

Field Measurement and Analysis of Voltage Unbalance Factor

鄭鐘浩* · 金宗謙[†] · 朴永鎮** · 李殷雄***

(Jong-Ho Jeong · Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Eun-Woong Lee)

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 voltage unbalance more commonly emerges in individual customer loads due to phase load unbalance, especially where, single-phase power loads are used. Voltage unbalance factor(VUF) represents the loss of symmetry in the supply(magnitude and angle). It leads 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 : Unbalanced Voltages, Voltage Unbalance Factor(VUF), Current Unbalance Factor(CUF), Power Quality

1. 서 론

전력에너지 사용 증가에 따라 부하의 효율적 관리를 위한 전기품질 향상연구가 널리 진행되고 있다[1-4]. 전기품질은 주로 전압에 관련된 것으로 시스템에 일시적으로 영향을 주는 것과 지속적으로 영향을 주는 것이 있다.

전압불평형은 시스템을 운전하는 동안 지속적으로 전원 및 부하측의 운전특성에 따라 달라진다. 단상과 3상, 선형과 비선형 부하를 함께 사용하는 수용가는 간선 및 분기선에 연결된 부하는 평형에 가깝게 설계하지만, 설비 증설, 변경 등에 의해 불평형이 커지거나 운전조건에 따른 전압변동이 발생하면 역상분의 존재로 기기에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 그래서 이런 영향을 줄이기 위한 연구가 진행되고 있다 [1,2,4].

단상과 3상 부하를 분리사용하는 경우는 문제가 되지 않지만, 겸용이 가능한 3상 4선식 배전시스템에서 부하의 운전 패턴에 따라 발생하는 전압불평형은 기기에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 외국의 경우 전기품질에 대한 관심의 증가로 전압변동에 대한 기준을 마련하고 있으나 국내의 경우 전기 철도와 같이 대용량부하에서 발생하는 전압불평형을만 언급하고 있지만 비선형부하와 같은 민감한 설비에서 발생하는 영향을 줄이기 위한 규정의 마련을 위한 측정자료가 부족하다[5].

현재 널리 보급되어 있는 3상 4선식 배전시스템에서 부하의 사용에 따른 문제점 분석을 위해서는 간선 및 분기선에서 발생하는 전압불평형율에 대한 현장 측정 및 분석이 필요하다. 측정시 측정간격에 따라 전압불평형율이 달라지므로 부하의 종류에 따른 측정방법의 제시가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 저압수용가의 설비 중에서 단상부하의 사용비율이 높은 곳에서 전압불평형율을 측정 분석하였다. 측정결과 3상 4선식 시스템에서 단상부하의 사용이 빈도가 높거나, 부하변동이 심하거나 측정간격을 짧게 할수록 전압불평형율이 높아짐을 확인할 수 있다.

2. 전압불평형의 정의 및 측정

2.1 전압불평형의 정의 및 기준

전압불평형의 원인은 3상 전원에 단상부하의 불균형 배분과 불평형 3상 부하 임피던스 연결이다. 또 평형의 3상 부하가 불평형 전원에 연결되면 유입 전류는 불평형이 된다. 따라서 3상에서 각상에 서로 다른 전압강하가 발생한다. 이와 같이 상간전압의 서로 다른 차이가 전압불평형이다 [2,5,6].

전압불평형율은 각 선간전압을 수식적인 방법 또는 도식적으로도 나타낼 수 있다. 그러나 현장에서 측정할 경우 대개 실효값으로 간략화한 수식적인 방법을 사용하고 있다.

전압 불평형율(VUF:Voltage Unbalance Factor)은 식 (1)과 같이 정상분(V_1)에 대해 역상분(V_2)의 비율로서 정의한다.

$$VUF_1 = \frac{V_2}{V_1} \times 100[\%] \quad (1)$$

* 正 會 員 : 忠南大 工大 博士課程修了

[†] 교신저자, 正會員: 國立 原州大 電氣科 副教授 · 工博
E-mail : jgkim@wonju.ac.kr

** 正 會 員: 國立 原州大 電氣科 副教授 · 工博

*** 正 會 員 : 忠南大 工大 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 8月 13日

最終完了 : 2004年 2月 17日

식 (1)에서 정상분 V_1 과 역상분 V_2 은 3상 불평형 선간전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 를 다음과 같이 대칭성분에서 구한 것이다.

$$V_1 = \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 V_{ca}}{3}$$

$$V_2 = \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a V_{ca}}{3}$$

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

현장에서 측정된 값으로 3상 선간전압으로 전압불평형을 산출할 경우 식 (2)와 같은 공식을 이용하면 된다.

$$VUF_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100[\%] \quad (2)$$

식 (2)에서 β 는 다음으로 구한 것이다.

