

## 전압불평형율의 비교분석

김중겸, 박영진, 이은웅  
원주대학, 원주대학, 충남대학

### Comparison & Analysis of Voltage Unbalance Factor

Kim Jong-Gyeum, Park Young-Jeen, Lee Eun-Woong  
Wonju National College, Wonju National College, Chungnam Univ

**Abstract** - 단상 및 3상 부하를 동시에 공급할 수 있는 3상 4선식 배전시스템은 일반 수용가 및 상업용, 공장 등의 시설에 널리 적용되고 있다. 한대의 변압기로 전력을 공급할 수 있으므로 작은 공간과 시스템 구성의 간편함이 장점이지만, 부하 운전패턴의 다양화와 컴퓨터 및 가변속 드라이브와 같은 비선형부하의 사용 증가시 전압 불평형에 의한 문제점 발생은 큰 문제가 되고 있다. 외국의 경우 전압불평형에 의한 영향을 줄이기 위해 전압별 또는 부하의 종류에 따라 전압불평형율에 대한 규정을 제시하고 있으나, 국내에서는 전기철도와 같은 대형 부하에서만 전압불평형율의 기준만 정립되어 있고, 선형 및 비선형부하에 대해서는 규정이 제시되어 있지 않아 점차 증가하는 다양한 부하의 종류에 효율적으로 대처하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 국내의 전압불평형율에 대한 기준의 비교와 측정방법에 대한 내용을 제시하고자 한다.

## 1. 서 론

산업사회의 발달과 정보화기기의 확대보급에 따라 전기품질에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 전기품질은 과도현상과 같이 일시적으로 발생하는 것과 고조파 및 불평형과 같이 지속적으로 발생하여 부하에 영향을 미치는 것이 있다.

부하에 전원을 공급하는 방식은 용량에 따라 단상과 3상으로 분류할 수 있다. 용량이 작을 경우 대개 단상, 용량이 클 경우 3상을 주로 사용하지만, 공급하는 변압기를 2뱅크로 구성해야 하므로 경제적인 문제로 인해 단상과 3상을 동시에 공급 가능한 1뱅크 시스템의 3상 4선식 배전시스템을 많이 적용하고 있다. 산업용의 경우 대부분 동력과 일반 전등, 전열 부하를 분리 사용하므로 별 문제는 없지만, 가정용 및 일반 건물에는 부하의 운전패턴이 일정하지 않고, 단상 및 3상을 함께 사용하고 또한 컴퓨터와 같은 비선형부하의 사용이 많아 부하 불평형과 고조파에 대한 영향이 높아지고 있다. 전압불평형은 고조파와 같이 부하의 운전중에만 발생하는 것으로서 전류 불평형을 증가시켜 기기의 출력특성을 줄이고, 시스템의 신뢰도를 떨어뜨리고 있다[1,2].

전압불평형율의 증가에 따른 영향을 줄이기 위해 단상 부하의 용량이 매우 크고, 비중이 높을 시스템의 경우에 전압불평형율은 3%까지 허용하고 있지만, 대부분의 경우 2%이하 또는 그 이하로 제한하고 있다. NEMA에서는 유도전동기의 정격 출력 보장을 위해 전동기 입구단에서의 전압불평형율은 1%이하가 되도록 요구하고 있다. 그러나 컴퓨터와 같은 단상 비선형부하가 많은 경우 5%까지 허용하는 경우도 있다[1,2,3].

전압불평형율의 크기뿐만 아니라 산정방식도 규격에 따라 달리 표현하고 있다. 대부분의 경우 선간전압에 의한 방식의 산정으로 전압불평형율을 계산하지만, 일부에서는 상전압에 의한 계산방식도 정의하고 있다. 위상각의 변화를 고려하지 않고, 전압의 크기에 따라 계산할 경우 상전압과 선간전압에 의한 전압불평형율의 계산결과와는 동일하지만, 위상각의 고려시는 다른 결과를 나타낸다. 따라서 전압불평형율 산정을 위해서는 전압의 크기와 위상각을 고려한 시스템의 해석이 매우 중요하다. 그러나 대부분의 경우 측정기로는 전압의 크기만을 나타내므로 전압의 크기만으로 정확한 전압불평형율의 산정을 구하는 것이 매우 중요하다.

