

三相移動型非接触給電装置

阿部 知史*, 金井 研二, 金子 裕良, 阿部 茂 (埼玉大学)

Three-phase Moving Pick-Up Type Contactless Power Transfer Systems
Satoshi Abe, Kenji Kanai, Yasuyoshi Kaneko, Shigeru Abe (Saitama University)

1. はじめに

非接触給電は接点の不良、磨耗、火花がなく、クリーンルームなどの工場の搬送車で実用化が進んでいる。しかし、現在は単相給電であり、三相の非接触給電は実用化されていない。本論文では、一次直列二次並列コンデンサ方式を単相から三相に拡張し、三相非接触給電が可能であることを示す。三相給電は瞬時電力が一定であり、給電線を2本から3本にするだけで給電電力が $\sqrt{3}$ 倍になる特長がある。

2. 三相移動型非接触給電装置

<2. 1> 三相移動型非接触給電装置 図1に三相移動型非接触給電装置の構成を示す。給電線は周波数 $f_0=20\text{kHz}$ の三相電圧形方形波インバータで駆動し、U,V,W各相に対して電源と給電線の間直列共振コンデンサ C_{Si} を、受電部に並列共振コンデンサを C_{Pi} を設置する。負荷は等価抵抗 R_{Li} で表す($i=U,V,W$)。結線方式は一次、二次共にスター結線とする。

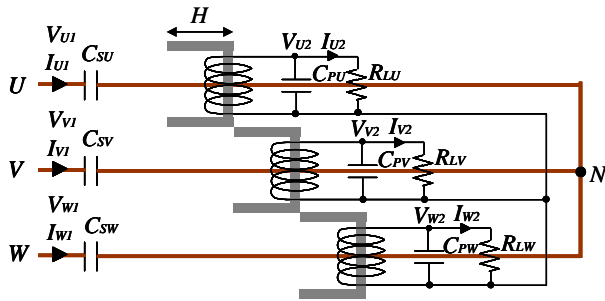


図1 三相移動型非接触給電装置

Fig. 1. Three-phase moving pick-up type contactless power transfer systems.

<2. 2> 三相非接触給電の問題点 三相の場合、単相にない二つの問題が生じる。第一は実用上3本の給電線を等間隔で平面上に置くため、一次自己インダクタンスが各相でバランスしない問題である。給電線のWU相の間隔がUV間,VW間の2倍あり、WU間の自己インダクタンスが大きくなる。第二は各相受電部の配置によっては各相間に磁気結合が生じる問題である。

本論文では、第一の問題については、一次直列コンデンサの値を調節することで、第二の問題については、各相の受電部を図1のように物理的にずらし磁気結合をなくすことで解決した。

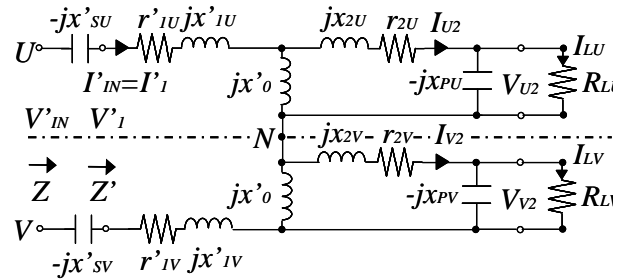


図2 コンデンサと負荷を含めた詳細等価回路(UV間)

Fig. 2. Detailed equivalent circuit including capacitors and loads.

