

Analysis on the Characteristics of Voltage Unbalance Factor by Load Variations

金宗謙[†] · 朴永鎭* · 李殷雄**

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

Abstract - Most of the loads in industrial power distribution systems are balanced and connected to three power systems. However, in the user power distribution systems, most of the loads are single & three phase and unbalanced, generating voltage unbalance. Voltage unbalance factor is mainly affected by load system rather than stable power system. Unbalanced voltage will draw a highly unbalanced current. As a result, the three-phase currents may differ considerably, thus resulting in an increased temperature rise in the machine. This paper presents a scheme on the characteristics of voltage and current unbalance factor under the load variation at the three phase 4-wire system. Load unbalance factor is measured by the power quality measurement apparatus and compared by the current unbalance factor. Two methods are indicated similar results. The voltage unbalance factor of the three-phase 4-wire system is approved by the field measurement. Each phase has an impedance each other by the unbalanced operation pattern and give rise to voltage unbalance.

Key Words : Unbalance Voltages, Load and Current Unbalance Factor, Power Quality

1. 서 론

전기품질은 대부분 전압에 관련된 것으로 시스템에 일시적으로 영향을 주는 전압세그나 스웰, 서지와 장기적으로 영향을 주는 정전과 시스템을 운전하는 동안 지속적으로 전원측 또는 부하기에 영향을 미치는 전압불평형과 고조파가 있다[1-3]. 전압에 대한 관심의 증가는 전력 시스템내 고조파에 의한 왜란으로 고조파성분이 포함된 전류가 흐를 경우 일반 전압계로 확인이 어려운 전압왜형이 발생하여 부하에 불평형된 전류를 흐르게 한다.

전압불평형은 시스템을 운전하는 동안 전원 및 부하측의 운전특성에 따라 달라지지만 주로 부하의 운전패턴에 따라 많이 좌우된다[2,3]. 3상 4선식 배전시스템 수용가는 간선 및 분기선에 단상과 3상, 선형 및 비선형 부하를 평형에 가깝게 설계한 다음 설치하지만, 부하의 설비 증설 등에 의해 불평형이 커지거나 운전조건에 따른 전압변동이 발생하면 전압 불평형율이 발생하여 높은 전류 불평형으로 이어져 기기에 나쁜 영향을 미칠 수 있다.

산업용과 달리 빌딩등의 상업용과 소규모 설비에서는 단상 및 3상 부하에 동시에 전원공급이 가능한 3상 4선식 전

원공급설비를 많이 채용하고 있다. 이와 같은 설비에서는 부하의 운전이 간헐적이거나 반복 운전되는 경우가 많이 설비불평형율의 허용범위를 초과하는 경우가 발생할 수 있다. 외국의 경우 전압불평형에 대한 기준과 허용범위를 설정하고 있으나 우리나라의 경우 전기철도와 같은 특수한 경우에 대한 것만 언급되어 있어 다양한 부하의 종류와 운전에 따라 전압불평형의 제시가 필요하다. 따라서 설비의 운전패턴에 따른 전원의 변동을 확인하는 것은 전압불평형에 따른 영향을 최소화하기 위해 매우 중요하다.

본 논문에서는 저압 3상 4선식 부하설비에서 부하의 운전 변화시 전압불평형율의 크기를 확인하기 위해 측정을 실시하고, 현재 규정되어 있는 설비의 불평형율의 허용 범위와 비교 분석한 결과 부하의 변화가 심한 경우 전압불평형의 크기에 큰 변화가 나타남을 확인하였다.

2. 전압, 전류 및 부하 불평형율

2.1 전압불평형의 정의

전압불평형의 원인은 3상 전원에서 단상부하의 불평형 배분과 운전 및 불평형된 3상 부하 임피던스의 연결 때문이다. 또한 평형된 3상 부하라도 불평형 전원에 연결되면 유입 전류는 불평형이 된다. 따라서 3상의 각상에 서로 다른 전압강하로 전압불평형이 발생한다.

전압불평형은 대칭좌표법에 의해 구하거나 도식적으로 나타낼 수 있다. 그러나 현장에서 측정할 경우 대개 실효값으

[†] 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 10月 26日

最終完了 : 2005年 2月 23日

로 나타내지므로 간단하게 간략화한 방법도 사용하고 있다.

