

대전류 펄스 성형을 위한 젤리롤형 인덕터의 제작과 특성분석

김영배*, 김종수*, 진윤식*, 류홍제*, 김진성**, 이병하**
 한국전기연구원*, 국방과학연구소**

Fabrication and testing of jelly-roll type inductor for high current pulse forming

Young Bae Kim*, Jong Soo Kim*, Yun Sik Jin*, Hong Je Ryu*, Jin Sung Kim**, Byung Ha Lee**
 Korea Electrotechnology Research Institute*, Agency for Defense Development**

Abstract - 펄스파워 전원장치에서 전류펄스 파형을 성형하기 위해 인덕터를 이용한다. 이 인덕터는 고주파용이므로 철심(core)이 없는 공심이어야 하며, 또한 표피효과(skin effect)로 인한 저항손실의 영향을 줄일 수 있는 구조로 제작되어야 한다. 표피효과를 줄이기 위해서, 인덕터는 권선의 동판을 3장 겹쳐서 나선형으로 감은 젤리롤(jelly roll)형으로 제작하였고, 실험을 통하여 인덕터 스과과 저항값을 측정된 결과를 소개 하고자 한다.

1. 서 론

현재 국내의 펄스파워 전원 기술은 안정화 단계에 와 있으며, 많은 응용분야에 적용되어 실제 상용제품들이 많이 나오고 있다. 군수분야의 전열추진기술, 레일건, 코일건등에 적용되고 있으며, 민수분야에서는 파압장비, 수처리 발라스터 장비, 또한 의료분야에서는 초음파 쇄석기등에 이용 되고 있다.

본 연구에서는 이들 장치들에 사용되는 구성품들(thyristor, blocking diode, crowbar diode, dump 저항, inductor 등)중에서 파형을 성형(forming)하는 역할을 하는 고전압 대전류용 인덕터에 대한 제작기술과 인덕턴스와 내부저항의 특성치들을 실험을 통해서 구하는 과정을 소개 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 펄스 성형용 인덕터의 종류

전류펄스의 파형 성형 제어를 위해서는 단위 커패시터 뱅크마다 인덕터가 필요하다. 인덕터의 종류로는 solenoid형, toroidal형, jelly roll형 등이 있다. 순수한 인덕턴스분만 존재하고 내부 저항이 적어야만 펄스전원 장치의 효율을 높일 수 있다. 인덕터의 내부 저항이 크면 주울(joule)가열에 의해 인덕터 손실로서 작용한다. 주울열로 인한 열손실을 최소화하기 위해서는 인덕터 도체의 단면적을 크게 하면 되지만 표피효과(skin effect)에 의한 저항손실 때문에 도체의 단면적을 무한정 크게 할 수는 없다. 표피효과를 줄이기 위한 방법으로 도체를 얇은 동판을 여러장 겹치고 도체와 도체 사이에는 절연지를 삽입하여 제작한다. 이러한 방법으로 제작이 가능한 인덕터가 젤리롤형이다.

2.2 인덕터 제작시의 도체 단면적 결정

인덕터의 도체 단면적을 계산으로 구한다면, 구형과 단펄스 전류 I [kA]를 흘릴 때 주어진 펄스폭과 온도상승을 파라메타로 하여 대전류 통전 도체의 최소 단면적을 결정하기 위하여 아래의 식 (1)이 사용된다. 또한 제작시에 기계적 강도를 고려하여 인덕터 외부에 FRP 절연 보강재로 둘러싸면 열의 발산이 매우 어려워지므로 1회의 통전전류 75[kA], 펄스폭 500[μs]에서 온도상승을 5[°C]로 제한할 경우 도체의 단면적은 아래의 식 (1)을 이용하여 결정할 수가 있다.

$$A[mm^2] = kI [kA] \sqrt{\frac{\text{펄스폭}[\mu s]}{\text{온도상승}[°K]}} \quad (1)$$

A : 도체의 단면적
 k : 열전도계수
 구리: 0.0703
 알루미늄 : 0.126
 황동 : 0.14

공식(1)은 단발로 발생하는 펄스 반복 주기가 적어도 10분 이상인 경우에 적용 가능한 실험공식으로 원하는 온도를 40[°C] 정도를 적용하면 아주 정확하게 잘 맞는다. 인덕터의 크기를 줄이기 위하여 온도상승을 70[°C] 정도까지 허용하면 인덕터의 크기를 소형으로 제작하는 것이 가능하다.

