

분포정수회로를 이용한 고전압 급준 펄스 연구

곽 희로*, 권 동진^o, 송 일근**

* : 송실대학교, ** : 한전기술연구원

A Study on the Very Fast Rising High Voltage Pulse Using Distributed Circuit

Kwak Hee-Ro*, Kweon Dong-Jin^o, Song Ill-Gun

* : Soong Sil University, ** : KEPCO

Abstract

This paper describes a very fast rising high voltage pulse generation for studying surge phenomenon and prebreakdown of liquid dielectric by applying the traveling wave theory of the distributed circuit. This very fast rising high voltage pulse generator consists of a charging coaxial cable, a discharging switch, and a terminating resistance. As results, the rising time of pulses are about 31[nsec], which is very fast, and its duration is 950[nsec] when using 200[m] coaxial cable. The length of the coaxial cable and changing voltage can regulate the duration and the amplitude or the polarity of the pulse. When terminated the resistance, capacitor and inductor, the measured waveform corresponds with simulated waveform.

1. 서론

고전압 전력설비의 사고는 절연파괴가 대부분이며 이러한 절연파괴는 이상전압에 의하여 주로 발생한다. 송전전압이 높아짐에 따라 시스템내에서 발생하는 이상전압도 높아지게 되어 전력설비의 건설비와 절연비가 증대된다. 따라서 전력시스템의 신뢰성을 확보하고 경제성을 추구하기 위하여 이상전압을 가능한 억제하여 시스템의 절연강도 레벨을 저감할 필요가 있다. 계통전압이 높아짐에 따라 개폐 과전압의 영향이 더욱 커지게 되며, 변전소 인출용 단거리 케이블의 개폐시 발생하는 충전전류에 의한 개폐 과전압 및 최근 대도시에서 많이 사용되고 있는 SF₆ 가스절연개폐장치(GIS)의 단로기, 차단기 등의 개폐시 충전전류의 차단, 또는 지락고장으로 인한 급준 과도 과전압(Very Fast Transient)의 파형은 상승시간이 아주 짧으므로 전력설비의 절연에 상당한 위협을 주게 된다.[1~4] 따라서 대전력 전송시 빈번히 발생하는 썬지현상에 대한 연구 및 해석에는 고전압 급준 펄스가 필요 불가결하다. 또한 액체 유전체의 절연파괴현상은 10⁻⁶~10⁻⁹[sec]의 매우 짧은 시간에 발생하는 특징이 있으므로, 액체 유전체의 선구방전현상에서 스트리머(streamer) 진전속도 등의 절연파괴 기구(mechanism)를 규명하기 위해서는 입상전

이 빠른 고전압 급준 펄스를 인가할 필요가 있다.[5~7]

본 연구에서는 고전압 급준 펄스를 발생시키기 위하여 분포정수회로에서의 진행파 이론에 대하여 검토하고, 충전선로(동축케이블), 방전 스위치 및 단말저항 등으로 구성된 고전압 급준 펄스발생기를[8] 이용하여 각종 방전스위치에서의 고전압 급준 펄스파형을 관측하고, 저항, 커패시터 및 인덕터 등이 종단되었을 경우의 펄스파형을 시뮬레이션하여 펄스 발생기의 출력파형과 비교, 검토하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

그림 1에 분포정수회로를 사용한 고전압 급준 펄스 발생장치의 등가회로를 나타내었다. 고전압 급준 펄스 발생장치는 직류 고전압 발생장치 및 충전선로와 단락스위치 및 종단저항으로 구성된다. 그림 1에서 충전선로는 동축케이블(ECX 5C-2V, 특성임피던스 : 75[Ω]±3, 유전율 : 2~2.5)을 사용하였고 동축케이블 차폐선의 양쪽 끝은 스위치 S₁, S₂를 통하여 접지되어 있다. 동축케이블의 내부도체 양쪽 끝은 각각 고전압 프로브(probe)와 저항 R을 통하여 대지와 연결되어 있다. 일반적으로 동축케이블의 차폐선은 대지로부터 절연되어 있으며, 충전저항 R_c를 통하여 공급되는 직류전원에 의해 -2E의 전위로 충전된다. 이때 스위치 S₁, S₂를 동시에 투입하여 방전시키면, 동축케이블 내부도체에 충전된 +2E의 충전전압이 반직 선로 양끝으로 전파되어 진행파가 발생하게 된다.

