

100kHz 고밀도 펄스 변압기 설계

김성철, 박성수, 김상희, 김도태, 남상훈
 퍼항공과대학교 포항공속기연구소

100kHz Higy Density Pulse Transformer Design

S.C.Kim, S.S.Pa가, S.H.Kim, D.T.Kim, S.H.Nam
 POSTECH PLS/PAL

Abstract - 고 주파수 스위칭 동작을 하는 DC/DC 컨버터 혹은 인버터를 효율적으로 제작하기 위하여 고주파용 펄스 변압기의 역할은 매우 중요하다. 동작주파수가 수십 혹은 수백 kHz일 경우에는 최소의 부피로 충분한 전력을 수용하면서 변압기를 설계 및 제작하기 위하여 코어 및 권선의 선정, 코어 및 권선의 손실, 변압기의 온도상승요소, 변압기의 발열, 변압기의 누설 인덕턴스, 권선 커패시턴스, 분포 커패시턴스 그리고 공진 주파수 등을 고려하여 설계하고 시험 평가하여야 한다. 본 논문에서는 위의 여러가지 요소들을 고려하여 동작 주파수가 100kHz인 DC/DC 컨버터 혹은 인버터를 고밀도 제작하기 위하여 고주파용 펄스변압기를 최소의 부피로 수kW 용량으로 변압기의 온도상승요소를 고려하여 설계, 제작 그리고 실험한 결과에 대하여 기술 하고자 한다.

1. 서 론

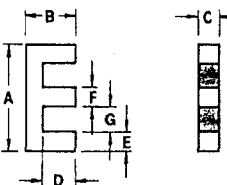
DC/DC 컨버터 혹은 인버터를 소형 경량화 시키기 위하여 기기에 대한 고 주파수 동작이 필수적이다. 전원장치의 부피와 무게를 결정하는 중요한 소자가 변압기이다. 따라서 전원장치의 부피와 무게를 줄이기 위하여 변압기의 에너지 밀도를 높여야 한다. 변압기의 에너지 밀도는 기기의 동작 주파수에 비례하여 증가한다. 이에 따라 전원장치를 소형 경량화 시키기 위하여 스위칭 방식으로 동작 주파수를 올리는 기술이 일반화 되고있다. 본 논문에서는 full-bridge DC/DC 컨버터에 적용 가능한 100kHz로 동작하는 3.3kW 용량의 펄스 변압기를 400 cm³(7.37cm x 7.37cm 7.37cm)이하의 부피로 설계하고 제작하여 실험한 것에 대하여 기술 하고자 한다. 그리고 펄스 변압기 설계 시 변압기의 권선 및 코어의 온도상승 및 누설 인덕턴스와 기생 커패시터에 의한 공진 전류의 흐름에 대하여 알아보았다. 이 변압기는 일차 입력이 250~290Vdc(펄스)이고 이차 출력이 4개이며 이차 출력은 630Vrms(1500W) x 2개, 560Vrms(135W) x 2개 이다.

2. 본 론

2.1 코어의 선정 및 코어의 유효전력

주어진 부피(400 cm³이하)로 변압기를 제작하기 위하여 페라이트 코어중 400 cm³이내에서 주어진 전기적인 용량을 만족하면서 제작이 가능한 코어를 코어 제작사별로 조사한 결과 magnetics inc.의 페라이트 코어중 EE-combination으로 2가지를 선정하였다.

- 선정된 코어 : 46016-EC/47228-EC(그림 1)
 선정된 코어가 필요로 하는 용량을 수용 할 수 있는지를 코어의 각종 파라메타를 이용하여 각 토폴로지에 대하여 계산한다.(표 1)



Type	R-46016-E	R-47228-E
A	33.95	72.4
B	22.3	27.5
C	15.52	19
D	13.8	17.8
E	7.7	9.53
F	15.52	15
G	14.85	16.3
Radiating Surface Ar	33.4690787	46.140425
Effective Area Ae	2.46	3.66
Effective Volume Vc	27.2	53.3
Effective Length Le	111	13.7

그림 1. 주어진 부피를 만족하면서 선정된 코어

	working Flux density	46016-E core	47228-E core
Forward converter topology			
$P_o(kW) = \frac{0.0005 B_{max} f A_e A_b}{D_{cma}}$ at f = 100kHz, D _{cma} = 500 circular mil/A	1000 G	0.72	1.48
	1500 G	1.07	2.22
	2000 G	1.43	2.96
Push-Pull converter topology			
$P_o(kW) = \frac{0.001 B_{max} f A_e A_b}{D_{cma}}$ at f = 100kHz, D _{cma} = 500 circular mil/A	1000 G	2.86	5.92
	1500 G	4.30	8.88
	2000 G	5.73	11.84
Bridge converter topology			
$P_o(kW) = \frac{0.0014 B_{max} f A_e A_b}{D_{cma}}$ at f = 100kHz, D _{cma} = 500 circular mil/A	1000 G	4.01	8.29
	1500 G	6.01	12.43
	2000 G	8.02	16.58

표 1 선정된 코어의 사용 자속밀도별 유효전력

표 1에 의하면 선정된 코어 각각 브릿지-토폴로지에서, 1500G, 200G로 펄스 변압기가 제작 되었을경우 필요한 용량을 충분히 이끌어 낼수 있음을 알수 있다.

