

전압불평형의 표현방식에 관한 연구(II) - 전압불평형계수의 근사적 표현방식 -

論 文
52A-5-4

A Study on the Representation of Voltage Unbalance: Part II—Approximations of Voltage Unbalance Factor

鄭 勝 基*
(Seung-Gi Jeong)

Abstract - In field applications, to represent the degree of voltage unbalance, the maximum voltage deviation from the average is preferred to the voltage unbalance factor based on symmetrical component analysis. This paper first clarifies the relationship between the voltage unbalance factor and the maximum deviation factor showing that the maximum deviation factor approximates the voltage unbalance factor under relatively low unbalanced conditions. Several alternative ways of approximation are introduced and examined by comparing with the conventional maximum deviation factor. It appears that these alternatives provide more accurate approximation to the voltage unbalance factor over wider range of voltage unbalance while maintaining simplicity in their formula.

Key Words : unbalance, unbalance factor

1. 서 론

전압불평형을 표현하는 가장 일반적인 방법은 IEC에서 규정하고 있는 전압불평형계수(voltage unbalance factor)로서 정상분전압에 대한 역상분 전압의 비율로 정의된다 [1]. 그러나 전압불평형계수를 계산하기 위해서는 전압의 위상각을 측정하여야 할 뿐 아니라 복잡한 복소수 연산을 거쳐야 한다.

본 논문의 I부에서는 대칭좌표변환으로부터 유도된 전압 불평형계수를 선간전압 크기의 측정치만으로 용이하게 계산할 수 있는 표현식과 함께 도식적으로 전압불평형계수를 결정할 수 있는 전압불평형차트를 제시한 바 있다 [2]. 그러나 여기서의 표현식 역시 비교적 복잡한 수식으로 표현되기 때문에 직관성이 떨어지고 암기하기 어렵다는 문제가 있다. 그리고 전압불평형차트를 사용하기 위해서는 인쇄된 차트가 준비되어 있어야 한다는 문제가 있다. 따라서 차트를 사용하지 않으면서도 쉽게 전압불평형계수를 구하기 위해서는 보다 간단한 형태로 근사화시킨 전압불평형계수의 표현식을 고안할 필요가 있다.

실제 산업현장에서 전압불평형의 정도를 나타내는 데에 있어 가장 널리 사용되는 방법은 3상 전압이 그 평균치로부터 최대 얼마나 떨어져 있는지를 나타내는 지수로서 여기서는 대칭좌표법에 의한 불평형계수와 구별하기 위하여 이를 '최대전압이탈율'이라 부르기로 한다. 최대전압이탈율은 대칭좌표법에 의한 불평형계수에서와 같이 해석적인 용도로 사

용하기에는 부적합하지만 계산이 매우 간단하며 직관적이라는 장점이 있다.

주어진 불평형 조건 하에서 최대전압이탈율을 계산하여 보면 전압불평형계수와 유사한 수치로 나타나는데 이는 최대전압이탈율이 전압불평형계수의 근사치로서 사용될 수 있음을 시사하고 있다. 그러나 아직까지 양자 사이의 수학적 관련성이 명쾌하게 제시된 바가 없다는 점에 주목하여 본 논문에서는 최대전압이탈율이 전압불평형계수와 어떤 상관관계를 지니는지를 살펴보도록 한다. 그리고 최대전압이탈율로 전압불평형계수를 표현하는 데에서 나타나는 한계를 보완하기 위한 몇가지 대안을 제시하고 이들 사이의 관련성을 검토하도록 한다.

2. 선간전압의 크기와 전압불평형계수

3상 선간전압의 대칭좌표성분과 불평형계수는 아래의 식으로 정의된다.

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_z \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$(a = \exp(j2\pi/3))$$

$$u = ue^{j\alpha} = \frac{V_n}{V_p} \quad (2)$$

위의 식은 선간전압 페이저의 함수로 표현되는 전압불평형계수를 나타내고 있다. 선간전압의 크기를 사용하여 전압 불평형계수를 표현하는 방식은 본 논문의 I부에서 기술한바 있다. 여기서는 그 역함수 관계로 전압불평형계수로 선간전

* 正 會 員 : 光云大 電子情報大 電氣工學科 教授
接受日字 : 2002年 7月 26日
最終完了 : 2003年 4月 1日

압의 크기를 나타내도록 한다. 식 (1)의 역함수관계는 아래와 같다.

$$V_{ab} = V_p + V_n = (1 + u) V_p \quad (3)$$

$$V_{bc} = a^2 V_p + a V_n = a^2(1 + a^2 u) V_p \quad (4)$$

$$V_{ca} = a V_p + a^2 V_n = a(1 + a u) V_p \quad (5)$$

일반적으로 3개의 자유도를 갖는 세 선간전압을 복소 불평형계수의 크기와 위상 두 개의 변수만으로 유일하게 결정하는 것은 불가능하다. 그러나 복소 불평형계수가 주어지면 세 선간전압 크기 사이의 비를 결정하는 것은 가능하며 식 (3)-(5)으로부터 다음의 관계식을 통해 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_p^2 &= \frac{V_{ab}^2}{1 + u^2 + 2u \cos \alpha} \\ &= \frac{V_{bc}^2}{1 + u^2 + 2u \cos(\alpha - \gamma)} \\ &= \frac{V_{ca}^2}{1 + u^2 + 2u \cos(\alpha + \gamma)} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\gamma = 2\pi/3$ 이다. 위의 식은 불평형계수의 크기가 주어졌을 때 선간전압들 사이의 관계는 유일하게 결정되는 것이 아니라 불평형계수의 위상각 α 에 따라 달라지게 됨을 보여주고 있다. 이러한 관계는 본 논문의 I부에서 입증한 바와 같이 불평형된 선간전압 페이서로 이루어진 전압삼각형의 꼭지점이 이루는 원형의 궤적으로 나타나게 된다.

