

권선 방법에 따른 100kHz 고밀도 펄스 변압기의 출력파형 개선

김성철, 정성훈, 남상훈
포항공대 포항가속기연구소

Output waveform improvement of 100kHz Higy Density Transformer by winding type

S. C. Kim, S. H. Jung, S. H. Nam
POSTECH PLS/PAL

본 논문은 민군경용기술사업에서 지원한 과제임

Abstract - 고 주파수 스위칭 동작을 하는 DC/DC 컨버터(인버터)를 효율적으로 제작하기 위하여 고주파용 펄스 변압기의 역할은 매우 중요하다. 완벽한 펄스를 재현하는 동작주파수가 100kHz, 용량이 3kW 그리고 부피가 400 cm³(7cm x 7cm x 7cm)이하인 DC/DC 컨버터(인버터)용 변압기를 개발하기 위하여 코어 및 권선의 선정, 권선의 배치, 코어 및 권선의 손실, 변압기의 발열, 변압기의 누설 인덕턴스, 권선 캐패시턴스, 분포 캐패시턴스 그리고 공진 주파수 등을 고려하여 설계 및 제작 하여야 한다. 본 논문에서는 위의 여러가지 요소들을 고려한 변압기의 설계, 제작, 시험 및 펄스 실험에 대하여 기술하고 변압기의 권선 배치 방법에 따른 출력 파형 개선에 대한 실험 결과에 대하여 기술하였다.

력은 최소 6kVdc가 되어야 하며 400 cm³이하로 개발 되어야 한다. 이 변압기에서 요구하는 입/출력은 표 1과 같다

변압기 입/출력	입력		240		Vrms	
	출력	S1	520/2.2/1144	V/A/W(rms)	S2	520/2.2/1144
	S3	520/0.2/104	V/A/W(rms)	S4	520/0.2/104	V/A/W(rms)

표 1 변압기의 입/출력(요구사항)

이러한 전기적인 요구사항을 가지고 입력 펄스의 듀티는 0.9로 컨버트 효율은 90%로 가정하여 변압기 설계 시 고려할 전기적인 파라메타를 표 1과 같이 계산하였다. 그림 2는 변압기의 고전압전원공급기에 연결도 이다.

1. 서 론

직류 혹은 교류 각종 전원장치를 소형 경량화 시키기 위하여 기기에 대한 고 주파수 동작이 필수적이다. 전원장치의 부피와 무게를 결정하는 중요한 소자가 변압기이다. 따라서 전원장치의 부피와 무게를 줄이기 위하여 변압기의 고 에너지 밀도가 되어야 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 고출력중폭기용 고전압전원공급기의 스위칭 주파수가 100kHz이고 용량이 3kW인 펄스 변압기를 400 cm³(7.37cm x 7.37cm x 7.37cm)이하의 부피로 설계하고 제작하여 실험한 것에 대하여 기술 하고자 한다. 펄스 변압기 시제품에대한 변압기의 턴수, quality(Q), 위상, 누설인덕턴스, 권선캐패시턴스, 공진주파수를 측정하고 분포캐패시턴스를 계산하였다. 그리고 변압기의 권선 방법에 따라 완벽한 펄스를 재현하는 것에 대한 실험 및 변압기의 제작에 대하여도 기술하였다.

f=100kHz, efficiency=90%, duty=0.9	
입력	출력
Vp = 253Vdc (240.02Vrms)	Vs1 = 520Vrms(548Vdc)
	Vs2 = 520Vrms(548Vdc)
	Vs3 = 520Vrms(548Vdc)
	Vs4 = 520Vrms(548Vdc)
Pin(total) = 3.057kW	Pout(total) = 2.75kW
Iin(total) = 13.4Arms	Iout(total) = 4.8Arms
turn ratio = 1	turn ratio s1 = 2.167
	turn ratio s2 = 2.167
	turn ratio s3 = 2.167
	turn ratio s4 = 2.167

표 2 변압기 전기적 파라메타(변압기 설계 시 이용)

2. 본 론

2.1 고주파수, 고밀도 고전압 펄스변압기 설계

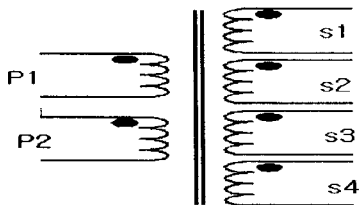


그림 1 고주파수 고전압 펄스변압기

그림 1은 설계 및 개발하여야 할 고주파수 고밀도 고전압 펄스변압기의 1, 2차 권선이다. 이 변압기는 사용온도가 -55 ~ 85℃, 동작주파수는 100kHz이고 절연대

