

3상 4선식 저압 수용가의 전압 불평형률 측정 분석

(The Measurement & Analysis of Voltage Unbalance Factor at LV Customer of Three-Phase Four-Wire System)

김중겸* · 박영진

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park)

요 약

대부분의 저압 수용가는 단상 및 3상 부하를 동시에 공급할 수 있는 장점을 지닌 3상 4선식 배전시스템을 적용하고 있다. 이 시스템은 구조적인 간단함 때문에 종래의 단상 및 3상 부하를 분리하는 방식보다 편리하다. 그러나 고르지 못한 부하 불평형이나 낮은 전기품질은 출력저하나 손실과 같은 문제를 발생하고 있다. 본 논문에서는 실제 현장에서 전압 및 전류 파형을 측정하여 국제적으로 허용되고 있는 전압불평형 기준과 비교 분석을 실시하였다.

Abstract

Most of LV customer have applied the 3-phase four wire system distribution system because it has advantage of supplying both of 1-phase & 3-phase loads simultaneously. Due to its structural simplicity, it is more convenient for use rather than the conventional separated scheme. But, once in a while, uneven load unbalance or unclean power quality lead some problems such as de-rating or power losses. In this paper, voltage and current waveform in the actual fields have been measured and analyzed in relation with internationally allowable voltage unbalance limits.

Key Words : Voltage unbalance, Power quality

1. 서 론

저압 수용가의 단상 및 3상 부하 운전을 위해 3상 208[V], 단상 120[V]의 3상 4선식 방식을 사용할 경우도 있었지만 동력부하용 208[V]는 전압이 낮아 여러 가지 문제점을 안고 있어 지금은 대부분의 현장

에서 380/220[V] 배전방식을 채택하고 있다. 이 방식에서 동력은 380[V]로 전동 및 전열부하는 220[V]로 2대의 독립된 변압기를 사용하면 좋지만, 경제적인 문제와 공간문제로 대부분의 경우 한 대의 변압기를 이용하여 같은 간선에 공용으로 사용하기 때문에 전압 불평형을 발생시킬 수 있다[1-5].

부하에 안정적인 전원공급을 위해 전동·전열 및 동력용 부하를 분리 전원 공급할 수 있는 변압기 구성방식이 적합하지만, 국내에서는 단상 및 3상 부하에 동시에 전력을 공급할 수 있는 3상 4선식 배전 시

* 주저자 : 원주대학 전기과 부교수
Tel : 033-760-8423, Fax : 033-760-8420
E-mail : jgkim@wonju.ac.kr
접수일자 : 2004년 6월 19일
1차심사 : 2004년 6월 30일
심사완료 : 2004년 7월 31일

3상 4선식 저압 수용가의 전압 불평형을 측정 분석

시스템을 많이 적용하고 있다. 이 방식의 경우 각 상의 전압불평형이 최소가 되도록 설계하지만 운전중 부하의 불평형에 의해 시스템에 여러 가지 문제를 발생하고 있다[1-3,6]. 낮은 전압불평형도 높은 전류불평형으로 이어져 기기의 손실증가 및 동작특성에 나쁜 영향을 미치고 있다[2,6,7]. 또한 중성선에 흐르는 전류의 경우 전압불평형률과 부하불평형 증가시 각 상에 흐르는 전류보다 높은 전류가 흘러 시스템에 여러 가지 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 전압불평형에 의한 영향을 최소화하기 위해 선진국의 경우 연구결과를 제시하고 있지만, 국내의 경우 단상 대용량 부하를 사용하는 교류 전기철도의 경우 다른 기기에 미치는 영향을 줄이기 위해 전압불평형률을 3[%]이하로 제한하고 있을 뿐이다[8].

전압불평형에 따른 영향을 줄이기 위해서는 전압 불평형률을 일으키는 원인과 그 크기에 대해서도 정확하게 이해해야 한다. 전압불평형률은 전압 크기뿐만 아니라 위상에 따라 달라지는데 실제 계산하는 방식은 여러 가지로 엔지니어가 쉽고, 정확하게 분석할 수 있는 방법의 제시가 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 3상 4선식으로 구성 운영되고 있는 수용가 설비에서 전압불평형률을 계산하는 방법에 대해 제안하고, 실제 현장에서 이용되고 있는 전원시스템에서 전압 및 전류 불평형에 대한 측정을 실시하여 국내외 규격과의 비교 분석을 실시하고자 한다.

2. 전압불평형

2.1 전압불평형의 정의 및 발생원인

전압불평형은 배전 시스템에서 발생할 수 있는 3상 회로의 불균일한 전압값으로서 전원측 및 부하측 시스템에서의 동작특성에 의해 주로 발생한다[2,6].

