

비선형 부하를 고려한 감쇠 진동형 임펄스 전류발생기의 설계 기법

論 文
57-12-20

Optimum Design Methodology of the Damped Oscillatory Impulse Current Generator Considering a Nonlinear Load

張錫勳[†] · 李在福^{*} · S. V. Shenderey^{**} · 明聖鎬^{***} · 趙延奎[§]
(Sug-Hun Chang · Jae-Bok Lee · S. V. Shenderey · Sung-Ho Myung · Yuen-Gue Cho)

Abstract - This paper presents a design parameter calculation methodology and its realization to construction for the damped oscillatory impulse current generator(ICG) modelled as damping factor α . Matlab internal functions, "fzero" and "polyfit" are applied to find α which are solutions of second order nonlinear equation related with three wave parameters T_1 , T_2 and I_{os} . The calculation results for standard impulse current waveforms such as 4/10 μ s, 8/20 μ s and 30/80 μ s show very good accuracy and this results make it possible to extend to generalization in the design of damped oscillatory ICG with any capacitor.

8/20 μ s ICG based on the calculated design circuit parameters is fabricated in consideration of the nonlinear load(MOV) variation. Comparisons of the tested waveforms with the designed estimation show error within 10% for the waveform tolerance recommended in IEC 60060-1 and IEEE std. C62.45.

Key Words : Nonlinear Parameter Estimation, Lightning, Impulse Current Generator, SPD

1. 서 론

뇌임펄스 발생장치는 낙뢰로 인해 발생할 수 있는 뇌 서지 전류에 대해 고압 피뢰기, 저압용 서지보호기, 퓨즈 등 보호기기의 성능 평가에 오랫동안 사용되고 있다.

낙뢰시의 뇌격전류는 최대 수백 kA에 달하지만 상당량의 전류는 뇌격지점의 접지임피던스, 뇌격점에 연결된 도체들로 분류되며, 이중 일부분의 전류만이 보호기기에 흐르게 된다. IEC 60060-1에서는 보호기기인 피뢰기의 운용조건을 모의하기 위해 4/10 μ s, 8/20 μ s, 및 30/80 μ s의 표준 임펄스 전류 파형을 제시하고 있다[1]. 이들 파형은 공통적으로 충전용 커패시터와 방전용 스위치 및 파형 정형을 위한 저항과 인덕터의 직렬조합으로 구성되어 주기적으로 진동하면서 감쇠하는 특징이 있으며, 파두장, 파미장 및 파고치의 오차는 $\pm 10\%$ 이내, 오버슈트는 20% 이내로 제한하고 있다.

감쇠 진동형 임펄스 전류 파형 발생 기법은 오랫동안 연구 개발되어 왔으며, 설계 파라미터의 계산 방법은 Haefly사 Modrusan씨의 정규화 회귀 방정식이나 감쇠정수 대 파형 파라미터 곡선을 활용하여 예측하고 있고 있다[2-6]. 그러나 상기의 방법에서는 시험품인 보호기기의 저항값이 전류의

크기에 따라 변하는 MOV소자를 주소자로 사용하기 때문에 적절한 외부저항기 R값을 선정하는 것이 매우 어렵다. 본 논문에서는 부하의 저항 변화에 따른 파형 파라미터의 변화를 고려하여 ICG의 최적 설계 파라미터 R, L을 산출하였으며, 선정된 C값에 대응하는 최적의 ICG를 구성할 수 있는 설계 계산식을 제시하였다.

2. 회로설계 파라미터 계산

2.1. 회로방정식

뇌임펄스 전류 발생장치는 그림 1과 같이 전위 V_c 로 충전된 커패시터의 전하를 저항(R), 인덕턴스(L)의 직렬회로에 방전하여 파형을 얻는다.

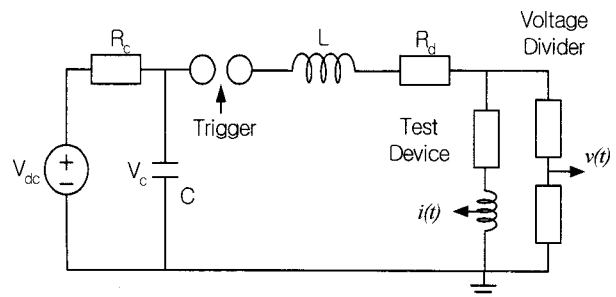


그림 1 임펄스 전류 발생기의 기본 구성
Fig. 1 Basic diagram of impulse generator

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 先任研究員

E-mail : shchang@keri.re.kr

^{*} 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員 · 工博

^{**} 非會員 : 韓國電氣研究院 招聘研究員 · 工博

^{***} 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員 · 工博

[§] 正會員 : 韓國電氣研究院 先任技術員

接受日字 : 2008年 10月 16日

最終完了 : 2008年 11月 19日

방전시 흐르는 전류는 R-L-C 직렬회로의 감쇠비 α 의 대소에 따라 $0 < \alpha < 1$ 인 부족 감쇠의 경우 식(1)과 같은 진동성의 파형이 나타난다.

$$i(t) = \frac{V_c e^{-\alpha \frac{t}{T}}}{\sqrt{1-\alpha^2} Z} \sin(\sqrt{1-\alpha^2} \frac{t}{T}) \quad (1)$$

여기서, $\alpha = R/2Z$, $Z = \sqrt{L/C}$, $T = \sqrt{LC}$ 이다. 진동성 임펄스 파형을 표준으로 한 임펄스 전류파형은 4/10 μs , 8/20 μs 및 30/80 μs 전류파형이 있다. $\zeta > 1$ 인 과감쇠인 경우는

$$i(t) = \frac{V_c e^{-\alpha \frac{t}{T}}}{\sqrt{\alpha^2 - 1} Z} \sinh(\sqrt{\alpha^2 - 1} \frac{t}{T}) \quad (2)$$

로 비진동성의 파형이 나타난다. 비진동성 임펄스 파형을 표준으로 사용하는 파형으로는 1/20 μs , 10/350 μs , 10/700 μs , 10/1000 μs 전류파형 및 1.2/50 μs 전압파형이 있다.

