

외부 전자파 펄스에 대한 보호소자들이 달린 다중전송선의 반응

(Response of Multiconductor
Transmission Line Terminated
by Protective Devices to an
External Electromagnetic Pulse)



김 세 윤

(Se-Yun Kim)

한국과학기술연구원 정보전자연구부

낙뢰나 핵폭발시 방출되는 강력한 전자파 펄스가 주변의 전기 및 전자기기에 입사될 경우 강한 서어지 (surge) 형태의 유도전류가 기기내부에 흐르게 되어 기기의 오동작 또는 파손을 일으키게 된다. 이러한 전자파 펄스의 유도장해의 해석 및 대책에 관한 연구를 통칭하여 EMP(electromagnetic pulse)라고 부른다. 본 논문에서는 EMP의 대표적인 사례로서 임의의 전자파 펄스가 다중도선으로 구성된 전송선에 입사시 비선형 보호소자에 의해 보호된 단말부하에 걸리는 유도전압을 예측할 수 있는 해석기법을 소개하고, 계산결과를 보이기로 한다.

이미 140여년전 최초의 전신망이 구축되었던 당시부터 유도낙뢰에 의한 전신전달의 장애가 심하면 전신선로의 절단 또는 전신단말 기기의 파손같은 문제가 발생하였다. 현재도 전화가입자 선로에 유기된 낙뢰서어지에 의해 교환기가 파손되기도 한다. 물론 교환기의 주 배전반(MDF)에 각종 보호소자들을 부착하여 낙뢰서어지를 억제하고는 있지만 충분하지 못할 경우가 있다[1-3].

최근 임의의 전자파 펄스가 평행 두 도선으로 구성된 전송선에 입사시 전송선 양단의 선형 부하에 걸리는 유도전압을 계산하고, 한쪽 부하 전단에 임의의 비선형 임피던스 특성을 갖는 보호소자들이 첨가되었을 경우에 대해 순간 시간 선형모형을 이용한 반복 계산기법을 개발하여 실제 보호하고자 하는 선형부하의 유도전압을 계산한 바 있다[4,5]. 본 논문에서는 이를 확장하여 완전도체로 된 접지면이 있을 경우 다중도선에 대해 해석할 수 있는 계산기법을 유도하였으며, 수치계산을 통하여 개발된 계산기법의 유용성을 입증하였다[6].

II. 해석기법

1. 비선형 전송선 방정식

그림 1에서 보인 바와 같이 z축 방향으로 평행한 N개의 도선이 y=0에 있는 접지면위에 임의로 분포되어 있다고 한다. 이 때 n번째 선로의 도체 반경은 a_n 이며 중심은 (x_n, y_n) 에 있다고 한다. 이러한 N개의 도선 양단인 z=0와 z=l에 그림 2와 같은 임피던스 회로망이 달려있다고 한다. z=0의 $[Z_1]$ 은 $N \times N$ 임피던스 행렬로 N개의 선로 상호간의 단말 부하 특성

을 나타내고, $z=1$ 에 있는 $[Z_2]$ 도 마찬가지이다. 그런데 $z=1$ 에 있는 $N \times N$ 행렬 $[R]$ 은 보조소자로 구성된 비선형 임피던스 행렬을 나타낸다.

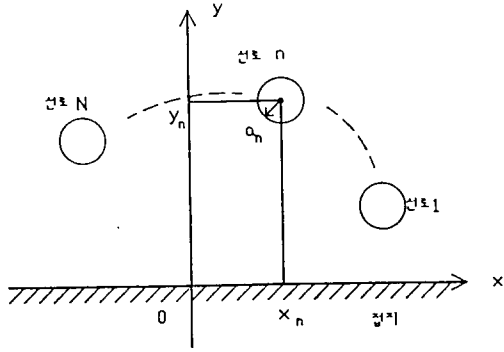


그림 1. 접지면위의 N개의 다중선로의 단면구조

외부로부터 이러한 전송선로로 입사되는 전자파는 그림 3과 같이 입사의 k' 방향으로 입사하며, 접지면에 의한 반사파는 k'' 방향으로 진행한다고 한다. 또한 입사전계 E' 는 그림 4와 같은 비대칭 삼각 펄스 형태로 $t > 0$ 인 순간부터 전송선에 인입된다고 한다. 이러한 입사 전자파 펄스에 의해 n번째 전송선의 임의의 z 지점에서 시간 t일 때 유기된 전압과 전류를 각