2.2 코어의 재질선정

선정된 코어의 코어손실이 최소인 재질을 선정하기 위하여 K, P, R 재질에 대하여 코어 손실이 최소인 재질을 선택하였다. 재질별 코어 손실 (P_L)

k 재질 : $P_L = 0.0655 * f^{1.565} * B^{2.759} (mW/cm^3) (f = kHz, B = KG)$

P 재질 : $P_L = 0.009 * f^{2.06} * B^{2.705} (mW/cm^3) (f = kHz, B = KG)$

R 재질 : $P_L = 0.008 * f^{1.979} * B^{2.628} (mW/cm^3) (f = kHz, B = KG)$

위의 3가지 재질에 대하여 코어의 유효부피를 고려하여 코어손실을 구하면 그림 2와 같다.

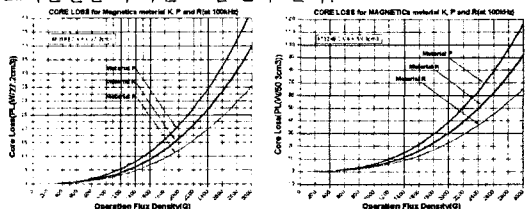


그림 2 코어 재질별 코어 손실

그림 2에서 K, P, R 재질중 R 재질이 코어손실이 가장

적어 코어의 재질은 R로 선정하였다.

2.3 펄스변압기의 설계

2.3.1 전기적 파라메타

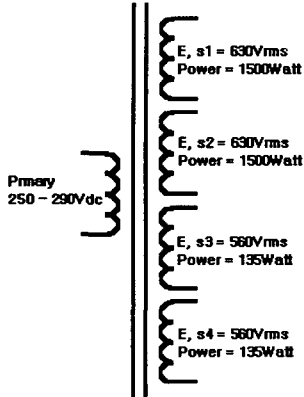


그림 3. 설계, 제작 할100kHz 펄스변압기

그림 3은 설계 및 제작할 100kHz 펄스 변압기이다. 이 변압기는 1차 입력이 250~290Vdc이고 2차 권선 s1과 s2는 630V rms/1500W, s3와 s4는 560V rms/1500W 이다. 입력 펄스의 듀티는 0.9로 컨버트 효율은 99%로 가정 하였다. 이것을 고려하여 1, 2차 각각의 전기적인 요소를 계산하면 표 2와 같다.

입력	출력
$V_p = 250Vdc(237.2Vrms)$	$V_{s1} = 630Vrms(664Vdc)$ $V_{s2} = 630Vrms(664Vdc)$ $V_{s3} = 560Vrms(590.3Vdc)$ $V_{s4} = 560Vrms(590.3Vdc)$
$P_{in}(total) = 3290W$	$P_{out}(total) = 3270W$
$I_{in}(total) = 13.87Arms$	$I_{out}(total) = 5.24Arms$
turn ratio = 1	turn ratio s1 = 2.656 turn ratio s2 = 2.656 turn ratio s3 = 2.361 turn ratio s4 = 2.361

표 2. 변압기의 전기적 파라메타 계산

2.3.2 절연지 및 권선의 선정

변압기의 설계 및 제작에 사용한 절연지로 skyrol SR550을 사용하였다. 각 권선의 층간 절연(t_{ij})은 2 mil(0.05mm), 일차 권선의 층간 절연두께(t_p)를 2 mil(0.05mm), 이차 권선의 권선간 절연은 2 mil(0.05mm)로 하였다. 일차 및 이차권선의 공간유효상수(U_{FP} , U_{FS})는 0.95로 가정 하였으며 설계시 적용된 보빈의 두께(T_b)는 0.76mm로 하였으며 권선의 총 폭은 절연물의 폭으로부터 양쪽으로 1.5mm씩 여유를 두었다.

property	unit	value
Normal Thickness	μm	25
Tensile Strength	kg/mm^2	22.0
Elongation	%	140
Heat Shinkage	%	1.5(150°Cx30min)
De-Electric Strength	kV	7.0

