

웨이브렛을 이용한 혼합송전선로에서의 거리계전 알고리즘 개선

論文
52A-10-6

Improvement of Digital Distance Relaying Algorithm Using Wavelet Transform in Combined Transmission Line

鄭彩均* · 金敬昊** · 河體雄*** · 李鍾範§ · 尹良雄§

(Chae-Kyun Jung · Kyoung-Ho Kim · Che-Wung Ha · Jong-Beom Lee · Yang-Woung Yoon)

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 resistance, and sheath voltage limiters(SVLs). There are also several grounding systems in cable systems. Therefore, if there is a fault in cable systems, 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 D1 coefficient summation in db4. And also, error compensation value was proposed for correct calculation of impedance in power cables section.

Key Words : Distance relay, Combined transmission line, Wavelet transform, Line impedance

1. 서 론

최근 전력수요가 해마다 증가하고, 인구집중현상에 따른 대도시의 전력수요 밀도가 급격히 높아지고 있으며, 여러 가지 환경적인 요인으로 인해 지중송전선로 및 가공과 지중이 혼합된 혼합송전선로의 건설이 점차 증가하고 있다. 그러나 혼합송전선로는 가공선로에 비해 유지 보수가 어려우며 고장시 고장점 탐지나 복구가 어려워 고장지속시간이 길다는 단점을 지니고 있을 뿐 아니라, 혼합 및 지중선로의 보호시스템도 가공선로와 특별한 구분 없이 적용하고 있다 [1-3].

현재 송전선로에서 디지털 거리계전기는 주보호인 전류차동계전기의 후비보호로 사용되고 있으며, 거리계전기는 계전기 설치점에서 고장점까지의 선로 임피던스를 정확히 측정하여 이로부터 Zone을 판별하고 트립을 결정하게 된다. 만약 가공송전선로에서 1선지락고장이 발생하면 고장전류는 고장점에서 대부분 대지로 방전되기 때문에 고장점까지의 선로임피던스는 비교적 정확히 측정되며 계전기 오동작의 가능성은 매우 적게 나타난다. 그러나 지중 및 혼합송전선로에서 발생하는 지락고장은 케이블의 도체와 시스 사이의

절연이 파괴되면서 발생하기 때문에 고장전류는 크로스본딩되어 있는 시스를 통해 보통접속함(NJ)의 직접접지 지점이나 절연통 보호장치(SVL)를 통해 대지로 방전되며 접지 저항의 영향도 받는다. 그래서 실제 지중선로나 혼합선로의 지중선로 구간에서 고장이 발생할 때 계전기에 의해 계산되는 결보기 임피던스는 실제 임피던스와 비교하여 많은 오차가 발생되며, 이로 인해 거리계전기의 부동작 및 오동작의 확률은 더욱 높아지게 된다[4].

따라서, 본 논문에서는 EMTP/ATP를 이용하여 국내에서 운전중인 혼합송전선로를 모델링 한 후 시뮬레이션 결과를 세밀히 분석하여 혼합송전선로의 지중선로 구간에서 고장발생시 나타나는 고장 특성을 정확히 분석하고 고장점까지의 임피던스 계산시 발생하는 오차의 원인을 파악하여 이를 보상할 수 있는 오차보상 값을 제시하였다. 그리고 정확한 임피던스 계산을 위해 웨이브렛 변환의 3단계 분석을 통해 고조파가 제거된 Approximation 성분을 추출하였으며, 고장구간의 판별을 위해서 1단계 분석 후 얻어진 Detail 성분을 사용하였다. 기본파 추출과 고장구간 판별을 위해 사용한 마더 웨이브렛 함수는 db4이다. 또한 혼합송전선로에서 적용할 수 있는 선로 임피던스 계산 알고리즘과 오차보상을 고려한 개선방안을 제시하였다.

2. 케이블 임피던스 계산 및 혼합송전선로 모델링

2.1 케이블 임피던스 계산

본 논문에서는 케이블의 정상(역상)분 임피던스와 영상분 임피던스로 분리하여 계산식을 제시하고자 한다. 이는 정상

* 正會員 : 圓光大 電氣工學科 博士課程

** 準會員 : 圓光大 電氣工學科 碩士課程

*** 正會員 : LG電線 電力研究所

§ 正會員 : 圓光大 電氣電子 및 情報工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2003年 2月 10日

最終完了 : 2003年 8月 23日

(역상)분 임피던스는 등가적인 하나의 상에 대한 해석으로 간략화 시킬 수 있으며, 영상분 임피던스를 계산할 경우는 3상이 동일전원에서 동일 전류가 흐르는 것으로 보아 각 상간의 상호 임피던스 영향을 배제시켜 간략화 시킨 수식으로 다룰 수 있기 때문이다. 또한 이러한 조건이 부합되기 위해서는 시스의 접지저항이 영이고 크로스본딩이 이상적으로 되어 있다는 가정이 뒷받침 되어야 한다. 그림 1에서는 정삼각 배열의 XLPE 케이블 단면도를 나타내었다. 본 논문에서는 그림 1의 케이블 구조를 바탕으로 대칭분 임피던스를 계산하였다.

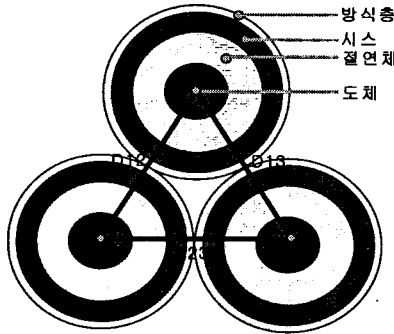


그림 1 정삼각 배열의 XLPE 케이블 단면도
Fig. 1 Diagram of XLPE cable in trefoil

시스의 접지저항이 영이고 크로스본딩이 이상적으로 되어 있다고 가정할 때 케이블의 등가회로에서 정상분 임피던스 계산식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_1 = Z_2 = R_c + j \left[w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{GMD_{3c}}{GMR_{1c}} \times 10^3 \right] \quad (1)$$

