

# 트랜스포머의 자가공진 특성을 이용한 고전압 트랜스포머 설계

## High Voltage Transformer Design using Self-Resonant Characteristics of Transformer

이 승 환\*, 조 대 권\*\*\*

Sueng-Hwan Lee\*, Dae-Kweon Cho\*\*\*

### Abstract

In this paper, self-resonant characteristics of transformers were analyzed in accordance with changes of characteristics regarding to the stray capacitance, the volume of winding and the winding ratio were organized by formulas. Generally, the stray capacitance is considered as an unnecessary factor in processing transformers design as well as one of the inherent characteristics. In particular, these characteristics can be appeared clearly in the high frequency driving and Electrical resonance occurs in transformer, according to coupling with a magnetic factor at a particular frequency. In the case of high-voltage output applications, such as medical equipments, It is required to output high-voltage gain. Therefore, If Self-Resonant Characteristic is applied to High-Voltage transformer design, Not only the transformer and circuit but also related the system size can be reduced. So we propose it as one of additional high voltage transformer design methods.

### 요 약

본 논문에서는 트랜스포머의 자가공진 특성에 대하여 분석하였으며, 부유용량과 권선량, 권선비에 따른 변화관계를 수식으로 정리하였다. 일반적으로 트랜스포머에서의 부유용량은 제작과 관련하여 불요인자로 간주되나, 모든 트랜스포머에서 내재하는 특성을 갖는다. 특히 고역의 구동 주파수에서는 해당 특성이 확연하게 나타남은 주지의 사실이며, 자기적 요소와 결합하여 특정주파수에서 공진현상을 유발한다. 출력이득 값이 높아야 하는 소형 고전압 기기, 특히 의료용 응용전기의 경우 트랜스포머의 자가공진 특성을 이용하면 트랜스포머 및 회로의 사이즈를 줄임과 동시에 시스템의 경량화가 가능하여 추가적 설계 기법으로 제안한다.

*Key words : Self Resonance; Stray capacitance; High voltage transformer; LC resonance; transformer design*

\* Dept. of Electronics Engineering, Pusan National University

\*\* Research & development team, Sangyoung RND

★ Corresponding author

: Tel: +82-51-312-7670, Email: jdk9898@pusan.ac.kr

Manuscript received Dec. 30 . 2013; revised Feb. 24 . 2014 ; accepted Feb. 25 . 2014

## 1. 서론

회로기술의 발달로 다양한 유형의 고주파기기의 설계 및 개발이 용이해 지고 있다. 특히, 수백~수kV의 비교적 높은 전압을 이용하는 의료기 분야에서는 높은 권선비의 고전압트랜스포머를 사용하거나, 직렬공진회로를 추가적으로 응용하여 높은 출력전압을 얻고 있다. 본 논문에서는 200kHz~1MHz 주파수 대역에서

100~5kV의 펄스 출력전압을 필요로 하는 의료기기, 특수조명기기 분야의 다양한 응용[1]에 적용될 수 있는 고전압 트랜스포머의 설계 방법을 소개하며, 이를 구현하기 위해서 트랜스포머의 자가공진(self resonance) 특성을 이용하여 고전압 출력을 얻는 것에 중점을 두고 연구하였다. 종래의 관련기술 분야에서 트랜스포머 설계 시 불요인자로 간주한 기생성분인 부유용량(Stray capacitance)을 적극 활용[2,3]하였으며[4,5], 특히 트랜스포머의 주파수에 대한 공진특성과 기생성분 및 기본 정수간의 상관관계를 분석하였으며 시제품을 제작하여 부하에 대한 주파수별 출력전압의 변화를 측정하였다. 각 결과를 통하여 일반적으로 많이 사용되어지고 있는 페라이트코어에 대한 자가공진형 트랜스포머의 설계방법을 정리하였다.