두 경우 $i(t)$ 가 파고치에 이르는 시각 t_m 은 $di(t)/dt = 0$ 의 해로 구해지며 부족감쇠인 경우는

$$t_m = \frac{T}{\sqrt{1-\alpha^2}} \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha}\right) \quad (3)$$

과감쇠인 경우는

$$t_m = \frac{T}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \tanh^{-1}\left(\frac{\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha}\right) \quad (4)$$

가 된다.

2.2 감쇠 진동형 임펄스 전류발생기 설계 파라미터 계산

뇌 임펄스 전류 파형은 그림 2와 같이 최대치의 90% 지점의 시각(t_2)과 10% 지점의 시각(t_1)의 차로 나타내는 상승 시간 t_r 의 1.25배인 파두장(T_1)과 최대치의 이후의 시각에서 최대치의 50% 값에 이르는 시각 t_3 에서 규약원점(t_0)의 차를 나타내는 파미장(T_2)으로 표현한다.

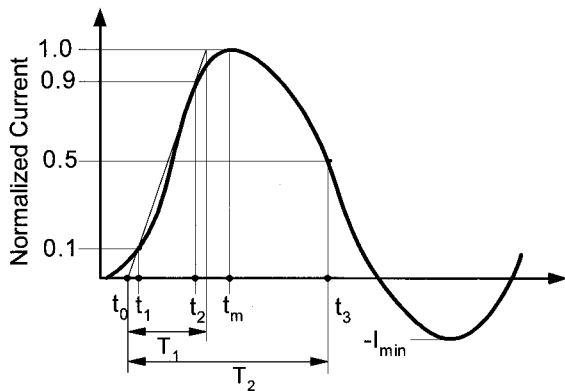


그림 2 임펄스 전류 파형과 정의된 파라미터
Fig. 2 Impulse current waveform and defined parameters

감쇠 진동형 ICG의 회로 방정식 (1)에서 $t_n = t/T$, $d = \sqrt{1-\alpha^2}$ 라 하면

$$I_n = I_m \frac{e^{-\alpha t_n}}{d} \sin(dt_n) \quad (5)$$

여기서, $I_m = V_c/Z$ 이다. 파고치에 이르는 시간은 식 (4)에서

$$t_{mn} = \frac{1}{d} \tanh^{-1}\left(\frac{d}{\alpha}\right) \quad (6)$$

이므로 전류의 최대치 I_{mn}

$$I_{mn} = I_m \frac{e^{-\alpha t_{mn}}}{d} \sin(dt_{mn}) \quad (7)$$

된다. 최소치는 I_{min} 은 식(8)과 같다.

$$I_{min} = I_{max} e^{-\pi\alpha/d} \quad (8)$$

한편 강제진동 각 주파수는 $\omega_d = d/T$ 이므로 오버슈트 바로 전의 반주기 시각 T_d 는 $T_d = 2\pi T/d$ 가 되므로 이를 정규화한 시각 T_{dn} 은 다음과 같다.

$$T_{dn} = 2\pi/d \quad (9)$$

IEC 60060-1 및 IEEE 62.41에 따르면 감쇠 진동형 표준 임펄스 전류 파형에서 오버슈트 $I_{os} = I_{min}/I_{max}$ 을 0.2 이하로 제한하고 있다[8]. 따라서 식(8)에서 이를 만족하는 감쇠계수 α 는 $0.4559 \leq \alpha < 1$ 의 범위에 있다. 식 (7)에서 파고치 계수를 k 라 하면 식(5)와 식(7)은 다음과 같은 등식이 성립된다.

$$e^{-\alpha t_n} \sin(dt_n) = k e^{-\alpha t_{mn}} \sin(dt_{mn}) \quad (10)$$

$k = 0.1, 0.9, 0.5$ 에 해당하는 시각을 t_{n1}, t_{n2}, t_{n3} 하면 각각의 시각은 α 만의 함수이며, 주어진 α 에 대해 비선형 방정식의 근 t_n 을 구하는 문제가 된다. t_n 은 Matlab 내장 함수 fzero를 사용하여 구할 수 있으며 각각의 시각은 그림 2로부터 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$T_{1n} = T_1/T = 1.25 \times (t_{n2} - t_{n1}) \quad (11a)$$

$$T_{2n} = T_2/T = t_{3n} + 0.125(t_{2n} - 9t_{1n}) \quad (11b)$$

파두장, 파미장은 α 만의 함수로 나타낼 수 있으며 α 의 함수로 T_{1n} 와 T_{2n} 를 도시하면 $0.4559 \leq \alpha < 1$ 범위에서 그림 3과 같이 T_{1n} 은 α 에 지수적으로 비례하며, T_{2n} 은 선형적으로 감소하는 경향을 나타낸다.

