

基于序电流的三相负荷不平衡度数学建模与度量分析

姚伟¹, 刘彦彦¹, 张玉良²

(1. 伊犁职业技术学院机电化工学院, 新疆 伊宁 835000; 2. 伊犁师范大学电子与信息工程学院, 新疆 伊宁 835000)

摘要: 目前, 基于序分量建立的三相不平衡度数学模型形式均不唯一, 而且序分量在实践中不易测量, 会给三相不平衡治理及因三相负荷不平衡带来的损耗分析带来诸多不便。基于3种三相负荷不平衡条件分别建立模型, 提出了对应的三相负荷不平衡度算法。针对幅值和相位均不平衡的三相负荷不平衡电力系统, 提出采用序分量有效值与三相平均电流有效值之比的平方和的倒数来度量三相负荷不平衡度, 建立了三相序分量与三相负荷不平衡度的关系, 统一了IEC提出的基于序分量的三相不平衡度量式。试验及案例分析表明, 提出的三相负荷不平衡度算法可以有力反映不同条件下的三相负荷不平衡。对于低压供配电系统, 所提出的三相负荷不平衡度算法与针对幅值和相位均不平衡的三相负荷不平衡电力系统提出的三相负荷不平衡度算法的度量结果具有一致性, 对三相不平衡的治理及工程实践具有较强的实用价值。

关键词: 序分量; 三相负荷不平衡条件; 三相负荷不平衡度; 度量分析; 一致性

Mathematical modeling and measurement analysis of three-phase load imbalance degree based on sequence current

YAO Wei¹, LIU Yanyan¹, ZHANG Yuliang²

(1. College of Electromechanical Engineering, Yili Vocational and Technical College, Yining 835000, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Yili Normal University, Yining 835000, China)

Abstract: At present, the mathematical model of three-phase imbalance degree based on sequence component is not unique, and the sequence component is not easy to measure in practice. This causes a lot of inconvenience to three-phase imbalance treatment and loss analysis due to three-phase load imbalance. Based on three kinds of three-phase load imbalance conditions, a corresponding three-phase load imbalance degree algorithm is proposed. For three-phase unbalanced load power systems with unbalanced amplitude and phase, the reciprocal of the square sum of the ratio of the effective value of the sequence component to the effective value of the three-phase average current is proposed to measure the three-phase load imbalance. The relationship between the three-phase sequence component and the three-phase load imbalance is established, and the three-phase imbalance measurement formula based on the sequence component proposed by IEC is unified. Experiments and case studies show that the proposed three-phase load imbalance algorithm can effectively reflect the imbalance under different conditions. For low-voltage power supply and distribution system, the proposed algorithm is consistent with the proposed three-phase load imbalance algorithm for three-phase power system with unbalanced amplitude and phase. This has strong practical value for the treatment of three-phase imbalance and engineering practice.

This work is supported by Youth Science Fund of Xinjiang Natural Science Foundation (No. 2022D01B64).

Key words: sequence component; imbalance condition of three-phase load; imbalance degree of three-phase load; measurement analysis; uniformity

0 引言

随着我国人民生活水平的整体提高, 空调、热

水器、屋顶光伏、电动机等大功率用电设备不断接入社区、医院、学校、工厂等场所, 加之单相用户用电的随机性, 导致低压供配电系统三相负荷不平衡, 不仅影响供电质量, 由此引发的电力系统事故和故障也不断增加^[1-4]。如文献[5]讨论了配电网不平

基金项目: 新疆自然科学基金青年科学基金项目资助 (2022D01B64)

衡引起直流链电容电压骤升的机理, 并提出了基于序分量的协调控制策略, 文献[6]针对配电网不平衡单相接地故障提出了单相接地故障选相方法。三相负荷不平衡还会导致变压器效率降低, 电网损耗增加, 计量仪表的测量不准等多种电能质量问题^[7-10]。三相负荷不平衡度是反映三相负荷不平衡的重要参数, 也是分析和治理三相负荷不平衡问题的依据。规程规定: 配电变压器三相负荷不平衡度不大于 15%, 低压出口电流不平衡度不超过 10%, 低压干线及主干线始端的电流不平衡度不超过 20%, 中性线电流应不大于变压器二次侧额定电流的 25%。因此, 如何计算三相负荷不平衡度是贯彻国家标准、提高电能质量的基础^[11]。国内外学者对于三相不平衡算法已开展了大量研究。文献[12-16]从不同角度对三相不平衡度的计算方法进行了研究。文献[17]对多种三相不平衡度计算式进行了对比分析。文献[18]提出了基于序分量的三相不平衡度计算式。文献[19]基于序分量分析, 提出了改进型三相电压不平衡度和电流不平衡度算法, 但计算较复杂而且只适用于幅值不平衡的三相电力系统。文献[20-22]提出了三相不平衡潮流计算方法, 还无法在工程实践中广范应用。上述文献均未针对不同三相不平衡条件建立能够统一度量三相负荷不平衡度的度量式。

