

The Comparison Study for Voltage, Current and Load Unbalance Factor

金宗謙[†] · 朴永鎮* · 李殷雄**
 (Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Eun-Woong Lee)

Abstract - Most of the LV customer have been applied the distribution system of 3-phase four wire system because of its 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 uneven load distribution or unclear voltage quality has occurred various problems such as de-rating, losses increase and vibration, etc. In this paper, voltage, current and power waveform in the actual fields have measured and analyzed in relation with internationally allowable voltage unbalance limits and compared the current unbalance factor with the load unbalance factor.

Key Words : Voltage Unbalance Factor, Load Unbalance Factor, 3phase 4wire system, Power Quality

1. 서 론

전기품질은 주로 전압품질과 관련되어 있다. 전압품질의 변화는 전류의 변화로 이어져 손실증가와 출력감소, 시스템의 신뢰성을 낮추어 생산의 차질까지 빚을 수 있으므로 이에 대한 기준의 설정이 매우 중요하다. 외국의 경우 전압불평형에 대한 기준을 전압별, 측정단자 및 측정기간에 따라 제한을 두고 있지만, 우리나라에서는 3상 전력에서 큰 용량의 단상부하를 사용하는 전기철도부분에서 전압불평형에 대한 기준이 마련되어 있지만 실제 일반 수용가에 전압 불평형율을 적용하기에는 다소 부적합하다.

전압불평형율의 발생은 전원측 보다는 주로 부하측의 운전상황에 따라 변화하기 때문에 부하 불평형과 밀접한 관계를 가지고 있다. 3상 4선식 시스템에 요구하는 부하의 불평형율은 30%이하가 되도록 규정하고 있지만 단상부하가 3상 부하보다 많이 사용되는 곳에서는 이 범위를 초과하는 경우가 매우 많다. 이는 부하의 설계시 각 상에 일정한 비율로 부하를 배분하지만 운전조건에 따라 부하의 사용비율이 달라지는 것으로서 가정이나 상업용 시설에서 주로 많이 발생할 수 있다.

부하의 분포와 사용량에 따라 변화하는 전압불평형율은 부하불평형율과 어떤 관계를 가지고 있는가를 밝히는 것은 시스템의 신뢰도 증진과 효율적인 설비의 운전에 매우 중요

하다. 따라서 본 논문에서는 전압불평형율과 부하불평형율의 상관관계를 수식적으로 설명하고, 현장 측정 결과에 대해 전류와 부하불평형율의 산출방식에 대해서도 비교 분석결과를 제시하고자 한다.

2. 전압, 전류 및 부하 불평형율

2.1. 전압 불평형율

전압불평형은 전원측 보다는 부하측에 의해 주로 많이 발생하는 것으로서 고조파와 같이 주파수대역은 낮지만 부하의 운전 중에 지속적으로 나타나는 현상으로 부하의 종류와 운전패턴에 따라 달라진다. 약간의 전압불평형은 높은 전류 불평형으로 이어져 부하기에 손실 증가로 출력감소 및 소음증가로 시스템의 신뢰도를 떨어뜨린다[1-3].

전압불평형율에 대한 산정은 수식적인 방법과 도식적인 방법 등이 있다. 도식적인 방법은 전압불평형에 대한 정도를 이해시키는데 도움이 되지만, 부하의 연속적인 사용시에 대한 불평형율 표현에는 어려움이 있으므로 수식에 의한 계산방법이 널리 사용되고 있다. 수식적인 방법에는 대칭좌표법에 의한 방법과 전압의 크기만으로 구하는 방법 및 부하의 피상전력대 단락전력의 비로도 구하고 있다[1-3].

식 (1)은 대칭좌표법에 의한 불평형율로서 정상분에 대한 역상분 또는 영상분의 비율로 구한 것이다.

$$\begin{aligned}
 VUF_1 &= \frac{V_2}{V_1} \\
 &= \frac{V_a}{V_1}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

식 (1)에서 V_1, V_2, V_0 는 다음과 같다.

