

磁界共振結合による三相交流伝送での共振器位置の

回転変化に関する実験と最大効率となる負荷抵抗値計算

Experiment of Rotating Resonators on Three-phase Wireless Electric Power Transfer with Magnetic Resonant Coupling and Calculation of Load Resistance Value for Efficiency Maximization

谷川雄介 加藤昌樹 居村岳広 堀洋一

Yusuke Tanikawa Masaki Kato Takehiro Imura Yoichi Hori
東京大学

The University of Tokyo

1. 三相交流無線電力伝送の回転実験概要

kHz 帯での磁界共振結合方式の三相交流伝送を行う。三相交流の対称性より回転部への伝送を想定し、図 1 の様に 1 次側と 2 次側のコイル中心を正三角形に配置して重心間を結ぶ線を軸に回転させる。実験目的は、各回転角度での三相平衡伝送状態の確認、実測値と理論値の比較による理論式の検証、各回転角度の最大効率負荷抵抗値の導出である。結線を図 2 に示す。測定項目は相互インダクタンス L_m 、1 次側と 2 次側の電圧 V_1, V_2 、電流 I_1, I_2 から計算した伝送効率 η 、位相差 ϕ 、共振器は $880\mu\text{H}$ 、 2000pF の LC 直列回路、エアギャップは 0.15m である。4ch 信号発生器 (50Ω 出力端) で 120kHz の位相差 120° の正弦波 ($10\text{V}_{\text{p-p}}$) を与える。

2. 理論値の導出方法

理論式には図 2 の単相等価回路の式(1)(2)(3)を用いる [1]。 A_v は電圧比、 A_i は電流比、 η は伝送効率である。コイル内部抵抗 R_1, R_2 はコイルの実測値、 R_L は負荷抵抗値で、実験では $R_L=50\Omega$ とした。

$$A_v = \frac{V_2}{V_1} = j \frac{\omega_0 L_m R_L}{R_1 R_L + R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2} \quad (1)$$

$$A_i = \frac{I_2}{I_1} = j \frac{\omega_0 L_m}{(R_L + R_2)} \quad (2)$$

$$\eta = A_v \cdot \bar{A}_i = \frac{\omega_0 L_m R_L}{(R_L + R_2) \{R_1 R_L + R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2\}} \quad (3)$$

1 つ共振器に関わる L_m は 3 つなので、これを 1 つ値に合成して単相の式に代入する。各相位相差が 120° より式(4)を立て、展開すると式(5)より合成値 L_{m3a} 、式(6)より位相差 ϕ が求まる。

$$L_{mca} \sin(\omega t) + L_{mcb} \sin(\omega t + \frac{\pi}{3}) + L_{mcc} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) = L_{m3a} \sin(\omega t + \phi) \quad (4)$$

$$L_{m3a} = \sqrt{L_{mca}^2 + L_{mcb}^2 + L_{mcc}^2 - (L_{mca} L_{mcb} + L_{mcb} L_{mcc} + L_{mca} L_{mcc})} \quad (5)$$

$$\sin \phi = \frac{(\sqrt{3}/2)L_{mcb} - (\sqrt{3}/2)L_{mcc}}{\sqrt{(L_{mca}^2 + L_{mcb}^2 + L_{mcc}^2) - (L_{mca} L_{mcb} + L_{mcb} L_{mcc} + L_{mca} L_{mcc})}} \quad (6)$$

$$\cos \phi = \frac{L_{mca} - (L_{mcb}/2) - (L_{mcc}/2)}{\sqrt{(L_{mca}^2 + L_{mcb}^2 + L_{mcc}^2) - (L_{mca} L_{mcb} + L_{mcb} L_{mcc} + L_{mca} L_{mcc})}}$$

最大効率の R_L は、式(3)を R_L で微分した式(7)にて極大値となる点なので式(8)で示される値となる。

$$\frac{d}{dR_L} \eta = \frac{\omega_0 L_m \{-R_1 R_L^2 + [R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2] R_L\}}{[R_1 R_L^2 + \{2R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2\} R_L + \{R_1 R_2^2 + (\omega_0 L_m)^2 R_2\}]} \quad (7)$$

$$\frac{d}{dR_L} \eta = 0 \Leftrightarrow R_L = \sqrt{R_2^2 + \frac{R_2}{R_1} (\omega_0 L_m)^2} \quad (8)$$

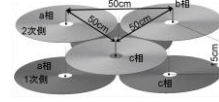


図 1 コイルの配置

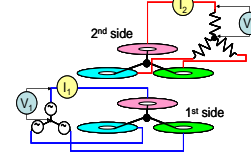


図 2 結線と測定箇所

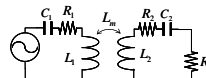


図 3 等価回路

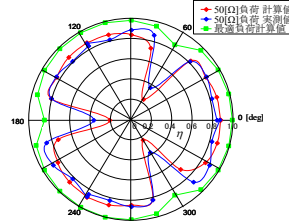


図 6 効率

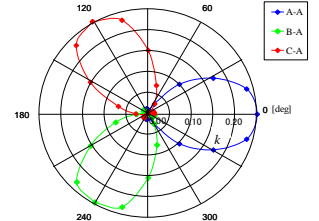


図 4 結合係数

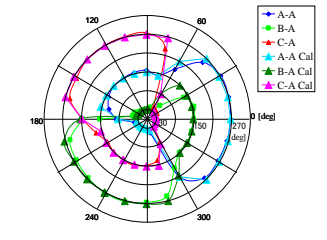


図 5 位相差

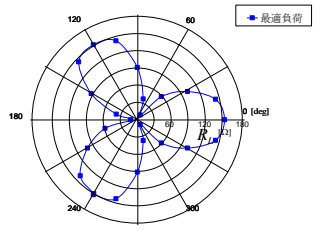


図 7 最適負荷抵抗値

3. 実験結果と計算値結果

実測 L_m から計算した結合係数 k を図 4、位相差を図 5、電圧電流実測値からの効率と $R_L=50\Omega$ および効率最大 R_L での効率を図 6、最大効率 R_L 値を図 7 に示す。

4. 結論

全回転角度にて三相平衡無線電力伝送を確認した。 $R_L=50\Omega$ では k が不足する 60° 近傍以外で効率 80% 以上、効率最大 R_L では、ほぼ全周で 90% 以上での伝送が可能である。位相差は最近傍の 1 次側コイルに対して 90° 遅れとなる。 k が小さい場合、実測値と計算値との誤差が大きいの飛越し結合を無視した影響とみなせる。効率最大抵抗値が L_m に比例することも確認された。

5. 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 25709020 の助成を受けたものです。

6. 参考文献

[1] Masaki Kato, Takehiro Imura, Yoichi Hori, "The Characteristics when Changing Transmission Distance and Load Value in Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling", INTELEC 34th, 2012