여기서,

$Z_1(Z_2)$: 케이블 정상(역상)분 임피던스 [Ω/km]

R_c : 도체 교류저항 [Ω/km]

GMR_{1c} : 도체간 기하학적 평균반경 [mm]

$$GMR_{1c} = e^{(-1/4)} \times (d/2)$$

d : 케이블 도체 외경 [mm]

GMD_{3c} : 도체간 기하학적 평균거리 [mm]

$$GMD_{3c} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}}$$

μ_0 : 자유공간의 투자율 [H/m] ($4\pi \times 10^{-7}$)

국내 케이블은 도체를 시스가 감싸고 있고 또한 지락고장은 도체와 시스 사이의 절연이 파괴되면서 발생하며 고장전류는 시스를 통해 대지로 흐르는 특성을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 특성을 고려하여 그림 2와 같이 고장전류가 시스를 통해 대지로 귀로 하는 경우의 등가회로를 이용해 케이블 영상분 임피던스를 계산하였다. 영상분 임피던스는 식 (2)-식 (4)의 Z_{c0} (케이블 도체만의 영상분 임피던스), Z_{s0} (케이블 시스만의 영상분 임피던스), Z_{m0} (케이블 도체와 시스간 상호임피던스)를 각각 계산한 후 식 (5)를 이용해 계산할 수 있다.

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

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

$$Z_{m0} = R_e + j \left[3w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{GMR_{3s}} \times 10^3 \right] \quad (4)$$

$$Z_0 = Z_{c0} - \frac{Z_{m0}^2}{Z_{s0}} \quad (5)$$

여기서,

R_e : 등가대지저항 [Ω/km]

R_s : 시스 교류저항 [Ω/km]

GMR_{3s} : 시스의 평균반경 [mm]

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

D_e : 등가 대지 귀로간 거리 [m]

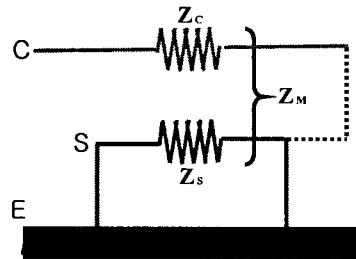


그림 2 케이블 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of power cable systems

2.2 혼합송전계통 모델링

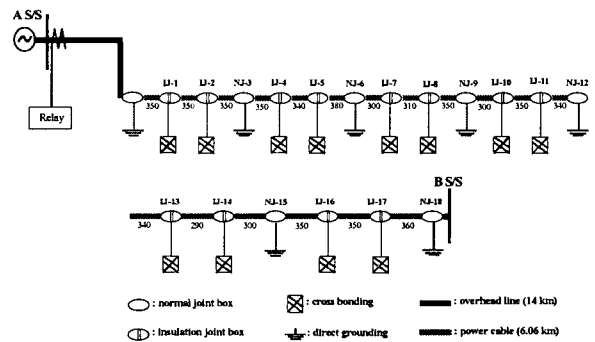


그림 3 혼합송전선로의 모델계통도

Fig. 3 Model system of combined transmission system

그림 3은 본 논문에서 모델링한 혼합송전선로의 계통도를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 전원은 154kV 편단전원이며, 14km의 가공송전선로와 6.06km의 지중송전선로가 연계되어 있다. 가공송전선로는 ACSR 410mm \times 2bundle의 형태이고 지중송전 케이블은 2000mm \times XLPE 케이블이 전력구 방식의 정삼각배열로 포설되어 있다. 또한 계전기 설치점에서 가공선로 구간인 3km, 7km, 11km, 14km 지점

과 지중선로 구간인 16km, 18km, 20km 지점에서 고장을 각각 모의하였다.

고장의 형태는 가공송전선로 구간에서는 고장전류가 모두 대지로 귀로 하는 완전지락사고로 설정하였고, 지중송전선로 구간에서는 케이블의 도체가 시스 사이의 절연이 파괴되어 지락이 발생하는 실제 고장형태를 모의하였다. 고장데이터 샘플링 주파수는 3,840Hz 이다.

3. 웨이블릿 변환 및 적정 마더 웨이블릿 선정

3.1 웨이블릿 변환 이론

전력계통에서 발생하는 고장의 진행과 연관된 파형은 일반적으로 기본파와 그의 고조파가 결합된 성분을 포함하는 비주기적인 과도특성을 가지므로 주파수 영역으로 변환할 때 시간영역의 정보가 소실되는 푸리에 변환은 고장검출 및 고장점 추정에 적합하지 못하다[5-7]. 이를 보완하기 위해 제안된 STFT(Short-Time Fourier Transform)는 신호를 시간과 주파수 영역으로 분석함으로써 푸리에 변환의 단점을 개선하였다. 그러나 일정한 크기의 윈도우를 사용하기 때문에 제안된 범위에서의 신호분석만 가능하며 시간영역에서 윈도우 크기가 설정되면 모든 주파수 영역에서 윈도우 크기가 고정된다는 단점을 가지고 있다. 따라서 STFT를 이용한 방법도 비 주기적이고 비 정적인 전력계통의 과도 특성을 분석하는데는 적절하지 못한 것으로 평가되고 있다[6].

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

연속웨이블릿 변환(CWT)은 모든 스케일에서 웨이블릿 분석을 수행하게 되어 무한히 많은 데이터가 산출되므로 분석 시간이 길다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 이산웨이블릿 함수(Ψ)를 이용하여 Scale(a_0^m)과 Translation(na_0^m) 요소를 이산화 시켜 효율적으로 웨이블릿 분석을 수행할 수 있는 이산웨이블릿 변환(DWT)을 이용하였다. 웨이블릿 함수와 Signal $S(t)$ 에 대한 이산웨이블릿 변환식은 식 (6)과 같다[5-6].

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

그림 4에서는 웨이블릿 변환의 필터뱅크 구성을 나타내었다. 그림에서처럼 원신호 S는 저역필터와 고역필터를 통해 분해되고 저역필터를 통과한 신호는 다시 고역필터와 저역필터를 통해 분해되며 이러한 과정은 원하는 신호를 얻을 때까지 반복된다.

