2003년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집(2003.11.13~15)

3상 배전계통의 고장조건에 따른 산화아연 피뢰기 소자의 누설전류 특성

이복희, 최휘성*, 강성만, 박건영, 이수봉, 오성균
인하대 차세대 고전압전력기술연구센터

The characteristic of leakage current of ZnO block varistor according to fault conditions of three-phase four-wire distribution system

B.H. Lee, H.S. Choi*, S.M. Kang, K.Y. Park, S.B. Lee, S.K. Oh
HEIRC inha University

Abstract - Kinds of most frequent faults happened on overhead distribution system are the single line-to-ground fault, the line-to-line fault and the two line-to-ground fault. Occasionally, the three line-to-ground fault and the disconnection of a wire are happened in severe conditions. In this study, the single line-to-ground fault, the line-to-line fault, two line-to-ground fault on three-phase four-wire overhead distribution system were experimentally simulated and characteristics of total leakage current of distribution arrester caused by these faults were investigated. Also, the changing aspect of total leakage current of distribution arrester caused by voltage variation was investigated. In a consequence, abnormal voltages caused by voltage variation, the line-to-line fault, the two line-to-ground fault have a little effect on total leakage current of ZnO arrester. But abnormal voltages caused by the single line-to-ground fault have an important effect on total leakage current of ZnO arrester.

1. 서 론

현재 우리나라에서 공급하는 가공 배전계통의 경우 22.9[kV] 다중 접지 방식으로써 전력기기 보호 장치인 배전용 피뢰기는 가공선로에 200m마다 설치하기로 되어 있다. 가공선로에 설치되어 있는 배전용 피뢰기는 상시 인가되는 운전전압에 의해서 지속적인 스트레스를 받게 되어 운전전압에서도 미소 누설전류가 흐른다. 또한 단시간의 고장에 의한 이상전압에 의해서도 상당한 스트레스를 받게 된다. 가공 배전계통은 직접 자연에 노출되어 있어 모든 기상조건의 영향을 받게 되므로 사고를 일으킬 우려가 많다. 가공 배전계통에서 발생하는 사고 중 가장 많은 것은 1선 지락이지만, 이밖에 선간 단락, 2선 지락, 심할 경우에는 3선 지락으로까지 진전되는 사고가 있을 뿐만 아니라 때에 따라서는 단선사고까지 발생하는 경우도 있다.

따라서 본 논문에서는 가공 배전계통에서 일어날 수 있는 사고 중 1선 지락, 선간 단락, 2선 지락 사고를 모의하여 3상 4선식 배전계통에서 발생할 수 있는 이상전압이 배전용 피뢰기의 누설전류에 미치는 영향을 평가하였고, 또한 특 고압 송전 시 허용되는 전압 변동률(허용치 ±10%)에 의한 전압 불평형이 피뢰기의 누설 전류에 미치는 영향도 조사하였다.

2. 관련 이론

어떠한 비대칭의 3상 전압이라도 정상분, 역상분, 영상분의 합성으로 나타낼 수 있다. 임의의 비대칭 전압 $\dot{V}_a$ $\dot{V}a$, $\dot{V}b$, $\dot{V}c$는 대칭분 전압의 합성으로 나타내어진다.

$$\begin{aligned}\dot{V}_a &= \dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2}\\ \dot{V}_b &= \dot{V}_{b0} + \dot{V}_{b1} + \dot{V}_{b2}\\ \dot{V}_c &= \dot{V}_{c0} + \dot{V}_{c1} + \dot{V}_{c2}\end{aligned} \quad (1)$$

식(1)의 우변은 전압의 대칭분이며, $\dot{V}_{a0}$, $\dot{V}_{b0}$, $\dot{V}_{c0}$는 영상분, $\dot{V}_{a1}$, $\dot{V}_{b1}$, $\dot{V}_{c1}$는 정상분, $\dot{V}_{a2}$, $\dot{V}_{b2}$, $\dot{V}_{c2}$는 역상분이다. a상의 영상분, 정상분, 역상분을

$$\dot{V}_{a0} = \dot{V}_0\ ,\ \dot{V}_{a1} = \dot{V}_1,\ \dot{V}_{a2} = \dot{V}_2$$