由于三相负荷不平衡会引起序电流的变化, 本文以三相序电流的研究为出发点, 基于三相相位不平衡、幅值平衡, 三相相位平衡、幅值不平衡, 三相相位不平衡、幅值亦不平衡的 3 种三相负荷不平衡条件分别建立数学模型, 并提出对应的三相负荷不平衡度算法。针对幅值和相位均不平衡的三相负荷不平衡的电力系统, 提出采用正序、负序、零序分量有效值与三相平均电流有效值之比的平方和的倒数来度量三相负荷不平衡度, 最终又可以转换为三相电流有效值的变化关系来度量三相负荷不平衡度。计算表明所提出的三相负荷不平衡度算法经归一化后与最终转换为三相电流有效值变化关系来衡量三相负荷不平衡度度量式的计算结果一致, 解决了现有仪表因难以测得各相电流序分量而无法精确计量三相负荷不平衡度的问题, 统一了低压供配电三相负荷不平衡度的度量形式, 并将其范围值钳定在 0~1 之间。通过试验及案例分析, 验证了所提出的三相负荷不平衡度算法的有效性, 为工程实践及三相不平衡的治理提供了理论和技术依据。

1 基于序电流的三相不平衡度数学模型

引入相位变换算子, $\alpha = e^{j120^\circ}$, $\alpha^2 = e^{j240^\circ}$,

$\alpha^3 = e^{j360^\circ} = 1$ 。设 i_a 、 i_b 、 i_c 分别为 A、B、C 三相电流相量, i_a^+ 、 i_a^- 、 i_a^0 , i_b^+ 、 i_b^- 、 i_b^0 , i_c^+ 、 i_c^- 、 i_c^0 分别为 A、B、C 三相的正序、负序和零序分量。根据对称分量法^[23-24], 并以 A 相序电流为基准, 可将三相电流分解为如式(1)所示的矩阵式。

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^+ \\ i_a^- \\ i_a^0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将 A 相、B 相、C 相电流分别分解为正序、负序和零序, 可得向量展开式为

$$\begin{cases} i_a^0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \\ i_a^- = \frac{1}{3}(i_a + \alpha^2 i_b + \alpha i_c) \\ i_a^+ = \frac{1}{3}(i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c) \\ i_b^0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \\ i_b^- = \frac{1}{3}(\alpha i_a + i_b + \alpha^2 i_c) \\ i_b^+ = \frac{1}{3}(\alpha^2 i_a + i_b + \alpha i_c) \\ i_c^0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \\ i_c^- = \frac{1}{3}(\alpha^2 i_a + \alpha i_b + i_c) \\ i_c^+ = \frac{1}{3}(\alpha i_a + \alpha^2 i_b + i_c) \end{cases} \quad (2)$$

按照 IEC 和国标 GB/T15543-2008 规定, 三相电流不平衡度^[11,18]定义为

$$\begin{cases} \varepsilon_{i2} = I_2 / I_1 \times 100\% \\ \varepsilon_{i0} = I_0 / I_1 \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

式中: ε_{i2} 为基于负序分量的三相电流不平衡度; ε_{i0} 为基于零序分量的三相电流不平衡度; I_2 为负序分量的方均根值; I_1 为正序分量的方均根值; I_0 为零序分量的方均根值^[25]。

文献[19]提出了基于序分量改进型三相电流不平衡度算法, 如式(4)所示。

$$\varepsilon_{ub} = 1 - \frac{\sqrt{2\beta + \alpha} + \sqrt{3}\sqrt{2\beta - \alpha}}{2(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)} \quad (4)$$

