

# 외부 전자파 펄스에 의해 전송선로에 유기되는 과전류 및 과전압 보호회로의 해석

## (Analysis of Protection Circuits of Overcurrent and Overvoltage on Transmission Line Induced by External Electromagnetic Pulse)

河 憲 兌\*, 金 世 潤\*, 李 經 宰\*, 吳 明 煥\*\*

(Huen Tae Ha, Se Yun Kim, Kyung Jae Lee, and Myung Hwan Oh)

### 要 約

비선형 보호 소자가 있는 평행 두 도선 전송선에 외부의 전자파 펄스가 입사할 경우, 부하측에 유기되는 과전류 및 과전압을 계산할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 특수한 형태의 입사파와 보호회로 형태에 대해서는 해석적으로 구하였다. 이 경우 해석적으로 구한 값과 알고리즘을 이용하여 수치계산으로 구한 값을 비교함으로써 제안한 알고리즘의 타당성을 검토하였다.

### Abstract

A new algorithm for calculation of overcurrent and overvoltage at load for parallel two-wire transmission line with nonlinear protection circuits induced by an external electromagnetic pulse is suggested. The rigorous solution is obtained for a particular type of the incident waveform and protection circuit. The validity of our algorithm is checked by comparing numerical results to the analytic solution in the particular case.

### I. 서 론

국내 개발된 전자교환기 TDX-1의 보급은 주로 농어촌 지역에 이루어졌는데, 지역특성 때문에 가입자 선로의 길이가 수 km 이상되는 곳이 많아 지하매

설보다는 주로 가공선로를 사용하고 있다. 이러한 가공선로에 번개에 의한 유도뢰로부터 발생하는 강한 전자파 펄스가 입사할 경우 가입자 선로에 강한 펄스 전류가 유도되어 순간적으로 교환기측 부하에 과전압이 걸리고 과전류가 흐르게되어 교환기의 오동작을 일으키거나 심하면 시스템 자체를 파괴할 위험이 있다.<sup>1)</sup> 이러한 과전압과 과전류로부터 교환기 시스템을 보호하기 위해 각종 비선형 소자를 이용한 보호회로를 교환기 출입단에 설치하고 있다. 따라서 수 km 이상의 가입자 선로를 갖는 교환기측 부하에 각종 비선형 보호소자를 달았을 경우 외부의 강한 전자파 펄스에 의해 유기되는 과전압과 과전류로부터 얼마나 교환기측 부하를 잘 보호하는가를 살펴볼

\*正會員, 韓國科學技術研究院 應用電子研究室 (Appl. Electron. Lab., KIST)

\*\*正會員, 韓國科學技術研究院 應用物理·電子部 (Div. of Appl. Phys. and Electron., KIST)

接受日字: 1990年 7月 30日

(※ 본 연구는 한국전자통신연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.)

필요가 있다.

수 km 이상의 길이를 갖는 가입자 선로는 회로이론으로 풀기 보다는 전송선(transmission) 이론으로 다루어야 한다. 일반적으로 하나의 주파수만을 갖는 전자파가 전송선에 입사할 경우 부하 임피던스에 따라 선로에 유기되는 유도 전류가 달라지며, 주파수가 변하면 더욱 크게 변한다.<sup>17-19</sup> 그런데 과전류 및 과전압 보호소자를 포함한 교환기측 부하 임피던스는 비선형이며, 입사되는 전자파 펄스는 매우 넓은 주파수 대역을 갖게되어 보호하고자 하는 교환기측 실제 부하에 흐르는 유도전류를 해석하기가 매우 어렵다.