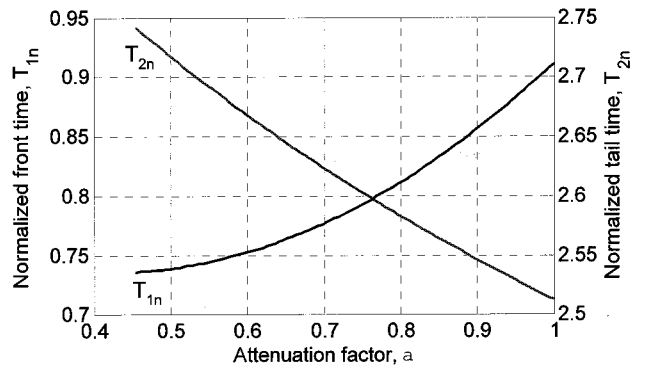


그림 3 감쇠계수에 따른 정규화된 파형 파라미터 T_{1n}, T_{2n} 의 변화

Fig. 3 Normalized waveform parameter T_{1n}, T_{2n} dependency on α

T_{1n}, T_{2n} 를 Matlab 내장함수 “Polyfit”을 이용하여 α 에 대한 2차 다항식으로 표현하면

$$T_{1n}' = 0.203\alpha^2 - 0.7122\alpha + 1.2225 \quad (12a)$$

$$T_{2n}' = 0.5182\alpha^2 - 0.4314\alpha + 2.6249 \quad (12b)$$

$$T_{2n}'/T_{1n}' = 0.8769\alpha^2 + 0.7533\alpha + 2.1722 \quad (12c)$$

로 각각의 회귀방정식 오차 노름(norm)은 0.003, 0.0009 및 0.009로 매우 작다. 따라서 커패시터의 값이 주어지면 T_{1n}' 과 T_{2n}' 으로부터

$$L = \frac{T_1}{CT_{1n}'^2} \quad (13a)$$

또는

$$L = \frac{T_2}{CT_{2n}'^2} \quad (13b)$$

이 되며, R은 식(14)와 같다.

$$R = 2\alpha Z \quad (14)$$

식 (12c)에서 $0.4559 \leq \alpha < 1$ 범위에서 파미장과 파두장의 비는 $2.7 \leq T_2/T_1 < 3.8$ 의 범위이므로 감쇠 계수에 대응하는 T_2/T_1 파형에서만 이론적으로 파형 오차가 0인 L_0, R_0 값을 얻을 수 있다. 예로서 4/10 μs , 8/20 μs 감쇠 진동형 임펄스전류는 $T_2/T_1=2.5$ 인 경우이므로 T_{1n}' 이 기준인 식 (13a)를 적용하면 파형오차가 0인 파두장을 얻을 수 있으며, T_{2n}' 이 기준인 식 (13b)를 적용하면 파형오차가 0인 파미장이 얻어진다. 그림 4는 전류의 상대 오버슈트(I_{os})이 20 %에 해당하는 감쇠정수 $\alpha=0.4559$ 에서 T_{1n}' 을 기준으로 구한 8/20 μs 임펄스전류 발생기의 파형과 설계 파라미터를 나타내고 있다.

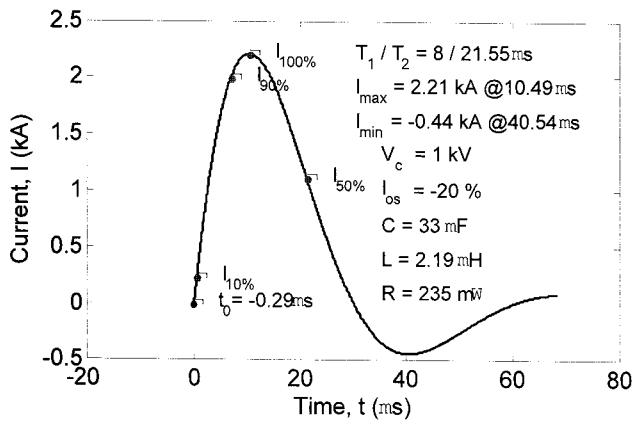


그림 4 $\alpha=0.4559$ 에서 8/20 μs 임펄스발생기의 파형과 설계 파라미터
 Fig. 4 Waveform design parameters of 8/20 μs ICG at $\alpha=0.4559$

파형의 상대오차를 식(15)와 같이 정의하고 파두장과 파미장의 상대오차를 각각 E_{r1}, E_{r2} 라 하여 8/20 μs ICG의 설계 파라미터를 구하면 ICG의 파형은 파두장이 작기 때문에 지정된 파형오차 범위내에서 그림 5에 도시한 것처럼 T_{1n}' 을 기준으로 설계할 때 설계 저항치의 여유가 크게 된다.

$$E_r = \left(\frac{T_n}{T} - 1 \right) \times 100 \quad (\%) \quad (15)$$

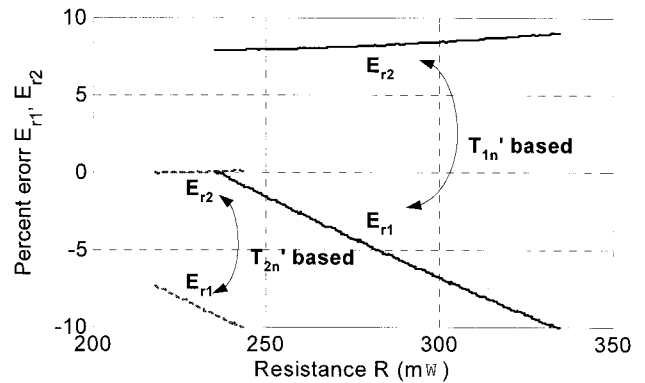


그림 5 8/20 μs ICG의 $C=33\mu F$ 에서 기준 파형 파라미터 T_{1n}', T_{2n}' 에 따른 허용오차내의 사용가능 저항치의 범위 (여기서 $L_{1n}=2.1949\mu H, L_{2n}=1.8848\mu H$ 기준)
 Fig. 5 Available resistance range for two based waveform parameter T_{1n}' and T_{2n}' within the 10% waveshape errors at the $C=33\mu F$ of 8/20 μs ICG.

2.3 감쇠 진동형 임펄스 전류발생기의 일반화 설계

감쇠 진동형 ICG를 효과적이고, 경제적으로 설계하기 위해서는 다음의 몇 가지 설계 범주를 고려해야 한다.

