

가스튜브 - 브와 산화아연 바리스터의 PSpice 모델

吉暲碩* · 宋在鏞* · 朴進吉**

A PSpice Model of Gas Tube and ZnO Varistor

G. S. Kil* · J. Y. Song* · J. G. Park**

Key words : Protective circuits, Transient overvoltages, Gas tube, ZnO varistor, PSpice, Firing voltages, Nonlinear characteristics

Abstract

The process of designing protective circuits against damage by transient overvoltages requires much work and expensive equipment. However, computer simulation using PSpice can overcome these problems.

In this paper, a gas tube and a ZnO varistor Pspice-model considering the steepness of the wave-front were presented. The effects of various waveforms on the transient behaviors and firing voltages of a gas tube were modeled by controlled voltage source E, controlled current source G, and TABLE function of PSpice. And the nonlinear characteristics of a ZnO varistor were modeled by controlled voltage source E and H.

To estimate the characteristics of the models proposed, various waveforms specified in IEC Std. 1000-4-5 were used in the simulation and the actual tests. The simulation results were compared with test results and showed good agreement.

1. 서 론

전원 및 신호·통신회로에 발생하는 과도이상 전압은 매우 짧은 시간동안 나타나지만 높은 피크 전압과 큰 에너지를 방출하기 때문에 고밀도 집적화된 전기·전자기기에 일시적인 장애나 영구적 손상을 일으키기에 충분하다¹⁾²⁾.

과도이상전압으로부터 전기·전자회로를 보호하기 위한 가장 효과적이고 경제적인 방법은 과도이상전압의 침입경로에 비선형 저항소자로 구성된 보호회로를 설치하여 침입한 과도이상전압을 피보호기기의 절연레벨 이하로 억제하는 것이다³⁾. 이러한 과도이상전압 보호회로는 단지 몇 개의 소자만을 사용하여 2~3단으로 구성되지만, 이들의

* 한국해양대학교 공과대학 전기공학과(원고접수일 : 98년 10월)
** 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부

적용으로 인한 회로에서의 삽입손실과 신호왜곡 등 2차적인 장애를 유발시킬 수 있다. 따라서 피보호 기기 또는 회로에 적합한 형태의 보호회로 개발을 위해서는 반복적인 실험과 평가가 요구되므로 많은 시간과 경비의 낭비가 따르게 된다.

다행히 현재는 개인용 컴퓨터의 성능이 급속도로 진보되어 이를 이용한 모의실험이 활발히 이루어지고, 전문 분야별로 다양한 종류의 소프트웨어가 출현하여 연구개발기간의 단축과 정확한 회로 개발에 큰 도움을 주고 있다^{[4],[5]}. 그 중에서도 PSpice는 회로망해석에 가장 널리 이용되고 있는 소프트웨어로 시뮬레이션에 필요한 소자의 모델만 있으면 대단히 강력하고 유용하다. PSpice 모델은 C언어와 같은 고급언어를 사용하지 않고도 대상 소자의 전기적 특성으로부터 소자의 모델링이 가능하며, 즉시 시뮬레이션에 적용할 수 있어 큰 어려움 없이 회로개발에 성과를 거둘수 있다^[6]. 그러나 PSpice에는 현재까지 과도이상전압 보호회로의 주 소자인 가스튜브-브(gas tube)와 산화아연 바리스터(ZnO varistor)등 비선형 소자의 모델이 없어 회로해석에 많은 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 과도이상전압 보호회로의 설계와 평가에 적용하기 위하여 가스튜브-브와 산화아연 바리스터의 전기적 특성으로부터 이들 소자의 PSpice 모델을 제안하였다. 특히 가스튜브-브는 소자 양단에 인가되는 파형의 파두준도(steeptness of the wave front : dV/dt)에 따라 보호특성이 달라지므로^[7], 파두준도에 따른 소자의 응답특성도 고려하여 다양한 과도이상전압 파형에 대해서도 적용될 수 있도록 설계하였다.

제안된 가스튜브-브와 산화아연 바리스터의 모델은 써-지발생장치에 의한 실험적 평가를 수행하였으며, 그 결과는 PSpice시뮬레이션 결과와 잘 일치하여 신뢰성 있는 모델임을 확인하였다.

