

비선형 보호소자를 포함하는 전송선로의 유기 전류 계산

하연택, 김세운, 이경재, 오명환

한국 과학 기술 연구원 응용 전자 연구실

Calculation of Induced Current on the Two-Wire Transmission Line with Nonlinear Protection Device

Huen-Tae Ha, Se-Yun Kim, Kyung-Jae Lee, Myung-Hwan Oh

Appl. Elect. Lab., KIST

Abstract

Nonlinear protection of overcurrent induced on parallel two-wire transmission line by electromagnetic pulse is analyzed. This algorithm is implemented numerically and simulation result for simple incident pulse and nonlinear type agrees with its analytic solution.

1. 서론

전자파가 도체에 입사되면 그 표면에 유기전류가 흐르게 된다. 이러한 성질은 전자파를 사용하여 대기층 통해 원거리간의 정보교환을 가능하게 해주는 반면 전기기기 및 전자기기에 불필요한 유기전류를 여기시켜 기기의 오동작을 유발하거나 통신의 장애요소가 되기도 한다. 이를 억제하기 위해 기기의 외벽을 도체로 만들어 외부전자파를 차단하고는 있지만 전원선이나 기기와 기기사이의 정보교환을 위해 필요한 전송선을 통해 여전히 유기전류가 유입된다. 이러한 유기전류는 정보의 보호 및 기기 보호 차원에서 그 정량적인 값이 요구되며 이러한 연구는 오래 전 부터 수행되어 왔다.[1,2]

외부로 부터 입의의 전자파가 선형부하를 갖는 전송선로에 입사할 경우, 입사파의 파장이 선로 선간 간격에 비해 충분히 크다는 가정하에 Maxwell 방정식으로부터 유도한 전송선 방정식을 풀어 부하측 유기전류를 구하는 방법들은 잘 알려져 있다. 특히 돌발적인 자연현상인 낙뢰 발생시 구름과 대기사이의 과도방전시 흐르는 대전류로부터 복사된 전자파가 주위의 전송선에 입사될 때 부하에 과도한

유기전류가 흐를 수 있음을 보여준다.[3,4] 대기중에 가설된 통신선로나 전력 계통 선로에서는 이러한 문제가 더욱 심각하며 자칫 부하측에 치명적인 손상을 입히기도 한다. 이러한 돌발적인 사태에 대해 부하를 보호할 수 있도록 부하측 앞단에 비선형 보호소자를 달아서 과전류 유입시 이를 억제한다. 전송선로에서 보호소자의 선정은 각 상황에 대해 부하를 보호하는 입장에서 매우 중요한 문제이며, 이를 위해 전자파가 입사할 경우 비선형 보호소자에 의해 제어된 유기 부하 전류를 계산하는 것이 필요하다.

유기전류는 구조물과 관계없는 전자파와 전송선 구조 그리고 부하에 의해 정해진다. 비선형 부하의 값은 유기전류의 크기에 따라 결정되는데 유기정도가 입사파의 주파수에 따라 그 양이 크게 달라지게 되고, 각 주파수 성분의 합인 유기전류의 크기만이 부하를 결정한다. 따라서 다음 순간의 각 주파수 성분에 대한 유기에는 앞 순간의 모든 주파수 성분에 의해 영향을 받게 되어 각 주파수 성분에 대한 유기전류를 계산하는 것은 매우 어렵다. 또한 직접 시간 영역에서 살펴 보려면 입의의 입사파에 대해 비선형 부하가 있는 전송선로의 과도 현상을 해석해야 하는 어려움을 갖게 된다.

