

10/350 μ s 전류파형을 형성하기 위한 대용량 인덕터 특성

(Characteristics of High Energy Inductor to Generate Current Waveform of 10/350 μ s)

이태형 · 조성철 · 엄주홍 · 김기복
 (Tae-Hyung Lee · Sung-Chul Cho · Ju-hong Eom · Ki-Bok Kim)

Abstract

This paper presents the characteristics of external inductor for impulse current waveform with 10/350 μ s time parameters. Impulse generator was composed with capacitor having large capacitance and low working voltage for the safe of operator and small discharging sound. Parallel R-L-C circuits with crow-bar gaps and superposition method were proposed to make a high current lightning impulse according to IEC 62305-1. The high energy inductor with several taps for fitting half decay time T2 within the tolerance range and experimental data of inductance according to charging voltages were suggested.

1. 서 론

최근 유럽을 주축으로 하는 선진 기술국에서 IEC 표준에 대용량의 단시간 뇌격전류 시험기준을 피뢰피벨(LPL) 또는 보호기 상위 등급(Class I)에 적용하게 됨에 따라 국내에도 관련기업 및 대학에서 관련 시험 및 연구가 필요한 실정이다. 10/350 μ s 대전류 임펄스는 최근 국제적으로 주목을 받고 있는 외부 피뢰를 위한 뇌격전류 파형의 한 형태로 시험전류의 용량이 지속적으로 증가하고 있으며 피뢰침, 피뢰기구, SPD, Arrester 등의 시험에 의무적으로 적용하도록 하는 사례가 늘고 있다. 유럽이나 일본에서는 이미 IEC 표준에 적합한 10/350 μ s 단시간 뇌격전류파형 발생기를 보유하고 있으나 국내에 이미 IEC 62305 표준이 KS 표준으로 도입되었으나 관련 표준을 만족하는 뇌격전류 시험설비가 국내에 도입이 되지 않고 있다. 그러므로 국내 기술표준은 해외 선진기술 표준과 동일하나 이들을 시험하고 연구할 수 있는 시험설비의 부재, 관련 기술의 현격한 차이로 도입된 KS 표준의 적용이나 확대시행에 난항을 겪고 있다.

특히 IEC 62305 표준에서는 LPL(lightning protection level)에 따라 최대 100 ~ 200 kA의 10/350 μ s 임펄스 전류가 사용된다. 이 파형은 wave tail이 기존의 임펄스 전류에 비해 길고 전류피크(peak)가 커서 큰 용량의 회로요소를 요구한다. 하지만 해외의 밴더의 시스템을 국내에 도입하기에는 시스템 자체가 워낙 고가이므로 국내에서 비교적 적은 비용으로 IEC 표준에 맞는 시스템을 개발할 필요가 있다. IEC 62305 표준에서는 350 μ s의 wave-tail 형성을 위해 크로바 스위치(crowbar

switch) 및 대용량 인덕터를 사용하도록 규정하고 있으므로 표준이 요구하는 형태의 대용량 인덕터 개발이 필요하다.

2. 본 론

2.1 10/350 μ s 단시간 뇌격전류 파형 발생기의 설계

IEC 62305 표준에서 제시한 단시간 뇌격전류 발생장치의 기본회로도를 이용한 10/350 μ s 파형 발생장치의 회로도는 그림 1과 같다[1].

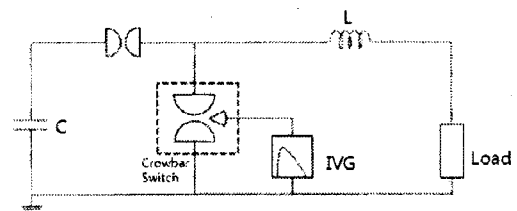


그림 1. 10/350 μ s 파형발생장치 개략도
 Fig. 1. Schematic of a 10/350 μ s impulse generator with crowbar switch

연구 목표인 LPL III 단계인 100 kA의 10/350 μ s 단시간 뇌격전류 발생기를 설계하기 위해 각 회로요소에 대한 파라미터를 결정한다. 우선 국내에서 제작가능한 캐패시터로서 40 kV 충전전압을 갖는 11 μ F 용량의 캐패시터를 기준으로 설계하였다. 캐패시터의 충전전압과 용량이 100 kA의 뇌격전류를 발생시키기에는 부족하기 때문에 최대 100 kA의 임펄스 전류파형을 만들기 위해서는 기본회로만으로 설계하기가 매우 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 ICG(Impulse Current Generator) 회로와 Crow-bar switch를 이용한 기본회

로를 병렬 중첩회로로 적용하였다. 그림 2에 병렬 중첩 회로도도를 나타내었다.