## 2. 전압불평형율 정의, 기준 및 측정방법

### 2.1 전압불평형율의 정의

전압불평형은 전력공급 시스템에서 불균형의 부하분배나 고르지 못한 임피던스에 의해 주로 발생한다. 부하에 의한 전압불평형은 대개 부하의 형태 및 3상 전원을 사용하는 수용가와 밀접한 관련이 있다. 전압불평형율은 전압의 크기와 위상각에 따라 달라진다. 현장 측정시 대개 3상 전압은 한상을 기준으로 나머지 2상의 크기와 위상각으로 표현할 경우 비대칭의 경우가 매우 많이 발생한다[2].

전압불평형에 의한 영향을 해석하기 위한 불평형율은 상전압과 선간전압만을 고려한 경우와 위상각을 포함한 해석에 따라 그 값이 달라진다. 식 (1)은 선간전압의 크기를 대칭좌표법으로 분해하여 정상분( $V_1$ )에 대해 역상분( $V_2$ )의 비율로 전압불평형율을 표현한 것이다[1-3].

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

3상 4선식에서 부하의 불평형은 전선 중성선에 흐르는 전류의 영향으로 3상 전압의 위상각이 비대칭일 경우 전압불평형율은 식 (1)의 계산에 어려움이 있어 식 (2)와 같이 선간전압의 크기만으로도 불평형율을 계산할 수 있다.

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

식 (2)에서  $\beta$ 는 다음과 같다.

$$\beta = \frac{|V_a|^4 + |V_b|^4 + |V_c|^4}{(|V_a|^2 + |V_b|^2 + |V_c|^2)^2}$$

전압불평형율의 계산결과는 식 (1)과 (2)가 동일하지만 식 (1)에 의한 복잡한 것보다는 식 (2)와 같이 바로 확인 가능한 방법을 널리 사용하고 있다.

상전압에 의한 전압불평형율의 산정은 식 (3)~(5)와 같은 세 가지 방법이 제시되어 있다. 식 (3)은 평균전압에 대해 평균전압과 각 상전압의 최대차로 구하는 방식이다.

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

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

식 (3)과 같은 방법에 의한 전압불평형율의 산출은 선간전압을 기준으로 평가한 결과에 최대 13% 정도의 오차를 발생시킬 수 있다.

상전압불평형을 표현하는 가장 간단한 방법은 식 (4)와 같이 3상전압에서 최대편차를 측정하여 평균전압과 비교하는 방식이다.

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

최근 많이 사용되고 있는 컴퓨터와 같은 단상부하 설비의 사용시 상전압으로 표현된 전압불평형율은 식 (5)와 같이 각 상 최대전압과 최소전압차를 평균전압으로 나타낸다.

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

식 (5)로 전압불평형율을 계산할 경우 일반적으로 허용되고 있는 값보다는 다소 높게 나타날 수 있다.

개략적인 방법으로서 식 (6)과 같이 부하의 피상전력  $S_L$ 과 전원회로의 단락전력  $S_{sc}$ 으로 계산하는 것으로서 대용량의 수전설비에서 일반적으로 적용되고 있다.

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

전압불평형율에 대한 산정방법으로서는 수식적인 방법 외에도 각 상 전압의 크기를 삼각형에 의한 도식적인 방법으로 표현하는 방법도 제시되어 있다.

현재 개발되어 있는 대부분의 전압불평형율 측정기의 측정값은 식 (2)에 의한 방식을 채택하고 있다.

## 2.2 전압불평형율의 국내외 기준

전압불평형은 과도와 같은 짧은 시간에 나타나는 현상이 아니고 고조파와 같이 정상동작중에 발생하는 전기품질현상의 하나로서 부하에 지속적으로 영향을 미칠 수 있는 요소이다. 표 1은 국내의 전압불평형율의 허용범위를 나타낸 것으로서 우리나라의 경우 전기철도와 같이 3상에서 2상(M,T)의 큰 단상부하를 사용하는 경우 전압불평형의 범위를 선정하고 있지만, 외국의 경우에는 부하별, 전압별, 사용 장소별 및 측정시간별로 전압불평형율에 대한 허용범위를 다양하게 규정하고 있다.

