

3상 4선식 저압 수용가의 전압 불평형을 측정분석

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

김종겸* · 박영진* · 이은웅**

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jin Park · Eun-Woong Lcc)

Abstract

Most of LV customer has been composed the 3-phase four wire system distribution system which is supplying simultaneously at the 1-phase & 3-phase load. In this system, the composition of the power apparatus system is simple rather than conventional separation mode of the 1-phase & 3-phase, But due to uneven load unbalance or unclean power quality, various kinds such as de-rating or power losses become an issue. In this paper, we measured and analyzed voltage and current waveform in the field, compared with internationally allowable voltage unbalance limits.

1. 서 론

부하에 전원을 공급하는 방식은 단상과 3상으로 구분할 수 있다. 부하에 따라 다르지만 소용량의 부하는 주로 단상, 동력용 부하는 대개 3상 전원을 사용한다.

부하에 안정적인 전원공급을 위해 전동·전열 및 동력용 부하를 분리하여 전원을 공급할 수 있는 변압기 구성방식이 적합하지만, 국내에서는 단상 및 3상 부하에 동시에 전력을 공급할 수 있는 3상 4선식 배전 시스템을 주로 많이 적용하고 있다. 이 방식의 경우 각 상의 전압불평형이 최소가 되도록 설계하지만 운전중 부하의 불평형에 의해 시스템에 여러 가지 문제를 발생하고 있다. 약간의 전압불평형에서도 높은 전류불평형으로 이어져 기기의 손실증가 및 동작특성에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 3상 4선식으로 구성 운영되고 있는 수용가 설비에서 전압 및 전류 불평형에 대한 측정을 실시하고 국내의 규격과의 비교 분석을 실시하고자 한다.

2. 전압불평형

2.1. 전압불평형의 정의 및 발생원인

전압불평형의 발생은 3상 전원에 단상부하의 불균형 배분과 불평형 3상 부하 임피던스에 의해 주로 발생한다.

수용가는 설비 특성상 단상과 3상 부하의 사용비율이 각각 다르다. 일반 사무실의 경우 단상 부하가 3상 부하보다 많지만, 공장이나 전동력설비를 사용하는 곳에

서는 3상 부하가 단상보다 사용 비율이 높다. 또한 사용하는 부하의 종류와 시간에 따라 전압불평형의 크기도 변화한다. 3상 4선식을 전동·전열 및 동력용 부하에 사용하는 경우도 있지만 일부에서는 전동·전열에만 사용하는 경우도 있다. 이와 같은 경우 전압불평형이 상대적으로 높게 나타날 수 있다.

전압불평형은 3상 전압이 각자 크기가 같지 않거나, 서로 상 차이가 발생하여 120도를 유지하지 않을 경우 또는 둘 다 해당될 경우이다.

전압불평형을 표현하는 가장 간단한 방법은 3상에서 전압편차를 측정하여 평균전압과 비교하는 것이다.

$$PVU = \frac{3[V_{avg} - \text{Max}(V_{ab}, V_{bc}, V_{ca})]}{V_a + V_b + V_c} \quad (1)$$

최근 많이 사용되고 있는 컴퓨터와 같은 설비의 사용시 전압불평형율(PVU)은 다음과 같다.

$$PVU = \frac{3[V_{max} - V_{min}]}{V_a + V_b + V_c} \quad (2)$$

식 (2)에서는 일반적으로 허용되고 있는 전압불평형율보다 다소 높은 2.5~5.0[%]범위이다.

전압불평형율은 식 (3)과 같이 정상분(V_1)에 대해 역상분(V_2) 또는 영상분(V_o)의 비율로서 정의하고 있다. 역상분 전압은 회로내 흐르는 불평형된 부하의 역상분 전류에 의해 주로 발생한다[1-3].

$$\begin{aligned} VUF &= \frac{V_2}{V_1} \\ &= \frac{V_o}{V_1} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)은 전압의 위상을 고려한 해석이기 때문에 일정 기간동안의 전압불평형율을 찾아내기 위해서는 선간전압의 크기만으로 계산이 가능한 식 (4)와 같은 관계식을 이용한다.

$$LVUR = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} \quad (4)$$

식 (4)에서 β 는 식 (5)로 계산한 것이다.