길이 l의 무손실 선로에 부하 Z를 접속할 때 부하점에서의 전압은 다음과 같다.

$$V(l, t) = V^+(l - v_0 t) + V^-(l + v_0 t)$$

여기서 V⁺는 부하로의 입사파, V⁻는 부하에서의 반사파이고, l은 동축 케이블의 길이, v₀ = $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ 는 동축케이블내 진행파의 전파속도, t는 시간이다.

또한 부하에서의 반사계수 ρ_r과 투과계수 ρ_t는 다음과 같다.

$$\rho_r(l, t) = \frac{V^-(l + v_0 t)}{V^+(l - v_0 t)} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$$

$$\rho(l, t) = \frac{V(l, t)}{V^*(l - v_0 t)} = 1 + \rho_r = \frac{2Z}{Z + Z_0}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

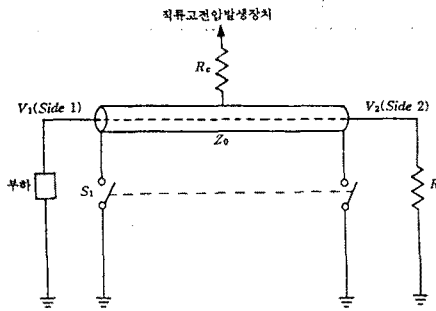


그림 1 고전압 구형파 펄스 발생장치의 등가회로
Fig. 1 The equivalent circuit of HV rectangular wave pulse generator

여기서 Z_0 는 선로의 특성 임피던스이다. 따라서 동축케이블에 충전된 전압을 방전시키면, Side 1으로 진행한 전압파는 부하 임피던스를 무한대로 가정하면 반사파의 크기는 +E가 되고, 부하에 인가되는 구형파 펄스전압 V_1 의 크기는 +2E가 된다. 이때의 구형파 펄스전압 V_1 의 폭은 $\tau = \frac{l}{v_0}$ 가 된다. 또한 Side 2로 진행한 전압파는 저항 R의 크기가 선로의 특성 임피던스 Z_0 와 같은 경우 반사파의 크기는 0이 되고, 구형파 펄스 전압 V_2 의 크기는 +E가 된다. 이때 저항 R에 인가되는 구형파 펄스 전압 V_2 의 폭은 Side 1에서 반사된 전압파 +E의 펄스 폭 τ 가 합쳐지므로 2τ 가 된다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 1의 등가회로와 같은 고전압 급준 펄스 발생회로에 직류 고전압 발생장치를 사용하여 충전저항 R_e 를 통하여 동축케이블의 차폐선에 -2E의 고전압을 충전시킬 경우, 분포정수회로를 가진 동축케이블은 차폐선과 심선이 일렬로 늘어선 커패시터와 같은 작용을 하므로 일정한 시간이 지난 후에 비로서 동축케이블의 심선 전체가 2E의 전압으로 충전된다. 본 연구에서 200[m]의 동축케이블을 사용한 경우의 충전시간은 약 30[sec]로 나타났다. 따라서 본 고전압 급준 펄스발생기를 이용하여 절연 파괴현상 등을 연구하기 위한 연속적인 파형을 발생시키기 위해서는 최소한 30여초의 충전시간이 필요함을 알 수 있다.

충전선로를 단락시키기 위하여 기존의 펄스발생기에 광범위하게 사용되고 있는 트리거 방전형 스위치와 자기 방전형 스위치 및 봉 대 평판전극을 사용하였다. 트리거 방전형 스위치는 제 3 전극의 방전을 이용하여 주 전극을 단락시키는 기술로써 기존의 펄스발생기에 광범위하게 적용되고 있다. 본 연구에서는 주 전극은 지름 70[mm]의 구형전극을 사용하였고, 접지 전극은 지름 70[mm]의 반구형전극을 사용하였으며, 보조전극의 인가전

압은 10[kV]이다.