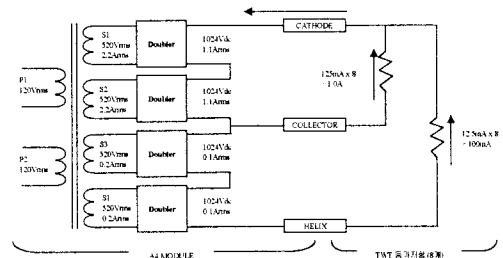


그림 2 펄스변압기의 연결도
(100kHz, 변압기 1차 full bridge 스위칭)

2.1.1 변압기 코어의 선정

펄스변압기용 코어는 동작주파수를 충분히 수용하면서 변압기 제작 시 부피가 최대 400 cm³이하가 되는 core 인 Magnetic Ferrite EC type(47220EC x 2)으로 코어손실이 적은 R 재질을 선정하였다. 이 코어는 Ve=50.5 cm³이며 스위칭 주파수가 100kHz이고, 변

압기의 자속밀도가 1000G ~ 2400G 사이로 동작할 때 코어손실은 3.7 ~ 36.5W이고 full bridge 방식에서 1000G ~ 2000G에서 코어로부터 이끌어낼 수 있는 전력은 8.29 ~ 16.58kW로 요구하는 3kW를 충분히 수용한다.

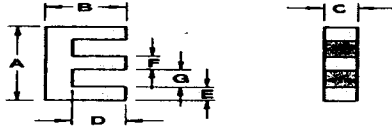


그림 3 R-47228E 코어의 형태(mm)
 (A=72.4, B=27.9, C=19, D=17.8, E=9.53, F=19, G=16.9)
 transformer size = 213.31cm3(A x 2B x (C+2G))

2.1.2 변압기 절연지 및 권선 선정

요구하는 충분한 절연강도를 가진 고전압 펄스변압기를 설계하기 위하여 절연지는 변압기에서 요구하는 6000Vdc를 만족하는 skyrol SR50을 선정하였다. 설계 시 일차 권선의 층간 절연은 2 mil. 이차 권선의 층간 절연 및 권선간 절연은 2 mil로 하여 충분한 절연을 유지하도록 하였다. 고전압 펄스변압기는 전류밀도가 500 Dcma(circular mil/A)인 권선을 기준으로 설계하였다. 동작 주파수가 100kHz이므로 이 주파수에서 skin depth ($\delta=0.071/\sqrt{f}(m)$)는 0.225mm이다. 따라서 일차 권선의 두께(지름)은 0.225mm 보다 적어야 한다. 일차권선은 foil을 사용하였고 이차권선은 litz wire를 사용하였다. 그리고 변압기 권선 설계 시 모든 권선에는 안전율을 1.25로 하였다. 표 3은 표 2의 내용으로 변압기의 권선을 설계한 것이다.

		value	unit
1차 권선 (foil)	권선의 전류밀도	500	Dcma
	필요한 동 단면적	4.24	mm ²
	foil의 길이	23.46	mm
	foil의 두께	0.2	mm
2차권선 (s1, s2)	종류(35AWGx50)	Litz	
	필요한 동 단면적	0.7	mm ²
	Litz의 동 단면적	0.7697	mm ²
	Litz의 단면적(절연포함)	1.1319	mm ²
2차권선 (s1, s2)	종류(35AWGx10)	Litz	
	필요한 동 단면적	0.06	mm ²
	Litz의 동 단면적	0.1539	mm ²
	Litz의 단면적(절연포함)	0.2264	mm ²

표 3 변압기 권선의 설계(1)

	1500Gauss	2000Gauss	
1차(p)	12/12	8/8	turn/layer
2차(s1)	26/2	18/1	turn/layer
2차(s2)	26/2	18/1	turn/layer
2차(s3)	26/1	18/1	turn/layer
2차(s4)	26/1	18/1	turn/layer

표 4 변압기 권선의 설계(2)

표 4는 표3의 권선을 이용하여 표 2의 변압기를 동작자속밀도 1500Gauss, 2000Gauss로 설계한 변압기 1, 2차 권선의 turn/layer 이다.