2. 가스튜브-브와 산화아연바리스터의 모델링

과도이상전압 보호회로에 가장 널리 이용되는 비선형 보호소자는 가스튜브-브와 산화아연 바리스터 그리고 양방향 제너다이오드이다. 이들 비선형 보호소자는 단독 또는 복합적으로 저항과 인덕

턴스 등의 수동소자와 조합하여 설계·제작되고 있다. PSpice에는 이미 양방향 제너다이오드와 저항, 인덕턴스의 모델은 있으므로, 가스튜브-브와 산화아연 바리스터의 모델만 있으면 정확한 시뮬레이션이 가능하다^{[8],[9]}. 따라서 본 연구에서는 가스튜브-브와 산화아연 바리스터의 모델에 대해서만 다루었다.

2.1 가스튜브-브

가스튜브-브는 대단히 적은 정전용량(1~3pF)을 갖는 크로우바(crowbar)소자로 일종의 전압제어 스위치의 동작으로 표현할 수 있다. 그림 1에 가스튜브-브의 보호동작 특성을 나타내었는데, 방전개시전압 이하의 A영역에서 가스튜브-브는 회로에 병렬로 접속되어 극히 적은 용량의 캐패시턴스로만 동작한다. B영역은 소자 모델링에 있어 가스튜브-브의 중요한 특성을 나타내는 부분으로 가스튜브-브 양단에 인가된 전압이 방전개시전압 이상으로 되면 양전극 사이에는 방전이 개시되어, 아주 짧은 시간내에 글로우방전 영역에서 아-크방전 영역으로 이행하고, 가스튜브-브 양단에는 C영역에서 나타나는 바와 같이 약 10~30 V의 낮은 아-크전압을 유지하게 된다. 이 상태에서 가스튜브-브를 흐르는 전류가 아-크방전을 지속하는데 필요한 방전유지전류(약 100 mA)이하가 되면 아-크방전이 종료되고, 다시 A영역의 정상상태로 되돌아온다^[10].

이와 같은 가스튜브-브의 전기적특성을 PSpice 모델링이 가능하도록 등가화하면 그림 2와 같다. 각 영역에서의 동작특성은 PSpice의 전압제어전압원(voltage controlled voltage source) E의 값을

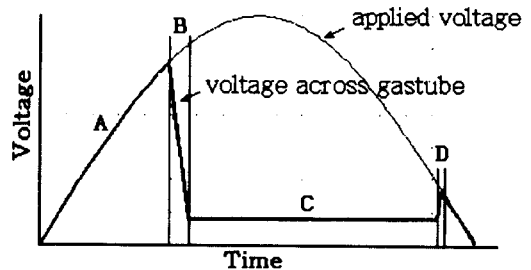


그림 1 가스튜브-브의 동작특성
Fig. 1 Operation characteristics of a gas tube

수식으로 제어할 수 있으며, 제어동작은 가스튜브 양전극 g_1 과 g_2 사이에서 걸리는 이 방전개시전압 이하이면 이때 E의 출력전압은 외부에서 인가된 전압을 따르고, 방전개시전압 이상이 되면 E의 출력전압을 고이득으로 급격히 감소시켜 영역 C의 아크전압(V_{arc})을 유지하게 한다.

또한 이 때 g_1 과 g_2 사이를 흐르는 전류가 유지 전류 이하가 되면 영역 A의 초기상태로 돌아가도록 제어전압원 E를 구성하면 된다.

본 모델을 PSpice로 시뮬레이션하면 그림 3의 결과를 얻을 수 있다. 그러나 실제의 가스튜브에서는 방전이 개시되고 글로우 방전을 거쳐 아크 영역 C로의 이행이 다소 완만하게 진행되는데, 본 모델에서는 A영역에서 C영역으로의 이행동작이 너무 급격하여 실제 가스튜브의 동작과는 다소