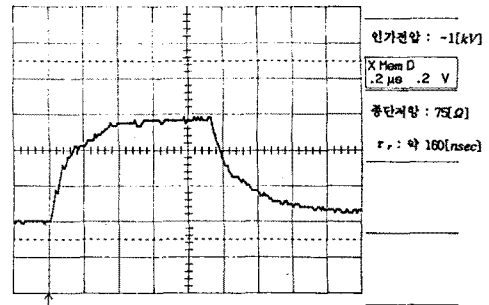


그림 2 트리거 스위치를 사용한 경우의 펄스파형
Fig. 2 The pulse waveform using trigger switch

그림 2는 트리거 방전형 스위치를 사용한 경우의 펄스파형으로서 Time/div은 0.2[μsec]이고, Voltage/div은 0.2[V]이다. 종단저항 R은 반사파를 제거하기 위하여 동축케이블의 특성 임피던스와 같도록 75[Ω]을 연결하였다. 트리거 방전형 스위치를 사용한 경우에는 원하는 시점에서 방전시킬 수 있는 장점은 있으나 입상시간이 약 160[nsec]로 상당히 느리게 나타났다.

전극간에 인가되는 전압이 절연파괴 전압에 도달하면 단락이 발생하는 자기 방전형 스위치를 사용한 경우의 펄스파형은 트리거 방전형 스위치에 비하여 입상시간은 비교적 빠르게 나타났으나 임의로 방전시키기 곤란하다는 단점이 있었으며, SSR(Solid State Relay)을 방전스위치로 적용한 경우에는 절연거리의 불충분으로 인하여 충전케이블에 전압이 충전되지 않아 본 연구에는 부적합하였다.

봉 대 평판전극은 상부는 봉 전극, 하부는 평판전극을 사용하였으며, 봉 전극은 집지선을 연결하여 충전된 케이블을 순간적으로 방전시킬 수 있도록 하였다. 봉 전극은 지름 18[mm]의 원통형의 봉을 사용하였으며, 봉의 곡률반경은 약 7[mm]가 되도록 제작하였으며, 손잡이는 테프론 봉을 사용하여 절연하였다. 평판전극은 직경 30[mm]의 원형 동판을 사용하여 고전압이 인가되도록 하였으며, 차폐판과는 12[mm]의 베크라이트를 사용하여 절연시켰다.

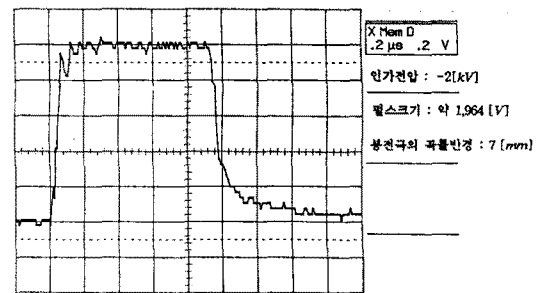


그림 3 봉 대 평판전극을 사용한 경우의 펄스파형
Fig. 3 The pulse waveform using rod to plane electrodes

