

電界共振結合における効率および入力電力の大電力化の設計法

一柳 宏樹* 居村 岳広 (東京理科大学)

Design Method for Increasing The Input Power of Capacitive Power Transfer and Improving Efficiency
Koki Ichiyangi*, Takehiro Imura, (Tokyo University of Science)

In recent years, there has been a lot of research on capacitive power transfer, most of which involves power transmission at high frequencies. In this paper, the efficiency and input power equations in capacitive power transfer are analyzed and the input power design method is discussed. It is also found that the input power is proportional to the frequency and the coupler capacitance, so the input power can be increased using this relationship, and the transmission efficiency is higher if the internal resistance is smaller.

キーワード：ワイヤレス電力伝送, 電界結合方式, 大電力, 設計法, 効率改善, 内部抵抗,
(Wireless Power Transfer, Capacitive Power Transfer, High Power, Design Method, Improving Efficiency, Internal Resistance)

1. はじめに

近年では Qi 規格を用いたスマートフォン向け充電機器が販売されているが、その多くが磁界結合を用いて電力伝送を行っている^[1]。一方、電界結合方式 CPT (Capacitive Power Transfer) は金属板を送受電カプラとして用いるため、磁界結合方式と比較して安価である。また電界結合方式は金属異物による発熱や効率低下に強く、磁界結合方式と比較して良い点が存在する^{[2]-[4]}。

現在電界結合方式は高周波 (数百 kHz から MHz 以上) での伝送が盛んに行われている^{[5]-[7]}。しかし、高周波での伝送が主流である理由はあまり分かっておらず、電源の出力電力と周波数とカプラ容量との関係性が明確になっていない。文献[8]、[9]では補償回路に工夫をし、カプラ間にかかる電圧を大きくすることで大電力化を行い、文献[10]では最

適負荷を調整することで効率の最大化を行っている。一方で、電力を大きくする設計方法についての研究がこれまでにない。よって電界結合方式における伝送の周波数と効率、電源の出力電力の関係を求めることでメカニズムを解明していく。

2. S-S 回路の式の導出

共振コイルを直列に入れる S-S 回路の等価回路は Fig. 1 のように表すことができる。金属プレートの内部抵抗は共振用コイルの内部抵抗と比較して十分に小さいため、金属プレートの内部抵抗を考慮しないものとする。

等価回路から効率 η と電源の出力電力 P_1 の式を導出すると以下の(1)~(5)式のようにになる。また、最適負荷 R_{Lopt} は(6)式のようにになる。

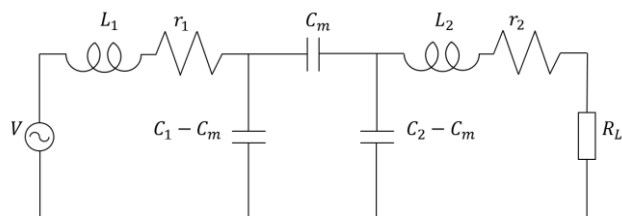


図1 CPT の S-S 等価回路

Fig. 1 S-S equivalent circuit diagram of CPT

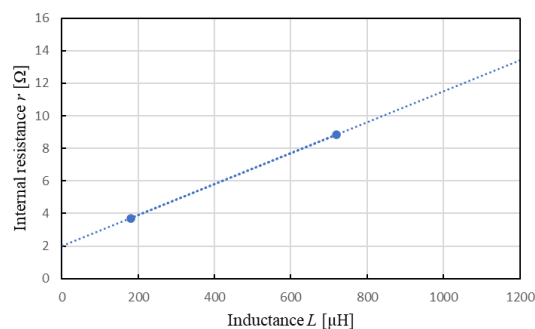


図2 コイルのインダクタンスと内部抵抗の関係

Fig. 2 Relationship between coil inductance and internal resistance

$$\eta = \frac{C_m^2 R_L}{(C_m^2(r_2+R_L)+r_1(\omega^2(C_1C_2-C_m^2)(C_1((r_2+R_L)^2L_2-L_2(1-\omega^2L_2C_2))-L_2C_1-C_m^2((r_2+R_L)^2+\omega^2L_2^2))+C_1^2))} \quad (1)$$