2.3 표피효과에 의한 skin depth

도체의 단면적에 직류전류가 통과하면 같은 전류밀도로 흐르지만 주파수 성분이 있는 전류가 흐르면(교류의 경우 주파수가 증가하면), 도체내의 중심부로 들어갈수록 자속 쇄교수가 커져서 인덕턴스가 증대되므로 중심부에는 전류가 잘 흐르지 못하고 표면으로 주로 흐르게 되어 (인덕터 제거)도체의 외측 부근의 전류밀도가 증가한다.

skin effect에 의한 skin depth는 아래의 식 (2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{1}{(\pi f \mu \sigma)^{1/2}} \quad (2)$$

f = frequency (Hz)

μ = Permeability (H/m), Copper μ=1.256x10⁻⁶ (H/m)

σ = Conductivity 1/(Ωm), Copper σ=5.8x10⁷ 1/(Ωm)

인덕터의 도체가 구리인 경우 식(2)를 정리하면 식(3)과 같이 된다.

$$\delta = \frac{66}{\sqrt{f}} [mm] \quad (3)$$

주파수를 약 10[kHz]이라고 하면, 인덕터 제작시의 표피효과에 의한 skin depth는 0.66[mm]가 된다.

2.4 인덕터 제작

펄스파워용 인덕터는 표피효과로 인하여 내부 저항값이 많이 증가한다. 이 내부저항 증가는 인덕터의 손실로 작용하여 펄스파워 전원장치의 효율을 저하시키므로, 인덕터의 제작시에는 동판을 여러장 겹치고 각 동판사이에는 절연지를 끼워서 권선을 하는 방법을 사용하면 인덕터의 내부 저항을 줄일 수 있다. 또한 이 표피효과는 인덕터에 인가되는 펄스파형의 기립시간(rise time)과 많은 관계가 있다.

실험에 이용된 인덕터는 권선을 동판 3점으로 제작하였고 인덕터에 펄스 전류를 인가하여 내부 저항을 구하기 위한 실험을 하였다. 또한 인덕터 제작에 관련한 구성들은 다음과 같다.

- ① 사용된 절연지
 - 동판과 동판사이 : 0.1[mm]유리섬유 2장
 - 턴과 턴사이 : 0.18[mm] 노맥스 절연지 1장
- ② 권선 : 동판 폭 100[mm], 두께 0.5[mm], 3장 사용
- ③ 턴수 : 15 $\frac{1}{4}$ [턴]
- ④ 사용된 동판의 총 기장 안쪽권선 : 5[m]
 중간권선 : 5.05[m]
 바깥권선 : 5.1[m]
- ⑤ 인출 탭 : 동 부스바 두께 8[mm], 폭 40[mm]

그리고, LCR meter를 이용하여 측정된 인덕턴스와 저항값은 각각 11.34[uH], 4[mΩ](@1kHz), 정밀저항 측정기로 측정된 직류 저항값은 0.56[mΩ]이었다.

2.5 펄스전원장치의 회로구성품의 임피던스 도출

R-L-C가 기본인 펄스전원장치의 회로에서 각 구성품들의 기생 성분을 고려하여 회로도들 그려보면 그림 1과 같다. 전류 경로는 커패시터(C)→스위치(SW)→각구성품 연결용버스(bus)→인덕터(inductor)→커패시터(C)로 흐른다. 인덕터 전류 i(inductor)는 스위치를 흐르는 전류 i(sw)와 같다.

