

웨이브렛 변환을 이용한 혼합송전계통에서의
디지털 거리계전 알고리즘에 관한 연구

정 채균* 홍 동석 이 종범
원광대학교

A Study on the Digital Distance Relaying Algorithm Using Wavelet Transform
in Combined Transmission Line with Underground Power Cables

Chae-Kyun Jung* Dong-Suk Hong Jong-Beom Lee
Wonkwang University

Abstract - Distance relay is tripped by the line impedance calculated at the relay point. Accordingly the accurate operation depends on the precise calculation of line impedance. 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 cable cover protection units (CCPUs). There are also several grounding systems in cable systems. Therefore, if there is a fault in cable system, these terms will severely be caused much error to calculation of impedance. Accordingly the proper compensation should be developed for the correct operation of the distance relay.

This paper presents the distance calculating algorithm in combined transmission line with power cable using wavelet transform. In order to achieve such purpose, judgement method to discriminate the fault section in both sections was proposed using db1 coefficient summation. And also, error compensation factor was proposed for correct calculation of impedance in power cable.

1. 서 론

최근 전력수요는 해마다 증가하고, 인구집중현상에 따른 대도시의 전력수요 밀도가 급격히 높아지고 있으며, 여러 가지 환경적 요인으로 인해 지중 송전선로의 건설이 확대됨에 따라 변전소 구간의 송전선로가 가공 및 지중으로 혼합되어 건설되는 경우가 증가하고 있다. 그런데 지중 송전선로와 결합된 혼합송전선로는 가공선로에 비해 유지 보수가 곤란하며 고장시 고장점 탐지나 복구가 어려워 고장지속시간이 길다는 단점을 지니고 있다.[1]~[3]

현재 송전선로에서 디지털 거리계전기는 후보호인 전류차동계전기의 후비보호로 사용하고 있으며 거리계전기는 계전기 설치점에서 고장점까지의 선로 임피던스를 정확하게 측정하고 이로부터 Zone을 판별하여 Trip을 결정하게 된다. 만일 가공송전선로에서 1선지락 고장시 고장전류는 고장점에서 모두 대지로 방전되기 때문에 고장점까지의 선로임피던스를 비교적 정확히 측정할 수 있어 거리계전기의 오동작은 매우 적다. 그러나 지중송전계통은 케이블의 도체와 시스사이의 절연이 파괴되어 서로 접촉하므로서 1선지락고장이 발생하며 고장전류는 크로스본딩 되어 있는 시스를 통해 보통접속함(NJ)의 직접접지 지점이나 방시층보호장치(CCPU)를 통해 대지로 방전되고 접지저항의 영향도 받는다.

따라서 실제로 지중송전계통이나 혼합송전계통의 지중선로 구간에서 고장 발생시 계전기에 의해 계산되는 겉보기 임피던스와 실제 임피던스와의 많은 오차가 발생하여 거리계전기의 부동작 및 오동작의 우려가 매우 높다.

본 논문에서는 EMTP/ATPDraw를 이용하여 국내에서 운전중인 혼합송전계통을 모델링한 후 시뮬레이션 결과를 세밀히 분석하여 혼합송전계통의 지중선로 구간에서 고장발생시 고장 특성을 정확히 분석하고 고장점까지의 임피던스 계산시 발생하는 오차의 원인을 파악하여 이를 보상할 수 있는 오차보상 값을 제시하였다. 그리고 웨이브렛 변환을 이용하여 고장구간을 판별하였으며 고조파가 제거된 고장신호와 오차보상 값(K)을 이용해 정확한 임피던스를 계산함으로써 혼합송전계통에 적용할 수 있는 새로운 거리계전 알고리즘을 개발하여 제시하였다.

2. 혼합송전계통 모델링 및 케이블 임피던스 계산

2.1 혼합송전계통 모델링

그림 1은 본 논문에서 모델링한 혼합송전선로의 계통도를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 전원은 154kV 편단전원이며 14km의 가공송전선로와 6.06km의 지중송전선로가 연계되어 있다. 가공송전선로는 ACSR 410mm²bundle의 형태이고 지중송전케이블은 2000[mm] XLPE 케이블이 전력구방식의 정상각배열로 포설되어 있다. 또한 계전기 설치점에서 가공선로 구간인 3km, 18km, 11km, 14km 지점과 지중송전케이블 구간인 16km, 18km, 20km 지점에서 고장을 모의하였다. 고장의 형태는 가공송전선로에서는 고장전류가 모두 대지로 귀로하는 완전지락사고로 설정하였고, 지중송전케이블에서는 케이블의 도체가 시스와 접촉해 절연이 파괴되어 지락이 발생하는 실제 고장형태를 모의하였다.

