

감쇠 상수를 이용한 22.9kV 전력 케이블의 열화 진단

이신호*, 이춘구*, 박진배*, 광기석*, 장승진*
연세대학교 전기전자공학과*

Aging Diagnosis of 22.9kV Power Cable Using Attenuation Constant

Sin Ho Lee*, Chun ku Lee*, Jin Bae Park*, Ki Seok Kwak, and Seung Jin Jang*
Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University*

Abstract - 본 논문에서는 22.9kV급 지중 전력 케이블의 열화에 의한 특성 변화를 분석한다. 케이블이 실제 선로로 포설될 경우 케이블에는 고전압이 흐르게 되고, 이로 인해 열이 발생하게 된다. 이와 같이 발생한 열에 의한 절연체 이상은 케이블 사고로 이어지므로 케이블의 열화 특성 분석은 사고를 미연에 방지하기 위해서 필요하다. 따라서 본 논문에서는 실제 선로에 사용된 후 교체된 케이블의 감쇠 상수를 구하여 열화가 진행된 정도에 따른 감쇠상수의 변화를 분석한다. 이 때, 네트워크 분석기의 S-파라미터를 이용하여 감쇠 상수를 구하고, 정상 상태 케이블과 폐 케이블의 감쇠상수를 비교하여 열화에 의한 케이블의 특성을 분석한다.

1. 서 론

최근 들어, 설치 및 유지비용이 가공 선로보다 많이 들어감에도 불구하고 지중 케이블이 가공 선로를 대체하여 포설되며, 이에 따라 지중 케이블에 대한 연구가 많은 학자들에 의해 이루어지고 있다 [1]. 특히 가공 폴리에틸렌 (XLPE) 케이블은 낮은 손실, 높은 안정도 등과 같은 장점 때문에 지중 케이블로 많이 이용되고 있다 [2].

이러한 XLPE 케이블에서 가장 문제가 되고 있는 현상이 열화이다. 고전압에 의한 열의 발생으로 인하여 절연체가 손상되는 현상인 열화는 케이블 사고의 원인이 될 수 있다. 따라서 케이블의 열화 특성을 분석하는 것은 사고를 미연에 방지하기 위해 필요한 연구이다. 케이블의 열화를 분석하기 위한 방법 중의 하나가 케이블의 감쇠 상수를 분석하는 것이다. 열화 정도에 따라 케이블의 감쇠 상수가 변하기 때문이다. 전력 케이블의 감쇠 상수는 전력 케이블을 동축케이블로 근사화하여, 동축 케이블의 단위 저항, 단위 인덕턴스, 단위 컨덕턴스, 단위 커패시턴스를 구함으로써 감쇠상수를 구할 수 있다 [3]. 하지만, 이 파라미터들은 이상적인 상황에서 구할 수 있기 때문에 실질적인 상황에서는 이용하기 힘들다 [4]. 따라서 네트워크 분석기를 통해 케이블의 S-파라미터를 구하고 이를 이용하여 감쇠 상수를 구하는 방법이 필요하다 [4].

본 논문에서는 22.9kV급 지중케이블의 감쇠상수를 네트워크 분석기의 S-파라미터를 통해 구한다. 이 때, 사용된 시기가 다른 케이블(1994년, 2007년, 2010년 생산되어 2011년에 수거한 케이블)을 네트워크 분석기를 통해 분석하고, 정상상태 케이블과 비교하여 케이블의 감쇠 상수가 열화 정도에 따라 변함을 확인한다.

2. 본 론

2.1 이론적인 배경

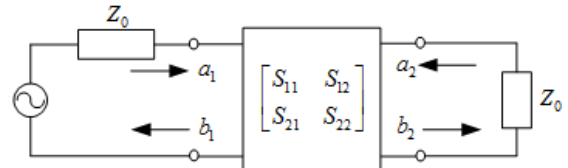
일반적인 전송선로에서 감쇠상수(α [dB/m])는 중요한 파라미터이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = 8.686 \operatorname{Re} \left(\sqrt{(R_u + j\omega L_u)(G_u + j\omega C_u)} \right), \quad (1)$$

여기서 R_u [Ω/m]는 단위 저항, L_u [H/m]는 단위 인덕턴스, G_u [S/m]는 단위 컨덕턴스, C_u [F/m]는 단위 커패시턴스다.

