

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200258

基于序分量和量测值的三相不平衡度量研究

何月军, 郝思鹏, 刘思亦, 张仰飞, 刘海涛

(南京工程学院电力工程学院, 江苏省主动配电网重点建设实验室, 江苏 南京 211167)

摘要: IEC 序分量三相不平衡度量包括负序和零序三相不平衡度, 使得三相不平衡度不具有唯一性。以量测的有效值度量三相不平衡度与序分量度量形式不具有对应关系, 给工程使用带来困扰。基于序分量和相量的大小关系, 提出采用正序分量有效值的平方和与总量平方和之比度量三相平衡度, 统一了含零序和不含零序系统的度量形式。在此基础上, 分别针对不含零序分量的线电压、线电流, 含有零序分量的相电压、相电流, 给出了根据量测有效值获取序分量大小的方法, 构建与序分量度量对应的量测有效值度量形式。算例显示, 提出的序分量度量方式适用于三相三线制和三相四线制系统, 构建的量测值度量形式和序分量具有对应关系, 保证了工程应用中三相不平衡度量的唯一性。

关键词: 三相不平衡; 序分量; 量测值; 三相三线制; 三相四线制

Research on three phase unbalanced ratio measurement based on sequence components and measured values

HE Yuejun, HAO Sipeng, LIU Siyi, ZHANG Yangfei, LIU Haitao

(Key Laboratory of Active Distribution Network of Jiangsu Province, School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: IEC separately defines the negative sequence and zero sequence three phase unbalanced ratio. So, the definition is not unique. The unbalanced ratio calculated by measured RMS values has no correspondence with the sequence component definition. It makes for confusion in actual engineering. Based on the size relationship between RMS of the sequence component and phasor, it is proposed to measure the three-phase balance ratio using the square of the three-phase positive sequence component RMS divided by the square of the phasor RMS. In this way the definition is unified no matter whether it is with or without the zero sequence component. On this basis, the method of using measurement values to get sequence components is constructed, aiming at both the line voltage and current without the zero sequence component and phase voltage and current with the zero-sequence component. The measurement RMS unbalanced ratio definition has correspondence with the sequence component. The examples show that the proposed method of sequence component measurement is more suitable for a three-phase three-wire system and a three-phase four-wire system. The definition based on measured values corresponds with the sequence component definition. It guarantees the uniqueness of the three-phase unbalanced ratio in engineering.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607083), Major Natural Science Research Projects of Jiangsu Province University (No. 17KJA470003), and Project of State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control.

Key words: three-phase unbalance; sequence component; measured value; three-phase three-wire system; three-phase four-wire system

0 引言

屋顶光伏、大功率单相负荷接入等使得三相不

平衡问题日益突出^[1-3]。电力系统三相不平衡导致电动机效率降低, 线路损耗增加等, 也影响了测量、计量仪表的精度^[4-6]。

不平衡度量是分析和治理三相不平衡的基础, 平衡系统电压、电流仅包含正序分量, 因此, 一般通过序分量度量三相不平衡^[7-8]。国际电工委员会(International Electro-technical Commission, IEC)提

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607083); 江苏省高校自然科学研究重大项目资助(17KJA470003); 智能电网保护与控制国家重点实验室项目资助

出利用负序与正序分量的基波有效值之比来表征三相不平衡度, 并应用于三线制系统。工程中, 含有零序分量的四线制系统中三相不平衡更为严重, 我国国标《电能质量-三相电压不平衡》中规定用电压、电流的负序基波分量或零序基波分量与正序基波分量方均根值的百分比表示三相不平衡度^[9-10], 这一规定形成了负序三相不平衡度和零序三相不平衡度两个概念, 使得三相不平衡度定义不具有统一性, 对于负序、零序同时存在的不平衡系统, 难以比较谁更不平衡, 如: 负序不平衡度 5%、零序不平衡度 5%和负序不平衡度 3%、零序不平衡度 6%的两个系统谁更不平衡。而且, 上述不平衡度参数的分布不在 0~1 之间, 即不平衡度可能超过 100%。

现有测量电压、电流等物理量仪表主要反映的是有效值, 难以获得相序分解需要的相量。为便于工程计算, 电气与电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE)基于有效值定义了相电压不平衡度(PVUR)^[11-12]; 美国电器制造商协会(National Electrical Manufacturers Association, NEMA)与国际大电网委员会(International Council on Large Electric Systems, CIGRE)定义了线电压不平衡度(LVUR)^[13]。其他协会或电力公司也基于量测值提出三相电压、电流不平衡度实用度量方式。基于量测值的度量方式计算相对简单, 但其缺乏与序分量度量形式的对应关系, 不同度量方式之间结果有时差异较大, 其精确度和可信度存在一定质疑。

构建适用于三线制和四线制系统的统一序分量三相不平衡度, 建立与序分量对应的量测值三相不平衡度是本文研究两个重点。在分析了电压、电流序分量和相量大小关系的基础上, 基于三线制、四线制系统共有正序分量, 提出采用三相平衡度评价体系, 并用三相正序分量有效值平方和与总量平方和之比定义三相平衡度 ε_b , 实现了对含零序或不含零序分量系统的统一评价。三相不平衡度可以统一表述为 $\varepsilon_{ub} = 1 - \varepsilon_b$, 无论是平衡度还是不平衡度, 其数值分布均处于 0~1 之间。