3상 4선식 배전시스템에서 한상 또는 여러 상의 부하가 다른 상과 다를 경우 전압불평형이 발생한다. 이는 주로 각 상의 부하의 형태와 값 또는 임피던스 차이 때문이다. 특히 전동기와 같은 유도성 부하기기 및 비선형부하에 심각한 문제를 발생시킨다 [1-3,6,9]. 결과적으로 발생하는 전류불평형은 시스템 전압 불평형뿐만 아니라 시스템 임피던스, 불평

형을 발생하는 부하의 성질 및 장비에서 동작하는 부하에 의해 생겨난다. 3상 회로에서 결상은 가장 가혹한 전압불평형 발생조건이다.

수용가는 설비 특성상 단상과 3상 부하의 사용비율이 각각 다르다. 일반 사무실의 경우 단상 부하가 3상 부하보다 많지만, 공장이나 전동력설비를 사용하는 곳에서는 3상 부하가 단상보다 사용 비율이 높다. 또한 사용하는 부하의 종류와 시간에 따라 전압 불평형의 크기도 변화한다. 3상 4선식을 전등·전열 및 동력용 부하에 사용하는 경우도 있지만 일부에서는 전등·전열에만 사용하는 경우도 있다. 이와 같은 경우 전압불평형이 상대적으로 높게 나타날 수 있다.

전압불평형은 3상 전압이 각각 크기가 같지 않거나, 서로 상 차이가 발생하여 120[°]를 유지하지 않을 경우 또는 둘 다 해당될 경우이다. 불평형률 계산 시 공식에 따라서 상전압과 선간전압을 각각 달리 표현하고 있다.

전압불평형률은 식 (1)과 같이 정상분(V_1)에 대해 역상분(V_2) 또는 영상분(V_0)의 비율로서 정의하고 있다. 역상분 전압은 대개 회로내 흐르는 불평형된 부하의 역상분 전류에 의해 주로 발생한다[1,2,6,7,9].

$$\begin{aligned} VUF_1 &= \frac{V_2}{V_1} \\ &= \frac{V_0}{V_1} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 V_1, V_2, V_0 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 V_{ca}}{3} \\ V_2 &= \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a V_{ca}}{3} \\ V_0 &= \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \end{aligned}$$

3상 불평형 선간전압 V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} 를 식 (1)과 같이 정상분 V_1 과 역상분 V_2 의 대칭성분으로 변환하면 불평형 조건하에서 유도전동기의 동작을 해석할 때 편리하지만[6,9], 3상 4선식 간선에서 중성점과 접지선을 공통으로 사용하지 않을 경우 영상분이

존재하므로 식 (1)은 3상 전압이 정확히 비대칭일 경우에는 적용이 어렵다.

순시 선간전압의 불평형률(VUF_2)은 식 (2)와 같다.

$$VUF_2 = \left| \frac{V_{ab} - a \cdot V_{bc}}{V_{ab} - a^2 \cdot V_{bc}} \right| \quad (2)$$

여기서 $a = 1 \angle 120[^\circ]$, $a^2 = 1 \angle 240[^\circ]$ 이다

그리고 식 (1) 과 식 (2)는 전압의 크기만 다르고 위상차가 없는 대칭의 경우에 적합하지만, 실제 전압은 크기뿐만 아니라 위상각에도 차이가 존재한다.

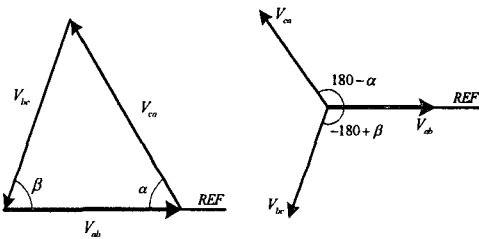


그림 1. 3상 불평형 시스템
Fig. 1. 3-phase Unbalance system

그림 1은 3상 비대칭 불평형 전압 시스템의 벡터도를 나타낸 것으로서 선간전압의 크기가 다를 경우 각 α 및 β 는 정확하게 $60[^\circ]$ 를 유지하지 않으므로 기준축(REF)에 대한 벡터 분해시 그림 1의 오른쪽과 같이 $120[^\circ]$ 위상차를 가지지 않는다.

