

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, 역상분 전압을 다음 식 (2)로 하고,

$$\dot{V}_{a0} = \dot{V}_0, \dot{V}_{a1} = \dot{V}_1, \dot{V}_{a2} = \dot{V}_2 \quad (2)$$

$a = \exp(j\frac{2\pi}{3}) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$, $a^2 = \exp(j\frac{4\pi}{3}) = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ 의 연산자를 사용하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \\ \dot{V}_b &= \dot{V}_0 + a^2 \dot{V}_1 + a \dot{V}_2 \\ \dot{V}_c &= \dot{V}_0 + a \dot{V}_1 + a^2 \dot{V}_2 \end{aligned} \quad (3)$$

이때 a상에 유기되는 전압을 \dot{E}_a 라고 하고, 3상이 평형을 이루었을 때 각 상의 전압은 식(4)와 같이 표현된다.

$$\dot{V}_a = \dot{E}_a, \dot{V}_b = a^2 \dot{E}_a, \dot{V}_c = a \dot{E}_a \quad (4)$$

1선지락, 2선지락, 선간단락의 고장조건에 따른 전압 벡터도를 그림 1에 나타내었다.[2-3]

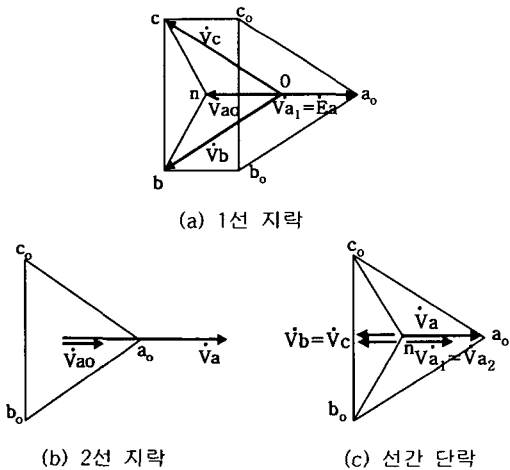


그림 1. 고장 조건에 따른 전압 벡터도
Fig. 1. Voltage vector diagrams according to fault conditions.

그림 1(a)와 같이 1선 지락 사고시 a상 지락을 가정하면 식 (5)과 같고,

$$\dot{V}_a = 0$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_b &= (a^2 - 1)\dot{E}_a = \sqrt{3}E_a \angle 210^\circ \\ \dot{V}_c &= (a - 1)\dot{E}_a = \sqrt{3}E_a \angle 150^\circ \end{aligned} \quad (5)$$

그림 1(b)와 같은 2선 지락시 b상과 c상의 지락을 가정하면 식 (6)과 같이 되며,

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= \frac{3}{2}\dot{E}_a \\ \dot{V}_b &= \dot{V}_c = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

그림 1(c)와 같이 b상과 c상이 선간단락 되었을 경우 다음 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= \dot{E}_a \\ \dot{V}_b &= \dot{V}_c = -\frac{1}{2}\dot{E}_a \end{aligned} \quad (7)$$

2.2. 실험계 구성 및 방법

정격전압과 공칭 방전전류가 각각 6 kV, 2.5 kA 인 배전용 피뢰기 소자를 사용하여 3상 배전계통에서 발생할 수 있는 고장조건과 전압불평형이 피뢰기의 누설전류에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험측정계를 그림 2와 같이 구성하였다. 각 고장조건과 전압불평형 조건에 따른 각상의 전압을 독립적으로 측정하였고 동시에 단일의 접지선을 통해 3상의 피뢰기를 일괄접지했을 때 접지선을 통해 흐르는 전류를 측정하였다.