그림 1은 V_{ab} 를 기준 페이서로 하였을 때 전압삼각형 꼭지점의 궤적을 보여주고 있다. 여기서 점선으로 나타낸 삼각형은 V_{ab} , $a V_{ab}$, $a^2 V_{ab}$ 의 가상적인 평형 3상 선간전압으로 이루어진 전압삼각형을 나타내며 여기서는 이를 '기준 삼각형(reference triangle)'이라 부르기로 한다. 이렇게 하였을 때 실제의 불평형 선간전압에 대한 전압삼각형은 기준삼각형의 꼭지점 C_0 가 ΔV 만큼 이동하여 왜곡된 것으로 간주할 수 있다. 이 ΔV 를 변위전압(deviation voltage)이라 부르고 전압삼각형의 꼭지점이 이루는 궤적은 C_0 를 기준 위치로 한 변위전압의 궤적에 해당한다.

한편 불평형 전압의 등가 3상 실효전압은

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{3}} \quad (7)$$

로 정의되는데[3]

$$V_e^2 = V_p^2 + V_n^2 = (1 + u^2) V_p^2 \quad (8)$$

의 관계가 성립한다. 따라서 식 (6)으로부터

$$\begin{aligned} V_e^2 &= \frac{(1 + u^2) V_{ab}^2}{1 + u^2 + 2u \cos \alpha} \\ &= \frac{(1 + u^2) V_{bc}^2}{1 + u^2 + 2u \cos(\alpha - \gamma)} \\ &= \frac{(1 + u^2) V_{ca}^2}{1 + u^2 + 2u \cos(\alpha + \gamma)} \end{aligned} \quad (9)$$

가 되며 이는 이하에서 기술하는 전압불평형계수의 근사적 표현방식을 구하는 데에 기본적인 관계식으로 사용된다.

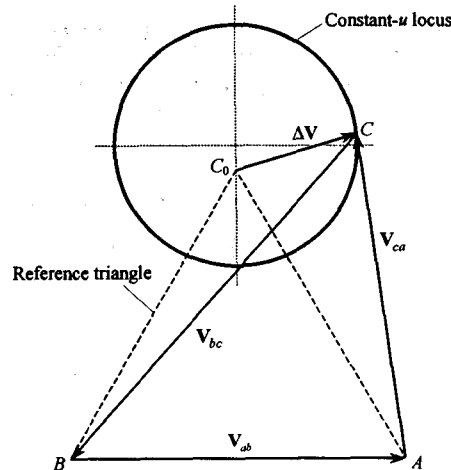


그림 1. 변위전압의 일정전압불평형계수 궤적
Fig. 1. Constant voltage unbalance factor locus of deviation voltage

3. 전압불평형계수와 최대전압이탈율

전압불평형의 정도를 나타내기 위해 실제적으로 가장 많이 사용되는 방식은 선간전압들이 그 평균치로부터 가장 크게 이탈한 정도를 나타내는 것이다. 대칭좌표성분에 의한 전압불평형계수 u 와 구별하기 위해 여기서는 이를 '최대전압이탈율(maximum voltage deviation factor)'이라 부르기로 하고 u_a 의 기호로 나타내기로 한다. 수식으로 나타내면

$$u_a = \frac{\max[|V_{ab} - V_{avg}|, |V_{bc} - V_{avg}|, |V_{ca} - V_{avg}|]}{V_{avg}} \quad (10)$$

$$V_{avg} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (11)$$

최대전압이탈율과 전압불평형계수 사이의 관계를 나타내기 위해 세 선간전압 중 V_{ab} 가 가장 크기가 큰 것으로 가정한다면 식 (10)은 다음과 같이 된다.

$$u_a = \frac{V_{ab} - V_{avg}}{V_{avg}} = \frac{3V_{ab}}{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}} - 1 \quad (12)$$

여기에 식 (3)-(5)를 적용하면 식 (12)는 아래와 같이 된다.

$$u_a = \frac{3|1 + u|}{|1 + u| + |1 + a^2 u| + |1 + a u|} - 1 \quad (13)$$

일반적으로는

$$u_a = \frac{3 \max[|1 + u|, |1 + a^2 u|, |1 + a u|]}{|1 + u| + |1 + a^2 u| + |1 + a u|} - 1 \quad (14)$$

위의 식은 전압불평형계수와 최대전압이탈율 사이의 수학적 관계를 잘 나타내주고 있기는 하지만 실용적인 관점에서는 거의 쓸모가 없다. 그 이유는 상대적으로 측정이 용이한 최대전압이탈율을 이보다 훨씬 측정이 어려운 전압불평형계수로부터 계산하여야 할 필요성이 있는 경우란 현실적으로 거의 예상하기 어렵기 때문이다. 또한 이 식으로는 두

전압불평형의 표현 사이에 존재하는 정량적인 상관관계를 직관적으로 파악하기가 어렵다. 위의 식에 대한 역함수관계를 해석적으로 구하는 것이 불가능하기는 하지만 이하에서는 이들 두 변수 사이의 정량적인 상관관계를 검토하여 보도록 한다.

전압불평형계수가 작은 경우에는 식 (9)로부터 다음과 같은 근사적 관계가 성립하게 된다.

$$V_{ab} \approx \sqrt{1 + 2u \cos \alpha} V_e \approx [1 + u \cos \alpha] V_e \quad (15)$$

$$V_{bc} \approx \sqrt{1 + 2u \cos(\alpha - \gamma)} V_e \approx [1 + u \cos(\alpha - \gamma)] V_e \quad (16)$$

$$V_{ca} \approx \sqrt{1 + 2u \cos(\alpha + \gamma)} V_e \approx [1 + u \cos(\alpha + \gamma)] V_e \quad (17)$$

따라서 (15)-(17)을 (10)과 (11)에 대입하면

$$V_{avg} = \frac{1}{3}(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}) \approx V_e \quad (18)$$

$$u_a \approx \frac{\max[|V_{ab} - V_e|, |V_{bc} - V_e|, |V_{ca} - V_e|]}{V_e} \approx \max[|u \cos \alpha|, |u \cos(\alpha - \gamma)|, |u \cos(\alpha + \gamma)|] \quad (19)$$

이는 근사적으로 최대전압이탈율을 전압불평형계수의 함수로 나타내고 있다.