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

불평형을 식 (1) 및 (2)로 계산한 결과는 동일하지만, 실제 전압 크기만의 측정으로 불평형율을 산출할 경우 식 (2)가 주로 사용된다. 전류불평형도 같은 방법으로 계산하며 국내에서 3상 4선식에서 부하의 불평형율은 30[%]이하로 제한하고 있다.

표 1은 전압불평형율의 허용범위에 대한 것으로서 측정장소, 측정조건 및 산출방식에 따라 약간씩 다르지만 대부분의 경우 3[%]이하를 유지하도록 요구하지만, 중요한 곳에는 1[%]이하로 제한하고 있다.

표 1 전압불평형율 허용범위
Table 1 Voltage unbalance rate allowable limits

관련규격	허용범위[%]	비고
전기설비 기술기준	3	교류전기철도 단상, 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_o/V_1 비대칭)
AS1359	1.0	same as NEMA
일본전기 공업회	2.8	정상운전시, 장기간 수명보장을 위해서는 1[%]이하

2.2 전압불평형 측정기준

전압불평형을 평가하기 위한 기본적인 요구조건은 측정 및 관찰기간(observation periods), 계산방법(calculation method), 평가기법(evaluation technique)이다. 이 중에서 계산방법은 식 (1) 및 (2)에 의한 구하면 되지만, 측정간격과 관찰기간은 전압불평형율의 크기 및 평가에서 매우 중요한 요소가 되기 때문에 설비에 따라 달라질 수 있다.

전압불평형 평가는 주기당 적어도 32개 이상의 샘플이 필요하며, 낮은 샘플링의 경우는 입력신호로부터 고조파 성분을 제거하기 위해 아날로그 필터를 사용해야 한다. 본 연구에서는 1주기당 256 샘플값을 사용하였다.

전압불평형율의 계산에 사용되는 각 선간전압의 실효값은 식 (3)과 같다.

$$U_{rmsl} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{s=0}^{M-1} (U_{1s} - U_{2s})^2} \quad (3)$$

여기서 s 는 샘플링 포인트수 이고, M 은 샘플수이다.

식 (3)에서 구한 실효치 평균 전압값을 식 (2)에 대입할 경우 전압불평형율이 구해진다.

일반적으로 순시값 변동에 의한 전압불평형은 별로 문제가 되지 않지만, 전력변환장치와 같이 짧은 기간의 전압변화에 민감한 경우에는 식 (4)와 같이 3초 간격으로 10분간 측정결과를 이용한다[7,8].

$$U_{u_{10min}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{200} u_{3s-i}^2}{200}} \quad (4)$$

$U_{u_{10min}}$ 값은 3상 DC 컨버터의 전력전자에서 발생할 수 있는 과열을 의미하는 것으로서 3상중에서 한상이 다른 것보다 오랜 기간 전도(conduct)하기 때문에 역상분에 민감하다.

전압평균값에서 불평형은 순시전압에 반영되어야 하기 때문에 짧은 시간간격으로 측정된 전압 불평형율이 긴 간격으로 측정된 전압 불평형율에 비해 그 값이 약간 높다. 또한 특별한 부하의 영향을 평가하기 위해 전압 불평형 측정기간은 부하의 정상적인 동작 주기에 해당할 수 있다.

전동기 및 전력기에 관련된 가혹함을 결정하기 위해 조사가 필요할 때 2시간 간격의 토대에서 평가된 $U_{u_{2h}}$ 값이 사용된다. $U_{u_{2h}}$ 값은 평가한 12개의 앞서 $U_{u_{10min}}$ 값을 가지고서 매 10분 간격에서 측정된 것으로서 식 (5)와 같다.

$$U_{u_{2h}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} u_{10min}^2}{12}} \quad (5)$$

3상 동력부하를 주로 사용하는 경우 부하의 변동이 낮아 식 (5)와 같은 방법을 적용하면 되지만, 동력과 전동·전열을 겸용하는 3상 4선식에서 전압불평형을 산정하기 위해서는 보다 긴 시간동안 측정이 요구된다.