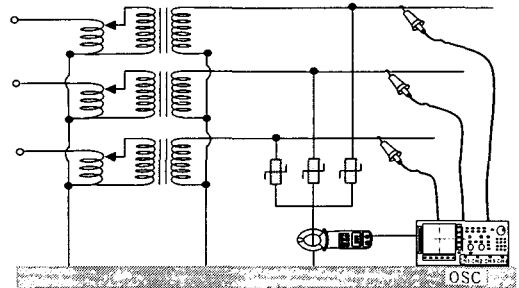


그림 2. 3상 배전계통 실험 구성도.
Fig. 2. Test circuit of three-phase power distribution systems.

실 계통에서 피뢰기 소자에 가해지는 전압으로서 전압변동을 실험에서는 인가전압을 6.2 kV를 기준으로 하여 +10%의 허용치에 대해서는 6.8 kV를, -10%의 허용치에 대해서는 5.6 kV를 인가하였다. 이 때 각 상에 인가하는 전압의 위상차는 120°를 유지하였다. 또한 1선 지락 실험에서는 지락된 a 상에는 전압 0 kV, 나머지 b상과 c상에는 6.2 kV의 $\sqrt{3}$ 배인 10.8 kV의 전압을 각각 210°와 150°의 위

상으로 60°의 위상차를 갖도록 하였다. 2선 지락 실험에서는 지락된 b상과 c상의 전압을 0 kV로 하고 나머지 a상의 전압을 6.2 kV의 1.5배인 9.2 kV로 인가하였다. 선간 단락 실험에서는 단락된 b상과 c상의 전압을 3.2 kV, 나머지 a상의 전압을 6.2 kV로 인가하였다. 이 때 단락된 b상과 c상의 전압은 단락되지 않은 a상의 전압과 180°의 위상차를 유지하였다. 표 1에 실험조건에 따른 각 상의 인가전압을 나타내었다.

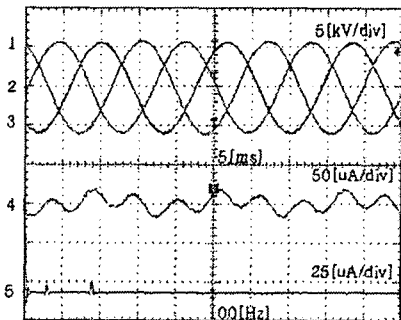
표 1. 실험조건에 따른 인가전압.
Table 1. Applied voltages according to test conditions.

	불평형 조건			고장 조건		
	3상 평형	3상 불평형	1상 불평형	1선지락	2선지락	선간단락
\bar{V}_a [kV]	6.2 $\angle 0^\circ$	5.6 $\angle 0^\circ$	5.6 $\angle 0^\circ$	0 $\angle 0^\circ$	9.2 $\angle 0^\circ$	6.2 $\angle 0^\circ$
\bar{V}_b [kV]	6.2 $\angle 120^\circ$	6.8 $\angle 120^\circ$	6.2 $\angle 120^\circ$	10.8 $\angle 210^\circ$	0 $\angle 120^\circ$	3.2 $\angle 180^\circ$
\bar{V}_c [kV]	6.2 $\angle 240^\circ$	6.2 $\angle 240^\circ$	6.2 $\angle 240^\circ$	10.8 $\angle 150^\circ$	0 $\angle 240^\circ$	3.2 $\angle 180^\circ$

