

**창립**  
40주년 학술대회  
논문 87-M-21-4

"22.9kV 다중 접지 배전선로 고저항 지락 검출"

\* 박영문, \* 이기원  
\* 서울대학교

\*\* 임우립, \*\* 윤만철 \*\* 유명오  
\*\* 한국전력 기술연구원

High Impedance Fault Detection on 22.9kV Multigrounded Distribution System.

Young-Moon Park, Ki-Won Lee, Ju-Il Lim, Man-Chul Yoon, Myeong-Ho Yoo  
Seoul National University, KEPCO Research Center

Abstracts

In this paper, a high impedance fault detection on 22.9kV multigrounded distribution system that has been very difficult by any existing conventional protective relaying systems is studied.

Because the fault current is very low, it cannot be distinguished from neutral current caused by load unbalanced on multigrounded distribution system.

We developed the new and best algorithms of high impedance ground fault detection. This algorithms are 'the even order power method', 'even order ratio method', and 'even order ratio variance method'.

Using this algorithms, a detection device for high impedance faults is constructed and tested in the laboratory.

And continually, it is installed and has been tested in KEPCO substations

1. 서론

과거 주로 사용하던 3상 3선식 비접지 배전 방식은 지락고장시 고장전류가 작아 과전압에 의한 지락고장검출시 신뢰도가 떨어질뿐 아니라 사고시 견전상의 전압상승이 높아서 기기의 절연 태백이 율타감에 따라 기자재의 가격 상승으로 인한 경제성이 문제가 되었다.

따라서 현재 우리나라 배전계통의 주종을 이루고 있는 3상4선식 다중접지 배전방식을 채택하게 되었고 이에따라 지락사고시 보호계전 방식도 선택지락계전기, 과전압 지락계전기에서 지락과전류 검출방식을 적용하여 신뢰도를 높여왔다.

그러나 아직도 모태 자감지락, 수목 접촉지락, 접연전선단선지락 등 지락사고 조건에 따라 고장전류가 작은 사고에 대하여는 고장검출이 되지

않는 사태가 발생하고 있는데 이원인은 상범부하 불평형으로 인한 중성선 불평형 전류 오동작을 방지하기 위하여 동작했을 낮출수 없기 때문에 배전선로 말단의 고저항지락사고, 접연전선 단선사고 등이 발생하였을 경우 고장전류가 동작별 전류보다 작아서 과전류 지락계전기가 동작치 못하는 것이다.

더우기 배전선사고의 약 1/4 - 1/3 (미국 PP & L 조사 : 낙선사고의 23% 및 복선사고의 32%)이 고저항지락사고로 진행될뿐 아니라 대도시 인가밀 집적지역 등에 접연전선 사용이 점차 증가하고 있어 고저항지락 사고는 더욱 증가 추세 있다.

또한 고저항 지락사고시 발생하는 아크로 화재 발생은 물론 안전사고를 유발하며, 선로사고의 확대 우려가 있는 점을 감안할때 고저항 지락검출의 중요성은 쉽게 이해할 수 있다.

그러나 고저항 지락검출은 미국동지에서 일부 연구중에는 있으나 아직 해결하지 못한 사항으로 새로운 보호계전 방식의 개발이 절실히 요구되고 있는 분야이다.

2. 고저항 지락사고의 특징

(1) 고저항 지락사고의 특징

i) 고저항 지락사고는 지락과 함께 언제나 아크를 동반한다.

이것은 선로의 단선지락시 완전지락(고장점  $Z=0$ )이 되지 못하고 대부분이 불완전지락 상태로 사고가 진행되기 때문이다.

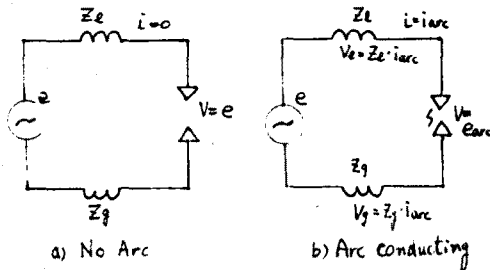
ii) 고저항 지락사고 후 아크 고장전류는 아크 발생시의 스파크와 비대칭 지속전류가 혼돈다.

iii) 아크 고장전류는 크기가 아주 적어서 기존 보호계전 방식으로는 검출이 극히 제한적이다.

