

## 상전압 및 선간전압에 대한 불평형율

(Voltage Unbalance Factor for Phase and Line Voltage)

김종겸 · 박영진 · 이동주 · 이종한 · 이은웅  
(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park · Jong-Ho Park · Eun-Wong Lee)

### Abstract

Most of the loads in industrial power distribution systems are balanced and connected to three power systems. However, voltage unbalance is generated at the user's 3-phase 4-wire distribution systems with single & three phase. Voltage unbalance is mainly affected by load system rather than power system. Unbalanced voltage will draws a highly unbalanced current and results in the temperature rise and the low output characteristics at the machine. It is necessary to analyse correct voltage unbalance factor for reduction of side effects in the industrial sites.

Voltage unbalance is usually defined by the maximum percent deviation of voltages from their average value, by the method of symmetrical components or by the expression in a more user-friendly form which requires only the three line voltage readings. If the neutral point is moved at the 3-phase 4-wire system by the unbalanced load, by the conventional analytical method, line and phase voltage unbalance leads to different results due to zero-sequence component.

This paper presents a new analytical method for phase and line voltage unbalance factor in 4-wire systems. Two methods indicate exact results.

## 1. 서론

전기품질은 대부분 전압에 관련된 것으로 시스템에 일시적인 영향을 주는 새그나 스웰, 서지와 장기적으로 영향을 주는 정전현상과 그리고 시스템을 운전하는 동안 부하기에 지속적으로 영향을 미치는 불평형과 고조파가 있다[1-3].

전압불평형은 시스템을 운전하는 동안 전원 및 부하측의 운전특성에 따라 달라지지만 주로 부하의 운전패턴에 영향을 많이 받는다. 3상 4선식 배전시스템 수용기는 간선 및 분기선에 단상과 3상, 선형 및 비선형 부하를 평형에 가깝게 설계한 다음 설치하지만, 부하의 설비 중설 등에 의해 불평형이 커지거나 운전조건에 따라 전압변동이 생기면 높은 전류 불평형으로 이어져 손실의 증가로 기기의 출력감소를 초래할 수 있다.

전압불평형율의 허용범위를 낮추어 기기의 손실저하 및 안정된 품질을 보장하기 위한 연구와 허용범위를 산출하는 여러 가지 산출방법이 제시되어 있다[2-4]. 그러나 3상 4선식과 같은 부하시스템의 운영에서 부하의 불평형으로 발생하는 전압불평형의 경우 선간전압의 크기로 불평형율의 경우 중성선에 나타나는 전압의 크기와 각 상전압의 위상각 산출이 어려워 기존에 제시된 상전압과 선간전압의 불평형율 계산에는 약간의 오차를 발생할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 3상 선간전압의 크기만으로 각 상전압의 크기와 위상각 및 영상분 전압을 크기를 계산하고 상전압과 선간전압에 의한 불평형율 계산에 차이가 없음을 입증하고자 한다.

### 2.1 전압불평형의 발생과 불평형율

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

전압불평형은 수식 또는 도식적인 방법으로 구할 수 있다. 수식에 의한 대표적인 것으로는 대칭좌표법과 간략화된 계산으로 산출하는 방법이 있고, 도식적인 방법으로는 각 상 전압의 크기를 작도법으로 그려 구하는 방법이 있다[3].

전압 불평형율(VUF: Voltage Unbalance Factor)은 식 (1)과 같이 정상분( $V_1$ )에 대해 역상분( $V_2$ )의 비율로서 정의한다 [1-4].

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

식 (1)의 정상분, 역상분 및 영상분은 식 (2)에서 계산한 것으로서 각 상 또는 전압의 크기는 벡터값이어야 하지만 크기만으로 정확한 해석이 불가능하다.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{pmatrix} \quad (2)$$

## 2. 전압 불평형율

식 (2)에서  $a=e^{j2\pi\cos\theta}$ 이다.

현장에서 측정한 3상 선간전압의 실효값으로 불평형을 산출할 경우 식 (3)을 이용하면 식 (1)과 같이 정확한 값을 구할 수 있지만 각 성분의 위상각은 표현하지 못한다.