본 논문에서는 임의의 펄스 형태를 갖는 전자파가 평행 두 도선으로 구성된 전송선로에 입사할 경우 임의의 비선형 보호소자를 포함하는 부하에 유기되는 유도전압과 전류를 계산할 수 있는 방안을 제시하였으며, 이를 컴퓨터 프로그래밍화 하였다. 먼저 임의의 순간에 부하측 임피던스는 일정함으로 임의의 전자파 펄스에 의해 전송선로에 유기되는 각각의 주파수 성분에 대한 유도 전류를 구하여 푸리에 적분을 취함으로써 그 순간의 유도 전압과 전류를 구한다. 이때 구한 유도 전압과 전류값에 따라 비선형 보호소자의 임피던스를 변경한 뒤, 다음 순간에 입사되는 전자파 펄스에 대한 유도 전압과 전류를 다시 계산한다. 이러한 과정을 시간에 따라 순차적으로 반복함으로써 비선형 보호소자의 과전압 및 과전류 보호 특성을 알 수 있다. 입사되는 전자파의 펄스 형태와

입사 방향이 특수하고, 비선형 보호소자의 특성이 간단한 경우 일정한 임피던스를 갖는 실제 부하에 흐르는 전류를 해석적으로 구하였다. 특히 이 경우에 대해 수치 계산한 결과가 해석적으로 구한 값과 일치함을 보임으로써 본 논문에서 개발한 컴퓨터 프로그램의 타당성을 확인하였다.

### II. 선형부하의 유도전류

그림 1과 같이 도선의 반지름이  $a$ 이고, 두 도선의 간격이  $b$ 이며, 두 도선의 길이가  $s$ 인 평행 두 도선의 양 끝에 임피던스  $Z_0$ 와  $Z_s$ 가 달려 있다고 한다. 이러한 전송선으로 전송 방향인  $z$ 축과  $\theta_1$ 의 각을 이루며 주파수를  $f$ 를 갖는 전계  $\mathbf{E}^i$ 가 입사할 경우 선형부하인  $Z_s$ 에 흐르는 전류  $I_s$ 는 다음과 같이 주어진다.<sup>7,8</sup>

$$I_s(k) = \frac{1}{D} \int_0^s dz [E_z^i(b, z, k) - E_z^i(0, z, k)] \times [Z_c \cos kz + jZ_0 \sin kz] + \frac{Z_c}{D} \int_0^b dx E_x^i(x, 0, k) - \frac{Z_c \cos ks + jZ_0 \sin ks}{D} \int_0^b dx E_x^i(x, s, k) \quad (1)$$

여기서 파수  $k$ , 전송선 특성 임피던스  $Z_c$ , 상수  $D$ 는 다음과 같다.<sup>17</sup>

$$k = 2\pi f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (2a)$$

$$Z_c = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{b}{a} \quad (2b)$$

$$D = (Z_c Z_0 + Z_c Z_s) \cos ks + j(Z_c^2 + Z_0 Z_s) \sin ks \quad (2c)$$

식 (2)에서  $\mu_0$ 와  $\epsilon_0$ 는 자유 공간내의 투자율과 유전율을 각각 의미한다.

펄스형태의 입사전계  $\mathbf{e}^i$ 는 여러가지 주파수 성분을 가지고 있으므로 푸리에 변환으로 부터 파수  $k$ 를 갖는 성분  $\mathbf{E}^i$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\mathbf{E}^i(x, z, k) = \int_{-\infty}^{\infty} dt \mathbf{e}^i(x, z, t) e^{-jkct} \quad (3)$$

여기서  $c$ 는 자유공간에서의 광속을 의미한다. 따라서 펄스 형태의 입사전계  $\mathbf{e}^i$ 가 그림 1과 같은 전송선로에 입사할 경우 선형부하  $Z_s$ 에 흐르는 순간 유도전류  $i_s$ 는 식 (3)의 관계를 이용하여 식 (1)의  $I_s(k)$ 에 대한 역 푸리에 적분으로 얻을 수 있다.

$$i_s(t) = \frac{c}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk I_s(k) e^{jkct} \quad (4)$$

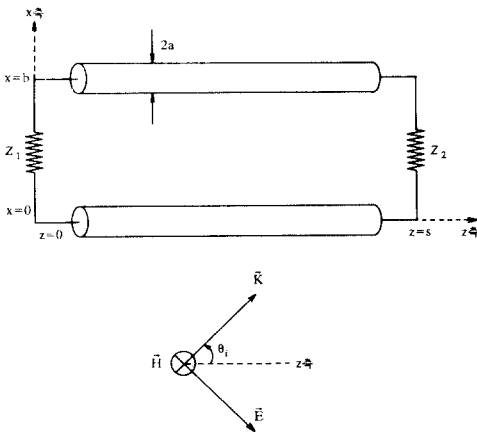


그림 1. 평행 두 도선으로 구성된 전자파 펄스의 입사  
Fig. 1. Incidence of electromagnetic pulse on parallel two-wire transmission line.