전압 불평형율(VUF:Voltage Unbalance Factor)은 식 (1)과 같이 정상분(V_1)에 대해 역상분(V_2)의 비율로서 정의한다[1-3].

$$VUF_1 = \frac{V_2}{V_1} \tag{1}$$

식 (1)에서 정상분 V_1 과 역상분 V_2 은 3상 불평형 선간전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 를 식 (2)와 같은 대칭성분으로서 불평형 조건하에서 유도전동기의 동작을 해석할 때 편리하다.

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

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

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

현장에서 측정된 3상 선간전압으로 전압불평형을 산출할 경우 식 (3)을 이용하면 쉽게 식 (1)과 같이 정확한 값을 구할 수 있다.

$$VUF_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \tag{3}$$

식 (3)에서 β 는 다음으로 구한 것이다.

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

상전압에 의한 대표적인 전압불평형율은 식 (4)와 같이 각 상전압과 평균전압의 최대차를 평균전압으로 나누어 나타낸다.

$$VUF_3 = \frac{\max(|V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}|)}{V_{avg}} \tag{4}$$

식 (4)에서 $V_{avg} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c)$ 이다.

전압불평형율 식 (1), (3) 및 (4)로 계산할 수 있지만, 식(4)의 경우 위상차가 존재할 경우 오차가 발생하여 3상 4선식 시스템에서의 사용이 부적합하다. 실제 전압 크기만의 측정으로 정확한 전압불평형율을 산출할 수 있는 식 (2)가 가장 널리 사용되고 있다.

2.2 부하 불평형에 따른 전압, 전류 벡터도

저압수용가에 사용되고 있는 3상 시스템에서 전등 및 전열과 동력을 함께 사용하는 경우에는 중성선이 포함된 3상 4선식 방식을 이용하지만, 공장등과 같이 동력용 부하를 전용으로 사용하는 경우에는 3상 3선식 wye방식을 많이 사용하고 있다.

그림 1은 3상 시스템에서 상전압과 선간전압사이의 이상적인 관계를 나타낸 것으로서 정상적인 운전조건시 상전압과 선간전압은 크기가 모두 같고, 각 상은 서로 120° 위상차를 이룬다. 그러나 전압변동시 위상차(phase shift)는 시스템에서 발생하는 매우 복잡한 현상으로 전압 위상각의 변화는 배전시스템의 임피던스와 부하 또는 고장 전류사이에서의 상호관계로 발생한다.

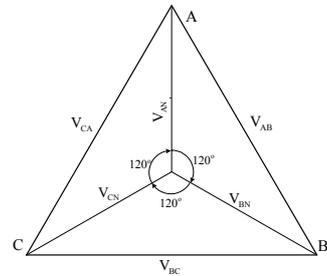
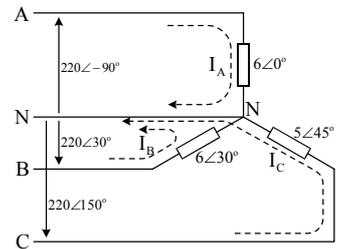
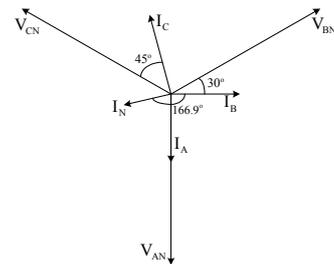


그림 1 phase shift
Fig 1 phase shift

3상 3선식이나 3상 4선식 시스템의 경우 각 상에서의 전류분담이 달라질 경우 위상차는 존재한다. 그림 2(a)에서와 같은 3상 4선식에서 부하가 불평형이면 각각에 걸리는 상전압은 같아도 그림 2(b)의 벡터도와 같이 전류값은 다르고, 각 상의 위상차는 120°가 아니며 중성선에는 전류가 흐른다.