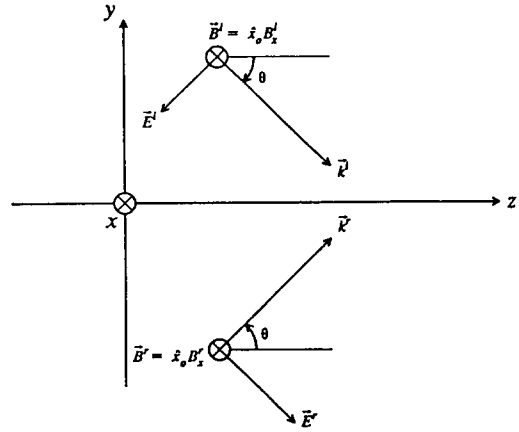


그림 3. 입사파와 영사파의 진행방향

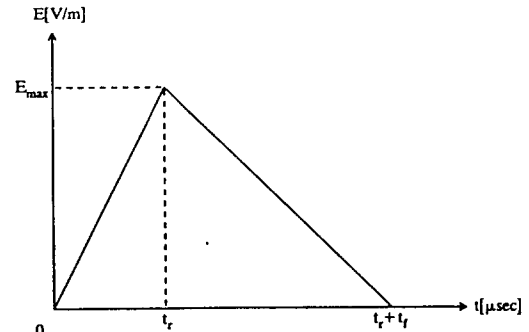


그림 4. 입사파의 펄스 형태

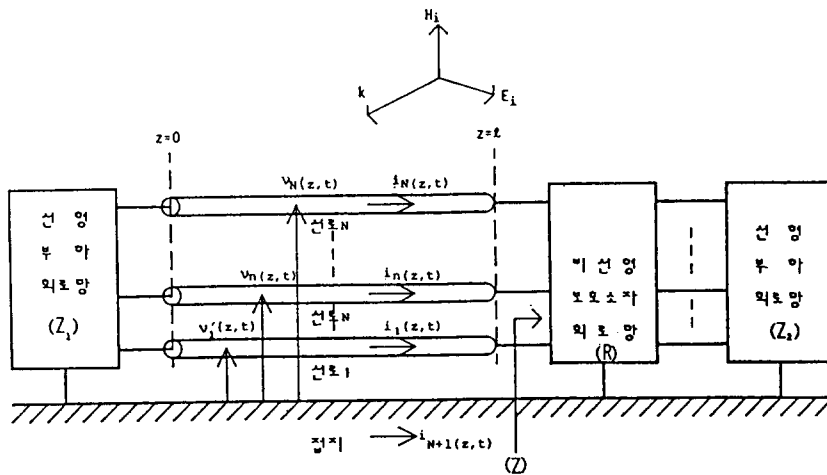


그림 2. 외부 전파펄스에 노출된 접지면위의 N개의 다중선로로 구성된 전송선의 양단인 $z=0$ 와 1 에 각각 비선형 호히로망으로 구성된 부하가 달린 구조.

각 $v_n(z, t)$ 와 $i_n(z, t)$ 로 표현한다. 이 때 유기전압은 접지면을 기준으로 정의되며, 유기전류의 방향은 +z 방향으로 취한다. 여기서 접지면에 흐르는 전류를 $i_{N+1}(z, t)$ 라고 표현하였으며, 접지면은 완전도체라고 가정하였다.

N개의 다중 도선중 n번째와 m번째 도선간에는 그림 5와 같이 $z=0$ 에 $N \times N$ 행렬 $[Z_1]$ 요소인 도선 상호간의 임피던스 Z_{0nm} 이 달려 있고, r번째 도선과 접지간에도 임피던스 Z_{0nn} 이 달려 있다고 한다. 같은 방법으로 $z=1$ 인 위치에서의 선형부하 행렬 $[Z_2]$ 도 구성한다. 그리고 보호소자들은 저항만 갖는 소자들로 각 선로와 접지간에는 그 지점의 전압에 따라 비선형적으로 저항이 변하는 R_v 를 달고, 그 뒤 직렬로 그 지점에 흐르는 전류에 따라 변하는 비선형 저항 R_i 가 달려 있다고 한다. 편의상 $z=1$ 에서 부하측의 총 임피던스 행렬을 $[Z]$ 로 표현한다. 또한 그림 1에서 도체 반경 a_n 은 인접한 도체간의 최소 거리에 비해 매우 작다고 가정하였는데, 이는 도체 상호간의 인덕턴스나 캐패시턴스 계산을 편하게 하기 위함이다. 또 N개의 선로간의 최대 파장에 비해 매우 작다고 가정한다. 따라서 다중선로로 전파되는 파는 TEM 모드만이 가능하므로 다중선로의 전자파 유도 현상은 다음과 같은 전송선 방정식을 푸는 문제로 바꿀 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial z} v(z, t) + [L] \frac{\partial}{\partial t} i(z, t) = v_s(z, t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} i(z, t) + [C] \frac{\partial}{\partial t} v(z, t) = i_s(z, t) \quad (2)$$

여기서 $[L]$ 과 $[C]$ 은 각각 전송선의 단위 길이당 인덕턴스와 캐패시턴스를 나타내는 $N \times N$ 행렬이다. 또한 v_s 와 i_s 는 외부 전자파 펄스에 의한 다중 전송선의 유도 전압 및 전류로 n번째 성분들은 각각 다음과 같다.

$$v_{sn}(z, t) = - \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{y_n} dy \{ B_x^i(x_n, y, z) + B_x^r(x_n, y, z) \} \quad (3)$$

$$i_{sn}(z, t) = -[C] \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{y_n} dy \{ E_y^i(x_n, y, z) + E_y^r(x_n, y, z) \} \quad (4)$$

식(1)과 (2)를 풀기 위해서는 여러가지 조건들이 필요하다. 먼저 초기 조건으로 $t=0$ 일 때 부터 외부 전자파가 전송선에 도착하기 시작한다고 하므로, 이때의 전송선내의 모든 전압 v 와 전류 i 는 항상 0이다.

$$v_n(z, 0) = i_n(z, 0) = 0, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

