

전력선 통신을 위한 고압 배전선로 특성 파라미터 해석

이재조, 박해수, 이원태, 김관호
한국전기연구원 전기정보망연구그룹

Analysis of Characteristic Parameter in Medium Voltage Power Distribution Line for Power Line Communications

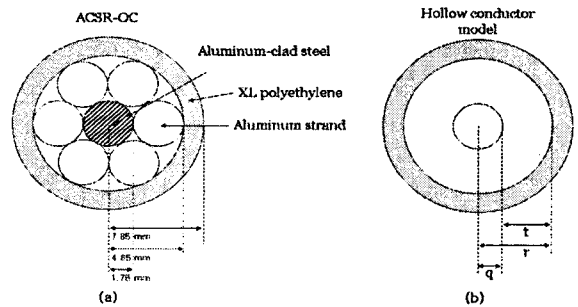
Jae-Jo Lee, Hae-Soo Park, Won-Tae Lee, Kwan-Ho Kim
Korea Electrotechnology Research Institute, Power Telecommunication Network Research Group

Abstract - 본 논문에서는 22.9kV 고압 가공 배전선로를 고속 전력선 통신을 위한 통신 채널로 사용하기 위하여 전력선 통신 주파수 2MHz~30MHz 대역에 대한 특성 파라미터를 해석하였다. 먼저 고압 배전선로에 주로 사용되는 ACSR-OC 케이블에 대한 구조를 분석하고 이의 특성 파라미터로부터 분포정수와 특성 임피던스를 구하였다. 또한 등각 사상법을 이용하여 유전체가 코팅된 평행 2선식 고압 배전선로의 정전용량 및 유효유전상수를 계산하였다. 이러한 결과를 바탕으로 고압 배전선로의 분포정수와 특성임피던스를 구하였으며, 특성임피던스는 케이블 단면적에 따라서 4700~5300 사이의 분포를 나타내었다. 특히, 특성 임피던스는 지면을 완전 전기도체로 가정할 경우에 비하여 실제 지면의 도전율과 유전상수를 고려할 때 20MHz 이하의 대역에서 보다 높은 값을 갖는 것을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 ACSR-OC 선로를 대상으로 하여 표피효과 저항을 계산하고자 한다. 예를 들어 58mm² 선로의 세부 단면도는 그림 1(a)와 같다. 알루미늄 피복 강심의 반지름은 1.75mm, 알루미늄 피복 강심 및 알루미늄 선을 포함한 반지름은 4.85mm, 절연층을 포함한 선로 전체의 반지름은 7.85mm이다. 일반적으로 표피 효과는 도체의 외부 표면에 가까워질수록 내부보다 고밀도의 전류가 흐르도록 하는 경향을 갖는다. ACSR-OC 선로의 경우 중심에 알루미늄보다 전도도가 매우 낮은 철로 이루어져 있기 때문에 표피효과에 의해 대부분의 전류가 알루미늄 선으로 흐르게 된다. 따라서 이와 같은 선로는 그림 1(b)와 같이 중심에 홀이 존재하는 알루미늄 도체 선으로 가정할 수 있다.

1. 서 론

고압 배전선은 기본적으로 전력을 공급하기 위하여 설계된 선로이므로 60Hz 및 그 고조파에 대한 특성은 널리 알려져 있으나, 고속 전력선 통신을 위한 주파수 대역인 2~30MHz 대역에 대한 통신 전송선로로서의 특성은 연구된 바가 극히 드물다. 특히 3상 4선식 Y결선을 사용하는 가공선로에 대한 체계적인 연구 결과는 전무한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 고압 배전선로의 가장 기초적인 특성 파라미터인 분포정수와 특성 임피던스를 구하기 위한 이론적 근거와 그 계산값을 제시하고자 한다.



〈그림 1〉 ACSR-OC 선로의 구조(a) 및 공동 도체 모델(b)

먼저 고압 배전선로의 표피효과 저항을 구하고, 등각사상법을 이용하여 유전체가 코팅된 가공 배전선로의 정전용량 및 유효유전상수를 계산한다. 이 값을 기초로 하여 고압 배전선로의 1차 분포정수인 R, L, G, C를 계산하여 각 케이블 종류별 특성 임피던스를 구하였다. 또한 지면의 유전상수와 도전율을 고려한 특성 임피던스를 구하여 보다 실질적이고 의미 있는 값을 도출하였다.