[†] 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 11月 11日

最終完了 : 2005年 4月 7日

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

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

$$V_0 = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3}$$

일정기간동안의 전압불평형을 찾아내기 위해서는 각 상의 선간전압의 크기만으로 계산이 가능한 식 (2)를 사용한다. 식 (2)는 각 상의 전압만 알 경우 전압불평형을 쉽게 구할 수 있으므로 가장 널리 이용하고 있다.

$$VUF_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\gamma}}{1 + \sqrt{3 - 6\gamma}}} \quad (2)$$

식 (2)에서 γ 는 다음과 같다.

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

IEEE와 NEMA는 전압불평형을 같이 정의하고 있지만 서로 달리하여 계산하였다. IEEE 112-1991의 내용에서 전압불평형은 상전압의 평균값을 기준으로 상전압 평균값과 가장 큰 차이를 계산하였고, IEEE Std.112-1991에서는 상전압의 평균값을 기준으로 가장 큰 값과 가장 작은 값의 차이를 계산하였으며, 1995년에 재개정된 IEEE Std.1159에서는 정상분과 역상분비율과 이들과의 문제점을 재검립하여 나타내고 있다[4,5].

전압불평형을 표현하는데 단지 크기만을 사용하기 때문에 각상의 위상차를 고려하지 않아 약간의 오차를 발생할 수 있다.

식 (3)은 선간전압 대신에 각 상전압을 평균전압차에서 최대값을 찾은 다음 평균값으로 나누어 구하는 방법이다.

$$PVUF_1 = \frac{\max[|V_a - V_{avg_p}|, |V_b - V_{avg_p}|, |V_c - V_{avg_p}|]}{V_{avg_p}} \quad (3)$$

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

식 (3)과 같은 방법에 의한 산출은 보편적으로 평가된 전압불평형율에 비해 최대 13% 정도의 오차를 추가시킬 수 있다.

상전압불평형을 표현하는 가장 간단한 방법은 식 (4)와 같이 3상에서 전압편차를 측정하여 평균전압과 비교하는 것이다.

$$PVUF_2 = \frac{[V_{avg_p} - \max(V_a, V_b, V_c)]}{V_{avg_p}} \quad (4)$$

최근 많이 사용되고 있는 컴퓨터와 같은 단상부하 설비의 사용시 상전압 불평형율(PVUF)은 식 (5)와 같이 최대전압과 최소전압차를 평균전압으로 나타낸다.

$$PVUF_3 = \frac{[V_{max} - V_{min}]}{V_{avg_p}} \quad (5)$$

식 (5)로 계산할 경우 일반적으로 허용되고 있는 전압불평형을 보다는 다소 높게 나타날 수 있다. 또한 식 (5)는 선간전압에 대한 편차를 평균값으로 구할 경우 선간전압 불평형율에도 적용할 수 있다.

개략적인 방법으로서의 다음 식 (6)과 같이 부하의 피상전력 S_L 과 전원회로의 단락전력 S_{SC} 으로 계산하는 경우로서 대용량의 수전설비에서 적용하고 있다.

$$VUF \cong \frac{S_L}{S_{SC}} \quad (6)$$

국내 전기설비기술기준(291조)에 명시된 전압불평형율은 3상 전원을 2개의 단상전원으로 변경하여 사용하는 전기철도에서 적용하기 위해 제시한 것으로 상대적으로 높은 용량의 단상부하에 의해 발생하는 문제를 줄이기 위함이다[6].

우리나라의 경우 일반 수용가 부하에 대한 내용은 규정되어 있지 않고, 전기설비기술기준 제 291조에 전압불평형에 의한 장애 방지를 위해 교류식 전기철도의 변전소의 변압기 결선방식(단상, T 및 V결선)에 따라 변전소 수전점에서의 3상 전원계통의 10[MVA]를 기준으로 퍼센트 임피던스 또는 퍼센트 리액턴스와 전기철도용 급전 전 구역에서의 연속 2시간의 평균부하용량의 적에 비례하는 양으로 표현하여 3%로 규정하고 있다. 표 1은 전압불평형율에 관련된 국내외 기준들이다. 전압, 측정 장소 및 부하의 운전특성에 따라 약간의 차이가 있다.