$$P_1 = \frac{R}{R^2+X^2} V^2 \quad (2)$$

$$R = r_1 + \frac{\omega^2 C_m^2 (r_2+R_L)(\omega^2 L_2^2+(r_2+R_L)^2)}{\omega^2 C_1^2 (r_2+R_L)^2 + \omega^4 (C_1 L_2 - (C_1 C_2 - C_m^2)(\omega^2 L_2^2 + (r_2+R_L)^2))^2} \quad (3)$$

$$X = \left(\omega L_1 + \frac{(-\omega C_1 A + \omega^3 (-L_2 + C_2(\omega^2 L_2^2 + A))(C_1 L_2 - (C_1 C_2 - C_m^2)(\omega^2 L_2^2 + A)))^2}{(\omega^2 C_1^2 A + \omega^4 (C_1 L_2 - (C_1 C_2 - C_m^2)(\omega^2 L_2^2 + A))^2)} \right)^2 \quad (4)$$

$$A = \left(r_2 + \sqrt{r_2^2 + \frac{C_m^2 (C_m^2 r_1 + C_2^2 r_2)}{\omega^2 C_2^2 (C_1^2 C_2^2 - C_m^4) r_1}} \right)^2 \quad (5)$$

$$R_{Lopt} = \sqrt{r_2^2 + \frac{C_m^2 L_2 (C_m^2 r_1 + C_2^2 r_2)}{C_2 r_1 (C_1^2 C_2^2 - C_m^4)}} \quad (6)$$

電源の出力電力の式がかなり煩雑なものとなるため、以下の条件(7)~(9)式を代入することで、簡単化するものとする。

$$L = \frac{1}{C\omega^2} \quad (7)$$

$$C_1 = C_2 = C \quad (8)$$

$$R_1 = R_2 = 0 \Omega \quad (9)$$

これらの条件を用いて導出した電源の出力電力 P_1 の式は(10)式となる。

$$P_1' = \frac{V^2}{\sqrt{\frac{k^2}{\omega^2 C^2 (1-k^2)}}} \quad (10)$$

ここで、 $k < 0.3$ の場合に $1 - k^2 \approx 1$ とすると(10)式は(11)式のように表せる。

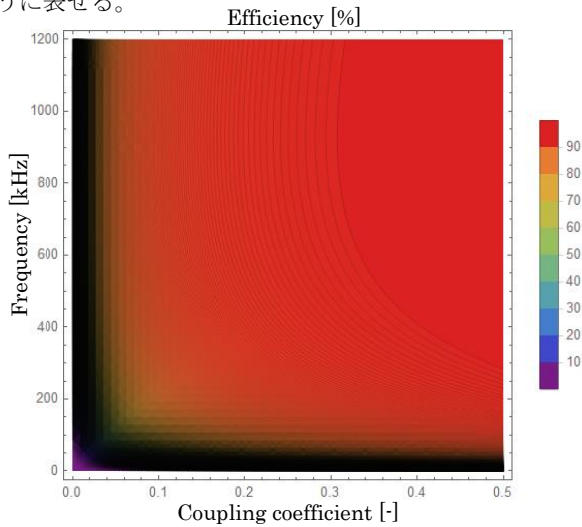


図3 効率の等値線図

Fig. 3 Efficiency contour map

$$P_1' = \frac{V^2}{\sqrt{\frac{k^2}{\omega^2 C^2 \cdot 1}}} = \frac{\omega C}{k} V^2 \quad (11)$$