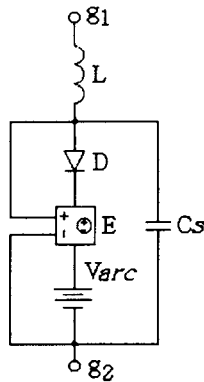


그림 2 가스튜브-브 모델의 등가 회로
Fig. 2 Equivalent circuit of the gas tube model

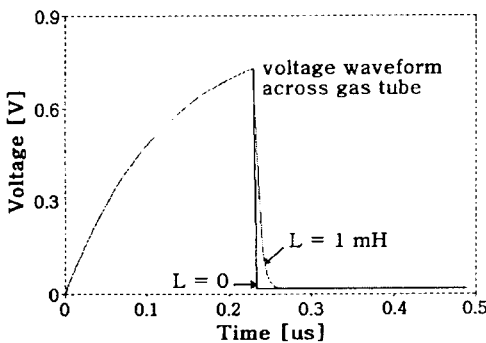


그림 3 $1.2/50\mu s$ 전압파형에 대한 모델의 특성
Fig. 3 Characteristics of the model against a $1.2/50\mu s$ voltage waveform.

차이가 있었다. 따라서 본 모델에서는 소자와 접속선의 인덕턴스($L: 1\sim 2nH$)를 직렬로 삽입하여 B영역의 특성을 실제와 같도록 모의하였다.

지금까지 완성된 등가모델은 가스튜브 양단에 인가되는 파형의 전압상승률에 관계없이 일정한 방전개시전압을 나타내게 된다. 그러나 실제 가스튜브의 응답은 인가되는 파형의 파두준도가 클수록 방전개시전압이 높아진다. 따라서 회로에 발생 가능한 다양한 종류의 과도이상전압에 대해서 만족한 개선된 모델을 얻기 위해서는 가스튜브 양단에 인가되는 파형의 파두준도에 따른 방전개시전압으로 수정할 필요가 있다. 이 경우는 그림 4에 나타난 가스튜브의 최종 모델과 같이 가스튜브 양단의 전압에 비례하여 전류로 변환시키는 전압제어전류원(voltage controlled current source) G를 적용하고, G의 출력전류를 인덕턴스 L_s 에 흘려줌으로써 인덕턴스에는 전압의 1계 미분에 비례하는 전압, 즉 dV/dt 가 구해진다. 이 값을 PSpice TABLE함수를 이용하여 이미 설계된 모델의 방전개시전압에 입력시켜, 인가 파형의 파두준도에 따른 방전개시전압으로 수정하여 인가 파형에 대한 정확한 가스튜브의 방전개시전압을 나타낸다. 이 모델은 인가되는 파형마다 회로의 상수 또는 동작 조건을 수정하지 않아도 전원 및 신호·통신회로에 발생 가능한 모든 파형에 대해 가스튜브의 동작 특성을 정확히 모의할 수 있으며, 가스튜브의 종류에 따른 모델은 방전개시전압만 수정하면 된다.

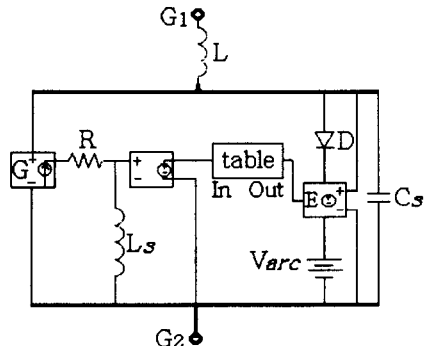


그림 4 파두준도를 고려한 가스튜브-브 모델
Fig. 4 Gas tube model considering steepness of the wave front

2.2 산화아연 바리스터

산화아연(ZnO) 바리스터(이하 “바리스터”로 함)는 양방향 클램핑 소자로 전압 - 전류 특성은 그림 5와 같다^[10]. 크게 3개의 영역으로 나누어지며, 약 0.1mA이하인 A영역은 바리스터의 누설저항(R_{leak})과 캐패시턴스 C에 의한 특성이며, 100A 이상의 C영역에서는 소자의 벌크저항(R_{bulk})에 의한 전압강하만이 나타나게 된다. B영역은 바리스터의 보호동작 특성인 비선형 전압 - 전류특성을 나타내는 것으로 이 부분에서 바리스터의 동작은 식 (1)에 따른다.

$$I = kV^\alpha \text{ [A]} \tag{1}$$

여기서 k 는 소자에 따른 상수이며, α 는 바리스터의 비선형 특성을 결정하는 것으로 식 (2)에 의하여 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{\log(I_1/I_2)}{\log(V_1/V_2)} \tag{2}$$

동종의 바리스터에 있어 비선형 특성영역에서 α 는 같은 값이며, 일반적으로 0.1 mA와 1 mA에서의 V_1, I_1 과 V_2, I_2 로 정하고 있다.