在统一的序分量平衡度、不平衡度基础上, 提出量测有效值与序分量的转换关系, 实现了平衡度和不平衡度的量测有效值表示。针对不含零序分量系统, 利用三相电压、电流量测值构成闭合三角形的特征, 通过量测值获取序分量大小, 并将序分量三相平衡度、不平衡度转换为量测值形式; 针对含零序分量的相电压, 根据线电压端点也是相电压端点的特性, 获取序分量大小, 构建与序分量描述相对应的量测值三相平衡度、不平衡度量方式; 针对含零序分量的相电流, 根据变压器的不同连接方

式与高、低压侧电流关系, 获取序分量大小, 构建与序分量描述相对应的量测值三相平衡度、不平衡度量形式。解决了原有量测有效值不平衡度量形式与序分量不对应的问题, 保证了三相不平衡度的唯一性, 为工程应用提供了理论和技术支撑。

1 序分量三相平衡度、不平衡度量改进

平衡系统仅含有正序分量, 因此, 常用序分量描述三相不平衡度。IEC 和国标提出三相不平衡度描述(以电流为例)如式(1)、式(2)所示。

$$\varepsilon_{u2} = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\varepsilon_{u0} = \frac{I_0}{I_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中, I_1 、 I_2 、 I_0 为正序、负序、零序分量的基波有效值。

对于三相三线制系统, 由于不存在零序分量, 通常用式(1)描述三相不平衡度。对于三相四线制系统, 同时存在负序、零序分量, 式(1)为负序三相不平衡度, 式(2)为零序三相不平衡度, 两个表达式使得三相不平衡度不具有唯一性。需要进行改进, 统一三相三线制和四线制的不平衡度描述。

1.1 序分量与相量的大小关系

序分量是对相量的分解, 根据对称分量法, 三相相量可分解为三组相序不同的对称序分量。以电流为例, 有

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 \\ \dot{I}_B = \dot{I}_1 \angle -120^\circ + \dot{I}_2 \angle 120^\circ + \dot{I}_0 \\ \dot{I}_C = \dot{I}_1 \angle 120^\circ + \dot{I}_2 \angle -120^\circ + \dot{I}_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 为三相电流相量; \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 、 \dot{I}_0 为正序、负序和零序电流分量。

式(3)中序分量和相量都包含角度, 设 A 相正序电流为 $I_1 \angle 0^\circ$, 负序电流为 $I_2 \angle \varphi_1$, 零序电流为 $I_0 \angle \varphi_2$, 则电流相量与序分量大小的关系为

$$\begin{cases} I_A^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_0^2 + 2I_1 I_2 \cos \varphi_1 + 2I_1 I_0 \cos \varphi_2 + \\ \quad 2I_2 I_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ I_B^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_0^2 + 2I_1 I_2 \cos(\varphi_1 + 120^\circ) + \\ \quad 2I_1 I_0 \cos(\varphi_2 - 120^\circ) + 2I_2 I_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2 + 120^\circ) \\ I_C^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_0^2 + 2I_1 I_2 \cos(\varphi_1 - 120^\circ) + \\ \quad 2I_1 I_0 \cos(\varphi_2 + 120^\circ) + 2I_2 I_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2 - 120^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

相加可得

$$I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 = 3(I_1^2 + I_2^2 + I_0^2) \quad (5)$$

由式(5)可知, 电流相量大小的平方和等于序分量大小平方和的 3 倍, 并且序分量间的相位差不影响其与相量有效值大小的关系。

1.2 改进的序分量三相平衡度、不平衡度度量方式

负序和零序分量均会引起不平衡, 三相三线制、四线制系统存在含有和不含零序分量的差异, 统一三相不平衡度定义较为困难。对于三相三线制和四线制不平衡系统, 正序分量是共有的序分量, 本文提出以三相正序分量在总量中所占比例度量三相平衡度, 正序分量以外部分用于度量三相不平衡度。由式(5)可知, 序分量和相量大小平方和存在等式关系。采用三相正序分量有效值平方和占总量平方和百分数定义三相平衡度, 得

$$\varepsilon_b = \frac{3I_1^2}{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2} = \frac{3I_1^2}{3(I_1^2 + I_2^2 + I_0^2)} = \frac{I_1^2}{I_1^2 + I_2^2 + I_0^2} \times 100\% \quad (6)$$

则三相不平衡度为

$$\varepsilon_{ub} = 1 - \varepsilon_b = \frac{I_2^2 + I_0^2}{I_1^2 + I_2^2 + I_0^2} \times 100\% \quad (7)$$

式(6)和式(7)统一了含零序和不含零序系统三相平衡度、不平衡度度量形式。对于三线制系统, 将公式中 I_0 取为 0 即可, 公式具有唯一性, 且将平衡度、不平衡度限制在 0~1 之间。以平方和定义的平衡度和不平衡度有利于后续建立三相不平衡与线损之间的量化关系。

