전압, 전류 및 부하 불평형율에 대한 비교 연구

(The Comparison Study for Voltage, Current and Load Unbalance Factor)

김종겸*·박영진*·정종호**·이은웅***

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Jong-Ho Park · Eun-Wong 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 unclean 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.

1. 서 론

전기품질은 주로 전압품질과 관련되어 있다. 전압품질의 변화는 전류의 변화로 이어져 손실증가와 출력감소, 시스템의 신뢰성을 나추는 요소로서 생산의 차질까지 빚을 수 있으므로 이에 대한 기준의 설정이 매우 중요하다. 외국의 경우 전압불평형에 대한 기준을 전압별, 측정단자 및 측정기간에 따라 제한을 두고 있고, 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 불평형율과 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 중요하다. 따라서 본 논문에서는 전압불평형율과 부하불평형율의 상관 관계를 수식적으로 설명하고, 현장 측정 결과에 대해 전류와 부하불평형율의 산출방식에 대해서도 비교 분석결과를 제시하고자 한다.

2. 전압, 전류 및 부하불평형율

2.1 전압불평형율

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 전류불평형으로 이어져 부하기기에 손질의 증가로 출력감소와 기기의 소음증가로 시스템의 신뢰도를 떨어뜨린다[1-8].

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[2].

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

$$VUF_1 = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_o}{V_1} \quad (1)$$

식 (1) 에서 V_1, V_2, V_0 는 다음과 같다.

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

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

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

일정기간동안의 전압불평형율을 찾아내기 위해서는 각 상의 선간전압의 크기만으로 계산이 가능한 식 (2)를 사용한다. 식 (2)는 각 상의 전압만 알 경우 전압불평형율 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 γ는 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 재개정한 IEEE Std.1159에서는 정상분과 역상분 비율과 이들과의 문제점을 재정립하여 나타내고 있다 [7-10].

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

식 (2)는 선간전압 대신에 각 상전압을 평균전압차에서 최대값을 찾은 다음 평균값으로 나누어 구하는 방법이다.

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

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

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

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

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

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

개략적인 방법으로서는 다음 식 (6)과 같이 부하의 피상전력 S_L 과 전원회로의 단락전력 S_{SC} 으로 계산하는 경우방법으로서 대용량의 수전설비에서 적용되고 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 발생되는 문제를 줄이기 위함이다. 명시된 전압불평형율의 계산법은 다음과 같이 3가지로 구분하고 있다[11].

(1) 단상 결선인 경우

$$K_1 = ZP \times 10^{-4} \quad (7)$$

여기서 K는 백분율로 표시한 전압 불평형율, Z는 변전소의 수전점에서의 3상 전원계통의 10,000[kVA]를 기준으로 하는 퍼센트 임피던스 또는 퍼센트 리액턴스, P는 전기철도용 급전 전구역에서의 연속 2시간의 평균부하(kVA를 단위로 한다)

(2) T 결선인 경우

$$K_2 = Z(P_A - P_B) \times 10^{-4} \quad (8)$$

여기서, P_A, P_B는 각각의 전기철도용 급전 구역에서의 연속 2시간의 평균부하(kVA를 단위로 한다)

(3) V 결선인 경우

$$K_3 = Z\sqrt{P_A^2 - P_A P_B + P_B^2} \times 10^{-4} \quad (9)$$

우리나라의 경우 일반 수용가 부하에 대한 내용은 규정되어 있지 않고, 전기설비기술기준 제 291조에 전압불평형에 의한 장해 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, 측정장소 및 부하의 운전특성에 따라 약간의 차이가 있다.

표 1 전압불평형율 허용범위

관련규격	허용범위 [%]	비 고
NEMA	1.0	at the motor terminals
IEC-3000-3-x, EN 50160	<2.0(LV,MV)	measured as 10-minute values, with instantaneous maximum of 4%
	<1 (HV)	
IEEE	0.5~2.0	steady state
EDF France	2	
ANSI	0~3	no-load conditions
EN50178	2	(V_o/V_1비대칭)
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
일본전기 공업회	2.8	정상운전시, 장기간 수명보장을 위해서는 1[%]이하
전기설비 기술기준	3	변압기의 결선방식에 따라 계산하여 변전소 수전점에서

2.2 전류불평형율과 부하불평형율

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

$$CUF = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\delta}}{1+\sqrt{3-6\delta}}} \quad (10)$$

식 (10)에서 δ는 다음과 같이 각 상의 전류로 표현된다.