## II. 본론

### 1. 권선에 따른 트랜스포머의 부유용량

권선기법에 따라서 다소 차이는 있으나, 기본적으로 권선간, 권선층간 부유용량이 형성된다. 일반적인 전력변환장치에 있어서 부유용량은 기생공진의 발생, 스위칭 시 발생하는 Ringing, Overshoot, 전자과장해 요인으로 간주되어 관련분야에서는 불필요인자로 그간 인식되어져 왔다. 반면에 RF분야 또는 이들 대역을 이용하는 고주파 응용기기에서는 기생용량을 활용하여 시스템을 설계 시 유용한 인자로 작용하며[1], 실제 고역필터 설계 시에는 부유용량을 결정하는 설계기술이 매우 중요한 역할[3]을 한다. 따라서 급변 연구는 고전압트랜스포머를 설계함에 부유용량을 이용한 설계 기법을 통하여 수백kHz 이상의 고역에서 작동 가능한 자가공진형 트랜스포머의 설계 기법을 활용할 수 있도록 함에 목적이 있다.

### 2. 트랜스포머의 자가공진(Self Resonance)

가. 트랜스포머의 자가공진

1, 2차 간 비교적 높은 권선비로 권선한 트랜스포머에 있어서 1차 측에 주파수성분의 전력을 공급하면 출력 측에 나타나는 전압이득 값은 그림 1과 같이 특정 주파수  $f_{sr}$ 에서  $V_o$ 가 최대값을 가지며 그 이후에서는 점차 감소하는 특성을 보인다.

해당 출력포트의 전압이득 특성은 그림 2와 같이 직렬공진회로로 간단히 등가화가 가능한 특성(아래 실험치의 결과를 통해)을 보이며 출력전압곡선의 패턴으로 판단해 볼 때, 공진주파수  $f_{sr}$ 을 기준으로 낮

은 주파수에서의 높은 구간 보다 전압 강하 기울기가 완만하다. 이는 용량성 임피던스가 유도성 보다 크게 나타난다는 의미로써 트랜스포머의 출력포트 양단의 공진 특성은 등가회로의 Capacitor  $C_s$  양단의 출력전압 특성과 등가화 할 수 있다.

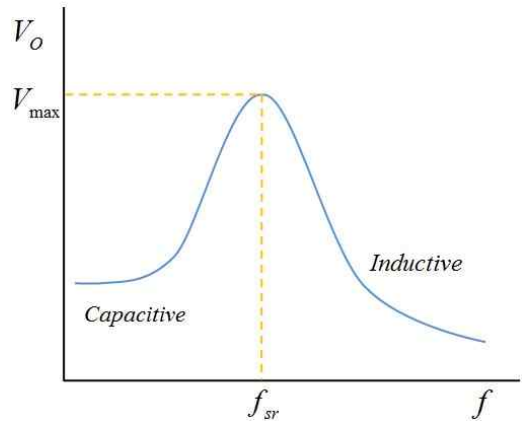


Fig. 1. Variation of the frequency characteristic of the output voltage of the transformer

그림 1. 주파수 변화에 따른 트랜스포머의 출력전압 특성

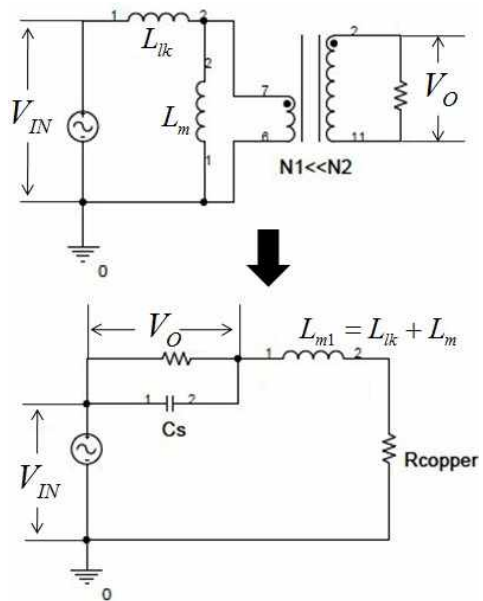


Fig. 2. The equivalent circuit of the output Port( $V_o$ )

그림 2. 출력 포트( $V_o$ )의 등가회로

여기서  $L_{lk}$ 은 누설인덕턴스로 1차 측의 권선수가 10턴 이하의 매우 적은 권선일 경우 그 값을 무시하여도 좋다. 따라서 상기의 특성을 근사화하면 공진주파수는 아래의 식 (1)로 정리가 가능하다.