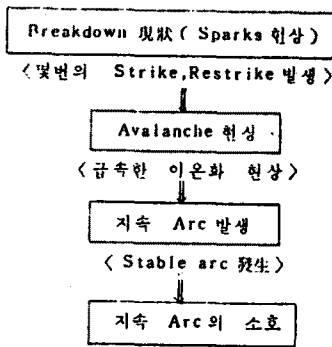
(2) Aro 외 전행

1) 실험실에서외 Aro 생성

아크의 진행순서는 그림 (a) 에서와 같이 두도 계사이 에 도전성체가 있다면 공기 에 의해 절연되고 있다가 (b) 와 같이 도전성의 증가 또는 갭이 감소되면 공기갭의 저항이 파괴되는 Break-down 현상이 일어나는데 아주 짧은 시간내에 몇 번의 strike 와 Restrike 가 발생하면서 Avalanche 현상으로 급속한 이온화 현상이 일어난다. 이때 용융한 딱딱이 총흔이 되고 공전선의 회로 저항이 낮다면 Arc로 불리는 연속적인 방전이 일어나는데 AC 시스템에서의 안정 아크는 매 반주기마다 형성되었다가 소멸된다.

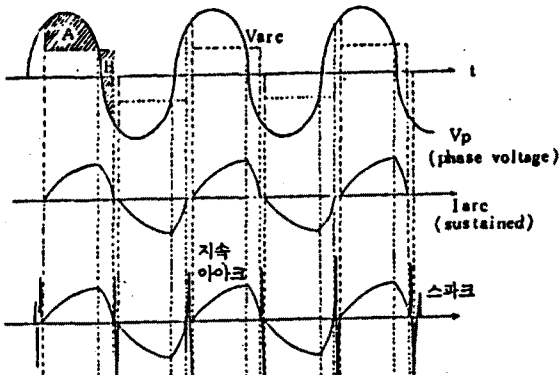


〈그림 1.〉 아아크 발생시키는 試驗用 裝置



〈그림 2.〉 Arc 도통순서

ii) 지속 아크의 파형



〈그림 3.〉 지속 아-크 파형

그류의 지속 아크는  $V_p$  (phase voltage)  $\geq V_{gap}$  (gap voltage) 일때 발생하고 이때 전압은  $V_{arc}$  로 일정해지며  $I_{arc}$  가 흐른다. 그림 3은 지속 아크의 파형이다.

(3) 심계통 아크 전류

아크 전압 전류는 아크의 상태 (아크 전압경사), 아크의 길이 태지 귀로 저항 등에 영향을 받으며 특히 아크 전류는 아크 전압 경사에 크게 제한 된다.

따라서 심계통 선로에서 발생하는 아크고장 영태는 그림3의  $I_{arc}$   $V_{arc}$ 의 파형처럼 반주기가 마다 대칭적이지 않다.

즉 아크를 발생시키는 양전극(렉소드, 애노드)의 재질이 다른 거 때문에 양의 반주기와 음의 반주기에 특성이 달라서 비대칭 파형을 만든다.

이것이 4장에서 설명한 고저항 지락사고 검출 방식인 우수고조파 방식의 검출 아이디어이다.

3. 고저항 경계지락사고 시험 및 분석

본 연구에서는 심계통 선로의 고저항 지락사고에 대한 주파수 특성을 해석하기 위하여 한국전력 구미변전소 22.9kV 형구 D/L 의 1개소에서 12종류의 시험법도 총 70여회의 시험 데이터를 측정 분석하였는데 이때 측정기기로서는 주파수 특성이 100 KHZ 이상이며 15CH 까지 동시 기록할 수 있는 Data Recorder (Magnetic Tape System)를 사용하였다.

또한 상시 배전선로의 주파수 특성을 분석하기 위하여 예산변전소의 8개소 100여종의 시험 및 Data 분석을 하였다.

여기서는 구미변전소 형구 D/L 의 고저항 지락사고 중에서 보도블럭 낙전선 낙하식 시험의 결과를 알아보기도 한다.