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

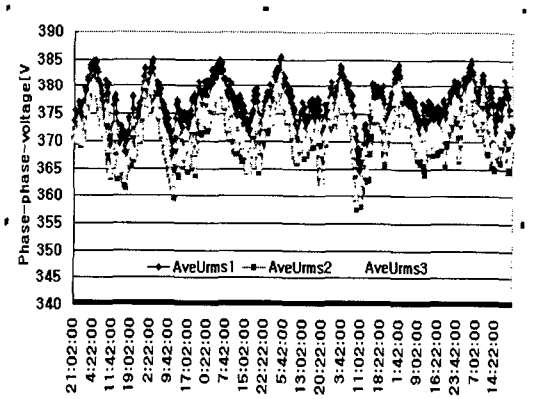
그러나 부하 즉 설비의 불평형율(LUF:Load Unbalance Factor)은 식 (11)과 같이 각 선간에 접속하는 단상 부하 총설비용량(VA)의 최대와 최소의 차와 총 부하설비용량 평균치의 비로 표현하고 있다.

$$LUF = \frac{\text{각 선간에 접속되는 단상부하 총설비용량의 최대와 최소의 차}}{\text{총설비설비용량의 } 1/3} \times 100 \quad (11)$$

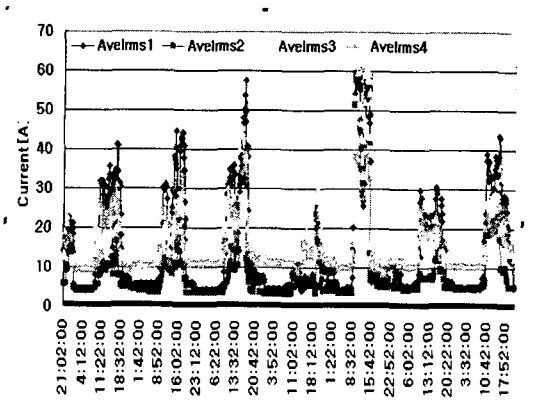
저압으로 수전하는 단상 3선식에서의 부하불평형율은 부득이한 경우 40%까지 그리고 3상 3선식 또는 3상 4선식으로 수전하는 설비에서 불평형율은 30%이하로 유지함을 원칙으로 하고 있다.

2.3 측정결과

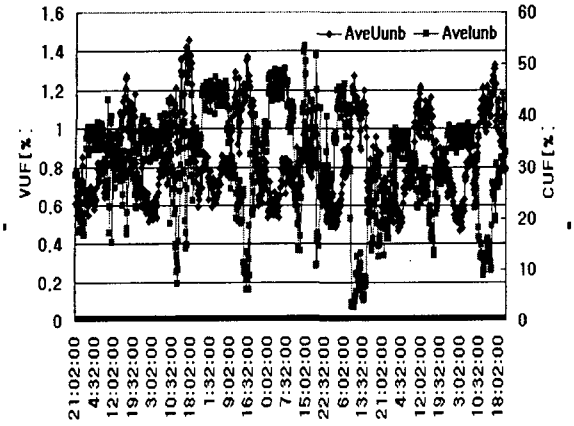
3상 4선식 부하설비에서 부하의 운전에 따른 불평형율에 대한 측정은 단상부하의 비율이 3상 부하의 용량보다 높은 경우와 반대로 3상 부하의 사용비율이 단상 용량보다 높은 경우에 대해 측정하였다. 측정은 10분 간격으로 일주일간 실시하였다.



