

# 磁界共振結合方式を用いた三相交流ワイヤレス電力伝送の基礎実験

## Fundamental Experiment of Magnetic Resonance Coupling Three-phase Wireless Power Transfer

谷川雄介 加藤昌樹 居村岳広 堀洋一  
Yusuke Tanikawa Masaki Kato Takehiro Imura Yoich Hori  
東京大学  
The University of Tokyo

### 1. 序論

三相交流は、有線での大電力伝送では一般的な技術である。しかしながら、ワイヤレス電力伝送（以下、無線送電）では、三相交流送電の試みはあまり行われていない。本研究では、三相交流の特徴を検証し、実際に kHz 帯を用いた磁界共振結合方式[1]での無線三相交流送電の実験を行い、三相交流無線送電が可能であることを示す。

### 2. 三相交流の特徴

本章では、有線三相送電と無線送電の共通特徴と無線特有の特徴を考え、三相送電の無線化に関して考察する。まず、有線との共通特徴には、結線の簡略化が挙げられる。各相の位相差が  $120^\circ$  かつ電圧振幅が等しい三相平衡状態では、各相の瞬時電圧の和が 0 なので、帰還電流用の配線が不要となり、送電線は単相の 2 本に対して、三相では 3 倍の送電容量ながらも 3 本の送電線で済む。無線送電では送電線数削減の優位性は少ないが、電力あたりの銅損の削減は可能である。整流器も全波整流の際、単相では 4 素子が必要だが、三相では単相の 3 倍の 12 個ではなく 6 素子で済む。また、同電力送電時でも各相の電圧および電流が  $1/\sqrt{3}$  倍であり、耐圧や電流許容値の小さい小容量素子が使用できる。素子の低耐圧化はコイルにおいて高電圧が発生する無線送電では特に有用である。

三相において結線方法は図 1 に示すような Y 結線と  $\Delta$  結線がある。Y 結線は中心の中性点から相電圧を測るため平行三相状態において線間電圧は相電圧倍となるが、 $\Delta$  結線では線間電圧と相電圧は同一である。一方で相電流は Y 結線では線間電流に等しく、 $\Delta$  結線では線間電流の  $1/\sqrt{3}$  倍となる。また、出力電圧を各結線上のインピーダンスは式 1 の関係を持つので、結線切り替えでインピーダンスを変更できる。これを無線送電のインピーダンスマッチングに応用し伝送効率の改善も考えられる。

$$Z_a = \frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_1}{Z_3} \quad (1)$$

また、単相交流では電力の脈動が生じるが、三相交流ではある相の電力を他相が補完することで、瞬時電力を一定化できる。特に無線送電特有の複数相コイル間でのクロスカップリングでは、異なる相間での伝送が行われる。そこで、三相においては 1 次側の 3 つのコイルと 2 次側の 3 つのコイル中心が、それぞれ正三角形をなすように配置し、全てのコイルが 2 つ正三角形の重心を結ぶ軸を中心に回転対称である場合、回転角度に依らず送電状態が維持されるという仮説を考えたと。なお、その際、2 次側で

は他相の位相が重ね合わさり位相が変化すると推定される。また、瞬時電力の一定化は整流後の電圧および電流の脈動の低減を意味するので、無線送電にて kHz 以上の高周波の整流時に電圧リップルによる平滑用電解コンデンサの破壊事故の低減に効果があると推測される。このような特徴を踏まえて、次のような実証実験を行った。

### 3. 三相交流のワイヤレス伝送の実証実験

本実験では磁界共振結合を用いた三相交流の無線送電の可能性を示す。特にクロスカップリングによる効果や影響の観測および、2 次側のコイル間の結線を Y 結線と  $\Delta$  結線に切り替えた場合の観測を行った。1 次側は Y 結線のみとした。コイルは 2sq KIV ビニル皮膜銅線をフラットスパイラル形に 60 巻きした直径 0.49m、自己インダクタンス  $879 \mu\text{H}$ 、自己共振周波数は 2000 pF のコンデンサを直列接続して[2]、120 kHz とした。コイルの仕様を表 1 に示す。電源には多チャンネル信号発生器を用いて振幅 10V の正弦波を a 相基準として b 相  $120^\circ$  遅れ、c 相  $240^\circ$  遅れとして与えた。負荷には  $50 \Omega$  抵抗 3 本を Y 結線にして用いた。実験では、結線は図 2 の Y 結線と  $\Delta$  結線の 2 通り、コイル配置は図 3 の直上配置と回転配置の 2 通りで行った。コイル配置ごとの相互インダクタンスおよび結合係数を表 2、表 3 に示す。

