

# □┐ 형 코어와 직병렬 공진 컨버터를 이용한 비접촉 시스템

진강환\*, 김지민\*, 김수홍\*, 김윤호\*, 김은수\*\*  
중앙대학교\*, 전주대학교\*\*

## Contactless System using □┐ type core and Series-Parallel Resonant Converter

Kang-Hwan Jin, Ji-Min Kim, Soo-Hong Kim, Yoon-Ho Kim, Eun-Su Kim  
Chung-Ang University, Jeon-Ju University

### ABSTRACT

비접촉 전력전송 시스템에 사용되는 변압기는 일반적인 변압기와 달리 구조적으로 분리된 형태를 갖는다. 이로 인해 결합시 일반적인 변압기에 비해 큰 공극이 발생하게 된다. 본 논문에서는 상대적으로 큰 공극이 발생하여도 높은 결합계수를 유지하여 전력전달 특성이 우수한 ‘□┐’ 코어를 이용한 비접촉 변압기를 제안하였다. 그리고 제안된 변압기의 공극변화에 따른 인덕턴스 파라미터 변화 및 부하변화에 따른 효율특성을 분석하였다. 컨버터 시스템은 모든 부하에서 높은 효율특성을 갖는 직병렬 공진 컨버터를 사용하였으며, 시뮬레이션을 통하여 그 특성을 분석하였다.

### 1. 서론

최근 비접촉으로 전력을 전달하는 시스템이 많은 관심을 받고 있다. 비접촉 시스템은 기존의 전력선에 의한 전력 공급 대신 변압기의 자기 결합을 이용하여 전기적 접촉점 없이 전력을 전달하게 된다. 이러한 시스템을 사용하면 장기간 사용 시 발생하는 접촉 불량 문제를 해결할 수 있고 다습한 환경에서도 안전하게 전력을 전달할 수 있다. 그러나 비접촉 시스템에 사용되는 변압기는 일반적인 변압기에 비하여 상대적으로 큰 공극이 발생하게 되고, 이로 인해 결합계수가 낮아 누설 인덕턴스가 증가하게 되어 전력 전달의 비효율성을 유발하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 비접촉 전력 전송 시스템에 사용되는 변압기의 형태와 누설 인덕턴스의 영향을 줄이기 위한 공진 컨버터의 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서는 일차 권선과 이차 권선을 밀접하게 결합시켜 큰 공극에서도 높은 결합계수를 유지할 수 있고, 2차 권선을 안정적으로 고정할 수 있는 ‘□┐’ 형 코어를 제안하였다. 그리고 컨버터 시스템은 모든 부하범위에서도 높은 효율 특성을 얻을 수 있는 직병렬 공진 컨버터를 사용하였으며, 제안된 시스템은 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 증명하였다.

### 2. 비접촉 변압기와 직병렬 공진 컨버터 설계

#### 2.1 비접촉 변압기 설계

그림 1은 변압기 등가모델을 나타내며 결합계수(coupling coefficient,  $k$ ), 자기 인덕턴스 (self inductance,  $L_1, L_2$ ), 상

호 인덕턴스(mutual inductance,  $L_m$ ), 누설인덕턴스(leakage inductance,  $L_{lk1}, L_{lk2}$ ), 자화인덕턴스(magnetizing inductance,  $L_u$ )와 변압기의 권선비( $N_1:N_2$ ) 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$L_m = L_u \left( \frac{N_2}{N_1} \right), \quad k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}}$$
$$L_{lk1} = L_1 - L_m, \quad L_{lk2} = L_2 - \left( \frac{N_2}{N_1} \right) L_m \quad (1)$$

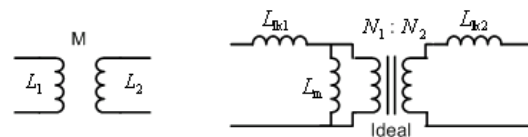


그림 1 변압기 등가모델  
Fig. 1 Equivalent circuit of transformer

변압기 전압이득을 고려하면 변압기의 1차측 전압은  $L_{lk1}$ 과  $L_m$ 의 전압 분배에 의해  $L_m$ 에 걸리는 전압이 이상적인 변압기의 1차측에 인가되며, 권선비에 의해 이상적인 변압기의 2차측으로 전달된다. 이상적인 변압기의 2차측 전압은  $L_{lk2}$ 와 부하의 전압 분배에 의해 부하에 전압이 전달되기 때문에, 결합계수가 낮으면  $L_{lk1}$ 과  $L_{lk2}$ 가 증가하여 전압이득이 낮아지는 것을 알 수 있다. 전류이득을 고려하면 결합계수가 낮아짐에 따라 상대적으로 변압기의  $L_m$ 은 작아지고 누설 인덕턴스는 증가하게 되어 입력전류가  $L_{lk2}$ 를 거쳐 2차측으로 전달되지 않고,  $L_m$ 을 통하여 다시 1차측으로 순환되어 흐르는 순환전류가 증가하게 된다. 즉, 부하가 요구하는 전류를 공급하기 위해서는 입력전류가 커져야 하며 그로인해 스위치 등의 도통 손실이 증가하여 결과적으로 시스템의 효율을 떨어뜨리는 원인이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 상대적으로 큰 공극에도 높은 결합계수를 유지할 수 있는 비접촉 변압기가 필요하다.