- ① 규정된 파형 허용오차 범위(10 %)내에서 L, R 값이 선정되어야 한다.
 - ② 역 전류로 인한 커패시터의 손손을 방지하기 위해 상대 오버슈트(I_{os})이 20% 이내로 제한되어야 한다.
 - ③ 낮은 충전전압(V_c)으로 높은 출력 전류를 얻을 수 있어야 한다.
 - ④ 시험품인 비선형 저항소자로 인해 더해지는 추가적인 저항값을 고려하여 사용가능한 R의 범위가 넓어야 한다.
- 위에서 ①과 ②조건은 필수조건이며, 이들 조건을 구하기 위해 L과 R을 함수로 8/20 μs 전류파형의 파두장과, 파미장의 상대 파형오차 E_{r1} 과 E_{r2} 를 도시하면 그림 6과 같이 조건 ④를 만족할 수 있는 L값이 정해진다.

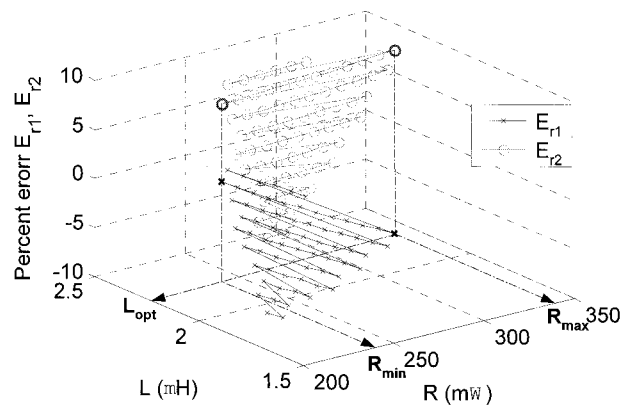


그림 6 $E_r \leq 10\%, I_{os} \leq 20\%$ 조건에서 8/20 μs ICG의 최적 설계 파라미터 L, R
 Fig. 6 Optimum waveshape design parameters of 8/20 μs ICG at $E_r \leq 10\%$ and $I_{os} \leq 20\%$

이 값은 R이 범위가 가장 클 때의 L값에 해당하며, 이 값 L_{opt} 에서의 저항의 최소치(R_{min})와 최대치(R_{max})의 범위가 가장 크게 된다.

표 1은 대표적인 진동성 전류 파형인 4/10 μ s, 8/20 μ s 및 30/80 μ s 파형에 대해 $V_c=1$ kV에서 최적 인덕턴스(L_{opt})와 저항(R_{opt}) 및 계산된 전류파형(T_{1c}/T_{2c}), 최대전류(I_{max}), 오버슈트(I_{os})과 출력전류 10 kA를 얻기 위한 충전전압 크기(V_{c10kA})를 계산한 값으로써 저항(R_{opt})이 R_{min} 과 R_{max} 인 경우에 대해 각각 분석하였으며, 그림 7은 최소저항(R_{min})에서 도시한 전류 파형들이다. 지정된 C값에서 임펄스 발생기를 설계시 최적 인덕턴스와 최소저항으로 회로 파라미터를 제작하고, 시험품의 저항 증가분이 R_{max} 이하이면 규정된 파형의 출력전류를 얻을 수 있다. 표 1은 임의의 커패시터 C_x 로 주어진 경우 3 가지 파형의 감쇠 진동용 ICG 설계하는데 사용할 수 있는 일반화한 파라미터이다. 즉, T가 일정할 때 L과 C는 상호 반비례하고 R은 L에 비례하므로 $k_p = C_x/C$ 라 하면 새로운 L_{opt}' , R_{opt}' 는

$$L_{opt}' = L_{opt}/k_p \tag{16a}$$

$$R_{opt}' = R_{opt}/k_p \tag{16b}$$

$$I_{max}' = I_{max}k_p \tag{16c}$$

$$V_{c10kA}' = V_{c10kA}/k_p \tag{16d}$$

가 되어 전류 파형은 C값과 관계없이 동일하므로 주어진 C값에 대해 최적의 설계 파라미터를 구할 수 있다.

표 1 C = 33 μ F, $V_c=1$ kV 일때, ICG의 최적 설계 파라미터 계산치

Table 1 Calculated optimum waveshape design parameters of ICG at C = 33 μ F, $V_c=1$ kV.

T_1/T_2 (μ s)	L_{opt} (μ H)	R_{opt} (m Ω)	T_{1c}/T_{2c} (μ s)	I_{max} (kA)	I_{os} (%)	V_{c10kA} (kV)
4/10	0.5559	118.60	4.03/10.86	4.39	19.98	2.28
4/10	0.5559	171.40	3.60/10.99	3.65	6.32	2.74
8/20	2.2236	237.30	8.06/21.72	2.19	19.98	4.56
8/20	2.2236	342.70	7.20/21.97	1.83	6.32	5.48
30/80	32.882	910.40	30.99/83.49	0.57	19.99	17.51
30/80	32.882	1411.0	27.01/84.91	0.46	4.33	21.89

2.4 ICG의 잔류 저항과 표유 인덕턴스 결정

임펄스 전류 발생기회로의 구성 요소인 커패시터, 저항, 인덕터, 방전용 스위치 및 이들을 연결하는 접속 리드선에는 필연적으로 잔류 저항과 표유 인덕턴스가 존재한다. 이들 값을 구하기 위해 저항과 인덕터를 단락시킨 후 측정된 전류 파형은 $0 < \alpha < 1$ 인 부족 감쇠의 경우에 속하므로 식 (8)에 나타낸 바와 같이 진동성의 파형이 나타나고 최대치 I_{max} 와 이어서 극성이 반대인 최소치 I_{min} 이 존재한다. 따라서 식 (8)에서 구한 α 를 위의 식(3)에 대입하면 측정된 최대치 I_{max} 와 이때의 시각 t_m , 최소치 I_{min} 및 기지의 C 값으로부터 표유 인덕턴스 L_p 와 잔류 저항 R_p 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