본 논문에서는 이와 같이 비선형 보호소자를 갖는 평행도체 선로에 전자파가 입사할 경우 전송선 방정식을 얻을 수 있는 조건하에서 각 순간의 부하를 선형부하라고 가정하여 주파수 영역의 유도 부하 전류를 구한다. 다음 이를 역 푸리에 변환을 위하여 그 순간의 전류를 계산하며, 이것으로부터 부하를 재결정하여 다음 상태의 유도 부하 전류를 계산해 나가는 알고리즘을 제안하였다. 간단한

입사파 형태와 전송선 구조에 대해 해석적으로 구한 값과 본 논문에서 제시한 알고리즘을 사용해 수치계산으로 얻은 값을 비교하여 같음을 확인하였다.

2. 비선형 부하시 유도 부하 전류 계산 알고리즘

비선형 보호 소자가 달린 전송선로에 전자파가 입사할 경우, 부하측에 흐르는 유도 전류를 알아보기 위해 그림 1과 같은 간단한 구조에 대해 살펴보기로 한다.

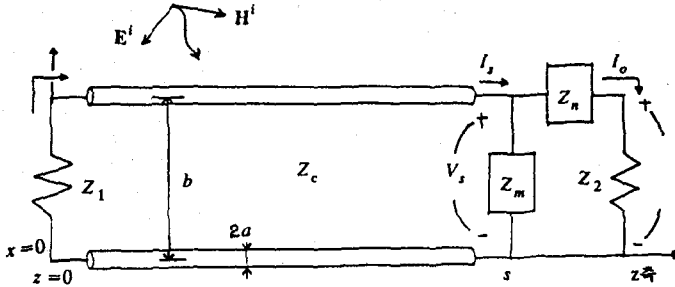


그림 1. 입사의 전자파가 입사하는 전송선로

그림 1에서 a는 도체선의 반경, b는 선간거리, s는 전송선로의 길이를 나타낸다. Z1, Z2는 각각 부하측 선형소자, Zc는 전송선의 특성 임피던스, Zm과 Zn은 각각 전압이 증가하면 저항이 감소하는 비선형 저항과 전류가 증가하면 저항이 증가하는 비선형 저항이며, Z1, Zm, Zn, Z2로 구성된 부하측의 입력 임피던스이다. Eⁱ와 Hⁱ로 표현된 전자파는 입사의 방향으로 입사되는 e^{iw}의 시간 의존 함수라고 가정하였다.

그림 1과 같은 전송선로에 전자파가 입사할 경우 유도 부하 전류, 전압을 계산하는 방법은 다음과 같다. 입사의 시간 t에서 부하측 입력 저항 Z1을 그 순간에 고정된 선형저항이라 생각한다. 이때의 부하측 전류 I1은 잘 알려져 있으며 그 표현식은 다음과 같다.[5][6]

$$I_1(w) = \frac{1}{D} \int_0^b K(z, w) [Z_c \cosh yz + Z_1 \sinh yz] dz - \frac{1}{D} [Z_c \cosh ys + Z_1 \sinh ys] \int_0^b E_x^i(x, b, w) dx + \frac{Z_c}{D} \int_0^b E_x^i(x, 0, w) dw \quad (1)$$

$$K(z, w) = E_z^i(b, z, w) - E_z^i(0, z, w)$$

$$D = (Z_c Z_1 + Z_c Z_2) \cosh ys + (Z_c^2 + Z_1 Z_2) \sinh ys$$

단 이 경우는 입사파의 파장이 선간거리 b에 비해 충분히 크다는 조건하에서 구한 양이며 γ는 전송선의 전송상수를 나타낸다.

식 (1)의 I1(w)를 역 푸리에 변환함으로써 그 순간의 전류크기를 알 수 있다.

$$I_1(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I_1(w) e^{iwt} dw \quad (2)$$

시간 t에서 순간적으로 선형저항이라 생각하므로 회로 방정식을 풀어서 Zm, Zn에 걸리는 전압과 전류를 계산한다. 다음 Zm 양단의 전압, Zn을 흐르는 전류로부터 다음 순간 t + Δt일때의 부하 Zm, Zn을 결정하며 이로부터 다음 순간의 전류값 식 (1)을 써서 계산한다.

