웨이브렛 계수를 이용한 고저항 지락고장 감시데이터 산출방법 연구

A Study on the Developing Method of HIF Monitoring Data using Wavelet Coefficient

정 영 범* · 정 연 하* · 김 길 신* · 이 병 성* · 배 승 철**

(Young-Beom Jung · Yeon-Ha Jung · Kil-Sin Kim · Byung-Sung Lee · Seung-Chul Bae)

Abstract - As the increasing HIF(High Impedance Fault) with the arc cannot be easily detected for the low fault current magnitude compared to actual load in distribution line. However, the arcing current shows that the magnitude varies with time and the signal is asymmetric. In addition, discontinuous changes occur at starting point of arc. Considering these characteristics, wavelet transformation of actual current data shows difference between before and after the fault. Although raw data(detail coefficient) of wavelet transform may not be directly applied to HIF detection logic in a device, there are several developing methods of HIF monitoring data using the original wavelet coefficients.

In this paper, a simple and effective developing methods of HIF monitoring data were analyzed by using the signal data through an actual HIF experiment to apply them to economic devices. The methods using the summation of the wavelet coefficient squares in one cycle of the fundamental frequency as the energies of the wavelet coefficients and the summation of the absolute values were compared. Besides, the improved method which less occupies H/W resources and can be applied to field detection devices was proposed. and also Verification of this HIF detection method through field test on distribution system in KEPCO power testing center was performed.

Key Words : High impedance fault, Arcing current, Wavelet transform, Monitoring data per cycle

1. 서 론

고저항 고장은 고장전류가 매우 작아 기존의 과전류 계전기나 퓨즈가 검출하기 매우 어려운 고장유형이다[1]. 고저항 고장 시 전력공급 차질로 인한 손실보다 감전사고 및 화재의 위험이 가중된 문제이다. 전력회사 입장에서는 감전이나 화재로 사고가 파급되기 전에 검출 및 대처하는데 관심을 가지고 있다.

고저항 고장유형은 매우 다양하지만 크게 아크 유무와 지면 또는 지면 위 특정사물과의 접촉 유무에 따라 구분될 수 있다. 아크 발생여부는 HIF 검출 접근방식의 경제성에 관련되며 접촉유무는 감전이나 화재 위험성과 관련되어 있다. 아크가 발생하는 경우 적은 전류가 흐르지만 고유의 전기적 신호특성을 포함하고 있어 비교적 경제적 방법으로 부하전류와 구분할 수 있다. 하지만 전선 단선 후 아크는 항상 발생하는 것은 아니다.

한국의 배전선로의 경우 가공전선 중 절연전선 비율이 매우 높아(도심지의 경우 대부분 절연전선) 지면에 접촉하여도 아크가 발생하지 않는 고장 비율이 높을 것으로 추정된다. 위험성을 고려하여 지면에 전선이 추락한 경우를 검출의 주요 대상으로 해야 되는데 이는 전기적 징후 상 다른

단선 사고와 차이를 구별하기 어렵다. 전류가 전혀 흐르지 않는 경우는 지면에 있으나 공중에 매달린 경우나 차이가 없기 때문이다.

그림 1 한전 고창전력시험센터 인공 고저항 지락 아크발생 실험

Fig. 1 downed conductor arcs to pavement block at KEPCO RI's power testing center

* Dept. of Power System, KEPCO Research Institute, Korea.

** Dept. of Forensic Science, National Institute of Science Investigation, Korea.

† Corresponding Author : Dept. of Power System, KEPCO Research Institute, Korea.

E-mail : ybjung7@kepcoco.kr

Received : November 8, 2012; Accepted : January 28, 2013

물론 그림 2에서 보여주는 것처럼 배전선로 다수 위치에 선로 기울기에 대한 전기적·기계적 센서를 설치할 경우 구분 가능하지만 이는 막대한 설치 및 운영비용이 요구될 것이다. 비교적 경제적이며 설치 및 운영의 편리성(변전소에서 D/L 단위 감시)이 제공되는 아크 검출방식은 기본 연구 전제인 위험성과 부합된다고 볼 수 있다.