(11)式から入力電力は周波数とカプラ容量に比例することが分かる。これにより、大電力化するためには周波数とカプラ容量を大きくすることが必要である。

3. 効率と入力電力の理論計算

カプラ容量を一定としたときに、共振周波数によって共振コイルのインダクタンスは変化するため、コイルの内部抵抗も変化するものと考えられる。よって、コイルの内部抵抗の変化を考慮するために検討段階としてインダクタンスの異なる2つのコイルを作成して、コイルのインダクタンスと内部抵抗の関係式(12)を求めた。また、コイルのインダクタンスと内部抵抗の関係を示したものを Fig. 2 に示す。

$$r = 0.0095L + 2.0 [\Omega] \quad (12)$$

これらを考慮したうえで効率と電源の入力電力の式(1)(2)から Mathematica を用いて解析を行った。なお、このとき $C_1 = C_2 = 140 \text{ pF}$ 、 $k = 0.1$ 、 $V = 100 \text{ V}$ とした。

(7)式と(12)式から共振周波数が低い場合に内部抵抗が大きくなることが分かる。よって、Fig. 3 から内部抵抗の増加によって伝送効率は低下することが分かる。また、Fig. 4 から電源の入力電力はあまりコイルの内部抵抗の影響を受けないことが読み取れる。また、(11)式の妥当性を検証するために、(2)式を用いて解析を行った結果を以下に示す。また、このとき $k = 0.1$ 、 $V = 100 \text{ V}$ とした。その各点のパラメータを Table 1 に示す。

Fig. 5~7、Table 1 から電源の入力電力はカプラ容量と周波数に比例することが読み取れる。

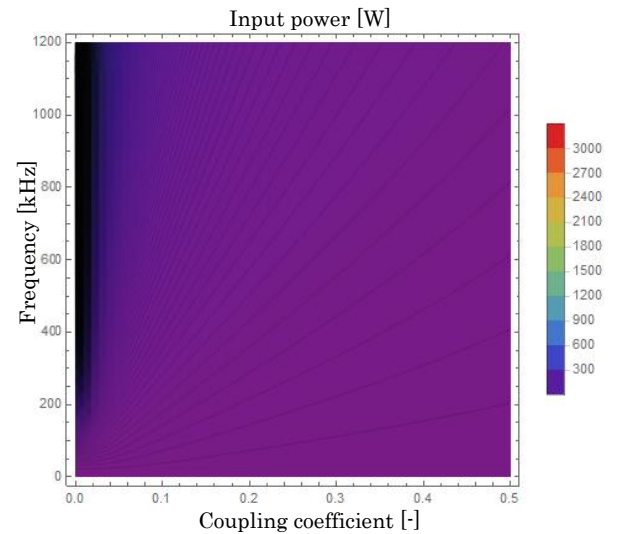


図4 電源の入力電力の等値線図

Fig.4 Input power contour map

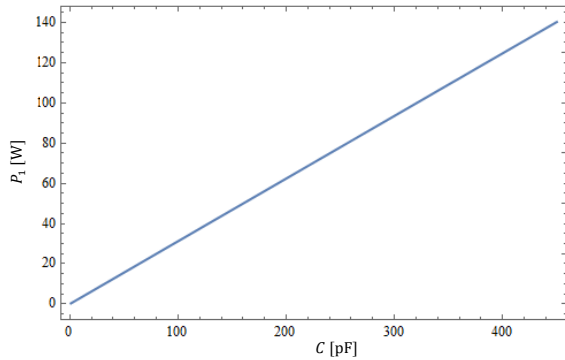


図5 容量 C と出力電力 P_1 の関係($f=500$ kHz)

Fig.5 Relationship between capacitance and input

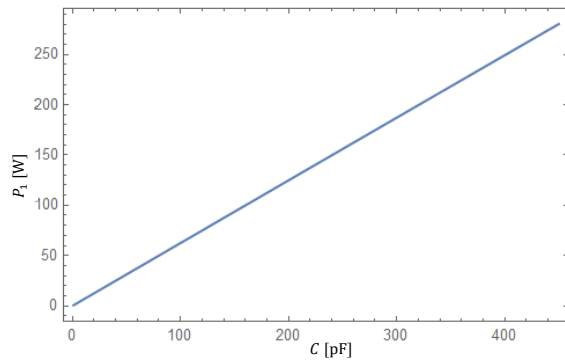


図6 容量 C と出力電力 P_1 の関係($f=1$ MHz)