그림 2는 0에서 100%까지의 전압불평형계수에 대하여 최대전압이탈율을 전압불평형계수에 대해 단위화된 값으로 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 전압불평형계수의 위상각 전반에 걸쳐 최대전압이탈율은 전압불평형계수보다 대체로 작은 값이 되며 전압불평형이 낮을 경우에는 최대전압이탈율이 전압불평형계수와 큰 차이를 갖지 않는다. 그러나 전압불평형이 증가하면 양자 사이에는 현저한 차이가 나타나게 된다.

그림에서 굵은 선으로 나타낸 곡선은 전압불평형이 수 퍼센트 이내로 작은 값을 나타내고 있으며 이는 위의 식 (19)에 해당한다. 이 곡선으로부터 0도, 60도 등의 위상각에서는 최대전압이탈율이 전압불평형계수와 일치하지만 30도, 90도 등에서는 전압불평형계수의 87% ($\cos 30^\circ$)까지 떨어짐을 알 수 있다. 즉 전압불평형이 매우 작은 경우 식 (10)으로 계산한 최대전압이탈율은 실제 전압불평형 계수값의 87%에서 100% 사이의 어딘가에 있게 된다. 따라서 최대전압이탈율을 전압불평형계수의 근사치로 간주하였을 때 그 오차는 13% 이내가 된다. 전압불평형이 증가하면 오차범위도 증가하여 100%의 전압불평형에서는 50%에 달하게 된다. 이를 달리 표현하자면, 어떤 상황에서도 최대전압이탈율로는 13% 이하의 오차율로 전압불평형계수를 예측할 수 없다.

전압불평형계수와 최대전압이탈율 사이의 관계를 좀 더 직관적으로 보여주기 위해 그림 3에 변위전압 페이서의 일정 전압불평형계수 궤적과 일정 최대전압이탈율 궤적을 비교하였다. 이로부터 최대전압이탈율은 전압불평형계수와 상관관계를 가지고 있기는 하지만 불평형의 정도가 심화됨에 따라 이들 수치로 나타낸 불평형 상태는 큰 오차를 가지게 되는 것을 볼 수 있다. 그림 3(b)는 불평형계수가 5% 이내로 작은 범위 안에 있을 때 페이서 궤적을 확대하여 보여주고 있다. 여기서 일정 최대전압이탈율의 페이서 궤적은 같은 값의 일정 전압불평형계수 궤적이 그리는 원에 외접하는 정육각형에 가까운 모양으로 나타나는 것을 볼 수 있다.

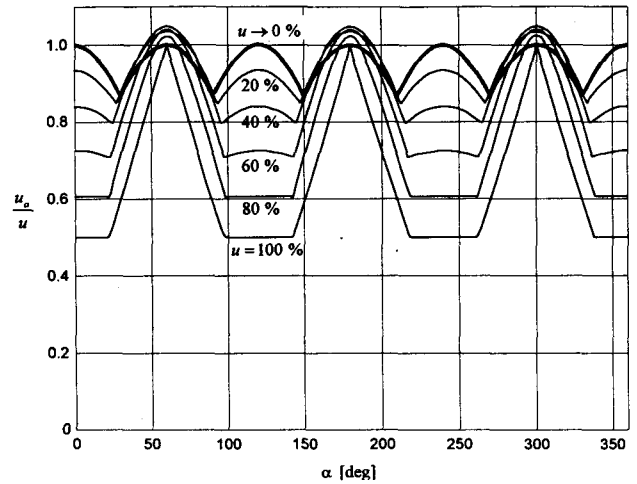


그림 2. 최대전압이탈율
Fig. 2. Maximum voltage deviation factor

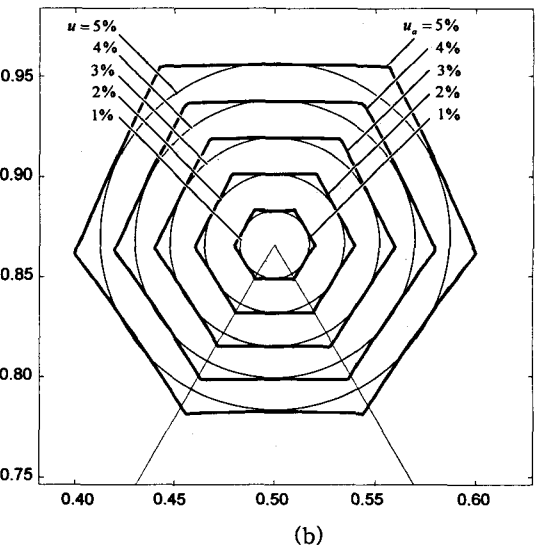
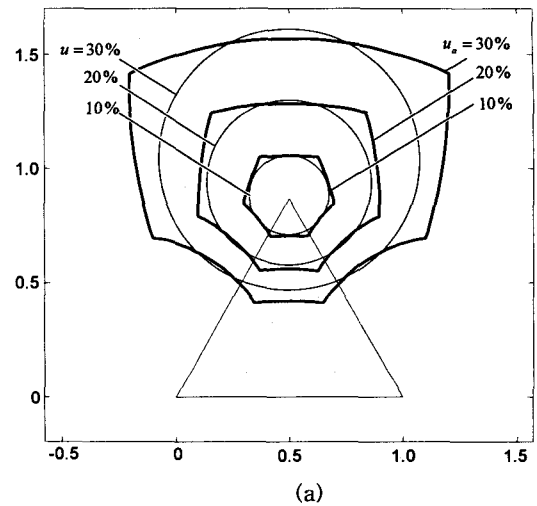


그림 3. 일정 전압불평형계수 궤적과 일정 최대전압이탈율 궤적
Fig. 3. Phasor loci for constant voltage unbalance factor and constant maximum voltage deviation factor

이상에서 기술한 바와 같이 최대전압이탈율을 전압불평형 계수의 근사치로 사용하기에는 상당히 큰 오차로 인해 적용 상 한계가 있다. 따라서 이하에서는 이를 대체할만한 몇가지 근사적 표현방식을 검토하여 보기로 한다. 이들 근사적 표현방식은 가능한 한 단순하여야 하며 표현식으로부터 전압의 불평형에 대한 관련성이 직관적으로 유추될 수 있는 형태가 되어야 한다.