Ⅲ. 비선형 부하의 유도 전류

1. 반복 계산 방법

낙뢰로부터 복사되는 전자파 펄스가 그림 1과 같은 전송선에 입사할 경우 선형 부하  $Z_s$ 에 흐르는 유도전류  $i_s$ 는 순간적으로 매우 큰 값을 갖게되어 선형 부하에 손상을 일으킨다. 따라서 그림 2와 같이 실제 선형 부하  $Z_1$ 과 직렬로 비선형 임피던스  $Z_1$ 이 달려있고, 이들과 병렬로 또 다른 비선형 임피던스  $Z_2$ 가 달려진 것을 부하측 임피던스  $Z_s$ 라고 하자. 이때  $Z_2$ 의 임피던스는 비선형으로 부하측에 걸리는 유도전압  $v_s$ 가 클수록 그 값이 줄도록 취하여 과전류  $i_s$  실제 부하인  $Z_1$ 측으로 흐르지 못하도록 하고,  $Z_1$ 은  $v_s$ 가 클수록 임피던스 값이 커지도록 취하여 과전압  $v_s$ 가  $Z_1$ 에 걸리지 않도록 해야한다.

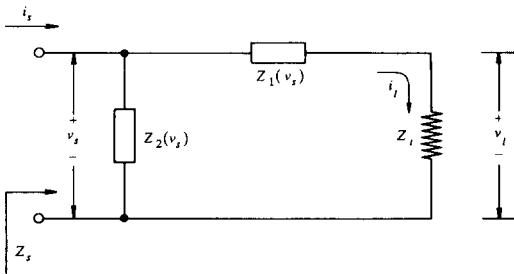


그림 2. 두개의 비선형 소자로 보호된, 부하측 임피던스

Fig. 2. Load impedance protected by two nonlinear devices.

$t > 0$ 인 시간부터 전계 펄스  $e^1$ 가 그림 1과 같은 전송선에 입사하며, 이때  $Z_s$ 가 그림 2와 같은 비선형 보호소자를 포함하고 있을 경우 실제 부하인  $Z_1$ 에 걸리는 전압  $v_1$ 과 여기에 흐르는 전류  $i_1$ 을 구하자. 먼저, 전계 펄스  $e^1$ 가 전송선에 입사되는 시간인  $0 < t \leq t_w$ 을  $N$ 개의 미소 구간으로 나누고,  $n$ 번째 시간인  $t = t_n$  일때의 부하측 유도 전압  $v_s(n)$ 을 안다고 하자.  $t = t_n$  일때의  $v_s$ 를 알면 이때의 비선형 소자들의 임피던스  $Z_1$ 과  $Z_2$ 가 정해지는데, 이들을 각각  $Z_1(n)$ 과  $Z_2(n)$ 으로 표현하자. 따라서 그림 2로 부터  $t = t_n$  일때의 부하측 임피던스  $Z_s(n)$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_s(n) = \frac{[Z_1 + Z_1(v_s(n))] Z_2(v_s(n))}{Z_1 + Z_1(v_s(n)) + Z_2(v_s(n))} \quad (5)$$