그림 1의 경우 정상분 V_1 및 역상분 V_2 은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{3} \{ V_{ab} \angle 0^\circ + V_{bc} \angle (-60^\circ + \beta) + V_{ca} \angle (60^\circ - \alpha) \} \\ V_2 &= \frac{1}{3} \{ V_{ab} \angle 0^\circ + V_{bc} \angle (60^\circ + \beta) + V_{ca} \angle -(60^\circ + \alpha) \} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 각 α 및 β 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \cos^{-1} \left\{ \frac{V_{ca}^2 + V_{bc}^2 - V_{bc}^2}{2V_{ca}V_{ab}} \right\} \\ \beta &= \cos^{-1} \left\{ \frac{V_{bc}^2 + V_{ab}^2 - V_{ca}^2}{2V_{bc}V_{ab}} \right\} \end{aligned}$$

그림 1에서와 같이 선간전압의 크기가 다를 경우 해론의 공식을 이용하여 불평형률을 산출할 수 있다. 선간전압으로 이루어진 삼각형의 절반둘레를 s , 면적 K 및 등가 3상전압 실효값을 V_e 라고 할 경우 전압불평형률은 식 (4)와 같다.

$$VUF_3 = \sqrt{\frac{K_e - K}{K_e + K}} \quad (4)$$

여기서 K 및 K_e 는 각각 다음과 같다.

$$K = \sqrt{s(s - V_{ab})(s - V_{bc})(s - V_{ca})}$$

$$K_e = \frac{\sqrt{3}}{4} V_e^2$$

식 (1), (2)에서와 같이 각 선간전압은 크기만 다를 경우 불평형을 구하기가 쉽지만 위상이 비대칭일 경우 정확한 불평형을 구하기가 어렵고, 또한 식 (3)과 같이 선간전압의 크기에 따라 위상각을 분리하는 것이 쉽지 않다. 따라서 현장 측정시 선간 전압크기만을 고려해도 정확한 전압불평형률을 구할 수 있는 방법이 필요하다. 식 (5)는 각 선간전압과 평균선간전압과의 차이에서 최대분을 평균값으로 구하는 경우이다.

$$VUF_4 = \frac{\max\{|V_{ab} - V_{avg}|, |V_{bc} - V_{avg}|, |V_{ca} - V_{avg}|\}}{V_{avg}} \quad (5)$$

정상분 및 역상분 전압성분을 해석할 때 실제 정의는 크기와 각을 포함해야 하므로 계산상의 어려움을 피하기 위해 식 (6)과 같은 근사화된 공식을 사용하는 경우도 있다.

$$VUF_5 = \frac{82 \cdot \sqrt{V_{abe}^2 + V_{bce}^2 + V_{cae}^2}}{V_{avg}} \quad (6)$$

식 (5), (6)에서 V_{abe} , V_{bce} 와 V_{cae} 및 V_{avg} 는 각각 다음과 같다.

$$V_{abe} = |V_{ab}| - V_{avg}$$

$$V_{bce} = |V_{bc}| - V_{avg}$$

$$V_{cae} = |V_{ca}| - V_{avg}$$

3상 4선식 꺾임 수용가의 전압 불평형을 측정 분석

$$V_{avg} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3}$$

일정기간동안의 전압불평형률을 찾아내기 위해서는 선간전압의 크기만으로 계산이 가능한 식 (7)을 이용한다.

$$VUF_7 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\gamma}}{1 + \sqrt{3 - 6\gamma}}} \quad (7)$$

식 (7)에서 γ 는 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2}$$

3상 선간전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 를 측정하여 평균 값 V_s 를 구한다음 식 (8)과 같이 정상분 V_1 에 대한 역상분 전압 V_2 의 비율로 나타낼 수 있다.

$$V_1 = \sqrt{\frac{1}{6}(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + \frac{2}{\sqrt{3}}V_s(V_s - V_a)(V_s - V_b)(V_s - V_c)} \quad (8)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{1}{6}(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) - \frac{2}{\sqrt{3}}V_s(V_s - V_a)(V_s - V_b)(V_s - V_c)}$$

여기서 $V_s = \frac{1}{2}(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca})$ 이다.

Pierrat & Meyer씨가 제안한 방법의 경우 각 선간전압을 크기와 위상각으로 표현하면 식 (8)과 같다.

$$VUF_8 = \tau \cdot \exp(j\theta) \quad (9)$$

여기서 크기 τ 와 각 θ 는 다음과 같다.

$$\tau = \frac{A - \sqrt{3A^2 - 6B}}{\sqrt{6B - 2A^2}}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(V_{ab}^2 - V_{ca}^2)}{V_{ab}^2 + V_{ca}^2 - 2V_{bc}^2}$$

식 (1)~(9)까지는 각상 선간전압의 크기와 위상각 또는 크기만으로 불평형률을 구한 경우이지만, 단상 부하 및 상전압의 경우 불평형률도 비슷한 방법으로 구한다.