4. 최대전압차율에 의한 근사적 표현방식

4.1 최대전압차율

식 (15)-(17)의 근사식을 사용하여 선간전압들 사이의 차이를 나타내 보면 다음과 같다.

$$V_{ab} - V_{bc} \approx \sqrt{3} \sin(\alpha + \gamma) u V_e \quad (20)$$

$$V_{bc} - V_{ca} \approx \sqrt{3} \sin \alpha u V_e \quad (21)$$

$$V_{ca} - V_{ab} \approx \sqrt{3} \sin(\alpha - \gamma) u V_e \quad (22)$$

이러한 관계를 감안하여 선간전압의 불평형을 나타내는 한 방법으로 다음과 같이 '최대전압차율(maximum voltage difference factor)'을 정의하도록 한다.

$$u_b = \frac{\max[|V_{ab} - V_{bc}|, |V_{bc} - V_{ca}|, |V_{ca} - V_{ab}|]}{\sqrt{3} V_{avg}} \quad (23)$$

그림 4는 최대전압차율을 전압불평형계수에 대해 단위화된 값으로 보여주고 있다. 낮은 불평형상태에서 식 (23)은 식 (20)-(22)를 적용하여 다음과 같이 근사화시킬 수 있다.

$$u_a \approx \max[|u \sin \alpha|, |u \sin(\alpha - \gamma)|, |u \sin(\alpha + \gamma)|] \quad (24)$$

이는 식 (19)의 최대전압이탈율과 유사한 형태이며 그림 4에 굵은 선으로 나타낸 곡선에 해당한다. 이 곡선은 위상각에 있어 30도의 차이를 보일 뿐 그 변화범위는 전압불평형 계수의 87%에서 100%로서 최대전압이탈율의 경우와 같은 것을 알 수 있다.

전압불평형이 큰 경우에는 최대전압차율은 최대전압이탈율과 다소 다른 특성을 보여준다. 즉 최대전압이탈율이 경우에 따라서는 전압불평형계수보다 큰 값이 될 수 있는 반면 최대전압차율은 항상 전압불평형계수보다 작은 값이 된다. 그리고 전압불평형계수가 100%에 근접하면 그 오차범위는 50%를 상회하게 된다. 따라서 최대전압차율 그 자체는 전압불평형계수를 근사적으로 표현하는 데 있어 최대전압이탈율보다 나은 방법이라 할 수는 없다.

4.2 최대전압이탈율과 최대전압차율의 조합

식 (19)와 식 (24) 사이에 30도의 위상차가 존재하는 것으로부터 이들 둘을 아래와 같이 조합하면 오차범위가 작은, 보다 평활한 특성을 얻을 수 있다.

$$u_c = \max[u_a, u_b] \quad (25)$$

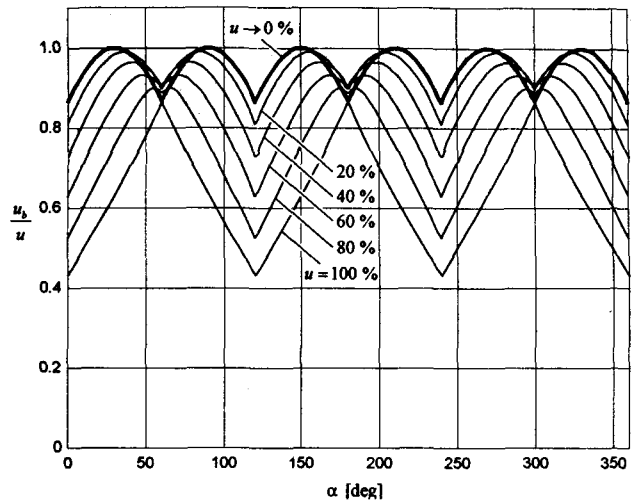


그림 4. 최대전압차율
Fig. 4. Maximum voltage difference factor

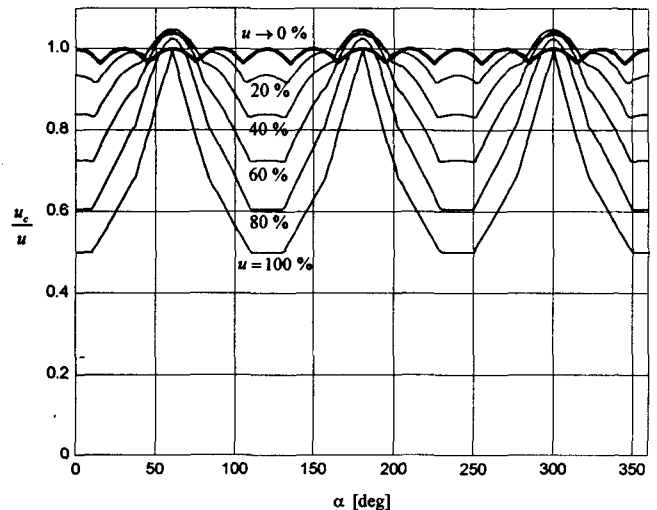


그림 5. 최대전압이탈율과 최대전압차율의 조합
Fig. 5. Combination of maximum voltage deviation factor and maximum voltage difference factor

이는 마치 30도 위상차를 갖는 6펄스 정류기 두 대를 조합하여 12펄스 정류기 출력전압을 얻는 것과 유사하며 그림 5에 그 결과를 보였다. 그림의 굵은 선으로부터 낮은 전압불평형에서는 그 오차범위가 앞서의 13%에서 약 3.4% (1 - cos 15° 에 해당)로 대폭 줄어들었음을 알 수 있다. 전압불평형이 20%에 달하는 경우에도 오차는 10%를 넘지 않는다. 따라서 통상적으로 나타나는 비교적 작은 불평형 상태에서는 최대전압이탈율로 구한 수치와 최대전압차율로 구한 수치 중 단순히 큰 값을 취함으로써 대칭좌표법에 의한 전압불평형계수를 거의 정확히 구할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 그림에서 보듯이 전압불평형이 커지면 두 방식의 조합으로 인한 이점은 사라지고 최대오차는 u_a의 경우와 마찬가지로 최대 50%까지 증가한다.