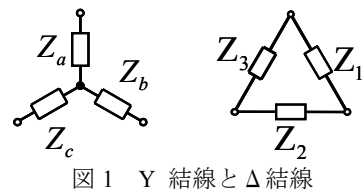


図 1 Y 結線と  $\Delta$  結線

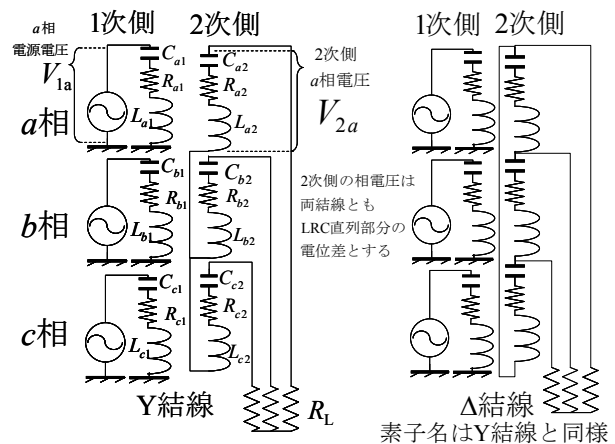


図 2 コイル結線の様子

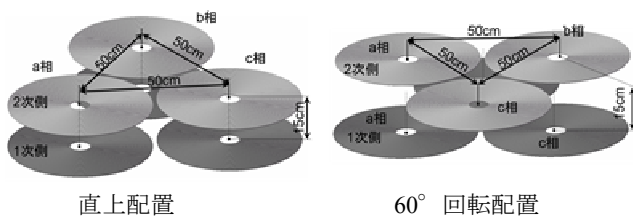


図3 コイル配置

表1 アンテナの仕様

	a相	b相	c相	
1次側	自己インダクタンス [ $\mu\text{H}$ ]	872.8	868.3	869.3
	コイルの内部抵抗 [ $\Omega$ ]	1.21	1.23	1.12
	共振コンデンサ容量 [pF]	2000	2000	2000
	Q値	546.0	535.7	588.6
2次側	自己共振周波数 [kHz]	120.5	120.8	120.7
	自己インダクタンス [ $\mu\text{H}$ ]	867.2	869	869.4
	コイルの内部抵抗 [ $\Omega$ ]	1.17	1.23	1.2
	共振コンデンサ容量 [pF]	2000	2000	2000
	Q値	562.8	535.9	549.4
	自己共振周波数 [kHz]	120.8	120.7	120.7

表2 直上配置時の相互インダクタンスと結合係数

	a-a 相間	a-b 相間	a-c 相間	b-a 相間	b-b 相間	b-c 相間	c-a 相間	c-b 相間	c-c 相間
相互インダクタンス [ $\mu\text{H}$ ]	185.2	17.7	16.8	18.2	185.0	15.1	16.6	14.3	182.8
結合係数	0.213	0.020	0.019	0.021	0.213	0.017	0.019	0.016	0.210

表3 回転配置の相互インダクタンスと結合係数

	a-a 相間	a-b 相間	a-c 相間	b-a 相間	b-b 相間	b-c 相間	c-a 相間	c-b 相間	c-c 相間
相互インダクタンス [ $\mu\text{H}$ ]	24.3	31.8	9.5	8.0	24.5	30.5	32.3	8.3	20.3
結合係数	0.028	0.036	0.011	0.009	0.028	0.035	0.037	0.009	0.023

実験では、電源電圧および整流器直前の各相の相電圧を測定した。a相、b相、c相それぞれの相電圧とY結線と $\Delta$ 結線に変えたときの実験結果を図4および図5に示す。