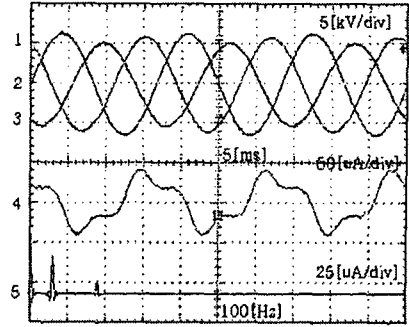
3. 결과 및 고찰

3.1. 전압불평형에 의한 누설전류

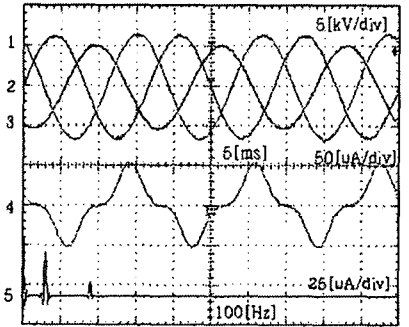
3상 불평형 전압이 피뢰기에 흐르는 누설전류에 미치는 영향을 평가하기 위해 3상 평형, 3상 불평형, 3상중 1상 불평형 조건에 따른 각 상의 전압과 합성누설전류 및 누설전류의 고조파 성분에 대한 주파수 분석 결과를 그림 3에 나타내었다.



(a) 3상평형



(b) 3상불평형



(c) 3상중 1상만 불평형

1 : a상 전압 2 : b상 전압 3 : c상 전압
4 : 누설전류 5 : 누설전류의 FFT

그림 3. 3상 불평형전압 의한 누설전류와 FFT 결과.
Fig. 3. Leakage current waveforms and their FFT results caused by unbalanced 3-phase voltages.

그림 3의 (a)에서와 같이 3상이 평형이 되었을 때 누설전류의 피크치는 수 십 μA 정도로 미소하게 흘렀으며, 주파수 분석결과 대부분 제 3고조파 성분으로 다른 주파수 성분은 거의 나타나지 않았다. 그림 3 (b)에서처럼 3상이 모두 불평형일 경우의 누설전류는 인가전압이 중첩이 되는 부분의 90° 뒤쳐진 위상에서 피크치를 나타내었으며 그 값은 약 50 μA 정도를 나타내었다. 그림 3 (c)의 3상중 1상만 불평형이 일어났을 때의 누설전류는 인가전압이 중첩이 되는 부분의 90° 뒤쳐진 위상에서 피크값을 나타내고 기본파의 성분이 가장 크게 나타났다. 이는 전압 변동률에 따른 누설전류의 변화는 각 상의 인가전압이 동작개시전압보다 낮기 때문에 측정된 누설 전류에서는 저항성 성분이 거의 나타나지 않았고 용량성 누설 전류의 크기도 80 μA 이하로 동작개시전압에서의 누설전류보다도 매우 작은 값들이었다.

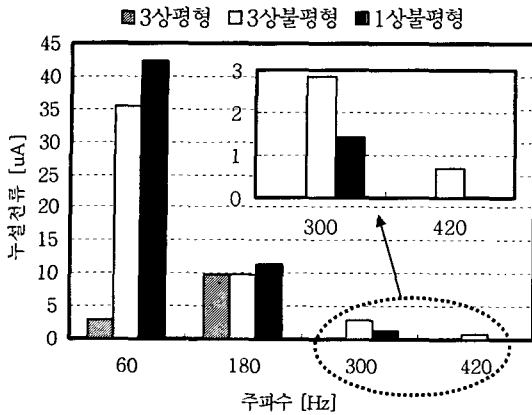
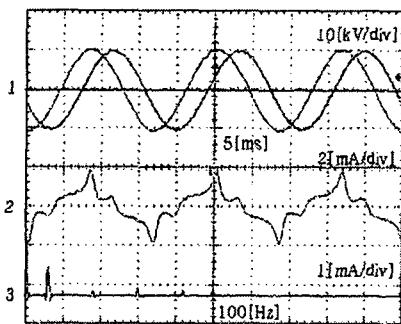


그림 4. 전압 변동에 따른 누설전류의 고조파 성분
Fig. 4. The harmonic components of leakage currents according to voltage variation

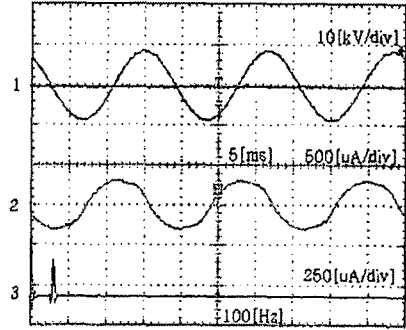
3상 불평형 전압에 의한 각 고조파분 누설전류의 분포를 그림 4에 나타내었다. 3상이 평형일 경우에 누설전류의 대부분이 제3고조파 성분으로 이루어져 나머지 기본파를 포함한 고조파 성분은 매우 작게 나타났지만, 전압 변동에 의해서 3상이 불평형을 이루면서 점차 기본파 성분이 크게 나타났고 누설전류의 주를 이루는 것을 알 수 있다.