그림 1은 1시간동안 측정간격에 따른 전압불평형율을 비교한 것이다. 측정간격이 짧을수록 전압불평형율의 변화를 상세하게 볼 수 있으나 측정간격이 긴 경우에는 변화가 완

만하여 민감하게 동작함을 알 수 있다.

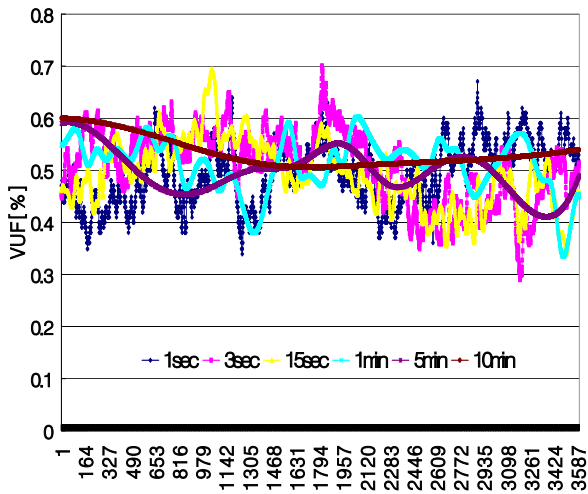


그림 1 측정간격에 따른 전압불평형을 비교
Fig. 1 Comparison of VUF due to measurement interval

그림 1에서와 같이 어느 기간 동안에 발생하는 간단한 전압불평형의 산정은 짧은 기간에서만 측정해도 가능하지만, 대부분의 경우 시간대별로 부하사용량이 달라지지 때문에 부하의 특징에 따른 전압불평형을 분석을 위해서는 식 (6)과 같이 최소 하루 ($U_{u_{1d}}$) 또는 일주일간 ($U_{u_{1w}}$) 측정이 필요하다.

$$U_{u_{1d}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{144} u_{u_{10min-i}}^2}{144}} \quad (6)$$

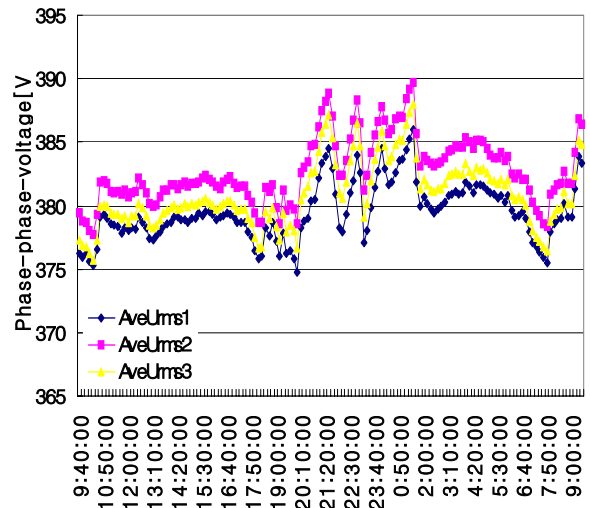
$$U_{u_{1w}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{1008} u_{u_{10min-i}}^2}{1008}}$$

3. 측정 및 결과 분석

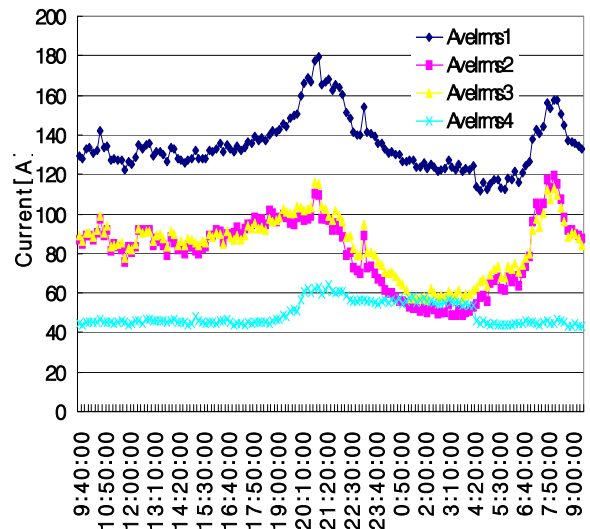
전압불평형율은 전압의 크기, 위상각에 따라 달라지지만 실제 현장에서는 두 가지 모두가 포함되어 있으므로 전압불평형을 산정시에는 식 (2)에 의한 산출이 편리하다.