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (5)$$

순시 선간전압의 불평형율 ($LVUR_i$)은 다음과 같다.

$$LVUR_i = \left| \frac{V_{ab} - a \cdot V_{bc}}{V_{ab} - a^2 \cdot V_{bc}} \right| \quad (6)$$

여기서 $a = e^{j120^\circ}$ 이다.

정상 및 역상분 전압은 불평형된 조건에서 유도전동기 동작을 해석할 때 사용된다. 정상분 및 역상분 전압 성분을 해석할 때 실제 정의는 크기와 각을 포함해야 하므로 계산상의 어려움을 피하기 위해 다음과 같은 근사화된 공식을 사용하는 경우가 있다.

$$LVUR_a = \frac{82 \cdot \sqrt{V_{abe}^2 + V_{bce}^2 + V_{cae}^2}}{V_{avg}} \quad (7)$$

식(7)에서 V_{abe} , V_{bce} 와 V_{cae} 는 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{abe} &= |V_{ab}| - V_{avg} \\ V_{bce} &= |V_{bc}| - V_{avg} \\ V_{cae} &= |V_{ca}| - V_{avg} \end{aligned} \quad (8)$$

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 (9)와 같고, 평형된 시스템에서 페이스의 합은 페루프 삼각형을 이루기 때문에 제로가 된다.

$$V_{NPS} = \frac{(V_a + a^2 V_b + a V_c)}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

PCC에서 시간에 따른 NPS는 표 1과 같이 허용하는 경우도 있다.

Table 1 Allowable limits of overall NPS at unbalanced loads

시간	허용값[%]
1-min peak loads	2.0
5-min peak loads	1.0
30-min peak loads	0.7

부하설비가 안정적으로 동작하기 위해서는 전압불평형이 최소가 되어야 한다. 본 연구에서 전압불평형율은 식 (5)로 계산한 결과이다.

전압불평형에 의한 영향을 최소화하기 위해 표 2와 같은 규격에서는 그 허용범위를 대개 0~3[%]범위 이내로 설정하고 있다.

표 2 전압불평형율 허용범위

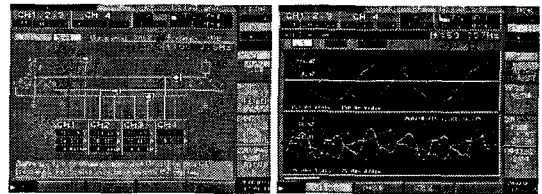
Table 2 Voltage unbalance rate allowable limits

관련규격	허용범위[%]	비고
NEMA	1.0	at the motor terminals
IEC	2.0	
IEEE	0.5~2.0	steady state
ANSI	0~3	no-load conditions
EN50178	2	V_o/V (비대칭)
AS1359	1.0	same as NEMA
일본전기 공업회	2.8	정상운전시, 장기간 수명보 장을 위해서는 1[%]이하

2.2. 측정 및 결과분석

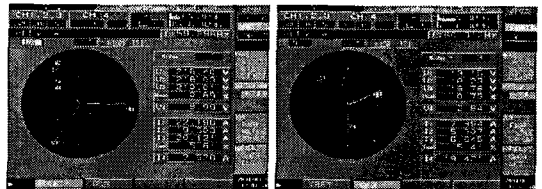
전압 불평형율의 크기를 확인하기 위해 수용가를 대상으로 3상 4선식 분전반에서 전력분석기로 전압 및 전류 파형을 측정하였다. 측정에 사용된 프로브는 600[V], 500[A]까지 가능하다. 측정시간은 각 장소에서 1초 간격으로 10분간 실시하였다.

다음 그림 1은 저압 3상 4선식 수용가에서 측정한 순시치 결과들이다. 측정은 부하의 변동 분포를 전체적으로 확인 가능한 PCC에서 실시하였다.