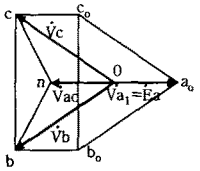
로 하고, $a = e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2}+j\frac{3}{2}$, $a^2 = e^{j4\pi/3} = -\frac{1}{2}-j\frac{3}{2}$ 의 연산자를 사용하면

$$\begin{aligned}\dot{V}_a &= \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2\\ \dot{V}_b &= \dot{V}_0 + a^2\dot{V}_1 + a\dot{V}_2\\ \dot{V}_c &= \dot{V}_0 + a\dot{V}_1 + a^2\dot{V}_2\end{aligned}$$

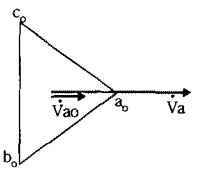
로 표현된다. a상에 유기되는 전압을 $\dot{E}_a$라고 하고 3상이 평형을 이루었을 때 각 상의 전압은

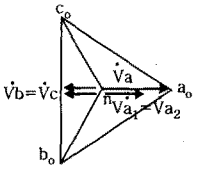
$$\dot{V}_a = \dot{E}_a\ ,\ \dot{V}_b = a^2\dot{E}_a\ ,\ \dot{V}_c = a\dot{E}_a$$

로 표현된다.[1] 그림 1에는 1선지락, 2선지락, 선간단락의 고장조건에 따른 전압 벡터도를 나타내었다.



(a) 1선 지락





(b) 2선 지락 (c) 선간 단락

그림 1. 고장 조건에 따른 전압 벡터도
Fig 1. Vector diagrams for voltage according to fault conditions

특고압 계통에서는 (a)에서와 같이 a상이 지락되었을

경우,

$$\dot{V}_a = 0$$
$$\dot{V}_b \fallingdotseq (a^2 - 1)\dot{E}_a = \sqrt{3}E_a \angle 210^\circ$$
$$\dot{V}_c \fallingdotseq (a - 1)\dot{E}_a = \sqrt{3}E_a \angle 150^\circ$$

이 되고, (b)와 같이 b상과 c상이 지락되었을 경우에는

$$\dot{V}_a \fallingdotseq \frac{3}{2}\dot{E}_a$$
$$\dot{V}_b = \dot{V}_c = 0$$

이 되며, (c)와 같이 b상과 c상이 선간단락 되었을 경우,

$$\dot{V}_a \fallingdotseq \dot{E}_a$$
$$\dot{V}_b = \dot{V}_c \fallingdotseq -\frac{1}{2}\dot{E}_a$$

이 된다.[2]

3. 실험계 구성 및 방법

실험에 사용한 피뢰기 소자는 정격전압과 공칭 방전전류가 각각 18[kV], 2.5[kA]인 배전용 피뢰기 소자로서 정격전압이 3[kV]인 ZnO 블록 바리스터를 사용하였다. 그림 2에 3상 4선식 배전계통의 모의 실험계를 나타내었다. 그림 3에 실험에 사용한 ZnO 블록 바리스터의 동작개시전압과 누설전류의 파형을 나타냈다. 동작개시전압은 5[kV] 정도이고 이때 흐르는 누설전류는 380[μA]이다.

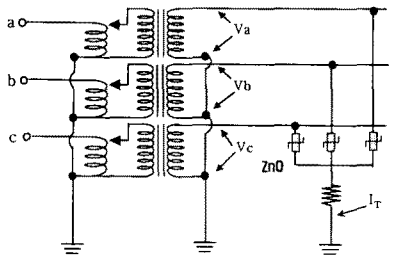
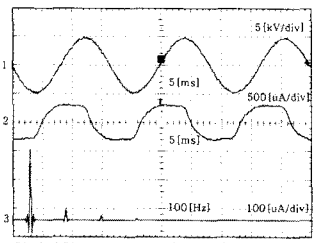


그림 2. 3상 4선식 배전계통 실험 구성도
Fig 2. Test circuit of three-phase four-wire distribution system