그림 2 HIF 검출방법 접근방향
Fig. 2 Approach to HIF detection methods

하지만 항상 아크가 발생하는 것은 아니므로 보조적인 단선 정보를 필요로 한다. 대칭성분 변화와 위상각 변동의 경우 단선판단의 충분조건은 아니지만 다른 조건들과 사용되면 부가적으로 활용될 수 있다. 전선단선은 물리적 손상보다 취약개소에서 순간적인 과전류 발생 이후 단선되는 경우가 대부분 이므로 과전류 경험 이후 발생한 이러한 정보는 활용가치가 있다. 하지만 이 보조적인 기능들은 구현과 성능검증이 어려운 것이 아니므로 본 연구에서는 보조적인 기능을 포함한 전체기능 보다는 웨이브렛 변환을 이용한 감시데이터 산출방식에 초점을 맞추었다. 단선사고 중 위험성이 큰 아크 발생의 경우를 검출하기 위한 파형분석 방법을 실제 실험데이터를 이용해 분석 및 비교하고 실제 장치에 적용할 수 있도록 제시하였다.

2. 절연전선의 HIF 특성

2.1 전기적 정후

그림 3 HIF 현상분석실험 환경(개념도)
Fig. 3 Diagram of HIF field test

그림 3에서와 같은 환경에서 HIF 현장 실증 시험을 수행하였다. 그림의 선로 좌측이 홍농S/S에서 오는 전원측 이고 오른쪽은 부하측 이다. 실제 사용되고 있는 피복전선을 인공 지락을 위한 별도의 분기선로로 사용하였다. 그림 3에 표시된 인공 지락 장소에서 다양한 매질(표 2)과 절연전선과의 높이(접촉 거리)를 제어하기 위해 무선 호이스트가 사용되었으며 시험용 분기선로가 설치된 전주로부터 전원측으

로 5경간 떨어져있는 전주에 전류·전압을 MOF, CT, PT를 통해 감지하여 그 신호를 다음과 같은 조건하에서 계측하였다.

표 1 현상분석을 위한 계측장비 및 설정

Table 1 Used equipment and conditions

Measuring Instrument	DEWE5000(channel : 12)
Recording	Actual oscillographic records Vector scope, RMS, Harmonics etc.
Sampling rate	20,000 or 15,360Hz (333 or 256 sample/cycle)

표 2에서 보이는 바와 같이 지락 선로와 접촉하는 약 5가지 매질, 기상조건 및 선로 접촉부위에 따라 인위적으로 HIF 실험을 수행하였다. 서론 부분에서 언급했던 바와 같이 선로 끝 도체부분이 지면에 가까울 경우 표 2의 ①과 같이 다양한 현상이 나타났지만 절연전선의 피복부분이 접촉한 경우 ②와 같이 거의 반응이 없었다.

표 2 HIF 현상분석 실험결과

Table 2 Brief results of HIF experiment

접촉시료	수분	전기적 정후(①,② : 전선상태)	
		도체 ①	피복 ②
아스팔트	건조	없음	없음
	주수	Arc (No load : 21A, Load : 24A)	
자갈 (두께 : 8 ~ 10cm)	건조	없음	
	주수	Arc (No load : 15A, Load : 19A)	
사질토 (해안)	건조	Arc (No load : 10A)	
	주수	Arc (No load : 13A)	
콘크리트 (철근)	건조	OC (100A 이상)	
	주수	OC (범위초과)	
보도블럭 (콘크리트)	건조	Arc (No load : 15A, Load : 17A)	
	주수	Arc (No load : 15A, Load : 23A)	

표 2의 ②는 단선 후 절연전선이 지면에 떨어질 때 특정 사물에 의하여 앞부분이 올려져 있는 경우라 할 수 있다. 표 2의 ①은 도체가 접촉하여 아크가 발생한 경우 측정된 전류 크기를 피크값 기준으로 보여주고 있다. 부하전류가 없을 때 아크 전류가 약 10~15A(peak) 수준인데 L(유도성) 성분의 부하전류 10A(peak)가 흐르는 상황에서 아크 전류와의 합이 19A(peak) 밖에 되지 않는데 이는 전류 위상각 분석결과 인공 고저항 지락 시 대부분의 아크는 R(저항성) 성분이기 때문인 것으로 추정된다.

2.2 전류신호의 파형 변화

HIF 측정 실제전류 파형의 한가지를 예를 그림 4에서 보여주고 있다. 그림 4는 주수(비) 상태의 자갈과 부하가 인가된 상태(그림 위쪽) 및 부하가 인가되지 않은 상태(그림 아래쪽)인 전선과 접촉 시 측정된 전류 변화이다. 중요한 것은 일반적인 전류파형에 비해서 아크 발생 시 파형의 변화가 생긴다는 것이다. 예로서 아스팔트에 관한 결과인 그림 5의 아래쪽(무부하 상태)에서 시간에 따라 파형의 변화가 달라짐을 상세히 보여주고 있다. 아크는 불완전한 전기적 접촉에 의해 발생하는데 양극의 접촉 시간이 증가하면서 재질이 변형되고 이로 인해 임피던스가 낮아지면서 전류가 증가하고 파형이 안정화 되는 경향이 있다.

