

非接触給電の最大効率の結合係数 k とコイルの Q による表現

学生員 遠井 敬大* 正員 金子 裕良* 正員 阿部 茂*

Maximum Efficiency of Contactless Power Transfer Systems using k and Q

Takahiro Tohi*, Student Member, Yasuyoshi Kaneko*, Member, Shigeru Abe*, Member

(2011年7月28日受付)

This paper presents a simple theoretical equation of maximum efficiency for contactless power transfer systems. Conventional theoretical equations are composed of many factors such as transformer's resistances and inductances. The proposed equation is composed only of coupling factor k and Q factors. This shows ideas to improve efficiency of contactless power transfer systems.

キーワード：非接触給電, 効率, 結合係数, Q

Keywords: contactless power transfer system, efficiency, coupling factor, Q factor

1. はじめに

非接触給電では給電効率の高いトランスを設計する必要がある。筆者らは一次直列二次並列コンデンサ方式 (SP方式) の理想変圧器特性を利用して、鉄損を無視した場合の最大効率 η_{\max} とそのときの抵抗負荷の値 $R_{L\max}$ がトランス定数を用いた簡単な式で表せることを示した⁽¹⁾。本稿では η_{\max} と $R_{L\max}$ が、結合係数 k と一次コイルの Q_1 と二次コイルの Q_2 を用いて、さらに簡単な式で表現できることを示す。また一次直列二次直列コンデンサ方式 (SS方式) でも、 η_{\max} が同じ式で表されることを示す。

2. 一次直列二次並列コンデンサ方式の場合

〈2・1〉 等価回路と直列および並列コンデンサ 一次直列コンデンサ C_S と二次並列コンデンサ C_P と抵抗負荷 R_L を含む詳細等価回路を Fig. 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つけて表す。

二次側の C_P の値は、電源周波数 $f_0 (= \omega_0/2\pi)$ において二次自己インダクタンス L_2 と共振するように、一次側の C_S の値は一次側電源力率が1となるように、(1) 式の値に決める。

$$\frac{1}{\omega_0 C_P} = \omega_0 L_2 = x_p = x'_0 + x_2, \quad \frac{1}{\omega_0 C'_S} = x'_s = \frac{x'_0 x_2}{x'_0 + x_2} + x'_1 \dots (1)$$

フェライトコアとリッツ線を用いると鉄損を表わす r'_0 と巻線抵抗 r'_1, r_2 は、電源周波数 f_0 においてトランスのリアクタンス $x'_0 (= \omega_0 M/a)$, x'_1, x_2 に比べ十分小さい。従って r'_0 と r'_1, r_2 を省略した Fig. 2(a) の回路で解析を進める。

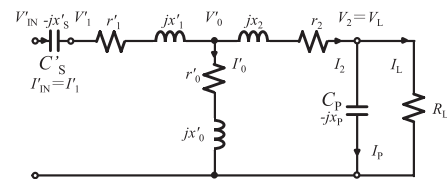


Fig. 1. Detailed equivalent circuit for method of SP.

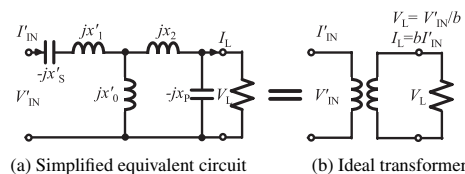


Fig. 2. Simplified equivalent circuit and ideal transformer.

なお M は相互インダクタンス, $L_1 = a^2(x'_1 + x'_0)/\omega_0$ である。

ここで、 V'_IN と V_2 , I'_IN と I_L の関係を求めると、(2) 式が成り立ち巻数比 b の理想変圧器と等価となる。

$$V'_IN = V_IN/a = bV_2, \quad I'_IN = I_L/b, \quad b = \frac{x'_0}{x'_0 + x_2} \dots (2)$$

〈2・2〉 給電効率とその最大値 Fig. 1 で鉄損を無視すると ($r_0 = 0$)、トランス効率 η は (3) 式となる。

$$\eta = \frac{R_L I_L^2}{R_L I_L^2 + r'_1 I_1^2 + r_2 I_2^2} \dots (3)$$

トランス効率の最大値 $\eta_{\max SP}$ とそのときの抵抗負荷の値 $R_{L\max SP}$ を求めると (4) 式となる⁽¹⁾。

* 埼玉大学 大学院 理工学研究科
 〒338-0825 さいたま市桜区下大久保 255
 Graduate school of Science Engineering, Saitama University
 255, Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama 338-0825, Japan

$$R_{LmaxSP} = x_p \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r'_1}{r_2} + 1} \quad \eta_{maxSP} = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{x_p} \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r'_1}{r_2} + 1}} \dots\dots\dots(4)$$

〈2・3〉 最大効率の k と Q による表現 コイルの Q を (5) 式で定義し, (6) 式を用いると, (4) 式は (7) 式に変形できる。

$$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{r_1}, \quad Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{r_2}, \quad k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{1}{k^2} \frac{Q_2}{Q_1} \gg 1 \dots\dots\dots(6)$$

$$R_{LmaxSP} = \frac{r_2 Q_2}{k} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}} \quad \eta_{maxSP} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k \sqrt{Q_1 Q_2}}} \dots\dots(7)$$

非接触給電では Q_1 と Q_2 は一般に数 100 程度でほぼ値が等しいので, k が 0.3 程度, またはそれ以下であれば (6) 式は成り立つ。(7) 式より最大効率は k と Q だけで表され, 効率を上げるには k と Q を大きくするだけでよいことが分かる。