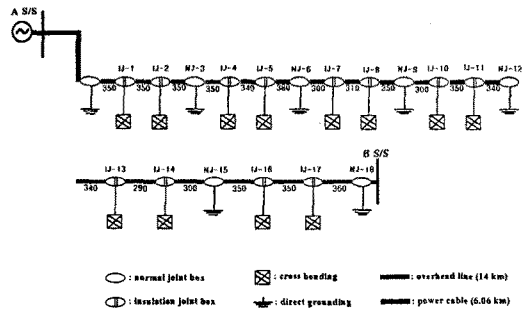


그림 1. 혼합송전선로의 모델계통

2.2 케이블 대칭분 임피던스 계산

본 논문에서는 케이블의 정상(역상)분 임피던스와 영상분 임피던스로 분리하여 계산식을 제시하고자 한다. 시스의 접지저항이 영이고 크로스본딩이 이상적으로 되어 있다고 가정하고 케이블의 등가회로를 구성하여 정상분 임피던스 계산식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_1 = Z_2 = R_c + j\omega \left[\mu_0 \ln \frac{GMD_{3c}}{GMR_{1c}} \times 10^3 \right] \quad (1)$$

여기서,

Z_1, Z_2 : 케이블 정상(역상)분 임피던스 (Ω /km)

R_c : 도체 교류저항 (Ω /km)

GMR_{1c} : 도체간 기하학적 평균반경 (mm)

GMD_{3c} : 도체간 기하학적 평균거리 (mm)

μ_0 : 자유공간의 투자율 (H/m)

이다.

국내의 케이블은 도체 플레를 시스가 감싸고 있고 또한 지락고장은 도체와 시스 사이의 절연이 파괴되어 접촉에 의해 일어나는 경우가 대부분으로 고장전류는 시스를 통해 대지로 흐르게 되는 특징을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 특성을 고려하여 고장전류가 시스를 통해 대지로 귀로하는 경우 적용가능한 식 (2)를 이용해 케이블 영상분 임피던스를 계산하였다. 그리고 식 (3)~식(5)는 Z_{cp} (케이블 도체만의 영상분 임피던스), Z_{so} (케이블 시스만의 영상분 임피던스), Z_{co} (케이블 도체와 시스간 상호 임피던스)의 임피던스 계산식을 각각 나타내었다.

$$Z_0 = Z_{c0} - \frac{Z_{m0}^2}{Z_{s0}} \quad (2)$$

$$Z_{c0} = R_c + R_e + j \left[3w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{GMR_{3c}} \times 10^3 \right] \quad (3)$$

$$Z_{s0} = R_s + R_e + j \left[3w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{GMR_{3s}} \times 10^3 \right] \quad (4)$$

$$Z_{m0} = R_e + j \left[3w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{GMR_{3e}} \times 10^3 \right] \quad (5)$$

여기서,

R_e : 등가대저저항 [Ω/km]

R_s : 시스 교류저항 [Ω/km]

GMR_{3c} : 시스의 평균반경 [mm]

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

D_e : 등가 대저 커로간 거리 [m]

이다.

3. 웨이브렛 변환 및 적정 마더웨이브렛 선정

3.1 웨이브렛 변환 이론

전력계통에서 발생하는 대부분의 고장의 진행파와 연관된 파형은 일반적으로 기본파와 그의 고조파가 결합된 성분을 포함하는 비주기적인 과도특성을 가지므로 주파수 영역으로 변환할 때 시간 영역의 정보가 소실되는 푸리에 변환은 고장검출 및 고장점추정에 적합하지 못하다. 이를 보완하기 위해 제안된 STFT(Short-Time Fourier Transform)는 신호를 시간과 주파수영역으로 분석함으로써 푸리에 변환의 단점을 개선하였다. 그러나 일정한 크기의 윈도우를 사용하기 때문에 제한된 범위에서의 신호분석만 가능하며 시간영역에서 윈도우 크기가 설정되면 모든 주파수 영역에서 윈도우 크기가 고정된다는 단점을 가지고 있다. 따라서 STFT를 이용한 방법도 비주기적이고 비정적인 전력계통의 과도특성을 분석하는 데는 적절하지 못하다.

