

一次直列二次直列共振コンデンサを用いた非接触給電の給電効率

学生員 長塚 裕一, 学生員 江原 夏樹, 正員 金子 裕良, 正員 阿部 茂 (埼玉大学)

Efficiency of Contactless Power Transfer Systems using Series Resonant Capacitors

Yuichi Nagatsuka, Natsuki Ehara, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe (Saitama University)

This paper presents efficiency of contactless power transfer system using series resonant capacitors both primary and secondary windings. Since the circuit analysis becomes simple, the approximate value of the power transfer efficiency can be derived. This paper describes the derivation of the efficiency, and the test results.

キーワード：非接触給電，共振コンデンサ，変圧器，効率

Keywords : contactless power transfer system, resonant capacitor, transformer, efficiency

1. はじめに

非接触給電の漏れリアクタンス補償として、筆者らは一次直列二次並列共振コンデンサ方式 (SP 方式) を推奨してきた。同方式は電源周波数でコンデンサを含むトランス部の等価回路が理想変圧器と等価になり扱いやすい⁽¹⁾。しかし二次巻線には負荷電流に加え共振電流が流れるため、巻線抵抗で発生する銅損が大きくなり、通常の変圧器よりも効率が低下する問題点があった⁽²⁾。

本稿では、並列共振を用いないために SP 方式よりも高効率となる可能性のある一次直列二次直列共振コンデンサ方式⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ (SS 方式) の給電効率の近似式を導き、その最大値が SP 方式よりもほんの少し高くなることを示す。

2. 一次直列二次直列共振コンデンサ方式

2.1 等価回路 共振コンデンサ C'_{S1} , C_{S2} と抵抗負荷 R_L を含めたトランス部の詳細等価回路を図 1 に示す。一次側諸量は巻数比 $a = (N_1/N_2)$ で二次側に換算し、ダッシュを付けて表す。

2.2 直列共振コンデンサ⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾ フェライトコアとリッツ線を用いると、電源周波数 f_0 において鉄損を示す r'_0 と巻線抵抗 r'_1 , r_2 は、対応するリアクタンス x'_0 , x'_1 , x_2 に比べ十分小さい。そこで r'_0 , r'_1 , r_2 を無視して回路解析を進める。直列共振コンデンサ C'_{S1} , C_{S2} の値を電源周波数で一次巻線と二次巻線の自己リアクタンスと共振するよう⁽¹⁾ 式に決める。

$$x'_{S1} = \frac{1}{\omega_0 C'_{S1}} = x'_0 + x'_1 \quad x_{S2} = \frac{1}{\omega_0 C_{S2}} = x'_0 + x_2 \quad \dots\dots (1)$$

このとき一次側から見たインピーダンスは(2)式となる。

$$Z' = \frac{V'_{IN}}{I'_{IN}} = \frac{x'_0{}^2}{R_L} \quad \dots\dots (2)$$

一次側と二次側の電圧電流の関係は次式で表される。

$$V'_{IN} = -jx'_0 I_L \quad I'_{IN} = -j \frac{1}{x'_0} V_L \quad \dots\dots (3)$$

これはイミタンス変換器特性と呼ばれ、一次側を定電圧 (定電流) で駆動すれば二次側は定電流 (定電圧) になる⁽⁵⁾。

3. 給電効率

3.1 給電効率 フェライトコアを用いると鉄損 r'_0 は十分小さいため、図 1 で巻線抵抗 r'_1 , r_2 だけを考慮して、給電効率 η の近似式を求めると(4)式となる。

$$\eta = \frac{R_L I_L^2}{R_L I_L^2 + r'_1 I_{IN}^2 + r_2 I_L^2} = \frac{R_L}{R_L + r_2 + r'_1 \left(\frac{R_L}{x'_0} \right)^2} \quad \dots\dots (4)$$

(4)式から給電効率 η が最大となる抵抗 R_{LmaxSS} の値と、そのときの最大効率 η_{maxSS} を求めると、(5)式と(6)式となる。

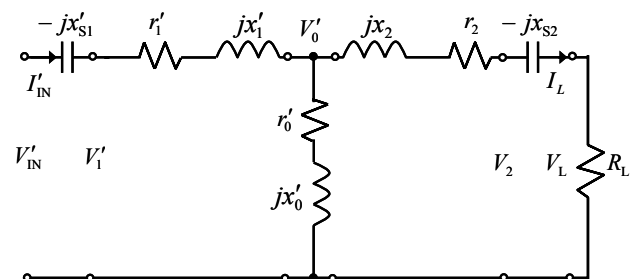


図 1 詳細等価回路

Fig.1. Detailed equivalent circuit.

表1 トランス定数

Table 1. Parameters.

freq[kHz]	20
N_1	18
N_2	9
r_0 [mΩ]	0.45
r_1 [mΩ]	82.5
r_2 [mΩ]	20.9
l_0 [μH]	40.2
l_1 [μH]	64.3
l_2 [μH]	17.2
C_{S1} [μF]	0.60
C_{S2} [μF]	2.30
k	0.38

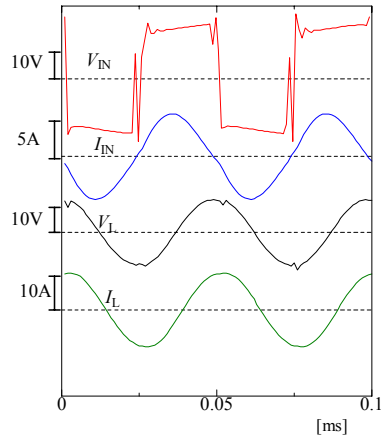


図2 電圧電流波形($R_L=1.32$)

Fig.2. Results($R_L=1.32$).

