

Fault Location Estimation for High Impedance Fault using Wavelet Transform

金 賢* · 金 喆 煥**
(Hyun Kim · Chul-Hwan Kim)

Abstract - High impedance fault(HIF) is defined as a fault that the general overcurrent relay can not detect or interrupt. Especially when HIF occurs in residential areas, energized high voltage conductor results in fire hazard, equipment damage or personal threat. This paper proposes a fault location estimation algorithm for high impedance fault using wavelet transform. The algorithm is based on the wavelet analysis of the fault voltage and current signals. The performance of the proposed algorithm is tested on a typical 154kV korean transmission line system under various fault conditions. From the tests presented in this paper it can be concluded that a fault location estimation algorithm using wavelet transform can precisely calculate the fault point for HIF.

Key words : Fault location, Wavelet analysis, High impedance fault, Phasor, Mother wavelet, FFT

1. 서 론

최근 국내에서는 송전선로 근처에서 공사용 크레인이나 수목 및 산불 등의 접촉과 근접으로 인한 고저항 미소전류의 지락사고가 발생하였다. 이들 고장은 전력계통 전체에 심각한 영향을 초래하지는 않지만 주로 도의적 관점, 사람에게 대한 안전성 제고의 측면에서 관심의 대상이 되고 있다.

고저항 지락사고 발생시 정확한 고장거리 추정은 선로 계전점의 선전압과 선전류의 크기와 위상(phase)을 가지고 계전점에서의 페이저(phasor)를 계산함으로써 수행될 수 있다 [1]. 그러나, 아크를 동반하는 지락사고에 있어서 페이저 계산은 고장점에서 발생하는 아크의 영향을 받으므로, 정확한 고장거리 추정에 어려움이 발생한다[2]. 일반적으로 교류 시스템에서의 아크는 짧은 시간동안 몇 번의 접촉과 소호를 통하여 스파크를 발생한 후 안정된 형태의 아크가 된다. 사고시 발생하는 아크는 비선형적인 전압-전류 특성 뿐만 아니라, 아크에 작용하는 여러 가지 형태의 힘과 시간에 따라서 길이가 가변된다. 이러한 아크의 비선형적인 특징은 고장형태의 정확한 판별과 고장거리 추정, 그리고, 계전기의 동작에 장애가 된다.

그러므로, 아크 모델링을 통해 얻어진 데이터를 웨이브렛 변환을 사용하여 입력 전압과 전류의 기본과 성분을 추출하여 고장점 추정 알고리즘에 이용하였다. 또한, 기존의 기본과 및 3고조파 성분을 이용한 방식[2]과 웨이브렛 변환 [3,4] 방식의 기본과를 이용한 고저항 지락사고 고장거리 추

정 결과를 비교하였다. 웨이브렛 변환은 전력계통의 고장과 스위칭에 연관된 과도현상을 분석하기 위한 방법으로 사용 가능하며, 고장검출기법에도 적용되었다[7-8]. 고장거리 추정 알고리즘은 고저항 지락사고를 기준으로 설정하였으며 이 알고리즘에 1선 고저항 지락사고를 적용하여 그 결과를 비교, 검토하였다.

2. 고저항 지락사고

고저항 지락사고는 아크를 동반하는 특징을 가지고 있다. 아크현상은 에너지 전위가 매우 높은 도체와 그렇지 않은 다른 물체가 불완전한 접촉 상태에서 서로 접근하였을 때 발생하는 현상이다. 고장시 발생하는 아크는 비선형적인 전압-전류 특성을 나타낸다.

본 논문에서는 고저항 지락사고 검출성을 비교하기 위하여 1선 고저항 사고와 커패시터 스위칭, 라인 스위칭 및 아크로 부하등의 비고장 현상들을 모델링하였다[7,8]. 커패시터 스위칭 모델에서 커패시터 뱅크의 용량은 1.2[MVA]이다. 아크로 부하 모델은 TACS 제어 신호원을 사용하여 모델링하였으며 아크로 부하의 용량은 15.4[MVA]이다.