Fig.6 Relationship between capacitance and input

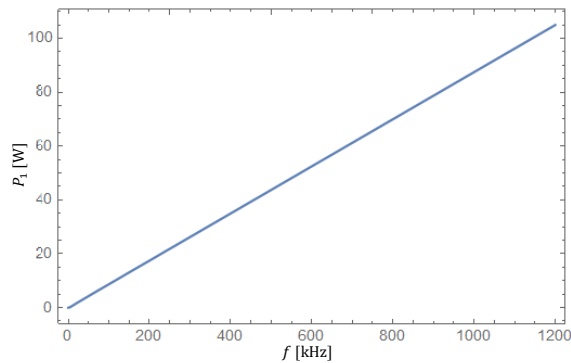


図7 周波数 f と出力電力 P_1 の関係($C=140$ pF)

Fig.7 Relationship between frequency and input

4. 実験とシミュレーションの比較

実験を行うことにより、Table. 1 の値の妥当性を検証する。実験装置を Fig. 8 に示す。この実験系は4枚の金属プレートを用いた送受電コプラ、補償インダクタ、補償キャパシタ、抵抗負荷からなる回路である。本実験では自己容量 C_1 、 C_2 は送受電コプラが本来有する自己容量 C_{in1} 、 C_{in2} と補償キャパシタ C_{ex1} 、 C_{ex2} を用いている。実験の各パラメー

タを Table 2 に示す。

これらの実験パラメータを用いて行った測定結果とシミュレーションの計算結果を Table 3 に示す。Table 3 の結果から $C = 140$ pF のときの結果が計算と比較して異なることが読み取れる。これは共振がずれていることに起因していると考えられる。 $f = 484$ kHz のとき、 $\eta = 97.0\%$ 、 $P_1 = 457.0$ mW となり測定結果とほぼ一致する。また、 $f = 986$ kHz のとき、 $\eta = 95.5\%$ 、 $P_1 = 931.0$ mW となりこちらも測定結果とほぼ一致する。

また、測定結果の効率 η が特に高くなっている部分に関して、実験で用いたコイルの内部抵抗がシミュレーションの計算で用いたものよりも小さいものとなっていたことによるものだと考えられる。

以上の実験結果から、電源の入力電力は周波数とコプラ容量に比例するので、(11)式の妥当性が証明された。

表1 効率と電源の出力電力 $C = 70$ pF, 140 pF, 280 pF

Table 1 Efficiency and input power $C = 70$ pF, 140 pF, 280 pF

		$C = 70$ pF	$C = 140$ pF	$C = 280$ pF
$f = 500$ kHz	η [%]	93.34	92.56	90.93
	P_1 [W]	21.85	43.70	87.34
$f = 1$ MHz	η [%]	95.35	93.76	90.49
	P_1 [W]	43.73	87.42	174.7

