

고집적 펄스파워용 인덕터의 설계 및 제작 실험

김영배, 박재윤*, 김종수, 류홍제**, 김진성, 이병하***
 경남대학교*, 한국전기연구원**, 국방과학연구소***

Inductor design and test for high density pulsed power supply

Young Bae Kim, Jae Yun Park*, Jong Soo Kim, Hong Je Ryu**, Jin Sung Kim, Byung Ha Lee***

Kyungnam University*, Korea Electrotechnology Research Institute**, Agency for Defense Development***

Abstract - 펄스파워기술은 저장된 전자에너지를 시공간적으로 압축 증첩하여 극히 짧은 시간안에 대전력을 발생시켜 좁은 공간에 에너지를 집중 공급하는 기술이다. 여기에는 에너지를 저장하는 충전장치에 대한 기술과, 빠른 시간에 에너지를 방출하는 스위칭기술, 파형을 성형하는 펄스포밍 네트워크 기술등을 포함하며, 이를 이용한 응용기술로 플라즈마건, 이온빔 가속장치, 펄스성형용접, 수처리 발라스트, 파압장비, 코일건, 레이저 등이 있으며, 이 응용분야에 오래전부터 이용되어 왔다. 이러한 분야에 적용되는 펄스전원장치는 이동성이 용이해야 하고, 부피 또한 작은 구조를 가져야 한다. 본 논문은 고집적화 펄스전원장치의 트로도 타입 설계, 제작, 실험에 관한 논문으로 그 중 펄스성형을 이뤄내는 인덕터에 대한 성능 실험 결과를 위주로 한다.

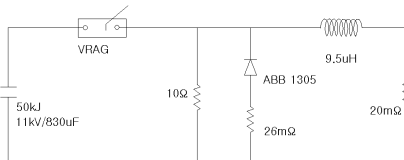
1. 서 론

고전압. 대전류의 에너지를 공급하는 펄스전원장치의 구성품은 충전용 커패시터, 주 스위치, 크로바 다이오드, 크로바 저항, 파형성형용 인덕터등으로 구성 되어 있다. 이러한 구성품들을 소형화 즉 고집적화하기 위한 연구는 오래전부터 행하여져 왔다. 장치의 각 구성품들간의 고전압에 대한 절연 문제 및 펄스포밍을 위해 발생하는 자기장은 시스템의 각 구성품들에 영향을 미쳐 제어기의 오동작 또는 고장의 원인 제공을 하기 때문에 구성품들의 이격 거리를 증가 시켜야 하고, 이로 인해 전원장치의 크기가 커질 수밖에 없다.

본 논문에서는 동일소자 사용시 최대 전력 밀도를 갖는 고집적화 펄스전원장치(CPPS: Compact Pulse Power Supply)를 구성하는데 큰 영향을 미치는 인덕터 발생 자기장에 관한 효과를 분석하고자 한다. 이를 위해, 파형조정용 인덕터를 제작하였으며, 센서를 이용하여 인덕터에서 발생하는 자장의 세기를 측정하였다. 실험에 사용된 인덕터는 제작이 쉽기 때문에 많이 사용되는 젤리롤형 인덕터 와 제작이 어려운 트로이달형 인덕터 2종류를 사용 하였다.

2. 본 론

본 논문에 사용한 고전압. 대전류 고집적화 펄스전원장치의 회로도도는 그림 1과 같다. 에너지를 저장하는 충전용 커패시터, 충전된 에너지를 방전하는 주 스위치, 메인 스위치의 방전시에 커패시터에 걸리는 역전압을 제거하는 기능과 인덕터에 저장된 에너지를 부하로 방전시키는 freewheeling역할을 하는 크로바다이오드, 그리고 출력 전류 파형을 shaping하는 인덕터로 구성된다. 실험에 사용된 펄스전원장치는 그림 3과 같이 고집적화하여 콤팩트하게 제작하였다.



〈그림 1〉 펄스전원장치 회로도

2.1 충전용 커패시터

고집적화 펄스전원장치에 사용한 커패시터의 정격사양은 다음과 같다. 전압 11kV, 정전용량 830μF, 에너지 50kJ, Peak Current 150kA, 커패시터의 내부 인덕턴스 40nH이다. 또한 커패

시터의 에너지밀도는 0.7J/cc이다.

2.2 충전용 커패시터

주 스위치는 VRAG(Vacuum Rotary Arc Gap Switch)를 사용하였으며, 사양은 다음과 같다. 정격전압 22kV, 썬지전류 100kA (@1ms) 이다.

2.3 크로바 다이오드 와 크로바 저항

크로바 다이오드의 역할은 커패시터 방전시에 역전압이 걸리는 것을 차단하며, 동시에 출력측에 freewheeling 효과를 주는 역할을 한다. 그러나 다이오드만 설치한다면 커패시터에 역전압을 발생시키므로 적당한 값의 저항을 직렬 연결하여야 한다. 다이오드의 정격사양은 다음과 같다. ABB사의 모델 No.1350으로, 역전압 13.5kV, 썬지 전류 60kA(@ 500μs)이다. 크로바 저항은 SUS 304를 사용하여 다음의 조건으로 제작 하였다.

