

자심 테슬라 변압기를 이용한 400kV급 소형 고전압 펄스 발생기 개발

신진호, 윤동기

(주)리플렉스, 고출력 전자과 응용연구실

400kV-Class Compact High Voltage Pulse Generator Using Magnetic Core Tesla Transformer

Jin Ho Shin, Dong Gi Youn

High Power Electromagnetic Applications Laboratory, Replex Co., Ltd.

ABSTRACT

본 논문에서는 자심 테슬라 변압기를 이용한 400kV급 소형 고전압 펄스 발생기를 개발하였다. 테슬라 변압기의 효율 및 출력전압 향상을 위해 4분할 적층 원통형 자심 구조를 새롭게 제안 하였다. 제안 된 자심 구조를 적용하여 테슬라 변압기를 제작 한 결과, 최대 출력전압 425kV, 에너지 변환 효율 50%를 확인하였다

1. 서론

최근 펄스 파워(pulsed power) 기술은 산업분야 뿐만이 아니라 고출력 전자과 감응성 실험을 위한 용도로 활발히 응용되고 있다. 이러한 고출력 전자과에 대한 감응성 실험에서는 시험의 편의성 및 시험 대상체의 다양성으로 인해, 소형, 고반복율의 고전압 나노초 펄스 발생기가 요구되고 있다^{[1][2]}.

일반적으로 고전압 나노초 펄스 발생기는 막스 발생기(Marx generator) 또는 테슬라 변압기(Tesla transformer)와 펄스성형선로(pulse forming line)가 결합한 구조로 구성된다. 이 중 테슬라 변압기는 니콜라 테슬라(Nikola Tesla)가 발명한 고전압 승압방식으로 상호 인덕턴스에 의해 유도 결합된 두 개의 LC 공진회로로 구성되어 있으며, 공심(air core)과 개루프 자심(open loop magnetic cores) 테슬라 변압기로 구분된다^[3].

공심 테슬라 변압기는 구조가 간단하고, 자심의 포화문제가 발생하지 않는 장점이 있으나, 결합계수가 작아 에너지 변환 효율이 낮고 고 반복율 및 소형화 구현이 어려운 단점이 있다.

반면 자심 테슬라 변압기는 공진회로간 자기적 결합강화를 위해 자심을 사용하는 변압기로, 공심 테슬라 변압기에 비해 결합계수가 크기 때문에 에너지 변환 효율이 높고 고 반복율 펄스 발생이 가능하며, 소형화에 보다 유리한 장점을 갖는다. 본 논문에서는 4분할 적층 원통형 자심 구조를 제안하여 테슬라 변압기에 적용 하였으며, 이를 통해 개발 된 고전압 펄스 발생기의 성능을 확인 하였다.

2. 본문

2.1 자심을 삽입한 테슬라 변압기 구조

자심 테슬라 방식 고전압 발생기는 그림 1에서와 같이 테슬라 변압기가 동축 펄스성형선로에 내장되어 있는 구조로, 1차 LC 회로(L₁, C₁)와 2차 LC 회로(L₂, C₂)간 자기적 결합강화를 위해서 원통형의 개루프 자심을 삽입하였으며, 또한 자심이 동축 펄스성형선로 역할을 동시에 수행하는 구조적 특징을 갖는

다.

이러한 구조에서 결합계수는 자심의 종횡비에 따라 1에 근접한 매우 높은 값을 가지며, 이로 인해 결합 계수가 낮은 공심 테슬라 변압기에 비해 자심 테슬라 변압기는 에너지 변환 효율이 높은 특징을 갖는다. 따라서 고 반복율 펄스 발생이 가능하며, 시스템의 소형화에 보다 유리한 장점을 갖는다.

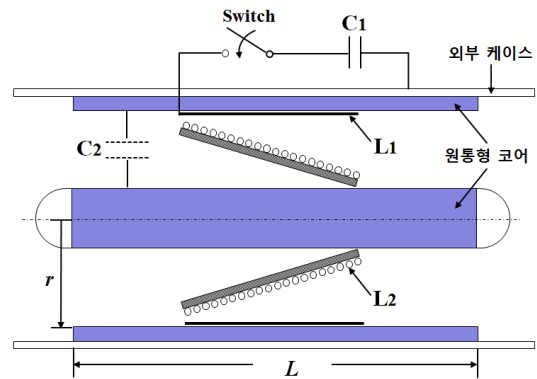


그림 1 자심 테슬라 변압기 구조

Fig. 1 Structure of magnetic core Tesla Transformer

2.2 4분할 적층 원통형 자심

자심 테슬라 변압기의 자심은 결합 계수를 높이는 역할과 함께 펄스성형 선로의 역할을 한다. 따라서 도전성을 가지고 있어야 하며, 동축 형태로 제작을 위해 자심 재료는 절삭가공을 위한 연성 특성을 가지고 있어야 한다.

제안된 자심은 박판 적층체와 십자형태의 금속 프레임으로 구성된다. 금속 프레임의 적층 영역을 4분할하고 각 영역에 박판 적층체를 고정시킨 후, 외측면을 절삭 가공을 하여 원통형 곡면을 갖도록 제작하였으며 제작 사진을 그림 2에 나타내었다.