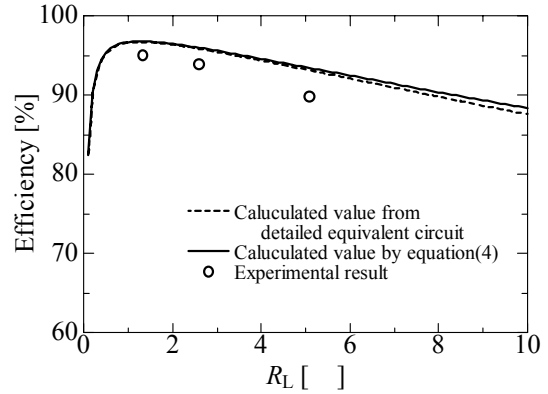


図3 給電効率の負荷特性

Fig.3. Efficiency with load change.

$$R_{LmaxSS} = x'_0 \sqrt{\frac{r_2}{r'_1}} \dots (5) \quad \eta_{maxSS} = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{x'_0} \sqrt{\frac{r'_1}{r_2}}} \dots (6)$$

一方、SP方式の効率が最大となる抵抗 R_{LmaxSP} と最大効率 η_{maxSP} は、(7)式と(8)式となる⁽²⁾。

$$R_{LmaxSP} = (x'_0 + x_2) \sqrt{\left(\frac{x'_0 + x_2}{x'_0}\right)^2 \frac{r'_1}{r_2} + 1} \dots (7)$$

$$\eta_{maxSP} = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{x'_0} \sqrt{\frac{r'_1}{r_2} + \left(\frac{x'_0}{x'_0 + x_2}\right)^2}} \dots (8)$$

(6)式と(8)式から最大効率 η_{max} はSP方式よりSS方式のほうが高い。また、給電効率を上げるには、巻線抵抗 r'_1 、 r_2 を小さくし、励磁リアクタンス x'_0 を大きくすることが必要である。

また実際の運転条件が(5)式と(7)式の負荷に近くなるようトランス定数や電源周波数を調整することも重要である。

3-2 給電実験 SS方式の基本的な特性を調べるため、給電電力を100W程度とし給電実験を行った。実験で使用する給電トランスのトランス定数と共振コンデンサ値を表1に示す。

入力電圧を周波数20kHzの矩形波で基本波実効値18V一定の条件で負荷抵抗を1.32 (R_{LmaxSS})、2.59、5.09と変化させたときの給電実験結果を図2、図3、表2に示す。負荷電流はほぼ一定となり、負荷電圧が入力電流同様倍々に上昇しており(3)式を満たしている。図2の波形から理論通り V_{IN} 、 I_{IN} と V_L 、 I_L は位相が90度ずれている。図3より効率も理論値とよく一致している。

表1のトランス定数で(6)式と(8)式の最大効率を計算すると、SS方式が96.8%に対しSP方式は96.6%とSS方式が少し高い。なおSP方式で最大効率となる負荷抵抗9.9 (R_{LmaxSP})での最大効率の実測値は95.1%であった。また、SS方式の最大効率となる負荷抵抗1.32 (R_{LmaxSS})での最大効率の実測値は95.1%でSP方式と同値だった。

表2 実験結果

Table 2. Results.

R_L [Ω]	1.32	2.59	5.09
V_{IN} [V]	18.5(18.5)	18.6(18.6)	18.8(18.8)
I_{IN} [A]	4.02(3.94)	7.69(7.62)	14.6(14.6)
V_L [V]	9.72(9.86)	19.2(19.2)	37.2(37.0)
I_L [A]	7.24(7.20)	7.19(7.15)	6.82(7.04)
P_{IN} [W]	71.2(70.8)	142.(138.)	272.(271.)
P_{OUT} [W]	67.7(68.4)	133.(132.)	245.(253.)
η [%]	95.1(96.6)	93.9(95.7)	89.9(93.1)

() : calculated value from detailed equivalent circuit.

4. まとめ

本稿ではSS方式非接触給電の給電効率の近似式からその最大条件を導き、SP方式よりも最大効率が理論上少し高くなることを示した。しかし実際の給電トランスではその差はほんのわずかであることが分かった。

SS方式とSP方式を比較した場合、SS方式は電源が定電圧源であると負荷によって負荷電圧が大きく変動し、無負荷になると一次側から見たインピーダンスは r_0+r_1 とほぼゼロになり扱いづらい。従ってSP方式の方が実用的と考えられる。

文 献

- (1) 藤田敏博・金子裕良・阿部 茂：「直列および並列共振コンデンサを用いた非接触給電システム」、電学論 D, Vol.127, No.2, pp.174-180 (2007)
- (2) 阿部 茂・金子裕良：「非接触給電技術」、電学誌, Vol.128, No.12, pp.796-799 (2008)
- (3) C.S.Wang, G.A.Covic and O.H.Stielau : "Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol.51, No.1, pp.148-157 (2004)
- (4) J.de Boeiji, E.Lomonova, J.L.Duarte, A.J.A.Vandeput : "Contactless power supply for moving sensors and actuators in high-precision mechatronic systems with long-stroke power transfer capability in x-y plane", *Sensors and actuators A: physical*, 148, pp.319-328 (2008)
- (5) 入江寿一：特開2007-181162