- 저항값 : 20mΩ
- 용량 : 60kA,
- 정격전압 : 11kV
- 펄스폭 : 500μs
- 허용온도 상승 : 50℃

j : 전류 밀도

k : 온도계수

τ : 펄스폭

ΔT : 온도 상승 허용치

ρ_e : 에너지

ρ_m : 질량

C_p : 비열

$$k = \frac{\rho_e}{2C_p \rho_m} = 1.068 \times 10^{-13}$$

저항체의 허용온도를 50℃로 볼때,

$\Delta T = k j^2 \tau = 50^\circ\text{C}$, 한편 펄스의 폭이 500μs일때의 전류밀도를 구

하면, $\therefore j^2 \tau = \frac{50}{1.068 \times 10^{-13}} = 4.69 \times 10^{14}$ ($\tau = 500\mu\text{s}$)

$$j = \sqrt{\frac{4.69 \times 10^{14}}{500 \times 10^{-6}}} = 9.61 \times 10^8 \text{ (A/m}^2\text{)} = 960 \text{ (A/mm}^2\text{)}$$

도체의 허용온도가 50℃일때의 전류 밀도는 960[A/mm²]가 된다. 제작하고자 하는 저항체의 사양이 다음과 같을때, 50kJ, 22kV, 500μs, (?)A ⇒ 60kA 저항체의 도체 단면적은 다음과 같이 구해진다.

$$A = \frac{60000}{960} = 62.5 \text{ (mm}^2\text{)} \text{ [SUS뚜껑 1mm, 폭 62.5mm이면 된다]}$$

필요한 저항기의 저항치는 20mΩ이므로 저항을 구하는 공식에

의해 다음과 같이 된다.

$$R = 7.2 \times 10^{-7} \times \frac{\ell}{62.5 \times 10^{-6}}$$

$$\Rightarrow \ell = \frac{20 \times 10^{-3} \times (62.5 \times 10^{-6})}{7.2 \times 10^{-7}} = 1.74 \text{ (m)}$$

따라서, 뚜껑 1mm, 폭 62.5mm의 저항판을 사용 시, 28회 구부러서 제작하였다. 제작한 저항기는 그림 3에서 처럼 양쪽끝 부분을 처리하여 적절한 압력을 가하여 고정하였다.

3. 파형 성형용 인덕터의 제작 및 실험

필요한 펄스전류 파형을 제어하기 위해서는 회로상에 인덕터를 설치하여 파형을 조절할 수가 있다. 이 인덕터는 내부저항값이 작아야 하고, 인덕터에서 발생되는 자장이 적어야만 시스템의 각 구성품에 영향을 미치지 않는다. 그래서 인덕터의 구조를 트로이달 형으로 제작을 하였다. 인덕터 내부자속이 밖으로 나오지 못하게 차폐를 할수도 있으나, 인덕턴스값의 감소를 가져 올수가 있다. 그래서 인덕터의 내부 자속이 밖으로 나오는것을 막을수 있는 구조가 트로이달형 이다. 그러나 트로이달형은 제작의 어려움이 있다. 제작상에서 절연문제, 전류가 흐를때의 권선간의 응력과 전류 인입 터미널 부분에 작용하는 힘이 인덕터의 손상을 가져올수가 있다.

3.1 트로이달형의 인덕터 계산

코일내에 전류가 흐르고 이에 따라 자속Φ가 발생하는 회로에서 발생하는 기전력 $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 또는 $e = -L \frac{di}{dt}$ 그러므로

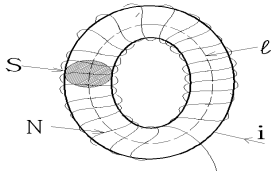
$$L = N \frac{d\Phi}{di} \quad \text{에서} \quad Li = N\Phi, \text{ 이 회로에서 } \Phi \text{를 발생시키는 자계}$$

$$H = \frac{\Phi}{\ell} (AT/m), (\ell: \text{평균자로}[m])$$

$$\Phi = B \cdot S (B: \text{자속밀도}[WB/m^2], s: \text{자로의 단면적}[m^2])$$

$$B = \mu H (\mu: \text{투자율}[H/m]) \text{에서 인덕턴스 } L = \frac{\mu S N^2}{\ell} (H) \text{의 수식을 얻}$$

는다. 여기서 $\mu = \mu_0 \mu_s (\mu_0: \text{진공투자율}[H/m] = 4\pi \times 10^{-3}, \mu_s: \text{자성체의 비투자율}$ 이므로 $L = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\mu_s N^2}{\ell} (H)$ 가 된다.



<그림 2> 트로이달형 인덕터

이식에서 알수 있는 바와같이 자성체에 감은 인덕턴스는 권선수의 자속에 비례하고 자성체의 비투자율에 비례하여 증가한다. 따라서 권선수 N, 은 직접 알수 있는 것이고, 비투자율 μ_s 는 자성체의 catalogue에서 또 평균자로 ℓ 은 실측하면 L은 계산될 수 있으나 실제로는 이론식 되로는 되지 않아서 일단 적당한 권선수로 감은후에 LCR 메타로 측정후 $\frac{L}{N^2} = \frac{L_x}{N_x^2}$ 에 따라 필요한

L_x 의 N_x 를 구하여 감으면 된다. 그림 4와 같이 실험에 사용한 인덕터는 KIV전선 60mm를 24회 권선을 하여 제작 하였으며 LCR 메타로 측정한 인덕턴스 값은 20uH이었다.