이와 같은 동작특성을 나타내는 바리스터의 등가회로는 그림 6과 같다. 인덕턴스 L은 소자의 접속선에 의한 것으로 보통 수 nF정도이며, C는 소자 양단의 정전용량으로 소자에 따라 주파수 1 kHz에서 0.2nF~10nF의 값을 갖는다. 또한 회로에서 R_{leak} 는 누설저항(약 $10^9\Omega$)으로 대단히 큰 값이며, R_{bulk} 는 벌크저항(수 m Ω 이하)으로 극히 적

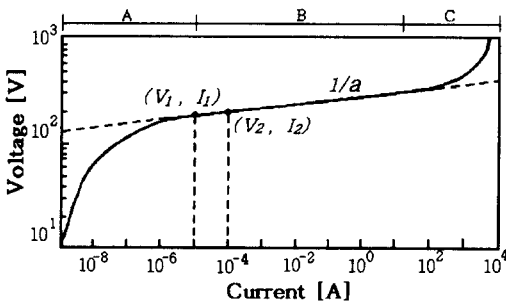


그림 5 산화아연 바리스터의 V - I 특성
Fig. 5 V - I characteristics of ZnO varistors

은 값을 갖는다.

R_{var} 는 바리스터의 보호특성을 나타내는 비선형 저항부분으로 그림 5의 전압 - 전류특성으로 부터 얻을 수 있다.

본 연구에서는 바리스터의 PSpice 시뮬레이션을 위해 General Electric사의 B40K150 ($V_{rms}=150V, V_{dc}=200V$)을 모델링 대상으로 하였다. 산화아연을 주성분으로 한 다른 정격의 바리스터는 비선형 특성이 모두 같으므로 몇 가지 정수만 변경하면 적용이 가능하다. 바리스터 모델링에 필요한 $R_{leak}(109\Omega), R_{bulk}(1m\Omega), L(19nH)$ 값은 제조사의 사양으로 부터 구할 수 있으며, C의 값은 주파수에 의존하므로 별도의 측정이 필요하여 본 연구에서는 임피던스미터(HIOKI 3531)로 주파수를 변화시키면서 바리스터의 정전용량을 측정하였다. 그 결과를 그림 7에 나타내었는데 주파수의 증가에

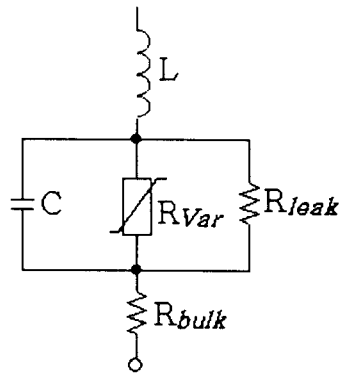


그림 6 산화아연 바리스터의 등가회로
Fig. 6 Equivalent circuit of ZnO varistors

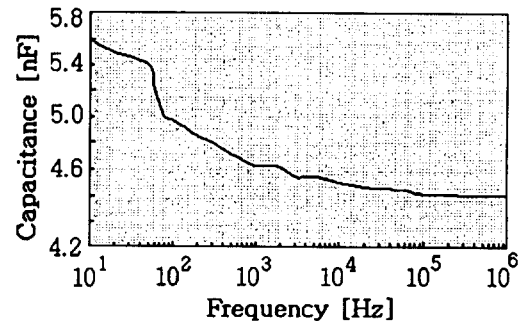


그림 7 주파수에 따른 정전용량변화
Fig. 7 Capacitance variation with frequency

따라 C값은 감소하고 1 kHz에서 4.8nF이었으며, 약 10kHz부터는 4.7nF로 일정한 값을 나타내었다. 정확한 바리스터의 모델링에 있어서는 C값을 주파수에 의존하는 값으로 대치될 수 있도록 하여야 하지만, 본 모델의 적용범위가 과도이상전압이므로 C값을 4.7nF의 상수로 취급하여도 무방하며, 시뮬레이션 결과에서도 보호동작에 차이가 없었다⁸⁾.