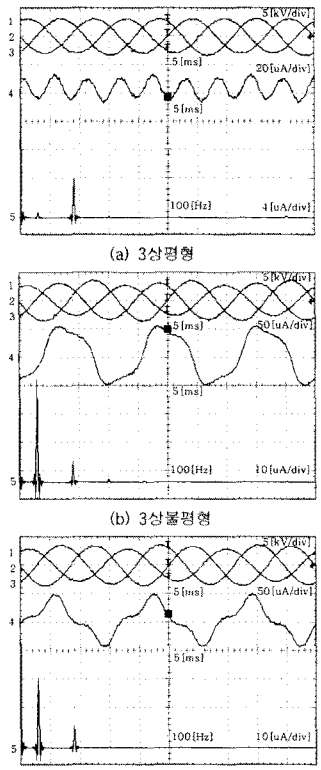
1 : 인가전압 2 : ZnO 블록 바리스터의 누설 전류
3 : 블록 바리스터 누설전류의 고속푸리에 변환
그림 3. ZnO 블록 바리스터의 동작 개시 전압
Fig 3. The nominal conduction voltage of ZnO block varistor

전압 변동률 실험에서는 인가 전압을 3[kV]를 기준으로 하여 +10%의 허용치에 대해서는 3.3[kV]를 인가하였고 -10%의 허용치에 대해서는 2.7[kV]를 인가하였다. 이때 각 상에 인가하는 전압의 위상차는 120° 를 유지하였다. 또한 1선 지락 실험에서는 지락된 a상에는 전압 0[kV]를 인가하였고 나머지 b와 c상에는 3[kV]의 $\sqrt{3}$ 배인 5.2[kV]의 전압을 각각 210° 와 150° 의 위상으로 60° 의 위상차를 갖도록 하였다. 2선 지락 실험에서는 지락된 b와 c상의 전압을 0[kV]로 하고 나머지 a상의 전압을 3[kV]의 1.5배인 4.5[kV]로 인가하였다. 선간 단락 실험에서는 단락된 b와 c상의 전압을 1.5[kV]로 인가하고 나머지 a상의 전압을 3[kV]로 인가하였다. 이때 단락된 b상과 c상의 전압은 단락되지 않은 a상의 전압과 180° 의 위상차를 유지하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 전압 변동률 실험

그림 4에 전압 변동률 실험에 대한 인가전압과 ZnO 블록 바리스터 누설 전류 파형을 나타냈다. (a)실험에서는 3상이 평형인 상태를 모의하기 위하여 각 상의 전압을 3[kV]로 동일하게 인가하였고, (b)실험에서는 3상이 모두 불평형인 상태를 모의하기 위하여 a상에 3.3[kV], b상에 3[kV], c상에 2.7[kV]를 각각 인가하였다. (c)실험에서는 한 상의 전압만이 불평형인 상태를 모의하기 위하여 a와 b상에 3.3[kV], c상에 2.7[kV]를 인가하였다.



(a) 3상평형

(b) 3상불평형

(c) 3상중 1상만 불평형

1 : a상의 인가전압 2 : b상의 인가전압
3 : c상의 인가전압 4 : ZnO 블록 바리스터 누설전류
5 : ZnO 블록 바리스터 누설전류의 고속푸리에 변환
그림 4. 전압 변동률에 따른 ZnO 블록 바리스터 누설전류 파형
Fig 4. The waveform of leakage current of ZnO block varistor according to voltage variation

(a)실험에서와 같이 3상이 평형이 되었을 때는 ZnO 블록 바리스터로 누설되는 전류의 대부분은 제 3고조파 성분임을 알 수 있다. (b)실험에서와 같이 3상이 모두 불평형일 경우에는 인가전압이 중첩이 되는 부분의 90° 뒤

쳐진 위상에서 누설전류 성분의 최대값이 나타났다. (c) 실험에서도 마찬가지로 인가전압이 중첩이 되는 부분의 90° 뒤쳐진 위상에서 누설전류 성분의 최대값이 나타났다. 그러나 전압 변동률에 따른 실험에서 각 상에 인가된 전압은 동작개시전압보다 낮은 전압이었기 때문에 측정된 누설 전류에서는 저항성분이 거의 나타나지 않았고 누설 전류의 크기도 80[㎂] 이하로 동작개시전압에서의 누설전류보다도 상당히 작은 값들이었다.

그림 5에는 고속 푸리에 변환을 이용하여 누설전류의 주파수에 따른 분포를 나타냈다. 3상이 평형일 경우에 누설전류의 대부분이 제 3고조파 성분으로 이루어져 나머지 고조파 성분은 거의 나타나지 않았지만, 전압 변동에 의해서 3상이 불평형을 이루면서 점차 제 1고조파 성분이 늘어났고 누설전류의 상당 부분을 차지하는 것을 알 수 있다.