표 3. 절연지(SR50) 사양

펄스 변압기의 권선은 코어 및 보빈의 구조 그리고 변압기의 1, 2차 권선을 고려하여 하였다. 사용할 권선은 전류밀도가 500 circular mil/A를 기준으로 하여 설계 하였다. 일차권선은 foil을 사용 하였고 2차 권선은 변압기의 동작 주파수를 고려하여 Litz wire를 사용하였다. 그리고 권선에 대한 AC저항과 DC저항의 비

(R_{ac}/R_{dc})를 최소로 하기 위하여 동작주파수에서 표피효과를 고려하였다. 동작온도가 100°C 일 때 등의 skin depth는 $\delta = 0.071/\sqrt{f}(m)$ 이다. 설계 시 권선에 대한 안전율은 1.25를 적용하였다. 표 4는 R-47228EC 코어에 대한 설계 시 적용한 권선의 파라메타 이다.

	value	unit	
권선의 전류밀도	500	Dcma	
1차 권선	종류(Foil)		
	필요한 동 단면적	4.39	mm^2
	foil의 길이	26.48	mm
	foil의 두께	0.2	mm
2차권선 (s1, s2)	종류(33AWGx40)	Litz	
	필요한 동 단면적	0.75	mm^2
	Litz의 동 단면적	1.0179	mm^2
	Litz의 단면적(절연포함)	1.4969	mm^2
2차권선 (s1, s2)	종류(40AWGx20)	Litz	
	필요한 동 단면적	0.06	mm^2
	Litz의 동 단면적	0.1005	mm^2
	Litz의 단면적(절연포함)	0.1478	mm^2

표 4. R-47228EC 코어에 대한 권선 파라메타

2.3.3 펄스 변압기 설계 및 제작

그림 3의 펄스 변압기를 설계하기 위하여 권선의 배치는 1, 2차 권선의 수 및 전류의 흐름 등을 고려하여 변압기가 전체적으로 균일한 전류분포를 가지도록 그림 4와 같이 권선을 배치 하였다.

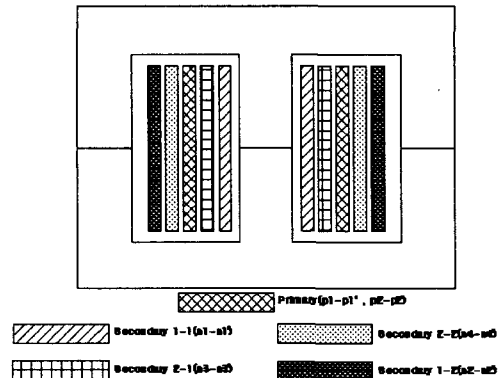


그림 4. 펄스변압기 권선의 배치

위의 내용을 기준으로 하여 사용 자속밀도를 100G부터 3000G까지 변화시키면서 각 권선에 대하여 권선수, 권선의 평균길이, 두께, 층수, DC저항, 손실, 변압기의 온도상승, 누설 인덕턴스, 분포 캐패시턴스, 공진 주파수들에 대하여 펄스 변압기를 설계하였다. 설계값을 그림 1 - 그림 4에 대하여 실제 권선의 두께, 윈도우 두께, 온도상승 등에 대하여 고려한 결과 이 변압기는 R46016EC 코어에 대하여는 동작 자속밀도를 1500G, 2000G, 2300G로 R47228EC 코어에 대하여는 동작 자속밀도를 1000G, 1500G, 2000G로 제작되는 것이 적절함을 확인하였다. 표 5는 R-47228EC 코어를 사용하여 펄스 변압기를 동작 자속밀도를 1500G로 설계한 것이다. 그림 5, 그림 6, 그림 7, 그림 8은 R-47228EC 코어를 사용한 변압기의 동작 자속밀도(100G ~ 3000G)에 대한 변압기 권선(윈도우)두께, 손실, 온도상승, 권선저항등을 해석적인 방법으로 살펴본 것이다. 이들 그림을 통하여 R-47228EC 코어의 경우 동작 자속밀도를 1500G 기준 제작 하는 것이 적당함을 알 수 있다.

사용 자속밀도	1500	G	이차 S-1	31.88	turn	2 층
총 권선 두께	10.60	mm	이차 S-3	28.33	turn	1 층
원도우 두께	11.09	mm	일차 P	12	turn	12 층
권선 저항	0.96	ohm	이차 S-4	28.33	turn	1 층
코어 손실	10.6	W	이차 S-2	31.88	turn	2 층
권선 손실	1.82	W	누설 인덕턴스	0.035	mH	
변압기 손실	12.42	W	기생 캐패시턴스	4.08	uF	
열발생 (ΔT)	44.3	°C	공진주파수	4.211	MHz	