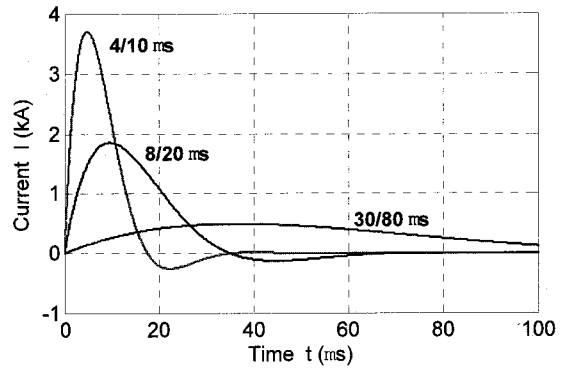


그림 7 C = 33 μ F, $V_c=1$ kV, R_{min} 일때 각종 ICG의 파형
Fig. 7 Calculated waveshape of ICG at C = 33 μ F, $V_c=1$ kV and R_{min} .

$$L_p = \frac{t_m^2 d^2}{C(\tan^{-1}(d/\alpha))^2} \tag{17a}$$

$$R_p = 2\alpha \sqrt{\frac{L_p}{C}} \tag{17b}$$

그림 8은 표유 인덕턴스 L_p 와 잔류 저항 R_p 를 구하기 위해 적렬 외부저항 184m Ω (348 nH) 단자를 단락한 상태에서 8/20 μ s ICG에 사용한 33 μ F 커패시터에 1.5 kV의 전압을 충전후 스위치를 통해 방전했을 때 얻어진 감쇠진동 전류파형이다. 식(17)을 적용하면 표유 인덕턴스 L_p 는 1.563 μ H, 잔류 저항 R_p 는 35 m Ω 이 얻어지며, 측정된 L, R값을 식(1)을 이용하여 계산한 파형과 비교하면 파두부분의 초기상승률이 계산치보다 좀 더 완만한 한 것을 제외하고 두 파형이 거의 일치함을 알 수 있다. 표 2는 ICG 파라미터의 측정치와 계산치를 나타낸 것이다. 파두부분의 초기 상승률이 계산 파형보다 긴 이유는 스위치 동작시에 생기는 아크 인덕턴스에 의한 것으로 추정된다. 표유 인덕턴스는 커패시터의 인덕턴스와 ICG 회로의 배선에 기인한 것이다. 측정된 파형에서 충전전압 V_c 는 식(1)에서 $t=t_m$ 일 때 구해진 전압이며, 실제 인가 전압은 1.5 kV이다. 그림 8에서 파형 파라미터 T_1/T_2 와 I_{os} 는 측정치에서 얻어진 것이다.

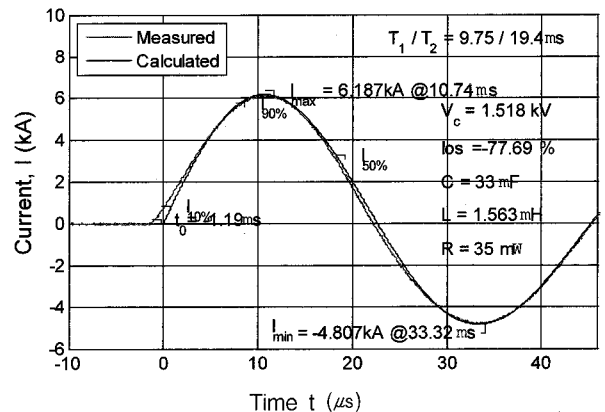


그림 8 표유 인덕턴스와 잔류 저항 계산을 위해 측정된 전류파형
Fig. 8 Measured current waveform for calculation of a parasitic inductance and a residual resistance of ICG

표 2 ICG 파라미터의 측정치와 계산치

Table 2 Measured and calculated ICG parameters

	L_p (μH)	R_p ($\text{m}\Omega$)	T_1/T_2 (μs)	I_{max} (kA)	I_{os} (%)	V_c (kV)
측정치	1.563	35	9.75/19.40	6.19	77.69	1.5
계산치	1.563	35	8.62/18.71	6.19	77.61	1.518

3. ICG의 구성

설계 제작된 ICG는 8/20 μs 파형 발생용으로 커패시터에 직류 전압을 충전하기 위한 충전용 저항을 포함한 직류 충전장치와 커패시터, 인덕터, 저항기로 구성된 파형정형회로 및 커패시터의 에너지를 방전하기 위한 스위치와 트리거 장치로 구성하였다. 그림 9는 최대 출력전류 I_{max} 가 60 kA, 최대 에너지 E_{max} 가 14.8 kJ인 제작된 ICG를 나타내고 있으며, 각 부의 사양과 특성은 다음과 같다.

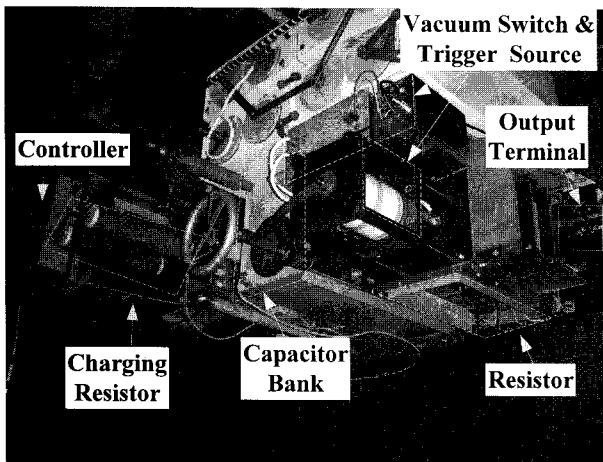


그림 9 최대출력 $I_{\text{max}} = 60 \text{ kA}$, $E_{\text{max}} = 14.8 \text{ kJ}$ 인 제작된 8/20 μs ICG

Fig. 9 Fabricated 8/20 μs ICG with $I_{\text{max}} = 60 \text{ kA}$, $E_{\text{max}} = 14.8 \text{ kJ}$

3.1 충전장치와 커패시터

충전장치는 220 V/21 kV, 2 kVA 승압 변압기와 전파정류기로 구성하였다. 충전시 정류기와 변압기에 과도한 전류를 억제하기 위해 사용된 충전용 저항은 200 k Ω 이며, 최대 충전전압 직류 28 kV까지의 충전 시간은 최대 40 초이다. 충전용 커패시터는 33 μF , 직류 40 kV 정격의 커패시터 1 개를 용량성 에너지 저장용 ICG에 사용하였다.