그림 4 HIF 현상분석실험 환경(개념도)

Fig. 4 Actual current with HIF on gravel surface

그림 5 HIF 현상분석실험 환경(개념도)

Fig. 5 Actual current with HIF on asphalt surface

부분방전이 발생하는 초기에 전류 파형 왜곡이 가장 심하고 점차 안정화 되면서 기본 정현파에 가까워 진다. 전류의 파형 왜곡은 한 주기내의 비대칭성과 관련되어 있다. 대칭적인 왜곡의 경우 Odd-harmonics(3,5,7,9th..etc.)만 존재하지만 비대칭적 일 때는 Even-harmonics (2,4,6,8th..etc.)까지 포함한다[2].

실제 HIF 파형은 이러한 비대칭적인 파형 특성을 볼 때 다수의 주파수 성분을 함유하고 있음을 알 수 있다. 이를 통

해 웨이블릿 변환을 통한 감시 데이터 산출을 하면 초기 부분 방전 시 큰 변화를 보여줄 것이라는 것을 예상할 수 있다.

하지만 단순히 크기만 가지고 HIF로 인한 아크를 판별하는 것은 위험하다. 다른 문헌[3]에서 알 수 있듯이 아크 시 발생하는 파형은 개폐기 Switching과 Capacitor Bank 투/개방 시의 파형과 유사하다. 이를 구분하기 위해서는 다음 단계에서 보여질 시간의 정보를 가지고 있는 감시데이터를 적용하는 방법을 이용해야 한다. 다음절에서는 이러한 HIF 감시데이터 산출방법의 비교와 개선된 방식을 제시하고 있다.

3. HIF 감시데이터 전개 방법

3.1 제곱합계 : Sliding sample by sample

단순히 웨이블릿 계수를 변환한 계수값을 사용하여 이상 유무를 판단하기 위해서는 별도의 복잡한 패턴 분석과정이 필요하다. 하지만 이는 현재까지 배전선로에 사용되는 디지털 장치의 H/W 수준에 따른 신호처리 능력을 고려할 때 적용하기 어려운 실정이다.

$$\sum_{n=1}^{\Delta k} \omega_j^2(n), \quad \text{if } 1 \leq k \leq \Delta k$$

$$\sum_{n=k-\Delta k+1}^{\Delta k} \omega_j^2(n), \quad \text{if } \Delta k \leq k \leq k_t$$
(1)

Where, Δk : 샘플윈도우 길이(1cycle 내 샘플 개수)

ω : Wavelet coefficient(Detail)

j : Scale or level

k : {1,2, , k_t }

k_t : 총 샘플데이터 개수

특정 신호의 한 주기 내의 샘플 값을 제공한 후 합계한 것은 신호의 에너지로 표현된다[4]. “Wavelet coefficient energies”로 명명[5]된 식(1)의 방식은 Wavelet coefficient(detail)의 변화를 증폭시키면서도 음의 영역을 반전시키므로 보다 해석하기 쉽게 보여준다.

그림 6 매질별 HIF 전류(Load + HIF current)

Fig. 6 Actual current with HIF on wet surface(Load + HIF current)

그림 7 HIF 전류에 대한 웨이블릿 계수(Level 1) 제곱 합계 (샘플단위 이동)

Fig. 7 Wavelet coefficient(Level 1) energies of HIF currents on wet surfaces

그림 6은 주수 상태에서 3가지 시료에 대한 HIF 실험 시 측정된 실제 전류파형이다. Wavelet 변환 후 1단계 detail 계수를 식(1)과 같은 방법으로 가공한 값을 그림 7에서 보여주고 있다. 또한 3단계 detail 계수를 식(1)과 같은 방법으로 가공한 값을 그림 8에서 보여주고 있다. X축은 시간을 나타내는 것으로 샘플단위로 표현되고 있으며 10,000샘플이 기본과 약 39cycle 정도이다.

그림 8 HIF 전류에 대한 웨이블릿 계수(Level 3) 제곱 합계 (샘플단위 이동)

Fig. 8 Wavelet coefficient(Level 3) energies of HIF currents on wet surfaces

측정된 HIF 전류파형에 대해 PC에서 Wavelet 변환을 수행조건을 표 3에서 보여주고 있다. 그림 7과 8에서 “Wavelet coefficient energies”로 명명[3]된 방식은 아크가 발생하기 시작하는 시점에서 큰 값이 나오지만 지속적인 차이를 보여주지 못하고 있다.