(a) 3ph-4 wire system



(b) Phasor diagram

그림 2 3상 4선식 시스템 및 벡터도

Fig 2 3Phase 4wire System and Vector Diagram

부하의 불평형에 의해 각 상에 흐르는 전류는 식 (5)와 같이 크기가 다르고 위상차는 비대칭이다.

$$\begin{aligned}
 I_A &= \frac{V_{AN}}{Z_A} = \frac{220 \angle 90^\circ}{6 \angle 0^\circ} = 36.67 \angle -90^\circ \\
 I_B &= \frac{V_{BN}}{Z_B} = 36.67 \angle 0^\circ \\
 I_C &= \frac{V_{CN}}{Z_C} = 44 \angle 105^\circ
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

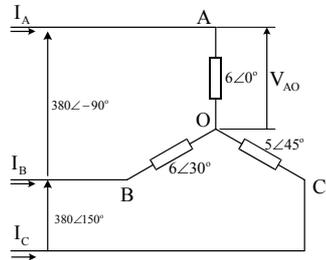
따라서 부하의 불평형에 의해 중성선에 흐르는 전류는 각 상전류의 합으로서 식 (6)과 같다.

$$I_N = -(I_A + I_B + I_C) = 25.94 \angle -166.9^\circ
 \tag{6}$$

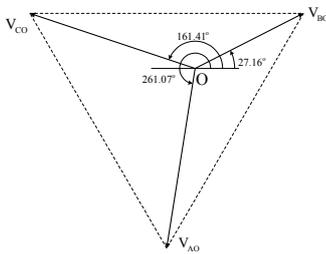
3상 4선식에서 부하의 불평형으로 식 (6)에 나타난 값만큼 이 중성선에 흐르는데 특히 비선형부하의 사용시 3고조파 성분이 매우 높아진다.

3상 4선식에서 중성선이 접지되어 있지 않을 경우 대지가 기준이 아니므로 시스템은 플로팅된 것으로 간주할 수 있지만, 중성선이 접지된 경우에는 대지로 전류가 흐르지 않으므로 중성점 전압은 제로이다.

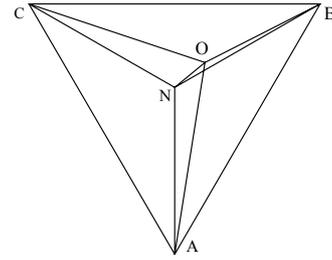
그림 3(a)는 불평형된 wye 부하에 연결된 A, B 및 C의 세 부하임피던스의 공통점이 중성선 라인이 아니므로 N 대신에 "O"를 표시하였다. 세 부하 임피던스에 걸리는 전압은 그림 3(b)의 등변 삼각형에서와 같이 라인에서 중성선에 이르기까지 변화가 가능한 것을 알 수 있다. 특히 관심을 갖는 것은 그림 3(c)와 같이 중성점 전압의 변이가 N에서 "O"로 이동이다.



(a) 3ph-3 wire system



(b) 3상 전압 벡터도(1)



(c) 3상 전압 벡터도(2)

그림 3 3상 3선식 wye 시스템 및 벡터도

Fig 3 3Phase 3wire Wye System and Vector Diagram

그림 3(a)에서와 같이 중성점 N이 O로 이동한 경우 중성 전압의 변동을 구하기 위해서는 부하전압 및 어드미턴스에 의해 라인전류를 구하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 I_A &= V_{AO} Y_A \\
 I_B &= V_{BO} Y_B \\
 I_C &= V_{CO} Y_C
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

그림 3(a)에서 점 O에 키르히호프법칙을 적용하여 정리하면 식 (8) 및 (9)가 된다.

$$I_A + I_B + I_C = 0
 \tag{8}$$

$$V_{AO} Y_A + V_{BO} Y_B + V_{CO} Y_C = 0
 \tag{9}$$

그림 3(c)의 벡터도와 같이 부하 어드미턴스에 걸리는 전압 V_{AO} , V_{BO} 및 V_{CO} 는 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{AO} &= V_{AN} + V_{NO} \\
 V_{BO} &= V_{BN} + V_{NO} \\
 V_{CO} &= V_{CN} + V_{NO}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

식 (9)에 (10)을 대입하여 정리하면 불평형 부하에 의한 변이 중성 전압 V_{ON} 은 식 (11)과 같이 전압과 어드미턴스로 나타낼 수 있다.

$$V_{ON} = \frac{(V_{AN} Y_A + V_{BN} Y_B + V_{CN} Y_C)}{(Y_A + Y_B + Y_C)}
 \tag{11}$$

여기서 V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} 는 각상의 무부하 전압이고, Y_A , Y_B , Y_C 는 부하의 어드미턴스이다. Y 결선 중압과 중성선이 완전하게 서로 연결된 경우에는 V_{ON} 는 제로가 된다. 실제 그림 3(a)와 같은 조건에서 변이 중성전압 V_{ON} 은 51.35[V]로 매우 높은 편이다.