또 그림 1의 회로에서 S/W가 닫힐 때의 전류 경로는 C-S/W-bus-Inductor-C가 되므로 회로전체의 인덕턴스 성분 $L_1 = ESL + L_{SW} + L_{bus} + L_{inductor}$ 과 회로전체의 저항 성분

$R_1 = ESR + R_{SW} + R_{bus} + R_{inductor}$ 을 고려하여 그림 1의 등가회로를 그리면 그림 2와 같이 된다. 여기에서 ESR(Equivalent Series Resistance)은 커패시터의 내부 저항성분이고, ESL(Equivalent Series Inductance)은 커패시터의 내부 인덕턴스이다.

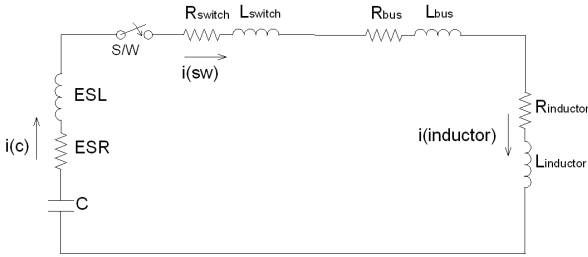


그림 1 기생 성분을 고려한 시스템 회로도
Fig.1 System circuit diagram including stray components

그림 2에서 $t = 0$ 에서 S/W가 닫힌다고 가정하여 키르히호프의 전압 법칙을 적용하면 아래의 (4), (5)식과 같은 회로 방정식을 구할 수 있다.

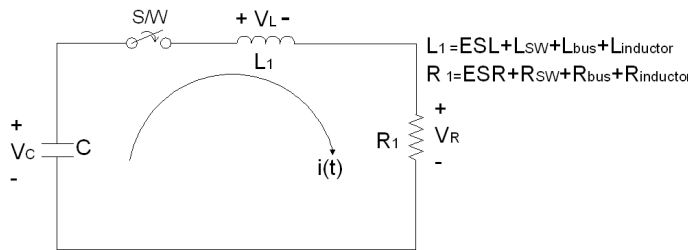


그림 2 그림 1의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of Fig. 1

$$V_C + V_L + V_R = 0 \quad (4)$$

$$\frac{1}{C} \int_0^t i dt + V_C(0_-) + L_1 \frac{di}{dt} + R_1 i = 0 \quad (5)$$

초기 조건은 $V_C(0_-) = -V_0$, $I(0) = 0$ 로 둘 수 있고, 스위치의 정류기능(다이오드 기능)에 의해 $\frac{T}{2}$ 이후의 전류의 흐름이 영으로 됨을 고려하면, 식(4), (5)로부터 회로의 전류 및 커패시터 전압은 각각 식(6)과 같이 된다.

$$i(t) = \begin{cases} \frac{V_0}{\omega L_1} e^{-\alpha t} \sin \omega t & (0 \leq t < \frac{T}{2}) \\ 0 & (t \geq \frac{T}{2}) \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{R_1}{2L_1}, \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = \frac{2\pi}{T}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \tan \theta = -\frac{\alpha}{\omega} \quad (7)$$

커패시터의 커패시턴스는 제품의 규격치 또는 LCR메타의 실측에 의해서 결정 된다. L_1 , R_1 은 전류 또는 전압 파형의 감쇠율로부터 구할 수 있다. 감쇠율 α 는 전류가 $\frac{T}{2}$ 이후에서는 역으로 흐르기 때문에 전류 파형으로부터는 구할 수 없으므로 반주기 동안의 커패시터 전압의 파형을 이용하여 구할 수 있다. $t=0$ 와 $t = \frac{T}{2}$ 에서의 커패시터 전압은 (8), (9)와 같다.

$$V_C(0) = V_0 \frac{\omega_0}{\omega} \cos \theta = V_0 \quad (8)$$

$$V_C(\frac{T}{2}) = V_R \quad (9)$$

$$= V_0 \cdot \frac{\omega_0}{\omega} \cdot e^{-\alpha \frac{T}{2}} \cdot \cos(\omega \frac{T}{2} + \theta)$$

$$= -V_0 \cdot \frac{\omega_0}{\omega} \cdot e^{-\alpha \frac{T}{2}} \cdot \cos \theta$$

$$= -V_0 \cdot e^{-\alpha \frac{T}{2}}$$

식(8), (9)으로부터 감쇠율 α 를 식(10)과 같이 결정할 수 있다.