3. 等価回路とコンデンサ C_{Pi} C_{Si} の値の決定法

三相非接触給電回路を、まずUV間、VW間、WU間の3つの単相給電回路に分け、それぞれを三相電圧源で駆動するものとする。次に各一次巻線、二次巻線の電流を重ね合わせの理で合成する。

図2にUV間の詳細等価回路を示す。一次直列二次並列コンデンサ方式では、二次並列コンデンサ C_{Pi} は二次巻線の自己インダクタンスと共振するように、一次直列コンデンサ C_{SU} と C_{SV} の合成容量 C_{SUV} は、図2において電源から見たインピーダンス Z が純抵抗になるように選ぶ。各相受電部間に磁気結合が無ければ C_{Pi} は各相独立に決めることができる。

$$\frac{1}{\omega_0 C_{PU}} = x_{PU} = x'_0 + x_{2U} = \omega_0 L_{2U} \quad \dots(1)$$

$$\frac{1}{\omega_0 C'_{SUV}} = x'_{SUV} = \frac{x'_0 x_{2U}}{x'_0 + x_{2U}} + \frac{x'_0 x_{2V}}{x'_0 + x_{2V}} + x'_{1UV} \quad \dots(2)$$

同様にVW間、WU間の回路を考えることにより、二次並列コンデンサ C_{Pi} ($i=U,V,W$)と合成容量 C_{Sij} ($ij=UV,VW,WU$)の値が決まる。

図1の一次直列コンデンサ C_{Si} ($i=U,V,W$)は3つの C_{Sij} から次式を用いて、連立方程式を解くことで求める。

$$\frac{C_{Si} C_{Sj}}{C_{Si} + C_{Sj}} = C_{Sij} \quad \dots(3)$$

UV間には中性点Nがあるので、図2の鎖線でU相とV相に分けることができる。さらに図2にW相(WN間)を加えれば三相モデルとなる。

表1 トランス定数
Table 1. Parameters of transformer.

l_0 [μF]	0.195	r_{1U} [$\text{m}\Omega$]	8.65
l_{1U} [μF]	2.65	r_{1V} [$\text{m}\Omega$]	7.65
l_{1W} [μF]	1.65	r_{1W} [$\text{m}\Omega$]	8.95
l_{2U} [μF]	2.75	r_{2U} [$\text{m}\Omega$]	13.3
l_{2V} [μF]	7.00	r_{2V} [$\text{m}\Omega$]	13.7
l_{2W} [μF]	6.99	r_{2W} [$\text{m}\Omega$]	13.8
l_{2W} [μF]	7.32		

表2 実験装置の定数
Table 2. Parameters of experiment.

a	1/6	R_{Li} [Ω]	21.4
C_{SU} [μF]	21.0(22.8)	C_{PU} [μF]	4.49(4.52)
C_{SV} [μF]	35.9(37.1)	C_{PV} [μF]	4.56(4.52)
C_{SW} [μF]	23.6(22.6)	C_{PW} [μF]	4.42(4.42)

() Calculated value from detailed equivalent circuit.

表3 実験結果
Table 3. Experimental results.

	V[V]	I[A]	pf
U1	4.65	13.3	0.988
V1	4.66	13.9	0.923
W1	4.86	14.4	0.976
U2	23.8	1.06	0.974
V2	23.1	1.03	0.975
W2	22.8	1.01	0.974

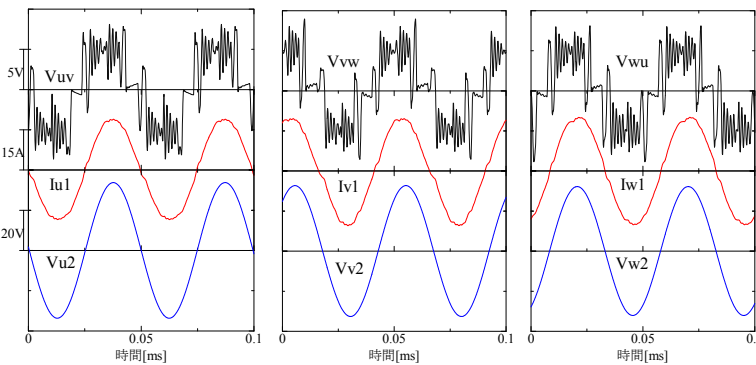


図3 実験結果

Fig. 3. Experimental results.

