

一方向非接触給電から拡張容易な双方向非接触給電システム

渡辺 宏* 望月 大樹 金子 裕良 阿部 茂 (埼玉大学)

Bidirectional Contactless Power Transfer Systems expandable from Unidirectional Systems

Hiroshi Watanabe*, Shigeru Mochizuki, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe (Saitama University)

1. はじめに

プラグインハイブリッド自動車(PHV)や電気自動車(EV)の給電に、利便性と保守性に優れた非接触給電を用いる研究が各国で進められている。その多くは電力系統から車への一方向給電(G2V)である。しかし EV のバッテリーを電力負荷平準化や各種電源として利用するには、車から電力系統への給電(V2G)も可能な双方向給電が必要となる。双方向非接触給電に関しては、Auckland 大の U.K.Madawala⁽¹⁾や電力中央研究所の名雪の研究⁽²⁾があるが、筆者等は現在の EV 用一方向非接触給電システムから拡張容易で、双方向とも給電効率の高いシステムが望ましいと考えてきた。

本稿では非接触給電で一般的な一次直列二次並列コンデンサ方式 (SP 方式) をベースに、二次側にリアクトルを追加し、一次側の直列コンデンサの値を変更するだけで理想変圧器特性が成立し、双方向ともに給電効率の高いシステムが実現できることを示す。最大の特長は一方向用の非接触給電トランスをそのまま利用できる拡張容易性にある。

2. 双方向非接触給電システム

〈2・1〉 SPL 方式 図 1(a)に提案する双方向非接触給電システムの構成を示す。ブリッジ型インバータを系統側と車側の両方に配置し、送電側はインバータとして動作させ、受電側は IGBT を常にオフとし、ダイオードのみを用いた全波整流器として使用する。インバータには図 1(b)のようなハーフブリッジ回路を用いても良い。

一方向の一次直列二次並列コンデンサ方式⁽³⁾に対して、二次側並列コンデンサ C_p とインバータとの間に直列リアクトル L_s を追加し、 C_p, L_s の値を(1)(2)式のように定める。 C_s は従来の一方向給電の SP 方式とは異なる(3)式の値にする。 L_1, L_2 は一次および二次自己インダクタンスである。

$$\frac{1}{\omega_0 C_p} = \omega_0 L_2 = \omega_0 L_s = x_p = x'_0 + x_2 \dots\dots\dots (1)$$

$$L_s = L_2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{1}{\omega_0 C_s} = \omega_0 L'_1 = x'_s = x'_0 + x'_1 \dots\dots\dots (3)$$

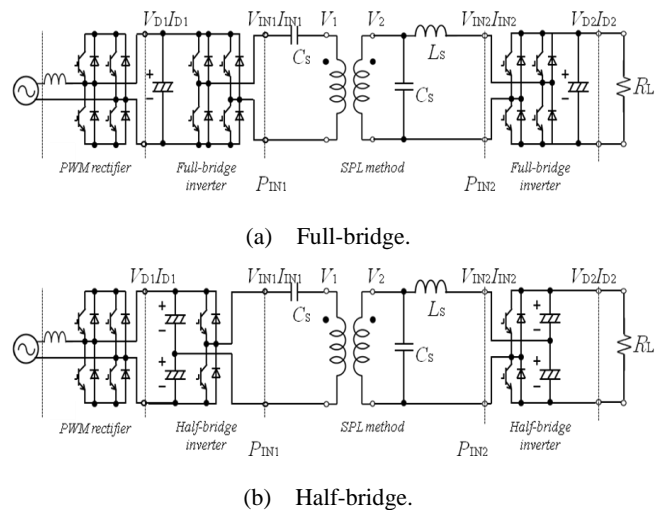


図 1 双方向非接触給電システム

Fig.1. Bidirectional contactless power transfer system.