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

식 (3)에서  $\beta$ 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.

$$VUF_3 = \frac{\max(|V_A - V_{avg}|, |V_B - V_{avg}|, |V_C - V_{avg}|)}{V_{avg}} \quad (4)$$

식 (4)에서  $V_{avg} = \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C)$ 이다.

상전압에 의한 불평형율의 간이 방법으로서 식 (5)와 같이 3상 전압의 최대값과 평균값의 차로써 구하기도 한다.

$$VUF_3 = \frac{V_{avg} - \max(V_A, V_B, V_C)}{V_{avg}} \quad (5)$$

전압불평형율 식 (1), (3), (4) 및 (5)로 계산할 수 있지만, 식 (4) 및 (5)와 같은 경우 위상차를 고려할 수 없고 오차가 발생하여 현장 적용이 부적합하다. 실제 전압 크기만으로 정확한 전압불평형율을 산출할 수 있는 식 (3)이 가장 널리 사용되고 있지만, Y결선과 같은 방식에서 상전압에 대한 전압불평형율과 정상분, 역상분 및 영상분의 크기와 위상각에 대한 산출이 어려워 기기의 정확한 특성이 불가능하다. 따라서 Y결선방식에서 선간전압의 크기만으로도 상전압에 대한 각각 크기는 물론 불평형율과 위상각 산출이 가능한 방식의 접근이 필요하다.

## 2.2 전압불평형율의 비교

3상 평형인 부하의 정상적인 운전조건시 상전압과 선간전압은 크기가 모두 같고, 각 상은 서로 120° 위상차를 이룬다. 그러나 전압변동시 위상차(phase shift)는 시스템에서 발생하는 매우 복잡한 현상으로 배전시스템의 임피던스와 부하 또는 고장 전류사이에서의 상호관계로 발생한다.

3상 4선식의 경우 공급되는 전압이 평형이라도 부하의 불평형으로 각 상에서의 전류분담이 달라질 경우 위상차는 존재한다. 3상 4선식의 경우 부하의 불평형으로 중성선에는 각상 전류의 합이 되는 전류가 흐르게 된다. 이는 평형시와 달리

중성점이 이동하여 상전압에 대한 크기와 위상각에 변화가 발생하므로 선간전압의 크기만으로 불평형율을 계산하는 것은 가능하지만, 중성점의 이동을 고려하지 않을 경우 상전압불평형율은 정확한 계산결과를 얻을 수 없다.

그림 1은 전압벡터도로 평형시(그림내 점선)가 부하의 불평형이나 전압의 변화로 불평형(그림내 실선)으로 변화된 경우를 나타낸 것이다. 평형일 경우 정삼각형이지만, 정상분에 영상분이 추가될 경우 정삼각형은 유지하되 위상만 이동하지만, 역상분이 추가될 경우에는 왜형된 삼각형을 나타낸다.

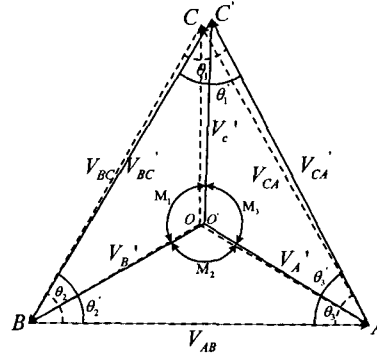


그림 1 전압 페이서도  
Fig. 1. Phasor diagram of voltage

그림 1에서와 같이 평형 3상 선간전압의 크기가 각각  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ ,  $V_{CA}$ (점선)라고 할 경우 꼭지점 ABC로 구성되는 정삼각형이 이루어진다. 그러나 부하의 불평형으로 인해 선간전압의 크기가 각각  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ ,  $V_{CA}$ (실선)로 변할 경우 부하의 공통 중성점 O는 O'로 이동하여 정삼각형이 아닌 불평형된 선간전압의 삼각형을 형성하게 된다. 따라서 정삼각형의 내접하는 세 개의 동일한 삼각형 면적이 전압불평형이 이루어짐에 따라 면적을 달리하는 세 개의 삼각형으로 변형되므로 상전압 및 선간전압의 크기와 삼각형을 구성하는 각도에서 변화가 있다. 중성점이 이동함에 따라 변화된 전압의 크기와 위상각을 고려해야 정확한 상전압 및 선간전압의 불평형율의 산출이 가능하다.