2 量测值三相平衡度、不平衡度度量方式改进

序分量获取需要相量分解, 即需要获得各物理量的相角关系。仪表主要测量电压、电流有效值, 工程中为便于计算, 常采用量测值大小度量三相不平衡^[14-16]。

IEEE 规定了相电压不平衡度(PVUR)。IEEE Std.936-1987 定义如式(8)所示。

$$PVUR_{936} = \frac{U_{Pmax} - U_{Pmin}}{U_{Pav}} \times 100\% \quad (8)$$

IEEE Std.112-2004 定义如式(9)所示。

$$PVUR_{112} = \frac{\max(|U_P - U_{Pav}|)}{U_{Pav}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: 相电压 $U_P = U_A、U_B、U_C$; U_{Pmax} 为相电压最大值; U_{Pmin} 为相电压最小值; U_{Pav} 为相电压平均值。

美国电器制造商协会定义线电压不平衡度(LVUR)如式(10)所示。

$$LVUR = \frac{|U_{Lmax} - U_{Lav}|}{U_{Lav}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: U_{Lmax} 为线电压最大值; U_{Lav} 为线电压平均值。

国际大电网委员会(CIGER)基于和 IEC 序分量三相不平衡定义对应, 推荐线电压不平衡度如式(11)所示。

$$LVUR = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6r}}{1 + \sqrt{3 - 6r}}} \times 100\% \quad (11)$$

式中, $r = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2}$, 其中 $U_{AB}、U_{BC}、U_{CA}$ 为线电压。

国家电网公司等单位也推出了自己定义的不平衡度度量方法, 由公式可知, 这些量测值不平衡度度量方法与序分量形式总体缺乏对应关系, 主要基于工程经验, 不同的度量方式数值存在一定差异, 给工程使用带来一定困惑。

序分量平衡度、不平衡度度量形式唯一, 为三相不平衡度量提供了标准, 但获取困难。基于量测量的不平衡度量获取简单, 但形式较多, 不具有唯一性。亟待构建与序分量对应的量测值三相平衡度、不平衡度度量方式^[17-19]。

2.1 无零序分量的线电压、线电流测量值度量方式

对于线电压和三线制线电流, 由于量测的线电压、线电流大小构成闭合三角形, 可以构建与序分量对应的量测值度量方式。以线电压为例, 设 AB 线电压的正序分量为 $U_1 \angle 0^\circ$, 负序分量为 $U_2 \angle \varphi$, 由于没有零序分量, 则序分量和相量大小关系为

$$\begin{cases} U_{AB}^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \varphi \\ U_{BC}^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\varphi + 120^\circ) \\ U_{CA}^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\varphi - 120^\circ) \end{cases} \quad (12)$$

化简计算, 可得

$$U_1^2 + U_2^2 = \frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2}{3} = \frac{1}{3} \sqrt{2\beta + \alpha} \quad (13)$$

$$2U_1U_2 = \frac{2}{3} \sqrt{\alpha - \beta} \quad (14)$$

式中: $\beta = U_{AB}^2 U_{BC}^2 + U_{BC}^2 U_{CA}^2 + U_{CA}^2 U_{AB}^2$; $\alpha = U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4$ 。

求解可知:

$$\begin{cases} (U_1 + U_2)^2 = \frac{1}{3} \sqrt{2\beta + \alpha} + \frac{2}{3} \sqrt{\alpha - \beta} \\ (U_1 - U_2)^2 = \frac{1}{3} \sqrt{2\beta + \alpha} - \frac{2}{3} \sqrt{\alpha - \beta} \end{cases} \quad (15)$$

通常 $U_1 > U_2$, 可求得 $U_1、U_2$ 。

$$\begin{cases} U_1^2 = \frac{\sqrt{2\beta+\alpha}}{6} + \frac{\sqrt{3}\sqrt{2\beta-\alpha}}{6} \\ U_2^2 = \frac{\sqrt{2\beta+\alpha}}{6} - \frac{\sqrt{3}\sqrt{2\beta-\alpha}}{6} \end{cases} \quad (16)$$

根据式(6)、式(7)序分量平衡度、不平衡度量形式, 将序分量代入, 求得量测量对应表达式为

$$\begin{cases} \varepsilon_b = \frac{U_1^2}{U_1^2+U_2^2} = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sqrt{2\beta-\alpha}}{\sqrt{2\beta+\alpha}} \\ \varepsilon_{ub} = \frac{U_2^2}{U_1^2+U_2^2} = \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sqrt{2\beta-\alpha}}{\sqrt{2\beta+\alpha}} \end{cases} \quad (17)$$

可知, 对于线电压和三线制线电流, 利用量测量可以直接计算与序分量定义对应的三相平衡度、不平衡度, 实现序分量和量测有效值定义的统一。

2.2 含零序分量的相电压量测值度量方式

对于 Y 联结的相电压, 其大小可能不构成闭合三角形, 即含有零序分量。设 A 相的正序分量为 $U_1 \angle 0^\circ$, 负序分量为 $U_2 \angle \varphi_1$, 零序分量为 $U_0 \angle \varphi_2$, 则各相电压为

$$\begin{cases} \dot{U}_A = U_1 + U_2 \angle \varphi_1 + U_0 \angle \varphi_2 \\ \dot{U}_B = U_1 \angle -120^\circ + U_2 \angle \varphi_1 + 120^\circ + U_0 \angle \varphi_2 \\ \dot{U}_C = U_1 \angle 120^\circ + U_2 \angle \varphi_1 - 120^\circ + U_0 \angle \varphi_2 \end{cases} \quad (18)$$