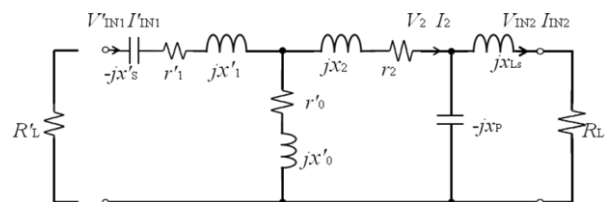


図 2 SPL 方式等価回路(G2V)

Fig.2. Equivalent circuit of SPL topology.

等価回路を図 2 に示す。F 行列から入出力特性を求めると、従来の SP 方式と同じ(4)式の理想変圧器特性が得られる。

$$\begin{bmatrix} V'_{IN1} \\ I'_{IN1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x'_0}{x'_0 + x_2} & 0 \\ 0 & \frac{x'_0 + x_2}{x'_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{IN2} \\ I_{IN2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

巻数比 a と $b=x'_0/(x'_0 + x_2)$ を用いると(5)式となる。

$$\begin{bmatrix} V_{IN1} \\ I_{IN1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ab & 0 \\ 0 & 1/ab \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{IN2} \\ I_{IN2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

b は結合係数 k の値にほぼ等しくなり、結合係数 k に応じて巻数比 a を調節することで電圧比を任意に設定すること

表 1 トランス定数

Table 1. Parameters.

freq[kHz]	50
Gap[mm]	70
N ₁	20
N ₂	6
L ₁ [μH]	146.7
L ₂ [μH]	12.5
k	0.382
C _S [μF]	0.069
C _P [μF]	0.810
L _S [μH]	12.5

表 2 実験結果

Table 2. Experimental results.

	G2V	V2G	SP
R _L [Ω]	10.0	17.5	10.0
R _{Lmax} [Ω]	10.2	17.5	11.0
V _{IN1} [V]	267.0	228.9	224.2
V _{IN2} [V]	174.9	170.1	140.5
V _{OUT} /V _{IN}	0.65	1.35	0.63
P _{IN1} [W]	3257	3058	3279
P _{IN2} [W]	3076	3228	3115
η[%]	94.4	94.8	95.0
η _{max} [%]	97.7	97.7	97.5

ができる。(4)式は従来の SP 方式と等しいため、一方向用の給電トランスを用いて高効率な双方向給電が可能となる。

〈2-2〉 最大効率での運転 SPL 方式では最大効率で運転するために R_L を適切な値に設定する必要がある。図 2 の等価回路において鉄損 r'₀ は十分小さいので、巻線抵抗 r'₁, r'₂ のみを考慮すると、G2V における P_{IN1} から P_{IN2} までのトランス効率 η は、

$$\eta_{G2V} = \frac{R_L I_{IN2}^2}{r_1' I_{IN1}^2 + r_2' I_2^2 + R_L I_{IN2}^2} = \frac{R_L}{R_L + r_2' \frac{R_L^2}{(x_0' + x_2')^2} + \frac{r_1'}{b^2}} \dots\dots\dots (6)$$

となり、最大効率とその時の抵抗負荷の値は、

$$\eta_{maxG2V} = \frac{1}{1 + \frac{2}{x_0'} \sqrt{r_1' r_2'}} \dots\dots\dots (7)$$

$$R_{LmaxG2V} = \frac{(x_0' + x_2')^2}{x_0'} \sqrt{\frac{r_1'}{r_2}} \dots\dots\dots (8)$$