식 (10)은 식 (5)와 같은 방법이지만 선간전압 대신에 각 상전압을 평균전압차에서 최대값을 찾은 다음 평균값으로 나누어 구하는 방법이다.

$$PVUF_1 = \frac{\max(|V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}|)}{V_{avg}} \quad (10)$$

여기서 $V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$ 이다.

상전압불평형을 표현하는 가장 간단한 방법은 식 (10)과 같이 3상에서 전압편차를 측정하여 평균전압과 비교하는 것이다.

$$PVUF_2 = \frac{[V_{avg} - \max(V_a, V_b, V_c)]}{V_{avg}} \quad (11)$$

최근 많이 사용되고 있는 컴퓨터와 같은 단상부하 설비의 사용시 상전압 불평형률(PVU)은 식 (12)와 같이 최대전압과 최소전압차를 평균전압으로 나누어 나타낸다.

$$PVUF_3 = \frac{[V_{max} - V_{min}]}{V_{avg}} \quad (12)$$

식 (12)로 계산할 경우 일반적으로 허용되고 있는 전압불평형률보다는 다소 높게 나타날 수 있다.

개략적인 방법으로서는 식 (13)과 같이 부하의 피상 전력 S_L 과 전원회로의 단락전력 S_{sc} 으로 계산하는 방법으로서 대용량의 수전설비에서 적용되고 있다.

$$VUF \cong \frac{S_L}{S_{sc}} \quad (13)$$

3상 시스템에서 불평형된 부하는 역상분 전압(NPS ; Negative Phase Sequence)을 일으키는 전류를 발생한다. PCC(Point of Common Coupling)에서 NPS 전압의 크기는 나라에 따라 다르지만 3상 M-G에서 발생하는 증가된 열 때문에 전원공급회사들은 대개 1~2[%]의 범위내로 제한하고 있다. 대지전압을 기준으로 한 NPS는 식 (14)와 같고, 평형된 시스템에서 페이서의 합은 페루프 삼각형을 이루기 때문에 제로가 된다.

$$VUF_{NPS} = \frac{(V_a + a^2 V_b + a V_c)}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

2.2 전압 불평형을 비교 분석 및 허용범위

전압불평형률의 계산에서 상전압, 선간전압 그리고 전압의 크기와 위상각에 따라 대칭 및 비대칭으로 구분하여야 한다. 그러나 설계자나 엔지니어가 쉽게 이해할 수 있는 계산법의 제시가 매우 중요하다.

전압불평형률의 계산에서는 전압의 크기변화에 따른 대칭(sym), 위상각에 따른 비대칭(asym), 그리고 대칭 및 비대칭 모두(s-asym)를 고려한 계산이 이루어져야 하는데 표 2는 결과를 비교 분석하기 위한 조건들이고, 표 3은 계산결과를 비교한 것이다.

표 2. 전압 불평형률의 비교 조건표
Table 2. Comparison table of voltage unbalance ratio

구분	V_a	V_b	V_c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
balanced(a)	127 < 0°	127 < 240°	127 < 120°	219.97	219.97	219.97
1°-sym(b)	117 < 0°	127 < 240°	127 < 120°	211.369	219.97	211.369
2°-sym(c)	117 < 0°	122 < 240°	127 < 120°	206.905	215.655	211.369
3°-sym(d)	117 < 0°	121 < 240°	125 < 120°	206.124	213.052	209.616
1°-asym(e)	127 < 0°	127 < 240°	127 < 115°	219.97	225.301	214.221
2°-asym(f)	127 < 0°	127 < 238°	127 < 118°	222.153	219.97	217.72
s-asym1(g)	122 < 0°	125 < 241°	126 < 120°	212.828	218.46	214.784
s-asym2(h)	122 < 0°	129 < 239°	128 < 121°	218.486	220.293	217.609

표 3. 전압 불평형률의 비교 결과
Table 3. Comparison result of voltage unbalance ratio

구분	Unbalance ratio(%)													
	식(1)	식(2)	식(3)	식(4)	식(5)	식(6)	식(7)	식(8)	식(9)	식(10)	식(11)	식(12)	식(13)	식(14)
(a)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(b)	2.695	2.695	4.071	2.695	2.677	1.901	2.695	2.695	2.695	5.391	2.695	8.086	5.774	
(c)	2.366	2.366	3.549	2.366	2.056	2.92	2.366	2.366	2.366	4.098	4.098	8.197	5.0	
(d)	1.902	1.902	2.863	1.909	1.657	2.354	1.909	1.909	1.909	3.306	3.306	6.612	4.0	
(e)	2.91	2.91	4.367	2.91	2.552	0.09	2.91	2.91	2.91	0	0	0	6.397	
(f)	1.164	1.164	1.745	1.164	1.013	1.424	1.164	1.164	1.164	0	0	0	2.559	
(g)	1.536	1.536	2.309	1.536	1.441	1.668	1.536	1.536	1.536	1.887	1.34	3.217	3.308	
(h)	0.723	0.723	1.085	0.723	0.684	0.201	0.723	0.723	0.723	3.43	2.111	5.541	1.582	