#### 4. 考察

直上配置での実験では、他相からのクロスカップリングの結合係数が同相の結合係数の10%以下と小さいため、図4に示すとおり単相無線送電と同様の2次側の相電圧が各相とも電源電圧に対して $90^\circ$ 進み位相となる無線送電が示された。一方で、 $60^\circ$ 回転配置での実験では、図5に示すとおり回転対称構造では2相以上からの送電でも相間位相差 $120^\circ$ を維持した三相平衡無線送電が可能であると示された。結線の違いは、三相平衡送電時の位相には影響しなかったが、相電圧振幅は $\Delta$ 結線の方がY結線よりも大きくなった。

なお、本実験では三相平衡条件下で考察したが、三相不平衡を考慮すると、中性線の設置が難しい無線送電では、 $\Delta$ 結線の特徴が有用と推測される。例えばクロスカップリングが不均一に発生した際に生じる零相電流はY結線では中性線電流になるが $\Delta$ 結線では $\Delta$ 部の循環電流

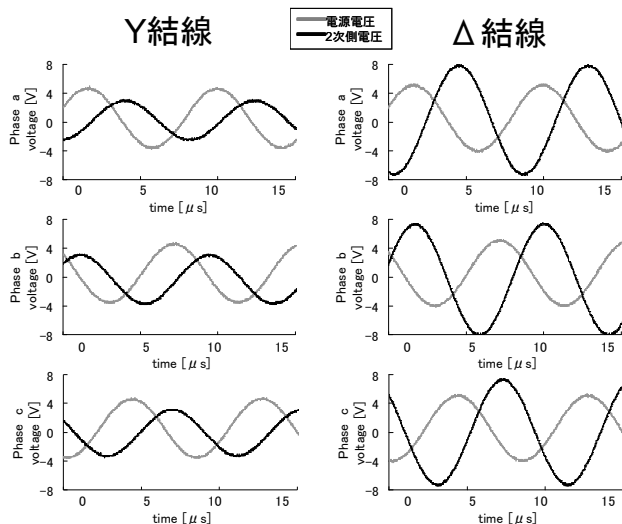


図4 直上配置での相電圧

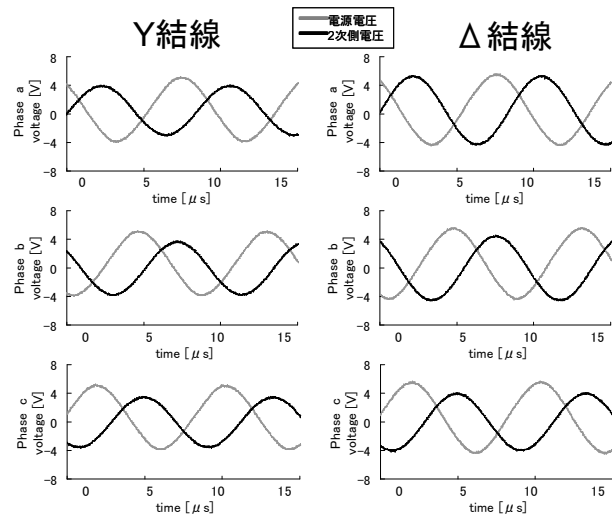


図5 回転配置での相電圧

となるため、 $\Delta$ 結線回路では零相電流によって相電圧変動が生じない。また、他にも零相電流の原因である三倍次の高調波が混在する矩形波などの伝送時にも、結線方法が波形および効率に影響を与えると推測され、今後の研究課題である。

#### 5. 結論

境界共振結合による三相交流のワイヤレス電力伝送が可能であることを実験にて示した。また、回転対象状態の配置においてクロスカップリングを用いて、1次側と2次側間の位相差が変化しても、a相、b相、c相間は $120^\circ$ 位相差が維持される三相平衡無線送電を実験にて示した。

#### 参考文献

[1] 居村 岳広 他, "共振時の電磁界結合を利用した位置ずれに強いワイヤレス電力伝送", 電気学会論文誌D, Vol. 130, No. 1, pp. 76-83, 2010.  
 [2] 藤田 敏博 他, "直列および並列共振コンデンサを用いた非接触給電システム", 電気学会論文誌D, Vol. 127, No. 2, pp. 174-180, 2007.