그림 1과 같은 조건의 평형 및 불평형시의 선간전압의 크기는 표 1에 나타내었다.

표 1 선간전압의 크기  
Table.1 Amplitude of line voltage

평형시 전압[V]		불평형시 전압[V]	
$V_{AB}$	380	$V_{AB}$	380
$V_{BC}$	380	$V_{BC}'$	378
$V_{CA}$	380	$V_{CA}'$	383

그림 1에서와 같이 당초 동일한 크기의 선간전압이 변형됨에 따라 기존의 동일한 위상각  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  및  $\theta_3$ 의 크기가 선간전압의 변화로 각  $\theta_1'$ ,  $\theta_2'$  및  $\theta_3'$ 로 바뀔 때 삼각형정리에

의하면 식 (6)과 같이 변화된 삼각형의 내각을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}\theta_1' &= \cos^{-1} \left( \frac{V_{CA}^2 + V_{BC}^2 - V_{AB}^2}{2V_{CA}'V_{BC}'} \right) \\ \theta_2' &= \cos^{-1} \left( \frac{V_{BC}^2 + V_{AB}^2 - V_{CA}^2}{2V_{BC}'V_{AB}'} \right) \\ \theta_3' &= \cos^{-1} \left( \frac{V_{AB}^2 + V_{CA}^2 - V_{BC}^2}{2V_{AB}'V_{CA}'} \right)\end{aligned}\quad (6)$$

이동된 삼각형의 중심점  $O$ 는 변형된 삼각형의 꼭지점  $A, B, C$ 의 각을 이등분하여 만나는 점이다. 이  $O$ 와 각 꼭지점을 연결하는 길이가 상전압의 크기가 된다. 식 (6)에 의하여 구한 꼭지점의 각은 변형된 내부 세 개의 삼각형의 면적  $\triangle AOB, \triangle AOC, \triangle BOC$ 가 생겨남에 따라 두 각과 한변의 길이를 알 경우 삼각형의 정리에 의한 경우 나머지 각도 구할 수 있지만, 여기서는 삼각형의 내각합에서 식 (6)에서 구한 값을 제외 할 경우 새로 구성된 삼각형의 내부각  $M_1, M_2$  및  $M_3$ 는 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}M_1 &= \left( 180^\circ - \frac{\theta_1' + \theta_2'}{2} \right) \\ M_2 &= \left( 180^\circ - \frac{\theta_2' + \theta_3'}{2} \right) \\ M_3 &= \left( 180^\circ - \frac{\theta_3' + \theta_1'}{2} \right)\end{aligned}\quad (7)$$

따라서 불평형된 상전압의 크기는 선간전압의 크기와 식 (6) 및 (7)을 이용할 경우 식 (8)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}V_A' &= V_{AB} \frac{\sin\left(\frac{\theta_1'}{2}\right)}{\sin(M_2)} \\ V_B' &= V_{CA} \frac{\sin\left(\frac{\theta_3'}{2}\right)}{\sin(M_2)} \\ V_C' &= V_{BC} \frac{\sin\left(\frac{\theta_2'}{2}\right)}{\sin(M_1)}\end{aligned}\quad (8)$$

식 (8)에서의 상전압의 크기는 각각  $V_A'=217.27, V_B'=221.60, V_C'=219.87[V]$ 이다. 식 (8)의 경우는 불평형된 전압의 크기만을 나타낼 뿐 위상각을 포함하지 않고 있다. 따라서 상전압의 크기에 의한 불평형율 계산을 위해서는 크기와 위상각이 포함되어야 한다.

불평형된 상전압의 정상분, 역상분 및 영상분의 크기는  $V_A'$ 를 기준상으로 할 경우 식 (7)과 식 (8)로부터 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}V_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}} (V_A' + aV_B'e^{-jm_2} + a^2V_C'e^{jm_3}) \\ V_2 &= \frac{1}{\sqrt{3}} (V_A' + a^2V_B'e^{-jm_2} + aV_C'e^{jm_3}) \\ V_0 &= \frac{1}{\sqrt{3}} (V_A' + V_B'e^{jm_2} + V_C'e^{jm_3})\end{aligned}\quad (9)$$

식 (9)는 전압의 크기뿐만 아니라 위상각을 포함하고 있다. 표 2는 기존의 전압불평형율과 본 연구에서 제시한 전압불평형율의 결과를 비교한 결과이다.