전압불평형은 동력부하보다는 단상부하의 사용이 많은 장소에서 일반적으로 높다. 또한 단상부하에서도 에어컨과 같은 용량이 비교적 큰 부하의 곳에서 높다. 3상 4선식 설비라도 공장과 같이 거의 일정한 부하가 소비되는 경우 전압불평형율이 낮지만, 일반적으로 소용량 부하를 사용하는 경우, 단상 부하가 3상 동력보다 차지하는 비율이 큰 경우 또는 각상의 부하 변동이 많은 곳에서 전압불평형율은 높다. 따라서 전압불평형율의 분석에는 단상부하 비율이 높은 곳에서 측정이 유리하다.

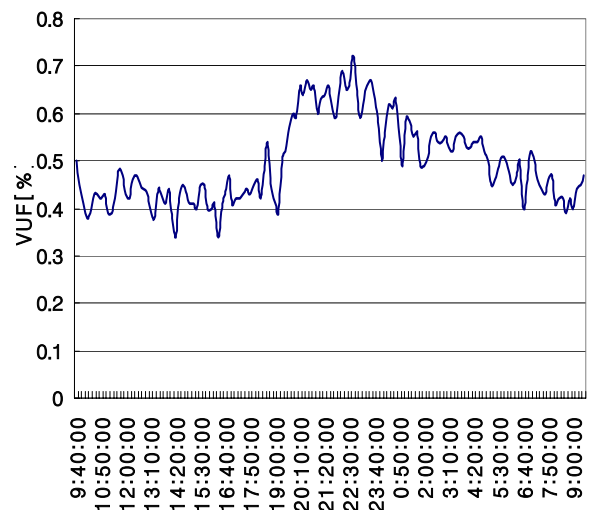
그림 2는 단상부하가 차지하는 비율이 동력에 비해 높은 3상 4선식 설비의 분기선에서 10분 간격으로 하루 동안 부하의 변동에 따른 측정된 결과를 나타낸 것이다.