표 3에서와 같이 3상 평형, 대칭 및 비대칭 3상 전압을 이용한 계산 결과에서 대칭 및 비대칭인 경우에 대해 식 (1), (2) 및 (4)에서와 같이 위상각만 고려한 계산값과 선간전압의 크기만을 이용하여 계산한 식 (7), (8) 및 (9)가 전압불평형률의 결과값이 잘 일치한다. 상전압만으로 산출하는 식 (10), (11), (12) 및 (14)의 경우 대칭시는 높은 값을 나타내지만, 비대칭시는 표현이 안되는 경우가 발생한다. 따라서 정확하고 가장 손쉽게 불평형률을 알 수 있는 방법의 접근이 필요한데 표 2에서와 같이 전압의 실효값으로 쉽게 불평형률을 알 수 있는 식 (7)이 가장 적합함을 알 수 있다.

표 4. 전압불평형률 허용범위
Table 4. Voltage unbalance rate allowable limits

관련규격	허용범위[%]	비고
전기설비 기술기준	3	교류전기철도 대상. T 및 V 결선 변전소 수전점
NEMA	1.0	at the motor terminals
IEC-3000-3-x, EN 50160	<2.0(LV,MV) <1 ([HV])	measured as 10-minute values, with instantaneous maximum of 4[%]
IEEE	0.5~2.0	steady state
ANSI	0~3	no-load conditions
EN50178	2	(V_j/V_1 비대칭)
AS1359	1.0	same as NEMA
일본전기 공업회	2.8	정상운전시, 장기간 수명보장을 위해서는 1[%]이하

표 4는 국내의 전압불평형률의 허용범위를 나타낸 것이지만, 상전압과 선간전압을 구분하지 않고 또한 측정시간과 측정지점에 따라 그 범위를 달리하고 있다[3,4,7,8,11-15].

3. 측정 및 결과분석

부하설비가 안정적으로 동작하기 위해서는 전압 불평형이 최소가 되어야 한다. 본 연구에서 전압 불평형률은 식 (7)로 계산한 결과이다.

전압불평형에 의한 영향을 최소화하기 위해 표 4

3상 4선식 저압 수용가의 전압 불평형을 측정 분석

와 같은 규격에서는 그 허용범위를 대개 0~3[%]범위 이내로 설정하고 있다.

전압 불평형률의 크기를 확인하기 위해 수용가를 대상으로 3상 4선식 분전반에서 전력분석기로 전압 및 전류 파형을 측정하였다. 측정에 사용된 전압 및 전류프로브는 600[V], 500[A]까지 가능한 것을 이용하였다. 측정시간은 각 장소에서 1초 간격으로 10분간 실시하였다.

그리고 그림 2는 저압 3상 4선식 수용가에서 측정한 순시치 결과들이다. 측정은 부하의 변동 분포를 전체적으로 확인 가능한 PCC에서 실시하였다.

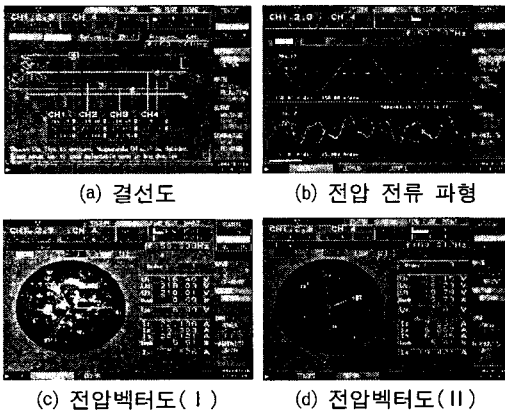


그림 2. 결선도, 측정파형 및 벡터도
Fig. 2. Connection diagram, Measurement Waveform & Vector diagram