이러한 작업을 반복함으로써 부하전류 I1, 전압 V1을 시간에 따라 계산할 수 있다. 이와 같은 반복 알고리즘을 그림 2에 도표화하여 나타내었다.

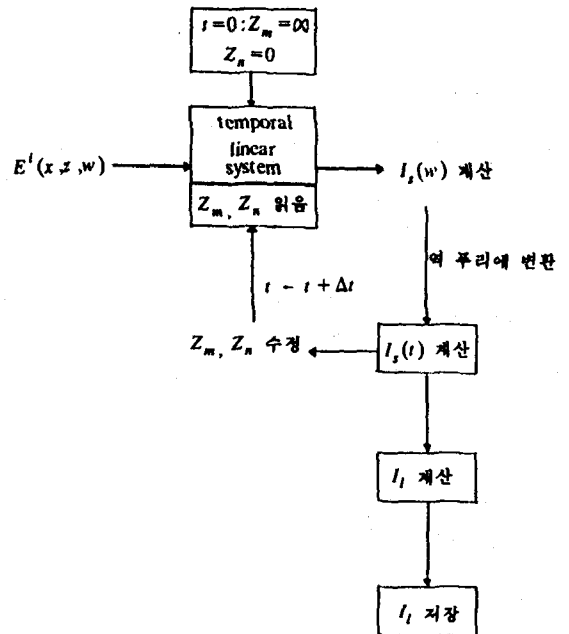


그림 2. 부하측 유도 전류 계산 알고리즘

3. 수치계산 및 검토

비선형 보호 소자가 있는 전송선로에 전자파가 입사할 경우 부하측 유도 전류를 계산하기 위해 제안한 그림 2의 알고리즘의 타당성을 확인하기 위해 간단한 형태의 입사파와 비선형 보호소자에 대해 해석적인 값을 얻고 이를 알고리즘을 통해 얻은 값과 비교하였다. 이를 위해 입사전계 $E^i(x, z, w)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$E^i(x, z, w) = z_0 P(k) e^{-jkx} \quad (3)$$

이때

$$P(k) = jp_0 \frac{k(k_2 - k_3)}{(k - jk_1)(k - jk_2)(k - jk_3)}$$

식 (3)에서 k 는 입사전계의 파수이다.

식 (3)에서 정의된 입사파를 식 (1)에 대입하고 Z_1 과 Z_2 를 Z_c 와 같은 값으로 두고 구한 $I_s(w)$ 를 식 (2)에 대입하여 역 푸리에 변환하면 $I_s(t)$ 는 다음과 같이 된다.

$$I_s(t) = \frac{c P_0}{Z_s + Z_1} (k_3 - k_2) \left[\frac{g(k_1 t)}{(k_1 - k_2)(k_1 - k_3)} + \frac{g(k_3 t)}{(k_3 - k_1)(k_3 - k_2)} + \frac{g(k_3 t)}{(k_3 - k_1)(k_3 - k_2)} \right] = \frac{V(t)}{Z_s + Z_1} \quad (4)$$

여기서 c 는 광속을 의미하고, 함수 g 와 u 는 다음과 같다.

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

$$u(t) = \begin{cases} 1 & \text{for } t > 0 \\ 0 & \text{for } t < 0 \end{cases}$$

그림1에서 정의된 $V_s(t)$ 와 $I_s(t)$ 의 관계를 식 (4)와 함께 표현하면 다음과 같다.

$$I_s(t) = \frac{V(t)}{Z_s + Z_1} = \frac{V_s(t)}{Z_s} \quad (5)$$

부하측 전류, 전압을 간단한 형태로 구하기 위해 비선형 보호소자인 Z_m 과 Z_n 이 V_s 에 따라 다음과 같이 변한다고 하자.

$$Z_m(V_s) = \frac{Z_c}{F(V_s)} \quad (6)$$

$$Z_n(V_s) = Z_c F(V_s) \quad (7)$$

여기서 함수 F 는 다음과 같이 정의한다.