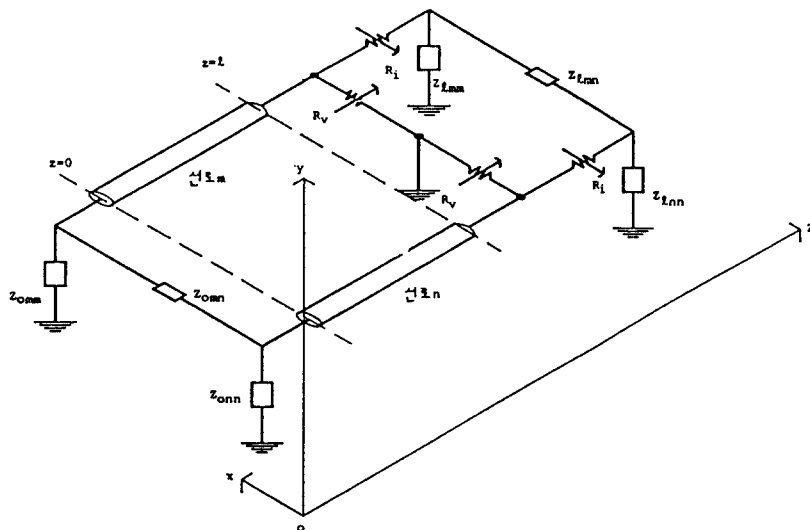


그림 5. N개의 다중 선로중 n번째와 m번째 선로간의 부하 및 보호소자 구성도.

$z=0$ 과 $z=1$ 에서 전압 v 와 전류 i 간에는 다음과 같은 부하 조건을 만족하여야 한다.

$$v(0, t) = -[Z_1]i(0, t) \quad (6)$$

$$v(l, t) = [Z(t)]i(l, t) \quad (7)$$

여기서 $[Z_1]$, $[Z(t)]$ 의 요소들은 각각 $z=0$ 과 $z=1$ 에서의 회로망 이론으로 구할 수 있다.

그런데 식(7)에서와 같이 식(1), (2)를 푸는데 필요한 $z=1$ 에서의 경계조건이 시간에 따라 일정하지 않으며, 더구나 구하고자 하는 $i(l, t)$ 및 $v(l, t)$ 에 따라 정해지므로 직접 풀기는 불가능하다. 따라서 $t > 0$ 부터 입사파의 펄스폭보다 더 큰 시간 $t = t_q$ 까지를 Q 개의 미소시간 Δt 로 나누어 각 구간마다에서의 $[Z(t)]$ 는 거의 변화가 없는 상수로 볼 수 있도록 짧게 나눈다.

$$[Z(t)] = [Z(t_q)], \quad \text{for } t_q \leq t < t_q + \Delta t = t_{q+1} \quad (8)$$

식(1)과 (2)를 시간 구간 $[t_q, t_{q+1}]$ 에서 라플라스(Laplace) 변환하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial z} v(z, s) + [L]sI(z, s) = [L]i(z, t_q)e^{-st_q} + V_s(z, s) \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} I(z, s) + [C]sV(z, s) = [C]v(z, t_q)e^{-st_q} + I_s(z, s) \quad (10)$$

식(10)의 양변에 $\pm c[L]$ 을 곱하여 식(9)에 더한 뒤, 새로운 변수 $R_{\pm}(z, t)$ 를 다음과 같이 도입하면

$$R_{\pm}(z, s) = V(z, s) \pm [Z_c]I(z, s) \quad (11)$$

식 (9)와 (10)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial z} R_{\pm}(z, s) \pm \frac{s}{c} R_{\pm}(z, s) = F_{\pm}(z, s) \quad (12)$$

여기서 $F_{\pm}(z, s)$ 는 다음과 같다.

$$F_{\pm}(z, s) = \pm \frac{e^{-st_q}}{c} r_{\pm}(z, t_q) + R_{s\pm}(z, s) \quad (13)$$

$$r_{\pm}(z, t_q) = v(z, t_q) \pm [Z_c]i(z, t_q) \quad (14)$$

$$R_{s\pm}(z, s) = V_s(z, s) \pm [Z_c]I_s(z, s) \quad (15)$$

2. 라플라스 영역의 해석

식(12)는 일차 미분 방정식이므로 계수 변화법(variation of parameter)로 쉽게 해를 구할 수 있다.

$$R_{\pm}(z, s) = \left[\int_0^z d\eta F_{\pm}(\eta, s) \exp(\pm \frac{s}{c} \eta) + R_{\pm}(0, s) \right] \exp(\pm \frac{s}{c} z) \quad (16)$$

식(11)에서 $z=0$ 일 때 식(5)의 라플라스 변환된 조건을 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$R_+(0, s) = [\rho_1]R_-(0, s) \quad (17)$$

여기서 $[\rho_1]$ 은 $z=0$ 에서의 반사계수 행렬과 같은 의미로 다음과 같이 주어진다.

$$[\rho_1] = \{ [Z_1] - [Z_c] \} \{ [Z_1] + [Z_c] \}^{-1} \quad (18)$$

마찬가지로 식(10)에서 $z=1$ 일 때 식(7)의 라플라스 변환된 조건으로부터 다음과 같은 식을 얻는다.

$$R_-(l, s) = [\rho(t_q)]R_+(l, s) \quad (19)$$

$$[\rho(t_q)] = \{ [Z(t_q)] - [Z_c] \} \{ [Z(t_q)] + [Z_c] \}^{-1} \quad (20)$$

식(16)에서 미지 함수인 $R_{\pm}(0, s)$ 를 구하기 위하여, 먼저 $z=1$ 인 경우에 대해 살펴보기로 한다. 여기서 $z=0$ 인 경우 자동으로 만족한다. $z=1$ 일 때의 식(16)에 식(17)와 (19)의 조건을 대입하여 $R_+(0, s)$ 와 $R_-(l, s)$ 를 소거한 후, $R_-(0, s)$ 와 $R_+(l, s)$ 에 대한 방정식을 얻어서 $R_-(0, s)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$R_-(0, s) = [D(s)]^{-1} \int_0^l dz \left\{ [\rho(t_q)]F_+(z, s) e^{\frac{s(z-2l)}{c}} - F_-(z, s) e^{-\frac{sz}{c}} \right\} \quad (21)$$