3.2 스위치

일정한 트리거 펄스에 의해 안정된 방전이 형성되어 신뢰성 있는 스위칭동작이 이루어지며, 방전시 발생하는 소음을 줄이기 위해 10^{-7} torr 압력의 진공로타리 아크캡스위치

(VRAGS : vacuum rotary arc gap switch)를 사용하였다.

3.3 파형 정형 저항기와 인덕터

전류 파형 정형용 저항기는 스테인레스 스틸(SUS 303 : $7.2 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$)재로 제작한 저항기(인덕턴스 1.0 μH) 저항은 $R_{\text{ext}} = 0.2 \Omega$ 이다. 리드선 및 커패시터의 잔류 저항을 고려하면 ICG의 총저항은 $R_t = R_p + R_{\text{ext}} = 214 \text{ m}\Omega$ 이다. 회로의 인덕턴스는 회로 자체의 표유 인덕턴스를 이용하였기 때문에 별도로 설치하지 않았다. 상기의 저항과 인덕턴스는 임피던스분석기(Agilent 4294A, 40~110 MHz)를 이용하여 측정된 값이다.

3.4 측정장치

ICG의 성능 측정을 위해 전류센서는 Pearson Electronics사의 Current Monitor(Model 1423 : 0.001V/A, 1.2 MHz)를 사용하였으며, 전압측정은 Tektronix사 고전압프로브(P6015, 1000:1, 70 MHz)를, 파형기록은 Tektronix사 디지털오실로스코프(Model DPO3032, 300 MHz, 2.5 GS/s)를 이용하였다.

4. ICG의 성능분석

4.1 단락회로 특성

그림 10은 8/20 μs ICG의 설계 정수인 $C = 33 \mu\text{F}$, $L = 1.911 \mu\text{H}$, $R = 219 \text{ m}\Omega$ 으로 구성된 회로의 출력단자를 단락한 후 27 kV의 충전전압을 인가하여 얻어진 측정 전류 파형과 설계정수를 이용하여 계산한 파형을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 10에 표기된 V_c 와 R , L , C 는 측정파형으로부터 계산된 값이며, 나머지 정수는 측정파형에서 얻어진 값이다. 비교결과 파두의 초기 상승 부분만 제외하고 측정파형과 계산파형이 거의 일치하고 있으며, 표 3과 같이 측정치와 계산치도 파형 파라미터를 제외하고 거의 일치하고 있다.

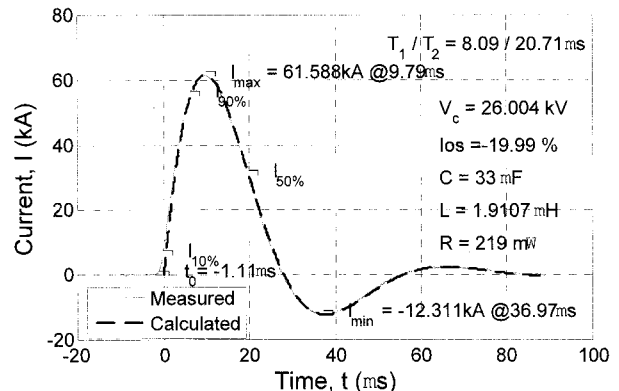


그림 10 단락 회로에서 8/20 μs ICG의 최대 전류 출력 파형
Fig. 10 Maximum output current waveform of 8/20 μs ICG under the short circuit.

표 3 단락회로에서 ICG 파라미터의 측정치와 계산치

Table 3 Measured and calculated ICG parameters under the short circuit

	L (μH)	R ($\text{m}\Omega$)	T_1/T_2 (μs)	I_{max} (kA)	I_{os} (%)	V_c (kV)
측정치	1.911	219	8.09/20.71	61.59	19.99	27
계산치	1.911	219	7.47/20.13	61.64	20.08	26

4.2 부하 특성

비선형 부하인 MOV의 전류에 따른 제한전압(E_c)의 변화 즉, 전류의 변화에 따라 MOV의 저항 $R_{\text{MOV}}(I)$ 변화가 출력 파형에 미치는 영향을 확인하기 위해 최대 교류 사용전압(MCOV)이 440V인 EPCOS사의 모델 LS40K440QP를 부하로 사용하였으며, 다음 식으로 I-V 특성을 나타낸다.

$$U_c = 10^\alpha \tag{18}$$

여기서, $\alpha = B_1 + B_2 \log(I) + B_3 e^{-\log(I)} + B_4 e^{\log(I)}$, $B_1 = 2.9299121$, $B_2 = 0.0240609$, $B_3 = -0.0001834$, $B_4 = 0.0034573$ 이다. 이를 도시하면 그림 11과 같다.