(a) 결선도

(b) 전압 전류 파형



(c) 전압벡터도 (I)

(d) 전압벡터도 (II)

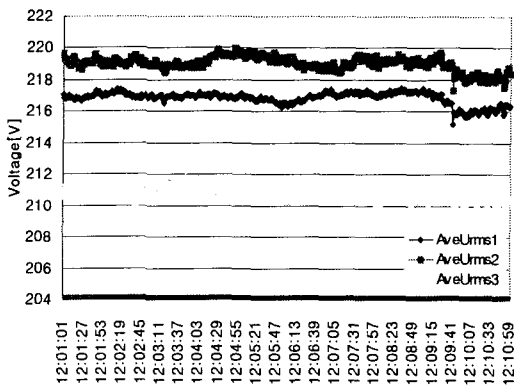
그림 1 결선도, 측정파형 및 벡터도

Fig. 1 Connection diagram, Measurement Waveform & Vector diagram

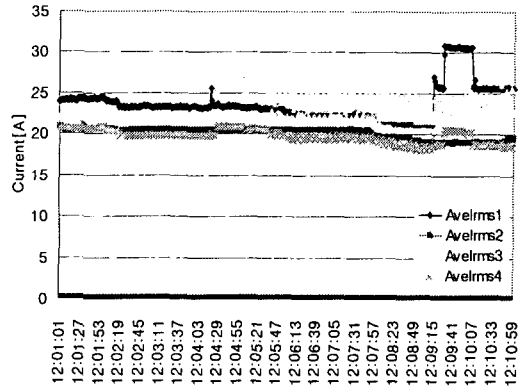
그림 1에서 (a)는 결선도와 선간 전압, 전류값을 나타낸 것으로서 중성선과 접지단자사이에는 약 9[V] 정도의 전압이 나타나고 있다. 그림 1(b)는 전압·전류 파형을 나타낸 것으로서 전압 파형은 컴퓨터와 같은 비선형부하의 영향으로 플랫폼(flat-top)형상이고, 전류는 고조파 성분이 포함된 왜형파이다. 그림 1(c)는 전압 및 전류의 기본파에 대한 백터도를 나타낸 것으로서 전압의 경우 약간의 비대칭을 하고 있으며, 전류의 경우에는 중성선에 흐르는 전류값의 존재로 인해 비대칭의 크기가 전압 파형에 비해 높다. 그림 1(c)에서 상전압은 I_3 에 흐르는 단상부하의 영향에 의해 U_3 상에 걸리는 전압이 다른 2상에 비해 낮아 0.69[%]의 전압불평형이 순간적으로 나타나고, 전류불평형은 5.61[%]로서 3상 4선식의 부하불평형 허용범위내이다. 전압불평형 및 비선형부하의 사용으로 3조파 성분이 상대적으로 매우 높다. 그림 1(d)는 3조파의 전압 및 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.

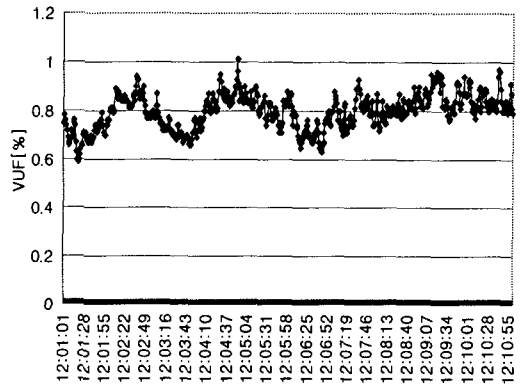
그림 2는 단상 부하의 사용이 동력부하보다 많은 수용가의 3상 4선식 배전방식에서의 대지전압 및 전류를 1초 간격으로 10분간 측정된 결과이다.



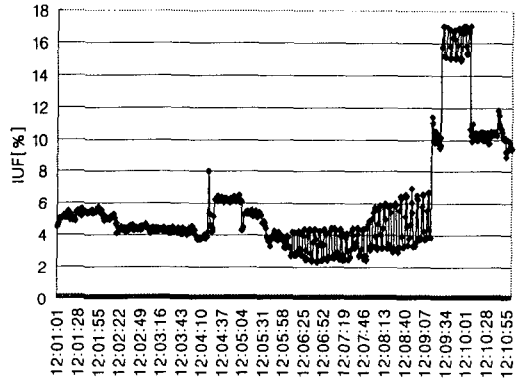
(a) 전압 파형



(b) 전류 파형



(c) 전압불평형률 (VUF)