3.2. 고장조건에 따른 누설전류

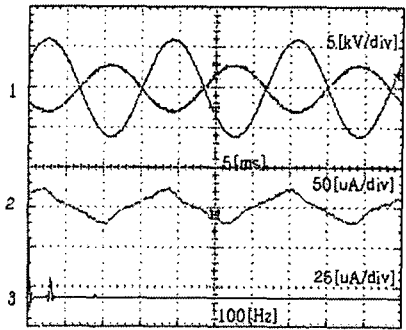
3상 4선식 배전계통에서 발생할 수 고장조건이 피뢰기 누설전류에 미치는 영향을 평가하기 위해 1선 지락, 2선 지락, 선간단락의 조건을 표 1과 같이 각 상에 전압을 인가하고 산화아연 피뢰기의 소자에 흐르는 누설전류와 누설전류의 고조파 성분을 분석한 결과를 그림 5에 나타내었다.



(a) 1선 지락



(b) 2선 지락



(c) 선간 단락

1 : 각상의 전압 2 : 누설전류 3 : 누설전류의 FFT

그림 5. 고장 조건에 따른 ZnO 소자에 흐르는 누설전류의 파형

Fig. 5. The waveform of leakage current flowing through ZnO elements according to fault conditions

그림 5 (a)의 1선 지락 조건에서 b상과 c상에는 동작개시전압(10 kV)보다 큰 전압이 인가되기 때문에 누설전류의 피크치는 약 1.7 mA 정도로 매우 크게 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이의 고조파 성분을 분석한 결과 기본파 성분이 주를 이루고 3고조파 성분이 매우 작게 나타났다. 그림 5 (b)의 2선 지락조건에서 a상에 인가한 전압이 동작개시전압 근처의 전압이므로 저항성 누설전류가 점차 나타나지만 대부분은 용량성 전류임을 알 수 있다. 누설전류의 크기는 약 300 μ A 정도로 1선 지락의 누설전류 보다는 작은 값을 가졌다. 그림 5 (c)의 선간 단락 고장에서 인가전압의 최대값을 부근에서 위상이 180° 차이가 나기 때문에 전압이 서로 상쇄되어 누설전류는 거의 흐르지 않음을 알 수 있다.

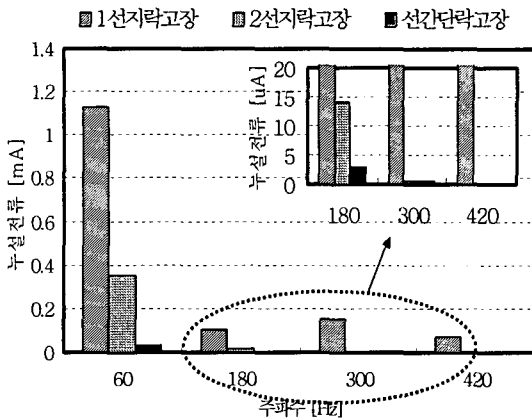


그림 6. 고장 조건별 누설전류의 고조파 분포.
Fig. 6. Distributions of harmonic components of the leakage currents by unsymmetrical faults.