(1) 측정시험 개요도

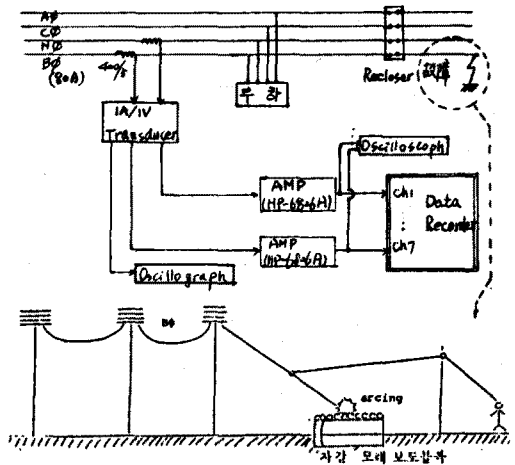


그림4 고저항 지락사고 시험개요도

(2) 분석 결과

1) Spectrum Analyzer 의 측정본신

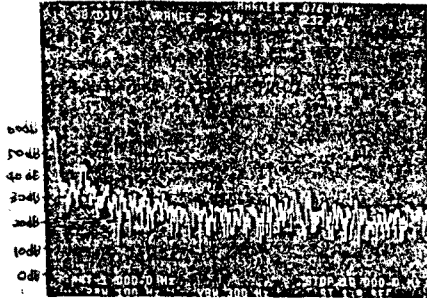


그림5 정상상태의 동성선전류

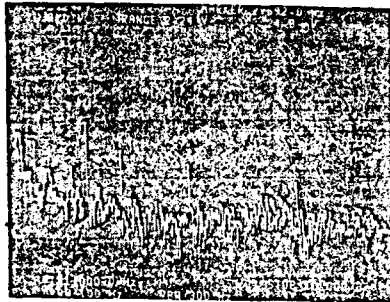


그림6 모래지막시험의 동성선 전류

이 측정본은 Data Recorder에 기록하였던 사고시와 정상시의 동성선전류를 출력하여 Spectrum Analyzer를 통해 본 것이다.

그림의 로마도이드 사진에서와 같이 50-60 dB의 펄크치를 가지는 2-3개의 frequency pulse가 발생함을 알았다.

이러한 peak pulse는 정상상태에는 없던 것이다.

1) 주파수 분석 Data

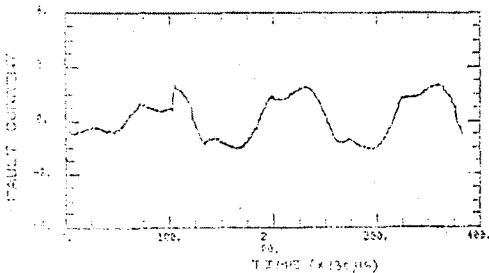


그림7 전체 고장전류

\* 고장이 발생한 순간 전류가 커져 있다.

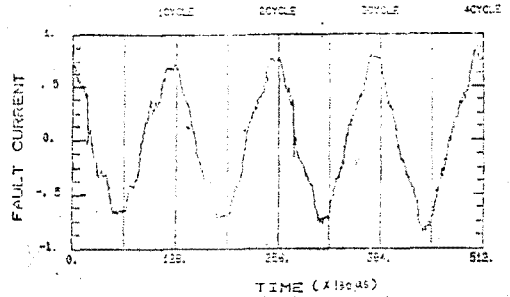


그림8 순수한 아크 고장전류 (4주기 동안)

\* 고장이 발생한 순간부터 비대칭적인 아크 전류가 흐르고 있다.