여기서

$$[D(s)] = 1 - [\rho(t_q)][\rho_1]e^{-\frac{2sl}{c}} \quad (22)$$

식(21)에서 보듯이 $[D(s)]^{-1}$ 를 구하기 위해 식(22)를 s 에 대해 급수 전개하면 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$[\mathbf{D}(s)]^{-1} = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ [\rho(t_q)] [\rho_1] e^{-\frac{2sl}{c}} \right\}^n \quad (23)$$

따라서 식(21)의 $\mathbf{R}_-(0, s)$ 도 다음과 같은 급수 전개할 수 있다.

$$\mathbf{R}_-(0, s) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} [\rho_1]^n [\rho(t_q)]^n \mathbf{Q}_n(s) \quad (24)$$

$$\mathbf{Q}_n(s) = \frac{1}{2} \int_0^l dz \left\{ [\rho(t_q)] \mathbf{F}_+(z, s) e^{-\frac{s(z-2l-2nl)}{c}} - \mathbf{F}_-(z, s) e^{-\frac{s(z+2nl)}{c}} \right\} \quad (25)$$

식(11)로부터 $\mathbf{V}(z, s)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{V}(z, s) = \frac{\mathbf{R}_+(z, s) + \mathbf{R}_-(z, s)}{2} \quad (26)$$

3. 시간 영역의 해석

실제 구하고자 하는량은 시간 영역 $[t_q, t_{q+1}]$ 내에서의 $\mathbf{v}(z, t)$ 이므로, 식(26)의 $\mathbf{V}(z, s)$ 를 라플라스 역변환 시켜야 한다. 따라서 식(16), (17), (24)를 식(26)에 대입하여 정리한 후, 라플라스 역변환 하면 $\mathbf{v}(z, t)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{v}(z, t) = \alpha_s(z, t) + [\mathbf{Z}_c] \beta_s(z, t) + \frac{1}{c} \alpha(z, t_q) + \frac{[\mathbf{Z}_c]}{c} \beta(z, t_q) \quad (27)$$

여기서 α_s 와 β_s 는 외부 전자파에 의한 것으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha_s(z, t) = & \int_0^z d\eta \frac{v_s(\eta, t + \frac{\eta-z}{c})}{2} - \int_z^l d\eta \frac{v_s(\eta, t - \frac{\eta-z}{c})}{2} \\ & + \sum_{n=0}^{\infty} [\rho(t_q)]^n [\rho_1]^n \int_0^l d\eta \left\{ \frac{[\rho(t_q)]}{2} v_s\left(\eta, t + \frac{\eta+z-2nl-2l}{c}\right) - \frac{[\rho_1]}{2} v_s\left(\eta, t - \frac{\eta+z-2nl}{c}\right) + \frac{[\rho(t_q)][\rho_1]}{2} v_s\left(\eta, t + \frac{\eta-z-2nl-2l}{c}\right) + \frac{[\rho(t_q)][\rho_1]}{2} v_s\left(\eta, t + \frac{\eta-z-2nl-2l}{c}\right) \right\} \end{aligned}$$

$$v_s\left(\eta, t - \frac{\eta-z+2nl-2l}{c}\right) \right\} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \beta_s(z, t) = & \int_0^z d\eta \frac{i_s(\eta, t + \frac{\eta-z}{c})}{2} + \int_z^l d\eta \frac{i_s(\eta, t - \frac{\eta-z}{c})}{2} \\ & + \sum_{n=0}^{\infty} [\rho(t_q)]^n [\rho_1]^n \int_0^l d\eta \left\{ \frac{[\rho(t_q)]}{2} i_s\left(\eta, t + \frac{\eta+z-2nl-2l}{c}\right) + \frac{[\rho_1]}{2} i_s\left(\eta, t - \frac{\eta+z+2nl}{c}\right) + \frac{[\rho(t_q)][\rho_1]}{2} i_s\left(\eta, t + \frac{\eta-z-2nl-2l}{c}\right) + \frac{[\rho(t_q)][\rho_1]}{2} i_s\left(\eta, t - \frac{\eta-z+2nl-2l}{c}\right) \right\} \end{aligned} \quad (29)$$

식(28)과 (29)에서의 모든 항들은 t_q 이후에 일어나야만 의미가 있다. 예를 들어 식(28)의 마지막 항의 v_s 는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$v_s\left(\eta, t - \frac{\xi}{c}\right) = \begin{cases} v_s\left(\eta, t - \frac{\xi}{c}\right), & 0 < \frac{\xi}{c} \leq t - t_q \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (30)$$

식(30)에서 $t - \xi/c \leq t$ 의 의미는, 미래에 들어올 전자파에 의한 영향이 고려될 수 없다는 조건(causality condition)을 나타내며, $t - \xi/c \geq t_q$ 의 조건은 $z=|$ 에 달린 비선형 부하 $[\mathbf{Z}(t)]$ 가 $[\mathbf{Z}(t_q)]$ 로 일정하다는 가정을 만족시키기 위해서 부가된다. 따라서 식(28)과 (29)의 모든 항들은 각각 식(30)과 같은 조건을 만족해야 한다.

