

## 발전소에 포설된 케이블 선로 임피던스 분석

하체웅, 한성흠  
한국수력원자력(주)

### Line Impedance Analysis of Underground Cable in Power Plant

C. W. Ha, S. H. Han  
Korea Hydro & Nuclear Power Co.

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

Usually, the impedance can be accurately calculated in case of overhead line. However, in case of power cables or combined transmission lines, the impedance can not be accurately calculated because cable systems have the sheath, grounding wires, and earth resistances.

Therefore, if there is a fault in cable system, these terms will severely be caused many errors for calculating impedance.

In this paper, the line impedance is measured in a power system of underground cables, and is analyzed by a generalized circuit analysis program, EMTP(Electromagnetic Transient Program), for comparison with the measured value. These analysis results are considered to become foundation of impedance calculation for underground cables.

#### 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 늘어나고 있다. 또한 발전소 및 변전소의 전력선로가 지중으로 건설되는 경우도 증가하고 있다[1]-[2].

현재 송전선로용 보호계전기는 후보호로 디지털형 전류차동계전기를 사용하게 되었으며 후보호로는 디지털 거리계전기를 사용하고 있는데 이러한 추세는 앞으로도 계속될 것으로 전망된다. 그런데 만일 후보호인 전류차동계전기가 부동작 한다면 거리계전기가 반드시 정확하게 동작하여 선로를 보호하여야만 한다. 거리계전기는 계전기 설치점에서 고장점까지의 선로 임피던스를 정확하게 측정 한 후 이로부터 Zone을 판별하여 트립을 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 야기 시키고 있다.

본 논문에서는 발전소에 포설된 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 선로임피던스 계산식 적용 조건

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 경우

에는 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 전류가 흐르지 않는 조건
- 3) 도체 연가가 이루어진 선로에서의 각 선로간 불평형이 없어야 한다는 조건
- 4) 기타

만약 위의 조건을 만족하지 못할 때에는 선로 임피던스의 여러 발생 요인 되어 이론치와 실측치와의 오차가 발생하게 된다. 현재 송전 선로에 대한 등가회로의 변환방법에 있어서 케이블 선로는 정상(역상) 임피던스와 영상 임피던스로 분리하여 등가식을 제시하고 있다.[1]

따라서, 지중송전케이블에서 1선 지락고장이 발생하였을 경우에 케이블의 영상 임피던스는 계산식 표 1의 CASE 1~CASE 3와 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 실선로에 대한 케이블의 등가 영상 임피던스를 계산하고 있지만, 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 선로에서의 1선 지락 고장 시 영상 임피던스 계산식

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

여기서,  $Z_{C0}$  : 케이블 도체만의 영상 임피던스  
 $Z_{S0}$  : 케이블의 시스만의 영상 임피던스  
 $Z_{M0}$  : 케이블 도체와 시스간의 상호 임피던스 :

#### 3. 실측 및 시뮬레이션 분석 결과

##### 3.1 선로 임피던스 측정

본 연구의 대상으로 하였던 실 선로는 발전소에 포설된 케이블로서 Oil Filled 1C×600SQ의 케이블이 정상각 배열로 포설된 선로이다. 케이블 길이는 0.791km이고 편단접지 시스템으로 구성 되어 있다.

선로 임피던스 측정 장비를 사용하여 정상분 및 영상전류가 시스로 흐르는 경우의 전압, 전류 및 위상차를 측정된 결과를 표 2에 나타내었다.

<표 2> 선로 임피던스 측정 데이터

Data	정상분	영상분
전압(V)	0.5138	0.0113
전류(A)	0.8250	0.2165
임피던스(Ω)	0.78406	0.06598
Angle(°)	232.5	115.9
선로 임피던스 (Ω/km)	0.479342 + j0.024691	0.02882 + j0.05935

### 3.2 EMTP를 이용한 시뮬레이션 결과

EMTP를 통한 지중케이블의 선로임피던스 계산을 위하여 EMTP의 보조프로그램인 'CABLE CONSTANTS 보조루틴'을 사용하여 600SQ 케이블의 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 오차를 표 3에 나타내었다.