표 1 전압불평형율 허용범위

Table 1 Allowable limits of VUF

관련규격	허용범위 [%]	비 고
NEMA	1.0	at the motor terminals
IEC-3000-3	<2.0(LV, -x, MV)	measured as 10-minute values, with instantaneous maximum of 4%
EN 50160		
IEEE	0.5~2.0	steady state
EDF France	2	
ANSI	0~3	no-load conditions
EN50178	2	(V_o/V_1 비대칭)
CENELEC	2	European Committee for Electro-technical Std
NRS 048-2	2	단상 또는 2상 수용가가 많은 경우 3%
AS1359	1.0	same as NEMA
GCOI/GCPS	2	브라질
일본전기공업회	2.8	정상운전시, 장기간 수명보장을 위해서는 1[%]이하
전기설비기술기준	3	변압기의 결선방식에 따라 계산하여 변전소 수전점에서

2.2. 전류불평형율과 부하불평형율

3상 시스템에서 부하 임피던스는 고르지 못하게 분포된 단상부하 또는 고장에 의해 주로 발생하며, 전원 임피던스는 대형 부하 임피던스와 일정하지 못한 전원 출력 임피던스에 의해 발생한다. 불평형 부하는 상간 다른 부하전류 실효값으로 나타나거나 같은 전류라도 서로 다른 위상차 또는 둘다를 포함하는 경우도 생겨나게 할 수 있다.

전류불평형율(CUF:Current Unbalance Factor)은 전압불평형율과 같이 식 (10)으로 산정할 수 있다.

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

식 (7)에서 δ 는 다음과 같이 각 상의 전류로 표현된다.

$$\delta = \frac{|I_a|^4 + |I_b|^4 + |I_c|^4}{(|I_a|^2 + |I_b|^2 + |I_c|^2)^2}$$

그러나 부하 즉 설비의 불평형율(LUF:Load Unbalance Factor)은 식 (8)과 같이 각 선간에 접속하는 단상 부하 총설비용량(VA)의 최대와 최소의 차와 총 부하설비용량 평균치의 비로 표현하고 있다.

$$LUF = \frac{\text{각 선간에 접속되는 단상부하 총설비용량의 최대와 최소의 차}}{\text{총설비설비용량의 } 1/3} \quad (8)$$

저압으로 수전하는 단상 3선식에서의 부하불평형율은 부득이한 경우 40%까지 그리고 3상 3선식 또는 3상 4선식으로 수전하는 설비에서 불평형율은 30%이하로 유지하도록 하고 있다[7].

3. 측정 및 결과분석

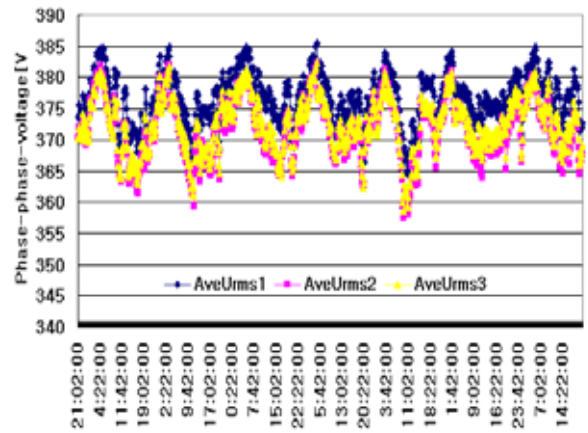
3.1 전압 및 전류측정

단상 및 3상 부하에 동시에 공급 가능한 3상 4선식 방식은 일반 수용가에 널리 적용되고 있다. 이 방식은 시스템의 간략화로 설치비 및 운영상 편리하지만 사용 중에 발생하는 전압불평형율은 높은 전류불평형으로 이어져 손실증가와 기기의 출력감소와 같은 여러 가지 문제가 발생할 수 있다.