식(27)의 α 와 β 도 앞에서와 마찬가지로 다음과 같은 급수 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha(z, t_q) = & \frac{v(z-c\Delta t, t_q)}{2} + \frac{v(z+c\Delta t, t_q)}{2} \\ & + \sum_{n=0}^{\infty} [\rho(t_q)]^n [\rho_1]^n \left\{ \frac{[\rho(t_q)]}{2} v(-z+2l+2nl-c\Delta t, t_q) + \frac{[\rho_1]}{2} v(-z-2nl+c\Delta t, t_q) \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{[\rho(t_q)][\rho_1]}{2} v(z+2l+2nl-c\Delta t, t_q) \\
 & + \frac{[\rho(t_q)][\rho_1]}{2} v(z-2l-2nl+c\Delta t, t_q) \} \\
 & \hspace{15em} (31)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \beta(z, t_q) &= \frac{i(z-c\Delta t, t_q)}{2} - \frac{i(z+c\Delta t, t_q)}{2} \\
 & + \sum_{n=0}^{\infty} [\rho(t_q)]^n [\rho_1]^n \left\{ \frac{[\rho(t_q)]}{2} \right. \\
 & \quad i(-z+2l+2nl-c\Delta t, t_q) \\
 & \quad - \frac{[\rho_1]}{2} i(-z-2nl+c\Delta t, t_q) \\
 & \quad + \frac{[\rho(t_q)][\rho_1]}{2} i(z+2l+2nl-c\Delta t, t_q) \\
 & \quad \left. - \frac{[\rho(t_q)][\rho_1]}{2} i(z-2l-2nl+c\Delta t, t_q) \right\} \\
 & \hspace{15em} (32)
 \end{aligned}$$

여기서도 시간 t_q 이 후 임의의 시간 Δt 가 지난 뒤인 시간 t 에서 관측할 경우, 예를 들어 식(31)의 첫째항의 값은 다음과 같은 정의를 따라야 한다.

$$\frac{1}{2} v(z-c\Delta t, t_q) = \begin{cases} \frac{1}{2} v(z-c\Delta t, t_q), & 0 \leq z-c\Delta t \leq l \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \hspace{10em} (33)$$

그러므로 식(33)과 같은 조건을 식(31)과 (32)의 모든 항들은 만족해야만 한다.

4. 반복 계산 기법

앞에서 보인 바와 같이 $t=t_q$ 일 때의 전송선 유기 전압 v 와 전류 i 를 알 경우 $t_q \leq t < t_q + \Delta t$ 일 때 $z=1$ 의 부하 $[Z(t)]$ 가 $[Z(t_q)]$ 로 근사화 하여 임의의 시간 t 에서의 유기전압 $v(z, t)$ 를 식(27)과 같이 구할 수 있다.

따라서 첫번째 시간 구간인 $[t_0, t_1]=[0, \Delta t]$ 에서는 $t=0$ 일 때의 $z=1$ 의 부하 행렬 $[Z(0)]$ 이 일정하고, $v(z, 0)$ 와 $i(z, 0)$ 모두가 0이다. 따라서 $v(l, t_1)=v(l, \Delta t)=v_1$ 을 쉽게 계산할 수 있다. v_1 을 알면 $t=\Delta t$ 일 때 $z=1$ 의 모든 소자들에 걸리는 전압과 전류를 계산할 수 있다. 그런데 보호소자들의 저항 행렬인 $[R_v$

$(t)]$ 와 $[R_i(t)]$ 는 각각 해당소자 양단에 걸리는 전압과 전류에 따라 값이 변하므로, $t=t_1=\Delta t$ 일 때의 $[R_v(\Delta t)]$ 와 $[R_i(\Delta t)]$ 는 $t=t_0=0$ 일 때 저항 값인 $[R_v(0)]$ 과 $[R_i(0)]$ 과는 달라진다.

그러므로 두번째 시간 구간인 $[t_1, t_2]=[\Delta t, 2\Delta t]$ 에서는 $t=t_2$ 일 때 구한 보호소자 저항 행렬 $[R_v(\Delta t)]$ 와 $[R_i(\Delta t)]$ 로 부터 $z=1$ 의 실질적인 부하 행렬 $[Z(\Delta t)]$ 으로 일정하다고 둘 수 있다. 따라서 식(27)을 써서 $v(l, t_2)=v(l, 2\Delta t)=v_2$ 를 계산할 수 있다. 그런데 앞의 v_1 의 경우와는 달리 v_2 의 계산에서는 $t=t_1$ 일 때의 특정한 전송선의 두개의 위치인 $z=z_1$ 과 z_2 에서의 유기 전압 v 와 전류 i 를 알아야만 한다. 이 계산은 복잡하지만 식(27)을 이용하여 구할 수 있으므로 문제가 되지 않는다.

마찬가지의 과정으로 N 번째 구간인 $[t_{N-1}, t_N]=[(N-1)\Delta t, N\Delta t]$ 까지 연속적으로 반복함으로써 전체 시간 구간 $[0, t_N]$ 까지의 $z=1$ 에서의 유기 전압 v 를 모두 계산할 수 있다.

III. 수치 계산 및 결과

1. 기본 구조의 계산 결과

앞서 구한 반복 계산 기법 알고리즘을 실제 문제에 적용하기 위한 기본 구조로서 접지면 위의 두 도선으로 구성된 전송선 구조를 취하였다. 이는 그림 5에서 $m=1, n=2$ 라고 보면 된다. 이때 반경 a 인 원통형 선로들은 z 방향으로 평행하게 놓여 있으며, 길이는 l 로서 $z=0$ 에서 부터 l 까지 이다. 선로 1의 중심은 $x=x_1, y=y_1$ 이고, 선로 2의 중심은 $x=x_2, y=y_2$ 로 두 선간의 간격 d 는 3m로 고정하였다. 선로 및 접지면은 완전 도체라고 가정하였으며, 주변 매질은 공기라고 두었다. 본 연구에서는 그림 5에서의 $z=0$ 과 1에 달린 선형 부하들을 저항만이 있다고 두었다.