3. 웨이브렛 분석

3.1 이산 웨이브렛 변환

여러 단계의 웨이브렛 변환을 수행하게 되면 많은 양의 데이터가 산출되고 분석시간도 길어지므로 문제가 된다. 따라서, 2의 역승 형태에 기초한 scale과 shift를 선택한다면 분석은 더욱 효율적으로 수행될 것이다. 이러한 분석은 이산 웨이브렛 변환을 통해서 구현된다. 이산 웨이브렛 변환

* 正 會 員 : (주)우리기술 중앙연구소

** 正 會 員 : 成均館大 電氣電子및컴퓨터工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 11月 23日

最終完了 : 2000年 7月 25日

$D_{a,b}$ 는 다음 식 (3-1)로 나타낼 수 있다[3,4].

$$D_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k S[n] \cdot \Psi\left[\frac{k - na_0^m}{a_0^m}\right] \quad (3-1)$$

여기서, scale을 나타내는 변수는 a_0^m 이고 shift를 나타내는 변수는 na_0^m 이다. $\frac{1}{\sqrt{a_0^m}}$ 은 마더 웨이브렛과 같은 크기의 에너지를 유지시키기 위한 에너지 정규화 성분이다.

웨이브렛의 approximation(A)은 신호의 저주파 성분을 나타내고 detail(D)은 고주파 성분을 나타낸다. 따라서, 이산 웨이브렛 수행과정은 고역필터와 저역필터를 사용하는 2가지 필터링의 개념으로 확장될 수 있다. 웨이브렛의 다분해능은 신호를 여러 형태의 고역 필터 성분들로 나누기 위해서 그림 1과 같은 웨이브렛 필터뱅크를 사용한다[5,6].

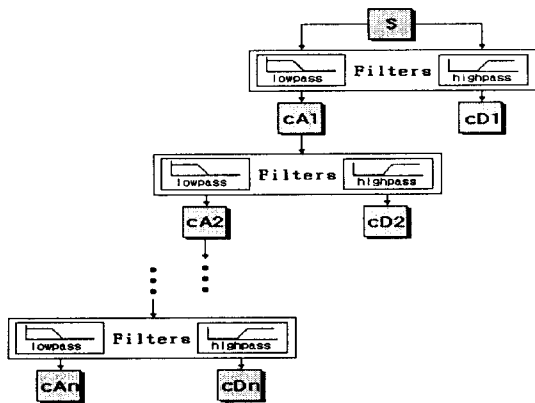


그림 1 고차와 저차필터로 구성된 필터 뱅크
Fig. 1 Multi level decomposition

3.2 마더 웨이브렛의 원신호 추출능력

고장검출에 있어서 적합한 마더 웨이브렛은 db4와 sym5 마더 웨이브렛 이다[7,8]. 두 가지 마더 웨이브렛 중 어떤 마더 웨이브렛이 원신호의 추출능력을 보유하는가를 비교하여, 둘 중 가장 적절한 마더 웨이브렛을 선정하여 알고리즘에 이용하고자 한다. 이를 위해 각 분해 단계는 6단계까지 수행하였으며, 판별을 위해서 사용되어진 신호는 선로의 5km, 13km 및 21km를 기준으로 하고 0°, 90° 사고를 기준으로 삼았다. 또한 고저항 사고시 많이 발생하고 고장거리 추정시 영향을 미치는 3고조파와 5고조파의 각 단계별(A1~A6) 함유 비율을 그 판단 기준으로 설정하였으며 신호는 전류를 기준으로 하였다.

표 1은 sym5 마더 웨이브렛 선정시 approximation 성분의 기본파에 대한 3, 5고조파의 비율이며, 표 2는 db4 마더 웨이브렛 선정시 approximation 성분의 기본파에 대한 3, 5고조파의 비율을 나타낸 것이다.

웨이브렛 분석 결과중 approximation 성분을 원신호 추출에 사용하게 되는데 그 중 표 2의 db4 마더 웨이브렛은 2단계와 3단계로 양분되어지나, 표 1의 sym5 마더 웨이브렛은 3단계로 일정하다. 따라서, 고장 검출시 가장 적절한 마더

웨이브렛은 sym5 마더 웨이브렛이며, 그 분해 단계는 3단계라고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 sym5 마더 웨이브렛을 이용하여 고장검출[7,8] 및 고장거리 추정 알고리즘을 수행하였다. 또한 고장거리 추정 알고리즘의 입력으로서는 A3 성분을 이용하였다.