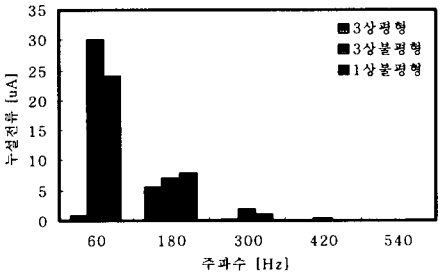


그림 5. 전압 변동에 따른 누설전류의 주파수 분포

Fig 5. The frequency distribution of leakage current according to voltage variation

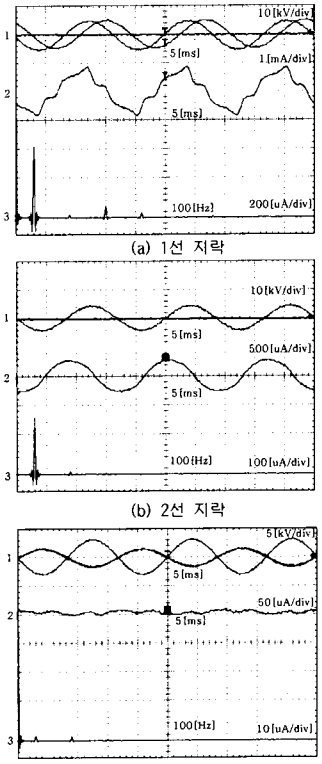
4.2 고장조건에 따른 실험

(a)의 1선 지락 실험에서는 a상이 지락된 상황을 모의하기 위해 a상에는 0[kV], b와 c상에는 각각 5.2[kV]를 인가하였다. 이때 b상과 c상의 위상은 각각 210° 와 150° 로 60° 의 위상차를 갖도록 인가하였다. (b)의 2선 지락 실험에서는 b상과 c상이 지락된 상황을 모의하기 위하여 b상과 c상에는 각각 0[kV], a상에는 4.5[kV]를 인가하였다. (c)의 선간 단락 실험에서는 b상과 c상이 단락된 상황을 모의하기 위하여 b상과 c상에는 1.5[kV], a상에는 3[kV]를 인가하였다. 이때 b상과 c상의 전압은 a상과 180° 의 위상차를 갖는다. 그림 6에 각각의 고장 조건에 따른 인가전압과 ZnO 블록 바리스터누설 전류의 파형을 나타내었다.

(a)실험 동안 b상과 c상에는 동작개시전압(5[kV])보다 큰 전압이 인가되었기 때문에 누설 전류에는 상대적으로 저항분 전류가 많이 포함되어 있다는 것을 알 수 있다. 누설 전류의 최대 값은 인가전압이 중첩된 부근에서 900[㎂] 정도의 최대 값을 갖는다. 이는 3상이 평형일 경우와 또는 나머지 사고에서의 값보다 상당히 큰 값이다. 또한 고속 푸리에 변환에서 볼 수 있듯이 누설전류에는 제 3고조파 성분이 거의 포함되지 않았다.

(b)실험 동안 a상에 인가한 전압이 동작개시전압 근처의 전압이었기 때문에 저항분 누설전류가 점차 나타나지만 그 크기는 용량분 전류보다 미약하기 때문에 대부분의 누설전류는 용량분 전류임을 알 수 있다. 누설 전류의 크기는 340[㎂]정도로 1선지락의 누설전류 보다는 작은 값을 가졌다.

(c)실험 동안에는 인가전압이 최대 값을 갖는 부분에서 위상이 180° 차이가 나기 때문에 전압이 서로 상쇄되어 누설전류는 거의 흐르지 않음을 알 수 있다.



1 : 각상의 인가전압 2 : ZnO 블록 바리스터 누설전류

3 : ZnO 블록 바리스터 누설전류의 고속푸리에 변환

그림 6. 고장 조건에 따른 ZnO 블록 바리스터 누설전류의 파형

Fig 6. The waveform of leakage current of ZnO block varistor according to fault conditions

그림 7 는 고장 조건에 따른 누설전류의 주파수 분포를 나타냈다. 3상이 평형일 경우와 비교하여 1선 지락, 2선 지락, 선간단락의 경우 고조파 성분 모두 상승한 것을 알 수 있다. 또한 특이할 만한 점은 1선 지락의 경우 제 3고조파 성분이 거의 나타나지 않았고 누설전류의 대부분이 제 3고조파를 제외한 나머지 고조파들로 이루어졌다는 점이다.