특히 그림 5의 보호소자들의 저항 값은 다음과 같은 비선형 특성을 갖는다고 한다.

$$R_v(t) = Z_c F[v(l, t)] \hspace{10em} (34)$$

$$R_i(t) = Z_c G[v(l, t)] \hspace{10em} (35)$$

여기서

$$F[v(l, t)] = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} \left\{ \frac{|v(l, t)| - v_{TV}}{v_{TV}} \right\}^{\beta}, & |v(l, t)| \geq v_{TV} \\ 0, & |v(l, t)| < v_{TV} \end{cases} \quad (36)$$

$$G[v(l, t)] = \begin{cases} r \left\{ \frac{|v(l, t)| - v_{TI}}{v_{TI}} \right\}^{\beta}, & |v(l, t)| \geq v_{TI} \\ 0, & |v(l, t)| < v_{TI} \end{cases} \quad (37)$$

여기서 보호소자가 작동하기 시작하는 임계전압(threshold voltage)으로서 R_o 에 대해서는 v_{TV} , R_i 에 대해서는 v_{TI} 라고 한다. 이 경우 저항 R_o 인 보호소자는 $z=1$ 에서와 유기전압이 v_{TV} 이내일 경우는 무한대의 저항, 즉 개방되어 있는 것으로 생각하면 되나, 유기전압의 절대값이 v_{TV} 보다 커지면 저항이 급속도로 감소한다. 그런데 R_o 는 $z=1$ 에서 접지면과 선로간에 연결된 소자의 저항이므로, 유기전류의 대부분을 실제 부하인 Z_l 로 보내는 대신 R_o 를 통해 접지면으로 빠져나가도록 하여 실제 부하인 Z_l 에 흐르는 과전류를 방지하는 역할을 한다. 이와는 반대로 R_i 는 $z=1$ 의 유기전압이 임계전압 v_{TI} 보다 클 경우 저항이 급속도로 늘어남으로서, R_i 와 직렬로 연결된 실제 부하인 Z_l 에 과전압이 걸리지 못하도록 하는 역할을 한다. 엄밀한 의미로 R_i 는 여기에 흐르는 전류에 대해 비선형적으로 변하지만 편의상 여기서는 $v(l, t)$ 에 따라 변하는 경우를 기본으로 하였다.

그림 3, 4 및 5와 같이 주어진 기본 구조에서 각 변수들을 표 1과 같은 값으로 주어졌을 때 0부터 60 μ sec 동안 실제 부하인 Z_l 에 유기되는 공통 모드 전압과 차등 모드 전류를 수치 계산하였다. 여기서 공통 모드 전압은 Z_l 과 접지면 간의 전위차를 나타내며, 차등 모드 전압은 실제 Z_l 양단에 걸리는 전압으로 도선 1을 + 전압으로 취하기로 한다.

그림 6(a)는 보호소자들인 R_o 와 R_i 가 없을 때, 즉 $R_o = \infty$ 이고 $R_i = 0$ 일 때 Z_l 에 걸리는 공통 모드 전압(실선)과 차등 모드 전압(점선)을 계산한 값이다. 이 때 공통 모드 전압이 차등 모드 전압보다 높은 것은, 그림 5의 두 도선간의 간격 및 접지면부터 도선간의 높이들이 입사되는 전차과의 최소 유효 파장에 비해 적어서 두 도선에 유기되는 전압이 거의 비슷하기 때문이다. 또한 실제 입사파의 펄스는 0부터 100/3 μ sec이지만 전송선에 유기된 후 $+z$ 방향으로 진행하여 $z=1$ 에 들어오는 성분 이외에, $-z$ 로 진

행한 후 $z=0$ 에서 반사되어 재차 $z=1$ 에 들어오는 성분도 있어서 그림 6(a)처럼 100/3 μ sec 이 후에 또 약간의 전압이 부하에 걸린다. 그런데 표 1에 주어진 기본 구조의 변수값들을 $z=0$ 에서의 부하가 전송선의 특성 임피던스와 거의 일치하도록 정하여서 $z=0$ 에서 반사될 경우 그 크기가 상당히 줄기 때문에 그림 6(a)에서 보듯이 60 μ sec 이후에는 부하에 유기되는 공통 모드 및 차등 모드 전압 모두가 거의 0이 된다.

그런데 그림 5의 보호소자들이 있을 경우에 수치 계산한 결과가 그림 6(b)이다. 이 경우 공통 모드 전압은 거의 보호소자의 임계전압인 200V 이내로 억제되며, 차등 모드 전압은 50V 이내로 억제됨을 알 수 있다. 특히 흥미로운 점은 공통 모드 전압이 억제되는 시간, 즉 과전압 보호소자가 동작을 개시하거나 동작중에서 작동을 멈추는 순간에 차등 모드 전압이 높다는 점이다. 이러한 부하측 유기 전압의 억제는 그림 6(c)에서 보인 바와 같이 과전압 보호소자의 저항이 급속히 줄어들고, 반대로 과전류 보호소자의 저항이 증가하기 때문이다.