그림 3은 봉 대 평판전극을 사용한 경우에 부하측(Side 1)에 나타나는 고전압 급준 펄스파형이다. 고전압 발생장치에서 직류

고전압을 충전케이블의 차폐선에 $-2[\text{kV}]$ 인가하고, 동축케이블이 충전된 후 스위치를 투입하였을 경우에 관측된 펄스파형의 크기는 고전압 프로브의 분압비 2,000을 곱하면 $1.964[\text{V}]$ 이다. 또한 관측된 펄스파형의 입상시간 τ_r 은 약 $31[\text{nsec}]$ 로 매우 빠르게 나타났다. 고전압 급준 펄스의 펄스 폭은 선로의 길이에 의해 정해지는데 본 연구에서 $200[\text{m}]$ 의 동축케이블을 이용할 경우에 펄스파형의 폭은 약 $950[\text{nsec}]$ 로 나타났다. 케이블에서의 전파속도는 $v_0 = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon}}$ $[\text{m/s}]$ 이고, 동축케이블의 유전율은 $2.0 \sim 2.5$ 이므로 동축케이블에서의 전파속도를 계산하면 $2.12 \sim 1.897 \times 10^8 [\text{m/s}]$ 가 된다. 따라서 동축케이블의 길이가 $200[\text{m}]$ 일 경우의 펄스 폭 $\tau = \frac{l}{v_0}$ 를 계산한 $942.8 \sim 1,054[\text{nsec}]$ 범위내에 있으므로 계산치와 실측치가 잘 일치됨을 알 수 있다.

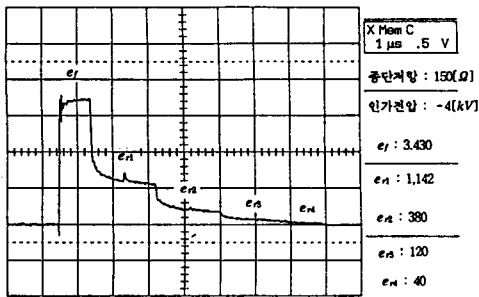


그림 4 종단저항 $150[\Omega]$ 일 경우의 펄스파형
Fig. 4 The pulse waveform on the terminating resistance $150[\Omega]$

종단저항 R 이 선로의 특성 임피던스 Z_0 와 같은 값을 갖지 않을 경우, 즉 종단측 임피던스가 정합이 이루어지지 않았을 경우에 종단저항 R 에서는 진행파의 반사와 투과작용이 일어나게 되고, 그 결과로 발생하는 다중반사작용이 중복되어 발생하게 된다. 그림 4는 그림 1의 등가회로에서 Side 2의 종단저항을 $150[\Omega]$ 로 하였을 경우에 Side 1에 나타나는 다중반사파형이다. 이때 충전 케이블의 차폐선에 인가한 충전전압의 크기는 $-4[\text{kV}]$ 이며, 반사파는 다음과 같다.

$$e_r = \frac{R - Z_0}{R + Z_0} e_f = \frac{150 - 75}{150 + 75} e_f = 0.3333 e_f$$

여기서 e_f 는 충전선로가 단락되었을 경우에 Side 1으로 진행한 전압파형으로 Side 2로 진행한 전압파형과 같으며 펄스 폭은 약 $950[\text{nsec}]$ 이다. $-4[\text{kV}]$ 를 충전선로의 차폐선에 충전시킬 경우에 출력전압의 크기는 $3,430[\text{V}]$ 로 나타났다. 종단저항 R 에서의 제 1 반사파 e_{r1} 은 Side 2로 진행한 전압파형과 Side 1으로 진행하여 고전압 프로브에서 반사된 파형이 나타나므로 펄스 폭은 e_f 의 두배인 $1,870[\text{nsec}]$ 가 되었으며, 반사된 전압의 크기는 $1,142[\text{V}]$ 로 나타났다. 제 2 반사파 e_{r2} 는 제 1 반사파가 고전압 프로브에서 반사된 것이므로 펄스 폭은 제 1 반사파와 같게 된다. 종단저항을 $150[\Omega]$ 로 하였을 경우의 반사파형의 크기는 급격히 감소하여 제 4 반사파형에서 약 $40[\text{V}]$ 를 나타내었으며, 그 이후의 반사파는 거의 0을 나타내었다.

