

지중케이블 선로 임피던스 실측 및 분석

하체용 · 김정년
LG 전선(주)

Measurement and Analysis of Line Impedance in Underground Cables

C. W. Ha · J. N. Kim
LG Cable Ltd.

Abstract - The line impedance is important data that is applied in all analysis fields of electric power system like power flow, fault current, stability and relay calculation etc.

Usually, impedance can be accurately calculated in case of overhead line. However, in case of power cables or combined transmission lines, impedance can not be accurately calculated because cable systems have the sheath, grounding wires, and earth resistance. Therefore, if there is a fault in cable system, these terms will severely be caused much error to calculation of impedance.

Therefore, the line impedance were measured for this study in an actual power system of underground cables, and were analyzed by a generalized circuit analysis program EMTP for comparison with the measured value. These analysis result is considered to become foundation of impedance calculation for underground cable.

1. 서 론

일반적으로 전력은 주로 가공송전선로를 이용하여 송전되는 것이 대부분이었다. 그러나 도심지의 급속한 팽창과 기타 가공송전 건설이 어려운 지역의 출현 등으로 기존의 선로는 물론 새로운 선로도 전력케이블로 대체하거나 또는 신설하는 경우가 늘어나는 경우는 물론 변전소 구간의 송전선로가 가공 및 지중으로 혼합되어 건설되는 경우도 증가하고 있다[1]-[2].

현재 송전선로용 보호계전기는 주보호로 디지털형 전류차동계전기를 사용하게 되었으며 후비보호로는 디지털 거리계전기를 사용하고 있는데 이러한 추세는 앞으로도 계속될 것으로 전망된다. 그런데 만일 주보호인 전류차동계전기가 부동작 한다면 거리계전기가 반드시 정확하게 동작하여 선로를 보호하여야만 한다. 거리계전기는 계전기 설치점에서 고장점까지의 선로 임피던스를 정확하게 측정할 수 있도록 Zone을 판별하여 트림을 결정하게 된다. 이때 정확한 동작은 얼마나 고장점까지의 선로 임피던스를 정확하게 계산하느냐에 달려있다. 그런데 가공선로만의 송전계통에서는 거의 정확하게 이러한 선로 임피던스들이 계산되어 부동작이나 오동작의 염려가 매우 적다. 그러나 케이블만으로 이루어진 선로나 혼합선로에서는 많은 오차를 유발하게 되어 자연히 임피던스 계산치는 부정확하게 되어 계전기 동작에 큰 문제를 야기시키고 있다.

본 논문에서는 Pakistan Karachi 220kV OFAZE 1C×100SQ 케이블을 대상으로 선로 임피던스를 실측한 결과와 EMTP를 통해서 분석한 결과 및 계산식과 비교를 통하여 지중케이블의 선로 임피던스 오차 원인 및 향후 관련 연구에 도움이 되도록 하였다.

2. 케이블의 선로 임피던스 계산

케이블은 일반적으로 1개 이상의 동심 도체로 구성되어 있고 각 도체는 고체, 액체 또는 기체로 절연되어

있으며 대부분의 케이블은 지중에 매설하여 운전할 수 있도록 설계 되어 있다. 케이블의 구조는 다양하지만 국내외에서 대표적으로 쓰이는 케이블은 도체(Core), 절연체(Insulator) 및 전기적 도전성을 갖는 시스(Sheath)로 구성되어 있다. 이 시스는 대지와 직접 접촉되도록 설계하거나, 절연물을 사용하여 대지와 절연시킬 수도 있다.

따라서, 각 케이블 회사에서 사용하고 있는 선로 임피던스 계산식은 정상(역상) 임피던스와 영상 임피던스를 등가적인 하나의 상에 대한 해석으로 간략화 시키고 영상 임피던스를 구할 경우에는 3상이 동일 전원에서 동일 전류가 흐른다는 가정에서 각 상간의 상호 임피던스 영향을 배제시킬 수 있는 특징을 이용하여 간략화 수식으로 나타내는 계산식을 적용하여 선로 임피던스를 계산하고 있다. 하지만 이러한 계산식은 다음과 같은 조건이 성립해야 한다는 문제점을 안고 있다.[1]

- 1) 시스의 접지 저항이 0Ω이 되어야 된다는 조건
- 2) 크로스 본드 대 구간내 접속함 간 케이블 길이는 1 : 1 : 1로 되어 시스의 불평형 전류류가 흐르지 않는 조건
- 3) 도체 연가가 이루어진 선로에서의 각 선로간 불평형이 없어야 한다는 조건
- 4) 기타

따라서 위의 조건을 만족하지 못할 때에는 선로 임피던스의 에러 발생 요인 되어 이론치와 실측치와의 오차가 발생하게 된다.

이러한 지중케이블의 선로 임피던스 계산식을 2.1 및 2.2절에서 나타내었다.