5. 전압불평형계수 위상각에 대한 의존성의 완화

위에서 기술한 최대전압이탈율, 최대전압차율 및 이들의 조합은 전압불평형계수가 일정하게 주어진 상태라 해도 전압불평형계수의 위상각에 따라 그 값이 크게 좌우된다. 전압불평형계수의 근사식에서 이러한 전압불평형계수 위상각에 대한 의존성을 제거 내지는 완화함으로써 근사식의 오차 범위를 낮출 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 이를 위해 이하에서는 아래의 삼각함수 등식을 이용하도록 한다.

$$\cos^2\alpha + \cos^2(\alpha - \gamma) + \cos^2(\alpha + \gamma) = 3/2 \quad (26)$$

$$\sin^2\alpha + \sin^2(\alpha - \gamma) + \sin^2(\alpha + \gamma) = 3/2 \quad (27)$$

5.1 실효전압이탈율 및 실효전압차율

식 (15)-(17)에 식 (26)을 적용하면 다음과 같은 근사적 관계식을 얻을 수 있다.

$$(V_{ab} - V_e)^2 + (V_{bc} - V_e)^2 + (V_{ca} - V_e)^2 \approx \frac{3}{2} u^2 V_e^2 \quad (28)$$

낮은 불평형상태에서는 $V_e \approx V_{avg}$ 로 놓을 수 있음을 감안하면 식 (28)을 전압불평형계수에 대하여 쓴 아래의 식을 전압불평형계수의 근사적 표현으로 사용할 수 있다.

$$u_e = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\sqrt{(V_{ab} - V_{avg})^2 + (V_{bc} - V_{avg})^2 + (V_{ca} - V_{avg})^2}}{V_{avg}}} \quad (29)$$

위의 식은 실효치(root-mean-square value)를 구하는 과정과 유사하므로 이를 '실효전압이탈율(effective voltage deviation factor)'이라 부르기로 한다.

한편 (20)-(22)의 전압크기의 차이에 대한 표현식에 식 (27)을 적용하면 다음과 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$(V_{ab} - V_{bc})^2 + (V_{bc} - V_{ca})^2 + (V_{ca} - V_{ab})^2 \approx \frac{9}{2} u^2 V_e^2 \quad (30)$$

따라서 이를 전압불평형계수에 대하여 쓴 아래의 식 역시 전압불평형계수의 근사적 표현으로 사용할 수 있다.

$$u_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{\sqrt{(V_{ab} - V_{bc})^2 + (V_{bc} - V_{ca})^2 + (V_{ca} - V_{ab})^2}}{V_{avg}} \quad (31)$$

이는 '실효전압차율(effective voltage difference factor)'이라 부르기로 한다.

식 (29)와 (31)은 서로 다른 표현식과 의미를 갖고 있기는 하지만 실제로는 같은 값을 나타낸다. 이는 아래의 등식이 성립함을 보임으로써 증명할 수 있다.

$$(V_{ab} - V_{bc})^2 + (V_{bc} - V_{ca})^2 + (V_{ca} - V_{ab})^2 = 3[(V_{ab} - V_{avg})^2 + (V_{bc} - V_{avg})^2 + (V_{ca} - V_{avg})^2] \quad (32)$$

따라서 이하에서는 실효전압이탈율과 실효전압차율은 동일한 것으로 간주한다.

그림 6은 실효 전압이탈율의 변화를 보여주고 있다. 식 (28) 혹은 (30)에서 예상할 수 있는 바와 같이 낮은 불평형 상태에서는 그 값이 전압불평형계수의 위상각에 거의 좌우되지 않고 전압불평형계수의 크기에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 상당히 큰 불평형상태까지도 실효전압이탈율은 앞서

의 최대전압이탈율이나 최대전압차율은 물론이고 이들의 조합에 비해 그 오차가 크지 않다. 그러나 불평형이 심화되면 이 역시 오차는 50%까지 증가한다.

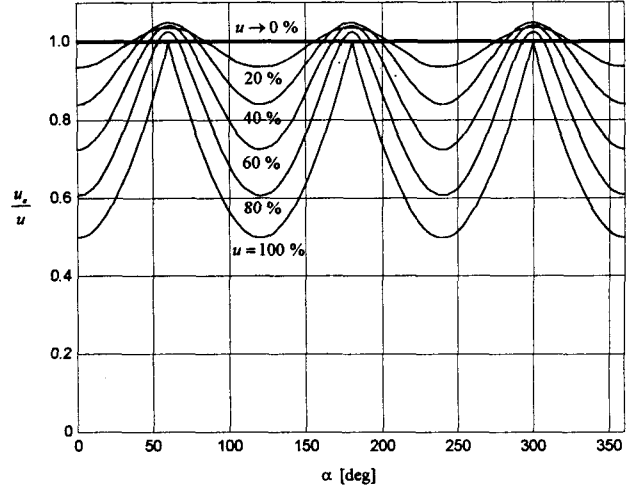


그림 6. 실효 전압이탈율
Fig. 6. Effective voltage deviation factor

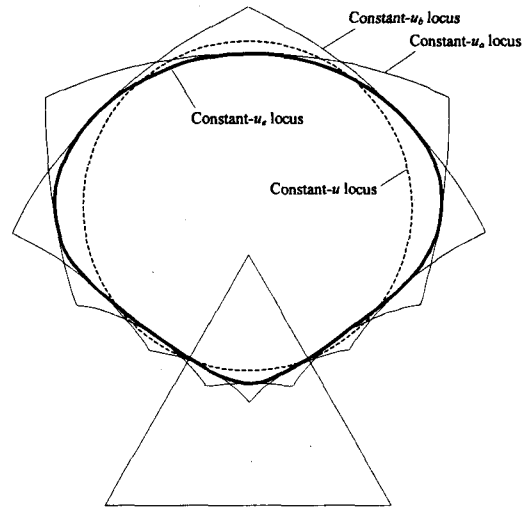


그림 7. 일정한 값(30%)의 전압불평형 표현방식들에 대한 페이서계적
Fig. 7. Phasor loci of constant(30%) voltage unbalance measures