이때 도체 내부의 선속(flux)이 외부보다 매우 작기 때문에 표피효과에 의한 인덕턴스는 무시할 수 있다. 알루미늄 선의 개수를 n_s , 알루미늄 선의 반지름을 r_s , 내부 강심의 수를 n_c , 내부 강심의 반지름을 r_c 라고 할 때, 표피효과에 의한 저항 R_{se} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

2. 본 론

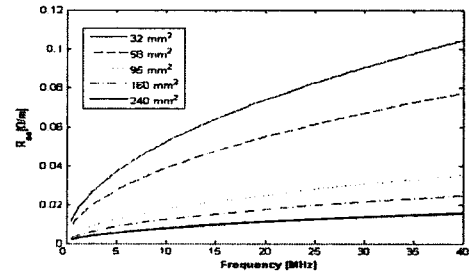
2.1 고압 배전선로의 표피저항 효과

현재 국내에서 22.9kV 고압 전력 배전선로에 사용되는 케이블은 합성연선으로 2 종류 이상의 금속선을 꼬은 전선으로서 강심 알루미늄 연선(ACSR-OC: Aluminum Conductor Steel Reinforced Outdoor Cross-linked Polyethylene insulated Wires)이 대표적이다. ACSR-OC 선로는 도전율이 61%인 경 알루미늄 선을 사용하며, 동선에 비해 가볍고 철심으로 보강하여 기계적인 강도가 크며, 같은 저항의 동선보다 전선의경이 커서 코로나 방지에 장점이 있다.

$$R_{se} = \frac{R_{0at}(q+r)}{2r\sqrt{2}} \quad [\Omega/m] \quad (식 1)$$

여기서 ρ, f, μ_0 는 각각 알루미늄의 컨덕턴스, 주파수, 투자율을 나타낸다. 그림 2는 ACSR 선로의 종류에 따라서 계산된 R_{se} 값을 나타낸다. 예상대로 단면적이 증가할수록 저항값이 감소하는 경향을 보인다. 표피저항은 주파수의 함수이며 20MHz대역에서 58mm²선로의 경우 약 0.06Ω/m의 값을 나타낸다.

ACSR-OC 선로의 종류는 표 1과 같다. 표 1로부터 단면적이 32, 58, 95 ㎍ 인 선로는 중심에 한 개의 알루미늄 피복 강심이 존재하고 6 가닥의 알루미늄 선으로 둘러 쌓여있다. 그리고 그 바깥에 두께가 3mm, 유전상수가 2.25인 폴리에틸렌으로 절연층이 구성된다. 마찬가지로 단면적이 160, 240 ㎍ 인 선로는 중심에 7개의 알루미늄 피복 강심, 그 위층에 30 가닥의 알루미늄 선, 폴리에틸렌 피복으로 구성되어 있음을 알 수 있다.



〈그림 2〉 ACSR 선로의 종류에 따른 표피효과 저항

표 1. ACSR-OC 고압 배전 선로

공칭 단면적	도 체			절연두께 의 경		
	Al	Steel	외경	(㎜)	(㎜)	(㎜)
(㎍)	No./(mm) (개수 및 직경)	No./(mm) (개수 및 직경)	(㎜)			
32	6/2.6	1/2.6	7.2	3.0	13.2	
58	6/3.5	1/3.5	9.7	3.0	15.7	
95	18/4.5	1/4.5	12.0	3.5	19.0	
160	30/2.6	7/2.6	15.4	4.0	23.4	
240	30/3.2	7/3.2	18.9	4.0	27.0	

2.2 고압 배전선로의 유효유전상수

실제 국내 가공지선용 배전선로는 지상으로부터 약 10m이상의 가공(overhead)에 위치한다. 그리고 3상 4선식을 사용하므로 3상의

전압선로이외에 대지와 접지된 증성선이 사용된다. 따라서 전력선과 증성선을 통해 신호를 인가시키면 대부분의 전류가 증성선 보다는 대지를 통해 대부분 흐르기 때문에 ACSR-OC 선로가 접지면 위에 존재한다고 가정 할 수 있다.