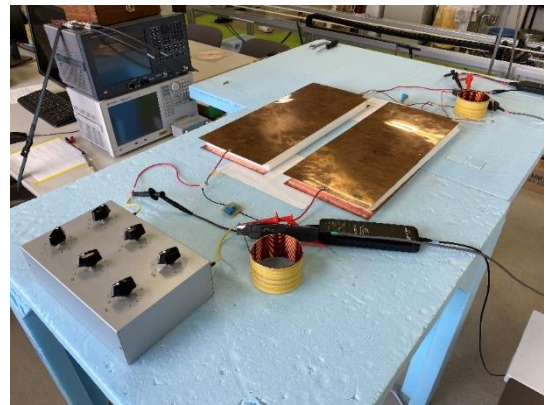


図8 実験装置

Fig.8 Experimental equipment

表 2 実験の各パラメータ

Table 2 Experimental condition

	$C = 140 \text{ pF}$	$C = 140 \text{ pF}$	$C = 280 \text{ pF}$	$C = 280 \text{ pF}$
$f \text{ [kHz]}$	500	1000	500	1000
$C_1 \text{ [pF]}$	145.0	145.0	284.7	284.7
$C_2 \text{ [pF]}$	139.7	139.7	280.1	280.1
$C_m \text{ [pF]}$	16.74	16.74	26.27	26.27
$r_1 \text{ [}\Omega\text{]}$	7.656	4.235	3.249	2.754
$r_2 \text{ [}\Omega\text{]}$	8.094	4.584	3.771	2.787
$L_1 \text{ [}\mu\text{H]}$	714.2	178.8	363.8	91.92
$L_2 \text{ [}\mu\text{H]}$	722.2	180.9	363.6	91.76
$R_{Lopt} \text{ [}\Omega\text{]}$	245.1	137.7	115.0	54.43
$V \text{ [V]}$	10	10	10	10

表 3 測定結果と計算結果の比較

Table 3 Comparison of measurement results and calculation results

		$C = 140 \text{ pF}$		$C = 280 \text{ pF}$	
		計算	測定	計算	測定
$f = 500 \text{ kHz}$	$\eta \text{ [%]}$	92.56	94.60	90.93	97.46
	$P_1 \text{ [mW]}$	437.0	271.0	873.4	818.0
$f = 1 \text{ MHz}$	$\eta \text{ [%]}$	93.76	94.30	90.49	93.71
	$P_1 \text{ [mW]}$	874.2	503.0	1747	1676

5. 結論

補償回路や最適負荷による高効率化や大電力化を検討する論文は存在するが、電力を大きくする設計方法の検討を行った研究は存在しない。電界結合方式において、効率と入力電力の式の解析を行い、大電力化する設計方法の検討を行った。以上の結果から、当然ながら効率は内部抵抗によって大きく影響されることが確認された。また、電源の入力電力はカプラの容量と周波数に比例することが分かった。よって、電界共振結合方式の S-S 回路においては、大電力化するためにはカプラ容量と周波数を大きくするように設計することが重要であることが分かった。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 17H04915 の助成を受けたものです。

文 献

- [1] G. A. Covic, J. T. Boys, "Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications," IEEE J. Emerg. Sel. Topics PE, Vol. 1, No. 1, pp. 28–41, 2013.
- [2] Y. Naka, K. Yamamoto, T. Nakata, M. Tamura, M. Masuda, "Verification Efficiency of Electric Coupling Wireless Power Transfer in Water," in ICMIM pp. 83–86, 2017.
- [3] Fei Leu, Hua Zhng, Heath Hofmann, Chris Mi, "An inductive and capacitive integrated coupler and its LCL compensation circuit design for wireless power transfer," 2016.
- [4] Mitchell Kline, Igor Izyumin, Bernhard Boser, Seth Sanders, "A generalized coupling model for Capacitive Power Transfer systems," IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010.
- [5] F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann and C. C. Mi, "A Double-Sided LC-Compensation Circuit for Loosely Coupled Capacitive Power Transfer," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.33, no.2, pp.1633-1643, 2018.
- [6] A.Bartlett P.Arsenault, "Wireless Power for Vehicle Lightweighting, Reducing Costs, and Improving Manufacturing Efficiencies," Proc.IEEE Vehicle Technol.Conf., pp1-5, 2015.
- [7] A. A.Sepahvand, "High power transfer density and high efficiency 100 MHz capacitive wireless power transfer system," Proc. IEEE Control Model. Power Electron., pp. 1-4, 2015.
- [8] Hua Zhang, Fei Lu, Heath Hofmann, Weiguo Liu, Chris Mi, "A large air-gap capacitive power transfer system with a 4-plate capacitive coupler structure for electric vehicle charging applications," 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, 2016, pp. 1726-1730, doi: 10.1109/APEC.2016.7468100., 2016.
- [9] Chris Mi, "High power capacitive power transfer for electric vehicle charging applications," 2015 6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), Hong Kong, 2015, pp. 1-4, 2015.
- [10] T. M. Mostafa, D. Bui, A. Muharam, A. P. Hu and R. Hattori, "Load Effect Analysis and Maximum Power Transfer Tracking of CPT System," in IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 67, no. 8, pp. 2836-2848, 2020.