표 5. R-47228EC 코어의 1500Gauss에 대한 설계

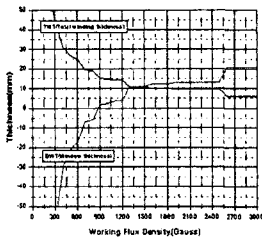


그림 5. 변압기 권선 (R-47228EC, 1500G)

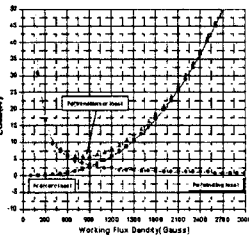


그림 6. 변압기 손실 (R-47228EC, 1500G)

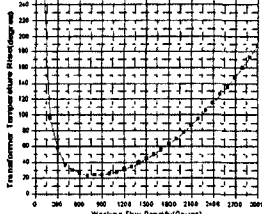


그림 7. 변압기 온도상승 (R-47228EC, 1500G)

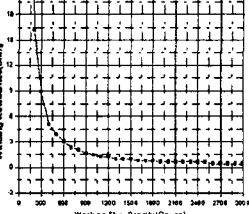


그림 8. 권선저항 (R-47228EC, 1500G)

사진 1과 사진 2는 지금까지 설계한 데이터를 가지고 변압기를 제작한 것이다.



사진 1. R-46016EC 코어의 펄스변압기 시제품(2000G)



사진 2. R-47228EC 코어의 펄스변압기 시제품(1500G)

2.4 펄스변압기의 시험

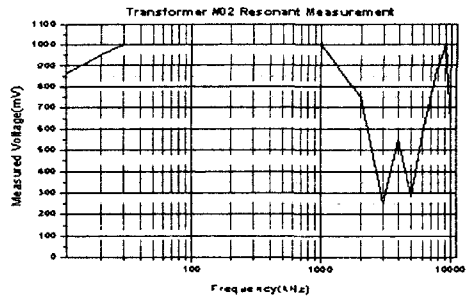


그림 9. 변압기 시제품의 공진점 측정 (R-47228EC 코어 1500G)

그림 9는 R-47228EC 코어를 사용 자속밀도 1500G로 제작한 변압기의 공진점을 측정한 것이다. 100kHz 주파수에서 이 변압기의 1차인덕턴스(L_p)는 1.385mH(측정값)이고 누설인덕턴스(L_L)는 1.43 μ H(측정값)이고 권선 캐패시턴스(C_w)는 0.0185pF(측정값) 그리고 공진 주파수는 2MHz 이다. 따라서 분포 캐패시턴스(C_d)는 4.574pF이 된다. 이 변압기는 동작 공진주파수가 동작주파수의 20배($F_{sw} \ll F_{osc}$)이고 권선 캐패시턴스는 분포 캐패시턴스의 41배($C_d \ll C_w$)이다. 제작된 변압기에 대하여 quality(Q)를 측정한 결과 1차 권선은 42.1, 이차 s-1권선은 46.1, 이차 s-2 권선은 45.6, 이차 s-3권선은 45.4, 이차 s-4권선은 45.1로 각 권선의 저항성분에 의한 손실은 2.4 ~ 2.2%로 펄스 변압기로서 충분함을 알수 있었다. 그리고 이 변압기의 CMRR은 52이다. 이 변압기는 제작시에 코어 및 각 권선사이에 각각 5000V를 1분간 인가한 결과 절연이 잘 유지되고 있었다.

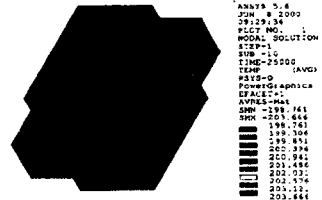


그림 9. 변압기 시제품의 열발생 모의실험 (R-47228EC 코어 2000G)

그림 9는 변압기의 열발생에 대하여 주변온도를 85°C로 하여 모의 시험한 것이다. 열 발생은 보빈을 중심으로 코어와 권선 사이에서 가장 많이 발생하여 코어의 바깥으로 전달되고 있다. 그리고 변압기는 약 6시간 경과 후 열적인 포화가 일어났다.

3. 결 론

주어진 부피 이내로 100kHz로 동작하는 펄스 변압기를 설계, 제작 그리고 시험을 하였다. 설계시 해석적인 방법에만 의한 결과와 실험적인 결과가 대체로 일치함을 알 수 있었다. 펄스 변압기는 제작시 공간전류에 의한 시스템의 불안정과 변압기의 온도상승을 억제하기 위하여 누설 인덕턴스와 기생 캐패시턴스를 최소로 억제하기 위한 제작상의 고려가 되어야 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] 남상훈 외, "고 에너지밀도 펄스변압기 설계", 대한전기학회 하계학술대회, E권, pp.2186, 1999
- [2] Abraham I. Pressman, "Switching Power Supply Design", pp 267-317, 1991