3.2 자장의 세기 측정 센서

인덕터에 가해지는 펄스 전류에 의한 자장의 세기를 측정하기 위해서 주파수특성이 빠른 센서를 이용하여 측정을 하여야 한다. 이러한 센서의 종류로는 홀 효과를 이용한 홀 센서, 양자화 효과를 이용한 SQUID센서, 자화곡선의 포화영역을 이용한 Fluxgata형 센서 등이 있다.

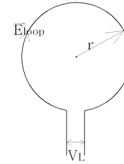
본고에서는 에나멜선을 이용한 링센서를 제작하여 실험을 하였다. $\phi 3.2$ 에나멜동선을 지름 90mm의 원주형으로 제작하였으며, 동축케이블은 RG58을 사용하였는데, 동축케이블에는 페라이트코어를 끼워 넣어서 반사파를 제거하도록 설치 하였다.



<그림 3> 제작된 CPPS의 모습

그림 4에서 자계 센서 원호를 따라 걸리는 전계를 E_{loop} 라 하고, 반지름 r 의 원호를 따라서 걸리는 전압을 V_L 이라 할때 센서의 원호를 따라서 걸리는 전계 E_{loop} 는 다음과 같이 공식을 전개 할 수가 있다.

$$\text{센서의 단면적 } A = \pi r^2 \quad \text{센서의 단자 전압을 } V_L = \oint E_{loop} \cdot dl = 2\pi r \cdot E_{loop} \quad \text{센서의 원호에 걸리는 전계는 } E_{loop} = \frac{V_L}{2\pi r} \text{가 된다. } E_{loop} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(BA)}{dt} = -A \frac{dB}{dt}$$



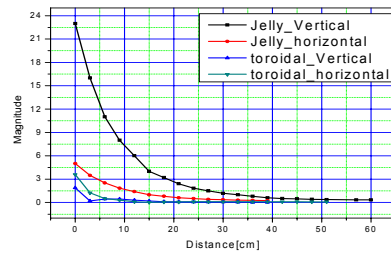
<그림 4> 자장 센서의 모형

$$B = \frac{1}{A} \int E_{loop} \cdot dt \approx \frac{E_{loop} \cdot \tau}{\pi r^2} = \frac{V_L \cdot \tau}{2\pi^2 r^3} \quad \text{고로 } H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{V_L \cdot \tau}{2\pi^2 \mu_0 r^3}$$

에 의하여 자장의 세기를 구할수 있다.

3.3 실험

젤리롤형 인덕터와 트로이달형 인덕터를 직렬 연결하여 제작된 CPPS를 이용하여 펄스 전류20kA를 인가 하였다. 그리고 각각의 인덕터에 직각방향으로 수직과 수평위치에 센서를 설치하고 인덕터에서 거리를 변화시키면서 측정한 결과가 그림 5이다.



<그림 5> 각 인덕터에서 측정된 거리별 자장의 세기

실험 결과 트로이달형 인덕터는 젤리롤형에 비해 현저히 자장이 낮음을 알수 가 있다. 이것은 트로이달형 인덕터는 구조상 자속이 밖으로 빠져 나오지 않음을 의미 한다. 자장의 영향을 줄일수 있는 구조의 인덕터는 트로이달형으로 제작을 하여 사용하면 펄스파워 장치에 자장의 영향을 줄일수가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고집적화한 펄스 파워 시스템 제작에 관련한 방법을 제시 하였으며, CPPS에 사용할수 있도록한 트로이달형 인덕터에 관해, 제작과 실험을 하였다.

실험 결과 일반적으로 사용되었던 젤리롤형 인덕터가 트로이달형 인덕터보다 외부로 발생되는 자장의 세기가 5배 정도 높음을 알수 있었다.

트로이달형 인덕터를 사용하면 펄스파워 시스템을 소형화 하는데 효과적으로 이용할 수가 있다.

[참 고 문 헌]

[1] Jin Sung Kim*, Sung Ho Kim, Kyung Seung Yang, Young Hyun Lee, Jong Soo Kim**, Young Bae Kim
*Agency for Defense Development, **Korea Electrotechnology Research Institute, "Development of 100's MW Compact Capacitive Pulsed Power Supply", 2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2007. 7. 18 - 20

[2] J. W. Jung, Y. H. Lee, K.S. Yang, J. S. Kim, J. H. Chu, "Overview of ETC Technology in Korea", IEEE Trans. on Magnetics, Jan. 2001, pp.39-41

[3] G. Y. Sung, J. S. Kim, J. H. Chu, J. W. Jung, "Development of 2.4-MJ Capacitor Bank for Electrothermal Propulsion Technology", IEEE Trans. on PLASMA SCIENCE, Vol. 30, No. 5, Oct. 2002, pp.1789-1792