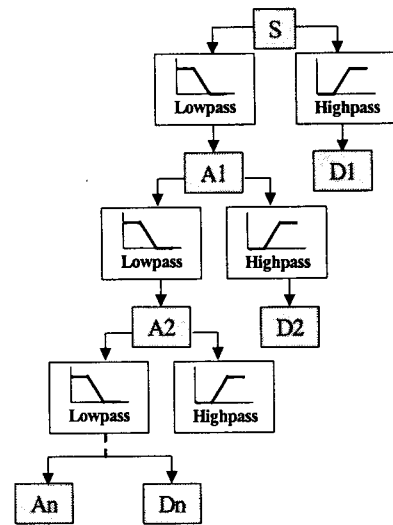


그림 4 웨이블릿 필터뱅크
Fig. 4 Wavelet filter bank

3.2 마더 웨이블릿의 선정

혼합송전선로의 고장검출 및 고장구간 판단을 위해 각각 마더 웨이블릿의 1단계 분석을 통해 D1계수의 합을 비교하였다. 본 논문의 분석 결과 db4와 sym3가 가장 높은 계수 값을 보였으며, 또한 마더 웨이블릿 함수의 신뢰도를 평가하기 위해 1단계로 분해시킨 뒤 이를 다시 역변환(IDWT)하여 오차율을 비교한 결과 그림 5와 같이 db4가 가장 우수한 결과가 나타남을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 신호 분석을 위해 db4를 사용하였으며, db4는 단시간동안 빠르게 발생하는 과도현상에 가장 적합하게 사용될 수 있는 웨이블릿으로 전력계통 해석에 가장 일반적으로 적용되고 있다.

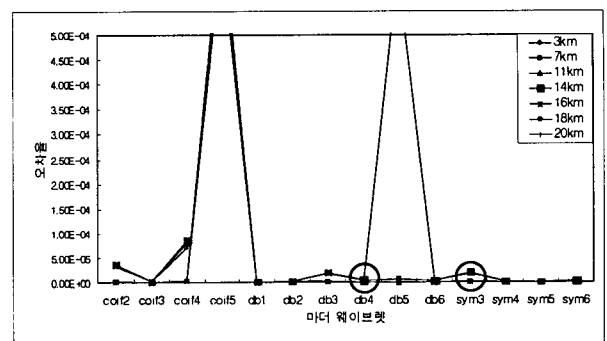


그림 5 마더웨이블릿 함수의 IDWT 변환 후 오차율 비교
Fig. 5 Comparison of error rate after IDWT in mother wavelet

또한 혼합송전선로 거리계전기 임피던스 계산 알고리즘 적용을 위한 전압과 전류의 기수 고조파가 제거된 확실한 기본파 성분 분석을 위해 FFT 분석을 수행하였다. 그림 6은 고장신호의 5단계 분석을 통해 얻어낸 Approximation (A)성분과 Detail(D)에 대한 FFT분석 결과이다. 그림에서처

럼 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 확실히 포함할 뿐 아니라 미량의 기수 고조파만을 함유하였다. 따라서 본 논문에서는 db4 웨이브렛의 3단계 분석결과인 전압과 전류신호의 A3성분을 이용해 디지털 거리계전기 알고리즘에 적용하였다

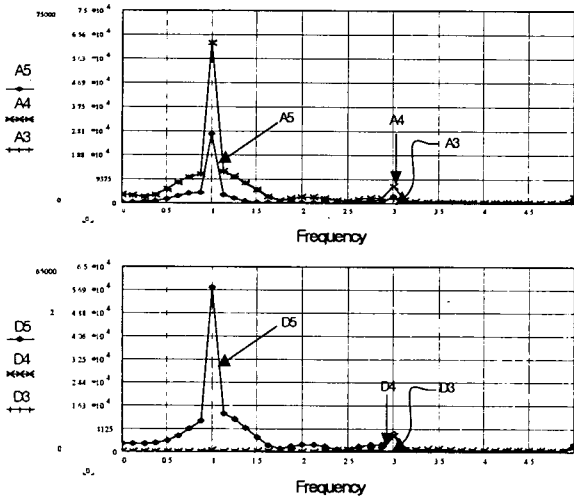


그림 6 웨이브렛 변환 결과에 대한 FFT 분석
Fig. 6 FFT analysis after result of wavelet transform

그림 7과 8은 지중선로 구간인 16km 지점에서 고장이 발생한 경우 계전기 설치점의 전압과 전류 신호를 이용하여 실제 임피던스 계산알고리즘에 적용한 임피던스 계산 결과이다. 그림에서처럼 4단계 분석결과는 3단계 분석결과와 비교할 때 수렴시간은 비슷하나 불안정한 임피던스 분포를 보여 오동작의 우려가 있음을 알 수 있다. 그러므로 본 논문에서 적용한 db4 마더 웨이브렛 함수를 이용한 전압과 전류 신호의 3단계(A3)의 분석 결과가 디지털 거리계전기 알고리즘 수행에 적절함을 증명하였다.

4. 디지털 거리계전 알고리즘

4.1 고장구간 판별

혼합송전선로에서 고장점을 추정하기 위해서는 고장발생 구간이 가공선로 구간인지 지중선로 구간인지를 판별해야 한다. 고장구간 판별을 위해서 전압과 전류신호를 웨이브렛 변환시키고 DC 오프셋이 발생하는 전류신호는 식 (7)과 같이 FIR 필터를 통과시킨 뒤, 웨이브렛 변환을 실시하였다 (8).

$$y_k = x_k - \frac{x_k - 1}{\exp(\Delta t / \tau)} \quad (7)$$

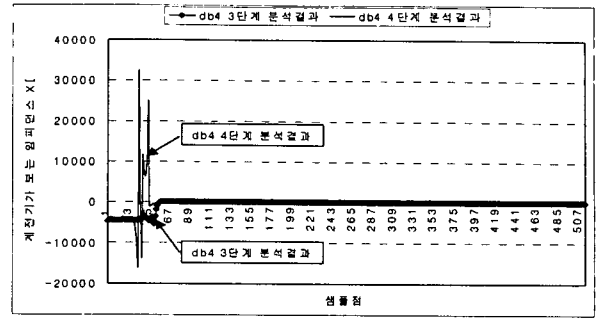


그림 7 db4 3단계와 4단계 분석을 통한 저항비교
Fig. 7 Resistance comparison of 3 step and 4 step decomposition in db4