그림 6은 고장 조건에 따른 누설전류의 고조파 성분의 분포를 나타냈다. 모든 고장조건에 있어서 누설전류의 분포는 기본파 전류가 가장 크게 나타났고 고조파 성분은 상대적으로 작게 나타났다. 그리고 1선 지락고장 조건에서의 각 주파수 성분의 누설전류의 크기가 다른 고장조건에 비해 크게 분포하는 것을 알 수 있다.

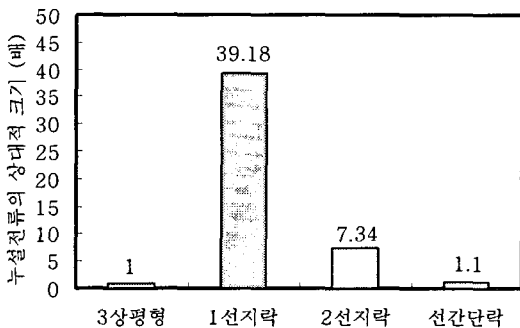


그림 7. 고장 조건별 누설전류의 비교
Fig. 7. Comparison of leakage currents by unsymmetrical faults.

그림 7에 3상이 평형일 때를 기준으로 하여 고장조건에 따른 누설전류의 크기를 비교하여 나타내었다. 3상 평형일 때의 누설전류를 1로 하였을 때 1선 지락의 경우 그 크기가 39.18배로 다른 고장조건에 비해서 가장 큰 값을 알 수 있다. 이는 1선 지락고장시 건전상에 나타나는 전압이 피뢰기의 동작개시전압보다 큰 전압이 가해지므로 전압이 중첩되는 부분에서 저항성 누설전류가 크게 나타났기 때문이다. 2선 지락의 경우도 누설전류의

크기가 7.34배가 되어 많은 누설전류가 흘렀으며, 선간 단락의 경우에는 오히려 3상 평형 상태보다 작게 흘렀다.

즉, 3상의 전압이 평형을 이루었을 경우 누설전류는 3고조파 성분으로만 이루어졌으며, 전압변동률의 허용범위 $\pm 10\%$ 내의 전압변동은 누설전류의 크기에 거의 영향을 미치지 않았다. 1선 지락 고장시 누설전류의 최대값은 3상이 평형일 때와 비교하여 약 39.18배 정도로 매우 큰 값을 나타내었으며, 선간 단락 고장시에는 누설전류가 거의 흐르지 않았다. 따라서 3상 배전계통에서 발생할 수 있는 여러 가지 고장조건 중에서 1선 지락고장에 건전상에 나타나는 전압이 배전용 피뢰기의 동작개시 전압보다 크게 되므로 피뢰기의 누설전류가 과다하게 흐르는 가혹한 조건이 된다. 특히, 1선 지락 고장의 지속시간이 수 초 이상 지속될 경우 피뢰기 소자의 발열을 야기하여 심각한 손상을 초래할 수 있으므로 신속한 고장의 검출을 통한 정상상태로의 회복이 이루어져야 한다.

4. 결 론

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

(1) 3상의 전압이 평형을 이루었을 경우 누설전류는 주로 제3고조파 성분이었으며, 전압변동률의 허용치인 $\pm 10\%$ 에 대한 전압 변동은 누설전류의 크기에 거의 영향을 미치지 않았다.

(2) 1선 지락 고장시 피뢰기 누설전류의 최대값은 3상이 평형일 때와 비교하여 약 39배 정도로 매우 큰 값으로 2선 지락이나 선간 단락 고장보다도 피뢰기에 가혹한 상태로 피뢰기의 열화에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축 지원사업의 지원에 의하여 수행된 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 이복희, 강성만, 유인선, "배전피뢰기용 접지도선의 효과적인 설치기법", 전기학회 논문지, Vol.51C, No.6, pp.253~259, 2002.
- [2] 이복희, "電力傳送工學", 普成文化社, pp.138~140, 2001.2.
- [3] 新田目. 倭造 原著, "電力系統技術計算 応用", 圖書出版 義 價, pp134~152, 2000.1.