그림 2의 (a)는 결선도와 선간 전압, 전류값을 나타낸 것으로서 중성선과 접지단자 사이에는 약 9[V] 정도의 전압이 나타나고 있다. 그림 2의 (b)는 전압·전류 파형을 나타낸 것으로서 전압 파형은 컴퓨터와 같은 비선형부하의 영향으로 플랫폼(flat-top)형상이고, 전류는 고조파성분이 포함된 왜형파이다. 그림 2의 (c)는 전압 및 전류의 기본파에 대한 벡터도를 나타낸 것으로서 전압의 경우 약간의 비대칭을 하고 있으며, 전류의 경우에는 중성선에 흐르는 전류값의 존재로 인해 비대칭의 크기가 전압파형에 비해 높다. 그림 2의 (c)에서 상전압은 I_3 에 흐르는 단상부하의 영향에 의해 U_3 상에 걸리는 전압이 다른 2상에 비해 낮아 0.69[%]의 전압불평형이 순간적으로 나타나고, 전류 불평형은 5.61[%]로서 3상 4선식의 부하불평형 허용

범위내이다. 전압불평형 및 비선형부하의 사용으로 3조파 성분이 상대적으로 매우 높다. 그림 2의 (d)는 3조파의 전압·전류벡터도로서 부하불평형에 의해 중성선에 흐르는 전류 I_4 는 기본파 전류값 보다 매우 높으며, 다른 상에 흐르는 전류값과 거의 차이가 없다.

국내 수용가는 대부분 단상 및 3상 부하에 동시에 전원공급이 가능한 3상 4선식 380/220[V] 배전 시스템을 채택하고 있다. 이와 같은 전원공급 설비에서 전압 불평형의 크기를 확인하기 위해 단상부하가 동력부하 비율보다 높은 경우와 동력부하가 단상부하보다 높은 경우에 대해 각각 비교 측정하였다.

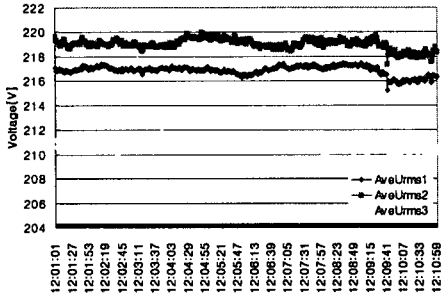
그림 3은 단상 부하의 사용이 동력부하보다 많은 수용가의 3상 4선식 배전방식에서의 대지전압 및 전류를 1초 간격으로 10분간 측정한 결과이다.

그림 3의 (a)에서 전압은 상전압 실효값으로 부하 전류의 영향으로 약간의 전압변동을 나타내고 있다. 그림 3의 (b)는 각상의 부하전류에 대한 변동을 나타낸 것으로서 시간에 따라 약간의 변화를 나타내고 있다. 그림 3의 (c)와 (d)는 그림 3의 (a)와 (b)에 대한 전압 및 전류에 대한 불평형률을 나타낸 것으로서 전압불평형은 국제 기준에서 정한 전압 허용오차 범위 이내임을 알 수 있다.

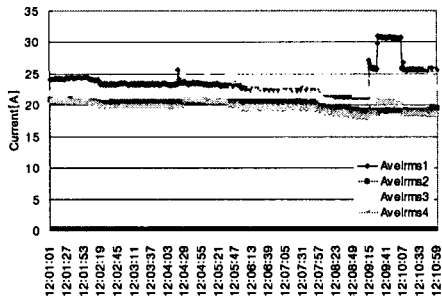
그림 4는 동력부하가 단상 전등 및 전열부하보다 많이 사용되는 수용가의 3상 4선식 배전방식에서의 대지전압 및 전류를 1초 간격으로 10분간 측정한 결과이다.

그림 4의 (a)에서 순간적으로 어느 한상에 걸리는 높은 비율의 단상 부하에 의해 전압은 상대적으로 낮아 그림 4의 (c)에서와 같이 전압불평형은 높게 나타나지만, 부하의 균등한 분배가 이루어질 경우 전압불평형은 낮아진다. 그림 4의 (b)는 전류파형으로서 상전류가 운전시 2배 정도의 차이가 나며 순간적인 변동이 크다. 따라서 전류불평형도 같은 형태를 가지고 있다.

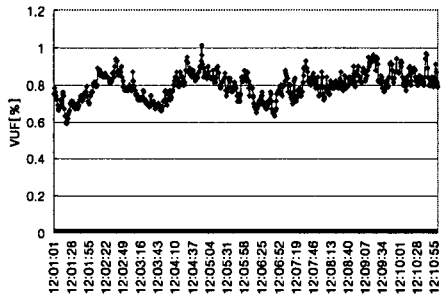
그림 5는 단상부하가 주류를 이루고 있는 3상 4선식에서의 중성선에 걸리는 전압을 고려한 선간전압 및 상전류의 측정결과이다. 그림 5의 (a)에서 약 10[V] 정도의 전압크기가 존재하며, 영상분 전압은 부하의 변동에 따라 변동이 크다. 그림 5의 (b)에서와 같이 부하변동이 갑자기 이루어질 경우 전류불평형은 상대적으로 허용범위를 초과할 수 있다.