3. 一次直列二次直列コンデンサ方式の場合

〈3・1〉 等価回路と直列コンデンサ

一次側直列コンデンサ C_{S1} と二次側直列コンデンサ C_{S2} と抵抗負荷 R_L を含む詳細等価回路を Fig. 3 に示す。 C_{S1} と C_{S2} の値は, 電源周波数 f_0 で一次コイルと二次コイルの自己インダクタンスと共振するように (8) 式の値に決める。このとき一次側と二次側の電圧と電流に (9) 式のイミタンス変換器特性が成り立つ。

$$x'_{S1} = \frac{1}{\omega_0 C'_{S1}} = x'_0 + x'_1 \quad x_{S2} = \frac{1}{\omega_0 C_{S2}} = x'_0 + x_2 \dots\dots\dots(8)$$

$$V'_{IN} = -jx'_0 I_L \quad I'_{IN} = -j \frac{1}{x'_0} V_L \dots\dots\dots(9)$$

〈3・2〉 給電効率とその最大値 SP 方式と同様にトランス効率を (3) 式で定義すると, その最大値 η_{maxSS} とそのときの抵抗負荷の値 R_{LmaxSS} は (10) 式で表される⁽²⁾。

$$R_{LmaxSS} = x'_0 \sqrt{\frac{r_2}{r'_1}} \quad \eta_{maxSS} = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{x'_0} \sqrt{\frac{r'_1}{r_2}}} \dots\dots\dots(10)$$

〈3・3〉 最大効率の k と Q による表現 (10) 式の R_{LmaxSS} と η_{maxSS} を (5) 式の Q_1, Q_2, k を用いて表すと (11) 式となる。

$$R_{LmaxSS} = kr_2 \sqrt{Q_1 Q_2} \quad \eta_{maxSS} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k \sqrt{Q_1 Q_2}}} \dots\dots(11)$$

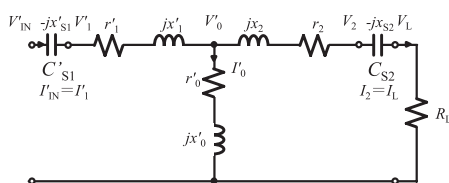


Fig. 3. Detailed equivalent circuit for method of SS.

Table 1. Transformer parameters.

Frequency[kHz]	30	50
Gap[mm]	30	
N_1	18	
N_2	9	
k	0.34	0.34
r_1 [mΩ]	108.4	139.8
r_2 [mΩ]	27.2	34
L_1 [μH]	84.8	84.7
L_2 [μH]	21.6	21.4
Q_1	147.5	190.4
Q_2	149.7	197.9
R_{LmaxSP} [Ω]	12.2	20.3
R_{LmaxSS} [Ω]	1.3	2.2
η_{max} [%]	96.2	97.0



Fig. 4. Transformer

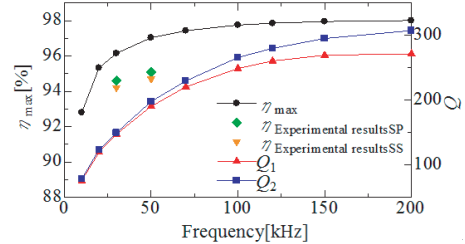


Fig. 5. Experimental results.

SP 方式は電磁誘導方式で, SS 方式は磁気共鳴方式で一般的である。 k と Q_1, Q_2 の値が同じであれば, (7) 式と (11) 式が同一であるため, 両方式の効率の最大値はほぼ一致する。

4. 計算と実験による検証

標準ギャップ長 30 mm の非接触トランス (Fig. 4) の定数を Table 1 に示す。周波数による効率の変化と Q_1, Q_2 の変化を Fig. 5 に示す。図中に (7) 式と (11) 式で計算した η_{max} と 1.5 kW 給電実験 ($f_0 = 30$ kHz, 50 kHz) での効率 η も示した。 Q_1, Q_2 は LCR メータによる測定値である。周波数を上げ Q を大きくすると効率が上がることも, しかし周波数が 100 kHz を越すと Q や効率の上昇が飽和すること, SP 方式と SS 方式の効率はほぼ等しいこと, がよく分かる。 k はギャップ長で決まり, 周波数による変化は小さい。100 kHz 以上では近接効果等によるコイルの抵抗増加に注意が必要である。なお, 理論効率と実験効率の差は鉄損が主因と考えられる。

5. むすび

非接触給電のトランス効率の最大値とそのときの抵抗負荷の値は, 結合係数 k とコイルの Q_1, Q_2 の簡単な式で表現できる。効率の最大値は SP 方式と SS 方式でほぼ同じ値となり, 効率を上げるには k と Q_1, Q_2 の値を大きくすればよい。

文 献

- (1) S. Abe and Y. Kaneko: "Contactless Power Transfer Systems", IEEJ Journal, Vol.128, No.12, pp.769-799 (2008) (in Japanese)
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)
- (2) Y. Nagatsuka, N. Ehara, Y. Kaneko, and S. Abe: "Efficiency of Contactless Power Transfer Systems using Series Resonant Capacitors", Proc. of 2009 Japan Industry Applications Society Conference IEE Japan, No.2-27 (2009) (in Japanese)
長塚祐一・江原夏樹・金子裕良・阿部 茂:「一次直列二次直列コンデンサを用いた非接触給電の給電効率」, 電気学会産業応用部門大会論文集, No.2-27 (2009)