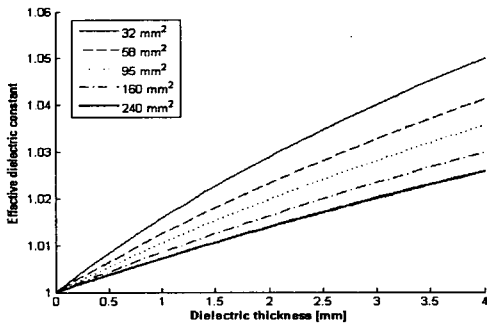
일반적으로 유전체가 코팅되어 있지 않은 도체만 존재하는 평행 선로(parallel wires)의 정전용량은 전자기적 이론으로부터 간단하게 수식으로 계산할 수 있다. 그러나 유전체가 코팅된 평행선로의 경우는 정전용량을 수식적으로 계산하는 것이 쉽지 않으므로 실제 구조를 계산하기 쉬운 형태로 사상(transformation)하여 계산하는 방법이 주로 이용된다. 따라서 본 논문에서는 정량적인 수식을 얻을 수 있는 등각사상법(conformal mapping)을 이용하여 정전용량을 계산하였다[2]. 정전용량은 식 2에서 구할 수 있다.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2x_1} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{dy}{1 + (\epsilon_r - 1) \frac{f(y)}{x_1}} \quad (\text{식 2})$$

유효 유전상수 $\epsilon_{r,eff}$ 는 유전체가 존재할 때 정전용량 C_d , 유전체가 존재하지 않을 때 정전용량 C_a 를 이용해 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon_{r,eff} = \frac{C_d}{C_a} \quad (\text{식 3})$$

그림 3은 케이블 종류 및 유전체 두께의 변화에 따른 유효유전상수 값을 나타낸다.



<그림 3> 유전체가 코팅된 평행 2선식 전송선로의 유효유전상수

2.3. 고압 배전선로의 분포정수 및 특성 임피던스

지면을 완전도체(PEC : Perfect Electric Conductor)로 가정할 경우의 정전용량 및 인덕턴스는 식 4, 식 5와 같이 계산할 수 있다.

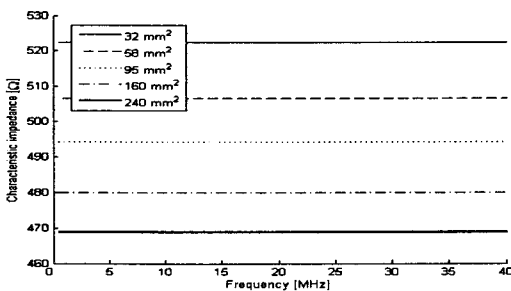
$$C_p = \frac{q_l}{V} = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln(2h/R)} \quad [F/m] \quad (\text{식 4})$$

$$L_p = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(2h/R) \quad [H/m] \quad (\text{식 5})$$

또한 공기의 도전율은 0으로 근사화 할 수 있으므로 G_p 는 무시할 수 있는 값이다. 계산된 배전선로의 R_{se}, L_p, G_p, C_p 로부터 특성임피던스는 식 6과 같이 계산 할 수 있다.

$$Z_{0p} = \sqrt{\frac{(R_{se} + j\omega L_p)}{j\omega C_p}} \quad [\Omega] \quad (\text{식 6})$$

실제 전력선 통신 선로의 규격을 적용하여 전력선의 종류별, 40MHz이하 대역의 주파수 영역에서의 특성임피던스를 계산하면 그림 4와 같다. 선로의 지면과의 높이 h를 10m로 하여 계산된 임피던스는 전력선의 단면적에 따라서 특성 임피던스가 450~520Ω정도로 매우 큰 값을 가짐을 알 수 있다.



<그림 4> 주파수 및 케이블 단면적의 변화에 따른 전력선의 특성임피던스

2.4 실제 지면의 유전상수 및 도전율을 고려한 선로 파라미터

실제 지면은 앞에서 가정한 PEC가 아닌 유한한 도전율을 갖고 일정 값의 유전상수를 갖는다. 따라서 이미지 이론에 의한 해석이 아닌 보다 정확한 해석이 필요하다. 현재까지 Carson, King 및 Wu, Chen[3] 등이 이러한 문제에 대한 접근 방법을 제시 하였으며, 이 중 본 과제의 주파수 대역 및 여러 가지 상황에 부합되고 가장 정확한 접근 방식을 제시한 것으로 검토된 King의 방법을 이용하기로 한다. 실제 지면을 고려하게 되면 전체 전하량 대 전위의 비로 계산되는 정전용량은 변화가 없지만, 인덕턴스의 경우 PEC의 경우에 비해 선속(flux)의 변화량이 크기 때문에 지면 자체의 인덕턴스를 고려해 주어야 한다. 따라서 단위 길이당 병렬 어드미턴스는 앞에서 계산한 정전용량 값을 이용해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Y = -j\omega C_p = -\frac{j2\pi\omega\epsilon_r\epsilon_0}{\ln(2h/R)} \quad [S/m] \quad (\text{식 7})$$

또한 단위 길이당 직렬 임피던스는 앞에서 계산한 표피효과 저항 R_{se} 및 이미지이론에 의해 계산된 인덕턴스 L_p , 지면 인덕턴스 L_g 를 이용해 다음과 같이 계산할 수 있다.