考虑到线电压端点也是相电压端点的特性, 根据相电压与线电压关系, 可知:

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \sqrt{3}(U_1 \angle 30^\circ + U_2 \angle \varphi_1 - 30^\circ) \\ \dot{U}_{BC} = \sqrt{3}(U_1 \angle -90^\circ + U_2 \angle \varphi_1 + 90^\circ) \\ \dot{U}_{CA} = \sqrt{3}(U_1 \angle 150^\circ + U_2 \angle \varphi_1 - 150^\circ) \end{cases} \quad (19)$$

其有效值关系为

$$\begin{cases} U_{AB}^2 = 3[U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\varphi_1 - 60^\circ)] \\ U_{BC}^2 = 3[U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\varphi_1 + 180^\circ)] \\ U_{CA}^2 = 3[U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\varphi_1 + 60^\circ)] \end{cases} \quad (20)$$

则有

$$U_1^2 + U_2^2 = \frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2}{9} = \frac{1}{9} \sqrt{2\beta + \alpha} \quad (21)$$

$$2U_1U_2 = \frac{2}{9} \sqrt{\alpha - \beta} \quad (22)$$

若 $U_1 > U_2$, 则正、负序分量与有效值关系为

$$\begin{cases} U_1^2 = \frac{\sqrt{2\beta+\alpha}}{18} + \frac{\sqrt{3}\sqrt{2\beta-\alpha}}{18} \\ U_2^2 = \frac{\sqrt{2\beta+\alpha}}{18} - \frac{\sqrt{3}\sqrt{2\beta-\alpha}}{18} \end{cases} \quad (23)$$

由于 $U_1^2 + U_2^2 + U_0^2 = \frac{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}{3}$, 则量测量

描述的相电压三相平衡度、不平衡度分别为

$$\begin{cases} \varepsilon_b = \frac{U_1^2}{U_1^2+U_2^2+U_0^2} = \frac{\sqrt{2\beta+\alpha} + \sqrt{3}\sqrt{2\beta-\alpha}}{6(U_A^2+U_B^2+U_C^2)} \\ \varepsilon_{ub} = 1 - \frac{U_1^2}{U_1^2+U_2^2+U_0^2} = 1 - \frac{\sqrt{2\beta+\alpha} + \sqrt{3}\sqrt{2\beta-\alpha}}{6(U_A^2+U_B^2+U_C^2)} \end{cases} \quad (24)$$

由于线电压的端点也是相电压的端点, 由式(23)可知, 相电压的正、负序分量大小仅与线电压大小相关, 数值为线电压正、负序分量的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 。零

序分量仅影响表达式的分母部分。由式(24)可知, 利用量测的线电压、相电压有效值可以构建与序分量描述对应的三相平衡度和不平衡度表达式, 实现二者的统一。

2.3 含零序分量的相电流量测值度量方式

配变台区低压侧采用三相四线制接线方法, 其电流含有零序分量。电流的量测值包括三相负载电流和中线电流的大小。由于四个电流构成的四边形不具有唯一解, 难以根据电流大小确定电流相量, 给建立三相平衡度、不平衡度量方式带来困难。

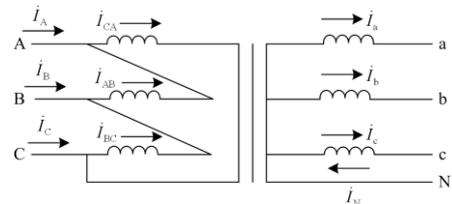
配电台区 10/0.38 kV 变压器采用 Δ/Y_0 和 Y/Y_0 两种接线方式。由于高压侧为三相三线制系统, 其电流构成闭合三角形, 可以利用配电变压器高压侧电流获取低压侧电流正、负序分量, 从而建立与序分量对应的量测量三相平衡度和不平衡度。

2.3.1 配变 Δ/Y_0 联结

高压侧三相线电流分别为 I_A 、 I_B 、 I_C , 低压侧相电流为 I_a 、 I_b 、 I_c , 低压侧中线电流为 I_N 。设低压侧 a 相电流的正序分量为 $I_1 \angle 0^\circ$, 负序分量为 $I_2 \angle \varphi_1$, 零序分量为 $I_0 \angle \varphi_2$, 则各相电压为

$$\begin{cases} \dot{I}_a = I_1 \angle 0^\circ + I_2 \angle \varphi_1 + I_0 \angle \varphi_2 \\ \dot{I}_b = I_1 \angle -120^\circ + I_2 \angle (\varphi_1 + 120^\circ) + I_0 \angle \varphi_2 \\ \dot{I}_c = I_1 \angle 120^\circ + I_2 \angle (\varphi_1 - 120^\circ) + I_0 \angle \varphi_2 \end{cases} \quad (25)$$