$$f_{sr} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_s L_m}}, (L_{lk} \approx 0, \therefore L_m \approx L_{m1}) \quad (1)$$

일반적으로 많이 사용하는 4042, 5040 규격의 페라이트 코어(삼화페라이트, PL7규격)에 대하여 각 규격의 보빈에 1, 2차 측 권선을 2:80턴으로 권선하고, 코어를 삽입하여 공극이 없는 상태에서부터 공극을 순차적으로 부여하는 방식으로 1차 측에 정현파 신호를 공급하면서 2차 측에 나타나는 이득곡선을 측정하는 방법으로 실험하였다.

표 1은 EER4042 코어에 고정권선으로 2:80턴을 적용하고 공극이 없는 상태에서부터 단계별로 공극을 확대 적용하여 공진주파수의 변동 특성을 정리하였다.

고정된 권선상태에서 공극을 변화시킨다는 것은 트랜스포머의 자화인덕턴스를 바꾼다는 기술적 의미가 있는 것으로서 각 단계별 공극상태의 변화에 따라서 공진주파수가 변화한다는 것은 트랜스포머 내의 기생용량과 자화인덕턴스간의 상호작용에 의해서 발생하는 현상임을 명확히 보여주고 있다.

Table 1. Self resonance properties of EER4042 core(Turn ratio 2:80)

표 1. EER4042 코어의 자가공진 특성(권선비 2:80)

공극	$L_m$ ( $\mu H$ )	$f_{sr}$ (kHz)	입력 (Vpp)	출력 (Vpp)	$C_{st}$ $\frac{1}{(2\pi f_{st})^2 L_m}$
없음	12.2	274	20	337	27.7nF
1	6.4	377.	20	335	27.8nF
2	5.4	421	20	331	26.5nF
3	4.3	450	20	331	29.1nF
4	3.7	497	20	336	27.7nF
5	3.4	529	20	323	26.6nF
6	1.14	907	20	274	27.0nF

즉, 표 1에 적시된 데이터를 토대로 추정하면 공진은 트랜스포머의 자화인덕턴스와 부유용량간의 상호작용에 의해서 발생하며, 1차 측의  $L_m$  값의 변동분에 비례하여 공진주파수가 기생부유용량과 상호작용하여 발생하는 현상임을 알 수 있으며, 각 단계별 인

덕턴스에 대한 공진주파수에 상응하는 부유용량 값  $C_{st}$ 를 산출할 수 있다. 아울러, 공극의 변화 및 자화인덕턴스의 변화와는 관련이 없는 것으로 보아 권선에 의한 부유용량에 의한 공진현상임을 추측하게 한다.

Table 2. Self resonance properties of EI5040 core(Turn ratio 2:80)

표 2. EI5040 코어의 자가공진 특성(권선비 2:80)

공극	$L_m$ ( $\mu H$ )	$f_{sr}$ (kHz)	입력 (Vpp)	출력 (Vpp)	$C_{st}$ $\frac{1}{(2\pi f_{st})^2 L_m}$
없음	21	198	20	365	30.8nF
1	4.9	395	20	350	31.1nF

Table 3. EER4042 core, characteristics according to changes Primary-side(60-turn secondary side)

표 3. EER4042 코어의 1차 측 권선수 변화에 따른 특성(2차측 60-turn)

공극	$L_m$ ( $\mu H$ )	$N_1$ (턴)	$f_{sr}$ (kHz)	$C_{st}$ $\frac{1}{(2\pi f_{st})^2 L_m}$
없음	3.5	1	60	67.7nF
없음	15	2	60	15.2nF
없음	31	3	60	7.36nF

나. 코어형태에 따른 부유용량

4042코어 보다 큰 사이즈의 5040코어에 대하여도 상기의 방법으로 특성실험을 실시하여 보았다. 표 2에서는 4042코어에서 얻은 데이터와 유사한 패턴의 공진 특성을 확인할 수 있으며, 역시 부유용량  $C_{st}$ 와 트랜스포머의 자화인덕턴스와의 상호작용에 의해서 발생하는 것임을 알 수 있다. 다만, 산출된  $C_{st}$  값은 4042코어와 5040코어의 값이 다름을 표 1, 2를 통해서 확인할 수 있다.