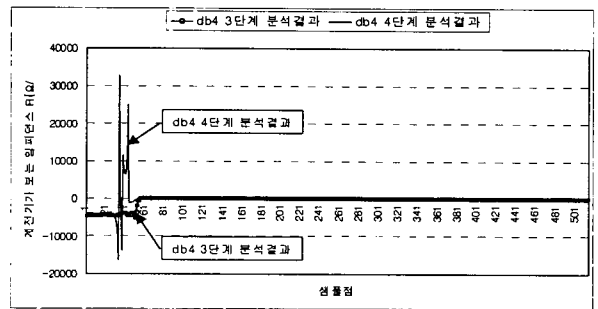


그림 8 db4 3단계와 4단계 분석을 통한 리액턴스 비교
Fig. 8 Reactance comparison of 3 step and 4 step decomposition in db4

여기서, Δt : 샘플링 간격, τ : 시정수,
 x_k : 현재시점 샘플값

이 필터의 크기 및 위상 특성은 식 (8)과 같이 나타난다.

$$MAG = \sqrt{E_n^2 + F_n^2}, \quad ph = \tan^{-1} \frac{F_n}{E_n} \quad (8)$$

여기서,

$$E_n = 1 - \frac{1}{\exp(\Delta t / \tau)} \cos\left(\frac{2n\pi}{N}\right)$$

$$F_n = \frac{1}{\exp(\Delta t / \tau)} \sin\left(\frac{2n\pi}{N}\right)$$

n : 고조파 차수, N : 주기당 샘플수

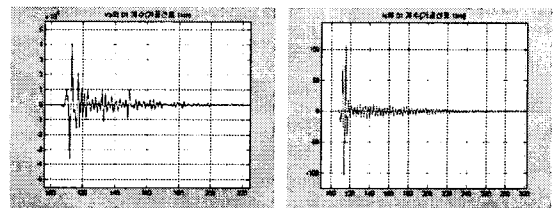


그림 9 3km 지점에서의 전압과 전류의 DI계수 파형
Fig. 9 DI coefficient waveform of voltage and current at the 3km position

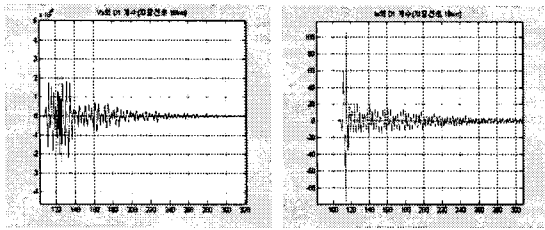


그림 10 18km 지점에서의 전압과 전류의 D1계수 파형
Fig. 10 DI coefficient waveform of voltage and current at the 18km position

고장구간을 판별하기 위해 3.2절에서 선정된 db4 웨이브렛 함수를 이용하였다. 그림 9와 그림 10에서는 db4를 이용해 웨이브렛 1단계 분석 후 추출된 전압과 전류신호의 D1계수 파형을 각각 나타내었다. 여기서 고장구간 판별을 위해 반주기(32샘플)동안의 전압과 전류의 D1계수 합을 이용하였다. 그러나 D1계수는 동일지점의 고장에서도 고장 발생 위상과 고장 저항 등에 따라 서로 다른 값을 나타내게 된다. 따라서 단순한 D1계수의 비교는 서로 중첩되는 경우가 발생할 수 있으므로 가공선로와 지중선로의 고장구간을 명확히 구분하기는 어렵다.

따라서 본 논문에서는 식 (9)-식 (10)에서 처럼 반주기에서 발생하는 최대값을 1로 하고, 그 값을 기준으로 나머지 D1계수들을 다시 계산한 다음 결과를 비교하였다. 그 결과 가공선로보다 지중선로 구간에서 고장시 전압에 함유된 고조파 성분이 더욱 많이 검출되었으며, 그림 9-그림 10에서처럼 전압의 D1계수도 가공선로 고장에 비해 지중선로 고장에서 더 오래 지속되고 있음을 알 수 있다. 따라서 식 (9)-식 (10)으로 계산된 결과를 비교하면, 지중선로 고장의 경우가 가공선로에서의 고장보다 상대적으로 더 높은 값을 나타낸다.

$$S(V_a) = \sum_{n=t}^{t+31} \frac{DI(V_a(n))}{\max(DI(V_a))} \quad (9)$$

$$S(I_a) = \sum_{n=t}^{t+31} \frac{DI(I_a(n))}{\max(DI(I_a))} \quad (10)$$

$S(V_a)$ 와 $S(I_a)$ 를 x와 y축으로 갖는 평면에서 가공선로와 지중선로 구간에서 발생한 고장을 명확히 구분할 수 있도록 경계값을 식 (11)과 같이 정해준다.

$$n = ax + by + c \quad (11)$$

계수 a,b,c를 정해준 다음 이 값들을 식 (12)의 양극성 이진 계단함수의 입력으로 사용하여 지중선로 고장일 경우 1, 가공선로 고장일 경우 -1을 출력하도록 하였다

$$u(n) = \begin{cases} +1 & (n > 0) \\ -1 & (n < 0) \end{cases} \quad (12)$$

식 (12)를 사용하여 수행한 고장구간 판별 결과는 그림 11과 같이 나타낼 수 있다.