$$\alpha = \frac{2}{T} \cdot \ln \left| \frac{V_0}{V_R} \right| \quad (10)$$

감쇠율 α , 주기 T , R_1 및 L_1 의 관계는 다음 식과 같이 표현 된다. 따라서 그림 2의 회로정수 R_1 , L_1 은 실험을 통하여 얻어진 전압, 전류 파형을 이용하여 결정 할 수 있다.

$$L_1 = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{\omega^2 + \alpha^2} = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{(\frac{2\pi}{T})^2 + \alpha^2} \quad (11)$$

$$R_1 = 2\alpha L_1 = \frac{1}{C} \cdot \frac{2\alpha}{(\frac{2\pi}{T})^2 + \alpha^2} \quad (12)$$

측정된 전압, 전류 파형으로부터 감쇠주기 및 감쇠율을 구하고, 실측이 어려운 회로의 저항 및 인덕턴스 값은 계산한다. 따라서

전압, 전류 실험 파형으로부터 반주기 $\frac{T}{2}$, 커패시터 충전전압 V_0 및 커패시터에 걸리는 역전압 V_{PI} 를 결정한 후 식 (10), (11), (12)를 이용하여 감쇠율 α , 회로저항 R_1 및 회로 인덕턴스 L_1 을 구하면 된다.

2.6 실험조건변 결과

실험에 사용된 펄스전원장치의 구성품들중 커패시터의 커패시턴스는 206 μ F이며, 스위치는 TVS 35 모델을 사용했다. 실험회로는 그림 1과 같이 결선하여 커패시터에 충전전압을 3, 5kV로 충전을 하여, 인덕터를 설치하였을 때와 제거한 상태일 경우의 실험결과를 이용하여 제작한 인덕터의 인덕턴스와 저항치를 구한 결과를 표 1에 요약하였다.

<표 1> 실험 결과

<Table. 1> Experiment results

순번	실험조건		실험결과				인덕턴스-저항	
	충전전압 [kV]	TVS 제작한 인덕터	첨두 전류	충전 전압 V_0	전압파형 반주기 ($T/2$)	첨두 역전압 (vp1)		
①	3	유	무	37.6kA	3220	44.8 μ s	-2220	0.974 μ H-16.2m Ω
②	5	유	무	68.8kA	5240	44.8 μ s	-3880	0.978 μ H-13.1m Ω
③	3	유	유	11.6kA	3180	159.2 μ s	-2780	12.4 μ H-21.0m Ω
④	5	유	유	19.6kA	3180	160.0 μ s	-4760	12.4 μ H-15.1m Ω

표 1에서 충전전압 3[kV]일 경우 순번③-순번①=4.8[m Ω] 11.42[μ H], 충전전압5[kV]일 경우 순번④-순번②=2[m Ω] 11.42[μ H] 값이 인덕터의 인덕턴스와 저항값에 해당한다. 충전전압이 3[kV]와 5[kV]일 때의 값이 차이가 나는 것은 오실로스코프에서 읽은 값의 오차라고 생각된다. 이와 같이 하여 인덕터의 인덕턴스와 저항값을 실험적으로 구할 수가 있는데 이때의 값들은 인덕터에 펄스전류가 흐를때의 값이므로 아주 중요한 요소가 된다. 또한 pspice등을 이용한 모사 실험치와 비교 한다면 같은 값이 나오는 것을 알 수 있다

3 결 론

펄스파워용 전원장치에 이용되는 인덕터의 실험 결과에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 인덕턴스 : LCR 메타로 측정된 값과 실험치가 일치 한다.
- 저항 : LCR 메타로 측정된 값과 실험치는 거의 일치 하지만, 직류 정밀 저항측정기로 측정된 값과는 큰 차이가 난다. 이러한 저항값의 차이는 표피효과와 의한 것으로 추정된다.

[참 고 문 헌]

[1] 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***, "고집적 펄스파워용 인덕터의 설계 및 제작 실험" 2008년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2008. 7. 16 - 18

[2] Jin Sung Kim*, Sung Ho Kim, Kyung Seoung 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