다. 권선비에 따른 부유용량의 변화

더욱 자세하게,  $C_{st}$ 와 권선량과의 관계 그 중에서도 권선비와의 관계를 보면 표 3, 표 4에 적시된 실험데이터와 같이 권선비율에 의해서 공진주파수가 변화하며 각 값을 분석한 결과 권선비율이 기생용량 값의 변화를 야기한다. 2차 측의 권선비율을 증가시켜도 동일한 결과를 얻을 수 있으며, 권선비가 클수록, 권선양이 많을수록 용량 값은 증가하는 패턴을 보인다.

Table 4. EER4042 core, characteristics according to changes Primary-side(40-turn secondary side)

표 4. EER4042 코어의 1차 측 권선수 변화에 따른 특성(2차측 40-turn)

공극	$L_m$ ( $\mu H$ )	$N_1$ (턴)	$f_{sr}$ (kHz)	$\frac{C_{st}}{1}$ $\frac{1}{(2\pi f_{st})^2 L_m}$
없음	3.3	1	40	38nF
없음	12.4	2	40	15.2nF
없음	28.4	3	40	3.73nF

### 3. 실험 및 출력특성의 해석

상기 데이터를 종합하면, 다음과 같은 트랜스포머의 자가공진과 관련한 특성이 요약된다.

- ① 1, 2차 측의 권선량이 결정된 상태에서 코어의 공극변화는 1, 2차 측 인덕턴스에 변화만 가지고 오며,  $C_{st}$  값에는 영향을 미치지 않는다.
- ② 따라서  $C_{st}$  값은 식 (3)과 같이 코어 공극의 크기와 무관하며 공극에 의하여 변화된 자화 인덕턴스  $L_m$  값에 반비례하여  $f_{sr}$  이 증가한다.
- ③ 공극에 변화가 없는 상태에서 1차 측의 권선수 변화는 공진주파수에 영향을 미치지 않으며  $L_m$  값에 변화를 초래하며,  $L_m$  의 줄어든 값의 크기만큼  $C_{st}$  의 증가를 가지고 오는 상반적인 특징을 보인다. 이 때  $f_{sr}$  은 상수로 정의가 가능하며 공진주파수는 고정이 되는 특성을 가진다.

상기의 요약을 통해 누설인덕턴스는 매우 작은 값(0.01 $\mu H$  내외)이므로 무시해도 좋으며  $L_m$  과 부유용량  $C_{st}$  에 의해 자가공진 특성이 결정되며 부유용량  $C_{st}$  는  $N_1$ ,  $N_2$  의 권선 비에 의해 결정된다.

따라서,  $N_1$  의 권선수가 1일 때의 부유용량(stray capacitance)를  $C_{s1}$  이라 하면,  $C_{sn}$  은  $N_1$  의 권선수가  $n$ 일 때의 부유용량으로 정의할 때 다음 식 (2)와 같이 수식화 할 수 있으며,

$$C_{sn} = \frac{C_{s1}}{n^2} \quad (2)$$

$C_{s1}$  은  $N_2$  에 의해 변화하며,  $N_2$  의 권선수의 증가에 제곱에 비례( $C_{s1} \propto N_2^2$ )한다.

$$C_{s1} = N_2^2 \cdot k \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서  $C_{sn}$  은 다음의 식 (4)와 같으며.

$$C_{sn} = \frac{N_2^2}{N_1^2} \cdot k \quad (4)$$

상기의 실험데이터의 일 예인 권선된 4042코어가 적용된 트랜스포머의  $k$  값을 구하면,

$$k = \sqrt{353.6 \times 10^{-24}} F \quad (5)$$

식 (5)와 같이 산출가능하며, 여기서  $k$  를 부유용량상수라고 정의하며, 간편화를 위하여  $C_{su}$  를 단위부유용량으로 정의한다.

$$C_{su} = 353.6 \times 10^{-24} F \quad (6)$$

다만, 단위부유용량  $C_{su}$  은 권선방법, 층간절연의 두께, 보빈의 형태 및 크기에 따라서 변화하는 특성을 가진다. 식 (6)은 4042H 보빈에 대하여 소밀한 권선기법을 적용하였을 시 얻을 수 있는 값을 재차 확인한다.