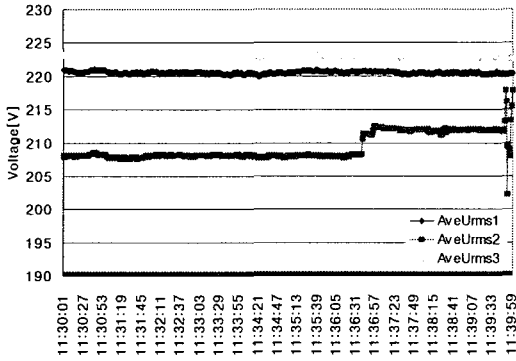
(d) 전류불평형률 (IUF)

그림 2 전압·전류파형 및 불평형률
Fig. 2 Voltage · Current Waveform & UF

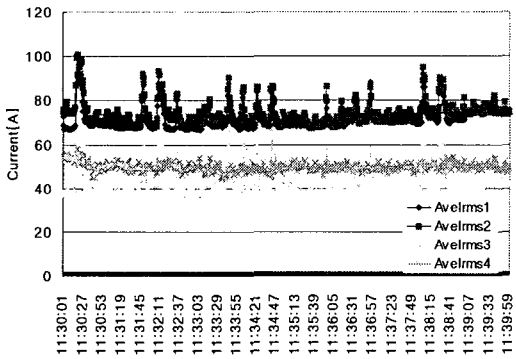
그림 2 (a)에서 전압은 상전압 실효값으로 부하전류의 영향으로 약간의 전압변동을 나타내고 있다. 그림 2(b)는 각상의 부하전류에 대한 변동을 나타낸 것으로서 시

간에 따라 약간의 변화를 나타내고 있다. 그림 2(c)와 (d)는 그림 2(a)와 (b)에 대한 전압 및 전류에 대한 불평형율을 나타낸 것으로서 전압불평형은 국제 기준에서 정한 전압 허용오차 범위 이내임을 알 수 있다.

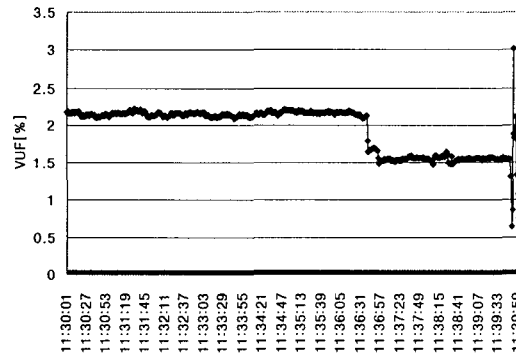
그림 3은 동력부하가 단상 전동 및 전열부하보다 많이 사용되는 수용가의 3상 4선식 배전방식에서의 대기 전압 및 전류를 1초 간격으로 10분간 측정된 결과이다.



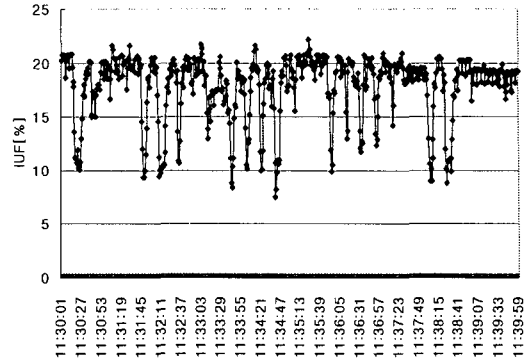
(a) 전압 파형



(b) 전류 파형



(c) 전압 불평형률 (VUF)

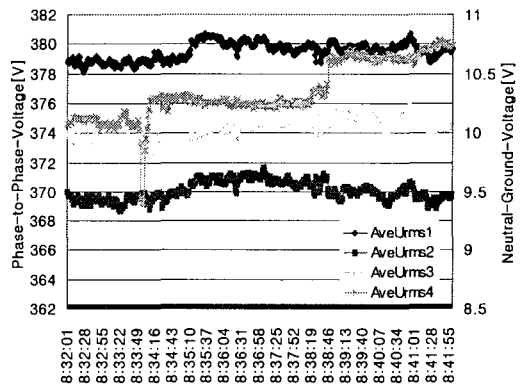


(d) 전류 불평형률 (IUF)

그림 3 전압·전류 파형 및 불평형률
Fig. 3 Voltage · Current Waveform & UF

그림 3(a)에서 순간적으로 어느 한상에 걸리는 높은 비율의 단상 부하에 의해 전압은 상대적으로 낮아 그림 3(c)에서와 같이 전압불평형은 높게 나타나지만, 부하의 균등한 분배가 이루어질 경우 전압불평형은 낮아진다. 그림 3(b)는 전류파형으로서 상전류가 운전시 2배 정도의 차이가 나며 순간적인 변동이 크다. 따라서 전류불평형도 같은 형태를 가지고 있다.