그림 3(c)와 같은 벡터도에서 전압불평형율은 식 (12)와 같다.

$$VUF_4 = \frac{V_{ON}}{V_{AN}}$$

(12)

식 (4)와 식 (12)로 계산한 전압불평형율은 23[%]로서 값이 매우 허용범위를 매우 초과하는 값이다.

그림 2, 3에서와 같이 3상 wye의 중성선을 가지는 경우 상전압이 같더라도 부하가 불평형이면 중성선에 높은 전류가 흐르게 되고, 중성선이 없는 3선식의 경우에는 같은 전압 조건에서 부하의 불평형에 의해 전압의 중성점이 이동하여 높은 전압불평형이 발생함을 알 수 있다.

2.3 전류 및 부하 불평형율

수용가의 3상 4선식 배전공급 시스템에서 단상 부하가 3상 부하보다 많이 공급되는 경우와 3상 부하가 단상 부하보다 많이 공급되는 경우가 매우 흔하다. 전자의 경우는 부하의 변화가 매우 심하므로 전압 및 전류불평형율이 매우 큰 변화를 나타내지만, 후자의 경우는 일반적으로 일정한 패턴으로 부하가 지속적으로 변화하기 때문에 전압 및 전류불평형율이 매우 안정적이다. 따라서 같은 3상 4선식 배전시스템에서 전압 및 전류불평형율 산출하기 위해서는 전자의 경우에 매우 많은 대책이 필요하다.

그러나 부하 즉 설비의 불평형율(LUF:Load Unbalance Factor)은 식 (13)과 같이 총부하설비용량 평균치에 대해 각 선간에 접속하는 단상 부하 총설비용량(VA)의 최대와 최소의 차의 비로 표현하고 있다[4].

$$LUF = \frac{\text{각 선간에 접속되는 단상 부하 총설비용량의 최대와 최소의 차}}{\text{총설비설비용량의 1/3}} \quad (13)$$

식 (14)는 식 (13)을 근거로 하여 역률을 고려하지 않고 피상 전력(S)만으로 부하불평형율을 계산한 것이고, 식 (15)는 식 (13)과 같이 역률을 고려한 유효전력(P)의 부하불평형율을 나타낸 것이다.

$$LUF_1 = \frac{3[\max(S_1, S_2, S_3) - \min(S_1, S_2, S_3)]}{(S_1 + S_2 + S_3)} \quad (14)$$

$$LUF_2 = \frac{3[\max(P_1, P_2, P_3) - \min(P_1, P_2, P_3)]}{(P_1 + P_2 + P_3)} \quad (15)$$

전압불평형율은 부하의 운전패턴에 따라 큰 차이가 있고, 부하의 불평형은 전류의 불평형과 밀접한 관계가 있지만, 현재 규정되어 있는 부하불평형율은 운전시간의 변화를 고려하지 않고 있다. 따라서 정확한 부하불평형의 산출을 위해서는 현장의 운전상황을 고려한 전류에 의한 부하불평형율의 산출이 필요하다.

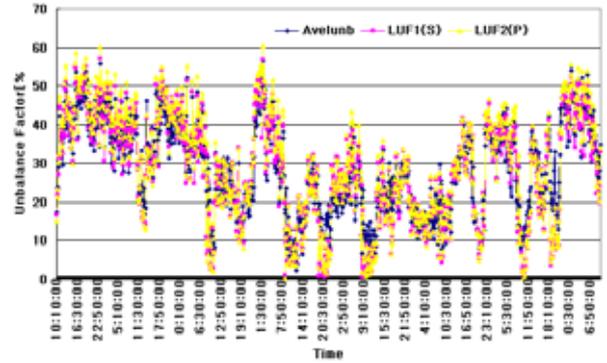
시간대별로 변동하는 부하의 운전상황을 고려한 불평형율을 산출할 수 있는 전류불평형율(CUF:Current Unbalance Factor)은 전압불평형율과 같이 식 (16)으로 산정할 수 있다.