$$N_2^2 \propto \frac{1}{C_{st}}, \quad N_1 = k \sqrt{\frac{1}{C_{st}}} \quad (7)$$

종합하면 부유용량상수  $k$  에 의해서 1차 측 권선수와  $C_{st}$  와의 관계를 정의할 수 있으며, 2차 측의 권선비에 따른 변화 비는 정확히  $k$  값의 비와 일치하므로 1, 2차 측 간의 권선량에 따른 부유용량은 식 (7)을 통하여 식 (8)과 같이 정리 할 수 있다.

$$C_{st} = N_2^2 \frac{\sqrt{C_{su}}}{N_1^2} \quad (8)$$

따라서, 식 (1)과 식 (8)을 적용하여  $L_m$ 의 값을 최초 결정하고, 각 권선 비를 고려한  $C_{st}$  값을 구하면 공진주파수  $f_{sr}$  값을 결정할 수 있으며 이후 결정된 권선비에 따라서 트랜스포머의 1, 2차 측 간 권선량을 결정할 수 있으므로 비교적 용이하게 설계가 가능하다. 또한, 상기 식을 이용하여 편의에 따라서 역으로 목표공진 주파수를 사전에 결정하고  $L_m$ ,  $C_{st}$ 를 결정하는 방법으로 설계도 가능하다.

#### 4. 자가공진 트랜스포머의 제작

같은 방법으로 그림 3은 상기의 설계 기법을 적용하여 제작된 트랜스포머를 도시하였고, 1차 측 2턴 2차 측 70턴으로 각각 권선하여  $C_{st}$ 는 약 10nF, 1차 측  $L_m$ 을  $9.35\mu H(500kHz/1V)$ 가 되도록 공극(Center Air-gap 0.25mm)을 부여하는 방법으로 인덕턴스를 조정하였다. 코어는 시중에서 흔히 구할 수 있는 EER4042(삼화페라이트코어, PL-7재)를 적용하였으며, 상기 정리한 수식에 따라서 공진주파수는 520kHz로 설계하였다.

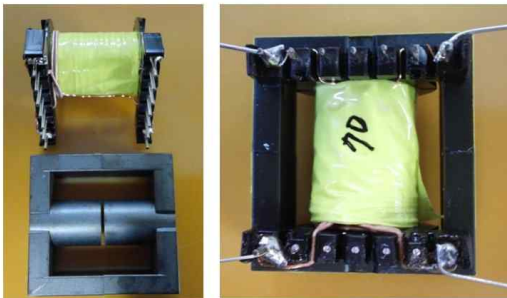


Fig. 3. Winded Self Resonance transformer(EER4042, 3:70T)  
 그림 3. 제작된 자가공진 트랜스포머(EER4042, 3:70T)

#### 5. 결과

제작된 트랜스포머에 대하여 주파수를 가변하며 입출력 전압 값의 변화를 측정하였고, 공진 특성을 확인한 결과, 그림 4와 같이  $V_{peak}$ 는 526kHz에서 입력 20Vpeak(6.8Vrms)에 대하여 640Vpeak(219Vrms)의 출력 값을 얻을 수 있었다. 해당 주파수는 설계 시 설정한 목표 공진주파수 520kHz와 대체로 근사하는 값이다. 아울러 100kHz~1.5MHz 대역에 대하여 그림 5와 같은 입출력전압-주파수 곡선을 얻을 수 있었으

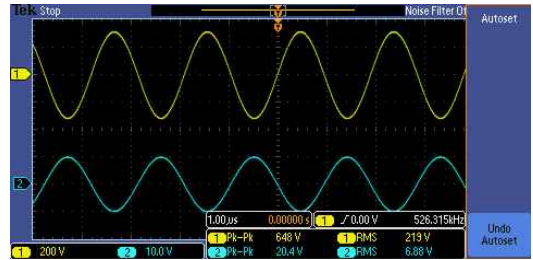


Fig. 4. The waveform of Transformer(Output-Upper, Input -below Figure)

그림 4. 자가공진 트랜스포머 입력, 출력파형(상 출력, 하 입력)  
 며, 출력포트 전압의 이득곡선 특성은 직렬공진의 이득곡선 특성에 잘 부합함을 확인하였다. 결과와 같이 종래의 단순 권선비에 의존하는 승압방법으로는 수백 kHz 이상의 고역구동 시 현격히 미달하는 출력 값을 얻게 되는 것에 반하여, 약 33배압 되는 실험결과를 얻을 수 있었다.