2.1 케이블의 등가회로 구성

현재 송전 선로에 대한 등가회로의 변환방법에 있어서 케이블 선로는 정상(역상) 임피던스와 영상 임피던스로 분리하여 등가식을 제시하고 있다.

따라서, 지중송전케이블에서 1선 지락고장이 발생하였을 경우에 케이블의 정상 및 영상 임피던스는 식 (4)와 같이 구할 수 있고, 영상 임피던스는 계산식 표 1의 CASE (1)~CASE (3)과 같이 크게 3가지의 형태로 구분하여 구할 수가 있다.

우리나라의 케이블은 도체 둘레를 시스가 감싸고 있고 또한 1선 지락고장은 도체의 절연이 파괴되어서 일어나는 경우가 대부분이다. 이때 고장이 발생하면 고장전류가 시스와 대지로 흐르게 된다. 이와 같은 경우에 적용이 가능한 CASE 3를 적용하여 실 선로에 대한 케이블의 등가 영상 임피던스를 계산하고 있다. 단지 발전소 구내 설비와 같이 크로스 본드 접지가 불가능한 짧은 선로에 대해서는 편단접지 형태를 사용하기 때문에 CASE 2의 계산식을 적용하여 영상분 임피던스를 계산하고 있다.

표 1. 케이블 선로의 영상 임피던스 계산식

CASE	케이블선로에서의 1선지락고장시 영상 임피던스 계산식
1	고장전류가 시스로 흐르지 않고 바로 대지로 흐르는 경우 $Z_0 = Z_{C0}$ (1)
2	고장전류가 시스만으로 흐르는 경우 $Z_0 = Z_{C0} + Z_{S0} - 2Z_{M0}$ (2)
3	고장전류가 시스와 대지로 흐르는 경우 $Z_0 = Z_{C0} - \frac{Z_{M0}^2}{Z_{S0}}$ (3)

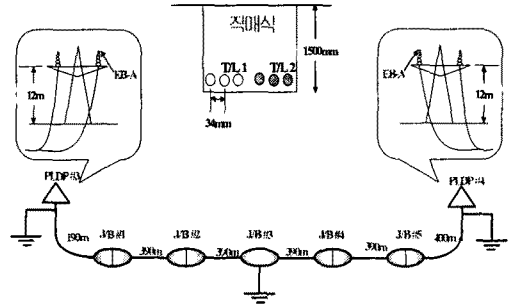


그림 1. 선로 임피던스 측정 선로

2.2 케이블의 대칭분 임피던스 계산식

- 케이블의 정상 및 역상 임피던스 : $Z_1 = Z_2$

$$Z_1 = R_C + j4\pi f \cdot \ln\left(\frac{GMD_{3C}}{GMR_{1C}}\right) \cdot 10^{-4}$$

(4)

- 케이블 도체만의 영상 임피던스 :

$$Z_{C0} = R_C + R_E + j3 \cdot 4\pi f \cdot \ln\left(\frac{D_E}{GMR_{3C}}\right) \cdot 10^{-4}$$

(5)

- 케이블의 시스만의 영상 임피던스 :

$$Z_{S0} = R_S + R_E + j3 \cdot 4\pi f \cdot \ln\left(\frac{D_E}{GMR_{3S}}\right) \cdot 10^{-4}$$

(6)

- 케이블 도체와 시스간의 상호 임피던스 :

$$Z_{M0} = R_E + j3 \cdot 4\pi f \cdot \ln\left(\frac{D_E}{GMR_{3S}}\right) \cdot 10^{-4}$$

(7)

- 케이블의 영상 임피던스 :

여기서 f : 주파수[Hz]

R_C : 교류 도체 저항[Ω/km]

R_S : 시스 저항[Ω/km]

R_E : 등가 대지 저항[Ω/km]

D_E : 대지로부터 등가 깊이[mm]

GMD_{3C} : 도체간 기하학적 평균거리[mm]

GMR_{3S} : 시스의 평균반경[mm]

GMR_{1C} : 도체간 기하학적 평균반경[mm]

GMR_{3C} : 3상 케이블도체 전체를 하나의 단도체로 간주한 경우 그 단도체의 GMR [mm]

3. 실측 및 시뮬레이션 분석 결과

3.1 선로 임피던스 측정

본 연구의 대상으로 하였던 실 선로는 Pakistan Karachi의 220kV 선로로, OFAZE 1C×1600SQ의 케이블이 직매 2회선 포설된 선로이다. 케이블 길이는 2.15km이고 도체 연가 및 Link Box 내 크로스 본드가 실시되었다. 그리고 케이블 헤드쪽은 지상 12m의 높이에서 가공선로와 접속이 된 구조이다. 크로스 본드 대 구간 내 접속함간 길이는 대체적으로 1 : 1 : 1을 나타내었다. 실측선로에 대한 자세한 도면을 그림 1에 나타내었다.