$$CUF = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\delta}}{1 + \sqrt{3 - 6\delta}}} \quad (16)$$

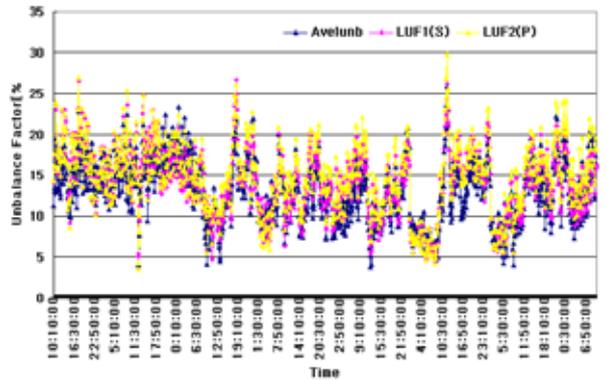
식 (16)에서 δ 는 다음과 같이 각 상의 전류로 표현된다.

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

그림 4는 부하의 불평형율과 전류 불평형율을 비교한 것이다. 분석에 이용된 자료는 10분 간격으로 일주일 동안 측정된 것으로 3상 4선식에서 단상부하가 많이 사용되는 것과 3상 부하가 많이 사용되는 두 가지를 비교한 것이다.



(a) 단상부하중심



(b) 3상 부하중심

그림 4 전류 및 부하불평형율의 비교

Fig 4 Comparison of Current & Load Unbalance Factor

그림 4에서와 같이 부하의 불평형율에 대한 평균전류, 피상 및 유효전력에 의한 비교에서 유효전력에 의한 불평형율의 값이 약간 높게 나타나고, 피상전력과 유효전력에 의한 부하 불평형율은 거의 같이 나타난다. 따라서 부하의 변화에 따른 불평형율의 계산은 전류불평형율에 의한 방법으로도 산출이 가능함을 확인할 수 있다. 그림 4의 측정결과에서 알 수 있듯이 3상 중심부하 보다는 단상중심의 부하가 집중된 곳에서 부하불평형율의 허용범위 30%를 초과하는 시간대가 매우 많음을 알 수 있다.

3. 측정 및 결과 분석

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 문제가 될 수 있다.

전압불평형율은 대개 전원측 보다는 부하측에 사용되는 기기의 임피던스에 의해 주로 발생한다. 3상 4선식과 같은 시스템의 설계시 부하의 불평형율은 30%이하로 제한하고 있지만, 부하의 종류와 사용시간대에 따라 임피던스가 달라 지므로 전압불평형율이 발생할 수 있다.

그림 5는 부하의 변화에 따른 전압불평형을 측정하기 위한 구성도로서 측정에 사용된 계측기는 HIOKI의 전력품질 분석기 모델 3196이다.

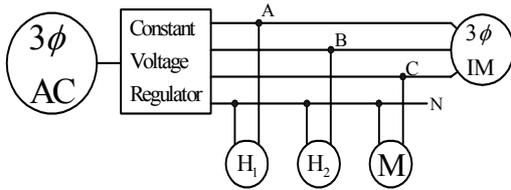
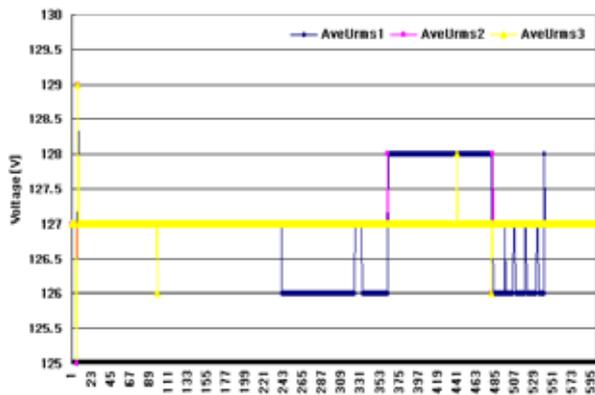