바리스터 모델링에 필요한 마지막 남은 부분은 비선형 저항(R_{var})으로, 이 부분의 동작특성을 수식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$\log(V_{var}) = a_0 + a_1 \log(i) + a_2 \{-\log(i)\} + a_3 \exp\{\log(i)\} \quad (3)$$

여기서 a_0, a_1, a_2, a_3 는 소자에 따른 상수이며, i 는 소자를 흐르는 전류이다. 비선형 저항부분 각 영역에서의 특성은 PSpice 내장의 LIMIT 함수를 사용하여 식 (3)을 제어전압원(CVS)의 제어수식으로 활용할 수 있도록 수정하면 된다.

그림 8에 최종적인 바리스터 모델을 나타내었다. 바리스터 양단에 과도이상전압이 인가되면 전도전압 이하에서는 누설저항에 의한 전류가 흐르며, 전도전압 이상이 되면 미리 정해진 전도전압과 인가전압 차이에 대해 고이득으로 비례한 전류가 소자를 흐르고, 다시 이 전류값에 대해 바리스터 양단에 전압이 나타나게 된다.

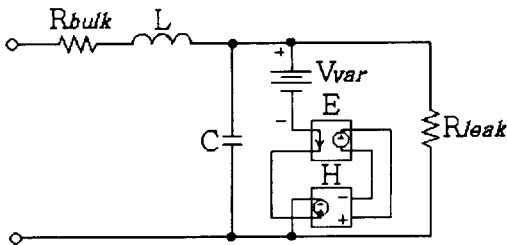


그림 8 산화아연 바리스터의 PSpice 모델
Fig. 8 PSpice model of the ZnO varister

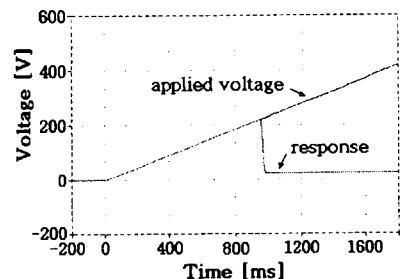
3. 평가 및 분석

본 연구에서 제안한 가스튜-브와 산화아연 바리스터 모델의 특성평가에는 IEC 1000-4-5규

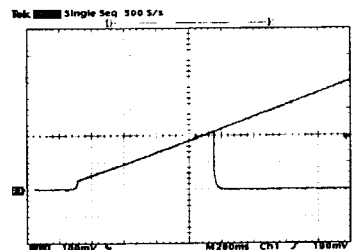
격에 의한 조합형 써-지발생장치의 회로를 이용하였다¹¹⁾. PSpice(Ver. 7.01)에서의 결과처리는 10ns 간격으로 실행하였으며, 실제 측정에 있어서는 TDS380(B.W. 400MHz)디지털축적형 오실로스코프, 고전압 프로브(Tek. 6015A)와 전류 프로브(Tek. A6302)를 사용하였다.

3.1 가스튜-브

가스튜-브는 과도이상전압에 대한 응답시간이 수 μ s정도로 늦기 때문에 파두준도에 따라 방전개시전압이 달라지므로, 본 연구에서는 200V/s(dc sparkover voltage test), 1kV/ μ s(impulse sparkover voltage test), 1.2/50 μ s(standard lightning impulse voltage test)의 다양한 파두준도를 갖는 파형을 적용하여 이들의 응답특성을 비교, 평가하였다. 평가에 사용된 가스튜-브는 JOSLYN 2031-23(dc V_{brk} 230V)으로 각 파형에 대한 시뮬레이션 결과 및 측정 결과를 그림 9에서 그림 11에



(a) 시뮬레이션 결과



[100 V/div, 200 ms/div]

(b) 측정 결과

그림 9 200V/s 파형에 대한 결과 비교
Fig. 9 Comparison of results for 200V/s waveform

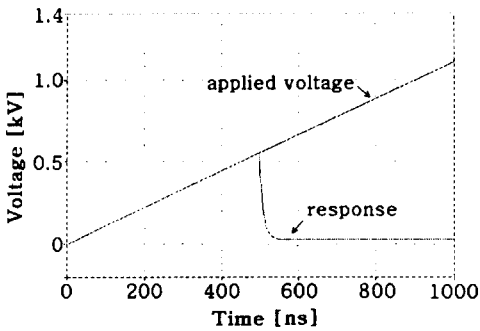
나타내었다.