표 3 웨이블릿 변환 수행조건

Table 3 Fault simulation results

Wavelet Transform S/W tool	Matlab
Transform function	SWT (Discrete Stationary Wavelet Transform)
Mother Wavelet	DB4

이는 짧은 시간(3cycle 이내)동안 유사한 현상을 보여주는 스위칭 현상과 Wavelet coefficient(detail) energies의 변화를 구별하기 어렵다는 것이다. 이러한 현상의 주원인은 제곱의 경우 1보다 같거나 큰 계수에 대해서는 더욱 커지지만 1보다 작은 경우에 대해서는 더욱 작아지기 때문이다.

3.2 절대값 합계 : Sliding sample by sample

$$\sum_{n=1}^{\Delta k} |\omega_j(n)|, \quad \text{if } 1 \leq k \leq \Delta k \quad (2)$$

$$\sum_{n=k-\Delta k+1}^{\Delta k} |\omega_j(n)|, \quad \text{if } \Delta k \leq k \leq k_t$$

식(2)의 방식과 같이 특정 신호의 한 주기 내의 샘플 값의 절대값을 합계한 것[6]을 그림 9와 10에서 보여주고 있다. 샘플 데이터별 절대값을 이용하기 때문에 처리결과가 식(1)에 비해 적을 것으로 예상되지만 한 주기 동안의 합계를 하나의 점으로 표시하므로 큰 차이를 보이지 않았다. 즉 식(1)의 경우 1보다 큰 값에 대해서는 식(2)보다 커지지만 1보다 작은 값에 대해서는 매우 작아지게 되므로 한 주기의 기간 동안의 합은 오히려 같거나 큰 값을 가지고 있었다. 그림 7에서 아크가 발생하기 시작하는 시점에서만 큰 값이 나오고 나머지 부분이 매우 작은 값을 가지는 것에 비해 그림 8에서는 나머지 부분에서도 그림 7에 비해 증가한 것을 알 수 있다.

그림 10에서는 wavelet coefficient(Level 3)에서 아크발생 전과 후가 구별되는 특징을 보여주고 있다. 그림 8과 10을 비교해 보면 식(1)과 (2)방식의 차이를 쉽게 알 수 있다. 이 식(2)와 같이 한 주기 동안 샘플들의 절대값의 합을 구하는 방식은 이미 약 10년 전에 언급되었었다[6]. 한 주기를 샘플 윈도우 크기라고 볼 때 이 샘플 윈도우가 샘플단위로 시간에 따라 이동하는 방식이다. 이는 실시간 처리가 아닌 PC 환경에서 Matlab을 이용한 이론적 분석단계에서는 훌륭한 검출 기준으로 쓰일 수 있다. 하지만 실제 검출장치에서는 Wavelet transform 및 한 주기 동안 샘플들의 식(1)이나 (2)와 같은 연산 후 합이 실제 전류 측정 시 Sampling rate과 같은 속도로 진행 되어야 한다. 예를 들어 256 sample/cycle의 경우 한 샘플과 다음 샘플간의 간격이 0.064 ms/sample (= 16.6 ms/cycle ÷ 256 sample/cycle) 이고 64 sample/cycle의 경우도 0.259 ms/sample (= 16.6 ms/cycle ÷ 64 sample/cycle) 이다. 아크와 관련된 주파수 성분은 1.92kHz 이하에 분포할 가능성이 높은 것을 감안하여 64 sample/cycle을 적용한다 하더라도 아래 표 4와 같이 level 1에서만 wavelet transform을 수행하더라도 6.4ms 시간이

소요되므로 sample 단위 Sliding Window의 처리는 H/W상황을 고려할 때 실제 경제성 있는 제품으로 구현이 어렵다는 것을 알 수 있다.

그림 9 HIF 전류에 대한 웨이브렛 계수(Level 1) 절대값 합계(샘플단위 이동)

Fig. 9 Sum of wavelet coefficient(Level 1) absolute value of HIF currents on wet surfaces

그림 10 HIF 전류에 대한 웨이브렛 계수(Level 3) 절대값 합계(샘플단위 이동)

Fig. 10 Sum of wavelet coefficient(Level 3) absolute value of HIF currents on wet surfaces

표 4는 전력산업 현장에 사용되는(저가의) 전력용 계전기나 계측기를 모의할 수 있는 DSP board를 이용해 시험해본 결과이다. 시험은 웹상에 공개된 그림 11과 같은 DB4 low-pass filter 계수값과 high-pass filter 계수값을 이용하여 기본과 샘플값과 매트릭스 연산을 통해 이루어 졌다. 표 4의 level 1을 수행하는데 소요된 6.4ms는 다음 그림 12를 바탕으로 계산된 것이다.