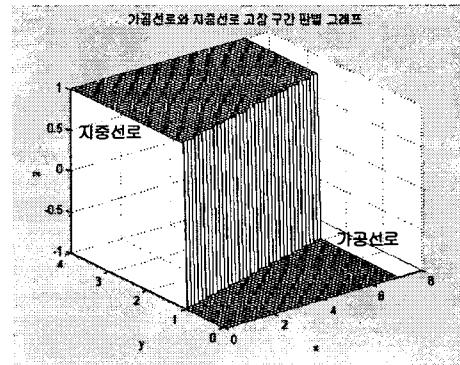


그림 11 고장구간 판별 결과
Fig. 11 Discrimination result of fault section

4.2 혼합송전선로에서 고장시 임피던스 계산 알고리즘

혼합송전계통에서 지락고장이 발생하였을 때 고장 임피던스를 계산하기 위한 등가회로는 그림 12와 같이 나타낼 수 있다.

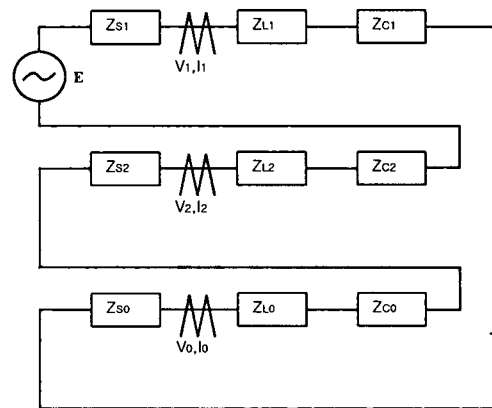


그림 12 혼합송전선로 등가회로
Fig. 12 Equivalent circuit for combined transmission system

여기서, E : 전원단 전압[kV]
 Z_{s0}, Z_{s1}, Z_{s2} : 전원단의 대칭분 임피던스[Ω]
 Z_{L0}, Z_{L1}, Z_{L2} : 가공송전선로의 대칭분 임피던스[Ω/km]
 Z_{c0}, Z_{c1}, Z_{c2} : 지중케이블선로의 대칭분임피던스[Ω/km]
 V_0, V_1, V_2 : 계전기 설치점에서의 측정전압[kV]
 I_0, I_1, I_2 : 계전기 설치점에서의 측정전류[kA]

4.2.1 가공선로 구간 고장시 임피던스 계산 알고리즘

거리계전기는 전압과 전류 데이터로부터 고장점까지의 거리 즉, 임피던스를 계산하여 동작영역과 비교한 후 고장판정을 하는 계전기로써 계전기 설치점에서의 전압과 전류는 식 (13)과 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_A = I_1 + I_2 + I_0 \quad (13)$$

$$V_A = V_1 + V_2 + V_0$$

$$= Z_{L1} I_1 + Z_{L2} I_2 + Z_{L0} I_0 + Z_{L1} I_0 - Z_{L1} I_0 \quad (14)$$

또한 그림 12의 등가회로와 식 (13)과 식 (14)를 이용해 가공송전선로 구간의 1선 지락고장시 계전기 설치점에서의 임피던스를 식 (15)과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{L1} = \frac{V_A}{I_A + I_0 \left(\frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} \right)} \quad (15)$$

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]

4.2.2 지중선로 구간 고장시 임피던스 계산 알고리즘

혼합송전선로 중 지중선로 구간에서 1선 지락고장 발생시, 계전기에서 측정한 고장전압과 고장전류를 이용하여 지중송전선로 앞단의 전압을 계산하고 계산값을 이용하여 케이블만의 고장 임피던스를 계산하며 가공송전선로의 전체 임피던스와 지중송전선로의 고장구간까지의 임피던스를 더하는 형식의 알고리즘을 개발하였다. 즉, 가공선로 구간에서 지락고장 발생했을 때에 적용하는 식 (15)에 의해 가공송전선로의 정상분 임피던스를 구하고, 지중선로 구간에서 지락고장이 발생했을 때는 식 (16)-식 (21)에 의해 혼합송전선로의 정상분 임피던스를 계산하였다.

먼저 케이블 앞단의 전압은 식 (16)-식 (18)의 대칭성분을 이용하여 식 (19)와 같이 나타내었다.

$$V_{L1} = V_R - Z_{LT1} \cdot I_1 \quad (16)$$

$$V_{L2} = -Z_{LT2} \cdot I_2 \quad (17)$$

$$V_{L0} = -Z_{LT0} \cdot I_0 \quad (18)$$

$$V_{LT} = V_{L0} + V_{L1} + V_{L2}$$

$$= V_R - Z_{LT1} \cdot I_R + (Z_{LT1} - Z_{LT0}) \cdot I_0 \quad (19)$$

그리고 케이블만의 정상분 임피던스는 식 (20)과 같다. 여기서 K는 오차보상 값을 말하는 것으로 5.3절에서 자세히 설명하겠다.

$$Z_C = \frac{V_{LT}}{I_A + I_0 \cdot \left(\frac{Z_{\alpha} - Z_{\beta}}{Z_{\alpha}} \right)} - K \quad (20)$$

혼합선로중 지중선로 구간에서 지락고장이 발생하였을 때 계전기가 보는 임피던스는 가공선로 구간의 전체 임피던스와 지중선로 구간의 고장지점까지의 임피던스를 고려한 식 (21)에 의해 계산된다.

$$Z_T = Z_L + Z_C \quad (21)$$

여기서, V_R : 계전기 설치점의 전압[kV]

I_R : 계전기 설치점의 전류[kA]

I_0 : 계전기 설치점의 영상전류[kA]

$Z_{L0, L1}$:가공선로의 영상분 및 정상분 임피던스[Ω/km]

$Z_{LT0, LT1, LT2}$:가공선로 전체 길이의 대칭분 임피던스[Ω]

$Z_{\alpha, \beta}$: 지중선로의 영상분 및 정상분 임피던스[Ω/km]

4.3 거리계전 알고리즘 흐름도

계전기 설치점에서 추출된 전압과 전류는 고장위상에 따라 고조파 및 DC 오프셋을 포함하고 있다. 특히 0도 고장의 전류는 많은 DC 성분을 포함하고 있으며, 90도 고장의 전압 신호에는 다량의 고조파들이 함유되어 있다. 따라서 본 논문에서는 FIR 필터를 통해 DC 오프셋이 제거된 신호에 대해 웨이브렛 분석을 하였으며, D1계수를 추출하여 고장구간 판별 알고리즘에 적용하였고, 웨이브렛 3단계 분석(A3)을 통해 기본파를 추출하여 디지털 거리계전 알고리즘에 적용하였다. 본 논문에서 고장구간 판별과 기본파 추출을 위해 적용한 마더 웨이브렛 함수는 db4이다. 그림 13에서는 거리계전 알고리즘의 흐름도를 나타내었다.