표 1 sym5 마더 웨이브렛의 분석 결과중 A1 ~ A6 에 대한 각 단계별 3, 5고조파 함유 비율 [%]

Table 1 The containing ratio of third and fifth harmonic components using sym5 mother wavelet(A1~A6)

		A1	A2	A3	A4	A5	A6
5 km	0도	7.904	7.86	<u>7.62</u>	9.85	8.00	42.5
	90도	9.075	9.03	<u>8.79</u>	9.12	9.39	51.9
13 km	0도	6.902	6.86	<u>6.65</u>	9.70	8.12	42.4
	90도	6.871	6.83	<u>6.66</u>	9.10	9.31	51.9
21 km	0도	5.225	5.20	<u>5.02</u>	9.59	8.34	42.6
	90도	5.197	5.17	<u>5.02</u>	9.09	9.25	52.0

표 2 db4 마더 웨이브렛의 분석 결과중 A1 ~ A6 에 대한 각 단계별 3, 5고조파 함유 비율 [%]

Table 2 The containing ratio of third and fifth harmonic components using db4 mother wavelet(A1~A6)

		A1	A2	A3	A4	A5	A6
5 km	0도	7.9	7.84	<u>7.74</u>	13.8	13.6	56.2
	90도	9.07	9.00	<u>8.83</u>	13.7	13.3	58.5
	도	51	18	<u>93</u>	2	3	4
13 km	0도	6.9	6.85	<u>6.82</u>	13.8	13.6	56.5
	90도	6.87	<u>6.81</u>	6.84	13.7	13.4	58.5
	도	14	<u>63</u>	79	1	2	5
21 km	0도	5.22	<u>5.18</u>	5.18	13.7	13.6	56.6
	90도	5.29	<u>5.15</u>	5.20	13.7	13.4	57.8
	도	70	<u>50</u>	80	9	3	

4. 분석 알고리즘

그림 2는 실제 하드웨어로 구현될 때의 전체적인 흐름도이다. 입력으로는 3상의 전압과 전류가 들어가 16bit A/D 변환기를 거쳐서 2차 butterworth 필터를 통과하여 10고조파까지만 통과하게 된다. 이 필터링된 신호는 다시 웨이브렛 분석에 의해서 각기 고장검출 및 고장거리 알고리즘을 조건에 맞게 수행하게 된다. 이 때 입력신호는 한 주기당 64 샘플치 신호를 데이터 윈도우의 길이로서 사용하게 된다.

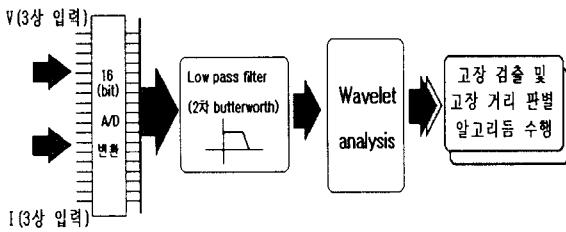


그림 2 알고리즘의 흐름도
Fig. 2 Flow chart of algorithm

5. 고장거리 추정 알고리즘 및 추정결과

다음 그림 3~그림 5는 각각 고장전과 고장후의 전압, 전류의 주파수 분석 결과와 웨이브렛 분해 결과인 A3 성분의 고장후 주파수 분석 결과이다.