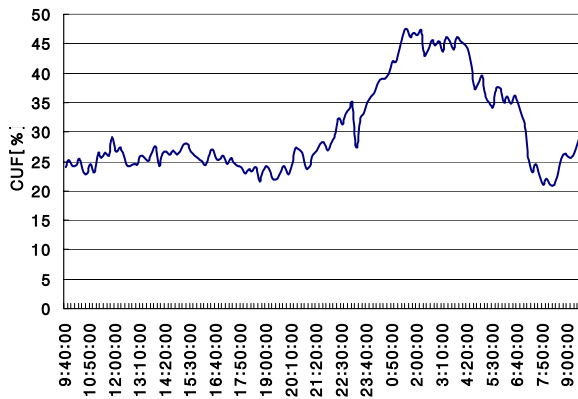
(a) 전압과형



(b) 전류과형



(c) 전압불평형율



(d) 전류불평형형률

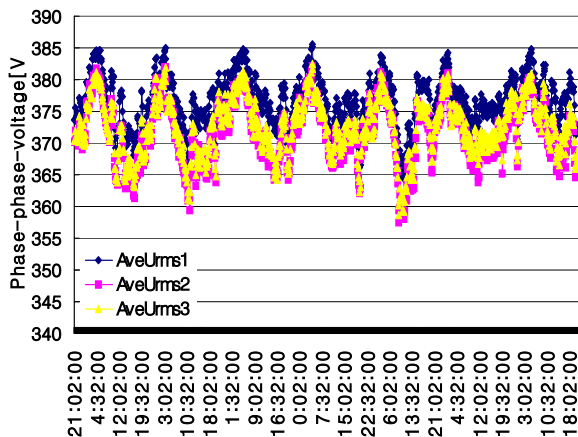
그림 2 전압, 전류파형 및 불평형형률

Fig. 2 Voltage, current waveform and unbalance factor

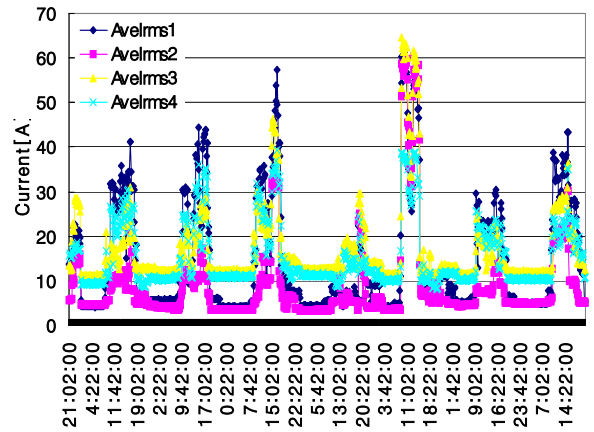
그림 2 (a)에서와 같이 1일 동안 전압의 변화가 시간에 따라 거의 일정한 패턴으로 변화하기 때문에 그림 2(c)와 같이 전압불평형형률은 상대적으로 낮다. 그림 2(b)는 전류값 변화를 나타낸 것으로서 저녁시간대가 다른 시간에 비해 상대적으로 높으며, 부하의 불평형으로 중성선에도 꽤 높은 전류가 거의 일정하게 흐르고 있다. 그림 2(d)는 전류불평형형률을 나타낸 것으로서 심야시간대 전류값은 낮지만 각 상에 흐르는 전류값의 차이로 부하불평형형률의 허용범위를 초과하고 있다. 또한 그림 2(b)에서 알 수 있듯이 부하의 불평형의 의해 중성선에 전류가 흐르는데 컴퓨터와 같은 비선형부하의 사용으로 일반적으로 3조파 성분이 기본파에 비해 상대적으로 높다.

부하는 사용장소, 사용 시간 등에 따라 달라진다. 따라서 보다 높은 정확한 불평형 비율산정을 위해서는 다소 긴 기간동안 측정이 요구된다. 그래서 일주일 동안 부하에 따라 전압값이 달라질 수 있는 장소인 간선 및 분기선에서 측정을 통해 분석한 결과를 그림 3, 4에 나타내었다.

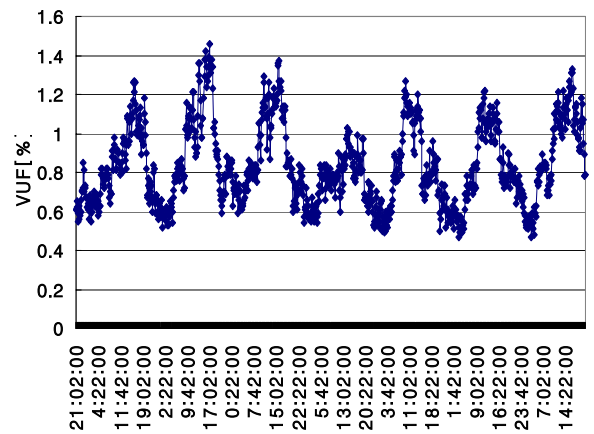
그림 3은 분기장소에서 10분 간격으로 일주일 동안 측정된 전압·전류 및 불평형형률의 결과를 분석한 것이다. 불평형형률은 식 (2)로 측정량 평가기법은 식 (6)을 사용하였다.