표 4 디지털 장치에서 DWT* 처리시간 추정

Table 4 Estimation of DWT processing time on digital device

Wavelet Transform	level 1	level 2	level 3
samples	64	32	16
Processing time	6.4ms	3.2ms	1.6ms
Test conditions	DSP board : TMS320F28 150MHz (TI corp.)		

* DWT(Discrete Wavelet Transform)

그림 11 Wavelet family DB4 filter coefficients[7]

Fig. 11 Wavelet family DB4 filter coefficients[7]

그림 12 처리시간 산정 개요

Fig. 12 Processing time calculation

3.3 처리시간 개선을 위한 주기단위 합계

$$\frac{1}{N} \times \sum_{n=k-(N \times \Delta k)+1}^k |\omega_j(n)|, \quad \text{if } k = N \times \Delta k \quad (3)$$

Where, Δk : 샘플윈도우 길이(1주기 내 샘플 개수)

- ω : Wavelet coefficient(Detail)
- j : Scale or level
- k : $\{1, 2, \dots, kt\}$
- kt : 총 샘플데이터 개수
- N : $\{1 \leq N \leq 5, \text{정수}\}$
- 절대값 합계들의 평균 단위(N주기)

식(3)은 주기(cycle) 단위 평균 이산 웨이브렛 변환 계수의 감시데이터 산출방법이다. N주기 동안 주기 단위로 웨이브렛 변환 후 식(3)과 같이 원 신호의 샘플 데이터가 샘플 윈도우 길이의 특정 배수(N) 일 때만 상세계수에 대한 절대값의 합계를 구한 후 다시 N으로 나누어 표시하는 방법이다. 처음부터 원 신호 N cycle을 1cycle로 평균치를 구하여 고속 압축 샘플링하는 장치에서는 식(3)의 N을 1로 적용한다.

앞서 언급된 처리속도상의 문제점을 해결하기 위해 식(3)과 같이 cycle단위로 한번만 절대값들의 합계를 구하는 HIF 감시 데이터를 생성방법을 제시하였다. 그림 13에서 샘플단위로 처리하는 식(2) 방식에서 합계 계산시마다 데이터의 중복을 보여주고 있다. 개념적 설명을 상기 Wavelet coefficient의 샘플윈도우 길이가 5 sample 이라고 가정하고 감시 데이터를 산출하여 보았다. 그림 14는 샘플윈도우 크기를 5 sample로 잡고 식(3)과 같이 주기 단위로 처리할 때의 감시 데이터를 산출하여 본 것이다.

그림 13과 14의 아래쪽 그래프인 감시데이터 산출결과의 추세를 비교해보면 양쪽의 처리결과가 전체적으로 유사한 패턴을 보여줄 수 있다. 1~2cycle 이내의 변화에 대해서는 식(3)과 그림 14에 제시된 방식이 무리가 있을 수 있지만 단순한 배전선로 개폐기 조작에 의하여 발생하는 것(3cycle 이내)과는 달리 단선 지락 후 HIF에 의한 아크는 그림 6~10에 나타난 것처럼 지속시간이 최소 30cycle 이상으로 본 연구에서 제시된 방식으로 충분히 고장 전·후를 구별할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 13 기존 HIF 감시데이터 산정방식(샘플단위 이동)

Fig. 13 Conventional developing method of HIF monitoring data(Sliding sample by sample)

4. 주기단위 HIF 감시데이터 수행결과

4.1 처리시간 개선효과 및 검출능력 사전분석

그림 14 개선된 HIF 감시데이터 산정방식(주기단위 이동)

Fig. 14 Improved developing method of HIF monitoring data(Sliding cycle by cycle)

앞서 식(3)에 제시된 방식을 실제 주수상태의 지면과 접촉을 통해 발생한 HIF 전류신호에 대해 적용하여 HIF 감시 데이터를 구해보았다.

그림 15 1주기 단위 HIF 감시데이터(Level 1 계수 절대값 합계)

Fig. 15 Monitoring data per cycle with wavelet coefficient(Level 1) from HIF currents

그림 9에서(3.2절)와 마찬가지로 그림 15에서 아스팔트와 보도블럭(콘크리트)은 약 4초 이상 자갈은 약 8초 이상 원신호를 이용해 wavelet coefficient level 1의 변환결과를 보여주고 있다. 급격한 증감이 발생하는 일부 꼭지점의 값을 제외하고는 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 그림 16에서 wavelet coefficient level 3의 HIF 감시데이터 산정 결과를 보여주고 있는데 3.2절의 그림 10과 큰 차이가 보이지 않고 있다.