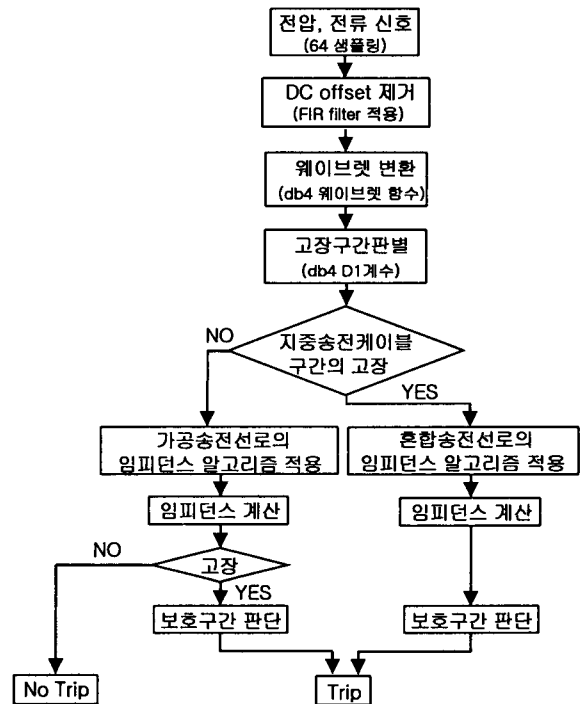


그림 13 거리계전 알고리즘 흐름도
Fig. 13 Flow chart of distance relay algorithm

그림 13에서처럼 가공송전선로 구간에서 지락고장 발생시는 가공송전선로의 임피던스 알고리즘의 적용에 따라 임피던스 계산이 이루어지고 계산되어진 값에 따라서 No Trip과 보호구간 판단에 따른 시간차로 Trip이 이루어지도록 하였다. 한편, 지중송전선로 구간의 고장시에는 혼합송

전선로의 임피던스 알고리즘을 적용하여 임피던스 계산이 이루어지도록 하였고, 보호구간 판단에 따른 시간차로 Trip 신호가 발생하도록 하였다.

5. 임피던스 계산 결과

5.1 오차보상 이전 임피던스 계산

표 1은 4.2절에서 제시한 임피던스 계산 알고리즘을 이용해 계전기 설치점에서의 실제값과 계산값을 비교한 임피던스 계산결과이다. 단, 표 1의 계산값은 식 (20)에서 오차보상 값(K)을 적용하지 않은 값이다. 가공선로 고장의 경우 1선지락 고장시 고장전류는 대부분 대지로 흘러가기 때문에 실제 임피던스 계산결과에 대한 오차는 거의 발생하지 않는다. 그러나 지중선로 구간에서 발생한 고장은 케이블의 도체와 시스 사이에 있는 절연층의 파괴로 발생하기 때문에 고장전류는 시스를 따라 중단부와 보통접속부(NJ)의 직접접지 지점을 통해 대지로 방전되게 된다. 따라서 고장의 특성이 가공선로 고장에 비해 매우 복잡한 양상으로 나타나게 되며, 계전기 설치점에서 계산된 임피던스도 실제값과 비교할 때 많은 오차가 발생된다. 표 1의 오차는 식 (22)의 오차 계산식에 의해 계산되었다.

$$\text{오차} = |\text{실제값} - \text{계산값}| \quad (22)$$

표 1 계전기 설치점에서의 임피던스

Table 1 Impedance at the relay point

	고장 지점	고장 위상	접지 저항[Ω]	실제값[Ω]		계산값[Ω]		오차[Ω]		
				R	X	R	X	R	X	
가공송전선로 구간	3km	0도	1	0.1259	0.9574	0.12539	0.98026	0.00051	0.00486	
		90도		0.1259	0.9574	0.12538	0.98025	0.00052	0.00485	
	7km	0도		0.29384	2.27598	0.29256	2.2872	0.001279	0.01122	
		90도		0.29384	2.27598	0.29256	2.2872	0.001279	0.01122	
	11km	0도		0.4617	3.57654	0.45969	3.59418	0.00201	0.0176	
		90도		0.4617	3.57654	0.459695	3.594145	0.002	0.0176	
14km	0도	0.5876		4.55196	0.585	4.5748	0.0026	0.0284		
	90도	0.5875		4.55196	0.584846	4.57415	0.0027	0.022		
지중송전선로 구간	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	

5.2 지중송전선로 구간에서의 오차발생 원인

16km 지중송전선로 구간에서 1선지락고장 발생시 고장전류는 고장점에서 모두 대지로 흘러가지 않고 시스를 통해 모든 계통의 직접접지점을 통해 대지로 방전된다. 또한 직접접지 지점의 접지저항 값에 따라 고장전류의 분포는 변하게 된다. 이러한 요인은 실제 계전기가 보는 임피던스 계산시 오차요인으로 작용하게 된다. 만약 전력케이블의 시스가

완전 크로스본딩 되어 있고 접지저항이 0Ω이라 하고 SVL이 없는 경우라고 가정하면 임피던스 계산시 오차는 현저히 줄어든다. 그림 14에서는 지중송전선로 구간인 지점에서 1선지락고장 발생시 실제로 중단점과 직접접지 지점을 통해 대지로 방전되는 고장전류의 분포를 분석한 결과이다. 그림에서처럼 고장전류는 중단부로 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.