그림 9는 파두준도가 대단히 낮은 200V/s 파형에 대한 응답파형으로 시뮬레이션 결과에서는 응답시간 950ms에서 방전개시전압 230V, 측정결과에서는 응답시간 940ms에서 방전개시전압 215V를 나타내었다. 이 차이는 본 실험에 적용한 가스튜-브의 직류방전개시전압이 $230V \pm 15\%$ 이므로, 가스튜-브의 상태와 주위온도에 따라 다소 차이를 갖기 때문이다. 또한 그림 9(b)의 파두부분에서 발생한 파형의 왜곡은 파형발생회로 자체에 기인한 것으로 본 실험값에는 영향을 주지 않는다.

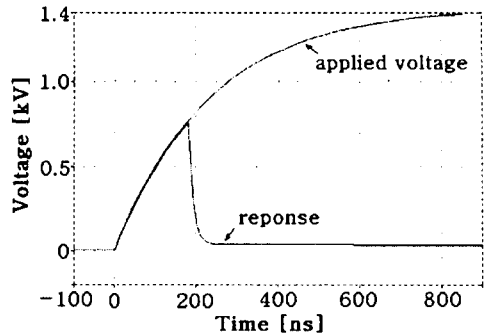
그림 10은 파두준도 $1kV/\mu s$ 에 대한 응답파형으로 시뮬레이션 조건에서 방전개시전압을 가스튜-브 제조사의 사양에 따라 550V로 설정하였으므로, 시뮬레이션 결과에서는 응답시간 500ns에

서 방전개시전압 550V를 나타내었고, 측정결과에서는 가스튜-브의 상태에 의존하여 응답시간 520ns에서 594V의 방전개시전압을 나타내어 오차범위 내에서 잘 일치함을 알 수 있다. 파형의 초기와 아-크영역에서의 진동성분은 써-지발생장치의 트리거 잡음과 회로내의 LC성분에 의한 진동성분으로 생각된다.

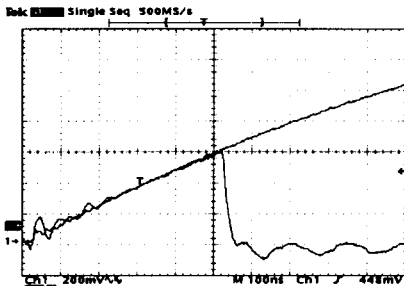
그림 11은 가스튜-브의 파두준도에 따른 기본 특성평가에 적용하는 파형 이외의 표준 뇌임펄스 전압에 대한 평가결과로 응답시간(180ns)과 방전개시전압(750V)이 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 이 경우에 시뮬레이션에서의 방전개시전압은 그림 4의 가스튜-브모델내의 TABLE에 정해진 $1kV/\mu s$ 와 $10kV/\mu s$ 에 설정된 방전개시전압에 따라 나타나게 된다.



(a) 시뮬레이션 결과

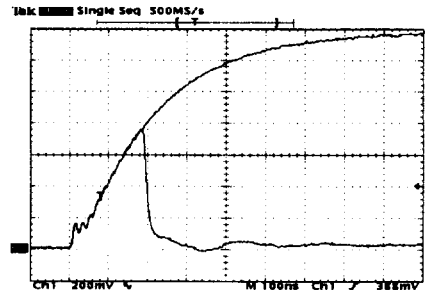


(a) 시뮬레이션 결과



[200 V/div, 100 ns/div]

(b) 측정 결과



[200 V/div, 100 ns/div]

(b) 측정 결과

그림 10 $1kV/\mu s$ 파형에 대한 결과 비교
Fig. 10 Comparison of results for $1kV/\mu s$ waveform

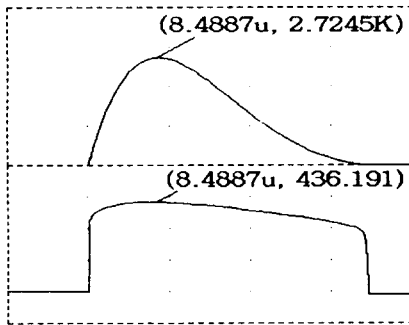
그림 11 $1.2/50\mu s$ $1kV$ 파형에 대한 결과 비교
Fig. 11 Comparison of results for $1.2/50\mu s$ $1kV$ waveform