그림 2는 EE 코어와 □┐ 코어를 사용한 비접촉 변압기의 구조를 보여준다. EE 코어는 상대적으로 큰 공극을 갖는 경우 권선을 밀접하게 결합시킬 수 없어 큰 누설인덕턴스가 발생하게 되나, □┐ 코어는 1차 권선을 2차 권선이 감싸는 형태를 취하여 누설인덕턴스가 감소하고 결과적으로 결합계수를 높일

수 있다.

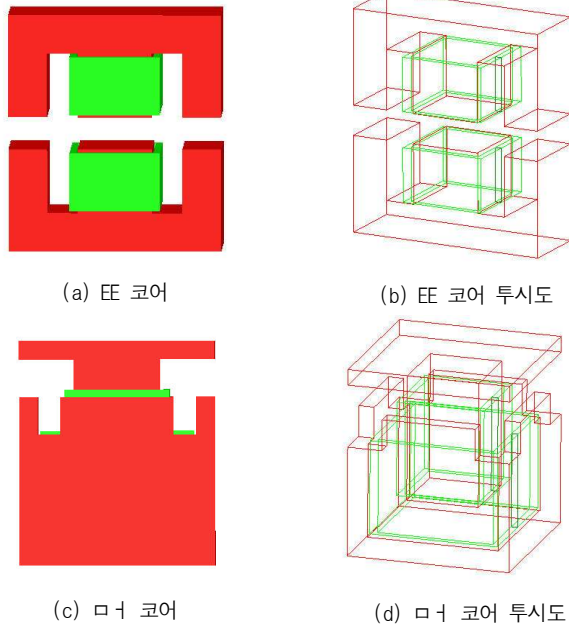


그림 2 EE 코어와 ㄱ 코어를 사용한 비접촉 변압기  
Fig. 2 Contactless transformers using EE core and ㄱ core

표 1 공극변화에 따른 EE코어를 사용한 비접촉 변압기 파라미터 (12턴 1:1)  
Table 1 Contactless transformer parameters using EE core by air-gap variation

	1mm	2mm	4mm	6mm	8mm	10mm
$L_1 (\mu H)$	71.95	47.96	34.72	30.17	27.94	26.7
$L_2 (\mu H)$	71.89	47.98	34.71	30.2	27.94	26.66
$L_m (\mu H)$	57.87	33.14	18.68	13.04	9.88	7.83
$L_{lk1} (\mu H)$	14.08	14.82	16.04	17.13	18.06	18.87
$L_{lk2} (\mu H)$	14.02	14.83	16.03	17.16	18.06	18.84
k	0.805	0.691	0.538	0.432	0.354	0.293

표 2 공극변화에 따른 ㄱ 코어를 사용한 비접촉 변압기 파라미터 (12턴 1:1)  
Table 2 Contactless transformer parameters using ㄱ core by air-gap variation

	1mm	2mm	4mm	6mm	8mm	10mm
$L_1 (\mu H)$	81.40	53.51	37.23	31.17	27.94	25.88
$L_2 (\mu H)$	82.42	53.55	35.61	27.95	23.24	19.93
$L_m (\mu H)$	79.70	51.17	33.78	26.49	22.00	18.75
$L_{lk1} (\mu H)$	1.71	2.35	3.46	4.67	5.94	7.15
$L_{lk2} (\mu H)$	2.72	2.38	1.83	1.45	1.24	1.18
k	0.973	0.956	0.928	0.900	0.863	0.825

표 1과 2는 공극 변화에 따른 EE 코어와 ㄱ 코어를 사용한 비접촉 변압기를 Maxwell을 이용하여 측정한 변압기 파라미터이다. 시뮬레이션 조건은 각 코어의 단면적과 창 면적, 그리고 사용된 전체 코어의 부피를 동일하게 설정하고 최소 공극 1mm 최대 공극 10mm를 가정하여 공극의 변화에 따른 변압기 파라미터를 측정하였다. EE 코어의 경우 공극 가변에 따라 결합계수는 0.805-0.293으로 급격하게 낮아지나 ㄱ 코어를 사용

한 경우는 0.973-0.825로 10mm의 공극에서도 높은 결합계수를 유지하여 큰 공극을 갖는 비접촉 시스템에 사용되는 변압기의 코어 형태로써 ㄱ 코어가 훨씬 좋은 성능을 나타낼 수 있음을 확인하였다.