由于 Δ/Y_0 联结配变高、低压侧相电流均有零序通路, 原边侧相电流和副边侧相电流保持同相, 原边侧线电流和副边侧相电流关系如图 1 所示。



(a) 电流在绕组中分布

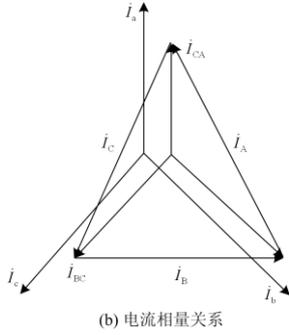


图 1 原、副边侧电流关系

Fig. 1 Relations of primary and secondary side current

设变压器变比为 k ，由图 1(b)可知：

$$\begin{cases} \dot{i}_{AB} = \frac{1}{\sqrt{3}k} (I_1 \angle 0^\circ + I_2 \angle \varphi_1 + I_0 \angle \varphi_2) \\ \dot{i}_{BC} = \frac{1}{\sqrt{3}k} [I_1 \angle -120^\circ + I_2 \angle (\varphi_1 + 120^\circ) + I_0 \angle \varphi_2] \\ \dot{i}_{CA} = \frac{1}{\sqrt{3}k} [I_1 \angle 120^\circ + I_2 \angle (\varphi_1 - 120^\circ) + I_0 \angle \varphi_2] \end{cases} \quad (26)$$

可知，原边侧线电流为

$$\begin{cases} \dot{i}_A = \dot{i}_{AB} - \dot{i}_{CA} = \frac{1}{k} [I_1 \angle -30^\circ + I_2 \angle (\varphi_1 + 30^\circ)] \\ \dot{i}_B = \dot{i}_{BC} - \dot{i}_{AB} = \frac{1}{k} [I_1 \angle -150^\circ + I_2 \angle (\varphi_1 + 150^\circ)] \\ \dot{i}_C = \dot{i}_{CA} - \dot{i}_{BC} = \frac{1}{k} [I_1 \angle 90^\circ + I_2 \angle (\varphi_1 - 90^\circ)] \end{cases} \quad (27)$$

其大小关系为

$$\begin{cases} k^2 I_A^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos(\varphi_1 + 60^\circ) \\ k^2 I_B^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos(\varphi_1 - 60^\circ) \\ k^2 I_C^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos(\varphi_1 + 180^\circ) \end{cases} \quad (28)$$

求解得

$$I_1^2 + I_2^2 = k^2 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3} = \frac{k^2}{3} \sqrt{2\beta + \alpha} \quad (29)$$

$$2I_1 I_2 = \frac{2k^2}{3} \sqrt{\alpha - \beta} \quad (30)$$

式中： $\alpha = I_A^4 + I_B^4 + I_C^4$ ； $\beta = I_A^2 I_B^2 + I_B^2 I_C^2 + I_C^2 I_A^2$ 。

若 $I_1 > I_2$ ，则正、负序分量与有效值关系为

$$\begin{cases} I_1^2 = k^2 \left(\frac{\sqrt{2\beta + \alpha}}{6} + \frac{\sqrt{3}\sqrt{2\beta - \alpha}}{6} \right) \\ I_2^2 = k^2 \left(\frac{\sqrt{2\beta + \alpha}}{6} - \frac{\sqrt{3}\sqrt{2\beta - \alpha}}{6} \right) \end{cases} \quad (31)$$

由于 $I_1^2 + I_2^2 + I_0^2 = \frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}$ ，则量测值描述的

的相电流三相平衡度、不平衡度分别为

$$\begin{cases} \varepsilon_b = \frac{I_1^2}{I_1^2 + I_2^2 + I_0^2} = k^2 \frac{\sqrt{2\beta + \alpha} + \sqrt{3}\sqrt{2\beta - \alpha}}{2(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)} \\ \varepsilon_{ub} = 1 - \frac{I_1^2}{I_1^2 + I_2^2 + I_0^2} = 1 - k^2 \frac{\sqrt{2\beta + \alpha} + \sqrt{3}\sqrt{2\beta - \alpha}}{2(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)} \end{cases} \quad (32)$$

对于 Δ/Y_0 联结的变压器，高压侧电流构成闭合三角形，由于高压侧线电流大小只与正、负序分量大小相关，与零序无关，通过变比折算至低压侧，从而确定低压侧电流的正、负序分量，解决了三相四线制系统电流序分量计算的问题。可知通过高、低压侧量测的电流有效值可以构建与序分量定义统一的三相平衡度、不平衡度表达形式。

2.3.2 配变 Y/Y₀ 联结

高压侧三相线电流分别为 I_A 、 I_B 、 I_C ，低压侧相电流为 I_a 、 I_b 、 I_c ，变比为 k 。设低压侧 a 相电流的正序分量为 $I_1 \angle 0^\circ$ ，负序分量为 $I_2 \angle \varphi_1$ ，零序分量为 $I_0 \angle \varphi_2$ ，则有

$$\begin{cases} \dot{i}_a = I_1 \angle 0^\circ + I_2 \angle \varphi_1 + I_0 \angle \varphi_2 \\ \dot{i}_b = I_1 \angle -120^\circ + I_2 \angle (\varphi_1 + 120^\circ) + I_0 \angle \varphi_2 \\ \dot{i}_c = I_1 \angle 120^\circ + I_2 \angle (\varphi_1 - 120^\circ) + I_0 \angle \varphi_2 \end{cases} \quad (33)$$

对于 Y/Y₀ 联结配变，原边侧没有零序通路，即原、副边侧只有正序、负序分量按变比变换，零序电流不能耦合到原边。原、副边侧电流关系为

$$\begin{cases} \dot{i}_A = \frac{I_1 \angle 0^\circ}{k} + \frac{I_2 \angle \varphi_1}{k} \\ \dot{i}_B = \frac{I_1 \angle -120^\circ}{k} + \frac{I_2 \angle (\varphi_1 + 120^\circ)}{k} \\ \dot{i}_C = \frac{I_1 \angle 120^\circ}{k} + \frac{I_2 \angle (\varphi_1 - 120^\circ)}{k} \end{cases} \quad (34)$$