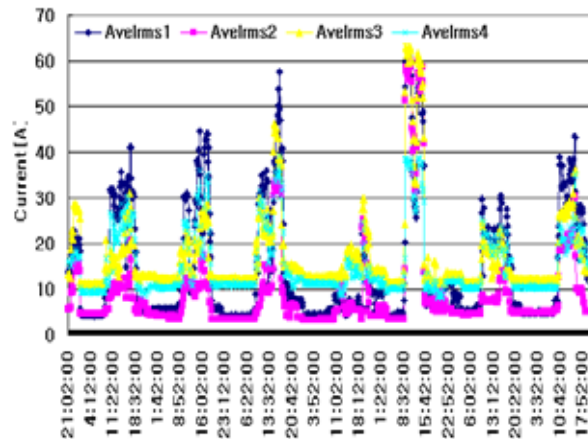
현재 규정되어 있는 부하불평형율의 경우 부하분담 설계시에 대한 것이고, 전압불평형율은 전기철도와 같이 단상부하를 집중적으로 사용하고 있는 특수한 경우에만 규정하고 있어 일반적으로 사용되는 3상 4선식에 대한 전압 및 부하불평형에 대한 제한 규정은 언급되어 있지 않다. 이와 같은 관점에서 보면 안전하고 신뢰성 있는 전기품질의 향상을 위한 전압 및 부하불평형에 대한 현장 측정을 통한 기초자료의 확보가 매우 필요하다.

3상 4선식 부하설비에서 부하의 운전에 따른 불평형율에 대한 측정은 단상부하의 비율이 3상 부하의 용량보다 높은 경우와 반대로 3상 부하의 사용비율이 단상용량보다 높은 경우에 대해 측정하였다. 측정은 10분 간격으로 일주일간 실시하였다. 그림에 표시된 전압 및 전류값은 각각 실효치 평균값이다.

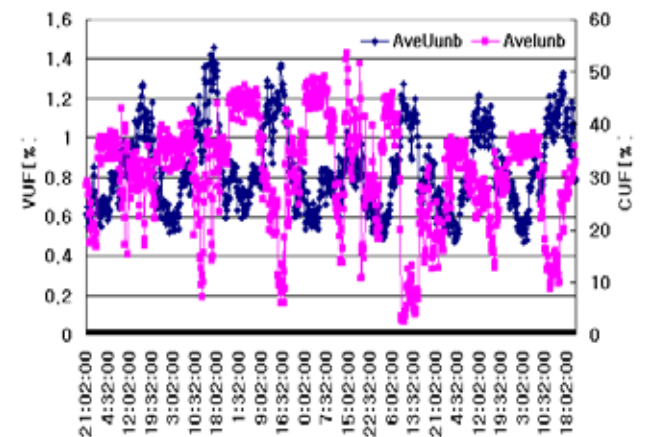
부하의 사용량 변화에 따른 전압 및 부하 불평형을 측정하기 사용된 계측기는 HIOKI의 전력품질분석기 모델 3196이다.