그런데 입사전계 펄스  $e^1$ 는 아는 양이므로, 이를 식 (3)에 대하여 푸리에 변환을 취하면  $e^1$ 의 파수 영역인  $E^1$ 를 구할 수 있다. 따라서  $t = t_n$ 으로부터 미소 시간 후인  $t = t_{n+1}$ 에 부하  $Z_s(n)$ 에 유기되는 전류  $i_s(n+1)$ 은  $Z_s(n)$ 과  $E^1$ 를 식 (1)에 대입하여  $I_s(k)$ 를 구한 뒤 이를 식 (4)에 대입하고  $t$ 를  $t_{n+1}$ 로 취하여 역푸리에 적분을 계산하면 구할 수 있다. 여기서 부하측 임피던스  $Z_s$ 는  $t_n < t \leq t_{n+1}$  동안 식 (5)와 같이  $Z_s(n)$ 으로 일정하다고 볼 수 있을 정도로 미소시간  $t_{n+1} - t_n$ 을 충분히 작게 잡아야 한다. 따라서  $t = t_{n+1}$  일때의  $v_s, v_1, i_1$ 을 각각  $v_s(n+1), v_1(n+1), i_1(n+1)$ 이라고 하면 그림 2로 부터 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$v_s(n+1) = Z_s(n) i_s(n+1) \quad (6a)$$

$$v_1(n+1) = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_1(v_s(n))} v_s(n+1) \quad (6b)$$

$$i_1(n+1) = \frac{v_1(n+1)}{Z_1} \quad (6c)$$

$t = t_{n+1}$  일때의 비선형 소자의 임피던스  $Z_1$ 과  $Z_2$ 들은  $v_s$ 가  $t = t_n$  일때의 값인  $v_s(n)$ 과는 달리 식 (6a)와 같이  $v_s(n+1)$ 로 변하였기 때문에, 비선형 특성으로 부터  $Z_1(n+1)$ 과  $Z_2(n+1)$ 로 바뀐다. 따라서  $t = t_{n+2}$  일때의 부하측 유도 전류  $i_s(n+2)$ 는 앞에서 기술한  $i_s(n+1)$ 을 구하는 과정과 같은 방법으로 구하면 된다. 이러한 계산과정을 순차적으로 반복함으로써 실제 부하인  $Z_1$ 에 걸리는 전압  $v_1$ 과 여기에 흐르는 전류  $i_1$ 을 시간  $t = t_1, t_2, \dots, t_n$ 에 대해 모두 계산할 수 있다. 특히  $t = 0$  일때  $e^1 = 0$ 이므로  $v_s$  또한 0이다. 따라서  $Z_1$ 과  $Z_2$ 의 초기치인  $Z_1(0)$ 과  $Z_2(0)$ 은  $v_s = 0$  일때의 임피던스를 취하면 된다. 이러한 반복 계산 방법을 그림 3에 도표화 하여 나타내었다.

2. 해석적인 방법

일반적으로 과전압 및 과전류 보호 소자를 포함하고 있는 비선형 부하가 달려진 전송선에 임의의 전자파 펄스가 입사할 경우 부하측에 흐르는 유도 전류를 해석적으로 구할 수 없다. 그러나 입사와 전계 펄스  $e^1$ 와 비선형 보호 소자  $Z_1$ 과  $Z_2$ 가 특별한 형태로 주어질 경우 해석적인 방법으로 정확한 해를 얻을 수 있다. 먼저 그림 1에서  $Z_0$ 는  $Z_c$ 와 같고  $E^1$ 는 다음과 같다고 한다.

$$E^1(x, z, k) = z_0 P(k) e^{-jkx} \quad (7a)$$

$$P(k) = jP_0 \frac{k(k_2 - k_3)}{(k - jk_1)(k - jk_2)(k - jk_3)(k - jk_4)} \quad (7b)$$

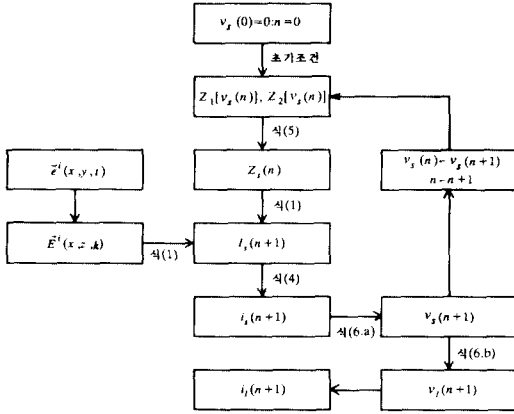


그림 3. 비선형 부하일 경우 반복 계산방법  
 Fig. 3. Iterative calculation method for nonlinear load with two nonlinear devices.