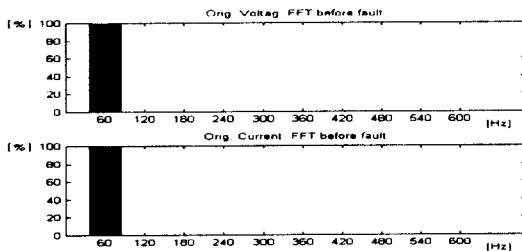


그림 3 고장전 주파수 분석 결과
Fig. 3 FFT before fault

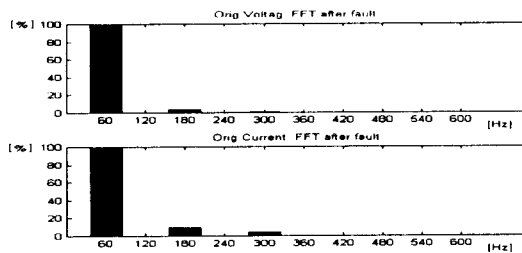


그림 4 고장후 주파수 분석 결과
Fig. 4 FFT after fault

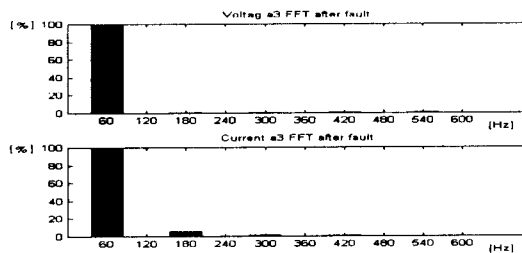


그림 5 고장후 A3 성분의 주파수 분석 결과
Fig. 5 FFT of A3 component after fault

주파수 분석 결과로부터 알 수 있듯이 고장전에는 60[Hz] 성분을 주로 포함하고 있으나, 고장후에는 3고조파와 5고조파가 발생함을 알 수 있다. 이 신호가 웨이브렛 필터를 통

과한 후의 결과인 A3의 주파수 분석에서는 3고조파와 5고조파가 통과전 보다 감소된 것을 알 수 있다. 따라서, 다음절에서 서술하게될 고장 거리 추정 알고리즘 상에서 3고조파를 고려하지 않고, 기본파의 영향만을 고려하여 고장 거리 추정 알고리즘에 적용할 수 있음을 보여주고 있다. 따라서, 그러한 관계들로부터 고장거리 추정에 사용될 전압과 전류의 성분은 기본파 성분을 가장 많이 포함하고 있는 전압 전류의 A3 성분을 이용하여 고장거리 추정 알고리즘에 사용하였으며, 또한 3고조파를 고려한 입력의 결과는 A3 입력 결과와 비교 수행하였다.

5.1 고장거리 추정 알고리즘

그림 6은 고장거리 추정 알고리즘의 흐름도이다.

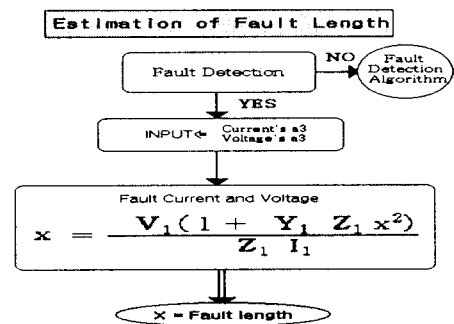


그림 6 고장 거리 추정 알고리즘
Fig. 6 Fault location estimation algorithm

입력은 각상의 전압, 전류의 웨이브렛 분석 결과인 A3 성분을 입력으로서 사용하게 되며, 알고리즘 내부의 수식적 증명은 다음절에서 설명하였다. 여기서, x는 고장 거리이다.

5.2 계전점 전압·전류의 페이지를 이용하는 방법[2]

고장은 선로의 임의의 지점에서 발생하므로 아크전압을 측정한다는 것은 사실상 불가능하다. 따라서, 선로 계전점 전압을 이용하여 아크 전압을 측정할 수 있다. 아크 고장일 경우에 계전점에서의 전압과 전류는 고조파 성분을 포함하고 있다. 이러한 파형들의 왜곡은 고장 거리와 아크 전압 크기에 의존한다. 스펙트럼 분석결과 계전점 전압과 전류는 아크 전압에 의해 발생하는 고조파 특히 기수 고조파 성분을 포함함을 알 수 있었다. 이러한 고조파 성분을 이용하여 아크를 동반한 사고시 고장점에 대한 거리를 추정할 수 있다.