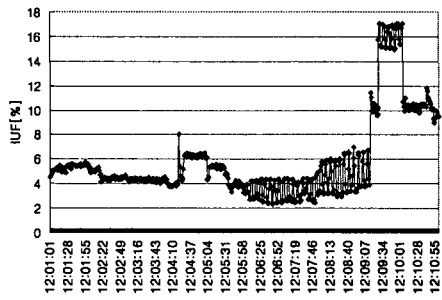
(a) 전압 파형



(b) 전류 파형



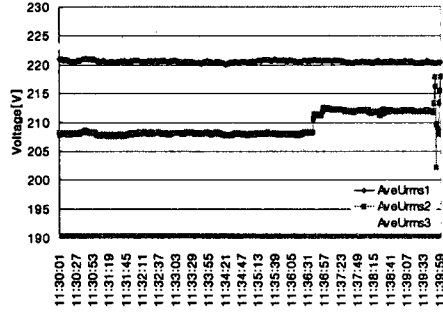
(c) 전압 불평형률 (VUF)



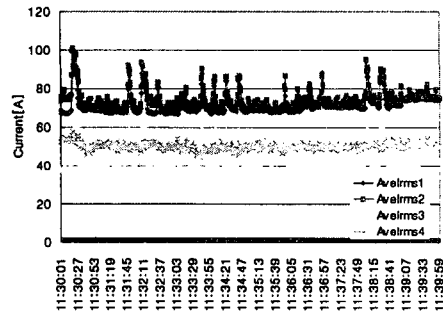
(d) 전류 불평형률 (IUF)

그림 3. 전압·전류파형 및 불평형률

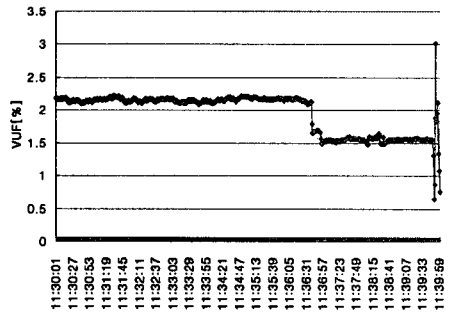
Fig. 3. Voltage · Current Waveform & Unbalance Factor



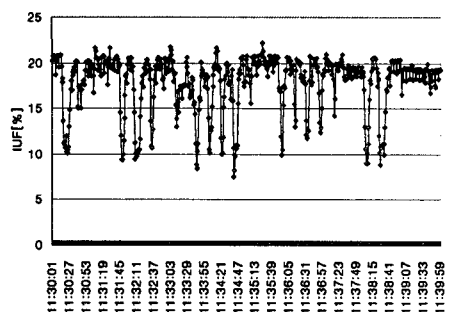
(a) 전압 파형



(b) 전류 파형



(c) 전압 불평형률 (VUF)



(d) 전류 불평형률 (IUF)