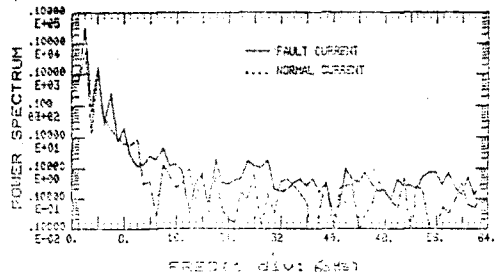


그림9 고장이 발생한 순간부터 한주기의 주파수 해석 (전체 고장전류)

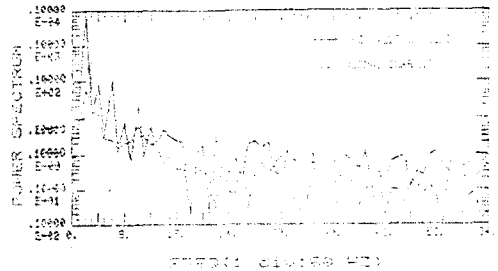


그림10 순수한 아크 고장전류의 주파수 해석 (첫번째 주기)

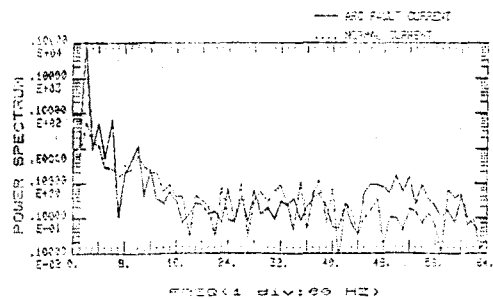


그림11 순수한 아크 고장전류의 주파수 해석 (두번째 주기)

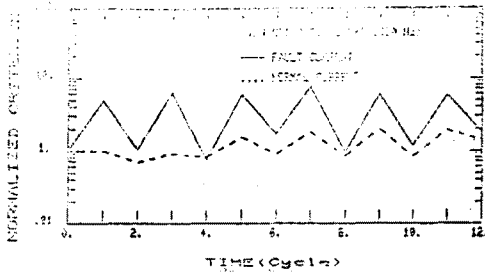


그림12 12주기 동안의 우수파 Power Spectrum Criterion

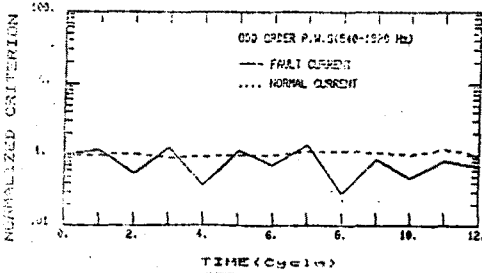


그림13 12주기 동안의 기수파 Power Spectrum Criterion (Normalised) : C<sub>0</sub>

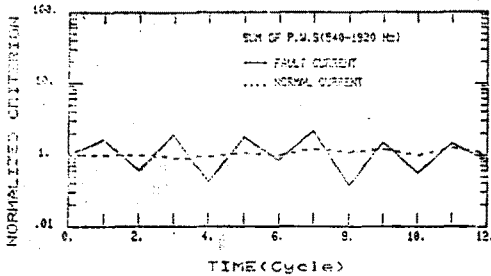


그림14 540 HZ-1920HZ 의 Power Spectrum Criterion (Normalised)

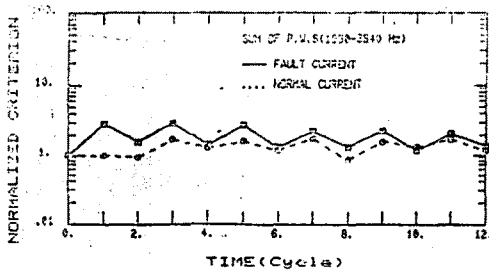


그림15 1980 HZ-3840HZ 의 Power Spectrum Criterion (Normalised)

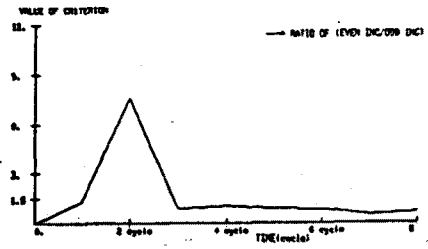


그림16 Ratio Criterion (C<sub>r</sub>) 적용 8주기 2번째 주기에 큰 값이 나타나 있다.

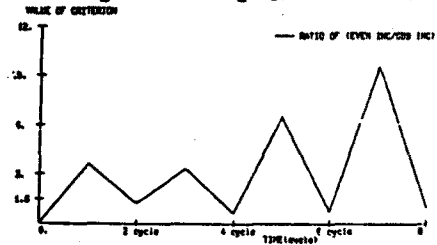


그림17 Ratio Criterion (C<sub>r</sub>) 다음 8주기 Ratio 값의 변화가 심하다.