그러나 웨이브렛 변환은 스케일이 주파수에 따라 변화한다. 즉, 시간-스케일 영역을 사용함으로써 가변윈도우의 특성을 나타내므로 Low Scale에서는 High Frequency 성분을 나타내고, High Scale에서는 Low Frequency 성분을 나타내게 된다. 이처럼 웨이브렛 변환은 웨이브렛 모함수를 정의하고 이 모함수를 시간에 따른 크기 변형(Scaling)과 시간에 따른 이동(Translation)을 통해 분석영역이 가변되는 윈도우를 사용함으로써 푸리에 변환과 STFT변환의 단점을 해결하였다.

연속웨이브렛 변환(CWT)은 모든 스케일에서 웨이브렛 분석을 수행하게 되어 무한히 많은 데이터가 산출되므로 분석시간이 길어진다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 이산웨이브렛함수(W)를 이용하여 Scale (a_0^m)과 Translation(na_0^m) 요소를 이산화시켜 효율적으로 웨이브렛 분석을 수행할 수 있는 이산웨이브렛 변환(DWT)을 사용하였다. 웨이브렛함수와 Signal S(t)에 대한 이산웨이브렛 변환식은 식 (6)과 같다.[5]-[6]

$$DWT(s, m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum S(t) \cdot \Psi\left(\frac{t - na_0^m}{a_0^m}\right) \quad (6)$$

3.2 마더웨이브렛 선정

혼합송전계통의 고장검출 및 고장구간 판단을 위해 각각 마더웨이브렛의 1단계 분석을 통해 D1계수의 합을 비교하였다. 본 논문의 분석 결과 db4와 sym3가 가장 높은 계수 값을 보였으며, 또한 마더웨이브렛 함수의 신뢰도를 평가하기 위해 1단계로 분해시킨 뒤 이를 다시 역변환(IDWT)하여 오차율을 비교한 결과 db4가 가장 우수한 결과를 나타내었다. 따라서 본 논문에서는 신호 분석을 위해 db4를 사용하였으며, db4는 단시간동안 빠르게 발생하는 과도현상에 가장 적합하게 사용될 수 있는 웨이브렛으로 전력계통 해석에 가장 일반적으로 적용되고 있다.

또한 혼합송전계통 거리계전기 임피던스 계산 알고리즘 적용을 위한 전압과 전류의 기수 고조파가 제거된 확실한 기본파 성분 분석을 위해 FFT 분석을 수행하였다. 그림 2는 고장신호의 5단계 분석을 통해 얻어진 Approximation(A)성분과 Detail(D)에 대한 FFT분석 결과를 나타낸 그래프이다. 그림에서 처럼 FFT분석 결과 A5는 고조파가 제거된 확실한 기본파의 성분을 나타내었으나 같은 단계로 분해되는 D5에 다량의 기본파 성분이 포함되어

있어 5단계 분해는 적절하지 못하였다. 또한 A4 역시 확실한 기본파 성분을 포함하고 있으나 2고조파와 3고조파를 함유하고 있음을 알 수 있다. 한편 A3는 기본파 성분을 확실하게 포함할 뿐 아니라 미량의 기수 고조파만을 함유하였다. 따라서 본 논문에서는 db4 웨이브렛의 3단계 분석결과인 전압과 전류신호의 A3성분을 이용해 디지털 거리계전기 알고리즘에 적용하였다