(a) 전압파형



(b) 전류파형

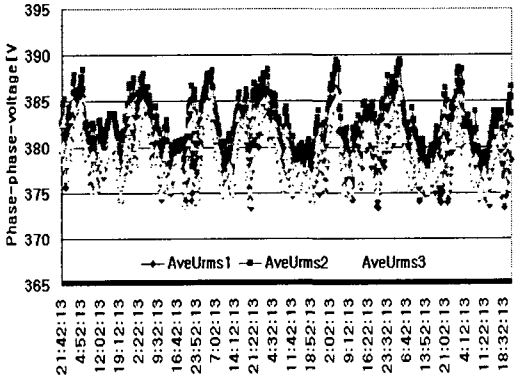


(c) 전압 및 전류 불평형율

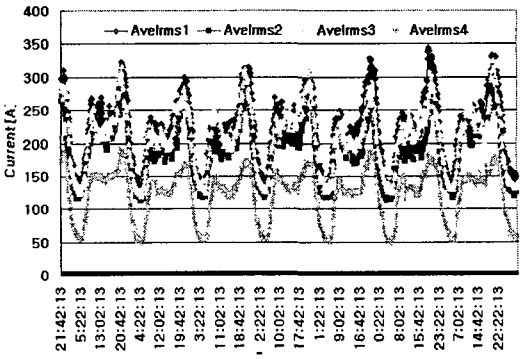
그림 1. 단상부하가 3상 부하보다 많이 사용되는 경우에서의 전압, 전류 및 불평형율

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 각 상의 부하전류가 상대적으로 차이가 많아 중성선에 흐르는 전류가 다른 상의 전류에 비해 매우 높은 값을 지니는 것을 확인할 수 있었다.

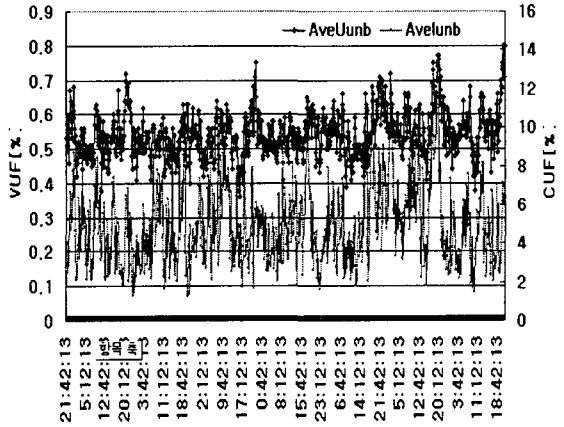
그림 2는 3상 4선식 부하공급 시스템의 PCC에서 3상 부하가 단상부하보다 많이 사용되는 경우의 측정결과를 나타낸 것이다.



(a) 전압파형



(b) 전류파형



(c) 전압 및 전류 불평형율

그림 2. 3상부하가 단상부하보다 큰 경우에서의 전압,전류 및 불평형율

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

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 전류불평형율 산출하기 위해서는 전자의 경우에 매우 많은 대책이 필요할 것이다.

그림 1, 2에서와 같이 전압불평형율은 부하의 운전패

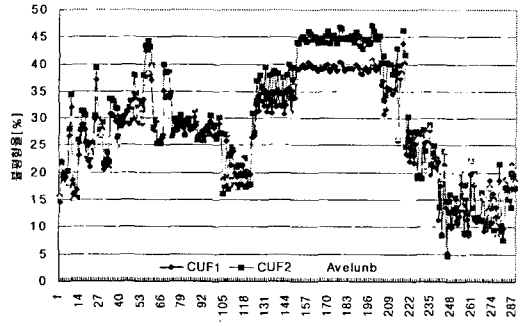
턴에 따라 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 부하의 불평형은 전류의 불평형과 밀접한 관계가 있지만, 현재 규정되어 있는 부하불평형율은 운전시간의 변화를 고려하지 않고 있다. 따라서 정확한 부하불평형의 산출을 위해서는 현장의 운전상황을 고려한 전류불평형율의 산출이 필요하다.

식 (12)는 식 (11)을 근거로 하여 역률을 고려하지 않고 피상전력(S)만으로 부하불평형율을 계산한 것이고, 식 (13)은 식 (11)과 같이 역률을 고려한 유효전력(P)의 부하불평형율을 나타낸 것이다.