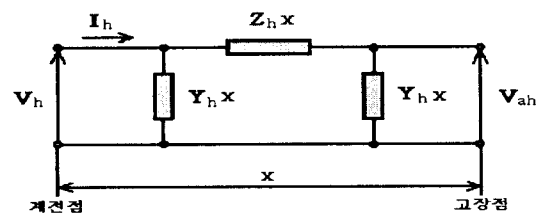


그림 7 선로의 등가 회로
Fig. 7 Equivalent circuit of the line

아크 전압의 고조파 성분을 측정할 수 있는 방법들은, 그림 7의 선로 등가 회로를 이용하는 것이다. 이 회로에서 모든 변수들은 라디안 주파수 $h\omega$ 를 가지며, $h\omega$ 로 모든 다른 선로 정수들은 계산되어질 수 있다. 고조파 성분에 해당하는 V_h , I_h 는 FFT를 통해서 계산 가능하다. 그림 7로부터 제 h 번째 아크 전압의 고조파 성분(V_{ah})은 다음 식 (5-1)과 같이 표시된다. 이는 모두 페이지와 관련된 것이다.

$$V_{ah} = V_h(1 + Y_h Z_h x^2) - Z_h x I_h \quad (5-1)$$

여기서, $Z_h(\Omega/km) = R(h\omega) + jh\omega L(h\omega)$,
 $Y_h(s/km) = jh\omega C(h\omega)/2$

는 각각 주파수 의존 임피던스, 어드미턴스이다. 그리고, x 는 관측 계전점으로부터의 고장 거리이다. 만약, h 번째 아크 전압을 크기만으로

$$V_{ah} = \frac{4}{\pi} \frac{1}{h} V_a \text{라 가정하면,}$$

$$V_{a1} = k_1 V_a = \frac{4}{\pi} V_a$$

$$V_{a3} = k_3 V_a = \frac{4}{3\pi} V_a$$

가 된다. 여기서, V_{ah} 는 아크전압의 h 번째 고조파의 진폭이다. 이를 페이지로 다시 정리하면, 기본파의 위상각이 ϕ 이라면, 3 고조파에 대한 위상각은 3ϕ 이다. 따라서, 이를 페이지에 관한 식으로 정리하면 다음 식 (5-2)와 같다. 여기서, V_{a1} 과 V_{a3} 는 각각 아크전압의 기본파 및 3고조파의 페이지이며 k_1 , k_3 는 계수이다

$$V_{a1} = k_1 V_a, \quad V_{a3} = k_3 V_a \quad (5-2)$$

$$k_1 = k_1 \angle \phi, \quad k_3 = k_3 \angle 3\phi = \frac{1}{3} k_1 \angle 3\phi$$

식 (5-1)과 (5-2)를 이용하여, 기본파 및 3 고조파에 대한 관계를 나타내면 다음 식 (5-3)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{a1} &= k_1 V_a \\ &= V_1(1 + Y_1 Z_1 x^2) - Z_1 x I_1 \\ V_{a3} &= k_3 V_a \\ &= V_3(1 + Y_3 Z_3 x^2) - Z_3 x I_3 \end{aligned} \quad (5-3)$$

여기서, Y 와 Z 는 각각 주파수 의존 선로 어드미턴스 및 임피던스이며 첨자는 각 고조파를 의미한다.

고장거리 산정을 위해서, 고장점에 대한 거리 x 는 다음 식 (5-4)와 같이 표시되며, 식 (5-4)를 이용하여, 고장거리를 산정할 수 있다.

$$x = \frac{V_1(1 + Y_1 Z_1 x^2) - K V_3(1 + Y_3 Z_3 x^2)}{Z_1 I_1 - K Z_3 I_3} \quad (5-4)$$

$$K = \frac{k_1}{k_3} = \frac{k_1 \angle \phi}{k_3 \angle 3\phi} = 3\angle -2\phi \text{이다.}$$

제시된 알고리즘은 계전점 전압과 전류가 주로 기본파 및 3고조파에 의해서 영향을 받는다는 가정 하에서 이루어진 것이다. 하지만 FFT분석 결과와는 달리 웨이브렛 분석 결과로 생성되는 A3 성분은 거의 기본파 성분만을 포함한 성분으로 원신호를 구성한다.