그림 7은 변위전압의 일정 전압불평형계수 페이서 계적을 다른 지수들을 일정하게 유지하였을 때의 페이서 계적과 비교하여 보여주고 있다. 점선으로 나타낸 것이 일정 전압불평형계수 페이서 계적이며 일정 u_a 계적, 일정 u_b 계적은 가는 실선으로 나타내었다. 그리고 굵은 실선은 일정 u_e 계적을 나타낸다. 여기서 한가지 흥미로운 점으로서 일정 u_e 계적이 일정 u_a 계적 및 일정 u_b 계적을 내접하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 별도로 표시하지는 않았지만 일정 u_c

궤적은 일정 u_a 궤적 및 일정 u_b 궤적에서 일정 u_e 궤적과 접하고 있는, 안쪽 부분들의 조합으로 이루어지게 된다. 따라서 일정 u_e 궤적은 일정 u_c 궤적을 매끄럽게 한 것에 해당하는 것으로 볼 수 있고 따라서 일정 전압불평형계수 궤적에 보다 근접하게 됨을 직관적으로 알 수 있다.

5.2 실효 제곱전압이탈율 및 실효 제곱전압차율

위에서 기술한 실효전압이탈율 또는 실효전압차율은 불평형이 낮은 경우에는 전압불평형계수의 위상각에 대한 의존성이 나타나지 않지만 불평형이 심화되면 위상각에 대한 의존성이 다시 나타난다. 이는 식 (28)과 (29)가 낮은 전압불평형상태에서만 성립하기 때문이다. 따라서 식 (26) 또는 (27)의 등식을 근사식이 아닌 원래의 식 (9)에 적용함으로써 이러한 의존성을 완전히 제거할 수 있다. 즉 식 (9)와 (27)로부터 다음의 식이 성립한다.

$$\left(\frac{V_{ab}^2}{V_e^2} - 1\right)^2 + \left(\frac{V_{bc}^2}{V_e^2} - 1\right)^2 + \left(\frac{V_{ca}^2}{V_e^2} - 1\right)^2 = \frac{6u^2}{(1+u^2)^2} \quad (33)$$

이로부터 전압불평형 계수를 근사적으로 표현하는 다른 방식으로서 '실효 제곱전압이탈율(effective squared-voltage deviation factor)'을 아래와 같이 정의하도록 한다.

$$u_s = \frac{u}{1+u^2} = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\sqrt{(V_{ab}^2 - V_e^2)^2 + (V_{bc}^2 - V_e^2)^2 + (V_{ca}^2 - V_e^2)^2}}{V_e^2} \quad (34)$$

한편 식 (32)에서 전압을 전압의 제곱으로 치환하고 V_e^2 이 이들 제곱전압들의 평균치에 해당한다는 점을 감안하면 아래의 등식이 성립하게 된다.

$$\frac{(V_{ab}^2 - V_{bc}^2)^2 + (V_{bc}^2 - V_{ca}^2)^2 + (V_{ca}^2 - V_{ab}^2)^2}{3[(V_{ab}^2 - V_e^2)^2 + (V_{bc}^2 - V_e^2)^2 + (V_{ca}^2 - V_e^2)^2]} \quad (35)$$

따라서 식 (34)는 아래와 같이 정의되는 '실효 제곱전압차율(effective squared-voltage difference factor)'과 같은 값을 갖는다.

$$u_s = \frac{1}{3\sqrt{2}} \frac{\sqrt{(V_{ab}^2 - V_{bc}^2)^2 + (V_{bc}^2 - V_{ca}^2)^2 + (V_{ca}^2 - V_{ab}^2)^2}}{V_e^2} \quad (36)$$

그림 8은 그 값의 변화를 보여주고 있다. 주어진 전압불평형계수에서 실효 제곱전압이탈율 또는 실효 제곱전압차율은 불평형계수의 위상각과 무관하게 일정한 값을 유지하며 낮은 전압불평형에서는 전압불평형계수에 수렴하고 100% 전압불평형에서는 전압불평형계수의 50%에 근접한다. 그러나 20%의 전압불평형에서도 그 오차는 식 (66)에서 예상할 수 있는 바와 같이 4% 미만에 불과하다.

만일 굳이 정확한 전압불평형계수를 구하고자 한다면 식 (34)에서 구한 실효전압제곱이탈율은 전압불평형계수와 2차 함수 관계를 가지므로 아래의 식을 적용할 수 있다.

$$u = \frac{1}{2u_s} - \sqrt{\frac{1}{4u_s^2} - 1} \quad (37)$$

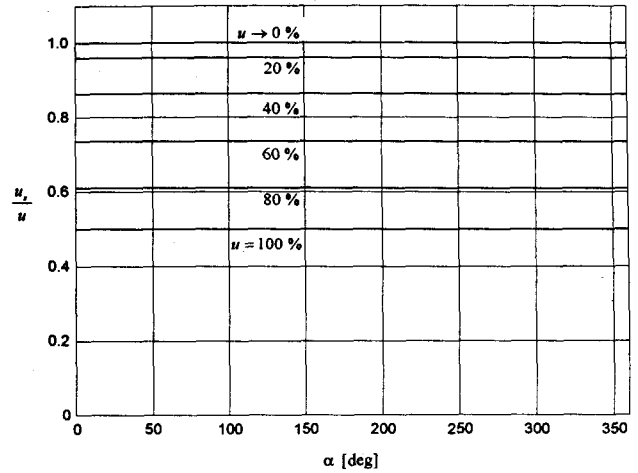


그림 8. 실효 제곱전압이탈율 실효 제곱전압차율
Fig. 8. Effective squared-voltage deviation/difference factor

