

ワイヤレス電力伝送のパラメータ誤差を考慮した設計法

溝口 洸輔・日下 佳祐・伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

1. はじめに

ワイヤレス電力伝送の一方式として 2 次側が定電圧特性となる S/P 方式がある。S/P 方式において所望の定電圧特性を得るには、共振パラメータを適切に設計する必要があるが、量産時には各パラメータが有する誤差により、所望の出力電圧比を得ることが困難になる。

本論文では、ワイヤレス電力伝送の各共振パラメータが正規分布状の誤差を有していることを考慮し、量産時の出力電圧のばらつきを低減する手法を確立する。

2. 検証方法

図 1 に SP 補償方式ワイヤレス電力伝送システムの回路を、図 2 に同システムの等価回路を示す。本等価回路において、コイルの巻線抵抗はコイルのリアクタンスと負荷抵抗に比べて十分小さいため省略する。図 2 に示す等価回路を I_1 、 I_2 及び I_3 の 3 つの回路網とした場合の回路方程式は(1)式となる。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j(x_1 + x_0 - x_s) & -jx_0 & 0 \\ -jx_0 & j(x_2 + x_0 - x_p) & jx_p \\ 0 & jx_p & R_{eq} - jx_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、フルブリッジ整流器はインダクタ L_f が十分大きく出力電流を連続とし、さらにコンデンサ C_f の両端電圧、すなわち出力電圧に変動がないとすれば、等価負荷抵抗 R_{eq} として表せる⁽¹⁾。(1)式を I_3 について解くと、図 2 に示す等価回路の出力電圧 V_2 は(2)式で求まる。

$$V_2 = \frac{V_1 R_{eq} L_M}{C_2 \sqrt{A^2 + B^2}} \dots\dots\dots(2)$$

$$A = R_{eq} \left(\frac{L_2}{C_1} - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2} - \omega^2 L_1 L_2 + \frac{L_1}{C_2} + \omega^2 L_M^2 \right) \dots\dots\dots(3)$$

$$B = \frac{\omega L_1 L_2}{C_2} - \frac{L_2}{\omega C_1 C_2} - \frac{\omega L_M^2}{C_2} \dots\dots\dots(4)$$

直流出力電圧 V_{dc2} は(5)式で求まる。

$$V_{dc2} = \frac{8}{\pi^2} \frac{V_{dc1} R_{eq} L_M}{C_2 \sqrt{A^2 + B^2}} \dots\dots\dots(5)$$

また、各パラメータは(6)(7)式で計算できる⁽²⁾。

$$L_2 = \frac{R_{eq}}{\omega_0} \frac{k}{\sqrt{1+k^2}}, \quad L_1 = L_2 \left(\frac{8}{\pi^2 k} \frac{V_{dc1}}{V_{dc2}} \right) \dots\dots\dots(6)$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1 (1-k^2)}, \quad C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2} \dots\dots\dots(7)$$

(6)(7)式を用いて設計する共振パラメータ $C_{1,2}$ 、 $L_{1,2}$ が正規分布状にばらつくことを考慮する。なお、本論文では平均 1、標準偏差 0.05 で約±10%の誤差が部品に含まれるとする。

図 3 に動作周波数と設計周波数 20kHz のときの出力電圧ヒストグラムを示す。共振パラメータのばらつきにより、出力電圧も同様に正規分布状にばらつく。本偏差を抑制できれば、量産時の出力電圧のばらつきを低減することが可能となる。

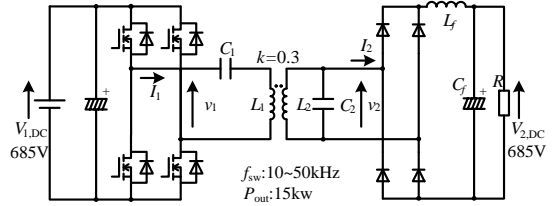


Fig. 1. IPT system with SP compensation.

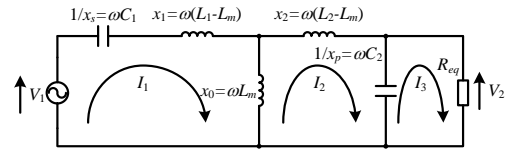


Fig. 2. Equivalent circuit of IPT system.

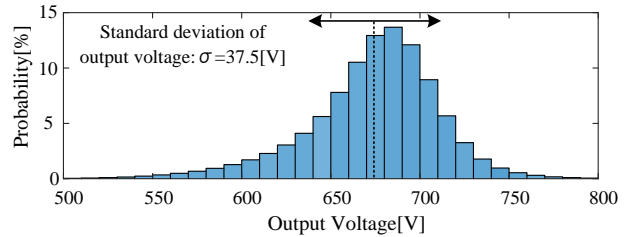


Fig. 3. Output voltage histogram of operation and design frequency 20 kHz.

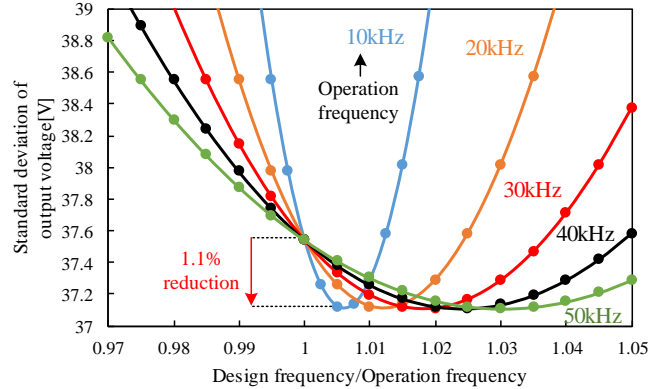


Fig. 4. Characteristics of Design frequency/Operation frequency vs. standard deviation of output voltage.

3. 検証結果

図 4 に各動作周波数で出力される出力電圧の標準偏差と設計周波数を基準化した結果を示す。給電システムを量産した場合、設計周波数を動作周波数よりもわずかに高く設計することにより、出力電圧の標準偏差を 1.1%低減することが可能である。例として、出力電圧 685V±20% の設計仕様で製品を 1 万台作ったとする。部品のばらつきにより出力電圧が±20%に入らない製品が 64 台になり、本論文に基づき設計周波数を調整すると、出力電圧の仕様を満たさない製品は 60 台となり、4 台減少する。また、動作周波数を大きくしていくことにより、出力電圧のばらつきを低減することが可能である。

文 献

- (1) R. L. Steigerwald: IEEE TPEL, Vol.3, No. 2, pp.174-182 (1988)
- (2) R. Bosshard, J.W.Kolar, J.Muhlethaler, I.Stevanovic, B. Wunsch, F. Canales : IEEE TPEL, Vol. 3, No. 1, pp.50-64 (2014)