<표3> 선로 임피던스 계산 비교 및 오차율

임피던스	EMTP 시뮬레이션 결과 값 (Ω/km)	실측치 (Ω/km)	오차율 (%)	이론치 (Ω/km)	오차율 (%)
정상분	R	0.04304	545.401	0.07305	35.388
	X	0.10779		0.11044	
영상분	R	0.09350	51.450	0.08518	5.130
	X	0.08955		0.09077	

표 3에서 나타낸 바와 같이 현재 포설 조건 및 접지저항을 모두 고려한 EMTP 결과를 기준으로 하였을 때 실측치의 임피던스는 EMTP 시뮬레이션 결과 값이나 이론값보다 오차율이 심할 수 있다. 이론값은 접지저항을 고려하지 않았지만 케이블 선로가 짧아 중간에 고저항 접지가 이루어지지 않았고, 발전소의 접지 저항이 아주 낮게 유지되고 있기 때문에 접지저항을 고려한 EMTP 시뮬레이션 결과 값 대비 오차율이 낮음을 알 수 있다. 그러나 실측치는 정상분 및 영상분 임피던스 모두 EMTP 시뮬레이션 값이나 이론치 보다 높게 나타나 측정당시 정확한 측정이 이루어지지 않았을 것으로 사료된다. 참고로 EMTP 시뮬레이션 값과 실측치와의 일치 여부는 기존 발표 논문에서 자세하게 나와 있다.[4]

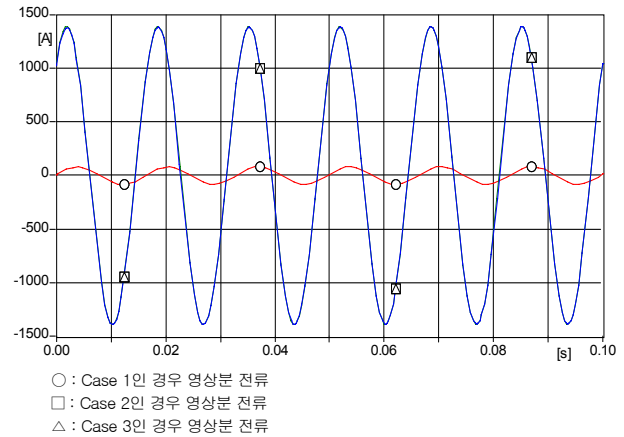
발전소 내에 포설된 전력 케이블의 선로 임피던스는 검증된 측정설비로 제대로 측정을 해야 하겠지만, 본 논문에서처럼 EMTP 시뮬레이션으로 간단히 구할 수 있다. 따라서, EMTP 시뮬레이션을 통한 실측치와의 오차율을 줄인다면 향후 실측치와 이론치의 선로임피던스 비교가 아니라 실측치와 EMTP 시뮬레이션 값의 비교가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

### 3.3 CASE에 따른 영상분 임피던스 특성 분석

표 1에서 제시한 각 CASE에서의 영상분 임피던스의 변화는 시뮬레이션 상에서도 그대로 나타나게 되는데 그림 1에 나타낸 바와 같이 동일 전원을 가압 하였을 때의 영상분 전류의 변화가 심하다는 것을 알 수 있다.

왜냐하면, 본 논문에서 대상으로 한 발전소 케이블은 0.791km 정도의 짧은 선로이기 때문에 접지저항의 영향이 장거리 선로에 비해서 상당히 적어 CASE 2와 CASE 3은 대체적으로 일치하였

으나 CASE 1의 경우는 사고전류가 시스 임피던스나 접지저항과는 무관하게 대지로 바로 흐르는 경우를 의미하므로 시스 임피던스 및 접지저항의 영향을 받는 CASE 2, 3와는 많은 차이를 나타낼 수 있다.



<그림 1> CASE에 따른 영상분 전류 크기 비교

그림에서 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 발전소에 포설된 케이블을 대상으로 선로 임피던스를 실측한 결과, EMTP를 통해서 분석한 결과 및 이론적 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 발생하는 특수 현상을 고려하지 않고 일괄적으로 적용되는 지중 케이블 선로 임피던스 계산식의 개선 근거를 제시하고 더 나가 지속적인 연구의 토대가 될 것으로 사료된다.

## [참고 문헌]

- [1] KEPRI, "지중선 임피던스 및 허용전류 계산기법 연구" 1991.
- [2] 이석규, "지중 송전설비의 효율적 운영", 1999년도 대한 전기학회 하계학술대회 논문지, P1385~1387, 1999
- [3] Turan Gonon, "Electric Power Transmission System Engineering Analysis and Design", 1988
- [4] 하체용 외 "지중케이블선로 임피던스 실측 및 분석", 대한전기학회 하계학술대회 논문지, P205~207, 2003.7.21~23