그림 2 4분할 적층 원통형 자심

Fig. 2 Quad-division lamination core with cylindrical shape

1.3 400kV급 소형 고전압 펄스 발생기 제작 및 성능 확인

본 연구에서 제안한 원통형 자심의 성능 확인을 위해 제안된 자심이 적용된 테슬라 변압기를 이용하여, 길이 280mm, 직경 130mm인 크기의 400kV급 소형 고전압 펄스 발생기를 제작하였다.

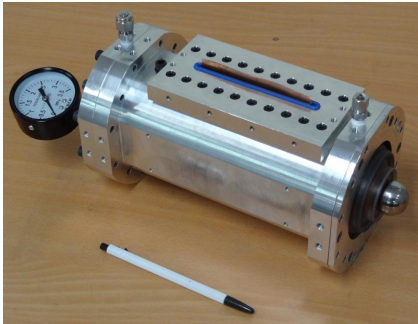


그림 3 제작된 소형 고전압 펄스 발생기
Fig. 3 Compact high voltage pulse generator

표 1은 제작된 소형 고전압 펄스 발생기의 각 부분 소자 값을 측정된 것이다. L_1 과 C_1 은 테슬라 변압기의 1차 측 인덕턴스 및 커패시턴스 값을 나타내며, L_2 와 C_2 도 동일하게 2차 측에 해당하는 값을 나타낸다. R_1 및 R_2 는 테슬라 변압기의 1차 및 2차 측 DC 저항성분 값을 의미한다. R_{k1} 은 1차 측의 기생 저항 성분, L_{k1} 은 1차 측의 기생 인덕턴스를 나타낸다.

표 1 테슬라 변압기 회로의 각 소자 값
Table 1 Electrical parameters of Tesla transformer

구분	값	구분	값
L_1	237nH	R_1	0.1m Ω
L_2	133mH	R_2	200 Ω
C_1	25 μ F	R_{k1}	17m Ω
C_2	40pF	L_{k1}	40nH

자심의 성능을 확인하기 위해서 제작된 발생기의 전압 이득 및 에너지 변환 효율 등을 확인하였다. 그림 4는 테슬라 변압기 1차 측 커패시터 C_1 의 전압이 728V일 때, 2차 측 커패시터 C_2 의 충전 전압 파형을 용량성 분압기를 이용하여 측정된 것이다. 분압기의 전압 분압비는 약 21,150배이며, 이로 부터 C_2 의 최대 충전 전압은 약 425kV, 충전 시간은 약 2 μ s이며 전압 이득은 580으로 확인되었다. 에너지 변환 효율은, 1차 측 커패시터와 2차 측 커패시터에 충전된 에너지의 비로 약 50%로 산출되었다. 이는 기존 공심 코어를 적용한 경우 대비 전압 이득은 약 20배 증가, 에너지 변환효율은 약 400배 증가한 값이다. 또한 2차 측 커패시터 충전 전압의 표준편차는 약 3% 이내로 동작 안정성이 우수함을 확인하였다.

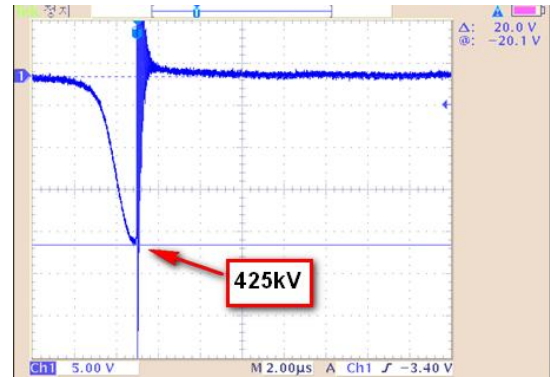


그림 4 자심 테슬라 변압기 2차 측 커패시터 충전 전압 파형
Fig. 4 Output voltage waveform of secondary capacitor

3. 결론

본 논문에서는 자심 테슬라 변압기에 적용 가능한 4분할 적층 원통형 자심을 새롭게 제안하였다. 제안된 자심은 제작이 용이하고, 점적율을 극대화 할 수 있는 구조적 특징을 갖는다. 제안된 자심의 성능 확인을 위해, 길이 280mm, 직경 130mm인 테슬라 변압기를 이용한 소형 고전압 펄스 발생기를 제작하고 출력 성능을 측정하였다. 그 결과, 출력전압은 425kV, 전압 이득은 580, 에너지 변환 효율은 약 50%로 확인 되었다. 본 연구에서 제안한 4분할 적층 원통형 자심은 테슬라 변압기 적용 시 높은 효율을 구현 할 수 있고, 소형뿐만 아니라 대형 자심 테슬라 변압기의 제작에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] H. Akiyama, T. Sakugawa, T. Namihira, K. Takaki, Y. Minamitani and N. Shimomura, "Industrial applications of pulsed power technology", IEEE Trans. Dielectr. Elect. Insul., vol. 14, no.5, pp.1051-1064, 2007
- [2] G. A. Mesyats, S. D. Korovin, V. V. Rostov, V. G. Shpak, and M. I. Yalandin, "The RADAN series of compact pulsed power generators and their applications", Proc. IEEE, vol. 92, no.7, pp.1166-1179, 2004
- [3] Korovin, S.D. "Tesla transformer in a high current repetitive accelerator.", HCEI SB AN SSSR. Technical Report 47, pp.4-35, 1988