其大小关系为

$$\begin{cases} k^2 I_A^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos \varphi_1 \\ k^2 I_B^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos(\varphi_1 - 120^\circ) \\ k^2 I_C^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos(\varphi_1 + 120^\circ) \end{cases} \quad (35)$$

化简得

$$I_1^2 + I_2^2 = k^2 \frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3} = \frac{k^2}{3} \sqrt{2\beta + \alpha} \quad (36)$$

$$2I_1 I_2 = \frac{2k^2}{3} \sqrt{\alpha - \beta} \quad (37)$$

式中： $\alpha = I_A^4 + I_B^4 + I_C^4$ ； $\beta = I_A^2 I_B^2 + I_B^2 I_C^2 + I_C^2 I_A^2$ 。

若 $I_1 > I_2$ ，则正、负序分量与有效值关系为

$$\begin{cases} I_1^2 = k^2 \left(\frac{\sqrt{2\beta + \alpha}}{6} + \frac{\sqrt{3}\sqrt{2\beta - \alpha}}{6} \right) \\ I_2^2 = k^2 \left(\frac{\sqrt{2\beta + \alpha}}{6} - \frac{\sqrt{3}\sqrt{2\beta - \alpha}}{6} \right) \end{cases} \quad (38)$$

由于 $I_1^2 + I_2^2 + I_0^2 = \frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}$, 则量测值描述

的相电流三相平衡度、不平衡度分别为

$$\begin{cases} \varepsilon_b = \frac{I_1^2}{I_1^2 + I_2^2 + I_0^2} = k^2 \frac{\sqrt{2\beta + \alpha} + \sqrt{3}\sqrt{2\beta - \alpha}}{2(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)} \\ \varepsilon_{ub} = 1 - \frac{I_1^2}{I_1^2 + I_2^2 + I_0^2} = 1 - k^2 \frac{\sqrt{2\beta + \alpha} + \sqrt{3}\sqrt{2\beta - \alpha}}{2(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)} \end{cases} \quad (39)$$

对于 Y/Y₀ 联结的变压器, 由于高压侧无中线, 所有高压侧电流没有零序分量, 其大小只与正、负序分量相关, 可以通过变比折算至低压侧, 从而确定低压侧电流的正、负序分量^[20-25]。

由上述可知, 配变无论是 Δ/Y₀ 联结还是 Y/Y₀ 联结, 都可以利用高、低压两侧的电流大小关系, 构建与序分量描述对应的量测有效值三相平衡度和不平衡度表达形式, 并且表达形式一致。

表 1 序分量不平衡度

Table 1 Sequence component unbalance ratio

A 相正序	A 相负序	A 相零序	U _A /V	U _B /V	U _C /V	U _{AB} /V	U _{BC} /V	U _{CA} /V	PVUR ₉₃₆ /%	PVUR ₁₁₂ /%	LVUR/ %	IEC 负序/%	序分量 ε _{ub} /%	相电压有效 值 ε _{ub} /%	线电压有效 值 ε _{ub} /%
20∠0°	10∠0°	0∠0°	30	17	17	46	17	46	60	40	52	50	20	20	20
20∠0°	10∠60°	0∠0°	27	27	10	52	30	30	79	52	39	50	20	20	20
20∠0°	10∠0°	10∠0°	40	10	10	46	17	46	150	100	52	50	33	33	20
20∠0°	10∠60°	10∠60°	35	17	17	52	30	30	75	50	39	50	33	33	20
20∠0°	10∠0°	20∠0°	50	10	10	46	17	46	171	114	52	50	56	56	20
20∠0°	10∠60°	20∠60°	44	10	26	52	30	30	128	65	39	50	56	56	20

由表 1 可知, 根据有效值计算的相电压三相不平衡度 PVUR₉₃₆ 和 PVUR₁₁₂, 不仅随着序分量大小改变而改变, 而且随着相位差改变而变化, 并且数值出现超过 100%。虽然 PVUR₉₃₆ 和 PVUR₁₁₂ 总体随着负序、零序分量的变化而变大, 但不具有一致性。如表 1 所示, 在正序、负序分量不变的情况下, 零序分量由 0∠0° 增加至 10∠60°, PVUR₉₃₆ 不平衡度由 79% 下降至 75%, PVUR₁₁₂ 不平衡度由 52% 下降至 50%, 说明该方法存在一定缺陷。

由于正序、负序分量的有效值不变, IEC 负序不平衡度始终保持不变。提出的序分量不平衡度随着负序、零序分量增加而能够反映序分量大小变化带来的影响, 并且随着负序、零序分量增大而增大, 具有一致性。根据相电压大小获得的量测值不平衡度与提出的序分量描述一致, 说明二者具有对应关系。根据线电压有效值计算获得的线电压不平衡度, 由于不含零序分量, 其值保持不变, 可知在同一三相系统中, 线、相电压之间不平衡度不同, 必须分别计算。