여기서  $k_1, k_2, k_3, k_4$ 는 임의의 양수로  $k_4 > k_3 > k_2 > k_1$ 의 관계가 있다고 한다. 또 그림 2에서  $Z_1$ 도  $Z_c$ 와 같고,  $Z_1$ 과  $Z_2$ 는 부하측에 걸리는 전압  $v_s$ 에 대해 다음과 같은 비선형 특성을 갖는다고 한다.

$$Z_1(v_s) = Z_c F(v_s) \tag{8a}$$

$$Z_2(v_s) = \frac{Z_c}{F(v_s)} \tag{8b}$$

여기서 함수  $F$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$F(v_s) = \begin{cases} \frac{|v_s| - v_{max}}{v_{max}} & , |v_s| \geq v_{max} \\ 0 & , |v_s| < v_{max} \end{cases} \tag{9}$$

$Z_s$ 는 비선형 임피던스인데 시간  $t$ 일때만 구한다고 하여 임의의 상수라고 보고 식(7a)를 식(1)에 대입하여  $I_s(k)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$I_s(k) = j \frac{P(k)(1 - e^{-k_1 b})(1 - e^{-k_2 s})}{(Z_c + Z_s)k} \tag{10}$$

위에서 구한  $I_s(k)$ 와 식(7b)를 식(4)에 대입하여 역푸리에 적분을 계산하면  $i_s(t)$ 는 다음과 같다.

$$i_s(t) = \frac{v(t)}{Z_c + Z_s} \tag{11}$$

여기서

$$v(t) = c^2 P_0(k_2 - k_1) \left[ \frac{g(k_1 t)}{(k_1 - k_2)(k_1 - k_3)(k_1 - k_4)} + \frac{g(k_2 t)}{(k_3 - k_1)(k_2 - k_3)(k_2 - k_4)} + \frac{g(k_3 t)}{(k_3 - k_1)(k_2 - k_3)(k_3 + k_4)} \right]$$

$$+ \frac{g(k_4 t)}{(k_4 - k_1)(k_4 - k_2)(k_4 - k_3)} \tag{12}$$

$$g(k t) = u(t) e^{-k c t} - u\left(t - \frac{b}{c}\right) e^{-k c t - b} - u\left(t - \frac{s}{c}\right) e^{-k c t - s} + u\left(t - \frac{b+s}{c}\right) e^{-k c t - b - s} \tag{13}$$

$$u(t) = \begin{cases} 1 & , t > 0 \\ 0 & , t < 0 \end{cases} \tag{14}$$

그런데 시간  $t$ 일때  $i_s$ 는  $v_s$ 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$i_s(t) = \frac{v_s(t)}{Z_s} = \frac{(Z_c + Z_1)Z_2}{Z_c + Z_1 + Z_2} v_s(t) \tag{15}$$

식(8)의 관계를 식(15)에 대입하고, 식(11)의 관계를 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$v(t) = \left[ F(v_s) + 1 + \frac{1}{F(v_s) + 1} \right] v_s(t) \tag{16}$$

식(9)의 관계식을 식(16)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$v(t) = \begin{cases} 2v_s(t) & , |v_s| < v_{max} \\ \left[ \frac{v_s(t)}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{v_s(t)} \right] v_s(t) & , |v_s| \geq v_{max} \end{cases} \tag{17}$$

식(17)로 부터  $v_s(t)$ 를 구하면,

$$v_s(t) = \begin{cases} \frac{v(t)}{2} & , |v_s| < v_{max} \\ \frac{v(t)}{\sqrt{[v(t) - v_{max}]v_{max}}} & , |v_s| \geq v_{max} \end{cases} \tag{18}$$

으로 되며,  $v_1(t)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_1(t) = \begin{cases} \frac{v(t)}{2} & , |v_s| < v_{max} \\ v_{max} & , |v_s| \geq v_{max} \end{cases} \tag{19}$$

실제 부하인  $Z_2$ 에 흐르는 순간 전류  $i_1$ 은 식(19)에서 구한  $v_1$ 을  $Z_2$ 로 나누면 된다.