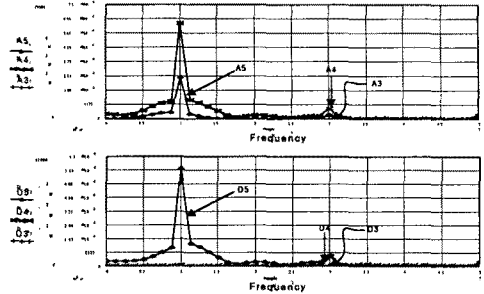


그림 2. 웨이브렛 변환을 통한 FFT 분석 결과

그림 3과 4는 지중케이블 구간인 16km 지점에서 고장이 발생한 경우 계전기 설치점의 전압과 전류 신호를 이용하여 실제 임피던스 계산알고리즘을 적용하여 수행한 임피던스 계산 결과이다. 그림에서처럼 4단계 분석결과는 3단계 분석결과와 비교할 때 수렴시간은 비슷하나 불안정한 임피던스 분포를 보여 오동작의 우려가 있음을 알 수 있다. 고로 전압과 전류 과도신호를 본 논문에서 적용한 db4 웨이브렛 3단계(A3)의 분석 결과는 디지털 거리계전기 알고리즘 수행에 적절함을 알 수 있다.

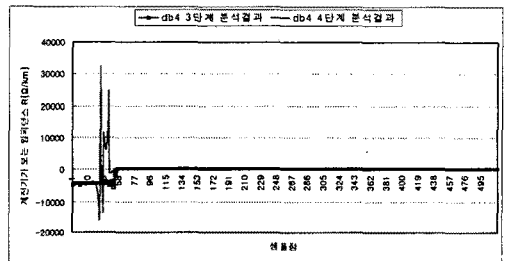


그림 3. db4 3단계와 4단계 분석을 통한 저항비교

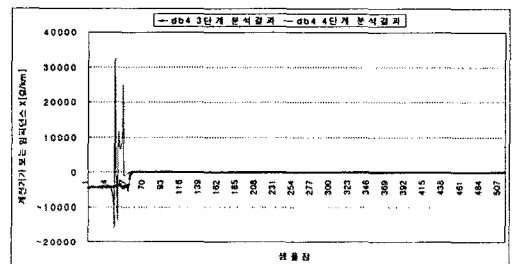


그림 4. db4 3단계와 4단계 분석을 통한 리액턴스 비교

4. 디지털 거리계전 알고리즘

4.1 고장구간 판별

혼합송전계통에서 거리계전 알고리즘 적용을 위해서는 각각 다른 과도특성을 보이는 가공선로와 지중선로의 고장 구간판별을 한 후 각각의 알고리즘을 적용시켜야 한다. 또한 고장구간 판별은 거리계전 알고리즘 적용 이전에 수행되어야 하므로 고장구간 판단은 정확성과 신뢰성이 필요하다 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 고장구간 판별을 위해 과도특성을 가장 신속하고 정확하게 분석하는 마더 웨이브렛인 db1의 웨이브렛 분석결과와 추출되는 D1계수를 비교하였다. 또한 고장구간 판별의 신뢰성 평가를 위해 0도와 90도 사교에서 모두 시도하였다.

그림 5에서 알 수 있듯이 db1~db6의 웨이브렛 함수 중에서 db1에서의 계수는 지중선로와 가공선로구간에서 서로 다른 값을 나타내고 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 5의 결과와 같이 db1 웨이브렛 함수의 D1 계수를 이용해 고장구간을 판별하였다.

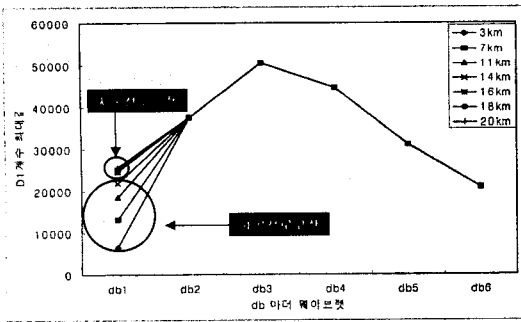


그림 5. 혼합송전계통의 고장구간 판별

4.2 혼합송전선로 고장시 임피던스 계산 알고리즘

거리계전기는 전압과 전류 데이터로부터 고장점까지의 거리 즉 임피던스를 계산하여 동작영역과 비교한 후 고장판정을 하는 계전기로서 가공송전선로 구간의 1선 지락고장시 임피던스값을 구하기 위하여 계전기 설치점에서의 임피던스는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{Line} = \frac{V_A}{I_A + I_0 \left(\frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} \right)} \quad (7)$$