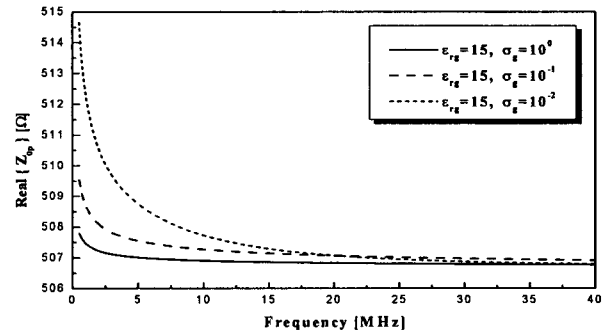
$$Z = R_{se} + j\omega(L_p - L_g) = R_{se} + j\omega\left(\frac{\mu_0}{2\pi} \ln(2h/R) - L_g\right) \quad [\Omega/m] \quad (\text{식 8})$$

전력선 통신 선로의 특성임피던스는 다음 식 9와 같이 계산된다.

$$Z_{0p} = \sqrt{Z/Y} \quad [\Omega] \quad (\text{식 9})$$

그림 5는 유전상수 및 지면 도전율의 변화에 따른 특성 임피던스의 실수부분을 계산한 결과이다. 예상대로 도전율이 감소할수록 지면상에 존재하는 저항성분이 증가하기 때문에 특성임피던스 또한 증가함을 알 수 있다.

결론적으로 지면의 도전율이 증가할수록 거의 주파수 전 대역에서 지면이 PEC라는 가정 하에 이미지 이론을 적용하여 계산한 결과인 507Ω으로 수렴함을 알 수 있다. 그리고 유전상수가 증가할수록 특성임피던스가 주파수의 증가에 따라 점점 더 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다.



<그림 5> 지면 도전율의 변화에 따른 특성임피던스($\epsilon_r = 15$)

3. 결 론

본 논문에서는 22.9kV 고압 가공 배전선로를 고속 전력선 통신을 위한 통신 채널로 사용하기 위하여 전력선 통신 주파수 2MHz~30MHz 대역에 대한 특성 파라미터를 해석하였다.

먼저 고압 배전선로에 주로 사용되는 ACSR-OC 케이블에 대한 구조를 분석하고 이의 특성 파라미터로부터 분포정수와 특성 임피던스를 구하였다. 저항성분을 구하기 위하여 공동 도체 모델을 이용하여 표피저항을 구하였다. 표피저항은 케이블 단면적에 따라 2MHz~40MHz 주파수 대역에서 0.01Ω/m~0.1Ω/m의 분포를 나타내었다.

또한 등각 사상법을 이용하여 유전체가 코팅된 평행 2선식 고압 배전선로의 정전용량 및 유효유전상수를 계산하였다. 계산된 정전용량은 6.2pF~7.2pF의 값을 나타내며, 유효유전상수는 1.02~1.04의 값을 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 고압 배전선로의 분포정수와 특성임피던스를 구하였으며, 특성임피던스는 케이블 단면적에 따라서 470Ω~530Ω 사이의 분포를 나타내었다. 특히, 특성 임피던스는 지면을 완전 전기도체로 가정할 경우에 비하여 실제 지면의 도전율과 유전상수를 고려할 때 20MHz 이하의 대역에서 보다 높은 값을 갖는 것을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. B. Dwight, "Skin Effect in Tubular and Flat Conductors", AIEE Transaction, 1918, pp. 1379
- [2] J. R. Kuttler, "A new method for calculating TE and TM cutoff frequencies of uniform waveguide with lunar or eccentric annular cross section" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 32, pp.348-354, Apr. 1984
- [3] R. W. P. King, T.T. Wu, and L. C. Shen, "The horizontal-wire antenna over a conducting or dielectric half-space : Current and admittance," Radio Sci., vol. 9, pp.701-709, July 1974.