식 (1)과 같이 감쇠상수를 구하기 위해서는 측정하고자 하는 케이블의 단위 저항, 인덕턴스, 컨덕턴스, 커패시턴스와 같은 특성 파라미터들을 알아야 하며, 이 파라미터들은 전송선로가 이상적인 short와 open 회로를 이루고 있어야 한다. 하지만, 실질적으로 이를 통해 파라미터들을 측정하기에는 어려움이 많다. 따라서 본 논문에서는 네트워크 분석기를 통해 케이블의 S-파라미터를 측정하고, 이를 이용하여 감쇠상수를 구하는 방법을 이용한다.

그림 2는 전송선로의 S-파라미터를 나타내며, 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.



<그림 1> 전송 선로

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

여기서 식 (2)의 a_1, a_2, b_1, b_2 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$a_1 = \frac{V_1 + Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}}, a_2 = \frac{V_2 + Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}},$$

$$b_1 = \frac{V_1 - Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}}, b_2 = \frac{V_2 - Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}}.$$

V_1 과 I_1 은 각각 입력단의 전압과 전류이며, V_2 과 I_2 는 각각 출력단의 전압과 전류이다. Z_0 는 정상 임피던스로, 일반적으로 값을 50Ω로 생각한다. 또한 S-파라미터 행렬은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{D_s} \begin{bmatrix} (Z_c^2 - Z_0^2) \sinh(\gamma l) & 2Z_c Z_0 \\ 2Z_c Z_0 & (Z_c^2 - Z_0^2) \sinh(\gamma l) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

여기서, 식 (3)의 $D_s = 2Z_c Z_0 \cosh(\gamma l) + (Z_c^2 + Z_0^2) \sinh(\gamma l)$.

식 (3)을 이용하여 전력 케이블의 감쇠 상수를 구하면 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\alpha(\omega) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{l} \cosh^{-1} \left(\frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \right) \right\}. \quad (4)$$



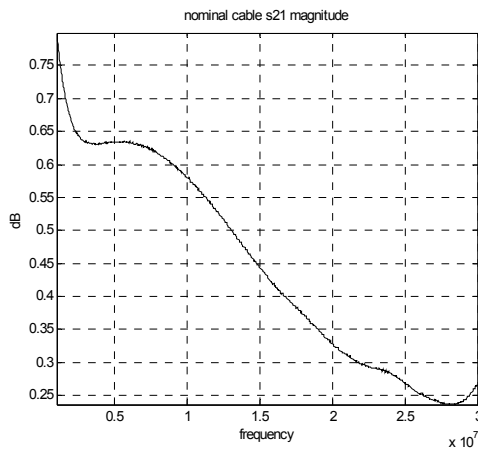
<그림 2> 폐 케이블

2.2 실험 결과 및 분석

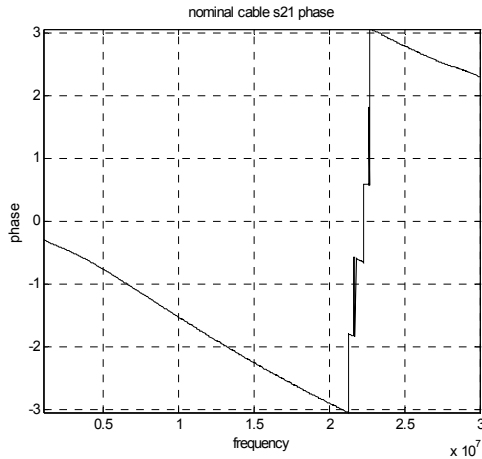
전력 케이블의 S-파라미터를 측정하기 위해 네트워크 분석기를 준비한다. 이 때 이용되는 네트워크 분석기는 모델 E5061A이며, 이 때 이용되는 주파수 대역은 1MHz-30MHz이다. 정상상태 케이블과 2010년, 2007년, 1994년 생산된 케이블을 그림 2와 같이 다섯 개의 샘플을 준비하고, 케이블의 끝을 종단 처리하여 네트워크 분석기와 연결이 쉽도록 한다. 네트워크 분석기의 포트 1과 포트 2에서 나온 연결선과 케이블의 종단 부를 악어 클립으로 연결하여 실험 준비를 한다.

그림 3과 그림 4는 각각 정상상태 케이블의 다섯 개 샘플의 S21 파라미터의 평균값이다. 그림 3은 S21의 크기를 나타내며, 그림 4는 S21의 위상 값을 나타내고 있다. 이와 같이 정상상태 케이블뿐만 아니라 2010년, 2007년, 1994년 케이블의 다섯 샘플 모두 S21 파라미터와 S11 파라미터를 모두 구하여 평균을 낸다. 나머지 케이블의 S21 파라미터 및 모든 케이블의 S11 파라미터 값은 생략한다.