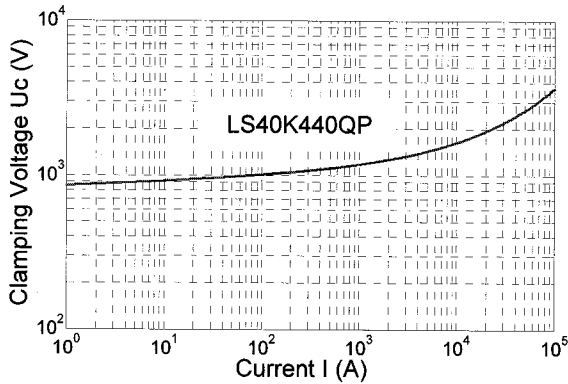
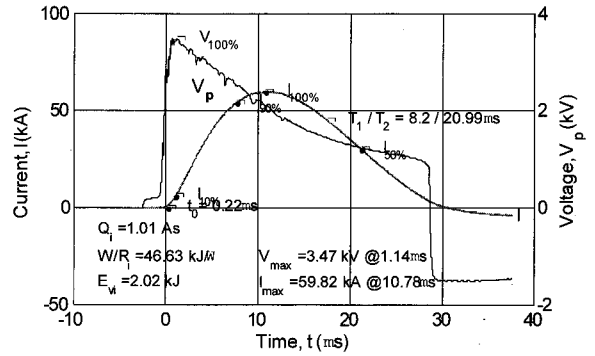
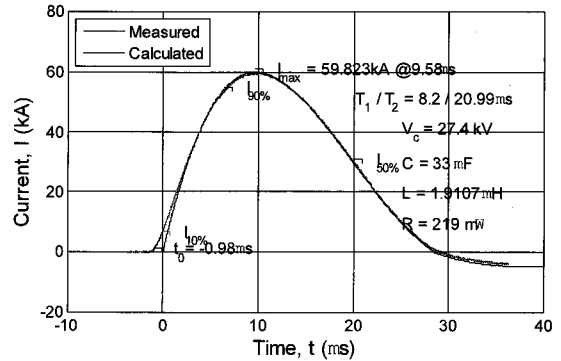


그림 11 MOV 모델 LS40K440QP의 전류-전압특성
Fig. 11 I-V Characteristic Curve of MOV (Model : LS40K440QP)

부하의 저항이 작은 경우를 모의하기 위해 두 개의 MOV(LS40K440QP)를 병렬로 연결한 전류-전압 특성시험에서는 27.4 kV 충전전압에서 그림 12와 같이 최대 59.82 kA의 출력전류가 일어났다. 그림 12에 표기된 Q_c 는 전하량, W/R_c 은 비에너지를 E_{vi} 는 에너지를 나타낸다. 최대전류 시각 t_m 에서 제한전압 $U_c(t_m)$ 은 2.11 kV 이므로 이 시각에서 측정된 MOV의 저항 $R(t_m)$ 은 35.2 m Ω 이다. 한편 임펄스전류 최대치의 1/2이 각각의 MOV에 흐른다고 가정하면 59.82 kA/2에 해당하는 제한전압은 그림 11의 I-V 특성곡선 혹은 식 (2)로부터 2.19 kV가 된다. 따라서 전체 MOV의 저항 $R_{\text{MOV}}(i)$ 는 36.7m Ω 으로 측정치와 근소한 차이를 보인다. 그림 12는 회로해석 프로그램인 PSPICE를 사용하여 MOV를 포함하여 ICG를 모의 해석하여 얻어진 전류 파형과 측정파형을 비교하여 나타낸 것으로 두 파형이 파두부분의 상승률을 제외하고 거의 일치하고 있으며 파형 파라미터 T_1/T_2 값은 각종 규격에서 요구하는 10% 오차 범위내에 있다. 표 4는 측정치와 계산치를 비교하여 나타낸 것이다.



(a) 방전전류와 제한전압 측정 파형



(b) 방전전류 측정치와 계산치

그림 12 저저항 부하에서 8/20 μs ICG의 방전전류와 제한전압 파형 ($V_c = 27 \text{ kV}$, $C = 33 \mu\text{F}$, $L = 1.911 \mu\text{H}$, $R = 219 \text{ m}\Omega$,)

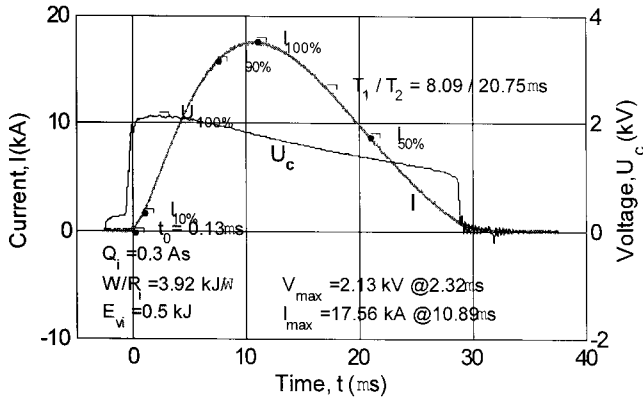
Fig. 12 The output discharge current and clamping voltage waveforms of 8/20 μs ICG at low resistance load

표 4 MOV에 대한 8/20 μs ICG 파라미터의 측정치와 계산치

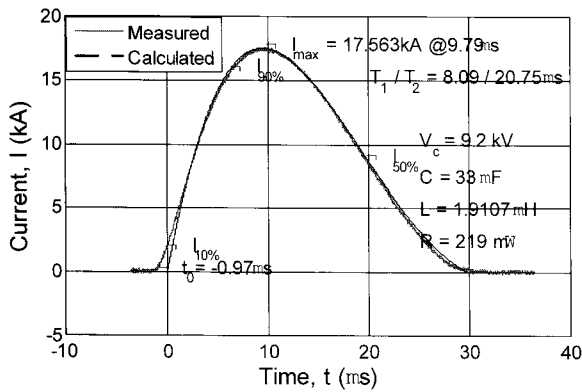
Table 4 Measured and calculated ICG parameters of 8/20 μs ICG with MOV(LS40K440QP) load

MOV 수	구분	T_1/T_2 (μs)	I_{max} (kA)	R_{MOV} (Ω)	V_c (kV)
2	측정치	8.20/20.99	59.82	35.2	27.4
	계산치	7.36/20.17	59.94	36.7	27.4
1	측정치	8.09/20.75	17.56	106.8	9.2
	계산치	7.20/20.20	17.51	107.2	9.2