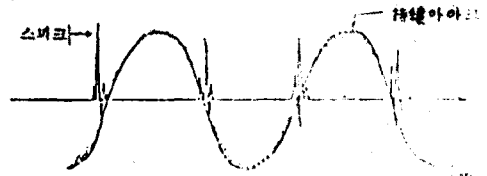
그림 12-15 까지의 Criterion 가운데 12,16의 우수파검출 Criterion이 가장 뚜렷한 구분을 나타내고 있다.

4. 우수고조파 검출방식

(1) 우수고조파 검출방식의 이론적 근거

본 연구에서 새롭게 개발된 방법으로 아크 고장전류의 한주기내의 비대칭성에 기인한 우수고조파 성분으로 고저항 지락사고를 검출하는 방식이다.

먼저 아크 고장전류에서 우수고조파가 발생하는 원인을 살펴보면 그림18에서와 같이 아크고장전류는 스파크부분과 지속 아크부분으로 나눌수 있다.



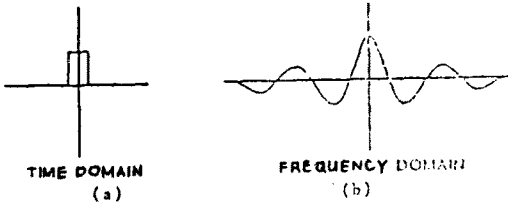
(그림 18) 이이크 電流의 스파크部分과 持續部分

여기에서 스파크부분은 그림19 (a)에서와 같이 Singular Impulse 로 모델링 할수 있다. 여기서 duration T는 100μs (Power Arc의 경우) 정도이다.

이때 주파수 해석은  $F(w) = T \frac{\sin(\frac{wT}{2})}{\frac{wT}{2}}$  로 나타낸다.

여기에는 상당한 양의 고조파 성분이 존재하므로

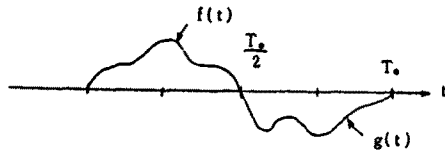
이들 통해 고저항 지막사고를 검출할 수 있다.  
이 방식이 기존 고주파 검출 방식이다.



(그림 19) 스파크 발생의 원리

실험실용 A.C 아크 발생기를 통한 지속 아크는 한 주기 내에서 shape 가 같은 대칭 아크 전류를 야기시킨다. 이에 관한 주파수 해석 결과는 기수파 성분만 존재하고 우수파 성분은 전혀 존재하지 않는다.

그러나 고저항 지막사고가 발생하여 야기된 지속 아크는 한 주기 내에서 서로 shape 가 다른 비대칭적인 아크 전류를 야기시킨다. 이에 관한 주파수 해석 결과는 3장에서와 같이 기수파 성분에 비해 우수파 성분이 지속적으로 존재한다.



(그림 20) 비대칭적 전류파형

이러한 비대칭성의 원인은 아크 저항의 Time varying nonlinear 성질, Travelling wave 영향, 로컬 저항의 변동성 등이 있지만 가장 큰 원인은 아크를 생성하는 두극이 60Hz 전원 전류에 의해 한 주기마다 바뀔 때 두극의 재접변동이 불균형 상태의 아크 성질을 바꿔게 하므로써 발생한다.

물론 정상시에도 부하 불균형에 의한 우수고조파 성분이 발생하지만 그 양은 아주 작을 것이다. 왜냐하면 대칭성 잡음은 기수고조파만 나타나기 때문이다.

그러므로 적정한 주파수 대역에서 이 우수파 성분의 변동량으로 정상상태와 고저항 지막사고를 명확히 구분할 수 있을 것이다.

(실제 현장시험 고장전류 분석결과를 보면 이 대역은 500 Hz-2KHz 정도이다)

(2) 우수고조파 Power 검출 방식

정상시에 대한 우수고조파 Power spectrum 의 용가를 우수파 검출 Criterion ( $C_j^u$ )로 정의하여 이 값이 그 근처이면 정상시이고 그보다 큰 규정치 (setting)를 초과하면 고장으로 판정하는 방식이다.