$$F(V_s) = \begin{cases} \frac{|V_s| - V_T}{V_T} & \text{for } |V_s| > V_T \\ 0 & \text{for } |V_s| < V_T \end{cases}$$

식 (6)와 식 (7)에서 정의된 비선형 보호소자는 모두 $|V_s|$ 가 문턱전압 V_T 이상일 때만 동작하도록 정의된 것이다. 부하측 유도전압 $V_l(t)$ 은 식 (6), 식 (7)의 부하 정의식과 식 (5)의 $I_s(t)$ 전류 표현식을 쓰고 부하단에서의 회로방정식을 이용하여 구하면 다음과 같은 형태가 된다.

$$V_l(t) = \frac{V(t)}{2} = V_s(t) \quad \text{for } |V_s| < V_T \\ V_T \quad \text{for } |V_s| > V_T \quad (8)$$

같은 입사파 조건과 부하조건하에서 그림 2에 표현된 알고리즘으로 부하측 유도전압 V_l 을 계산하였으며 그 결과물 그림 3에 나타내었다. 이때 전송선의 구조함수들인 a, b, s 는 각각 1cm, 10cm, 100m 이며 입사파의 형태를 결정하는 상수들인 k_1, k_2, k_3, P_0 는 각각 $\frac{2\pi}{9 \times 10^4}, 5k_1, 7k_1, 5 \times 10^{-3}$ 이다. 수치계산시 반복된 계산시 시간간격은 10^{-8} sec이다. 그림3에서 해석적인 값과 알고리즘으로 구한 값을 비교해 보면 유기 부하 전류가 급하게 보일때 차이를 보이는데 이런 부분에서는 시간 간격을 줄여 계산함으로써 해결할 수 있다.

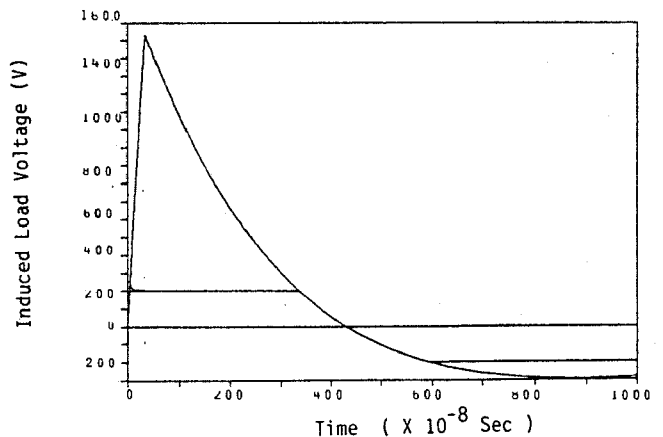


그림3. 비선형 보호소자에 의한 부하 유도 전류 억제

4. 결 론

비선형 보호소자가 있는 전송선로에 전자파가 입사할 경우 부하측 유기전류를 계산하는 알고리즘을 제안하였으며, 간단한 형태의 입사파와 비선형 보호소자를 가정하여 얻은 해석적인 해와 알고리즘을 통해 얻은 값을 비교하여 그 타당성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 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. on AP, vol.13, pp.987-989, 1965.
- [2] K.S.H.Lee, "Two parallel terminated conductors in external fields," IEEE Trans. on EMC, vol.20, pp.288-296, 1978.
- [3] M.A.Uman and E.P.Krider, "A review of natural lightning: experimental data and modeling," IEEE Trans. on EMC, vol.24, pp.79-112, 1982.
- [4] M.A.Uman, "Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards," IEEE Proc., vol.76, pp.1548-1565, 1988.
- [5] A.A.Smith, Jr., "A more convenient form of the equations for the response transmission line excited by nonuniform fields," IEEE Trans. on EMC, vol.15, pp.151-152, 1973.
- [6] A.A.Smith, Jr., Coupling of External Electromagnetic Fields to Transmission Lines, John Wiley & Sons, 1977.