표 2 전압불평형율의 비교  
Table 2 Comparison of VUF

구분	$V_A', V_B', V_C'$	$V_{AB}, V_{BC}', V_{CA}'$	비고
식(3)	-	0.7646	
식(4)	1.051	-	
식(5)	0.9206	-	
식(9)	0.7646	-	$V_1=219.58 \angle -0.0861$ $V_2=1.6789 \angle 156.6036$ $V_0=0.8367 \angle -156.25$

표 2에서와 같이 식 (3)을 이용하여 선간전압의 크기만으로 구한 결과와 식 (9)와 같이 상전압으로 불평형율을 구한 결과의 위상각을 구할 수 있다.

식 (3)은 선간전압의 위상각을 고려하지 않고 크기만으로 전압불평형율을 계산하는 방법으로 식 (1)과 같은 결과를 제시할 수 있지만 상전압의 크기만을 고려한 불평형율은 계산할 수 없고, 식 (4)는 상전압의 크기만으로 불평형율을 계산할 수 있지만 오차가 많이 발생할 수 있으며, 식 (5)는 계산의 편리성을 추구할 수 있지만 기기의 특성해석을 위한 정확한 결과 도출은 어렵다. 그러나 그림 1과 같이 선간전압의 크기만 주어질 경우 전압불평형율은 식 (3)으로 불평형율을 구할 수 있지만, 부하의 불평형으로 중성점이 이동할 경우 중성점을 가지는 Y결선방식의 상전압에 대한 불평형율은 식 (4), (5)와 같은 방식으로는 정확한 결과를 도출할 수 없다.

중성점의 변화에 따른 상전압 벡터에서 정상분, 역상분 및 영상분에서 불평형과 기존 선간전압에서의 불평형은 같은 결과를 도출해야 한다. 식 (8)의 경우 선간전압의 크기로 각 상전압에 대한 크기를 구할 수 있으며, 이 결과를 식 (9)에 의한 경우 정상분에 대한 역상분의 비율로 선간전압과 동일한 불평형율을 산출할 수 있으며 영상분에 대한 크기와 아울러 정상분, 역상분 및 영상분에 대한 위상각을 정확하게 산출할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 부하의 불평형으로 발생하는 전압불평형율에 대해 상전압과 선간전압의 크기에 의한 불평형율을 비교분석하였다. 기존의 불평형율 계산은 상전압과 선간전압의 크기를 비교할 경우 위상각을 고려하지 않아 약간의 오차를 발생하고, 불평형율에서도 크기만 나타낼 뿐 위상각은 포함하지

않았다. 그러나 Y결선부하의 경우 부하임피던스의 차로 선간 전압의 크기는 물론 전압에서도 위상차가 존재한다. 따라서 선간전압의 크기만으로는 불평형율을 구할 수 있지만, 중성점 변화에 따른 영상분의 크기와 각 전압에 대한 위상각은 고려할 수 없었다.

본 연구에서는 3상 4선식 시스템에서 부하의 불평형시 중성점이 이동할 경우 각 선간전압의 크기만으로 수식적인 변화를 통해 상전압의 크기와 위상각을 도출하여 전압불평형율의 크기를 선간전압에 의한 결과와 동일한 결과를 제시하였으며 기존에 제시하지 못하였던 위상각도 함께 도출할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2004년도 산업자원부 및 한국전력  
공사의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계  
부처에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 김종겸, 박영진, 정종호, 이은용, "불평형 전압 운전시 유도전동기의 동작 특성 해석" 대한전기학회 논문지(B), 제 53권, 6호, pp.372-379, 2004.6
- [2] 김종겸, 손홍관, 이은용, "선형 및 비선형 부하량에 따른 고조파 성분의 변화", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 8호, pp.441-448, 2002.8
- [3] 김종겸, 박영진, "3상 4선식 저압 수용가의 전압불평형율 측정 분석", 한국조명전기설비학회 논문지, 제 18권, 6호, pp.91-99, 2004. 11
- [4] P. Pillay and M. Manyange, "Definitions of voltage unbalance", IEEE Power Eng, Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001.
- [5] NEMA MG-1-2003, "Motor and Generators"