2.1.3 변압기 개발

2.1.3.1 변압기의 권선 배치

표 4의 1, 2차 권선을 선정된 변압기용 코어인

magnetics의 R-47228E 코어에 3가지 형태로 권선을 배치하여 변압기의 시제품을 제작하였다.

변압기 시제품 권선배치

type-01 : s1-s3-p(1/2p,1/2p)-s4-s2(그림 4)

type-02 : s3-s1-p(1/2p,1/2p)-s2-s4(그림 5)

type-03 : s3-1/2p-s3-s4-1/2p-s2(그림 6)

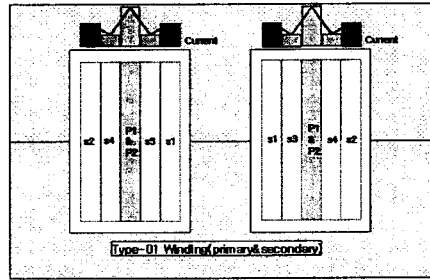


그림 4 변압기 권선배치 type-01

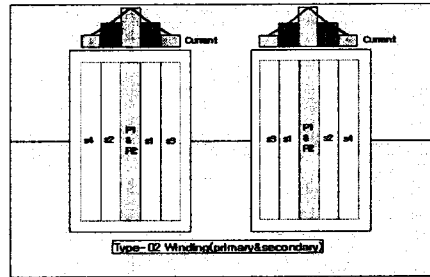


그림 5 변압기 권선배치 type-02

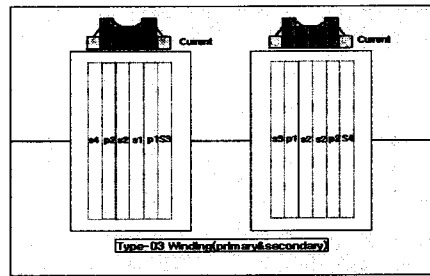


그림 6 변압기 권선배치 type-03

그림 4의 변압기 권선 배치는 일차권선을 한가운데 배치하고 이차 권선 중 전류가 낮은 s3, s4 권선을 일차 권선 옆에 배치시키고 이차 권선 중 전류가 많은 s1, s2 권선을 가장 바깥으로 배치하였다. 그림 5의 변압기 권선 배치는 일차권선을 한가운데 배치하고 이차권선 중 전류가 많은 s1, s2 권선을 일차권선 옆에 배치시키고 이차 권선 중 전류가 적은 s3, s4 권선을 가장 바깥으로 배치하였다. 그림 6의 변압기 권선 배치는 이차권선을 s3, s1, s2, s4로 배치하고 일차권선을 1/2씩 (p1,p2)하여 각각 2차권선의 s3와 s1 그리고 s2와 s4의 사이에 배치하였다.

2.1.3.2 변압기 시제품의 파라메타 측정

표 4의 1500gauss 및 2000gauss 권선을 그림 4, 5, 6와 같이 배치하여 변압기의 시제품을 제작하였다. 각 변압기에 대하여 quality($\frac{\omega L}{R}$), 위상, turn ratio, 누성인덕턴스, 권선케패시턴스, 공진주파수, 분포케패시턴

스 파라메타를 측정하였다. 측정결과 제작한 모든변압기는 설계시 turn ratio 대로 제작되었고 누설인덕턴스, 권선케패시턴스, 공진주파수, 분포케패시턴스 등은 펄스 변압기로서 우수하였다.

type-02 권선배치 변압기	
1500 Gauss	turn ratio:ok, Q = > 115, phase : > 89.5°
	leakage inductance(L_l)=2.04uH
	winding capacitance(C_w)=0.277nF
	resonant frequency(f_o)=4.0MHz
2000 Gauss	distributed capacitance(C_d)=3.12pF
	turn ratio:ok, Q = > 99, phase : > 89.4°
	leakage inductance(L_l)=1.29uH
	winding capacitance(C_w)=0.224nF
resonant frequency(f_o)=6.0MHz	
distributed capacitance(C_d)=1.96pF	

표 5 type-02 권선 변압기 시제품의 파라메타



그림 7 제작된 변압기 시제품

2.1.3.3 변압기 시제품의 펄스 시험

변압기에 대하여 펄스 시험을 하기 위하여 그림 2와 같이 펄스변압기를 연결하고 변압기의 일차에는 DC 입력 전압을 full bridge 회로를 이용하여 100kHz로 스위칭하며 이차권선 각각에서 파형을 관찰하였다.