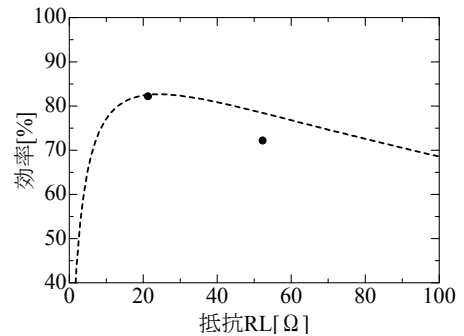


図4 給電効率

Fig. 4. Efficiency

4. 実験結果

<4・1> 実験回路 図1の回路で実験を行った。高周波電源には三相方形波インバータを用い出力周波数は20kHzとした。給電線には長さ3.9mのリッツ線($\phi 0.25\text{mm} \times 24 \times 16$)を用いた。受電部はU字断面のフェライトコア(H38 \times W40 \times L80)にリッツ線($\phi 0.25\text{mm} \times 24 \times 2$)を6ターン巻いた。負荷抵抗は20 Ω あるいは50 Ω とした。

<4・2> トランス定数とコンデンサの値 トランス定数はLCRメータで20kHzで測定した。一次側から各受電部の開放時と短絡時、および二次側から一次と各受電部の開放時のRとLを測定し、ニュートンラフソン法で計算し求めた。表1にトランスの定数測定結果を示す。

コンデンサ C_{Pi} と C_{Si} の値はLCRメータを用いて次のように決めた。まず、二次自己インダクタンス L_{2i} を測定し(1)式より C_{Pi} を決定した。次に、図2のインピーダンス Z' を測定し、 Z が純抵抗になる(電源力率が1となる)合成容量 C_{Sij} を求め、(3)式を用い C_{Si} 決定した。結果を表2に示す。実験ではこれらの値を用いた。表2の()内の値は、表1のトランス定数から(1)~(3)式で計算した値である。

l_1 のV相のアンバランスは C_{SV} で調整されている。

<4・3> 実験結果 実験結果を図3と表3に示す。図3より、一次相電流と二次相電圧の位相は一致しており、二次電圧も相間平衡のとれた三相給電であることが確認できる。送電電力は20.9W、受電電力は17.1Wである。

表3に各相の一次と二次の相電圧と相電流の実効値と力率を示す。各相の力率はほぼ1である。二次力率が1でな

いのは、負荷抵抗のインダクタンス分のためである。一次力率は、一次直列コンデンサ C_{Si} の値を調整することで改善することができる。

<4・4> 効率負荷特性 図2のU相分の等価回路において、給電効率 η は(4)式で、これが最大となる負荷抵抗 R_{Lm} の値とそのときの最大効率 η_m は(5)式で表される。

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + \frac{r'_1}{b^2} + r_2} \left\{ 1 + \left(\frac{R_L}{x_p} \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad b = \frac{x'_0}{x'_0 + x_2} \dots (4)$$

$$R_{Lm} = x_p \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r'_1}{r_2} + 1} \quad \eta_m = \frac{1}{1 + \frac{2r_2}{x_p} \sqrt{\frac{1}{b^2} \frac{r'_1}{r_2} + 1}} \dots (5)$$

負荷抵抗による効率の変化と実験結果を図4に示す。実験では $R_L = 21.4\Omega, \eta = 82.1\%$ となった。トランス定数の各相の平均値を用いて計算すると $R_{Lm} = 24.2\Omega, \eta_m = 82.7\%$ となりほぼ等しい。

5. まとめ

一次直列二次並列コンデンサを用いた三相移動型非接触給電装置の設計法を示し、理論通りの特性が得られることを実験で確認した。三相モデルとその定数の決定法、給電線の自己インダクタンスの相間不平衡問題の解決法、受電部の相間磁気結合解消の重要性などを示した。

文献

- (1) 金子・松下・及川・阿部：電学論D, Vol.128, No.7 (2008)
- (2) G.A.Covic, J.T.Boys, et al：IEEE Trans. IE Vol.54 No.6 (2007)