지중케이블 선로는 가공송전선로에 비해서 상당히 짧은 포설 구간을 갖기 때문에 낮은 전압에도 대전류가 흐르는 경우가 많다. 또한 선로 임피던스 측정시 제 3 고조파 및 각종 노이즈에 영향을 많이 받게 된다. 따라서 이러한 특성을 고려하여 연구소에서는 지중케이블 선로 전용 선로 임피던스 측정 설비를 개발하였다. 그림 2에 선로 임피던스 측정장비에 대해서 나타내었다.

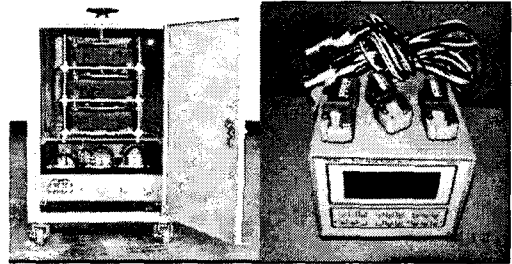


그림 2. 선로 임피던스 측정 장비

선로 임피던스 측정 장비를 사용하여 정상분 임피던스는 각 T/L에 대하여 3회 이상 실시하였고, 영상분 임피던스의 경우를 구분하여 각 T/L별로 고장전류가 대지로 흐르는 경우(CASE 1), 시스로 흐르는 경우(CASE 2), 및 영상분 전류가 시스와 대지로 흐르는 경우(CASE 3)로 나누어서 실측을 실시하였고 그 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. 선로 임피던스 측정 데이터

Data	정상분	영상분		
		CASE 1	CASE 2	CASE 3
전압(V)	9.567	6.984	6.001	6.39
전류(A)	22.82	5.796	30.327	42.097
임피던스(Ω)	0.4257	1.205	0.1978	0.1518
Angle(°)	80.94	65.1	41.062	42.946
선로 임피던스(Ω/km)	0.198 ∠ 80.9	0.56 ∠ 65.1	0.092 ∠ 41.1	0.07 ∠ 42.95

표 2에서 보듯이 영상분 값은 각 CASE 별로 많은 차이를 나타내는데 접지 저항의 크기가 주 원인이라고 할 수 있다. 하지만 실 선로에서는 접지저항의 변화 및 케이블 시스템의 변경이 용이하지 않기 때문에 본 논문에서는 EMTP를 사용하여 실 선로에 대한 모델링 구성 및 접지저항의 변화에 따른 영향 등을 평가하였다.

3.2 EMTP를 이용한 시뮬레이션 결과

EMTP를 통한 지중케이블의 선로임피던스 계산을 위하여 EMTP의 보조프로그램인 'CABLE CONSTANTS 보조루틴'을 사용 OFAZE 1600SQ의 선로정수를 구하였고,

EMTP 시뮬레이션에서 케이블의 도체와 시스간의 정상분 및 영상분 임피던스 측정에 필요한 회로를 구성하였다. 그리고 전원단 전압을 입력 하였을 때 케이블 선로에 흐르는 정상분/영상분 전류 및 역률등을 측정하여 임피던스를 계산 하였다. 그리고 계산 결과 및 오차율을 표 3에 나타내었다.

표 3. 선로 임피던스 계산 비교 및 오차율

임피던스		실측치 (Ω/km)	EMTP 결과 (Ω/km)	오차율 (%)	이론치 (Ω/km)	오차율 (%)	
정상분	R	0.0311	0.024	22.83	0.0537	72.67	
	X	0.01955	0.2153	10.13	0.0828	57.64	
영상분	CASE 1	R	0.0512	0.0695	35.74	0.0584	14.08
		X	0.0477	0.0544	14.05	0.055	16.87
	CASE 2	R	0.0694	0.0679	1.38	0.0586	64.8
		X	0.0604	0.0552	8.6	0.0556	57.6
	CASE 3	R	0.2358	0.4265	80.87	0.1933	18.02
		X	0.5079	1.9099	276.04	1.6394	222.76

표 3에서 나타낸 바와 같이 실측치를 기준으로 하였을 때 선로 임피던스는 최소 1.38%에서 최대 276%까지 변동이 심함을 알 수 있다. 이러한 오차는 실측 선로가 국내 선로에서는 거의 적용되지 않고 있는 직매 포설인 설로이기 때문에 EMTP 시뮬레이션 적용 시 판로나 전력구 포설 형태에 비해서 많은 Unknown Factor가 존재하고 시뮬레이션에서의 주 오차발생 원인이 된다.