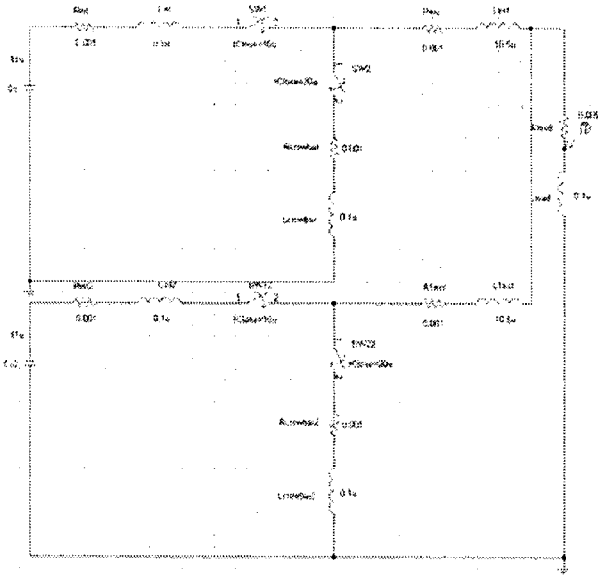


그림 2. 10/350 μ s 전류파형 발생을 위한 회로
Fig. 2. Circuit for generating the 10/350 μ s waveform

최대 40 kV를 충전하였을 때 100 kA의 단시간 뇌격 전류 파형을 얻기 위해서는 약 3개의 병렬 중첩 회로가 필요한 것으로 분석되었다. 이를 실제로 구현하기 위해서 우선 2개의 병렬 회로를 구성하여 실제 회로에서도 모의했던 회로중첩이 실제의 대전류 회로에서 적용되는 지 여부를 확인할 필요가 있다. 이러한 문제를 해결할 수 있다면 고가의 높은 사용전압을 대용량의 캐패시터를 사용하지 않고서도 IEC 표준에 적합한 대전류 임펄스를 발생시킬 수 있어 매우 경제적이다.

우선 2개의 병렬 회로일 때 최대 70 kA의 전류피크를 모의하여 시뮬레이션 하였으며 이때 회로의 전류파형에 영향을 크게 미치는 회로요소로는 대용량 인덕터 (L_{ext})의 인덕턴스와 부하에 위치하게 될 SPD의 내부임피던스이다. 인덕터의 인덕턴스는 설계가 가능하지만 SPD의 내부저항은 시험시료에 따라 다르므로 일정한 값을 정해서 설계하기가 어렵다. 하지만 경험적인 값으로 SPD 한 개가 동작할 때의 내부저항은 일반적으로 약 30 m Ω 정도이다. 이를 기준으로 하여 설계에 반영하였다. 최대 100 kA의 뇌격전류를 가정할 때 이 용량의 SPD는 대개 4~8개의 SPD 병렬 조합이 사용된다. 그렇다면 이 때의 저항은 7.5 ~ 3.75 m Ω 로서 평균값으로 약 5 m Ω 을 기준으로 설계하였다.

충전전압이 최대인 40 kV이고 부하저항이 0.005 Ω 인 경우 인덕터의 인덕턴스에 따른 전류피크와 wavetail의 파미시간(T2)의 그래프를 그림 3에 나타내었다.

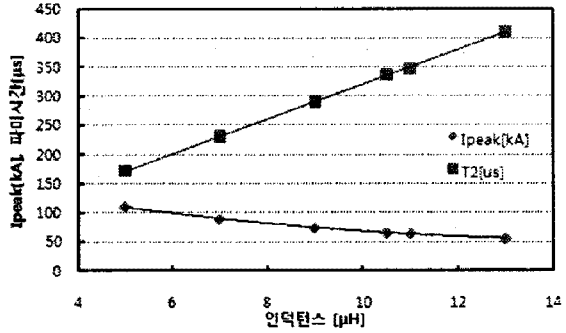


그림 3. 인덕턴스에 따른 전류피크와 파미시간(T2)
Fig. 3. Current peak value and half decay time(T2) according to inductance

그림 3에서 인덕턴스가 11 μ H일 때 전류피크가 약 64 kA이고 파미시간이 346 μ s로 모의되었다. 이 때의 전류파형을 그림 4에 나타내었다.