그림 4. 전압·전류 파형 및 불평형률

Fig. 4. Voltage · Current Waveform & UF

3상 4선식 저압 수용가의 전압 불평형을 측정 분석

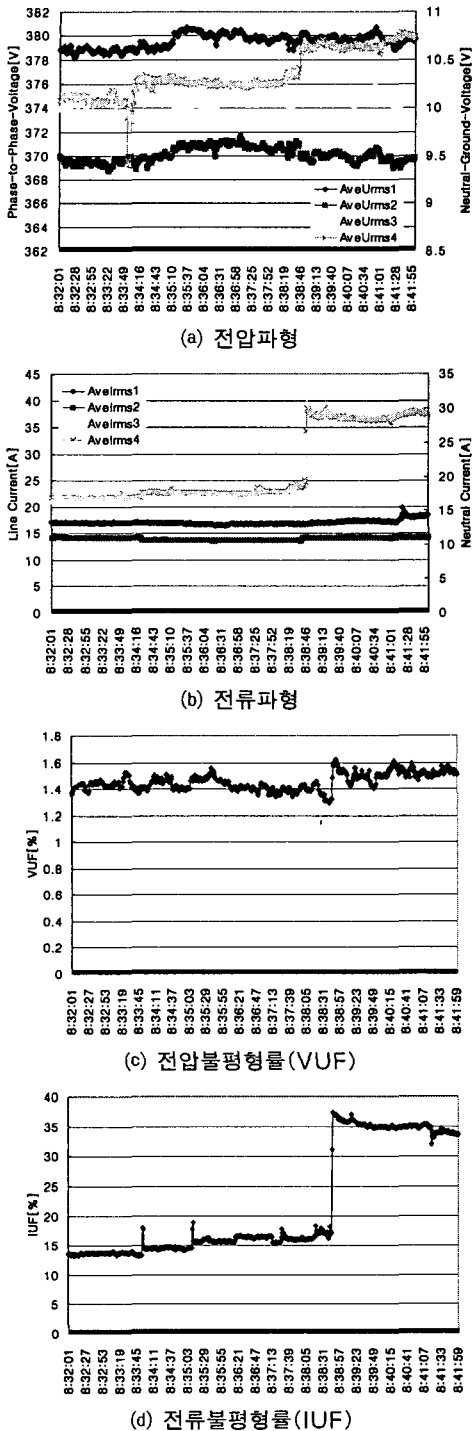


그림 5. 전압·전류 파형 및 불평형률
Fig. 5. Voltage · Current Waveform & UF

4. 결론

전압품질은 대부분 전압에 관련되어 있다. 전압품질에 문제가 발생할 경우 시스템에 미치는 영향은 매우 크다. 대부분의 경우 부하에 인가되는 전압은 대칭을 전제로 해석을 하고 있지만 실제 완전하게 평형된 전압이 인가되는 경우가 없기 때문에 전압불평형률을 고려한 해석이 필요하다.

본 연구에서는 전압불평형에 대한 계산식의 비교와 함께 쉽게 산출할 수 있는 여러 가지 방법을 비교 분석하였다. 그리고 저압 수용가에 단상 및 동력부하를 함께 사용할 수 있는 3상 4선식 전원공급시스템에서 불평형에 대한 측정을 실시하였다.

부하가 각 상에서 일정하게 사용될 경우 전압 및 전류불평형은 큰 변동이 없지만, 단상부하의 갑작스런 사용증가는 전류 및 전압불평형의 비율을 매우 높임을 확인할 수 있었다. 전압불평형의 경우 기준에 따른 허용범위의 최대값에는 들어가나, 정밀한 제어를 위한 범위에는 포함되지 않는 경우도 발생함을 확인하였다. 또한 3상 4선식에서 중성선과 접지선을 공용으로 사용하지 않을 경우 3상 불평형에 의해 전압이 나타남을 확인하였다. 향후 본 연구결과는 선형 및 비선형부하에 미치는 영향에 이용할 계획이다.

본 연구는 2003년도 산업자원부 및 한국전력공사의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- (1) J. Schlabbach, et al, "Voltage Quality in Electrical Power Systems", IEE, 2003.
- (2) 김중겸, 이은용, "불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, pp. 285-291, 2002. 6.
- (3) 일본전기학회기술보고서, 제 581호, "공장·빌딩에 있어 전원품질확보의 現狀과 對策", 1996.
- (4) IEC 61000-2-4, "Environment-Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances".
- (5) IEEE Std 141-1993, "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants".
- (6) 김중겸, 박영진, 정중호, 이은용, "불평형 전압 운전시

- 유도전동기의 동작특성 해석”, 대한전기학회 논문지(B), 제53권, 6호, pp.372-379, 2004. 6.
- [7] IEEE std 1159-1995, “IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality”.
 - [8] 전기설비기술기준 제 291조(전압불평형에 의한 장애방지).
 - [9] NEMA MG-1-2003, “Motors and Generators”.
 - [10] Australian standard AS1359.31-1986, “Rotating Electrical Machines-General Requirements”, 1986.
 - [11] ANSI C84.1-1995, “Interconnection for Parallel Operation of Customer Generation Guidelines”.
 - [12] European standard EN 50160, “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems”, CENELEC, November 1994.
 - [13] IEEE Std 446-1995, “IEEE Recommended Practice for Emergency & Standby Power Systems for Industrial & Commercial Applications, 446-1995”.
 - [14] IEC 61000-2-2, “Environment-Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems”.
 - [15] IEEE Std 241-1990, “Electric Power Systems in Commercial Buildings”.

◇ 저자소개 ◇

김종겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대 공대 전기공학과 졸업(공학). 1987~1988년 한국통신공사 근무. 1988~1996년 한국수자원공사 근무. 1996년~현재 국립원주대학 전기과 부교수. 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문 편집위원 및 전문대학교육위원회 편집부위원장.
Tel : 033-760-8423, email : jgkim@wonju.ac.kr

박영진 (朴永鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~현재 국립 원주대학 전기과 부교수.
Tel : 033-760-8424, email : popspark@wonju.ac.kr