혼합선로중 지중송전케이블에서의 1선지락고장이 발생했을 때, 계전기에서 측정된 전압과 전류를 이용해 식 (8)과 같이 지중송전케이블 앞단의 전압을 계산하였고 이를 이용해 케이블만의 임피던스 계산알고리즘을 식 (9)에서 나타내었으며, 지중송전케이블 구간에서 1선 지락고장이 발생하였을 때는 혼합송전선로 임피던스 계산알고리즘인 식 (10)을 적용하였다.

$$V_{CT} = V_A - Z_{L1} \cdot I_A + (Z_{L1} - Z_{L0}) \cdot I_0 \quad (8)$$

$$Z_{Cable} = \frac{V_{CT}}{I_A + I_0 \left(\frac{Z_{C0} - Z_{C1}}{Z_{C1}} \right)} + K \quad (9)$$

$$Z_{Total} = Z_{Line} + Z_{Cable} \quad (10)$$

여기서,

- V_A : 계전기에서의 측정전압 [kV]
- I_A : 계전기에서의 측정전류 [kA]
- I_1, I_2, I_0 : 측정전류의 대칭분 [kA]
- V_1, V_2, V_0 : 측정전압의 대칭분 [kV]
- Z_{L1}, Z_{L2}, Z_{L0} : 가공송전선로의 대칭분 임피던스 [Ω/km]
- $Z_{L10}, Z_{L11}, Z_{L12}$: 가공선로 전체 길이의 대칭분 임피던스 [Ω]
- Z_{C0}, Z_{C1} : 지중선로의 영상분 및 정상분 임피던스 [Ω/km]
- K : 오차보상분 [Ω]

이다.

4.3 거리계전 알고리즘 흐름도

계전기 설치점에서 추출된 전압과 전류는 고장위상에 따라 고조파 및 DC 오프셋을 포함하고 있다. 특히 0도 고장의 전류는 많은 DC성분을 포함하고 있으며 90도 고장의 전압은 많은 고조파 성분을 포함하고 있다. 따라서 본 논문에서는 웨이브렛 함수 중 db1에 의해 분석된 전압신호의 D1계수 합을 이용해 고장구간을 판단하였으며 FIR 필터를 통해 전류의 DC 오프셋을 제거하고 db4 웨이브렛 필터를 이용해 기본파를 추출하여 디지털 거리계전기 임피던스 계산 알고리즘을 수행하였다. 그림 6에서는 거리계전 알고리즘 흐름도를 나타내었다.

그림 6에서 보듯이 가공송전선로의 1선 지락고장시는 가공송전선로의 임피던스 알고리즘의 적용에 따라 임피던스 계산이 이루어지고 계산되어진 값에 따라서 No Trip과 보호구간 판단에 따른 시간차로 Trip이 이루어지도록 하였다. 한편, 지중송전케이블의 고장시에는 혼합송전선로의 임피던스 알고리즘을 적용하여 임피던스 계산이 이루어지도록 하였고, 보호구간 판단에 따른 시간차로 Trip 신호를 발생시키도록 하였다.

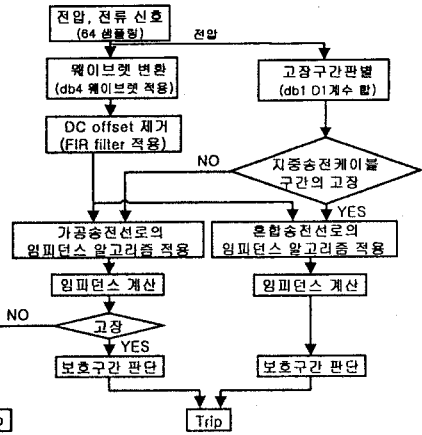


그림 6. 디지털 거리계전 알고리즘 흐름도

4.4 오차 보상 이전 임피던스 계산결과

표 1은 4.2절에서 제시한 알고리즘을 이용해 계전기 설치점에서의 계산값과 실제값을 비교한 임피던스 계산결과를 나타내었다. 가공선로 고장의 경우 1선지락 고장시 고장전류는 모두 대지로 흘러가기 때문에 실제 임피던스 계산결과 오차는 거의 발생하지 않았다. 하지만 케이블의 도체와 시스가 접촉하여 보통접속함(NJ)을 통해 고장전류가 대지로 흘러가는 특성을 가진 지중선로에서는 계산값과 비교한 실제값은 많은 오차를 발생시켰다.