그림 5 부하변동시험장치도
Fig 5 Schematic Diagram of Load Variation Test

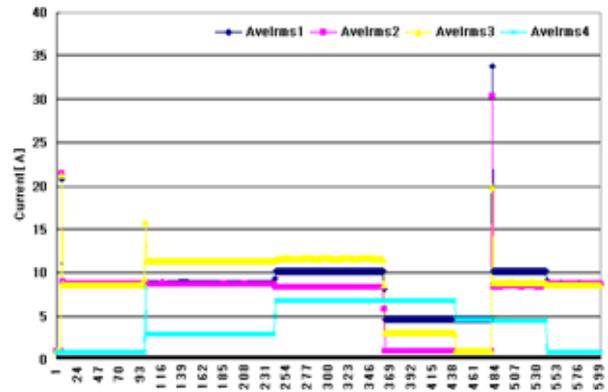
그림 5에서 단상부하는 용량이 서로 다른 전열 2개 ($H_1 = 1.2\text{kW}$, $H_2 = 1.5\text{kW}$)와 단상유도전동기 ($M = 1Hp$) 그리고 3상부하는 유도전동기(= 2.2kW)로 각각 상 및 선간에 연결하였고, 부하의 변화에 관계없이 항상 일정한 전압을 공급할 수 있도록 일정전원 공급장치(CVR)를 설치하였다.

그림 6, 7은 부하의 변동에 따른 전압, 전류파형 및 불평형율을 측정한 것이다. 전압 및 전류불평형율은 각각 식 (3)과 (6)을 이용하였다.

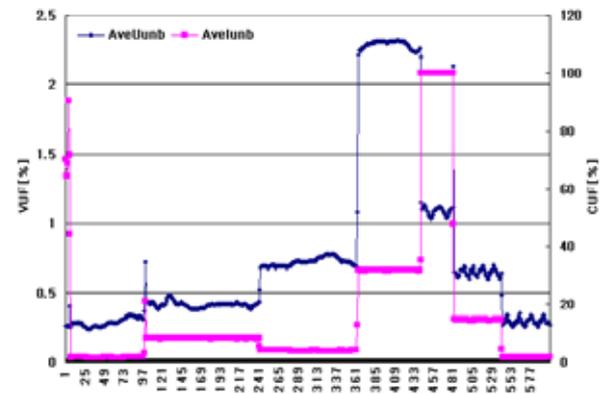
그림 6은 1초 간격으로 10분 동안 부하의 운전과 정지를 통해 부하변동에 따른 전압, 전류 및 불평형율을 측정한 것이다.



(a) 전압파형



(b) 전류파형

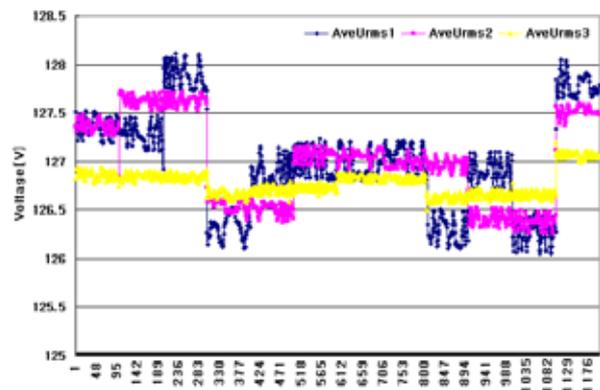


(c) 전압 및 전류 불평형율

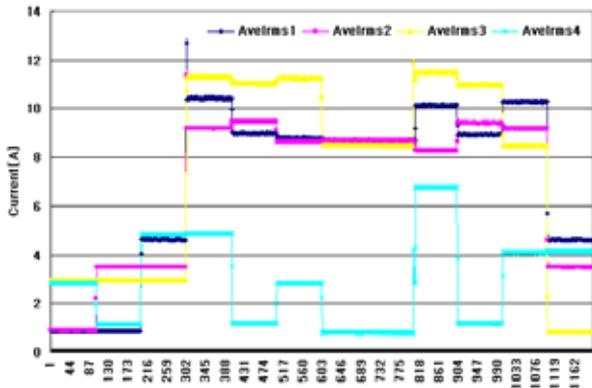
그림 6 전압, 전류 파형 및 전압·전류 불평형율
Fig. 6 Voltage & current waveform & voltage · current unbalance factor

그림 6에서와 같이 각상에 흐르는 전류값이 일정한 경우 전압불평형율은 낮지만 부하전류값에 차이가 많을 경우 전압불평형율이 매우 높게 나타난다. 특히 상별 전류값의 크기에 차이가 많을 경우 전압 및 전류불평형율이 높은 편임을 알 수 있다.