## 2.2 직병렬 공진 컨버터

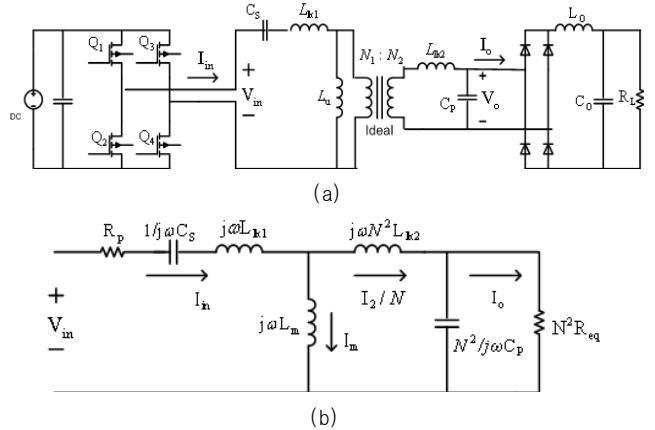


그림 3 (a) 직병렬 공진 컨버터 (b) 등가회로  
Fig. 3 (a) series-parallel resonant converter (b) equivalent circuit

그림 3은 직병렬 공진 컨버터의 회로도와 등가회로를 나타내며 장점은 다음과 같다<sup>[2]</sup>.

1. 자화인덕턴스와 2차측 병렬커패시터의 병렬 공진에 의한 임피던스 증가로 무부하 또는 경부하에서 자화인덕턴스를 통해 흐르는 순환전류를 줄일 수 있다.
2. 부하저항 변화에 대하여 기준화된 공진주파수에서 일정 전압이득 특성을 얻을 수 있다.
3. 모든 부하범위에 대해 인버터 단자 전압과 전류를 동상에 가깝게 제어할 수 있어 높은 효율특성을 얻을 수 있다.

다음 수식은 직병렬 공진 컨버터의 전압이득을 나타낸다.

$$|V_o| = \frac{1}{N} \cdot \left| \frac{1}{1 + \frac{L_{lk1}}{L_m} - \frac{1}{\omega^2 L_m C_s} + A\alpha + jQ_s \left( \frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega} \right) + jQ_p \left\{ \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right)^2 - 1 \right\}} \right| \quad (2)$$

여기서,

$$L_{eq} = \frac{L_m \cdot L_{lk2} N^2}{L_m + L_{lk2} N^2} + L_{lk1}, \quad \alpha = \frac{1}{N^2} + \frac{L_{lk2}}{L_m}, \quad L_p = L_m + L_{lk2} N^2$$

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} C_s}}, \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{C_p L_p}}, \quad C_p' = \frac{C_p}{N^2}, \quad R_{eq} = \frac{8R}{\pi^2}$$

$$Q_s = \frac{\omega_s L_{eq} \alpha}{R_{eq}}, \quad Q_p = \frac{R_s}{\omega L_m}, \quad A = \frac{R_s}{R_{eq}} + \frac{C_p}{C_s} - \omega^2 C_p L_{eq}$$

안정된 출력전압을 얻기 위한 주파수 조건은 식(3)과 같다.

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{eq}C_s}} \leq \frac{1}{\sqrt{C_pL_p}} \quad (3)$$

더 형 변압기와 결합된 직병렬 공진 컨버터의 스위칭 주파수가 55.47kHz이고 변압기 공극이 1mm라면, 직병렬 공진 커패시터  $C_s$ 와  $C_p$ 는 표 2에 나타낸 인덕턴스 파라미터와 식 (3)을 이용하여  $C_s=1.92\mu F$ ,  $C_p=0.1\mu F$ 의 값을 얻을 수 있다. 계산된  $C_s$ 와  $C_p$ 를 사용하여 공극변화에 따른 직렬공진주파수( $f_s$ )와 병렬공진주파수( $f_p$ )의 변화를 그림 4에 나타내었다.

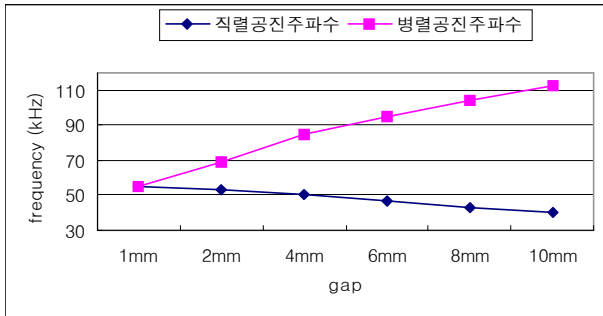
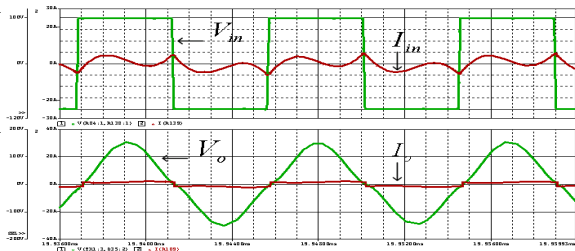