표 1. 계전기 설치점에서의 임피던스

고장 구간	고장 위상	점지점 형[Ω]	실제값[Ω]		측정값[Ω]		오차[Ω]	
			R	X	R	X	R	X
3km	0도	가	0.1259	0.9574	0.12539	0.98026	0.00051	0.00486
		공	0.1259	0.9574	0.12538	0.98025	0.00052	0.00485
7km	0도	송	0.29384	2.27598	0.29256	2.2872	0.001279	0.01122
		전	0.29384	2.27598	0.29256	2.2872	0.001279	0.01122
11km	0도	선	0.4617	3.57654	0.45969	3.59418	0.00201	0.0176
		로	0.4617	3.57654	0.459695	3.594145	0.002	0.0176
14km	0도	구	0.5876	4.55196	0.585	4.5748	0.0026	0.0284
		간	0.5875	4.55196	0.584846	4.57415	0.0027	0.022
16km	0도	1	0.6108	4.842	1.6249	6.7934	1.0141	1.9514
		10	0.6108	4.842	3.5920	6.7483	2.9812	1.9063
	90도	1	0.6108	4.842	1.6226	6.7942	1.0118	1.9522
		10	0.6108	4.842	3.5896	6.7515	2.9788	1.9095
18km	0도	1	0.634	5.1325	1.6836	7.1883	1.0496	2.0558
		10	0.634	5.1325	3.6633	7.1493	3.0293	2.0168
	90도	1	0.634	5.1325	1.6818	7.189	1.0478	2.0565
		10	0.634	5.1325	3.6657	7.1592	3.0317	2.0267
20km	0도	1	0.6571	5.4228	1.7479	7.6589	1.0908	2.2361
		10	0.6571	5.4228	3.7332	7.6583	3.0761	2.2355
	90도	1	0.6571	5.4228	1.7474	7.6768	1.0903	2.254
		10	0.6571	5.4228	3.7328	7.6576	3.0757	2.2348

4.5 지중송전계통에서의 오차발생 원인

지중송전계통에서 1선지락고장 발생시 고장전류는 고장점에서 모두 대지로 흘러가지 않고 시스템을 통해 모든 계통의 직접접지점을 통해 대지로 방전된다. 또한 직접접지 지점의 접지저항 값에 따라 고장전류의 분포는 변하게 된다. 이러한 요인은 실제 계전기 가 보는 임피던스 계산시 오차요인으로 작용하게 된다. 만약 전력 케이블의 시스가 완전크로스본딩 되어 있고 접지저항이 0이어서라하고 CPU가 없는 경우라고 가정하면 임피던스 계산시 오차는 현저히 줄어든다. 그림 7에서는 지중송전계통의 16km 지점에서 1선지락고장 발생시 실제로 중단점과 직접접지 지점을 통해 대지로 방전되는 고장전류의 분포를 분석한 결과이다. 그림에서처럼 고장전류는 전단부 80% 이상이 흘러나가며 고장 후단부에도 많은 영향을 미치고 있다. 또한 접지저항 1Ω과 10Ω에서 각각 고장전류의 분포는 서로 다른 경향을 나타내고 있다.

따라서 지락고장시 고장전류가 고장점의 대지를 통해 모두 방전되는 가공선로의 특성과는 달리 모든 시스템을 통해 고장전류가 분산되는 지중송전계통의 과도현상은 매우 복잡한 특성을 보인다.