2. 수치 계산의 유용성

그림 6의 결과는 반복 계산 알고리즘의 흐름도를 컴퓨터 프로그래밍 하여 수치계산으로 구하였다. 따

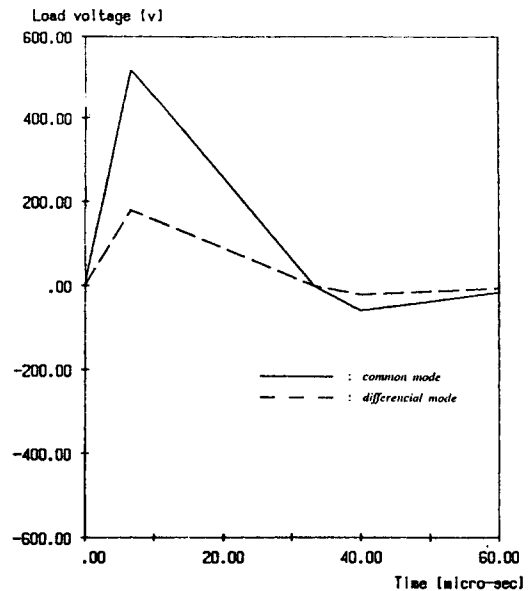


그림 6(a). 비선형부하가 없을 경우의 선형부하측 유기전압

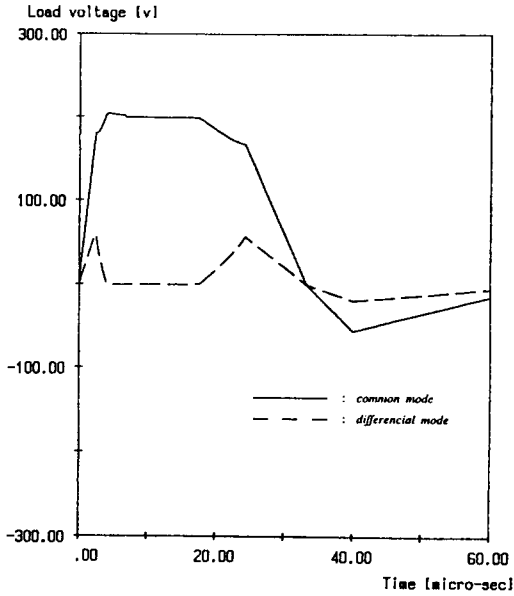


그림 6(b). 비선형부하가 있을 경우의 선형부하측 유기전압

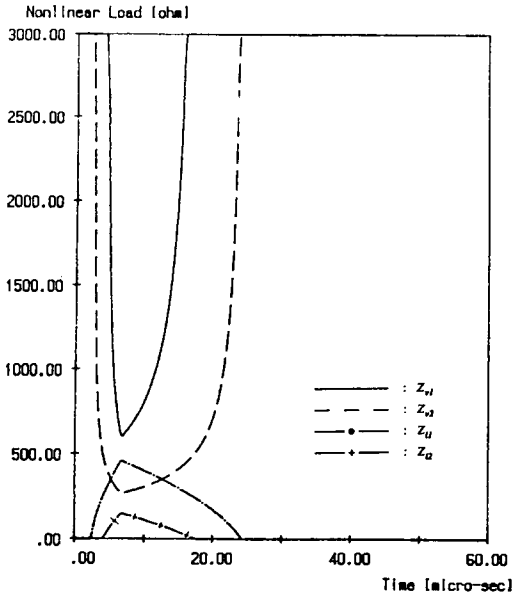


그림 6(c). 비선형부하의 저항변화

라서 수치계산된 결과의 타당성 또는 수치계산 해의 접근도를 확인할 필요가 있다. 특히 반복 계산시 미소 시간 구간 Δt 를 $0.1\mu\text{sec}$ 로 취하였는데 Δt 로 줄이면 오차가 줄어드는 것을 살펴봐야 한다. 더구나 본 연구에서 다루고자 하는 문제는 비선형 임피던스

표 1. 수치계산에 사용된 기본구조의 변수 값

분류	중분류	소분류	기호	단위	값
입사파	펄스파형	상승시간	T_r	μsec	20/3
		하강시간	T_f	μsec	80/3
		최대값	V_{max}	V/m	80
	방향	진행방향	θ	deg.	90
자계분극		.	.	.	
전송선	도선	반경	a	mm	10
		길이	.	km	10
	분포	간격	d	m	3
		높이 1	y	m	10
		높이 2	y	m	6
선형부하	비보호측	접지 1	z_{o1}	Ω	832
		접지 2	z_{o2}	Ω	718
		선간저항	z_o	Ω	1,100
	보호측	접지 1	$z_{\epsilon 1}$	Ω	400
		접지 2	$z_{\epsilon 2}$	Ω	300
		선간저항	z_e	Ω	350
보호소자	과전압	임계전압	V_{TV}	V	200
		배율	α	.	1
		승수	β	.	1
		개시시간	t_{on}	μsec	0
		과전류	임계전압	V_{TI}	V
	배율		γ	.	1
	승수		δ	.	1
			개시시간	t_{on}	μsec

특성을 갖는 보호소자가 포함된 부하가 달린 전송선의 전자파 유도 현상을 다루는 것으로, 일종의 비선형 전자파 해석 문제이다. 따라서 반복 계산 기법으로 구한 해가 실제로 존재하며, 하나의 해로 접근해가는 것을 입증하는 것은 매우 중요하다.