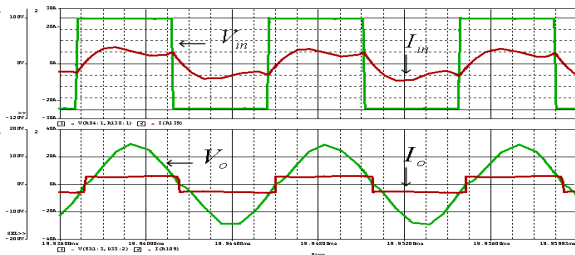
그림 4 공극변화에 따른 직렬공진주파수와 병렬공진주파수  
Fig. 4 series and parallel resonant frequency by air-gap variation

### 3. 시스템 시뮬레이션

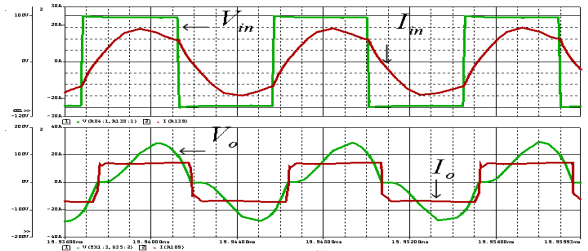
그림 5는 설계된 시스템의  $\pi$  코어를 사용한 비접촉 변압기 공극이 10mm로 가변된 경우의 시뮬레이션 파형이다. 공극이 증가함에 따라 병렬공진주파수는 112.81kHz로 변화되고, 그것에 맞추어 스위칭 주파수를 인가하였다. 시뮬레이션 파형에서 경부하로 갈수록 1차측 순환전류가 저감된다는 것을 확인할 수 있고 인버터 단자 전압과 전류의 위상이 전 부하범위에 대하여 고정되는 것을 볼 수 있어 큰 공극 변화에도 직병렬 공진 컨버터의 특성을 유지하는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5  $\pi$  코어와 직병렬 공진컨버터를 사용한 비접촉 시스템의 시뮬레이션 파형 (공극 10mm)

(a) 264 W (b) 435 kW (c) 963 kW  
Fig. 5 Simulation waveform of contactless system using  $\pi$  type core and series-parallel resonant converter (air-gap 10mm)  
(a) 264 W (b) 435 kW (c) 963 kW

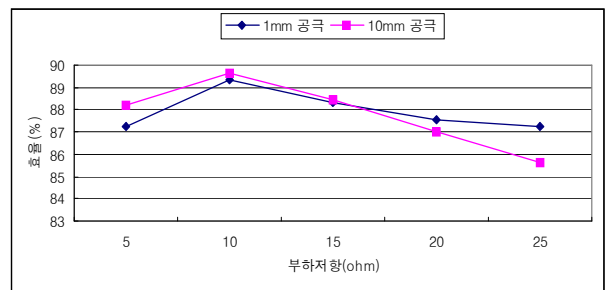


그림 6 부하변화에 따른 1mm 공극과 10mm 공극을 갖는 비접촉 변압기의 효율특성

Fig. 6 The efficiency characteristics of contactless transformers with 1mm air-gap and 10mm air-gap by load variation

### 4. 결론

본 논문에서는 큰 공극에도 높은 결합계수를 유지하는  $\pi$  코어를 이용한 비접촉 변압기의 파라미터를 분석하고 확인하였으며 이것을 직병렬 공진컨버터에 적용하였다. 최소 공극으로 가정된 1mm에 맞추어 시스템을 설계하였고 설계된 시스템에 공극의 변화가 발생하여도 병렬공진주파수에 맞추어 스위칭 한다면 직병렬 공진 컨버터의 특성을 유지하는 것을 확인하였다. 그리고 1mm, 10mm 공극의 비접촉 변압기 파라미터를 가지고 부하 출력변화에 따른 효율특성을 살펴본 결과 10mm 공극에도 높은 효율(약 85%~89%)을 나타냄을 확인하였다.

이 논문은 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2005-000-11173-0) 지원으로 수행되었음.

### 참고 문헌

[1] C. G. Kim, D. H. Seo, J. S. You, J. H. Park and B. H. Cho, "Design of a Contactless Battery Charger for Cellular Phone", IEEE Trans, Industrial Electronics, Vol. 48, 2001  
[2] 공영수, 김은수, 이현관, "낮은 커플링 변압기를 갖는 비접촉 전원의 개선된 고효율 공진컨버터", 전기학회 논문지, 제 54B권, 제 1호, pp. 33-39, 2005. 1