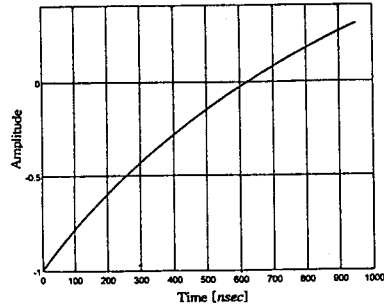


그림 5 $0.012[\mu\text{F}]$ 로 종단된 경우의 시뮬레이션 파형
Fig. 5 The simulation waveform on the terminating capacitor $0.012[\mu\text{F}]$

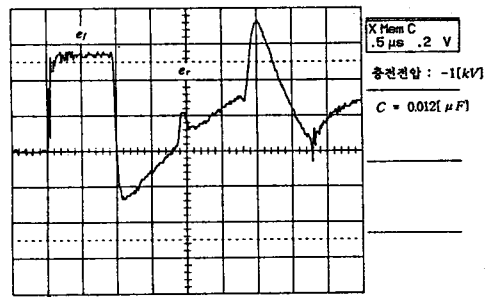


그림 6 $0.012[\mu\text{F}]$ 의 커패시터로 종단된 경우의 펄스파형
Fig. 6 The pulse waveform on the terminating capacitor $0.012[\mu\text{F}]$

그림 5와 그림 6은 그림 1의 등가회로에서 Side 2의 종단저항 R 대신에 커패시터가 연결되었을 경우의 반사파형을 나타낸 것이다. 케이블의 차폐선에 충전되는 전압을 $-1[\text{kV}]$ 로 하고, $0.012[\mu\text{F}]$ 의 커패시터로 종단시킬 경우에 선로를 다중반사하는 반사파는 다음과 같이 된다.

$$e_r = \left[1 - 2 \exp\left(-\frac{t}{Z_0 \times C}\right) \right] e_f$$

$$= \left[1 - 2 \exp\left(-\frac{t}{75 \times 0.012 \times 10^{-6}}\right) \right] e_f$$

따라서 시간에 따른 반사파의 크기는 다음과 같이 된다.

$t = 0$	$e_r = -e_f$
$t = 100[\text{nsec}]$	$e_r = -0.789e_f$
$t = 200[\text{nsec}]$	$e_r = -0.601e_f$
$t = 400[\text{nsec}]$	$e_r = -0.282e_f$
$t = 950[\text{nsec}]$	$e_r = 0.304e_f$

그림 5는 커패시터로 종단되었을 경우의 반사파를 시뮬레이션한 것으로, 반사파의 크기는 $t=0$ 에서 $t=950[\text{nsec}]$ 까지 시간에 따라 $-e_f$ 에서 $0.3e_f$ 로 지수함수적으로 변화되는 것을 나타내고 있다. 그림 6은 Side 1에서의 출력파형으로서, e_f 는 충전선로가 단락되었을 경우에 Side 1으로 진행한 전압파형이며, e_r 는 Side 2로 진행한 전압파가 커패시터에서 반사된 파형으로서, 펄스 폭은 e_f 의 2배가 되었으며, 그림 5에서 시뮬레이션한 펄스 파형과 잘 일치함을 볼 수 있다.

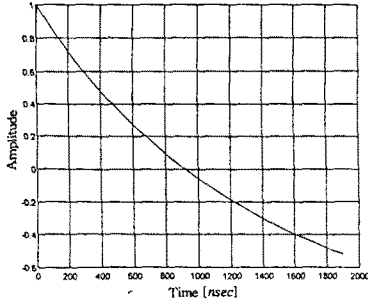


그림 7 100[μH]로 종단된 경우의 시뮬레이션 파형
Fig. 7 The simulation waveform on the terminating inductor 100[μH]

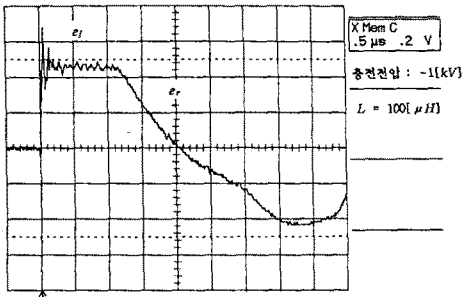


그림 8 100[μH]의 인덕터로 종단된 경우의 펄스파형
Fig. 8 The pulse waveform on the terminating inductor 100[μH]