부하의 저항이 큰 경우를 모의하기 위해 ICG의 출력단자에 한 개의 MOV 연결하여 얻어진 측정파형과 계산 파라미터를 그림 13에 나타내었다. 그 결과 두 파형이 거의 일치하며, 파형 파라미터 T_1/T_2 값은 계산치와 약 1 μs 정도 차이를 보이고 있다. 그러나 실제 파형의 경우 규격에서 요구하는 10% 오차 범위내에 있다. 두 실험 결과로부터 부하저항의 변화에 따라 파형 정보 T_1/T_2 는 대체적으로 일정한 양상을 보이고 있으며, 피 시험품에 요구되는 규정된 방전전류를 흘리기 위한 충전전압의 크기는 부하저항의 크기에 비례함을 알 수 있다.



(a) 방전전류와 제한전압 측정 파형



(b) 방전전류 측정치와 계산치

그림 13 고저항 부하에서 8/20 μ s ICG의 방전전류와 제한전압 파형 ($V_c = 9.2$ kV, $C = 33$ μ F, $L = 1.911$ μ H, $R = 219$ m Ω ,)

Fig. 13 The output discharge current and clamping voltage waveforms of 8/20 μ s ICG at high resistance load(LS40K440QP)

5. 결 론

본 연구에서는 IEC 60060-1 규격에서 제시하고 있는 감쇠 진동형 임펄스 전류 파형을 얻기 위해 요구되는 ICG의 설계 파라미터를 구하는 이론적인 방법을 제시하였으며, 이를 제작에 반영하여 구현된 ICG의 성능을 분석하였다.

설계 파라미터인 파두장 T_1 과 파미장 T_2 및 오버슈트 I_{ov} 와 직접 관련 있는 비선형 방정식의 감쇠계수 α 를 구하기 위해 Matlab 내장함수를 이용하였다. 그 결과 $0.4559 \leq \alpha < 1$ 범위에서 1%의 계산오차를 가진 파형 파라미터 T_1 , T_2 및 α 와 2차 회귀방정식의 선형 계수를 구하였다. 얻어진 회귀방정식을 이용하여 부하의 저항변화에 따른 파형 파라미터의 변화를 고려하여 ICG의 최적 설계 파라미터 R, L을 산출하였으며, R, L을 이용하여 주어진 C값에 대응하는 최적의 ICG를 구성할 수 있는 간편한 설계 계산식을 제시하였다.

또한 얻어진 설계 파라미터를 이용하여 제작된 8/20 μ s ICG는 파형 파라미터 T_1 과 T_2 의 허용오차 범위(10% 이내)의 성능을 나타내고 있으며, 부하 저항 변동에 따라 파형오차도 일정하게 유지되고 있어 본 ICG 설계기법이 감쇠 진

동형 임펄스 발생기의 설계제작에 적용될 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 한국학술진흥재단 해외고급과학두뇌초빙활용사업의 지원에 의하여 이루어진 연구입니다.

참 고 문 헌

- [1] IEC Publication 60060-1, "High Voltage Test Techniques. Part 1: General Definitions and Test Requirements", Geneva, 1989.
- [2] M. Modrusan, "HAEFLY: Normalized Calculation of Impulse Current Circuits for Given Impulse Currents", Basel, Switzerland, 1979.
- [3] C. Lorthongkam, and C. Thomrongtappitak, "Design of impulse high-current generator using the IMC simulation program", Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon, Vol.2, pp. 631-635, 2000.
- [4] S. pack and S. Jaufer, "Evaluation of an impulse current generator using numerical simulation tools", IPST 2003 in New Orleans.
- [5] K. Kishore, et al, "On the development of an impulse current generator", Electromagnetic Interference and Compatibility '97, pp. 401-406, Dec. 1997.
- [6] 일본전기학회, "고전압시험 Hand book", pp. 123-126, 1980.3.
- [7] D. B. Montgomery, "Solenoid magnet design", Robert R. Kriger Publishing Company, pp. 194, 1980.
- [8] IEEE Std. C62.45, "IEEE recommended practice on surge testing for equipment connected to low-voltage (1000V and Less) AC power circuits".

저 자 소 개



장 석 훈 (張錫勳)

1974년 2월 20일생. 1996년 인하대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 한국전기연구원 전기환경연구그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1328

Fax : 055-280-1329

E-mail : shchang@keri.re.kr



이재복 (李在福)

1962년 8월 17일생. 1985년 인하대공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 한국전기연구원 전기환경연구그룹 책임연구원

Tel : 055-280-1323

Fax : 055-280-1329

E-mail : jblee@keri.re.kr



S. V. Shenderey

1949년 11월 19일생. 1985년 A.F.Ioffe Physical-Technical Institute (물리학박사). 1974년-2001년 A.F.Ioffe Physical-Technical Institute 책임연구원. 2001년-2005년 한국전기연구원 초빙연구원. 2005년-2007년 Centre of Applied

Physics for the A. F. Ioffe Physico- Technical Institute 책임연구원. 2008년-현재 한국전기연구원 초빙연구원

Tel : 055-280-1325

Fax : 055-280-1329

E-mail : sergeyshenderey@yandex.ru



명성호 (明聖鎬)

1959년 3월 20일생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 한국전기연구원 전기환경연구그룹장

Tel : 055-280-1320

Fax : 055-280-1329

E-mail : shmyung@keri.re.kr



조연규 (趙延奎)

1957년 3월 10일생. 1982년 경남대 전기공학과 졸업. 2005년 창원대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 한국전기연구원 전기환경연구그룹 선임기술원

Tel : 055-280-1343

Fax : 055-280-1329

E-mail : ygcho@keri.re.kr