특히 국내 지중케이블의 포설방식에서 적용 할 수 있는 CASE 3의 경우는 시뮬레이션 결과 및 이론치 모두 상당한 차이가 발생한다. 이는 현장의 여건에 따라서 도체 및 시스간 기하학적 평균 반경이 변하기 때문이고 각 직접 접지 지점의 접지 저항이 영상분 전류의 흐름에 영향을 미치기 때문이다.

3.3 CASE에 따른 영상분 임피던스 특성 분석

영상분 임피던스의 변화는 각 CASE에 따른 시뮬레이션 상에서도 그대로 나타나게 되는데 그림 3에 나타낸 바와 같이 동일 전원을 가압 하였을 때의 영상분 전류의 변화가 심하다는 것을 알 수 있다.

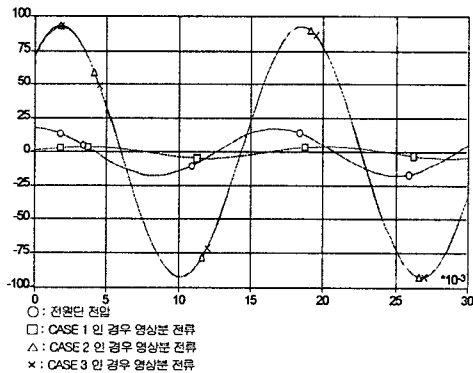


그림 3. CASE에 따른 영상분 전류 크기 비교

그림 3에서 CASE 2와 CASE 3은 대체적으로 일치하였으나 CASE 1과는 상당한 차이를 나타냄을 볼 수 있다.

이는 접지저항의 크기에 따라 영상분 전류의 크기가 상당히 감소하였음을 나타낸 것이다.

CASE 2와 CASE 3은 대체적으로 일치함을 볼 수 있는데 이것은 각 접속함의 접지저항보다 전원단 측의 저항

이 상대적으로 낮기 때문에 영상분 전류의 분류가 크게 발생하지 않음을 알 수 있다. 이러한 접지 저항의 크기를 변화 시키가며 그에 따른 영상분 전류 크기의 변화를 그림 4에 나타내었다.

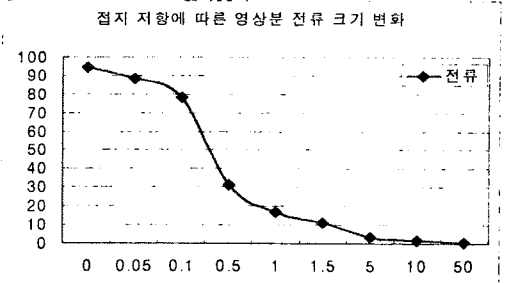


그림 4. 접지저항에 따른 영상분 전류 크기 변화

그림 4에서 보듯이 영상분 전류의 크기는 접지 저항에 따라서 변화량이 상당히 심한 것으로 나타났다. 하지만 2절에서 나타낸 바와 같이 지중케이블 선로 임피던스 계산에 사용하고 있는 계산식은 이러한 접지저항의 영향을 고려하고 있지 못하다. 따라서 국내 장거리 케이블 선로에서의 선로 임피던스는 계산치와 현실적으로 오차가 발생할 수 있는 문제점을 갖고 있다.

이러한 오차는 서론 부분에서 설명하였던 거리계전기 오동작의 원인이 될 수 있고, 전력 조류 계산, 고장 계산, 안정도 해석 보호 협조 설정 등에 문제점을 야기할 수도 있다.

따라서, 현장의 여건 및 포설 형태 등을 고려하여 선로 임피던스를 계산 할 수 있는 이론 식 및 시뮬레이션 기법 등에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

3. 결 론

본 논문에서는 Pakistan Karachi 220kV OFAZE 1C×100SQ 케이블을 대상으로 선로 임피던스를 실측한 결과와 EMTP를 통해서 분석한 결과와의 계산식과의 비교를 통하여 지중케이블의 선로 임피던스 오차 원인 및 향후 관련 연구에 도움이 되도록 하였다.

본 논문에서 제시된 지중케이블 선로 임피던스 실측 및 분석 결과는 지금까지 전력케이블 및 혼합선로에서 발생되는 특수 현상을 고려하지 않고 일괄적으로 적용되는 지중 케이블 선로 임피던스 계산식의 개선 근거를 제시하고 더 나가 지속적인 연구의 토대가 될 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] KEPRI, "지중선 임피던스 및 허용전류 계산기법 연구" 1991.
- [2] 이석규, "지중 송전설비의 효율적 운영", 1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문지, P1385-1387, 1999
- [3] Turan Gonen, "Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design", 1988
- [4] 이종범 외 "송전계통 고저항 사고에 대한 보호계전기 시험 및 특성분석에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol. 47, No. 4, 1998.4
- [5] 하계웅, 이종범, "지중송전케이블용 디지털 거리계전 알고리즘 개선", KIEE. Vol. 49A, NO. 12, DEC. 2000.