그림 3과 그림 4는 각각 정상상태 케이블의 다섯 개 샘플의 S21 파라미터의 평균값이다. 그림 3은 S21의 크기를 나타내며, 그림 4는 S21의 위상 값을 나타내고 있다. 이와 같이 정상상태 케이블뿐만 아니라 2010년, 2007년, 1994년 케이블의 다섯 샘플 모두 S21 파라미터와 S11 파라미터를 모두 구하여 평균을 낸다. 나머지 케이블의 S21 파라미터 및 모든 케이블의 S11 파라미터 값은 생략한다.



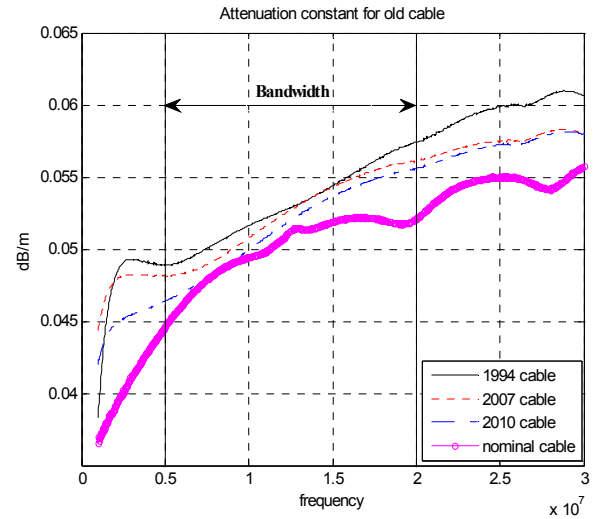
〈그림 3〉 정상상태 케이블 S21 크기



〈그림 4〉 정상상태 케이블 S21 위상

〈표 1〉 열화 정도에 따른 평균 감쇠 상수

케이블 종류	평균 감쇠 상수 [dB/m]
정상상태 케이블	0.0503
2010년 페 케이블	0.0526
2007년 페 케이블	0.0535
1994년 페 케이블	0.0546



〈그림 5〉 감쇠 상수

모든 샘플들의 S-파라미터를 구한 후, 식 (4)를 이용하여 감쇠 상수를 구해보면, 그림 5와 같이 나온다. 이 때, 그림 5는 케이블의 종류마다 감쇠 상수의 평균값이다. 또한 정확한 수치로 표현하기 위해 주파수에 대해 평균을 내어 감쇠 상수를 구해 보면 표 1과 같이 값을 구할 수 있다. 이를 통해 케이블의 사용 시기가 오래되고, 열화가 오래 진행되었을수록 감쇠 상수가 커짐을 확인할 수 있었고, 이는 열화 정도를 나타내는 인자로서 사용할 수 있음을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 22.9kV급 지중 전력 케이블의 열화에 의한 특성 변화를 분석하고자 하였다. 이를 위해 실제 선로에 사용된 후 교체된 케이블(2010년, 2007년, 1994년 생산 케이블)의 감쇠 상수를 구하여 열화가 진행된 정도에 따른 감쇠상수의 변화를 분석하였다. 이 때, 감쇠상수를 구하기 위하여 네트워크 분석기의 S-파라미터를 이용하며, 정상 상태 케이블과 페 케이블의 감쇠상수를 비교하여 열화에 의한 케이블의 특성을 분석한다. 또한, 이러한 실험 결과를 통해 열화가 많이 진행된 케이블, 즉 포설된지 오래된 케이블일수록 감쇠상수가 더 컸으며, 이를 이용하여 실제 사용되고 있는 케이블의 열화 정도를 측정할 수 있는 factor로서 이용 가능함을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. C. Tu and J. R. Marti, "A robust phase-coordinate frequency-dependent underground cable model (zCable) for the EMTP", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp. 189-194, 2003.
- [2] A. Ponnirani and M. S. Kamarudin, "Study on the performance of underground XLPE cables in service based on tan delta and capacitance measurements", Proc. of IEEE 2nd International Power and Energy Conference, pp. 39-43, 2008.
- [3] A. Cataliotti, A. Daidone, and G. Tine, "Power line communication in medium voltage systems: characterization of MV cables", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 23, no. 4, pp. 1896-1902, 2008.
- [4] R. Papazyan, P. Pettersson, H. Edin, R. Eriksson, and U. Gavvert, "Extraction of high frequency power cable characteristics from S-parameter measurements", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 11, no. 3, pp. 461-470, 2004.

[감사의 글]

This research was funded by the Ministry of Knowledge Economy (MKE), Project # 2009T100100609, "Development for 22.9kV Power Cable Fault Diagnosis System and Traceability Management System Based on TFDR".