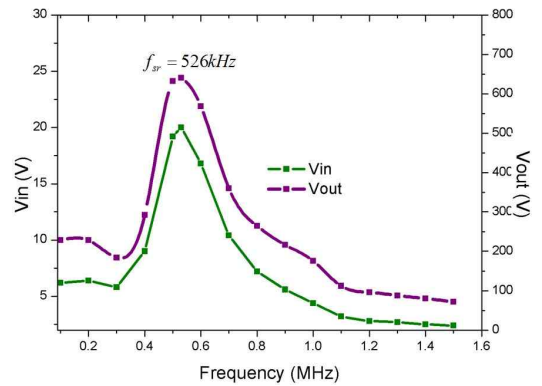


Fig. 5. Input Vs. Output Voltage curves  
 그림 5. 입출력 전압 곡선

### III 결론

본 연구의 결과와 같이 트랜스포머의 자가공진 특성을 이용한 고주파-고압트랜스포머 설계가 가능하도록 하는 기술사항을 제안하며, 이를 통하여 적용하고자 하는 코어의 규격과 보빈의 형태, 권선방법이 결정되면 각 결정정수를 적용하여 비교적 용이하게 고전압 트랜스포머의 설계가 가능함을 확인 하였다. 특히, 트랜스포머의 출력이득 값을 권선 비에 중점적으로 의존하는 종래의 설계방법에서 보다 그 사이즈를 축소할 수 있으며, 관련 회로디자인에 있어서도 경량화 할 수 있는 이점이 있다고 하겠다. 다만, 금후 트랜스포머의 자가공진 요소의 1, 2차 측간 상호작용의

특성에 대하여도 추가적 심화연구가 필요하며, 전주 파수 대역을 통해서 2차 측 출력이득 특성과 1차 측 공진이득의 특성간의 상호관계를 명확히 정리 할 필요가 있다.

## References

- [1] Jae-Hoon Jeong, Hee-Je Kim, Soo-Won Kim, " Dielectric Heating using High Voltage Generation of Self LC Resonance of Transformer," Journal of Korean institute of Electrical Engineers, vol. 61, no.12, pp. 1877~1879, 2012
- [2] RJ Kemp, PN Murgatroyd, and NJ Walker, " Self resonance in foil inductor," Electronics Letter, vol.11, no.15, 1975
- [3] Qin Yu, and Thomas W. Holmes, "A study on stray capacitance modeling of inductors by using the finite element method," IEEE transaction on Electromagnetic Compatibility, vol. 43, no. 1, pp. 88~93 2001
- [4] Hangseok Choi, "Design guidelines for quasi-resonant converters using KA5Q-series fairchild power switch," Fairchild Semiconductor, <http://www.fairchildsemi.com/AN-4149.pdf>, 2005.
- [5] Oh In-Hwan, "Analysis of a Resonant type high voltage Fly-back converter in a CRT horizontal deflection circuit and its high voltage BJT selection guide line," <http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9009.pdf>, 2000

## Dae-Kweon Cho (Member)



1998 : BS degree in Molecular Biology, Pusan National University.

2005 : BS degree in Computer Engineering, Korean Educational Development Institute.

2011 : MS degree in Electronic Engineering, Pusan National

University.

2012~Present : Research Planning & Advisory, Korea Ship Safety Technology Authority

2013~Present : Research & Development team, Sangyoung RND

<Research Interest>

Design and Control Dielectric Heating System,

Induction Heating System, Hyperthermia, Oncothermia

## BIOGRAPHY

### Seung-Hwan Lee (Student Member)



2010 : BS degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

2013 : MS degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

<Research Interest> Wireless

Power Transmission System