式中: ε_{ub} 为基于序分量改进型三相电流不平衡度; I_a 、 I_b 、 I_c 分别为 A、B、C 三相电流有效值;

$$\alpha = I_a^4 + I_b^4 + I_c^4; \quad \beta = I_a^2 I_b^2 + I_b^2 I_c^2 + I_c^2 I_a^2。$$

对式(1)进行对称分量展开, 可得

$$\begin{cases} \dot{i}_a = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dot{i}_0 \\ \dot{i}_b = \dot{i}_1 \angle -120^\circ + \dot{i}_2 \angle 120^\circ + \dot{i}_0 \\ \dot{i}_c = \dot{i}_1 \angle 120^\circ + \dot{i}_2 \angle -120^\circ + \dot{i}_0 \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)求解可得^[19]

$$I_1^2 + I_2^2 + I_0^2 = (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) / 3 \quad (6)$$

式中, \dot{i}_1 、 \dot{i}_2 、 \dot{i}_0 分别为正序、负序、零序分量的矢量。

引入电流不平衡度系数^[26-28] β_ϕ 为

$$\beta_\phi = \frac{I_\phi - I_{av}}{I_{av}}, \quad \phi \in \{a, b, c\} \quad (7)$$

式中, I_{av} 为三相平均电流, 即

$$I_{av} = (I_a + I_b + I_c) / 3 \quad (8)$$

对式(7)变换可得

$$I_\phi = (1 + \beta_\phi) I_{av}, \quad \phi \in \{a, b, c\} \quad (9)$$

对式(7)进行三相不平衡度系数求和可得

$$\beta_a + \beta_b + \beta_c = 0 \quad (10)$$

2 三相负荷不平衡条件的数学模型建立

由实践可知, 低压配电系统的三相不平衡可分为 3 种情况: (1) 三相相位平衡、幅值不平衡; (2) 三相相位不平衡、幅值平衡; (3) 三相相位不平衡、幅值亦不平衡^[29]。

2.1 三相相位平衡、幅值不平衡

可假设三相负荷功率因数角均为 ϕ , 三相电流的幅值分别为 I_{am} 、 I_{bm} 、 I_{cm} , 三相电流瞬时信号分别为 i_{ar} 、 i_{br} 、 i_{cr} , 则可得

$$\begin{cases} i_{ar} = I_{am} [\cos(\omega t - \phi) + j \sin(\omega t - \phi)] \\ i_{br} = I_{bm} [\cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \phi) + j \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \phi)] \\ i_{cr} = I_{cm} [\cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \phi) + j \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \phi)] \end{cases} \quad (11)$$

把式(9)代入式(11)可得

$$\begin{cases} i_{ar} = I_{av} (1 + \beta_a) [\cos(\omega t - \phi) + j \sin(\omega t - \phi)] \\ i_{br} = I_{av} (1 + \beta_b) [\cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \phi) + j \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \phi)] \\ i_{cr} = I_{av} (1 + \beta_c) [\cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \phi) + j \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \phi)] \end{cases} \quad (12)$$

把式(12)代入式(2), 可得零序电流瞬时信号为

$$\begin{aligned} \dot{i}_0 = \frac{I_{av}}{3} \{ & [(1 + \beta_a) \cos(\omega t - \phi) + \\ & (1 + \beta_b) \cos(\omega t - 120^\circ - \phi) + \\ & (1 + \beta_c) \cos(\omega t + 120^\circ - \phi)] + \\ & j[(1 + \beta_a) \sin(\omega t - \phi) + \\ & (1 + \beta_b) \sin(\omega t - 120^\circ - \phi) + \\ & (1 + \beta_c) \sin(\omega t + 120^\circ - \phi)] \} \end{aligned} \quad (13)$$

对式(13)求模, 并化简可得

$$\frac{I_0}{I_{av}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3}{2} (\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2)} \quad (14)$$