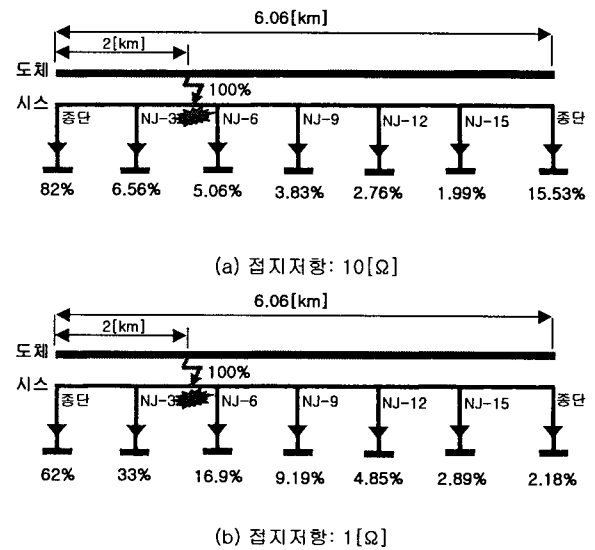


그림 14 접지저항에 따른 고장전류 분포

Fig. 14 Fault current with change of ground resistance

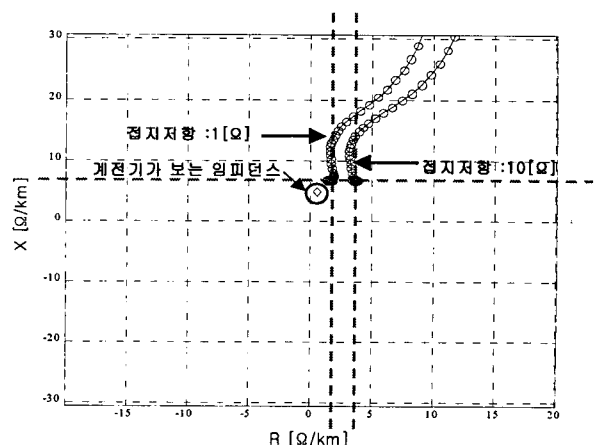


그림 15 접지저항에 따른 임피던스

Fig. 15 Impedance with change of ground resistance

또한 본 논문에서는 지중송전선로 접속함의 직접접지 저항의 설계기준이 10Ω이하라는 것을 감안하여 접지저항에 대한 오차요인을 분석하기 위해 각각 1Ω과 10Ω의 접지저

항을 갖는 계통에서 고장시 임피던스 특성을 분석하였다. 그림 15는 접지저항에 따른 R-X 임피던스 변화 그래프이다. 그림에서처럼 접지저항은 거리계전기가 보는 임피던스에 직접적인 영향을 미침을 알 수 있다. 그리고 계전기가 보는 임피던스의 리액턴스 성분(X)은 접지저항에 관계없이 모두 일정한 오차를 나타내고 있다. 이는 리액턴스 성분(X)은 접지저항에 직접적인 영향을 받지 않고, 고장시 시스를 통해 대지로 방전되는 고장 전류로 인해 변화하는 시스 성분 임피던스의 영향 때문으로 사료된다.

5.3 오차보상 값 및 오차 보상을 고려한 임피던스 계산

5.1절에서 검토한 결과와 같이 혼합송전선로 중 지중선로 구간에서 1선지락고장 발생시 계전기가 보는 임피던스와 실제 임피던스는 R과 X에서 모두 많은 오차가 발생하고 있다. 혼합송전선로의 지중선로 구간에서 발생하는 지락고장은 케이블의 도체와 시스 간의 절연파괴에 의해 발생하므로 지락 전류는 도체 및 시스의 양단으로 흐르게 되고 크로스본딩에 의해 다른 상으로도 영향을 미치게 되며, SVL의 동작여부에 따라 고장전류는 SVL 및 보통 접속부와 중단 접속부의 직접접지 지점으로 흐르게 된다. 이러한 고장특성 때문에 혼합송전계통의 지중선로 구간에서 고장 발생시 거리계전기의 결보기 임피던스는 실제 임피던스와 많은 오차를 발생시키게 된다. 또한 이처럼 복잡한 고장형태를 보이는 지중선로 구간에서 고장발생시 계전점에서의 임피던스 계산과정에서 나타난 오차를 정형화된 수식으로 보상하는 방안은 특정 선로 및 조건에서는 가능하나 각 선로마다 포설환경 및 계통 조건이 다른 지중계통에서 일괄적으로 보상할 수 있는 수식을 제시하기엔 많은 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 고장점을 다양하게 변경하여 오차를 분석하였고, 이를 통해 계통 조건에 알맞은 오차보상 값을 제시하였다. 이때 시스의 접지저항은 1Ω과 10Ω으로 고려하였다. 실제로 오차를 분석해본 결과 리액턴스(X) 성분은 접지저항에 의한 영향이 적으며, 접지저항은 저항(R)성분에만 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 따라서 리액턴스 성분의 오차보상은 접지저항에 관계없이 동일하게 적용시켰으며, 저항성분은 접지저항에 따라 다르게 적용시켰다. 본 논문에서는 EMTP/ATP에 의한 실제계통의 상세 모델링에서 접지저항을 기준으로 하였을 때 고장지점에 따라서 임피던스가 비례적으로 변함을 실험을 통해 검증하였고 이를 이용해 그림 16과 같이 오차보상 값을 설정하였다.

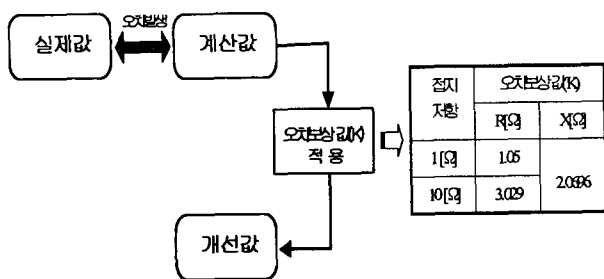


그림 16 오차보상 값 설정 과정
Fig. 16 Setting process of error compensation value

표 2에서는 그림 16에서 제시한 오차보상 값을 고려한 임피던스 계산결과를 나타내었다. 표에서 실제값은 각 거리에 따른 케이블의 정상분 임피던스 값을 말하며, 개선값은 계전점에서의 전압과 전류 파형을 FIR필터를 사용하여 DC 옴셋을 제거하고 웨이브렛 변환을 통해 기본파를 추출한 후 오차보상을 고려하지 않았을 때의 계산값에 식 (20)과 같이 오차보상 값을 적용하였을 경우의 임피던스이다.