3 算例分析

以 Y 联结相电压为例, 设分解后 A 相的正序、负序和零序分量分别为 U₁ = 20∠0° V、U₂ = 0 V 和 U₀ = 10∠0° V, 即三相电压只有正序、零序分量, 不存在负序分量。三相相电压有效值分别为: U_A = 30 V, U_B = 17.3 V, U_C = 17.3 V。计算得 U₁² + U₂² + U₀² = 500, U_A² + U_B² + U_C² = 1500, 可知, 三相总量平方和等于序分量有效值平方和的 3 倍, 符合式(5)的结论。

根据提出的序分量三相平衡度和不平衡度计算

$$\text{得 } \varepsilon_b = \frac{3U_1^2}{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2} \times 100\% = 80\%, \quad \varepsilon_{ub} = 20\%。$$

改变更序分量的大小及相角, 对比不同定义三相不平衡度的数值差异, 如表 1 所示。

对于三相四线制配变, 设高压侧电源电压对称, 低压侧负载不对称, 将线路及变压器损耗计入负载, 参数如表 2 所示。

表 2 配变及负载参数

Table 2 Parameters of transformer and load

电源电压/kV	变比	a 相负载/ kVA	b 相负载/ kVA	c 相负载/ kVA
10	10/0.38	200+j100	150+j50	100+j0

若配变是 Δ/Y₀ 联结, 计算得到的高、低压侧电流大小如表 3 所示。

表 3 配变 Δ/Y₀ 联结原、副边电流Table 3 Primary and secondary side current of Δ/Y₀ transformer

原边电流			副边电流		
I _A /A	I _B /A	I _C /A	I _a /A	I _b /A	I _c /A
31	32	20	1 016	719	455

若配变是 Y/Y₀ 联结, 计算得到的高、低压侧电流大小如表 4 所示。

由表 3、表 4 可知, 虽然配变的低压侧电流相同, 但对于不同的联结方式, 高压侧电流不同。根

据高、低压侧电流有效值计算低压侧电流平衡度及不平衡度，如表 5 所示。

表 4 配变 Y/Y₀ 联结原、副边电流

Table 4 Primary and secondary side current of Y/Y₀ transformer

原边电流			副边电流		
I _A /A	I _B /A	I _C /A	I _a /A	I _b /A	I _c /A
34	25	24	1 016	719	455

表 5 低压侧电流平衡度、不平衡度

Table 5 Balance ratio and unbalance ratio of secondary side current

Δ/Y_0		Y/Y ₀	
ε_b	ε_{ub}	ε_b	ε_{ub}
88%	12%	88%	12%

由表 5 可知，虽然高压侧电流大小不同，但 Δ/Y_0 和 Y/Y₀ 联结低压侧电流平衡度和不平衡度相同。说明配变联结方式不会改变不平衡度。对 Δ/Y_0 和 Y/Y₀ 联结高压侧三线制电流进行计算，两种联结方式三相平衡度和不平衡度都为 $\varepsilon_b = 94\%$ 、 $\varepsilon_{ub} = 6\%$ 。由于隔断了零序电流，高压侧线电流不平衡度要低于低压侧相电流，与实际工程经验相符。计算低压侧电流的正序、负序以及零序分量，分别为 719 A、186 A 和 186 A。根据序分量三相平衡度、不平衡度描述，低压侧有 $\varepsilon_b = 88\%$ ，则 $\varepsilon_{ub} = 12\%$ ，与量测值结果保持一致。即通过原、副边电流大小描述的三相平衡度和不平衡度与序分量描述对应。

4 结论

三相不平衡影响了系统正常运行，提高了线损。现有不平衡度量方式主要采用序分量和量测有效值两类，都存在不具有唯一性的问题。

1) 基于三相序分量与相量有效值平方和等式关系，提出采用三相正序分量有效值平方和与总量平方和定义三相平衡度，统一了含零序和不含零序分量系统的序分量三相平衡度、不平衡度量形式。

2) 分别针对三相三线制、四线制系统，给出了基于电压、电流量测有效值获取序分量大小的方法，构建了与序分量形式对应的量测值三相平衡度和不平衡度量方式。

后续将基于提出的三相平衡度和不平衡度研究不平衡和线损之间的量化关系，拓展工程应用范围。

参考文献

[1] 占恺峤, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑三相负荷平衡的电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 201-207.