이 방식에 의하면 갑작스런 부하의 투입이나

작단시에도 우수고조파의 Power spectrum 이 증가될 수 있으므로 이러한 경우 (스위칭 현상등)와의 구분을 지속시간 (duration time)의 차이로 구분한다.

또한 고조파 검출 방식과의 병행용 통해 선로 보완할 수 있을 것이다. 이 방식에 따른 검출 시스템의 전체 블록도는 (그림 21)과 같다.

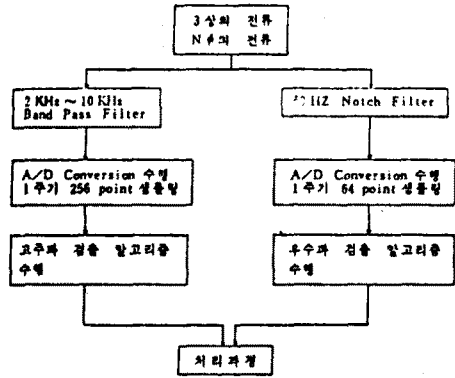


그림 21 검출 시스템 블록도

1)  $C_j^e$  (우수파 검출 Criterion)

$$C_j^e = \frac{1}{N} \sum_k \left\{ \frac{PS_f(k) / PS_f(1)}{PS_n(k) / PS_n(1)} \right\} \quad (N = k \text{ 개수})$$

2)  $C_j^A$  (고조파 검출 Criterion)

$$C_j^A = \frac{j \text{ 번째 주기의 고주파 에너지 (2 KHz - 10KHz)}}{\text{정상상태 고주파 평균 에너지 (2KHz - 10KHz)}}$$

여기서  $C_j$ ,  $C_j^e$ ,  $C_j^A$ 는

- $C_j$ : j 번째 주기의 검출 Criterion
- $C_j^e$ : j 번째 주기의 우수파 검출 Criterion
- $C_j^A$ : j 번째 주기의 고조파 검출 Criterion 를 나타낸다.

또한,  $PS_f(1)$ ,  $PS_n(1)$ 는

$PS_f(1)$ : FAULT 시 1 조파에서의 Power Spectrum

$PS_n(1)$ : NORMAL 시 1 조파에서의 Power Spectrum

와 같다.

그러므로 이때 normalized power spectrum 은 다음과 같다.

$$\left\{ \begin{array}{l} PS_n(k) : \text{NORMAL 시 } k \text{ 조파 (60 Hz) 성분으로} \\ PS_n(1) : \text{표준화시킨 } k \text{ 조파 성분의 Normalized Power Spectrum} \\ PS_f(k) : \text{FAULT 시 } k \text{ 조파 (60 Hz) 성분으로} \\ PS_f(1) : \text{표준화시킨 } k \text{ 조파 성분의 Normalized Power Spectrum} \end{array} \right.$$

여기서 우수 척 검출 Criterion ( $C_j^e$ )는 다음의 두 가지로 정의될 수 있다.

$$1) C_j^e = \left\{ \frac{PS(8)+PS(10)+PS(12)+\dots+PS(32)/PS(1)}{PS(8)+PS(10)+\dots+PS(32)/PS(1)} \right\} = \frac{\left\{ \sum_{k=1}^{even} PS(k) / PS_1(1) \right\}}{\left\{ \sum_{k=1}^{even} PS(k) / PS_n(1) \right\}}$$

$$2) C_j^e = \left\{ \frac{PS_1(8)/PS_1(1)}{PS_1(8)/PS_1(1)} + \frac{PS_1(10)/PS_1(1)}{PS_1(10)/PS_1(1)} + \dots + \frac{PS_1(32)/PS_1(1)}{PS_1(32)/PS_1(1)} \right\} \times (1/N) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{even} \frac{PS(k)/PS(1)}{PS(k)/PS(1)}$$

2)와 같이  $C_j^e$ 를 설정하면 고장전류의 크기에 대한 제한이 없어지고, 특정한 부하의 특성에 의존하는 어느 무제한 Even order Harmonic의 효과를 제거할 수 있다.