(a) 전압파형



(b) 전류파형



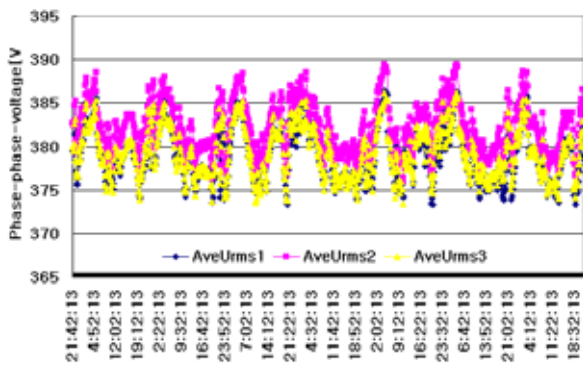
(c) 전압 및 전류 불평형율

그림 1 단상부하가 3상부하 보다 많이 사용되는 경우 전압, 전류 및 불평형율

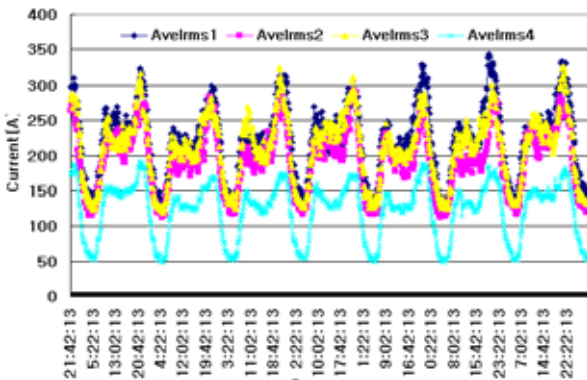
Fig. 1 Comparison of current and load unbalance factor at the heavy load

그림 1에서와 같이 단상부하가 3상 부하보다 많이 사용되는 곳에서는 부하가 집중적으로 많이 사용되는 시간대에서 그림 1(c)에서와 같이 전압불평형율이 다소 높게 나타남을 알 수 있다. 전류불평형율(CUF)이 경우 국내 기준에서 제시하는 3상 4선식의 허용범위 30%를 초과하는 경우가 매우 많이 나타남을 확인할 수 있다. 특히 각상의 부하전류가 상대적으로 차이가 많아 중성선에 흐르는 전류가 다른 상의 전류에 비해 매우 높은 값을 지니는 것을 확인할 수 있었다.

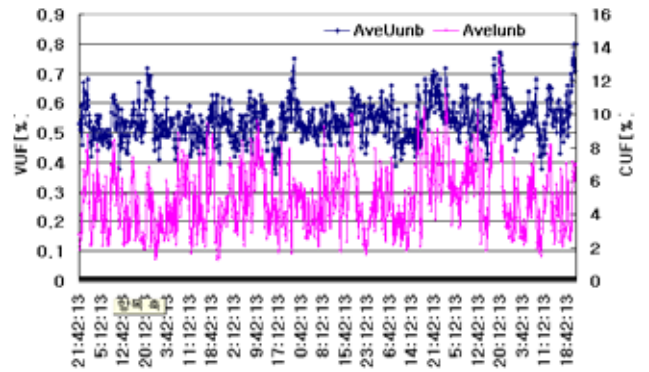
그림 2는 3상 4선식 부하공급 시스템의 PCC에서 3상 부하가 단상부하보다 많이 사용되는 경우의 측정결과를 나타낸 것이다.



(a) 전압파형



(b) 전류파형



(c) 전압 및 전류 불평형율

그림 2 3상부하가 단상부하보다 많이 사용되는 경우에서의 전압, 전류 및 불평형율

Fig. 2 Comparison of current and load unbalance factor at the heavy load

그림 2에서와 같이 3상 부하가 단상부하보다 많이 구성되어 있는 3상 4선식 배전시스템에서 간헐적으로 사용되는 단상부하에 비해 일정한 비율로 오랜 시간동안 사용되는 3상부하의 경우에는 전압 및 전류의 운전패턴이 매우 일정하게 나타나고 있다. 따라서 전압 및 전류불평형율은 매우 안정되어 있고, 허용범위도 국내의 기준에서 제시하는 범위 이내임을 확인할 수 있었다.

3상 4선식 배전시스템에 연결된 부하의 사용 비율에 따라 전압 및 전류불평형율에 큰 차이가 있음을 확인할 수 있다.

3.2 전류 및 부하 불평형율의 측정과 분석

3상 4선식 배전공급 시스템에서 단상 부하가 3상 부하보다 많이 공급되는 경우와 3상 부하가 단상 부하보다 많이 공급되는 경우에서 전자의 경우는 부하의 변화가 매우 심하므로 전압 및 전류불평형율이 매우 큰 변화를 나타내지만, 후자의 경우는 일정한 패턴으로 부하가 지속적으로 변화하기 때문에 전압 및 전류불평형율이 매우 안정적임을 알 수 있다. 따라서 같은 3상 4선식 배전시스템에서 전압 및 전류 불평형율 산출하기 위해서는 전자의 경우에 매우 많은 대책이 필요할 것이다.