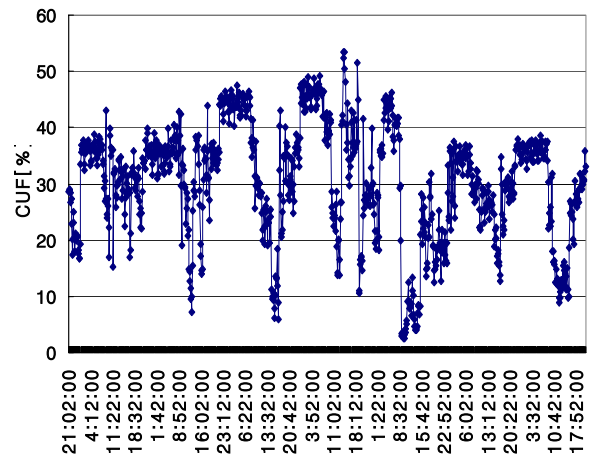
(a) 전압파형



(b) 전류파형



(c) 전압불평형형률



(d) 전류불평형형률

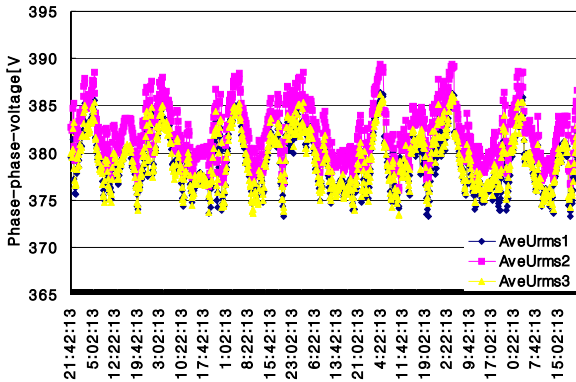
그림 3 전압, 전류 파형 및 불평형형률

Fig. 3 Voltage, current waveform & unbalance factor

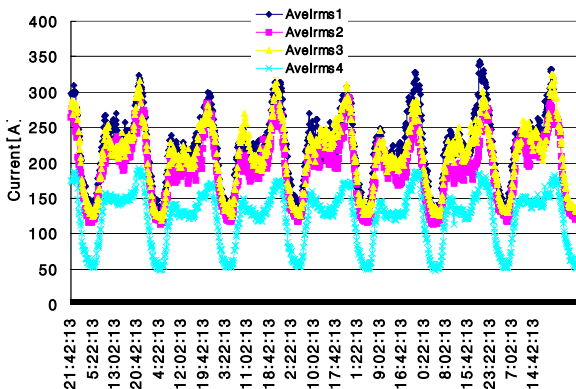
그림 3 (b)에서 전등부하량은 낮지만 에어컨과 같은 부하의 사용량이 많을 경우 선간전압은 작고, 선간전압이 거의 일정한 비율로 변화하기 때문에 부하량의 변화에 비해 전압

불평형율은 상대적으로 낮다. 부하변동이 커짐에 따라 전압 값의 차이는 약간 높아져 전압불평형율은 그림 3(c)에서와 같이 다소 변동이 발생한다. 그림 3(d)에서와 같이 전류불평형율은 일부시간대에서는 허용범위내 들어가지만 대부분의 시간대에서는 초과함을 알 수 있다.

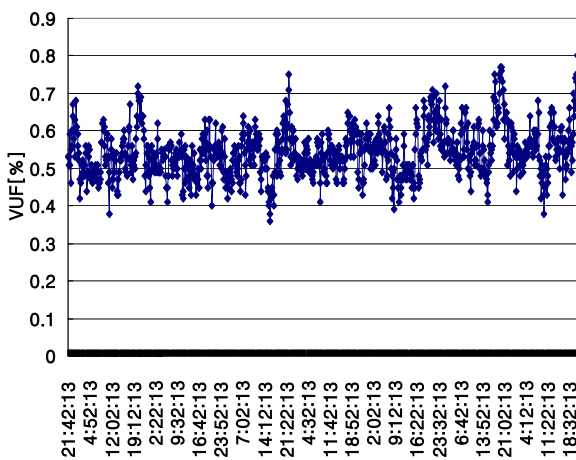
그림 4는 간선에서 10분 간격으로 일주일 동안 측정된 전압 및 전류값에 대한 분석결과이다.