표 4와 그림 12에 나타난 것처럼 합계를 구하는 시간을 제외하더라도 1주기(64 sample)의 DWT를 수행하는데도 약 6.4ms 가 소요된다. 기존의 감시데이터 산출방식은 Sample

by sample로 이동하는데 한 Sample과 Sample 사이의 간격이 0.259ms(16.6ms/64) 이므로 일반적인 배전용 디지털장치에서는 처리가 불가능하다.

그림 16 1주기 단위 HIF 감시데이터(Level 3 계수 절대값 합계)

Fig. 16 Monitoring data per cycle with wavelet coefficient (Level 3) from HIF currents

하지만 본 연구에서 제시된 방식의 경우 제시된 H/W 수준의 디지털장치에서 구현이 가능할 것으로 보인다. 예를 들어 1상의 전류에 대해서만 감시할 경우 level 1~3 까지 DWT를 수행하는데 11.2ms(6.4+3.2+1.6ms)가 소요되므로 DWT level 3까지 구현이 가능하다. 하지만 지금까지 설명한 1주기 단위 방식에서는 3상의 전류 모두 감시를 해야 될 경우는 33.6ms(11.2ms × 3상)로 16.6ms를 초과하므로 불가하다는 것을 알 수 있다. 그러나 이를 전류 원신호 4주기를 1주기로 평균하여 샘플링하는 장치에서 구현할 경우 실제한 주기 경과 시간은 표 5와 같이 66.4ms 이므로 1상에 대해 level 1~3 까지 DWT를 수행하고도 55.2ms(66.4 - 11.2ms)의 시간적 공간이 있으므로 나머지 2상의 전류신호에 대해서도 level 1~3 까지 DWT를 수행할 수 있는 시간적 여유가 존재하는 것을 알 수 있다.

그림 17에서 4주기를 1주기로 평균하여 DWT를 수행한

표 5 4주기를 1주기로 평균 샘플링하는 장치에서 처리 시간(64 sample/cycle, 1상 기준)

Table 5 Processing time on device considering 4cycle as 1cycle by average sampling

원 신호(V, I) 4 cycle 경과 시간	
	약 66.4 ms (= 16.6 ms × 4 cycle)
DWT 시간 (1 단계만)	64 ms (1 cycle 만 수행, 64 sample/cycle 기준)
DWT 시간 (2 단계 까지)	9.6 ms = 6.4+3.2 ms(1 단계의 1/2 다운샘플)
DWT 시간 (3 단계 까지)	11.2 ms = 6.4+3.2+1.6 ms(2 단계의 1/2 다운샘플)

후 Wavelet coefficient(level 3)를 이용한 감시데이터의 변화를 보여주고 있다. 급격한 증감이 발생하는 일부 꼭지점의 값을 제외하고는 검출능력에 차이가 없음을 알 수 있다.

그림 17 4주기 단위 HIF 감시데이터(Level 3 계수 절대값 합계)

Fig. 17 Monitoring data per 4cycle with sum of wavelet coefficient(Level 3) absolute value

4.2 HIF 실증실험 모델 구축 및 성능검증 결과

그림 18에서와 같이 변전소에 알고리즘이 탑재된 검출장치를 설치하고 약 12km 떨어진 배전시험장에서 인공 고저항 지락고장 실험을 수행하였다. 검출장치와 같이 설치된 기기(GE사 F60)를 통해 실험선로의 정상 시 고조파 상태를 사내망을 통해 모니터링 하면서 고조파분석으로 나타나는 잡음이 존재하지만 평균치의 잡음으로 인한 오 판단을 억제하기 위해 변화폭이 최대한 안정된 상태에서 실험을 수행하였다. 대상 배전선로인 연구D/L 말단에 리액터를 투입하여 부하전류 15A(지상, RMS)가 흐르는 상태에서 인공 고저항 지락 아크발생과 동시에 검출결과를 사내망을 통해 모니터링 하였다.

그림 18 HIF 검출 성능검증 실증실험 조건

Fig. 18 Noise condition of field test for performance

초기 실험은 DWT(Discrete Wavelet Transform) Level 1~2의 계수를 이용하였고 고장점 근처에 검출장치를 별도로 추가 설치하여 원격장치 및 근접장치에서 검출실험을 두가지 수행하였다. 표 6에서 보이는 바와 같이 원격리(변전소)

검출율이 낮았다. 표 6의 (단기)는 ‘단기아크검출’을 나타내는 것으로 장치에서 기능 구현 시 검출신뢰성을 높이기 위해 단기와 장기를 구분하게 되어있는데 (단기)라는 표시가 없으면 ‘장기아크검출’을 의미하며 이는 ‘단기아크검출’이 정해진 기간 내에 정해진 회수이상 발생할 때만 발생하도록 되어있다. 본 연구에서는 기간은 1분, 회수는 10회 이상으로 설정하였다.