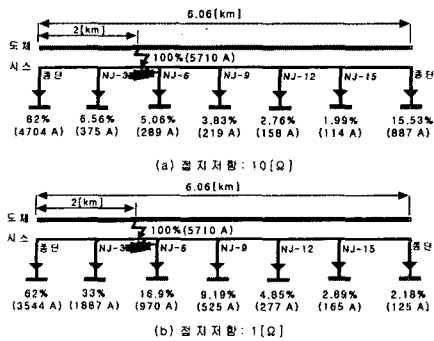


그림 7. 접지저항에 따른 고장전류 분포

또한 본 논문에서는 지중송전계통 접속한의 직접접지 저항의 설계기준이 10[Ω]이하라는 것을 감안하여 접지저항에 대한 오차요인을 분석하기 위해 각각 1[Ω]과 10[Ω]의 접지저항을 갖는 계통에서 고장시 임피던스 특성을 분석하였다. 그림 8은 접지저항에 따른 R-X 임피던스 변화 그래프이다. 그림에서처럼 접지저항은 거리계전기 보는 임피던스에 직접적인 영향을 미침을 알 수 있다. 그리고 계전기가 보는 임피던스의 리액티브 성분(X)은 접지저항에 관계없이 모두 일정한 오차를 나타내고 있다. 이는 리액티브 성분(X)은 접지저항에 직접적인 영향을 받지 않고, 고장시 시스템을 통해 대지로 방전되는 고장 전류로 인해 변화하는 시스템 성분 임피던스의 영향 때문으로 사료된다.

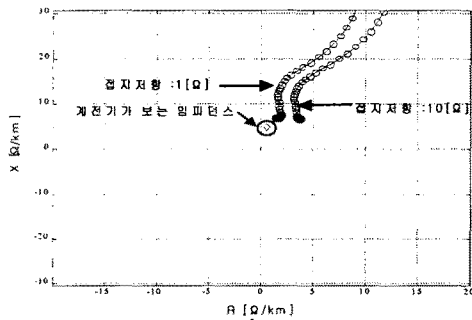


그림 8. 접지저항에 따른 임피던스

5. 오차보상을 고려한 임피던스 계산

5.1 오차보상 값 설정

4.4절에서 검토한 바와 같이 혼합송전계통 중 지중송전케이블에서의 1선지락 고장시 계전기가 보는 임피던스와 실제 임피던스와의 R과 X에서 모두 많은 오차를 발생하게 된다. 또한 4.4절에서 검토한 오차에 대한 보상을 정형화된 수식으로 증명하기엔 많은 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 고장점을 다양하게 변경하며 오차를 분석하였고 이를 통해 계통 조건에 알맞는 오차보상 값을 제시하였다. 실제 오차를 분석해본 결과 리액티브(X)성분은 접지저항에 의한 영향이 적으며, 접지저항은 저항(R)성분에만 영향을 미쳤다. 따라서 리액티브(X)성분의 오차보상은 접지저항에 관계없이 동일하게 적용시켰으며 저항(R)성분은 접지저항에 따라 다르게 적용시켰다. 본 논문에서 제시한 오차보상 값은 표 2와 같다.

표 2. 오차보상 값(K)

접지저항	오차보상값(K)	
	R[Ω]	X[Ω]
1[Ω]	1.05	2.0696
10[Ω]	3.029	

5.2 오차보상을 고려한 임피던스 계산결과

표 3에서는 5.1절에서 제시한 오차보상을 고려한 임피던스 계산결과를 나타내었다. 표에서 실제값은 각 거리에 따른 케이블의

정상 임피던스 값을 말하며, 측정값은 계전점에서의 전압과 전류 파형을 FIR필터를 사용하여 DC 옵셋을 제거하고 웨이브렛 변환을 통해 기본파를 추출한 후 오차보상을 고려하지 않았을 때 임피던스 값이다. 한편 개선값은 오차보상 값을 적용하였을 경우 임피던스 값이다.

표 3. 오차보상을 고려한 계전점에서의 임피던스

고장 구간	고장 위상	접지 저항	실제값[Ω]		측정값[Ω]		계산값[Ω]		오차[Ω]	
			R	X	R	X	R	X	R	X
16km	0도	1[Ω]	0.6108	4.842	1.6249	6.7934	0.5749	4.7238	0.035	0.118
		10[Ω]	0.6108	4.842	3.5920	6.7483	0.563	4.6787	0.047	0.163
	90도	1[Ω]	0.6108	4.842	1.6226	6.7942	0.5726	4.7246	0.038	0.117
		10[Ω]	0.6108	4.842	3.5896	6.7515	0.5606	4.6819	0.05	0.16
18km	0도	1[Ω]	0.634	5.1325	1.6836	7.1883	0.6336	5.1187	0.0004	0.01
		10[Ω]	0.634	5.1325	3.6633	7.1893	0.6343	5.1197	0.0007	0.012
	90도	1[Ω]	0.634	5.1325	1.6818	7.189	0.6318	5.1194	0.0018	0.013
		10[Ω]	0.634	5.1325	3.6657	7.1892	0.6347	5.1196	0.0011	0.012
20km	0도	1[Ω]	0.6571	5.4228	1.7479	7.6589	0.6979	5.5893	0.040	0.166
		10[Ω]	0.6571	5.4228	3.7332	7.6583	0.7042	5.5887	0.047	0.165
	90도	1[Ω]	0.6571	5.4228	1.7474	7.6768	0.6974	5.6072	0.040	0.184
		10[Ω]	0.6571	5.4228	3.7328	7.6576	0.7038	5.588	0.046	0.165