5.3 수정된 실효 제곱전압이탈율

식 (34)에서 V_e 를 V_{avg} 로 치환하여 다음과 같이 수정된 실효 제곱전압이탈율(modified effective squared-voltage deviation factor)을 사용하면 계산이 보다 간단해진다.

$$u_x = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\sqrt{(V_{ab}^2 - V_{avg}^2)^2 + (V_{bc}^2 - V_{avg}^2)^2 + (V_{ca}^2 - V_{avg}^2)^2}}{V_{avg}^2} \quad (38)$$

그림 9에서 보듯이 이와 같이 수정하였을 때 전압불평형 계수에 대한 의존성이 다시 나타나기는 하지만 u_x 는 전반적으로 u_s 보다 전압불평형계수에 가까운 값을 가지게 된다. 20%의 전압불평형에서도 그 오차가 2% 정도에 불과한 것을 보면 이를 사용하여 상당히 넓은 범위에서 전압불평형계수를 거의 정확하게 계산할 수 있음을 알 수 있다.

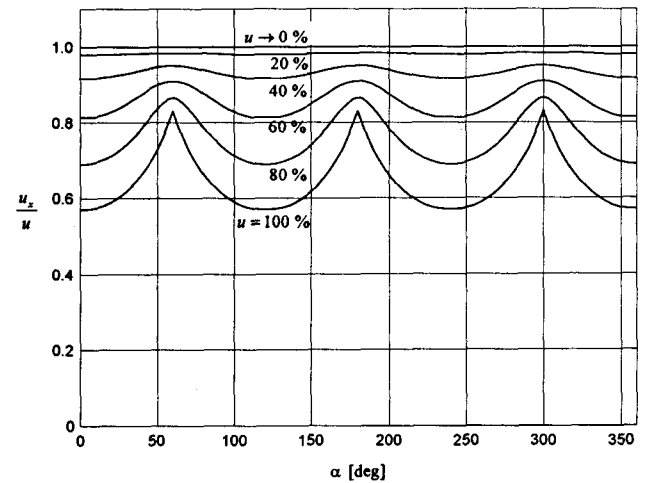


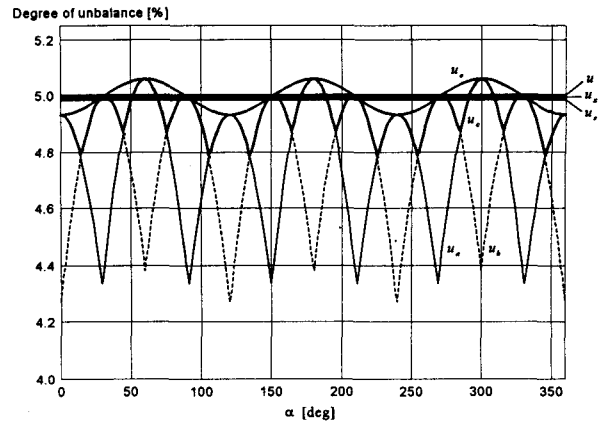
그림 9. 수정된 실효 제곱전압이탈율
Fig. 9. Modified effective squared-voltage deviation factor

6. 전압불평형계수 근사식의 비교

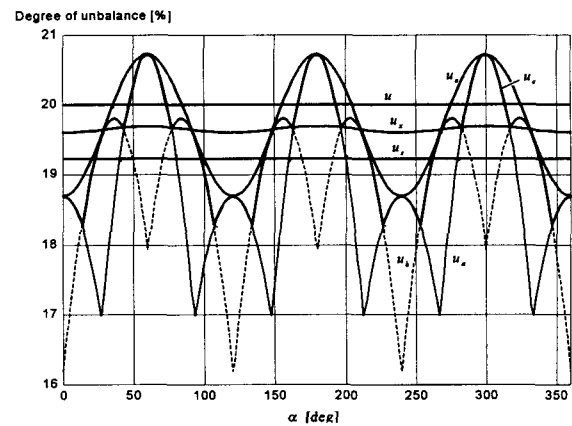
이상에서 살펴본 여섯 가지의 근사적인 방법들을 비교하기 위하여 그림 10에 5%와 20%의 전압불평형 두 경우에 대하여 이들로 계산된 불평형계수의 크기를 비교하여 나타내었다. 이들 중 전반적으로 u_x 가 전압불평형계수에 가장 근접하고 u_a 와 u_b 가 가장 변동이 심한 것을 알 수 있다.

그림 10은 또한 근사식들 사이의 상관관계가 있음을 보여주고 있다. 먼저 주목할 만한 점은 u_e 가 u_a 와 u_b 를 조합한 u_c 의 포락선에 해당한다는 점이다. 이는 앞서 그림 7의 설명에서 예상할 수 있는 측면이라 할 수 있다. 또 다른 흥미로운 점은 수정된 실효 제곱전압이탈을 u_x 가 u_e 의 평균치 부근에 있다는 것이다. u_x 의 변화를 좀 더 자세히 살펴보면 이 곡선이 u_c 와 u_e 가 교차하는 지점, 그리고 u_a 와 u_b 가 교차하는 지점을 지나고 있음을 알 수 있다. 이는 이들 표현 방식이 서로간에 긴밀한 상관관계를 가지고 있음을 시사하고 있다.

표 1은 제시된 방법들을 가장 좋은 근사치에서부터 순서대로 요약해서 보여주고 있다. 표의 맨 오른쪽 열은 각각의 방식들로 전압불평형계수를 계산하였을 때 5%의 오차를 넘지 않는 전압불평형계수를 나타내고 있다. 예를 들어 $u=35\%$ 까지는 u_x 로 계산한 값이 실제 전압불평형계수의 95% 이상의 값이 된다.



