各共振周波数について定電圧 7.5V を印加し、AB 端子間に流れる電流値を測定した。次に、各コイル上に異物を置いて、SnP 回路では定電流を流し電圧値を測定し、PnS 回路

では定電圧を印加し端子に流れる電流値を測定した。以上の実験結果から、異物なし時と異物あり時の電圧比、電流比を算出した。異物を 100 円硬貨、釘としたときの結果を表 5、6 に示す。表 5、6 より、異物なし時と異物あり時の比は最低で 1.11 となっていることから、しきい値を 1.1 と設定することで異物検知が可能である。実用上は電圧比/電流比は 2 以上が望ましいため、サーチコイルの内径を小さく、巻数を多くするなど今後サーチコイルの検出感度の

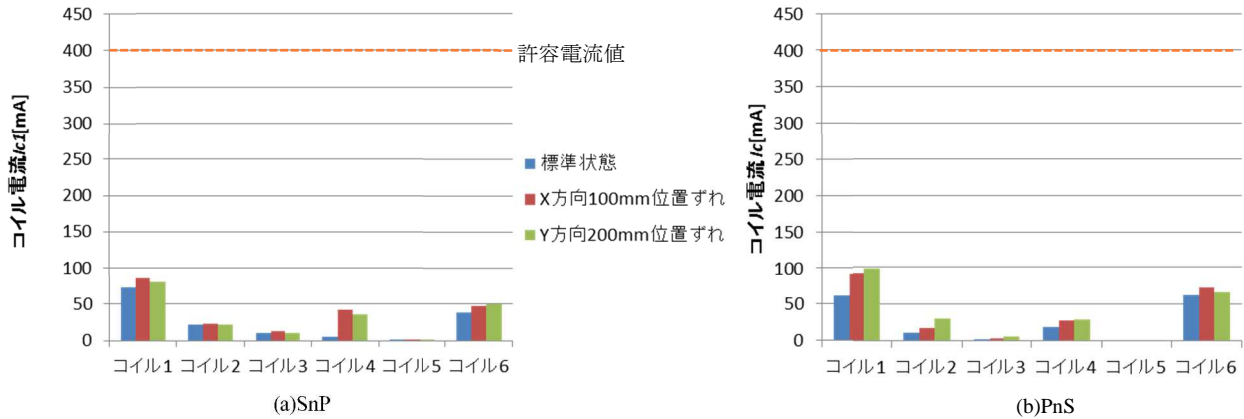


図 10 3kW 給電時の循環電流

Fig.10. Circulation current

表 7 コイル 1 のサーチコイル電流 I_{c1} と I_{cr1} の比較Table 7. Comparison between I_{c1} and I_{cr1} of Coil-1

	SnP			PnS		
	I_c [mA]	I_{cr} [mA]	誤差[%]	I_c [mA]	I_{cr} [mA]	誤差[%]
標準状態	73.3	82	11.8	61.0	67	9.82
X 方向位置ずれ	85.9	102	18.8	91.6	95	3.70
Y 方向位置ずれ	80.7	105	30.1	98.0	99	1.05

向上を考慮する必要がある。

〈4-4〉 3kW 給電時の誘導電流の影響 サーチコイル列をトランスの磁極上に設置した状態で給電を行い、循環電流を測定した。サーチコイルの許容電流値は 400mA である。給電は、85kHz, 3kW, ギャップ長 150mm で、位置ずれなしの標準状態, X 方向 100mm 位置ずれ, Y 方向 200mm 位置ずれについて行った。循環電流は各共振回路のコンデンサの電圧 $V_{c1} \sim V_{c6}$ を測定し、コンデンサの容量値からサーチコイル電流値 $I_{c1} \sim I_{c6}$ を求めた。実験結果を図 10 に示す。測定精度を検証するため、コイル 1 のサーチコイル電流についてのみ、電流計を用いて電流を実測した。これをサーチコイル電流 I_{cr1} とする。結果を表 7 に示す。コンデンサ電圧による測定誤差は 20%程度であった。

実験結果より、循環電流は最大 105mA で許容電流値 400mA 以下に収まることがわかった。この結果、定格電力を給電中でもサーチコイルに過電流が流れることなく、安全であることが確認できた。

5. まとめ

本論文では、電気自動車用非接触給電の金属異物検知法として、共振回路付きサーチコイルの直並列接続回路を用いる方法を提案した。提案手法はサーチコイル毎に共振周波数が異なる共振回路となっているため切換スイッチ不要で、電源周波数をスイープするだけで異物の位置も知ることができる。また、小型の 8 字サーチコイルを多数用いるため、電力給電時の循環電流を押さえるとともに、従来検知困難であった釘や小硬貨の検出が可能である。本手法の有用性、循環電流値が安全な値に収まっていることを実験

によって確認した。提案手法は電気自動車用以外の非接触給電装置、例えば携帯機器用の非接触給電の異物検知にも適用可能である。

文 献

- (1) 阿部茂・金子裕良:「非接触給電技術」, 電気学会誌, Vol.128, No.12, pp.796-799(2008)
- (2) M.Budhia, G.A.Covic, and J.T.Boys: "A New Magnetic Coupler for Inductive Power Transfer Electric Vehicle Charging Systems", IEEEIECON 2010, pp.2481-2486(2010)
- (3) 駒崎伸也・金子裕良・阿部 茂・保田富夫・鈴木 明:「電気自動車用非接触給電装置のギャップ中の異物検知法」, 平成 24 年電気学会産業応用部門大会論文集, No.4-10, pp.IV115-IV120 (2012.8.23)
- (4) Witricity Corporation, S.Verghese, M.P.Kesler, K.L.Hall, H.T.Lou: "Foreign Object Detection in Wireless Energy Transfer Systems", U.S.Patent 2013/0069441(2013.3.21)
- (5) 井田 和彦・松森 弘之・藤田 幸一・保田 富夫・金子 裕良・阿部 茂:「非接触給電システム用金属検知方式」, 自動車技術会秋季学術講演前刷集 20135896, No.110-13, pp.13~16 (2013)
- (6) 千明将人・長塚裕一・金子裕良・阿部 茂・保田富夫・鈴木 明:「電気自動車用非接触給電トランスの新コア構造と鉄損のモデル化」, 電学論 D, Vol.132, No.1, pp.123~124 (2013)