3.2 산화아연 바리스터

제안한 바리스터의 PSpice모델은 IEC 1000-4-5에 의한 $8/20\mu s$ 표준 뇌임펄스 전류파형을 적용하여 2.2절의 산화아연 바리스터 모델링에 사용되었던 산화아연 바리스터(Siemens사 B40K150)로 시뮬레이션과 측정결과를 비교하였다. 바리스터의 전압-전류특성에서 알 수 있는 바와 같이 바리스터를 흐르는 전류의 크기에 따라 바리스터 양단의 제한전압이 달라지므로, 인가 전류의 크기를 변화하여 $8/20\mu s$ 2.72kA와 5.54kA에 대한 응답특성을 평가하여 그 결과를 그림 12와 13에 나타내었다. 인가 전류값의 설정에 있어서 초기에 3kA와

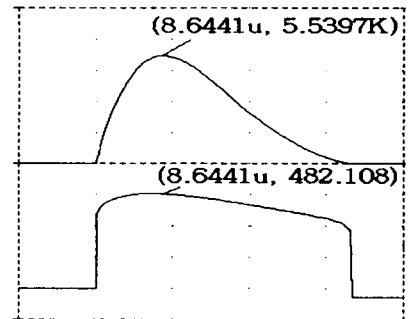
5kA로 설정하려고 하였으나, 본 연구에서 시험용으로 제작한 써-지발생장치에서 인가 전류값을 정확히 설정하는 것은 어려웠다. 그러나 이들 결과의 비교·평가에 있어서는 PSpice에서 인가전류를 실제 전류값과 동일하게 설정할 수 있으므로, 시뮬레이션 조건과 측정 조건을 동일하게 할 수 있었다. 또한 결과값은 PSpice의 눈금자(cursor)와 오실로스코프의 디지털 출력값을 이용하였다.

그림 12는 $8/20\mu s$ 2.72kA의 전류를 바리스터에 인가하였을 때 얻어진 파형으로 시뮬레이션에서 바리스터 양단의 제한전압이 약 436V이었으며, 측정결과에 있어서는 438V로 거의 일치하였다. 그림 13은 동일한 파형 5.54kA의 전류 인가시 얻



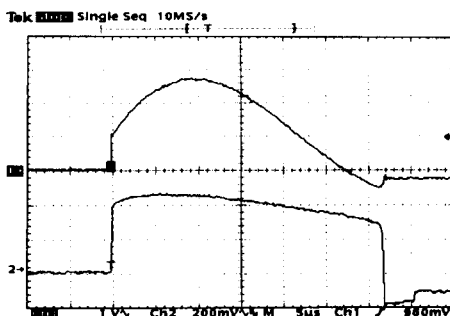
상 : 인가전류 [1 kA/div, 5 μs /div]
하 : 제한전압 [150 V/div, 5 μs /div]

(a) 시뮬레이션 결과(())



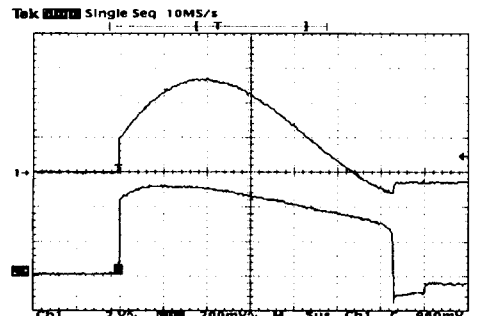
상 : 인가전류 [1 kA/div, 5 μs /div]
하 : 제한전압 [150 V/div, 5 μs /div]

(a) 시뮬레이션 결과(())



상 : 인가전류 [1 kA/div, 5 μs /div]
하 : 제한전압 [200 V/div, 5 μs /div]

(b) 측정 결과



상 : 인가전류 [1 kA/div, 5 μs /div]
하 : 제한전압 [200 V/div, 5 μs /div]

(b) 측정 결과

그림 12 $8/20\mu s$ 2.72kA 파형에 대한 결과 비교
Fig. 12 Comparison of results for $8/20\mu s$ 2.72kA waveform

그림 13 $8/20\mu s$ 5.54kA 파형에 대한 결과 비교
Fig. 13 Comparison of results for $8/20\mu s$ 5.54kA waveform