(a) 5% 전압불평형계수의 경우



(b) 20% 전압불평형계수의 경우

그림 10. 전압불평형의 근사적 표현방식들의 비교

Fig. 10. Comparison of various approximations to voltage unbalance factor

표 1. 전압불평형계수 근사식의 비교

Table 1. Comparison of approximate formulae of voltage unbalance factor

근사방법	표현식	5% 오차범위
수정된 실효 제곱전압이탈을 (u_x)	$\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\sqrt{(V_{ab}^2 - V_{avg}^2)^2 + (V_{bc}^2 - V_{avg}^2)^2 + (V_{ca}^2 - V_{avg}^2)^2}}{V_{avg}^2}$	35 %
실효 제곱전압이탈을 또는 실효 제곱전압차율 (u_s)	$\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\sqrt{(V_{ab}^2 - V_{avg}^2)^2 + (V_{bc}^2 - V_{avg}^2)^2 + (V_{ca}^2 - V_{avg}^2)^2}}{V_{avg}^2}$ $\frac{1}{3\sqrt{2}} \frac{\sqrt{(V_{ab}^2 - V_{bc}^2)^2 + (V_{bc}^2 - V_{ca}^2)^2 + (V_{ca}^2 - V_{ab}^2)^2}}{V_e^2}$	23 %
실효 전압이탈을 또는 실효 전압차율 (u_e)	$\frac{\sqrt{2}}{3} \frac{\sqrt{(V_{ab} - V_{avg})^2 + (V_{bc} - V_{avg})^2 + (V_{ca} - V_{avg})^2}}{V_{avg}}$ $\frac{\sqrt{2}}{3} \frac{\sqrt{(V_{ab} - V_{bc})^2 + (V_{bc} - V_{ca})^2 + (V_{ca} - V_{ab})^2}}{V_{avg}}$	17 %
최대전압이탈을 및 최대전압차율의 조합 (u_c)	$\frac{1}{V_{avg}} \max \left[V_{ab} - V_{avg} , V_{bc} - V_{avg} , V_{ca} - V_{avg} , \frac{ V_{ab} - V_{bc} }{\sqrt{3}}, \frac{ V_{bc} - V_{ca} }{\sqrt{3}}, \frac{ V_{ca} - V_{ab} }{\sqrt{3}} \right]$	9 %
최대전압이탈을 (u_a)	$\frac{\max[V_{ab} - V_{avg} , V_{bc} - V_{avg} , V_{ca} - V_{avg}]}{V_{avg}}$	없음
최대전압차율 (u_b)	$\frac{\max[V_{ab} - V_{bc} , V_{bc} - V_{ca} , V_{ca} - V_{ab}]}{\sqrt{3} V_{avg}}$	없음

7. 결 론

본 논문에서는 전압불평형계수를 계산하는 데 있어서 대칭과표변환을 할 필요 없이 선간전압의 측정치만을 사용하여 근사적으로 그 값을 구할 수 있는 방안을 검토하였다.

먼저 가장 흔히 사용되는 최대전압이탈율과 전압불평형계수의 상관관계를 살펴본 결과 비교적 낮은 전압불평형 상태에서는 최대전압이탈율이 전압불평형계수를 근사적으로 표현하는 것으로 나타났다. 그러나 최선의 경우에도 13% 이하의 오차범위 내에서 전압불평형계수를 예측하는 것은 불가능함을 알 수 있었다.

따라서 이러한 오차를 줄이기 위하여 전압불평형계수와 선간전압의 크기 간의 상관관계로부터 도출된 몇가지의 대안을 검토하였다. 그 결과 수정된 실효 제곱전압이탈율이나 실효 전압이탈율 또는 실효 전압차율 등을 사용하면 기존의 최대전압이탈율에 비하여 훨씬 정확한 전압불평형계수의 근사치를 구할 수 있음을 알 수 있었다.

이러한 근사식은 비교적 낮은 전압불평형 상태에서만 성립하는 것으로 전압불평형이 심화되면 어떤 근사식으로도 전압불평형을 정확하게 예측할 수는 없다. 비록 전압불평형의 전 범위에서 적용할 수 있는 간단한 근사적 방식은 발견할 수는 없었으나 방식에 따라서는 20 내지 30%의 전압불평형까지도 실제 전압불평형 계수를 5% 이내의 오차범위 이내로 추정하는 것이 가능한 것으로 나타났다.

결론적으로 본 논문에서 제시한 방식들은 현장에서 흔히 나타날 수 있는 수 % 정도의 불평형 조건 하에서 전압불평형계수를 근사적으로 구함에 있어서 기존의 최대전압이탈율을 대신하여 보다 정확한 방법으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 광운대학교의 1999년도 학술연구비 지원에 의해 이루어졌음.

참 고 문 헌

- [1] IEC Standard 61000-4-27: Testing and measurement techniques Unbalance, immunity test, August 2000.
- [2] 저자, "전압불평형의 표현방식에 관한 연구(I) - 선간전압 크기에 의한 전압불평형계수의 표현," 대한전기학회 논문지 52권 5호, 2003년 5월.
- [3] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations, "Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: A discussion," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, no. 1, January 1996.

저 자 소 개



정 승 기(鄭勝基)

1982년 서울대학교 전기공학과 졸업. 동 대학원에서 1984년에 공학석사, 1988년에 공학박사학위 취득. 1987년부터 현재까지 광운대학교 전기공학과 교수로 재직중. 1994년 Texas A&M 대학 방문연구. 전기학회 논문상, 전력전자학회 논문상, 춘강학술상 등 수상. 주 관심분야

는 산업용 인버터 제어 및 응용, 전력품질, 일반화된 전력 이론 등.

Tel: 02-940-5146

Fax: 02-943-7195

email: sgjeong@daisy.kw.ac.kr