본 논문에서 제시한 오차보상 값(K)을 혼합송전계통의 디지털 거리계전 알고리즘을 적용할 경우 표 3에서 볼 수 있듯이 저항(R)과 리액티브(X)에서 측정값과 실제값 사이에 발생하는 오차가 현저히 저하되었음을 알 수 있다. 한편 본 논문에서 모델링한 것과 다른 형태의 접지방식을 가진 혼합송전선로에 대해서도 동일한 과정으로 정밀 시뮬레이션하여 오차보상 값을 구할 수 있으므로 선로상황에 맞게 본 논문에서 제시한 방법으로 접근하면 실제계통에서의 거리계전기 운용에는 문제가 없을 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 논문에서는 웨이브렛 변환을 이용하여 혼합송전계통에서의 디지털 거리계전 알고리즘을 제시하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 혼합송전계통의 고장분석에 사용할 적정 마더웨이브렛을 D1 계수합과 오차를 분석을 통해 db4로 결정했으며 db4 웨이브렛의 단계별 분해과정의 결과에 FFT분석을 수행하므로서 기본파 추출에 가장 적절한 분해 단계수를 3단계(A3)로 결정하였다.
- (2) 혼합송전계통에서 서로다른 과도특성을 나타내는 가공송전선로와 지중송전선로의 고장구간 판별을 위해 과도특성을 가장 빠르고 정확하게 분석하는 마더 웨이브렛인 db1을 이용해 D1계수의 합을 비교함으로써 고장구간을 판별하여 임피던스 계산 알고리즘을 각각 다르게 적용하였다.
- (3) 혼합송전계통 중 지중송전선로 구간에서 고장발생시 시스템을 통해 직접접지점과 CCPU 접지점으로 대지로 방전되는 고장특성으로 인해 임피던스 계산시 측정값과 실제값에서 발생하는 오차를 확인하였고 이에 따른 오차의 원인을 분석하여 제시하였다.
- (4) 지중송전선로 고장시 수많은 시뮬레이션을 통하여 임피던스 계산 알고리즘을 통한 임피던스 계산 결과를 분석하여 접지저항에 따라 변화하는 저항(R)성분과 접지저항에 관계없이 시스템을 통해 커리하는 영상분 전류에 영향을 받아 변화하는 리액티브(X)성분을 보상하는 오차보상 값을 제시하였다.
- (5) 오차보상 값 적용결과 측정값보다 개선된 임피던스 값을 얻을 수 있었으며 이를 이용한 혼합송전선로에서의 정확한 보호 계통안정도에 크게 기여할 것으로 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Working Group D12 of the Line Protection Subcommittee, "Protective Relaying Considerations for Transmission Lines With High Voltage AC Cables", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 1, pp83-96, January 1997
- [2] 하체용, 이종범, "지중송전케이블용 디지털 거리계전 알고리즘 개선", KIEE, Vol. 49A, No. 12, DEC. 2000
- [3] KEPRI, "지중선 임피던스 및 허용전류 계산기법 연구" 1991
- [4] J. B. Lee, C. W. Ha, C. H. Jung, "Development of Digital Distance Relaying Algorithm in Combined Transmission Lines with Underground Power Cables", IEEE PES 2001 SM, 2001. 7
- [5] Martin, "Wavelet and Filter Banks: Theory and Design", IEEE Transaction on Signal Processing, Vol. 40, No. 9, pp. 2207~2232, 1992
- [6] Wavelet Toolbox For Use with MATLAB