1)의  $C_j^e$  또는 어느 무제한 Even order Harmonic이 발생하는 부하가 있는 선로에서는 고장과 구분의 구분은 이 큰편이다. 그리고 정상상태와 고장상태의 구분은

정상상태 :  $C_j^e = 1$  주변

고장상태 :  $C_j^e$ 의 값이 1보다 커질 것이다.

(즉,  $C_j^e$ 가 규정치를 넘으면 우수 척 성능이 증가된 것이므로 고장일 가능성이 높다.)

이 방식의 문제점은 정상시의 과도현상(스위칭 현상, 부하개폐현상 등)에 대한 민감성이 높다는 데 있다.

(3) 우수 구조적 Ratio 방식

이 방식은 앞의 우수 구조적 POWER 방식의 고장검출 Criterion 인  $C_e$  ( $C_e = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{even} \frac{PS_1(k)/PS_1(1)}{PS_n(k)/PS_n(1)}$ )에서의 우수 구조적 Power의 Normalized sum 형태를 우수와 기수의 상대적인 증가비 형태로 바꾼 새로운 Criterion  $C_r$ 을 사용한다.

$$C_r = \frac{C_e}{C_0} : \text{상대적인 증가비}$$

Ratio 방식을 사용함으로써 우수 구조적 POWER 방식에서의 검출상 문제점이었던 스위칭 현상, 부하 개폐현상 등의 정상 과도현상의 경우에도  $C_r = 1$ 로 유지되어 이들과 고장현상과를 확실히 구분할 수 있다. 즉, 정상 과도현상의 경우에 우수 구조적 Power ( $C_e$ )의 증가와 더불어 기수 구조적 Power ( $C_0$ )의 증가도 같이 나타나므로 이들의 상대적인 증가비 ( $C_r$ )은 거의 일정함을 여러 번의 현장 적용 시험 (예산 스위칭 시험, 구로 양평

특수부하 시험 등)에서 확인할 수 있었다.

(4) 우수 구조적 Ratio Variance 방식

이 방식은 앞의 Ratio 방식을 좀더 개선한 것으로 Ratio 방식의 문제점인 과도현상 전류(정상시나 고장시)에 대한 민감도의 저하를 보완하여 보다 확실한 고장 검출을 위한 방식이다.

Ratio Variance Criterion ( $C_v$ )에 대한 정의는 J 번째 주기의 ratio criterion  $C_j^e$ 와 j-1 번째 주기의  $C_{j-1}^e$ 과의 차이에 대한 variance의 합으로 정의된다.

$$C_v = \sum_{j=1}^{\text{cycle (end)}} (C_j^e - C_{j-1}^e)^2$$

$C_v$ 가 설정치를 넘으면 고장으로 판정한다.

이러한 Ratio Variance 방식은 정상시 과도현상에 대한 구분은 Ratio Variance으로 수행하고 고장에 대한 민감도를 Variance Criterion으로 향상시킨다.

5. 연구 결과 및 향후 활용 전망

본 연구에서는 다중접지 계통의 고저항 지락 사고의 외국의 여러 연구에도 불구하고 세계적으로 아직 완전히 해결되지 못한 문제로 되어있었으나, 새로운 검출방식인 우수 척 방식 (Ratio 방식, Ratio Variance 방식)을 연구 개발하여 현장 시험 고장전류에 적용해 본 결과 기존의 어떠한 방식보다 안정적으로 고저항 지락사고를 검출함을 알 수 있었다.

본 연구의 우수 척 검출방식 알고리즘은 마이크로 프로세서용 이용한 Digital Relay 시제품(고저항 지락보호장치)을 제작하여 현장에 설치 시험은 진행 중이다.

앞으로 보다 확실한 시험결과를 통해 가장

적합한 알고리즘 조합방식을 선택하고 선로별 파라미터 설정 등 적용 기준을 결정짓게 될 것이다.

1. Texas A & M University, "Detection of Arcing Faults on Distribution Feeders", EPRI Report EL 2757, Dec. 1982.
2. Russell, Aucoin, "Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Components", IEEE Trans.
3. J. Carr, "Detection of High Impedance Faults on Multi Grounded Primary Distribution System", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No.4, April 1981.