그림 1, 2에서와 같이 전압불평형율은 부하의 운전패턴에 따라 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 부하의 불평형은 전류의 불평형과 밀접한 관계가 있지만, 현재 규정되어 있는 부하불평형율은 운전시간의 변화를 고려하지 않고 있다. 따라서 정확한 부하불평형의 산출을 위해서는 현장의 운전상황을 고려한 전류불평형율의 산출이 필요하다.

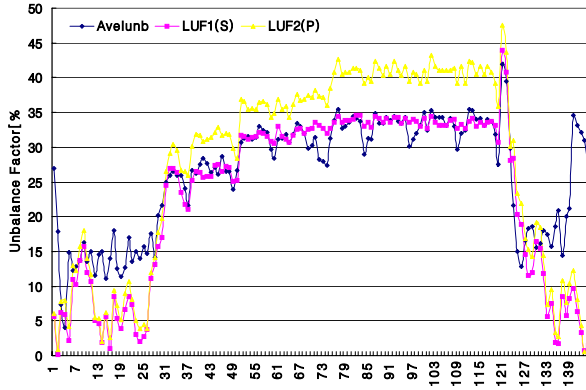
식 (9)는 식 (8)을 근거로 하여 역률을 고려하지 않고 피상 전력(S)만으로 부하불평형율을 계산한 것이고, 식 (10)은 식 (9)와 같이 역률을 고려한 유효전력(P)의 부하불평형율을 나타낸 것이다.

$$LUF_1(S) = \frac{3[\max(S_1, S_2, S_3) - \min(S_1, S_2, S_3)]}{(S_1 + S_2 + S_3)}$$

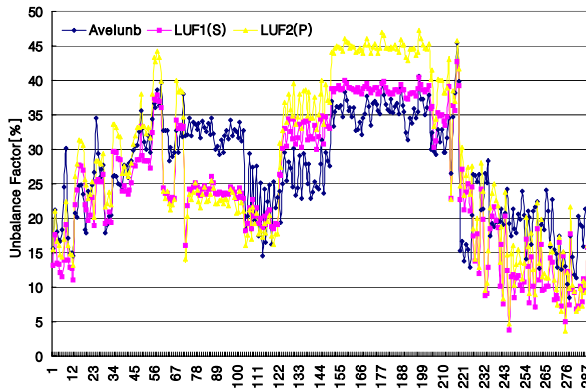
(9)

$$LUF_2(P) = \frac{3[\max(P_1, P_2, P_3) - \min(P_1, P_2, P_3)]}{(P_1 + P_2 + P_3)}$$

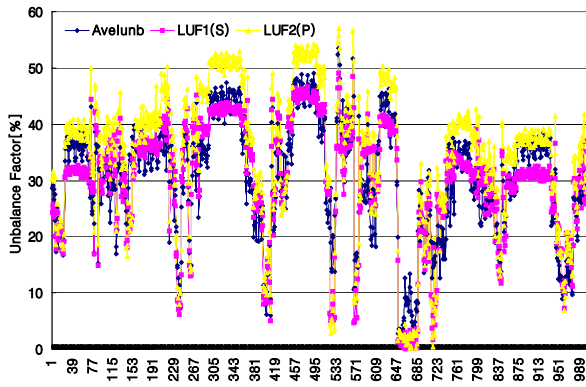
(10)



(a) 24시간 평균형률



(b) 48시간 평균형률



(c) 일주일간 불평형률

그림 3 전류 및 부하 불평형률의 비교

Fig. 3 Comparison of current and load unbalance factor

그림 3은 부하의 불평형률과 전류 불평형률의 비교한 결과이다. 분석에 이용된 자료는 10분 간격으로 24시간, 48시간 및 일주일 동안 측정된 것이다. 그림에서 x축은 데이터

개수이다.