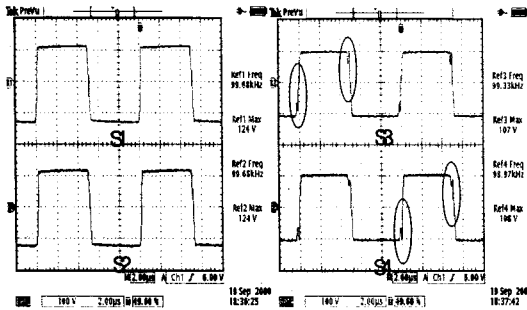


그림 8 type-01 권선배치 2000Gauss 변압기

그림 8은 type-01으로 권선을 배치한 동작 자속밀도가 2000Gauss인 변압기시제품을 펄스 시험을 한 파형이다. 이차권선 s1, s2의 파형은 거의 완벽한 파형이 재현되었고 s3, s4의 파형에는 rising edgy, falling edgy에서 파형의 찌그러짐이 있다. 그림 9은 type-02으로 권선을 배치한 동작 자속밀도가 2000Gauss인 변압기시제품을 펄스 시험을 한 파형이다. 이차권선 s1, s2, s4의 파형은 완벽한 파형이 재현되었고 s3의 falling edgy에서 파형의 약간 찌그러짐이 있다.

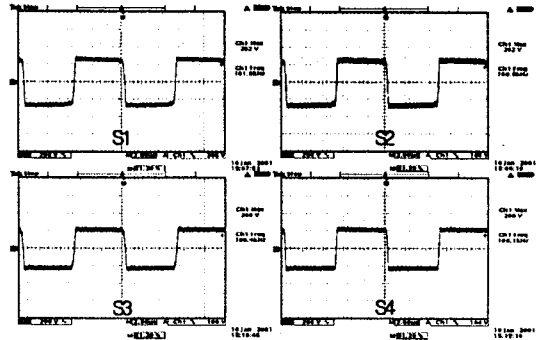


그림 9 type-02 권선배치 2000Gauss 변압기

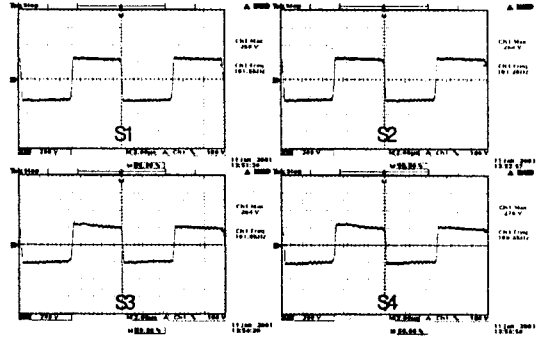


그림 10 type-03 권선배치 2000Gauss 변압기

그림 10은 type-03으로 권선을 배치한 동작 자속밀도가 2000Gauss인 변압기시제품을 펄스 시험을 한 파형이다. 이차권선 s1, s2, s3, s4의 파형은 모두 rising edgy, falling edgy에서 파형이 찌그러지는 현상이 없다. s3와 s4의 파형에서는 약간의 drop이 관찰되었다.

3. 결 론

고출력증폭기용 고전압전원공급기의 고주파수, 고밀도 고전압 펄스변압기를 개발하였다. 변압기 시제품은 type-01, type-02, type-03의 3가지 형태로 권선을 하여 파라메타를 측정하고 각각에 대하여 펄스 시험을 하였다. 측정된 파라메타는 개발된 펄스변압기가 성능이 우수함을 알 수 있다. 그리고 펄스시험결과 변압기의 권선배치는 type-01의 권선 배치에서는 일부 권선에서 파형의 찌그러짐이 나타났으며 type-02의 권선배치에서는 이차권선 모두에서 양호한 파형이 관찰되었다. 그리고 type-03의 권선배치에서는 파형의 찌그러짐은 없었으나 drop이 관찰되었다. 따라서 고출력증폭기의 고전압전원공급기용 펄스변압기와 같은 일, 이차권선이 여러 개인 스위칭 변압기의 권선배치는 type-02의 권선배치 방법이 가장 적절하다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김성철 외, "100kHz 고밀도 펄스변압기 설계", 2000년 도 대한전기학회 하계학술대회 논문지 B 권, pp 1283-1285
- [2] 김성철 외, "고출력증폭기 고전압전원공급기용 고주파수 펄스변압기 설계", 국방과학연구소 제4차 통신전자학술대회 논문지, pp. 3C 41-46, 2000