따라서, 3고조파에 대한 전압, 전류를 무시할 수가 있으므로, 위 식 (5-4)는 다음 식 (5-5)와 같이 간략화 할 수 있다.

$$x = \frac{V_1(1 + Y_1 Z_1 x^2)}{Z_1 I_1} \quad (5-5)$$

그러므로, 식 (5-5)를 이용하여, 고장 거리를 계산하고자 한다. 여기서 주목할 점은 기본파와 3고조파를 고려할 경우 필터링 되어서 들어온 신호를 다시 한번 DFT를 이용하여 신호를 분리해내어야 하는 반면, 웨이브렛 변환은 그 자체의 필터링 효과가 있어 부가적인 필터링을 필요로 하지 않으며, 바로 그 신호를 적용할 수 있다는 점으로부터 식 (5-5)는 나올 수 있다. 이 식(5-5)는 시뮬레이션 단계에서는 MATLAB과 같은 프로그램을 사용하여 쉽게 구할 수 있으며, 실제통에 적용할 시에는 다음과 같은 과정에 의해 구해 낼 수 있다. 식 (5-5)는 x 의 2차식으로, $Y_1 Z_1 x^2 \ll 1$ 인 것을 참조하여 쉽게 계산할 수 있다. 그래서, 첫 번째 단계에서는 $x^2=0$ 이라는 가정 하에 x 를 간단히 구해낼 수 있으며, 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 구해진 x 를 이용하여 x^2 을 무시하지 않고도 x 를 구해낼 수 있으며, 이러한 두 번째 단계는 처음 계산된 x 를 보정하는 것이다.

5.3 고장 거리 추정 결과

표 3과 4는 각각 기본파와 3 고조파를 고려 시 고장 거리 추정 결과와 기본파만을 고려시 고장 거리 추정 결과를 나타낸 것이다.

표 3 기본파와 3고조파를 고려시 고장거리 추정결과
 Table 3 Fault location estimation results considering fundamental and third harmonic components

고장점 [km]	0도 사고		90도 사고	
	고장점추정 [km]	오차 [km]	고장점추정 [km]	오차 [km]
0.5	0.6656	0.1156	0.6278	0.1278
5	4.5746	0.3254	4.8864	0.1136
10	9.9248	0.0752	10.3424	0.3424
13	12.3146	0.6854	12.5542	0.4458
16	15.8330	0.1670	15.6764	0.3236
21	21.0471	0.0471	21.0086	0.0086
평균오차	0.2412		0.1846	

표 4 기본파만을 고려시 고장 거리 추정 결과
 Table 4 Fault location estimation results considering fundamental frequency component

고장점 [km]	0도 사고		90도 사고	
	고장점추정 [km]	오차 [km]	고장점추정 [km]	오차 [km]
0.5	0.5529	0.0529	0.5592	0.0529
5	4.9376	0.0624	4.9303	0.0697
10	10.1963	0.1963	10.1878	0.1878
13	12.6230	0.3770	12.6159	0.3841
16	15.6478	0.3522	15.6577	0.3423
21	21.0186	0.0186	21.0093	0.0093
평균오차	0.1607		0.1589	

결과에서 볼 수 있듯이 큰 차이를 보이지 않는다. 오히려 기본파만을 고려한 것이 적은 오차를 보이고 있다. 따라서, 연산량의 감소로 인한 속도의 증가를 고려한다면 기본파만을 고려하는 것이 훨씬 좋다는 것을 알 수 있다. 여기서 발생한 오차들은 계산상의 오차뿐만 아니라, 고장 발생 시점 추정에서의 오차가 영향을 미치는 것으로 추정된다. 또한 기본파와 3고조파 신호는 고장 검출을 위해서 입력된 원신호로부터 DFT를 이용하여 기본파 성분과 3고조파 성분을 추출하여 신호를 재구성한 것이다. 그러나, 기본파 성분만을 이용하는 본 연구의 고장거리추정 알고리즘은 신호의 재분해의 과정없이, 고장검출시 수행된 웨이블릿 분석 결과의 하나인 A3 성분을 직접 이용하여 고장거리 추정을 수행할 수 있다. 다음 그림 8과 9는 0도 및 90도 고장발생시 기본파만을 고려한 경우와 기본파와 3고조파를 고려한 경우의 고장거리 추정오차를 나타낸 것이다.