由于三相零序电流 \dot{i}_a^0 、 \dot{i}_b^0 、 \dot{i}_c^0 表达式一致, 遂均用 \dot{i}_0 表述。令 I_a^+ 、 I_a^- , I_b^+ 、 I_b^- , I_c^+ 、 I_c^- 分别为 A、B、C 三相的正序、负序分量的有效值, 以 A 相为基准, 其正序、负序电流分别为

$$\begin{cases} \dot{i}_a^+ = \frac{I_{av}}{3} \{ [(1 + \beta_a) \cos(\omega t - \phi) + \\ (1 + \beta_b) \cos(\omega t - \phi) + \\ (1 + \beta_c) \cos(\omega t - \phi)] + \\ j[(1 + \beta_a) \sin(\omega t - \phi) + \\ (1 + \beta_b) \sin(\omega t - \phi) + \\ (1 + \beta_c) \sin(\omega t - \phi)] \} \\ \dot{i}_a^- = \frac{I_{av}}{3} \{ [(1 + \beta_a) \cos(\omega t - \phi) + \\ (1 + \beta_b) \cos(\omega t + 120^\circ - \phi) + \\ (1 + \beta_c) \cos(\omega t - 120^\circ - \phi)] + \\ j[(1 + \beta_a) \sin(\omega t - \phi) + \\ (1 + \beta_b) \sin(\omega t + 120^\circ - \phi) + \\ (1 + \beta_c) \sin(\omega t - 120^\circ - \phi)] \} \end{cases} \quad (15)$$

对式(15)求模, 把式(10)代入并化简可得

$$\begin{cases} \frac{I_a^+}{I_{av}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3}{2} (\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2)} \\ \frac{I_a^-}{I_{av}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3}{2} (\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2)} \end{cases} \quad (16)$$

同理可推导出:

$$\begin{cases} \frac{I_b^+}{I_{av}} = \frac{I_c^+}{I_{av}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3}{2} (\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2)} \\ \frac{I_b^-}{I_{av}} = \frac{I_c^-}{I_{av}} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3}{2} (\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2)} \end{cases} \quad (17)$$

由于式(14)、式(16)、式(17)的结果唯一, 可以将 A、B、C 三相正序、负序、零序的有效值统一符号为 I_1 、

I_2 、 I_0 , 对式(14)、式(16)、式(17)求平方和, 可得

$$\left(\frac{I_0}{I_{av}}\right)^2 + \left(\frac{I_2}{I_{av}}\right)^2 + \left(\frac{I_1}{I_{av}}\right)^2 = \frac{1}{2}(\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) \quad (18)$$

若此种条件下的三相负荷不平衡度用 ε_A 来度量, 则可令

$$\varepsilon_A = \frac{1}{2}(\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) \quad (19)$$

2.2 三相相位不平衡、幅值平衡

由于三相幅值平衡, 可令 $\beta_a = \beta_b = \beta_c = \beta$, 假设三相功率因数角分别为 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 , 则此时零序电流的瞬时信号表达式为

$$\begin{aligned} i_0 = \frac{I_{av}}{3}(1+\beta) \{ & [\cos(\omega t - \varphi_1) + \\ & \cos(\omega t - 120^\circ - \varphi_2) + \\ & \cos(\omega t + 120^\circ - \varphi_3)] + j[\sin(\omega t - \varphi_1) + \\ & \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi_2) + \sin(\omega t + 120^\circ - \varphi_3)] \} \end{aligned} \quad (20)$$

对式(20)求模, 并化简可得

$$\frac{I_0}{I_{av}} = \frac{1}{3}(1+\beta)\sqrt{3+2D} \quad (21)$$

式中:

$$D = \cos(120^\circ + \varphi_2 - \varphi_1) + \cos(-120^\circ + \varphi_3 - \varphi_1) + \cos(120^\circ + \varphi_3 - \varphi_2)$$

同理可推导出:

$$\begin{cases} \frac{I_a^+}{I_{av}} = \frac{I_b^+}{I_{av}} = \frac{I_c^+}{I_{av}} = \frac{1}{3}(1+\beta)\sqrt{3+2D} \\ \frac{I_a^-}{I_{av}} = \frac{I_b^-}{I_{av}} = \frac{I_c^-}{I_{av}} = \frac{1}{3}(1+\beta)\sqrt{3+2D} \end{cases} \quad (22)$$

进而可推导出:

$$\left(\frac{I_0}{I_{av}}\right)^2 + \left(\frac{I_2}{I_{av}}\right)^2 + \left(\frac{I_1}{I_{av}}\right)^2 = \frac{1}{3}(1+\beta)^2(3+2D) \quad (23)$$

若此种条件下的三相负荷不平衡度用 ε_φ 来度量, 则可令

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{3}(1+\beta)^2(3+2D) \quad (24)$$