그림 7은 그림 1의 등가회로에서 Side 2의 종단저항 R 대신에 100[μH]의 인덕터가 연결되었을 경우의 반사파를 시뮬레이션한 파형으로서 선로를 다중반사하는 반사파는 다음과 같이 된다.

$$e_r = \left[-1 + 2 \exp\left(-\frac{Z_0 t}{L}\right) \right] e_f$$

$$= \left[-1 + 2 \exp\left(-\frac{75 \times t}{100 \times 10^{-6}}\right) \right] e_f$$

따라서 시간에 따른 반사파의 크기는 다음과 같이 변화된다.

$t = 0$	$e_r = e_f$
$t = 100[\text{nsec}]$	$e_r = 0.855e_f$
$t = 400[\text{nsec}]$	$e_r = 0.482e_f$
$t = 950[\text{nsec}]$	$e_r = -0.019e_f$
$t = 1,870[\text{nsec}]$	$e_r = -0.508e_f$

그림 8은 케이블에 충전되는 전압을 -1[kV]로 하였을 경우의 반사파이다. 반사파의 크기는 $t=0$ 에서 $t=1,870[\text{nsec}]$ 까지 시간에 따라 e_f 에서 $-0.5e_f$ 로 지수함수적으로 변화되는 것을 나타내고 있다. 그림 8에서 e_r 는 충전선로가 단락되었을 경우에 Side 1으로 진행한 전압파형이며, e_f 는 Side 2로 진행한 전압파가 인덕터에서 반사된 파형으로서 그림 7의 시뮬레이션한 펄스파형과 잘 일치함을 볼 수 있다.

4. 결론

충전된 동축케이블의 분포정수회로를 이용하여 고전압 급준 펄스 발생기를 설계, 제작하고, 개발된 고전압 급준 펄스발생기에서 발생한 펄스파형을 관측하여 이론치와 실측치를 비교, 검토한 결과는 다음과 같다. 고전압 급준 펄스 발생기의 회로는 직류 고전압 발생장치 및 충전선로(동축케이블)와 단락스위치 및 종단저항으로 구성되어 아주 간단하다. 고전압 급준 펄스 파형의 입상시간은 봉대평판전극을 이용한 경우에 약 31[nsec]로써 매우 빨랐으며, 충전선로의 길이를 조절함으로써 출력펄스의 폭을 조절할 수 있으며, 인가전압의 크기로 출력파형의 크기를 조절할 수 있다. 저항, 커패시터 및 인덕터 등이 종단되었을 경우의 펄스파형은 시뮬레이션 파형과 실측파형이 잘 일치하였다.

참고 문헌

- [1] J. Meppelik et al., "Very Fast Transient in GIS," Cigre paper, WM 114-1, 1988
- [2] L. V. Bewley, "Traveling Waves on Transmission Systems," Dover Publications, inc., New York, pp.291~349, 1963
- [3] 秋山秀典, "高電壓パルスパワー工学," 森北出版株式会社, pp. 163~176, 1991
- [4] 雨谷昭弘, "分布定数回路論," コロナ社, pp.132~167, 1989
- [5] W. Chadband and J. H. Calderwood, "The Propagation of Discharges in Dielectric Liquids," Journal of Electrostatics, Vol. 7, No. 2, pp.57~66, 1979
- [6] J. Sidney Clements et al., "Preliminary Investigation of Prebreakdown Phenomena and Chemical Reactions Using a Pulsed High-voltage Discharge in Water," IEEE Trans., IA Vol. 23, No. 2, pp.224~235, 1987
- [7] H. Yamada and T. Sato, "High - speed Electro - optical Measurement of Prebreakdown Current in Dielectric Liquids," IEEE T-El, Vol. 20, No. 2, pp.261~267, 1985
- [8] 곽희로·권동진 외, "고전압 급준펄스 발생기에 관한 기초 연구", 대한전기학회 방전 및 고전압연구회, pp.58~61, 1994