표 6 초기 성능검증 실증실험 결과(Level 1,2)

Table 6 Results of beginning field test for performance(Level 1,2)

매 질		보도블럭	아스팔트 (주수)	자 갈	해안모래
근 접 (고장점)	실험회수	2	4	0	0
	검출회수	2	4	0	0
중거리 (변전소)	실험회수	0	3	1	1
	검출회수	0	1(단기)	0	0

초기 실험은 DWT Level 1~2의 계수를 이용하였는데 Level 3까지 수행할 경우 더욱 저주파 영역의 변화를 분석할 수 있다. 성능검증 실험과 이전 실험을 통해 취득된 접촉매질별 전류신호 분석결과 아크 발생 시 주파 변동이 7조파(420Hz) 이내에서 주로 발생하였다. 이러한 점과 실험선로에서 1kHz 이상의 잡음 변동 여건을 고려하여 DWT Level 3까지 수행하였으며 주파수 분석영역 확대 후 원거리 검출율이 매우 향상되었다.

표 7과 표 8에서 검출 성공률이 높은 보도블럭, 아스팔트, 잔디를 중심으로 실험한 결과를 보여주고 있다. Level 1~3에서 각각의 검출결과는 동시 및 별도로 발생할 수 있어서 전체적인 회수만 표시하였다. 표 7은 중거리에서 검출결과인데 Level 1~2의 검출결과 없어서 Level 3의 결과만 보여주고 있다. 표 8을 보면 모두 Level 3에서 검출 성공률이 매우 높으나 Level 1과 2에서도 검출이 된 것을 보여준다. 하지만 실험당시 고주파수의 잡음이 발생하는 환경이어서 Level 3보다 고주파수 영역인 Level 1~2 결과는 잡음으로 인해 발생한 가능성이 높다.

본 연구의 경우 ‘DB4’ 웨이브렛 모함수(mother wavelet 또는 mother function) 만을 사용해서 다른 웨이브렛 모함수와 함께 사용할 경우 성능이 더욱 향상될 것으로 기대되지만, 앞서 언급한 H/W 처리능력 및 경제성등을 우선적으로 고려한다면 별도의 웨이브렛 모함수를 이용한 DWT를 병렬

표 7 주파수영역 조정 후(12km, Level 1~3)

Table 7 Improved results after adjusting frequency domain (12km, Level 1~3)

구 분		중거리(12km)			계
매 질		보도블럭 (주수)	아스팔트 (주수)	잔 디	
실험회수		10	12	6	28
검출 회수	Level 3	8	11	6	25

로 수행하기 보다는 대칭성분, 위상변동등의 보조정보를 이용하는 것이 합리적일 것으로 보인다.

표 8 주파수영역 조정 후(3km, Level 1~3)

Table 8 Improved results after adjusting frequency domain(3km, Level 1~3)

구 분		단거리(3 km)			계
매 질		보도블럭 (주수)	아스팔트 (주수)	잔 디	
실험회수		15	15	15	45
검출 회수	Level 1	5	6	3	14
	Level 2	1	5	2	8
	Level 3	14	15	15	44

5. 결 론

본 연구에서는 실제실험 및 전력사 배전선로 운영현황들을 고려하여 고저항 지락 고장에 대한 검출방법을 개발하기 위해 현실적인 접근을 시도하였다. 그 결과, 이용하기 편리한 보조적인 정보(대칭성분, 위상각변동)들과 조합하여 경제적이면서도 설치 및 운영이 용이하도록 배전선로 인출지점에서 DWT 계수를 사용한 HIF 감시데이터를 사용하는 검출장치 개발로 방향을 정하였고, 실제 인공 고저항 지락고장 실험 데이터를 이용한 분석을 통해 다른 방식과의 차이점과 성능을 비교하였다.

HIF 감시데이터 산출방법 중 3.2절의 “절대값 합계” 방식에 대해 검출 알고리즘을 적용할만한 대상 기기의 H/W 구현상의 문제점을 분석하고 그 해결 방안으로 주기 단위 처리방식을 제시하였다. 이는 스위칭 현상등으로 인한 수 주기 이내의 아크에 비해 시간지속이 긴 점을 이용한 것으로 단순한 프로그램 모의가 아닌 HIF 실제 데이터 분석에 의한 검출능력 사전분석을 통해 알고리즘이 개발되었다. 또한 한전 고창전력시험센터에서 실증실험 선로인 연구D/L을 통해 홍농S/S - 고창 시험장간의 중·단거리 검출성능 실증 실험까지 수행하여 소기의 성능검증까지 수행하였다.