となる。R'_L(=R_L/a²)を一次側に置いた V2G の場合は(9)式となり、η_{max}・R'_{Lmax} は(10)(11)式となる。

$$\eta_{V2G} = \frac{R_L' I_{IN1}^2}{R_L' I_{IN1}^2 + r_1' I_{IN1}^2 + r_2' I_2^2} = \frac{R_L'}{R_L' + r_1' + r_2' \left(\frac{R_L'}{x_0'}\right)^2} \dots\dots\dots (9)$$

$$\eta_{maxV2G} = \frac{1}{1 + \frac{2}{x_0'} \sqrt{r_1' r_2'}} \dots\dots\dots (10)$$

$$R_{LmaxV2G}' = x_0' \sqrt{\frac{r_1'}{r_2}} \dots\dots\dots (11)$$

G2V では R_{LmaxG2V} に、V2G では R_{LmaxV2G} で給電できれば、双方向共に高効率で給電が可能となる。

3. 給電実験

巻数比 20:6 の給電トランス(表 1)を用いて図 1(a)の回路で給電実験を行った。今回は受電側に全波整流器を用い、高周波電源と整流器・抵抗負荷を反転させることで双方向給電の実験を行った。また抵抗負荷 R_L は(8)(11)式より求めた理論値 G2V (V2G) =10Ω (17.5Ω)を用いた。比較のため同じ給電トランスを用いて SP 方式の給電実験も行った。SP 方式の R_{Lmax} は SPL 方式における G2V の R_{LmaxG2V} とほぼ等しくなる。

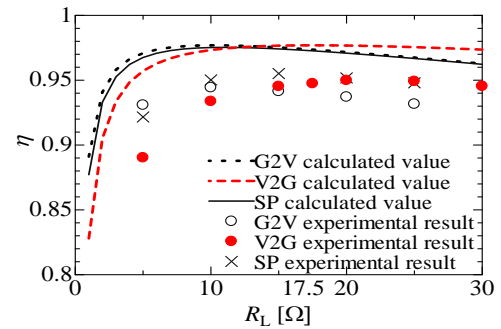


図 3 トランス効率の負荷特性

Fig.3. Transformer efficiency with load change.

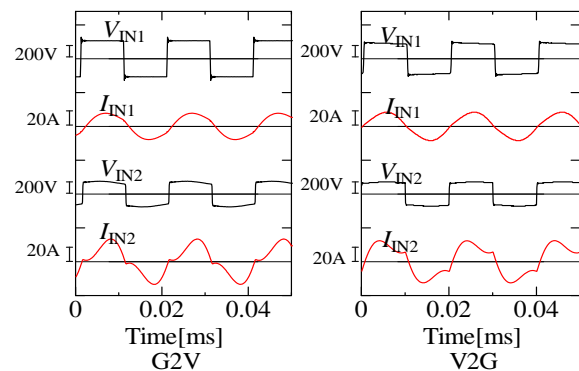


図 4 実験波形

Fig.4. Experimental waveform.

機械 gap70mm 位置ずれ無しの標準状態で 50kHz, 3kW を双方向から給電した結果を表 2、入出力電圧電流波形を図 4 に、図 3 に(6)(9)式より求めた理論効率と抵抗負荷変動時の給電実験効率を示す。

図 3 と表 2 より、(8)(11)式を用いて R_L を決定することで、従来の SP 方式に比べてほとんど変わらず高効率であることが確認できる。また図 4 より入出力電圧の位相が一致しており、理想変圧器特性が確認できる。

なお図 1(b)の回路でも、同等の双方向給電が可能であることを回路シミュレーション(PSIM)で確認している。

4. まとめ

SP 方式の一方向非接触給電システムは、給電トランスを変更することなく、直列リアクトル L_S を追加し、受電側整流器をインバータに変更するだけで、SPL 方式の双方向非接触給電システムに拡張できることを示した。SPL 方式は SP 方式と同じ理想変圧器特性を持つことも示した。3kW 給電実験で SPL 方式の給電効率は G2V で 94.4%、V2G で 94.8% と、SP 方式の給電効率 95% とほぼ同等の性能が得られることを確認した。

文 献

- (1) U.K.Madawala, D.J.Thrimawithana: IEEE Trans.IE, Vol.58, No.10, pp.4789-4796 (2011)
- (2) 名雪・福島・宜保・根本・池谷: 電力中央研究所報告,H10007 (2011)
- (3) 阿部・金子: 電学誌,Vol.128,No.12,pp.796-799 (2008)