그림 3에서와 같이 유효전력, 피상전력 및 부하전류의 변화를 통해 나타낸 각각의 불평형률에 대해서는 식 (9)에서 제시한 피상전력으로 계산하는 결과값(LUF_1)이 식 (10)의 유효전력의 계산한 결과값(LUF_2) 보다는 약간 낮게 나타났다. 부하전류만으로 계산한 결과값($aveI_{unb}$)과 거의 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 연속적인 부하의 사용시 발생하는 부하 불평형률 산출시에는 전류불평형률에 의한 방법으로도 산출이 가능함을 알 수 있다. 또한 3상 4선식에서 제한하는 부하의 불평형률을 많은 시간대에서 초과함을 알 수 있었다.

전압 및 전류불평형은 과도상태와 같이 일시적이고 매우 짧은 기간 동안 발생하는 현상이 아닌 부하의 운전동안 지속적으로 발생할 수 있는 전기품질의 하나로서 측정시 측정간격은 분단위로 설정하는 것이 바람직하고, 측정된 결과의 분석시 전압 및 전류값은 실효치값이어야 하며, 부하불평형률의 경우 설계시 적용되는 기준보다는 운전시 흐르는 전류값을 기준으로 측정하여 허용범위 초과여부를 결정하는 것이 바람직하다고 생각한다.

4. 결론

전압불평형은 주로 전원측 보다는 부하측에 의해 발생하는 확률이 높고, 부하의 운전방식에 따라 달라지는 것으로서 전압불평형이 발생할 경우 전류의 불평형으로 이어져 기기의 출력저하 및 손실증가, 진동 등 여러 가지 문제점을 발생하고 있어 외국의 경우 이에 대한 제한기준을 부하별, 전압별로 허용값을 따로 규정하고 있다. 그러나 국내의 경우 전기철도 분야에만 전압불평형률을 제시하고 있으나 국제기준의 산출방식과는 많은 차이가 있다.

전압불평형률의 산출방식에도 상전압과 선간전압에 따라 다르고, 전압의 크기뿐만 아니라 위상각을 고려한 불평형률의 산출에 따라 그 값이 다르기 때문에 가장 쉽고 보편적인 방법으로 정확한 전압불평형률을 산출하는 방법도 제시하였다. 이 방식과 동일한 방법으로 전류불평형률 및 부하 불평형률에 대한 비교를 통해 국내에서 규정하고 있는 부하의 불평형률과도 비교하였다. 비교결과 전류불평형률에 의해서도 시스템에 나타나는 부하의 불평형률을 정확하게 산출할 수 있었다.

본 연구결과는 앞으로 보다 다양한 곳의 부하를 대상으로 측정을 실시하여 전압 및 전류 불평형과 부하 불평형률의 상대적인 관계를 설계 및 부하운전 자료로 활용할 예정이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 김종겸, 박영진, 정종호, 이은웅, “불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작 특성 해석” 대한전기학회 논문지(B), 제 53권, 6호, pp.372-379, 2004.6
- [2] 김종겸, 이은웅, 박영진, “3상 4선식 부하설비의 전압불평형을 허용기준(안) 제정” 중간보고서, 2004. 9
- [3] P. Pillay and M. Manyange, "Definitions of voltage unbalance", IEEE Power Eng, Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001.
- [4] NEMA MG-1-2003, "Motors and Generators"
- [5] IEEE std 1159-1995, "IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality"
- [6] 전기설비기술기준 제 291조(전압불평형에 의한 장애방지)
- [7] 내선규정 제 115절 1항, “불평형부하의 제한”

저 자 소 개



김 종 겸 (金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1991년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 졸업 공학박사 1996년~현재 국립원주대학 전기과 부교수. 현재 당학회 B부문 및 본부 편집위원, P부문 편집위원장.

집위원, 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(공학). 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(공학). 1982년~83년, 1984년~85년 캐나다 McGill 대학 방문교수. 1987년~현재 당학회 평위원. 1995년 당학회 편집위원장 및 전기기연구회 간사장. 1995년~1997년 충남대 공대학장, 산업대학원장('96~97), 1997년~2000년 당학회 부회장. 2004년도 당학회 회장, 현재 충남대 전기공학과 교수.

Tel : 042-821-5652

E-mail : ewlee@cnu.ac.kr