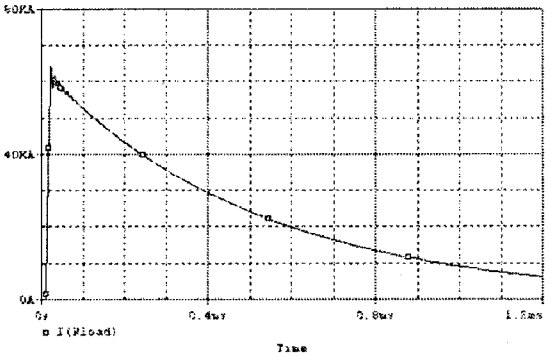


그림 4. 중첩회로를 이용한 10/350 μ s 전류 임펄스 모의 파형
Fig. 4. Simulated waveform of an impulse current with superposition circuit for 10/350 μ s waveform

이를 적용하여 인덕터가 11 μ H인 경우 충전전압에 따른 전류피크와 파미시간과의 관계는 그림 5와 같다.

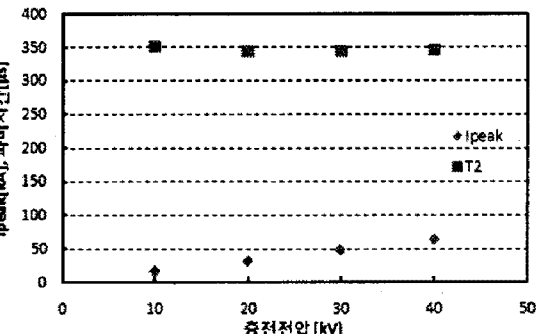


그림 5. 캐패시터 충전전압에 따른 전류임펄스 파형의 피크와 파미시간
Fig. 5. Current peak value and half decay time as charging voltage of capacitor bank

2.2 cylinder형 인덕터의 근사적 인덕턴스 계산
위 결과를 바탕으로 인덕터를 설계하기 위해 인덕턴스 계산식 중에서 본 연구에서는 아래의 Wheeler

formula를 이용하여 cylinder형 인덕터를 설계하였다. Wheeler식은 간단한 식이지만 $l/d \geq 0.4$ 인 경우에 $\pm 0.33\%$ 의 오차를 갖는다[2][3].

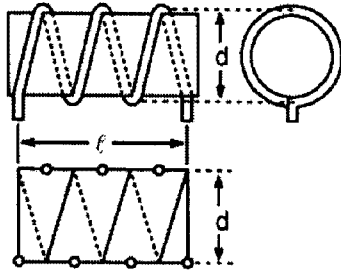


그림 6. cylinder형 인덕터의 구조
Fig. 6. Structure of a cylindrical inductor

그림 6은 계산하고자 하는 cylinder형 인덕터를 나타내며, 보빈의 직경 d 와 감긴 도체의 길이 l , 감긴 횟수 n 등을 나타낸다. 이들 파라미터를 사용하여 인덕턴스를 계산하기 위해 Wheeler는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$L = \frac{d^2 n^2}{l + 0.45d} \quad (1)$$

표 1. 인덕터 설계사양
Table 1. Design specifications of an external inductor

설계 인덕턴스	11 μ H
보빈 길이	1 m
보빈 직경	250 mm

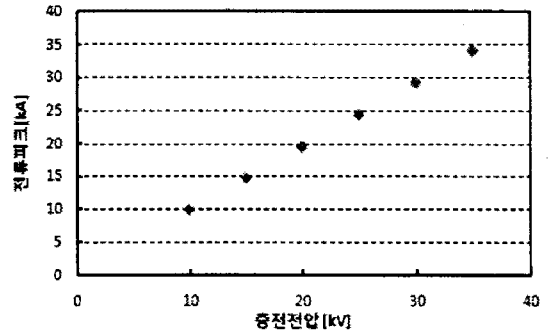
표 1에서 보는바와 같이 보빈의 길이는 1 m, 직경이 250 mm인 원통형으로 정하고 식(1)을 아래의 식(2)로 전개하여 감을 횟수를 구할 수 있다. 식을 풀면 약 13.1 회 감았을 경우에 11 μ H 값을 얻을 수 있으며 이 값을 기초로 인덕터를 제작하였다.