여기서는 그림 6(b)의 기본 구조에 대해 보호소자로 억제된 부하의 공통 모드와 차등 모드를 미소 시간 구간 Δt 를 바꾸어 가면서 계산하여 구한 값들의 상호 비교로서 해의 수렴도 및 수치계산의 안정도를 확인하였다. 그림 7(a)는 공통 모드 전압을 $\Delta t = 1.0, 0.5, 0.1, 0.01 \mu\text{sec}$ 의 4가지에 대해 계산한 결과인데, $\Delta t = 1.0\mu\text{sec}$ 일 경우 $\Delta t = 1.0\mu\text{sec}$ 에 비해 보호소자가 동작을 개시하는 $t = 20/3\mu\text{sec}$ 근방에서 상당한 정도의 오차가 있음을 볼 수 있다. 물론 $\Delta t = 0.5\mu\text{sec}$ 로 줄이면 $t = 20/3\mu\text{sec}$ 근방의 오차는 어느 정도 줄어들어 $\Delta t = 0.1\mu\text{sec}$ 의 결과와 유사해진다. 그런데 $\Delta t = 0.01\mu\text{sec}$ 로 취하여도 $\Delta t = 0.1\mu\text{sec}$ 의 결과와 큰 차이

가 없음을 볼 수 있다. 이는 $\Delta t = 0.1\mu\text{sec}$ 의 결과가 정확해에 거의 수렴해 있음을 간접적으로 확인해 준다.

마찬가지로 차등 모드 전압에 대해서도 계산하

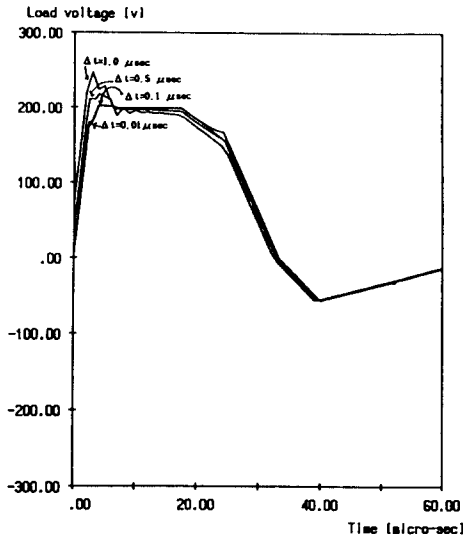


그림 7(a). 미소시간구간에 따른 공통모우드전압의 계산 결과 비교

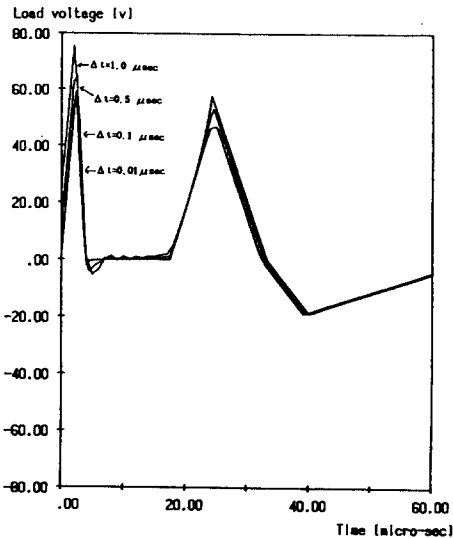


그림 7(b). 미소시간구간에 따른 차등모우드전압의 계산 결과 비교

였는데, 그림 7(b)에서 볼 수 있듯이 Δt 가 $1.0\mu\text{sec}$ 에서 $0.1\mu\text{sec}$ 로 줄면 보호소자가 동작 개시 및 동작 정지하는 시간 근방에 생기는 강한 삼각 펄스형 전압의

크기도 점차 줄어든다. 그러나 Δt 가 $0.1\mu\text{sec}$ 에서 더 줄어서 $0.01\mu\text{sec}$ 로 하여도 두 결과가 거의 변화가 없다. 그러므로 그림 7(b) 역시 $\Delta t = 0.1\mu\text{sec}$ 의 결과가 매우 신뢰할 수 있는 값임을 입증한다.

IV. 결 론

외부로부터 임의의 전자파 펄스가 비선형 보호소자들이 달린 다중 전송선에 입사시 보호된 단말 부하에 유기되는 과도전압을 예측할 수 있는 반복계산기법을 개발하였으며, 실제 수치계산을 통하여 개발된 기법의 타당성과 유용성을 확인하였다. 전송선의 유기전압중 차등 모드 성분에 비해 공통 모드 성분이 월등히 높으며, 보호소자의 비선형 임피던스 특성에 따라 실제 보호하고자 하는 선형 부하에 유기되는 과도전압이 크게 변함을 알 수 있었다. 본 논문에서 개발된 반복계산 기법은 각종 비선형 부하가 달린 전력선의 전자파 유도현상, bus 선간의 누화 현상, 스트립라인의 상호결합현상등에 직접적용이 가능하다.

참 고 문 헌

1. D.W. Bodle and P.A. Gresh, "Lightning surges in paired telephone cable facilities," *Bell Syst. Tech. J.*, vol.40, pp.547-576, 1961.
2. R. Mosch, "Over-voltage protection of telephone switching equipment containing electronic components," *Elect. Commun.*, vol.49, pp.159-169, 1974.
3. H. Koga and T. Motomitsu, "Lightning induced surges in paired telephone subscriber cable in Japan," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol.EMC-20, pp.152-161, 1985.
4. S.Y. Kim and H.T. Ha, "A study on nonlinear protective devices for suppression of lightning surges," *Proc. JTC-CSCC*, pp.207-210, 1990.
5. S.Y. Kim and H.T. Ha, "Transient response of nonlinear protective devices for suppression of lightning surges on a paired-wire line," *IEICE Trans.A*, vol.E74, no.10, pp.3018-3023, 1991.
6. 김세윤, "ISDN 가입자 선로의 유도 낙뢰 대책 연구," ETRI 수탁과제, KIST 연구 보고서, 1991년 10월.