#### IV. 수치 계산 및 검토

본 논문에서 제안한 알고리즘의 타당성을 확인하기 위해 특수한 형태의 입사파와 부하 형태에 대해 해석적으로 구한 식(19)의 부하측 유기 전압과 알고리즘을 바탕으로 임의의 입사파, 부하 형태에 대해 개발된 프로그램에 식(19)를 얻기 위해 사용되어진 입사파 형태와 부하 형태를 입력으로 하여 구한 부하측 유기 전압을 비교 제시하였다. 각 경우에 대해 수치 계산시 전송선 구조와 입사파 형태를 정하기 위해 사용된 상수값은 표 1에 나타내었다.

표 1. 수치계산에 이용된 상수  
Table 1. Constants in numerical simulation.

a	0.5 cm	$k_1$	$5 \times 10^{-5}/m$
b	10 cm	$k_2$	$1.5 \times 10^{-4}/m$
s	100 m	$k_3$	$2.5 \times 10^{-4}/m$
$P_o$	$1 \times 10^4 V/m$	$k_4$	$3.5 \times 10^{-4}/m$
$V_{max}$	30 V		

먼저 비선형 보호 소자의 역할을 알아보기 위해 비선형 보호 소자가 있을때와 없을때 해석적으로 구한 부하측 유기전압을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 보듯이 이때의 비선형 보호 소자는 아무리 큰 세력의 전자파 펄스가 입사되더라도 부하측 유기 전압이 300V 이상 넘지 않도록 함을 알 수 있다.

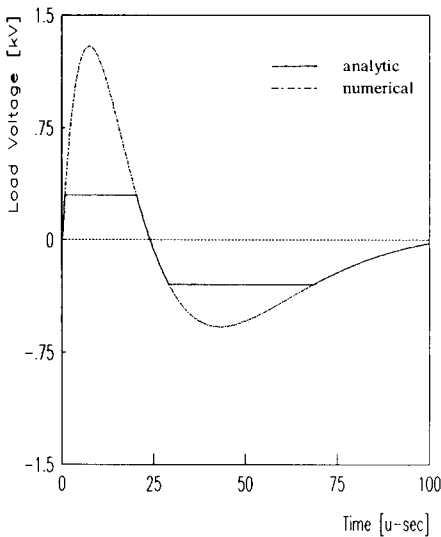
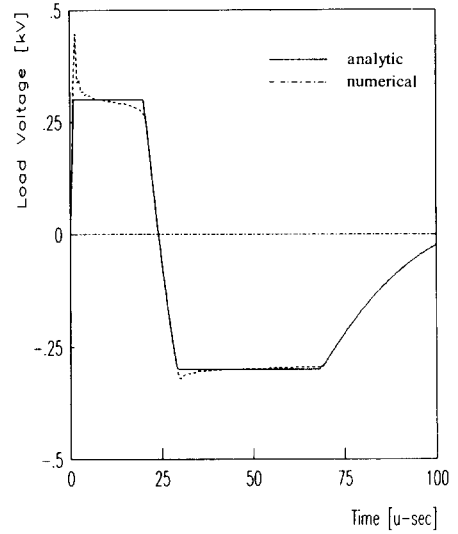


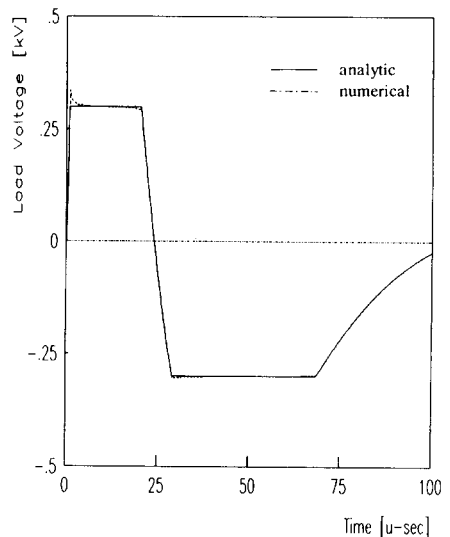
그림 4. 해석적으로 구한 부하측 유기 전압  
Fig. 4. Induced load voltage calculated by analytic method.