현재 고저항 지락고장은 정확한 통계는 존재하지는 않지만 순간고장이지만 단선고장으로 기록된 200건 이상의 고장이 고저항 고장으로 의심되고 있다. 고저항 지락고장으로 인한 문제는 배전계통의 경우 광범위 고장으로 파급되기 보다는 화재나 감전의 위험성이다. 이는 반드시 보호해야 할 필요가 있지만 발생회수가 높지 않아 전력회사 입장에서는 검출신뢰성과 동시에 설치&운영의 효율성 높은 검출방식을 추구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 별도의 H/W 설치나 기존기기의 변경이 없이도 변전소 배전선로 인출단의 기기에 적용할 수 있는 효율적인 검출 방식을 제시하였다. 이 HIF 검출 방법은 향후 2년 동안 214개 사업소 실제 배전선로에 설치된 D/L용 전자식 전력량계에 별도의 H/W변경 없이 S/W 개선을 통해 시범적용 및 평가되어질 예정이며 시범적용 결과에 따라 전 배전선로 현장에 활용될 것을 기대하고 있다.

References

- [1] John Tengdin, Ron Westfall, Kevin Stephan, High Impedance Fault Detection Technology, IEEE PES PSRC Working Group D15
- [2] KEPCO(Korea Electric Power Corporation), 1987, A Study for the Improvement of the Protection Relay Scheme on Multi-grounded Distribution System, KEPCO RI Final Report, p41
- [3] B. Don Russell, Ram P. Shinshali, C. J. Kim, Behavior of Low Frequency Spectra during Arcing Fault and Switching Events, IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 3, Oct. 1998, p1487
- [4] Seung-Hun Lee, Dong-Hwan Yoon, Introduction to the Wavelet Transform, Jinhanbook, 2003, p31
- [5] High Impedance Fault Detection, F. B. Costa(Brazil) ISH, hannover, Germany, Aug. 2011
- [6] Hyun Kim, Chul-Hwan Kim, High Impedance Fault Detection using Wavelet transform, KIEE, Vol. 48A, Dec. 1999, p1496
- [7] <http://wavelets.pybytes.com/wavelet/db4>
- [8] Carl L. Benner, B. Don Russell, Practical High-Impedance Fault Detection on Distribution Feeders, IEEE Transaction on Industry Applications Vol. 33, May/June 1997
- [9] Ground Alert, Reliable detection of High-Impedance Fault caused by Downed Conductor, ABB Review, Jan. 2004

저 자 소 개

정 영 범 (鄭永範)

1974년 6월 2일생, 2001년 고려대학교 전기전자전파 공학과 졸업, 2003년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2004년~현재 전력연구원 파워시스템연구소 근무 중, 전력계통 신뢰도 및 전력거래, 배전선로 운전기준, 고장분석/검출, 배전선로 파형 해석 등 연구

E-mail : ybjung7@kepc.co.kr

정 연 하 (鄭蓮賀)

1980년 3월 6일생. 2004년 숭실대 전기공학과 졸업(학사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 한전 전력연구원 근무 중, 지중배전 설비 진단 및 서지에 의한 수명단축 특성 등 연구

E-mail : mywendy@kepc.co.kr

김 길 신 (金吉信)

1972년 3월 1일생, 1993년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998~2010년 한국전력공사 및 경영연구소 근무, 2011년~현재 전력연구원 파워시스템연구소 근무 중, 배전기기 신뢰성평가, 전기품질해석 등 연구

E-mail : iamhappy@kepc.co.kr

이 병 성 (李丙成)

1968년 8월 17일생, 1993년 충남대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 2006년 동대학원 전기공학과 졸업(박사), 2008~2010년 한국철도시설공단 설계자문위원, 1995년~현재 전력연구원 파워시스템연구소 근무(책임연구원) 중, 고전압절연 및 배전설비 신뢰도, 전력기기 수명예측 분야 전문연구

E-mail : bslee@kepc.co.kr

배 승 철

1975년 2월 7일생, 2000년 홍익대학교 전기전자공학부 졸업, 2004년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2004~2005년 포스코ICT 기술연구소 근무, 2005~2006년 한국전력공사 전력관리처 근무, 2006년~현재 국립과학수사연구원 근무, 전력계통 고장 및 전기아크 현상 연구, 전기화재 원인 분석

E-mail : schul6820@korea.kr