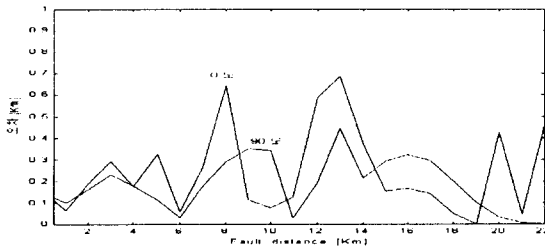


그림 8 기본파 및 3고조파 고려시 추정 오차
Fig. 8 Estimation error considering fundamental frequency and third harmonic components

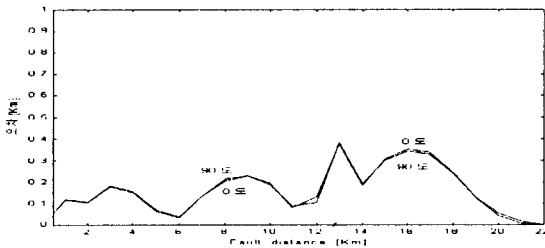


그림 9 기본파만 고려시 추정 오차
Fig. 9 Estimation error considering fundamental frequency component

6. 결 론

본 논문에서는 웨이블릿 변환을 사용하여 고저항 사고의 고장거리를 추정하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 고장 데이터를 웨이블릿 변환에 적용함으로써 기존 신호 분석 방법보다 고장검출을 빠르게 수행하였으며, 전압 및 전류의 A3 성분을 이용한 고장거리 추정도 정확하였다. 이는 기존의 고조파 성분을 이용한 방법보다 연산량 및 오차의 측면에서 보다 우수한 결과를 보여주었다. 추후 웨이블릿 변환을 사용한 고저항 지락사고 검출 및 고장점 추정 알고리즘의 실제 하드웨어 구현에 관한 연구를 진행하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] Arun G. Phadke, James S. Thorp, "Computer relaying for power systems", Research Studies Press Ltd, 1988.
- [2] M.B.Djuric et al, "Numerical algorithm for arcing faults detection and fault distance calculation on overhead lines", Electric Machines and Power Systems, Vol. 25, pp.939-953, 1997.
- [3] Martin Vetteli, Jelena Kovacevic, "Wavelets and subband coding", Prentice Hall, 1995.
- [4] Michel Misiti, Yves Misiti, Georges Oppenheim, Jean-Michel Poggi, "Wavelet toolbox for use with MATLAB", The mathworks Inc. 1996.
- [5] K K Li, "An adaptive window length algorithm for accurate high speed digital distance protection", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19, No. 6, pp. 375-383, 1997.
- [6] J Liang, S Elangovan and J B X Devotta, " A wavelet multiresolution analysis approach to fault detection and classification in transmission lines", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 20, No. 5, pp. 327-332, 1998.
- [7] 김현, 김철환, " Wavelet 변환을 이용한 고저항 지락고장 검출", 대한전기학회 논문지, 48A권 12호, pp. 1492-1497, 1999.
- [8] 고영훈, 이병길, 김철환, "송전선로의 고장검출용 마더 웨이블릿 선정과 기본파 추출에 관한 연구", 성균관대학교 논문집, 제50집 No. 2, pp.63-78, 1999.

저 자 소 개



김 현 (金賢)
1972년 10월 4일생. 1997년 성균관대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)우리기술 중앙연구소 연구원.
Tel : 02-886-0351 (내선 718)
Fax : 02-886-8560
E-mail : hkim@woorigs.co.kr



김 철 환 (金喆煥)
1961년 1월 16일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학과 교수
Tel : 031-290-7164
Fax : 031-290-7955
E-mail : chkim@yurim.skku.ac.kr