3상 시스템에서 불평형된 부하는 역상분 전압(NPS ; Negative Phase Sequence)을 일으키는 전류를 발생한다. PCC에서 NPS 전압의 크기는 나라에 따라 다르지만 3상 M-G 세트에서 발생하는 증가된 열 때문에 전원공급회사들은 대개 1~2%의 범위내로 제한하고 있다.

불평형된 부하가 PCC에서 전체 NPS 전압의 형성에 미치는 정도는 고정된 부하에서 쉽게 계산되지만, 다른 두 상에 나타나는 시변부하는 NPS 전압레벨의 예측을 더욱 복잡하게 한다.

3상 유도전동기에 역상분의 존재는 출력저하, 과열 등 부작용을 초래하므로 전압불평형은 1.0%이하가 되도록 요구하고 있다. 전기철도와 같이 대형 단상부하를 사용하는 경우에는 표 2에서와 같이 PCC에서 NPS를 허용한 경우도 있다. 유럽 여러 나라에서 PCC에서 한 수용가가 전체 역상분에 미치는 정도를 10분 평균해서 0.7% 이하가 되도록 제한하고 있다. 이는 10분 시정수를 가진 전동기에서 열 효과(heating effect)를 설명하기 위한 것으로서 표 2.1에 나타낸 레벨과 비교해서 이 기준은 5분 동안 0.99%, 1분 동안 2.21%의 역상분과 일치한다.

표 1. 전압불평형율 허용범위

관련규격	허용범위 [%]	비고
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
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 수전점

표 2. Allowable limits of overall NPS at unbalanced loads

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

## 2.3 측정방법 및 간격

전기품질에 관련하여 여러 가지 측정법이 소개되어 있다. 매우 짧은 기간, 짧은 시간, 오랜 시간 등 다양한 방

법으로 전기품질의 변화에 대한 현상을 측정하고 있다.

측정장소는 대개 PCC에서 실시하는 것이 일반적이지만, NEMA에서와 같은 경우 개별부하인 전동기 입구단에서 측정할 것을 기준으로 하는 경우도 있고, 전기설비 기준에서 처럼 변전소 수전점에서 측정할 것을 기준으로 하는 경우도 있다.

전압불평형은 고조파와 같이 부하의 운전 중에 지속적으로 발생하는 현상이므로 매우 짧은 시간보다는 짧은 시간간격으로 오랜 동안의 측정을 요구한다. 불평형을 계산시 전압 크기에 대한 기본 측정간격은 60Hz 전력시스템에 대해 12사이클의 시간간격이어야 하고, 측정시간간격(measurement time interval)은 3개의 서로 다른 시간간격(3s(60Hz 시스템에서 180사이클), 10min 및 1h)동안 적분해야 한다고 규정하고 있다[4]. IEEE에서는 표 3과 같이 고조파와 같이 5개의 측정간격(time interval)을 설정하고 있다. 또한 EN50160에서는 고장 또는 전압차단 등과 같은 상황을 제외한 정상적인 동작시 1주일간 측정간격 10min 평균 실효값의 전압이 정격전압의 ±10% 범위여야 하고, 측정시에 고려하는 공급전압의 모든 평균 실효값은 정격전압의 +10~15% 범위에 들어야 한다고 규정하고 있다[2].

표 3. 구분별 측정간격

구분	간격
Very short interval	3 sec
Short interval	10 min
Long interval	1 hour
One day interval	24 hour
One week interval	7 day

표 3에서 측정간격은 전압크기, 불평형, 고조파 및 플리커와 같은 정상상태 전기품질 변화를 설명하기 위해서는 매우 중요한 간격이다. 이들 모든 양은 매우 중요한 것으로서 10분 값을 사용하여 통계적으로 설명한 것들이다.

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 급전전 구역에서의 연속 2시간의 평균부하용량의 적에 비례하는 양으로 표현하여 3%로 규정하고 있다.