- ZHAN Kaiqiao, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. AC coordinated charging strategy for electric vehicle three-phase load balance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 201-207.
- [2] 吴斌, 单来支, 王庆, 等. 基于三相不平衡的分布式光伏接入配电网的优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 108-114.
- WU Bin, SHAN Laizhi, WANG Qing, et al. Research on optimal configuration of distributed photovoltaic access distribution network based on three-phase unbalance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 108-114.
- [3] 魏剑啸, 粟忠来, 杨波, 等. 配电台区无功功率及三相不平衡电容调节的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 71-79.
- WEI Jianxiao, SU Zhonglai, YANG Bo, et al. Study on reactive power and three-phase unbalance regulated by capacitor in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 71-79.
- [4] 杨洪耕, 肖先勇, 刘俊勇, 等. 电能质量问题的研究和技术进展(一)--电能质量一般概念[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10): 1-4.
- YANG Honggeng, XIAO Xianyong, LIU Junyong, et al. Issue and technology assessment on power quality, part 1: general concepts on power quality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(10): 1-4.
- [5] 吉兴全, 陈德华, 张维, 等. 多端直流架构的交直流混合配电网三相不平衡潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 169-177.
- JI Xingquan, CHEN Dehua, ZHANG Wei, et al. VSC-MTDC based three-phase unbalanced power flow calculation algorithm for AC/DC hybrid distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 169-177.
- [6] 郭兆成, 车建涛, 郭启栋, 等. 基于低压配网功率和用电量信息的三相不平衡负荷调整[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 86-95.
- GUO Zhaocheng, CHE Jiantao, GUO Qidong, et al. Adjustment of three-phase unbalanced load in distribution network based on its historical power data and power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 86-95.
- [7] SINGH A K, SINGH G K, MITRA R. Some observations on definitions of voltage unbalance[C] // 2007 39th North American Power Symposium, September 30 – October 2, 2007, Las Cruces, New Mexico.
- [8] 罗安, 欧剑波, 唐杰, 等. 补偿配电网电压不平衡的静止同步补偿器控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 55-60.
- LUO An, OU Jianbo, TANG Jie, et al. Research on

- control method of STATCOM for grid voltage unbalance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 55-60.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. 电能质量三相电压不平衡: GB/T 15543—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [10] Testing and measurement techniques: unbalance, immunity test: IEC Standard 61000-4-27[S].
- [11] PILLAY P, MANYAGE M. Definitions of voltage unbalance[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(11): 50-51.
- [12] BOLLEN M. Definitions of voltage unbalance[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(11): 49-50.
- [13] EUGENE C. A new simple and effective approximate formulation for the determination of three-phase unbalances by voltmeter method[C] // CIGRE, Belgique, 1986.
- [14] 张有玉, 郭珂, 周林, 等. 三相三线制系统电压不平衡度计算方法[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 123-128.
ZHANG Youyu, GUO Ke, ZHOU Lin, et al. A method to compute voltage unbalance factor in three-phase three-wire system[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 123-128.
- [15] KENNELLY A E. Computation of the unbalance factor of a three-phase triangle when lengths of three sides are given[J]. American Institute of Electrical Engineers Transactions of the, 1928, 47(1): 341-342.
- [16] WAGNER C F, EVANS R D. Symmetrical components: as applied to the analysis of unbalanced electrical circuits[J]. Nature, 1933, 132: 870-876.
- [17] BENSLIMANE A, BOUCHNAIF J, ESSOUFI M, et al. Comparative study of semiconductor power losses between CSI-based STATCOM and VSI-based STATCOM, both used for unbalance compensation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 56-69. DOI: 10.1186/s41601-019-0150-4.
- [18] 方恒福, 盛万兴, 王金丽, 等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2185-2193.
FANG Hengfu, SHENG Wanxing, WANG Jinli, et al. Research on the method for real-time online control of three-phase unbalanced load in distribution area[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2185-2193.
- [19] 胡应宏, 王建曩, 任佳佳, 等. 不平衡负载的平衡分量法分解及补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 98-104.
HU Yinghong, WANG Jianze, REN Jiajia, et al. Balance component decomposition and compensation method for unbalanced load[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 98-104.
- [20] 王一, 刘建政. 不对称电压下不平衡负载的平衡化补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 85-93.
WANG Yi, LIU Jianzheng. Balanced compensation for unbalance load in condition of asymmetrical voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 85-93.
- [21] 郭峰, 姚莉娜, 刘恒, 等. 引入三相不平衡度的低压电网理论线损计算[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (11): 51-54.
GUO Feng, YAO Lina, LIU Heng, et al. Theoretical line loss calculation with three-phase unbalance degree for low-voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 51-54.
- [22] 郭兆成, 车建涛, 郭启栋, 等. 基于低压配网功率和用、电量信息的三相不平衡负荷调整[J]. 电力系统保护控制, 2018, 46(21): 86-95.
GUO Zhaocheng, CHE Jiantao, GUO Qidong, et al. Adjustment of three-phase unbalanced load in distribution network based on its historical power data and power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 86-95.
- [23] 辛业春, 李国庆, 王朝斌. 无功和三相负荷不平衡的序分量法补偿控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 72-78.
XIN Yechun, LI Guoqing, WANG Chaobin. Compensation control of reactive power and three-phase unbalance load based on the method of sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 72-78.
- [24] 蔡丛楠, 迟屹楠, 黄焕强. 基于正负序迭代的配电网三相不平衡控制研究[J]. 供用电, 2019, 36(4): 56-63.
CAI Congnan, CHI Yinan, HUANG Huanqiang. Research on three-phase unbalance control of distribution network based on positive and negative sequence iteration[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(4): 56-63.
- [25] 徐勇, 于佳琪, 陈宏, 等. 三电平储能变流器改善电流质量研究[J]. 供用电, 2020, 37(2): 21-27.
XU Yong, YU Jiaqi, CHEN Hong, et al. Research on current quality improvement based on three-level energy storage converter[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(2): 21-27.

收稿日期: 2020-03-12; 修回日期: 2020-06-11

作者简介:

何月军(1972—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为配电网自动化; E-mail: 63301300@qq.com

郝思鹏(1971—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统低频振荡、配电网自动化; E-mail: hspnj@qq.com

刘思亦(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为三相不平衡。

(编辑 许威)