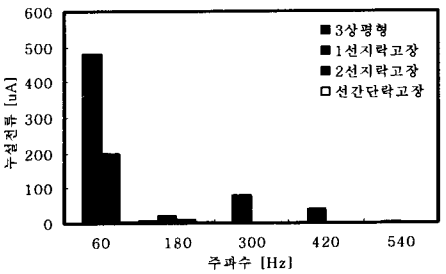


그림 7. 고장 조건에 따른 누설전류의 주파수 분포

Fig 7. The frequency distribution of leakage current according to fault conditions

표 1에 이상의 실험 결과를 정리하였다. 3상이 평형일 때를 기준으로 하여 고장조건에 따른 인가전압의 크기와 위상, ZnO 블록 바리스터 누설전류의 크기를 나타내었다.

표 1. 고장조건에 따른 각 상의 인가전압과 ZnO 블록 바리스터의 누설전류 비교

Table 1. Applied voltage to each phase and the comparison of leakage current of ZnO block varistor according to fault conditions

	3상평형	1선지락	2선지락	선간단락
$\dot{V}a$[kV]	$3\angle 0^\circ$	$0\angle 0^\circ$	$4.5\angle 0^\circ$	$3\angle 0^\circ$
$\dot{V}b$[kV]	$3\angle 120^\circ$	$5.2\angle 210^\circ$	$0\angle 120^\circ$	$1.5\angle 180^\circ$
$\dot{V}c$[kV]	$3\angle 240^\circ$	$5.2\angle 150^\circ$	$0\angle 240^\circ$	$1.5\angle 180^\circ$
I_T [μA]	42	900	340	18
상대율	1	21.43	8.1	0.43

ZnO 블록 바리스터로 누설되는 전류는 3상이 평형일 때를 1로 하였을 때 1선지락의 경우 그 크기가 21.43이 되어 1선지락, 2선지락, 선간단락의 고장 중에서 가장 큰 값임을 알 수 있다. 이는 ZnO 블록 바리스터의 동작개시 전압보다 큰 전압이 인가되어 전압이 중첩되는 부분에서 저항분 누설 전류가 크게 나타났기 때문이다. 2선지락의 경우도 누설전류의 크기가 8.1가 되어 많은 누설전류가 흘렀으며 선간단락의 경우에는 누설전류가 거의 흐르지 않았다.

5. 결 론

3상 4선식 배전계통의 전압 변동률에 의한 누설전류의 변화와 1선 지락, 2선 지락, 선간 단락의 고장조건에 따른 누설전류의 특성에 대한 연구를 수행한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 3상의 전압이 평형을 이루었을 경우 누설전류는 제3고조파 성분으로만 이루어졌다. 또한 전압변동률의 허용치인 ±10%에 대한 전압 변동은 누설전류의 성분 중에서 제 1고조파 성분을 증가시켰지만 누설전류의 최대값에는 거의 영향을 미치지 않았다.

(2) 3상 4선식 배전계통의 1선 지락 고장시 누설되는 전류는 제 3고조파 성분을 거의 포함하지 않았지만 최대 값은 3상이 평형일 때와 비교하여 약 21.43배 정도로 상당히 큰 값을 가졌다.

(3) 3상 4선식 배전계통의 2선지락 고장시 누설되는 전류의 크기는 3상이 평형일 때와 비교하여 약 8.1배 정도로 많이 흘렀다.

(4) 선간단락 고장시에는 누설 전류가 거의 흐르지 않았다.

3상 4선식 배전계통의 1선지락, 2선지락, 선간단락의 고장 중에서는 1선지락 경우가 각 상에 전압이 가장 크게 인가되어 ZnO 블록 바리스터에 가장 많은 누설 전류를 발생시켰다. 따라서 1선지락의 경우가 배전용 피뢰기에 가장 가혹하게 작용한다는 것을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] 이복희, "電力傳送工學", 普成文化社, pp.138~140, 2001.2.

[2] 新田目. 倖造 原著, "電力系統技術計算 応用", 圖書出版 義僖, pp134~152, 2000.1.