2.3 三相相位不平衡、幅值亦不平衡

根据上述假设, 则此时零序电流的瞬时信号表达式为

$$\begin{aligned} i_0 = \frac{1}{3} \{ & I_{av} [(1+\beta_a)\cos(\omega t - \varphi_1) + \\ & (1+\beta_b)\cos(\omega t - 120^\circ - \varphi_2) + \\ & (1+\beta_c)\cos(\omega t + 120^\circ - \varphi_3)] + \\ & jI_{av} [(1+\beta_a)\sin(\omega t - \varphi_1) + \\ & (1+\beta_b)\sin(\omega t - 120^\circ - \varphi_2) + \\ & (1+\beta_c)\sin(\omega t + 120^\circ - \varphi_3)] \} \end{aligned} \quad (25)$$

对式(25)求模, 并化简可得

$$\frac{I_0}{I_{av}} = \frac{1}{3}\sqrt{3+(\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) + 2E} \quad (26)$$

式中:

$$\begin{aligned} E = & (1+\beta_a)(1+\beta_b)\cos(120^\circ + \varphi_2 - \varphi_1) + \\ & (1+\beta_a)(1+\beta_c)\cos(-120^\circ + \varphi_3 - \varphi_1) + \\ & (1+\beta_b)(1+\beta_c)\cos(120^\circ + \varphi_3 - \varphi_2) \end{aligned}$$

求解 A 相正序、负序电流分别为

$$\begin{cases} i_a^+ = \frac{1}{3} \{ I_{av} [(1+\beta_a)\cos(\omega t - \varphi_1) + \\ (1+\beta_b)\cos(\omega t - \varphi_2) + \\ (1+\beta_c)\cos(\omega t - \varphi_3)] + \\ jI_{av} [(1+\beta_a)\sin(\omega t - \varphi_1) + \\ (1+\beta_b)\sin(\omega t - \varphi_2) + \\ (1+\beta_c)\sin(\omega t - \varphi_3)] \} \\ i_a^- = \frac{1}{3} \{ I_{av} [(1+\beta_a)\cos(\omega t - \varphi_1) + \\ (1+\beta_b)\cos(\omega t + 120^\circ - \varphi_2) + \\ (1+\beta_c)\cos(\omega t - 120^\circ - \varphi_3)] + \\ jI_{av} [(1+\beta_a)\sin(\omega t - \varphi_1) + \\ (1+\beta_b)\sin(\omega t + 120^\circ - \varphi_2) + \\ (1+\beta_c)\sin(\omega t - 120^\circ - \varphi_3)] \} \end{cases} \quad (27)$$

同理可求 B 相、C 相正序、负序电流分别为

$$\begin{cases} i_b^+ = \frac{1}{3} \{ I_{av} [(1+\beta_a)\cos(\omega t - 120^\circ - \varphi_1) + \\ (1+\beta_b)\cos(\omega t - 120^\circ - \varphi_2) + \\ (1+\beta_c)\cos(\omega t - 120^\circ - \varphi_3)] + \\ jI_{av} [(1+\beta_a)\sin(\omega t - 120^\circ - \varphi_1) + \\ (1+\beta_b)\sin(\omega t - 120^\circ - \varphi_2) + \\ (1+\beta_c)\sin(\omega t - 120^\circ - \varphi_3)] \} \\ i_b^- = \frac{1}{3} \{ I_{av} [(1+\beta_a)\cos(\omega t + 120^\circ - \varphi_1) + \\ (1+\beta_b)\cos(\omega t - 120^\circ - \varphi_2) + \\ (1+\beta_c)\cos(\omega t - \varphi_3)] + \\ jI_{av} [(1+\beta_a)\sin(\omega t + 120^\circ - \varphi_1) + \\ (1+\beta_b)\sin(\omega t - 120^\circ - \varphi_2) + \\ (1+\beta_c)\sin(\omega t - \varphi_3)] \} \end{cases} \quad (28)$$