어진 파형으로 시뮬레이션 결과와 측정 결과는 각각 482V와 488V로 잘 일치하는 값으로 본 연구에서 제안한 모델의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 그리고 그림 12(b)와 그림 13(b)의 전류파형에서 파두부분의 급격한 상승은 써-지발생장치에서 바리스터로 전류인가시 바리스터 전도전압 이하에서 바리스터는 고임피던스로 써-지발생장치에서 인가되는 전압으로 나타나고, 전도영역 이후에 바리스터가 저임피던스로 변화하면서 바리스터의 전압-전류특성에 따른 전류가 흐르기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 과도이상전압 보호회로의 주소자인 가스류-브와 산화아연 바리스터의 PSpice 모델을 제안하였다.

가스류-브 모델은 PSpice의 전압제어전압원을 이용하여 정밀 전압제어스위치와 같이 기본 모델을 구성하였다. 또한 다양한 파두준도를 갖는 과도이상전압에 대해서도 정확한 보호동작을 나타낼 수 있도록, 모델 내에서 인가 파형의 파두준도를 검출하고 여기에 대응하는 방전개시전압을 설정하도록 모델을 확장하였다.

산화아연 바리스터 모델은 바리스터의 비선형 전압-전류특성의 수식을 전류제어전압원의 제어값으로 적용함으로써 실제 바리스터의 특성과 동일하게 모의할 수 있었다. 또한 제안한 모델의 신뢰성은 써-지발생장치로부터의 다양한 파형을 각각의 소자에 인가하여 시뮬레이션 결과와 실제 측정 결과를 비교함으로써 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제안한 가스류-브와 산화아연 바리스터의 모델은 PSpice 내장모델의 양방향 제너 다이오드와 함께 과도이상전압에 대한 보호회로의 설계와 개발에 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] William V. Jackson et. al, "Testing and Selection Surge Suppressors for Low - Voltage AC Circuits." IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 26, No. 6, pp. 976~982, 1990. 12.
- [2] S.B. Smith and Standler, "The Effects of Surges on Electronic Appliances", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 7, pp. 1275~1282, 1992. 7.
- [3] Francois D. Martzloff, "Surge Suppressors and Clamps", International Conference on EMC, pp. E01~E07, 1986. 7.
- [4] IEEE Working Group 3.4.11, "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, pp. 302~309, 1992. 1.
- [5] Steve Hageman, Model Transient Voltage Suppressor Diodes, MicroSim Corporation, 1996, pp. 155~167.
- [6] MicroSim, The Design Center PSpice Version 7.1, MicroSim Corporation, 1996, 10.
- [7] ANSI/IEEE C62.42, IEEE Guide for the Application of Gas Arrester Low - Voltage Surge Protective Devices, 1987, pp. 7~27
- [8] 길경석, 박영호, 송재용, "PSpice시뮬레이션을 위한 바리스터의 모델링", 97 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 춘계학술발표회 논문집, pp. 202~205, 1997. 5.
- [9] 길경석, 박영호, 송재용, "응답시간특성을 고려한 가스어레스터 모델", 97 대한전기학회 추계학술발표회 논문집, pp. 367~369, 1997. 11.
- [10] Ronald B. Standler, "Protection of Electronic Circuits from Overvoltages", A Wiley - Interscience Publication, pp. 117~145, 1989, 7.
- [11] IEC 1000 - 4 - 5, Surge Immunity Test, 1995, pp. 19~27

저 자 소 개



길경석(吉曠碩)

1962년 6월 30일생. 1984년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1996년 동 대학원 전기공학과(공학박사). 1996년~현재 한국해양대학교 공과대학 전기공학과 조교수



송재용(宋在鏞)

1975년 1월 28일생. 1997년 2월 한국해양대 전기공학과 졸업. 1999년 2월 한국해양대 전기공학과 졸업(공학석사). 1999년 3월~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



박진길(朴進吉)

1939년 1월 1일생. 1963년 한국해양대교 기관학과 졸업. 1975년 동 대학원 기관학과 수료(공학석사). 1982년 동 대학원 기관학과 수료(공학박사). 1963년 2월~1972년 11월 한국전력공사. 1972년 11월~현재 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수.