그림 4와 동일한 형태의 입사파와 보호 소자에 대해 본 논문에서 제시한 알고리즘을 써서 수치 계산을 행하였다. 여기서 0에서  $100\mu s$  사이의 시간을 N개의 등간격으로 나누었는데 본 논문에서는 200구간과 1000 구간의 두가지 경우에 대해 수치 계산으로 얻은 부하측 유기 전압을 그림 5(a)와(b)에 각각 나타내었다.

그림 5(a)를 볼 때 비선형 보호 소자들이 동작하기



(a)



(b)

그림 5. 알고리즘으로 구한 부하측 유도 전압  
(a)  $N=200$  (b)  $N=1000$   
Fig. 5. Induced load voltage calculated by numerical algorithm.  
(a)  $N=200$ , (b)  $N=1000$ .

시작하는 300V 근처에서는 해석적인 해와 알고리즘을 통해 얻은 값이 차이를 보이는데 이는 알고리즘상 현재의 유기전압이 과거의 부하 값으로 구해지기 때문이며 오차의 정도는 입사파의 변화 정도가 클수록 크게 나타난다. 이러한 문제는 시간 간격을 줄여

계산함으로써 해결될 수 있는 것으로 1000 구간으로 나누어 계산한 그림 5(b)의 결과에서는 그림 5(a)에 비해 오차가 두드러지게 줄어드는 것을 볼 수 있다.

외부에서 입사되는 강한 세력의 전자파에 대해 부하측 양단 전압이 300V 이상 되지 않는 이유는 부하측 앞단의 보호 소자가 부하측에 과전압이 걸리지 않도록 부하량을 변화시키기 때문인데, 그 변화 상태를 알아보기 위해  $Z_1$ 과  $Z_2$ 를 해석적으로 구한 부하

측 유기전압과 함께 그림 6(a)와 (b)에 각각 나타내었다. 그림 6(a)와 (b)를 볼때  $Z_1$ 은 유기되는 전압이 클수록 그 값이 커져 부하에 과전압이 걸리는 것을 방지하고,  $Z_2$ 는 유기되는 전압이 클수록 그 값이 작아져서 부하에 과전류가 흐르지 않도록 막아주고 있다. 이와같이 그림 6(a)와 (b)는  $Z_1$ 과  $Z_2$ 가 유기 전압의 크기에 따라 동시에 부하값을 조정함으로써 강한 전자파 펄스에 의해 전송선에 유기되는 과전압과 과전류로부터 부하를 효과적으로 보호하고 있음을 잘 보여주고 있다.

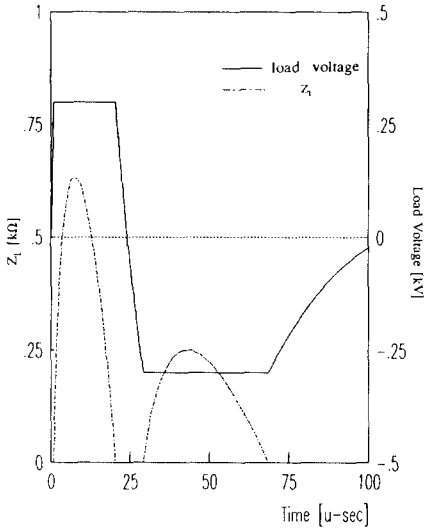
V. 결 론

본 논문에서는 비선형 보호 소자가 달린 전송 선로에 큰 세력의 전자파 펄스가 입사할 경우 부하측에 유기되는 전류, 전압을 계산할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하였으며 이를 바탕으로 임의의 입사파와 보호 소자 형태에 대해 계산 가능한 프로그램을 개발하였다. 특수한 형태의 입사파와 부하 형태에 대해 구한 해석적인 값과 같은 입력 자료로 알고리즘을 통해 구한 수치 결과를 비교함으로써 그 타당성을 확인할 수 있었다.