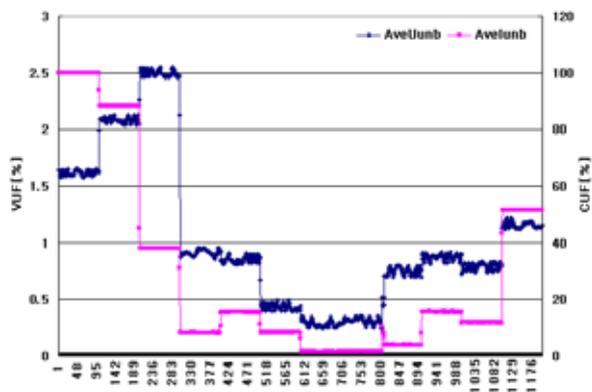
그림 7은 측정간격을 3초로 하고, 5분 간격의 부하운전변화를 통해 1시간동안 전압, 전류파형 및 불평형율을 측정한 것이다.



(a) 전압파형



(b) 전류파형



(c) 전압 및 전류 불평형율

그림 7 전압, 전류 파형 및 전압·전류 불평형율
Fig. 7 Voltage & current waveform & voltage · current unbalance factor

그림 7에서도 알 수 있듯이 단상부하만의 운전시 전압 및 부하의 불평형은 매우 높게 나타나지만 단상부하보다 용량이 다소 큰 3상 부하의 혼합 운전시 전압 및 부하의 불평형율은 매우 안정됨을 알 수 있다.

3상 4선식 배전시스템에서 각 상에 걸리는 부하의 용량변동에 따라 전압불평형율의 변화를 구하기 측정결과에서 전압은 일정하지만 각상의 부하임피던스의 변화에 따라 전압 불평형율이 변화함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 저압 수용가 설비에서 많은 채택되고 있는 3상 4선식 배전시스템에서 부하의 운전패턴에 따른 전압, 전류 및 부하 불평형율의 변화를 계산식의 유도과 측정을 통해 그 변화율을 분석하였다.

부하 불평형율은 설계시보다 운전시에 변화가 크고 부하의 불평형율은 전류의 불평형율에 의한 계산결과와 비교하여 그 결과의 타당성을 입증하였으며, 앞으로 운전 상태에 따른 부하의 불평형율은 전류의 불평형율로 적용이 가능함을 확인하였다. 3상 4선식에서 규정하고 있는 설비불평형율의 허용범위를 단상부하의 사용비중이 높은 곳에서는 많은 시간대에서 초과되고 있음을 입증하였다.

전압불평형율은 전원측 보다는 부하측에서의 변화에 의해 주로 발생하는 것을 증명하기 위해 3상 4선식 시스템에 각상의 부하 임피던스를 각각 달리하고, 운전시간대별로 변화시키면서 전류와 전압불평형율을 측정하였다. 3상부하의 용량이 단상부하보다 많은 곳에서는 전압 및 부하불평형율이 낮지만, 단상부하의 용량이 주로 사용되는 시간대에서는 불평형율의 크기가 매우 높아짐을 확인할 수 있었다. 따라서 3상 4선식 배전시스템에서 전압불평형율을 줄이기 위해서는 3상 부하와 단상부하의 공급을 분리운영하는 부하공급 시스템 설계가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 산업자원부 및 한국전력공사
의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감
사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] P. Pillay and M. Manyange, "Definitions of voltage unbalance", IEEE Power Eng, Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001.
- [2] 김종겸, 이은웅, "불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, pp. 285-291, 2002.6
- [3] 김종겸, 이은웅, 이동주, "불평형 전압으로 운전하는 비선형 부하의 고조파 특성분석", 대한전기학회 논문지 (B), 제 52권, 10호, pp. 491-500, 2003.10
- [4] 내선규정 제 115절, "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

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(공학박).



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 전기
공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공
학과 졸업(공학). 1982년~83년, 1984
년~85년 캐나다 McGill 대학 방문교수.
1987년~현재 당학회 평위원. 1995년 당
학회 편집위원장 및 전기기연구회 간사

장. 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