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



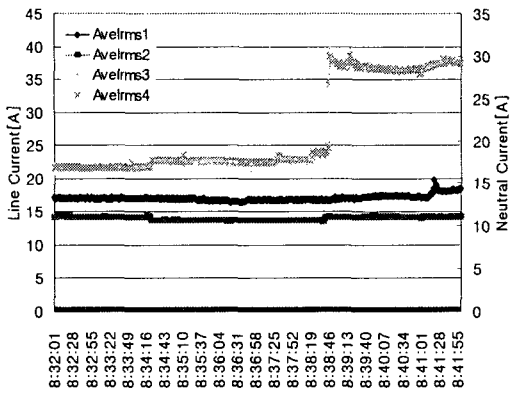
(a) 전압파형

3. 결 론

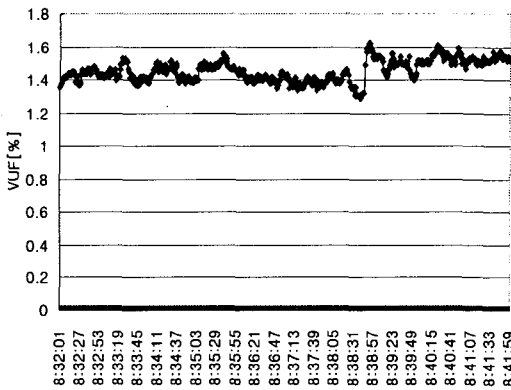
저압 수용가에 단상 및 동력부하를 함께 사용할 수 있는 3상 4선식 전원공급시스템에서 불평형에 대한 측정을 실시하였다. 부하의 사용이 각상에서 일정하게 이루어질 경우 전압 및 전류불평형은 큰 변동이 없지만, 단상부하의 갑작스런 사용증가는 전류 및 전압불평형의 비율을 매우 높인다. 전압불평형의 경우 기준에 따른 허용범위의 최대값에는 들어가나, 정밀한 제어를 위한 범위에는 포함되지 않는 경우도 발생한다.

참 고 문 헌

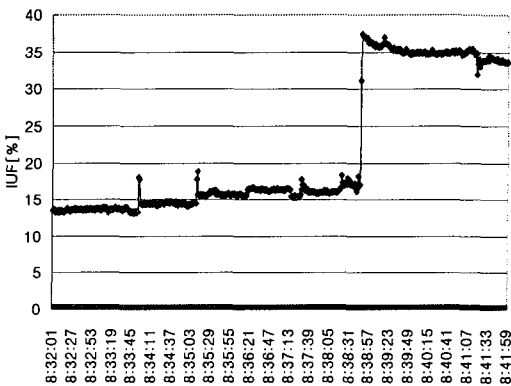
- [1] NEMA MG-1-2003, "Motors and Generators"
- [2] J. Schlabbach, et al, "Voltage Quality in Electrical Power Systems", IEE, 2003
- [3] 김종경, 이은용, "불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, pp. 285-291, 2002.6
- [4] IEEE std 1159-1995, "IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality"
- [5] ANSI C84.1-1995, "Interconnection for Parallel Operation of Customer Generation Guidelines"
- [6] European standard EN 50160, "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems", CENELEC, November 1994.
- [7] IEEE Std 446-1995, "IEEE Recommended Practice for Emergency & Standby Power Systems for Industrial & Commercial Applications, 446-1995"
- [8] Australian standard AS1359.31-1986, "Rotating Electrical Machines-General Requirements", 1986
- [9] 일본전기학회기술보고서, 제 581호, "공장·빌딩에 있어 전원품질확보의 現状과 對策", 1996



(b) 전류파형



(c) 전압불평형률 (VUF)



(d) 전류불평형률 (IUF)

그림 4 전압·전류 파형 및 불평형률
Fig. 4 Voltage · Current Waveform & UF