그림 1은 1시간동안 측정간격(1, 3, 15sec와 1, 5, 10min)에 따른 전압불평형률 비교 분석한 것이다. 측정간격이 짧을수록 전압불평형률의 변화를 상세하게 확인할 수 있으나 측정간격이 길 경우에는 부하의 변동시 발생한 중요한 내용과 민감하게 변화하는 기기에 미치는 영향 등의 동작내용을 분석할 수 있는 전압변화의 확인이 어렵다는 것을 알 수 있다.

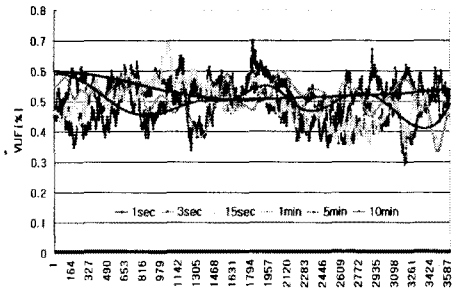


그림 1. 측정간격에 따른 전압불평형률 비교

어느 기간 동안에 발생하는 간단한 전압불평형의 산정은 짧은 기간에서만 측정해도 가능하지만, 대부분의 경우 시간대별 또는 계절별로 부하 사용량이 달라지지 때문에 부하의 특징에 따른 전압불평형률 분석을 위해서는 식 (7)과 같이 10분 간격으로 최소 하루 ( $U_{uv}$ ) 또는 일주일간 ( $U_{uv}$ ) 측정이 필요하다.

$$U_{uv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{144} u_{uv}^2}{144}}$$

$$U_{uv} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{1008} u_{uv}^2}{1008}} \quad (7)$$

식 (7)에서와 같이 하루 동안의 측정은 10분 간격의 전압 데이터가 144개이지만, 일주일 동안에는 1,008개의 데이터가 필요하다. 따라서 많은 자료의 분석을 위해서는 측정기의 메모리 용량이 많이 필요하다.

## 2.4 전압별 기준

표 4. 전압별 전압불평형률

규격	범위[%]	전압	비고
EN-50160	2	LV	4%순시 최대값, 10분간 측정시
	1	MV	
IEC	2	LV	
1000-3-x	1	MV	
Western Power com	1		>100W
	1.5		10~100W
	2		<10W
Australia	2	44,49W	1주일간 측정
	1.5	69,120,	
		161W	
	1	230, 315W	
LV(Low-voltage) : ≤1W		NRS -048-1	
MV(Medium-voltage) : 1W ≤44W			

일반적으로 전압강하에 따른 부하기기의 영향을 줄이기 위해 전압강하율은 잘 명시되어 있다. 전압이 높은 경우는 송배전 시스템으로 전압이 안정적이므로 전압불평형률은 낮지만, 수용가에서는 대개 저압으로 사용하는

부하도 다양하고, 운전방식에 따라 달라지므로 전압불평형율은 조금 높은 편이다. 표 4는 유럽 및 국제전기위원회에서 규정하고 있는 전압별 불평형율의 범위를 나타낸 것으로서 저압은 1%이하이고, 고압은 2%이하이다.

### 3. 결 론

전기품질개선을 통해 설비의 신뢰도 증진과 손실저감을 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 고조파와 전압불평형은 부하의 운전중에 시스템에 지속적으로 영향을 미치는 것으로서 이를 줄이기 위한 국내 기준이 마련되어 있지 않다.

전압불평형은 고조파와 같은 개념이지만 측정간격은 고조파 보다는 다소 길어도 되고, 부하에 미치는 영향의 분석을 위해서 측정 장소는 PCC에서 이루어져야 하며, 부하에 미치는 영향의 분석을 위해서는 일정기간(일주일 정도)의 자료 확보가 매우 중요하다. 또한 전압불평형율의 산정시에 전압의 크기만으로도 위상각의 고려 없이 산정이 가능한 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 전압불평형의 영향을 줄이기 위해 전압 불평형율에 대한 기준정립과 국내의 허용범위에 대한 자료의 비교분석과 측정시 고려해야 할 측정간격, 측정기간 등에 대한 내용을 소개하였다.

#### 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 논문지(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] IEC 61000-4-30, “Testing and measurement techniques-Power quality measurement method”, 2003.2