$$n = \sqrt{\frac{L(l + 0.45d)}{d^2}} \quad (2)$$

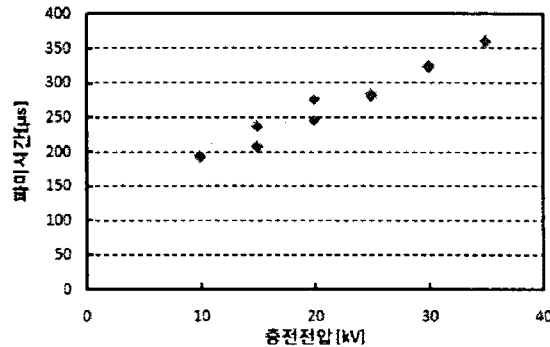
2.3 대용량 인덕터의 실제 특성 실험

실제 인덕터 코일을 사용하여 10/350 μ s 1단 발생회로를 구성하고 인덕턴스에 충전전압에 따른 전류피크와 파미시간을 분석한 결과는 다음과 같다.

그림 7에서 충전용 캐패시터(Cs)는 20 μ F이고 외부 인덕터의 용량은 약 5.5 μ H인 경우에 충전전압을 10 kV에서 40 kV까지 증가시킬 때 측정된 전류피크와 파미시간은 모두 충전전압에 따라 증가하는 특성을 나타내었다.



(a) 전류피크



(b) 파미시간

그림 7. 캐패시터의 충전전압에 따른 전류 임펄스 파형의 전류피크와 파미시간

Fig. 7. Measured current peak value and half decay time of current impulse as a function of charging voltage of capacitor bank

앞서 모의한 그림 5의 결과에서는 충전전압에 따라 전류피크는 선형적으로 증가하였으나 파미시간은 거의 변하지 않은 것으로 나타났으나 그림 7의 실제 측정 결과에서는 파미시간이 충전전압이 증가할수록 선형적으로 증가하기 때문에 실제 인덕터를 제작함에 있어서 캐패시터의 충전전압에 따라 다른 크기의 인덕터를 적용해야 할 필요가 있다.

표 2. 전류피크에 따른 인덕턴스 예
Table 2. Example of inductance according to current peak value

I _{peak} [kA]	inductance [μ H]
28	40.9
5	25.4
8	12.9
20	8.6

표 2에서 충전용 캐패시터(Cs)가 10 μ F일 때 다단탭 인덕터를 사용하여 인덕턴스의 크기에 따른 10/350 μ s 파형의 전류피크를 측정하여 나타내었다. 실제 회로에서는 이와 같이 인덕턴스에 따라 10/350 μ s 파형을 만족하는 전류피크가 존재하므로 표 2와 같이 미리 측정된 값을 알고 있다면 다단탭 인덕터를 이용하여 실험하

고자 하는 전류피크에 대한 인덕턴스를 쉽게 적용할 수 있다.

3. 결 론

낮은 충전전압과 중첩회로를 적용한 대전류 임펄스 발생회로에서 10/350 us 파형을 형성하기 위한 인덕터 특성은 다음과 같다.

P-spice를 통한 모의결과에서 파미시간 T2는 고정된 인덕턴스 값에 대해 충전전압이 증가함에 따라 일정하며 전류의 피크만이 증가한다. 실제 회로구성을 통한 실험결과에서는 모의에서 적용한 인덕턴스에 맞게 설계된 대용량 인덕터에 대해 충전전압이 증가함에 따라 파미시간 T2와 전류피크가 모두 증가하므로 적절한 인덕터 탭을 선택하여 인덕턴스를 변화시키는 방법으로 허용범위 내의 전류파형을 형성할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] IEC 62305, "Protection against lightning - Part 1: General principles", International Electrotechnical Commission, 1st ed. 2006
- [2] Frederick W. Grover, "Inductance Calculations", New York D.Van Nostrand Company Inc. 2nd. Ed. 1947
- [3] Harold A. Wheeler, "Inductance Formulas for Circular and Square Coils" proceeding of the IEEE, vol. 70, No. 12, 1982