본 논문에서 제시한 오차보상 값(K)을 혼합송전선로의 디지털 거리계전 알고리즘에 적용할 경우 표 2에서 볼 수 있듯이 저항(R)과 리액턴스(X)에서 실제값과 오차보상 값을 통해 표 1의 계산값을 보정한 개선값 사이에 발생하는 오차가 현저히 저하되었음을 알 수 있다. 표 2의 오차는 식 (23)의 오차계산식에 의해 계산되었다.

$$\text{오차} = |\text{실제값} - \text{개선값}| \quad (23)$$

표 2 지중선로 구간에서 오차보상을 고려한 계전점에서의 임피던스

Table 2 Impedance at the relay point considering error compensation in underground power cable section

고장 지점	고장 위상	접지 저항	실제값[Ω]		개선값[Ω]		오차[Ω]	
			R	X	R	X	R	X
16km	0도	1[Ω]	0.6108	4.842	0.5749	4.7238	0.035	0.118
		10[Ω]	0.6108	4.842	0.563	4.6787	0.047	0.163
	90도	1[Ω]	0.6108	4.842	0.5726	4.7246	0.038	0.117
		10[Ω]	0.6108	4.842	0.5606	4.6819	0.05	0.16
18km	0도	1[Ω]	0.634	5.1325	0.6336	5.1187	0.0004	0.01
		10[Ω]	0.634	5.1325	0.6343	5.1197	0.0007	0.012
	90도	1[Ω]	0.634	5.1325	0.6318	5.1194	0.0018	0.013
		10[Ω]	0.634	5.1325	0.6347	5.1196	0.0011	0.012
20km	0도	1[Ω]	0.6571	5.4228	0.6979	5.5893	0.040	0.166
		10[Ω]	0.6571	5.4228	0.7042	5.5887	0.047	0.165
	90도	1[Ω]	0.6571	5.4228	0.6974	5.6072	0.040	0.184
		10[Ω]	0.6571	5.4228	0.7038	5.588	0.046	0.165

6. 결 론

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

- (1) 혼합송전선로의 고장분석에 사용할 적정 마더 웨이브렛을 D1계수 합과 오차를 분석을 통해 db4로 결정했으며, db4 웨이브렛의 단계별 분해과정의 결과에 대한 FFT 분석을 수행하여 기본파 추출에 가장 적절한 분해 단계수가 3단계(A3)임을 검증하였다.
- (2) 고장구간 판별 또한 db4를 이용하였으며 1단계 분석을 통해 얻은 D1 계수를 비교하여 반주기 동안의 D1 계수 절대값의 최대값이 1이 되도록 계산한 뒤 모두 합해서 고조파 성분의 크기를 비교함으로써 발생한 고장이 가공선로 구간 인지, 또는 지중선로 구간에서 발생한 고장인지를 판별하였다.
- (3) 혼합송전선로 중 지중송전선로 구간에서 고장발생시 시스를 통해 직접접지점과 절연통 보호장치(SVL) 접지지점으로 대지로 방전되는 고장 특성으로 인해 임

피턴스 계산시 계산값과 실제값에서 발생하는 오차를 확인하였고 이에 따른 오차의 원인을 분석하여 제시하였다.

- (4) 지중송전선로 구간에서 고장 발생시 수많은 시뮬레이션과 계산 알고리즘을 이용한 임피턴스 계산 결과를 분석하여 접지저항에 따라 변화하는 저항(R)성분과 접지저항에 관계없이 시스를 통해 귀로하는 영상분 전류에 영향을 받아 변화하는 리액턴스(X)성분을 보상하는 오차보상 값을 제시하였다.
- (5) 오차보상 값 적용결과 계산값보다 개선된 임피턴스 값을 얻을 수 있었으며, 이를 이용한 혼합송전선로에서의 신뢰성 있는 거리계전기 동작은 송전계통의 안정도 향상에 크게 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 원광대학교의 교비지원에 의하여 연구됨

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, pp. 83-96 Jan. 1997.
- [2] 하체웅, 이종범, "지중송전케이블용 디지털 거리계전 알고리즘 개선", KIEE. Vol. 49A, NO. 12, DEC. 2000.
- [3] KEPRI, "지중선 임피턴스 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.
- [7] W. A. Wilkinson, M. D. Cox, "Discrete Wavelet Analysis of Power System Transient", IEEE Transaction on Power System, Vol. 11, No. 4, Nov. 1996.
- [8] 강상희, 권태원, "최소자승법을 이용한 고속 거리계전 알고리즘" 대한전기학회 논문지, Vol. 48A, No. 7, pp. 855-862, 1999.

저 자 소 개



정 체 균 (鄭彩均)

1973년 7월 14일 생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2002년~현재 동 대학원 박사과정.

Tel : (063)850-6735

E-mail : chekyun@wonkwang.ac.kr



김 경 호 (金敬昊)

1975년 9월 6일 생. 2002년 원광대 공대 전기전자공학부 졸업. 2002년~현재 동 대학원 석사과정.

Tel : (063)850-6735

E-mail : kkh5@wonkwang.ac.kr



하 체 웅 (河體雄)

1973년 4월 8일생. 1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 LG전선(주) 전력연구소 주임 연구원

Tel : (031)450-8422

E-mail : chewung@cable.lg.co.kr



이 종 범 (李鍾範)

1955년 7월 12일 생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987~1990년 한국전기연구원 지중송전연구실 실장. 1997~1998년 미국 Texas A&M University 객원교수. 현재, 원광대 공대 전기전자 및 정보공학부 교수

Tel : (063)850-6735

E-mail : ipower@wonkwang.ac.kr



윤 양 웅 (尹良雄)

1941년 9월 25일 생. 1967년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1979년~현재 원광대 공대 전기전자 및 정보공학부 교수

Tel : (063)850-6733

E-mail : ywyoony@wonkwang.ac.kr