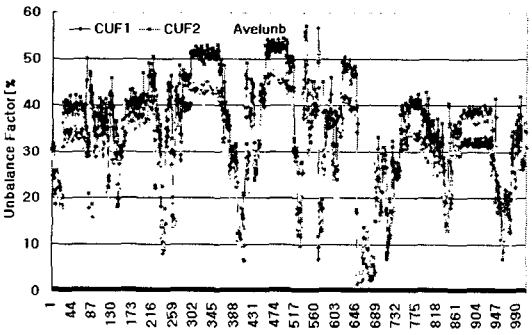
$$CUF_1 = \frac{3[\max(S_1,S_2,S_3) - \min(S_1,S_2,S_3)]}{(S_1+S_2+S_3)} \quad (12)$$

$$CUF_2 = \frac{3[\max(P_1,P_2,P_3) - \min(P_1,P_2,P_3)]}{(P_1+P_2+P_3)} \quad (13)$$

그림 3은 부하의 불평형율과 전류 불평형율의 비교한 결과이다. 분석에 이용된 자료는 10분 간격으로 24시간, 48시간 및 일주일 동안 측정한 것이다.



(b) 48시간 동안의 불평형율



(c) 일주일 동안의 불평형율

그림 3. 전류 및 부하 불평형율의 비교

그림 3에서와 같이 유효전력, 피상전력 및 부하전류의 변화를 통해 나타낸 각각의 불평형율에 대해서는 식 (12)에서 제시한 피상전력으로 계산하는 결과값(CUF_1)이 식 (13)의 유효전력의 계산한 결과값(CUF_2) 보다는 약간 낮게 나타났으며, 부하전류만으로 계산한 결과값 ($aveI_{unb}$)과 거의 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 연속적인 부하의 사용시에 발생하는 부하 불평형율 산출시에는 전류불평형율에 의한 방법으로도 산출이 가능함을 알 수 있다. 또한 3상 4선식에서 제한하는 부하의 불평형율을 많은 시간대에서 초과함을 알 수 있었다.

3. 결 론

전압불평형은 주로 전원측 보다는 부하측에 의해 발생하는 확률이 높은 것으로서 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 규정하고 있다. 그러나 국내의 경우 전기철도 분야에만 전압불평형율을 제시하고 있으나 국제기준의 산출방식과는 많은 차이가 있다.

전압불평형율의 산출방식에도 상전압과 선간전압에 따라 다르고, 전압의 크기뿐만 아니라 위상각을 고려한 불평형율의 산출에 따라 그 값이 다르기 때문에 가장 쉽고 보편적인 방법으로 정확한 전압불평형율을 산출하는 방법도 제시하였다. 이 방식과 동일한 방법으로 전류불평형율 및 부하 불평형율에 대한 비교를 통해 국내에서 규정하고 있는 부하의 불평형율과도 비교하였다. 비교결과 전류불평형율에 의해서도 시스템에 나타나는 부하의 불평형율을 정확하게 산출할 수 있었다.

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

감사의 글

본 연구는 2003년도 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 논

문지(B), 제 53권, 6호, pp.372-379, 2004.6
[2] 김종겸, 이은웅, 박영진, "3상 4선식 부하설비의 전압불평형율 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] 김종겸, 박영진, 이은웅, "3상 4선식 수용가의 전압불평형율 측정 분석", 한국조명·전기설비학회 춘계학술대회, pp.43-47, 2004. 5
[5] 김종겸, 이은웅, "불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, pp. 285-291, 2002.6
[6] NEMA MG-1-2003, "Motors and Generators"
[7] 김종겸, 이은웅, "저압 시스템에서 비선형 부하의 사용에 따른 전류 고조파 해석 및 측정", 대한전기학회 논문지(B), 제 50권, 12호, pp.601-608, 2001.12
[8] 김종겸, 이은웅, 이동주, "불평형 전압으로 운전하는 비선형 부하의 고조파 특성분석", 대한전기학회 논문지(B), 제 52권, 10호, pp. 491-500, 2003.10
[9] IEC 61000-4-30, "Testing and measurement techniques-Power quality measurement method", 2003.2
[10] IEEE std 1159-1995, "IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality"
[11] 전기설비기술기준 제 291조(전압불평형에 의한 장해방지)