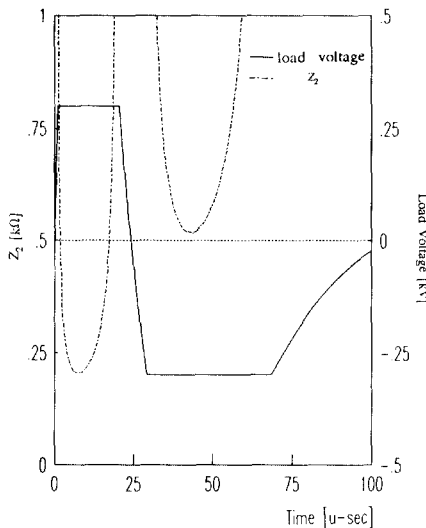
앞으로 유도 부하 전류에 대한 각 변수의 영향을 살펴봄으로써 현실적인 상황에서 부하측을 보호할 수 있는 방안을 얻을 수 있는 연구가 필요하다.

參 考 文 獻

- [1] D.W. Bodle and P.A. Gresh, "Lightning surges in paired telephone cable facilities," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 40, pp. 547-576, Mar. 1961.
- [2] E. Bennison, A.J. Ghazi, and P. Perland, "Lightning surges in open wire, coaxial, and paired cables," *IEEE Trans. Commun. Technol.*, vol. COM-21, no. 10, pp. 1136-1142, Oct. 1973.
- [3] H.J. Price and A.K. Agrawal, "The response of a transient line illuminated by lightning-induced electromagnetic field," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-22, no. 3, pp. 150-156, Aug. 1980.
- [4] H. Koga and T. Motomitsu, "Lightning-induced surges in paired telephone subscriber cable in Japan," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-20, no. 3, pp. 152-161, Aug. 1985.
- [5] F. Deguchi and H. Yamada, "Lightning surge protection design for subscriber line



(a)



(b)

그림 6. 비선형 보호 소자들의 임피던스 특성  
(a)  $Z_1$  (b)  $Z_2$

Fig. 6. Impedance characteristics of nonlinear protective devices.

interface circuits in D70 digital switching system," *Review of the ECI*, NTT, Jpn., vol. 33, no. 2, pp. 332-338, 1985.

[6] 임용훈, 이윤주, 남홍순, 전형구, "전자 교환 기용 보호소자에 관한 연구," 전자통신, 제9권, pp. 173-183, 1988년 1월.

[7] C.D. Taylor, R.S. Satterwhite and C.W. Harrison, Jr., "The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-13, no. 6, pp. 987-989, Nov. 1965.

[8] A.A. Smith, Jr., *Coupling of External Electromagnetic Fields to Transmission Lines.* Wiley-Interscience Publication, 1977.

[9] K.S.H. Lee, "Two parallel terminated conductors in external field," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-20, no. 2, pp. 288-296, May 1978.

[10] Y. Kami and R. Sato, "Circuit-concept approach to externally excited transmission lines," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-27, no. 4, pp. 177-183, Nov. 1985.

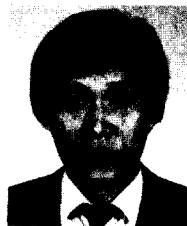
감사의 글

출입 회로 연구실 여러분께 심심한 사의를 포함합니다.

著 者 紹 介



河 憲 兌 (準會員)  
 1965年 7月 2日生. 1988年 2月 서울대 전기공학과 졸업(공학사). 1990年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업. 1990年 ~ 현재 한국과학기술연구원 응용물리 전자 연구실 연구원. 주관심분야 는 EMI/EMC, Microwave공학 등임.



李 經 宰 (正會員)  
 1953年 6月 14日生. 1984年 2月 서울산업대학 전기공학과 졸업(공학사). 1988年 8月 한양대학교 산업대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1971年 2月 ~ 현재 한국 과학기술연구원 응용전자연구실 연구원. 주관심분야는 EMC/EMI, Microwave공학 등임.

金 世 潤 (正會員) 第25卷 第8號 參照  
 현재 한국과학기술연구원 응용전자연구실 선임 연구원

吳 明 煥 (正會員) 第26卷 第11號 參照  
 현재 KIST 광·전 기술센터 장