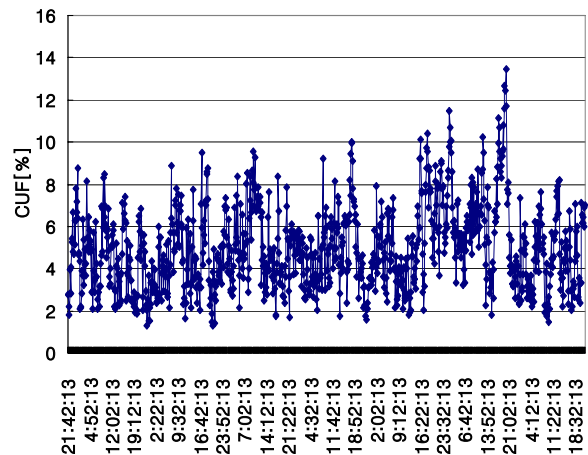
(a) 전압파형



(b) 전류파형



(c) 전압불평형율



(d) 전류불평형율

그림 4 전압, 전류 파형 및 불평형율

Fig. 4 Voltage, current waveform & unbalance factor

그림 4(b)에서 부하 변동이 일정하고, 3상전압이 일정한 패턴으로 변동할 경우 전압파형의 변동이 상당히 안정되어 전압불평형율은 매우 낮아짐을 알 수 있다. 부하가 일정한 패턴으로 변화함에 따라 각 선간전압의 차이가 없어 전압 및 전류불평형율이 상대적으로 낮다. 그림 3에서와 같은 분기선에 비해 부하분배가 적절하게 이루어지고, 사용량이 각상 평형일 경우 그림 4(d)와 같이 부하불평형율은 상대적으로 낮아 허용범위내에 들어감을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 산업현장에서 주로 사용하는 3상 4선식 설비에서 발생하는 전압·부하 불평형율의 크기를 측정을 통해 분석하였다. 전압불평형율 측정시 전력전자설비와 같이 민감하게 동작하는 경우에는 측정간격이 짧고, 측정시간이 낮아도 되지만, 대부분의 설비에서는 부하의 사용이 계절별, 시간대별로 다르기 때문에 이에 대한 정확한 전압불평형율의 분석을 위해서는 측정간격 10분에 측정시간을 길게 결정할 필요가 있다.

본 논문에서는 측정간격에 대소에 따른 분석과 간선 및 분기선에서 주기적인 부하의 사용에 따른 분석을 위해 1일 및 1주일동안 측정을 통해 분석을 실시하였다. 전류불평형율은 어느 한상에 흐르는 단상부하의 용량이 다른 상에 비해 상대적으로 높아 부하불평형율의 허용기준을 초과하고 있지만, 전압불평형율은 각상의 값이 같은 비율로 변동하기 때문에 대부분이 국제 기준에 제시하는 범위내 들어감을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 전압 보다는 부하불평형율을 기준범위내로 제한할 수 있는 방법이 필요함을 확인할 수 있었다. 특히 민감한 설비에서 전압전압불평형율에 대한 영향을 줄이기 위해서는 단상부하와 3상부하를 분리 사용하는 것이 매우 중요하다.

본 연구결과를 앞으로 비선형부하의 사용시 전압 및 부하 불평형율에 따른 문제해결에도 이용할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 산업자원부 및 한국전력공사의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김종겸, “전기품질 변화에 따른 유도전동기의 동작특성 해석”, 전기학회 논문지, 제 49P권, 2호, pp.15-21, 2000. 10
- [2] 김종겸, 이은웅, 정종호, “비대칭 전압불평형에 의한 유도전동기의 동작특성 해석”, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 추계학술대회논문집, pp.110-112, 2003. 11
- [3] P. Pillay and M. Manyange, “Definitions of voltage unbalance”, IEEE Power Eng. Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001.
- [4] Ching-Yui Lee, “Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor”, IEEE Trans on EC, Vol.14, No.2, pp.202-208, Jun 1999.
- [5] 김종겸, 이은웅, “불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상”, 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, pp. 285-291, 2002.6
- [6] 김종겸, 박영진, 이은웅, “3상 4선식 수용가의 전압불평형을 추정 분석”, 한국조명·전기설비학회 춘계학술대회, pp.43-47, 2004. 5
- [7] IEC-61000-4-30, “testing and measurement techniques-power quality measurement methods”
- [8] EN 50160, “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems”, 2000, 2



김 종 겸 (金 宗 謙)

1961년 10월 3일생. 1991년 충남대학교 대학원 졸업. 1996.2 동대학원 졸업 공학박사 1996년~현재 국립원주대학 전기과 부교수. 현재 당학회 B부문 및 본부 편집위원, P부문 편집위원장

Tel : 033-760-8423

E-mail : jgkim@wonju.ac.kr



박 영 진 (朴 永 鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~현재 국립 원주대학 전기과 부교수

Tel : 033) 760-8424

E-mail : popspark@wonju.ac.kr



이 은 응 (李 殷 雄)

1944년 8월 14일생. 1971년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1982년~83년, 1984년~85년 캐나다 McGill 대학 방문교수. 1987년~현재 당학회 평위원. 1995년 당학회 편집위원장 및 전기기연구회 간사장. 1995년~1997년 충남대 공대 학장, 산업대학원장('96~97), 1997년~2000년 당학회 부회장. 2004년도 당학회 회장, 현재 충남대 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5652

E-mail : ewlee@cnu.ac.kr

저 자 소 개



정 종 호 (鄭 鍾 浩)

1969년 6월20일생. 1993년 충남대학교 공과대학 전기공학교육과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 박사과정수료. 현재 경기기계공업고등학교 공동실습소 교사

Tel : 02-970-8922

E-mail : jeong-jh@hanmail.net