$$\left\{ \begin{aligned} i_c^+ &= \frac{1}{3} \{ I_{av} [(1 + \beta_a) \cos(\omega t + 120^\circ - \varphi_1) + \\ & (1 + \beta_b) \cos(\omega t + 120^\circ - \varphi_2) + \\ & (1 + \beta_c) \cos(\omega t + 120^\circ - \varphi_3)] + \\ & j I_{av} [(1 + \beta_a) \sin(\omega t + 120^\circ - \varphi_1) + \\ & (1 + \beta_b) \sin(\omega t + 120^\circ - \varphi_2) + \\ & (1 + \beta_c) \sin(\omega t + 120^\circ - \varphi_3)] \} \\ i_c^- &= \frac{1}{3} \{ I_{av} [(1 + \beta_a) \cos(\omega t - 120^\circ - \varphi_1) + \\ & (1 + \beta_b) \cos(\omega t - \varphi_2) + \\ & (1 + \beta_c) \cos(\omega t + 120^\circ - \varphi_3)] + \\ & j I_{av} [(1 + \beta_a) \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi_1) + \\ & (1 + \beta_b) \sin(\omega t - \varphi_2) + \\ & (1 + \beta_c) \sin(\omega t + 120^\circ - \varphi_3)] \} \end{aligned} \right. \quad (29)$$

对式(27)一式(29)求模, 并化简可得

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{I_a^+}{I_{av}} = \frac{I_b^+}{I_{av}} = \frac{I_c^+}{I_{av}} &= \frac{1}{3} \sqrt{3 + (\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) + 2G} \\ \frac{I_a^-}{I_{av}} = \frac{I_b^-}{I_{av}} = \frac{I_c^-}{I_{av}} &= \frac{1}{3} \sqrt{3 + (\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) + 2F} \end{aligned} \right. \quad (30)$$

式中:

$$\begin{aligned} F &= (1 + \beta_a)(1 + \beta_b) \cos(-120^\circ + \varphi_2 - \varphi_1) + \\ & (1 + \beta_a)(1 + \beta_c) \cos(120^\circ + \varphi_3 - \varphi_1) + \\ & (1 + \beta_b)(1 + \beta_c) \cos(-120^\circ + \varphi_3 - \varphi_2) \\ G &= (1 + \beta_a)(1 + \beta_b) \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + \\ & (1 + \beta_a)(1 + \beta_c) \cos(\varphi_3 - \varphi_1) + \\ & (1 + \beta_b)(1 + \beta_c) \cos(\varphi_3 - \varphi_2) \end{aligned}$$

结合式(26)和式(30), 可以看出将各相正序、负序、零序的有效值与三相平均电流的有效值相比, 可以实现三相正序、负序、零序的统一结果表达式。因此可以对三相序分量归一化, 如式(31)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{I_0}{I_{av}} &= \frac{1}{3} \sqrt{3 + (\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) + 2E} \\ \frac{I_2}{I_{av}} &= \frac{1}{3} \sqrt{3 + (\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) + 2F} \\ \frac{I_1}{I_{av}} &= \frac{1}{3} \sqrt{3 + (\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) + 2G} \end{aligned} \right. \quad (31)$$

对式(31)的平方求和, 可得

$$\left(\frac{I_0}{I_{av}} \right)^2 + \left(\frac{I_2}{I_{av}} \right)^2 + \left(\frac{I_1}{I_{av}} \right)^2 = \frac{1}{9} [9 + 3(\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) + 2E + 2F + 2G] \quad (32)$$

若此种条件下的三相负荷不平衡度用 ε_{Ap} 来度

量, 则可令

$$\varepsilon_{Ap} = \frac{1}{9} [9 + 3(\beta_a^2 + \beta_b^2 + \beta_c^2) + 2E + 2F + 2G] \quad (33)$$

由于低压供配电系统经常处于三相相位不平衡、幅值亦不平衡状态, 可以将三相负荷不平衡度计算式统一。令

$$\frac{1}{\varepsilon_i} = \left(\frac{I_0}{I_{av}} \right)^2 + \left(\frac{I_2}{I_{av}} \right)^2 + \left(\frac{I_1}{I_{av}} \right)^2 \quad (34)$$

若令 ε_i 来度量三相负荷平衡度, ε_{ui} 来度量三相负荷不平衡度, 把式(6)、式(8)代入式(34), 可得

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_i &= \frac{(I_a + I_b + I_c)^2}{3(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)} \\ \varepsilon_{ui} &= 1 - \varepsilon_i = 1 - \frac{(I_a + I_b + I_c)^2}{3(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)} \end{aligned} \right. \quad (35)$$

结合式(34)、式(35)可以看出, 所提出的三相负荷不平衡度算法可以实现只通过仪表的读数就能计算出三相负荷平衡度和三相负荷不平衡度, 可以实现正序、负序、零序变化反映三相负荷平衡度和不平衡度变化的统一结果表达式, 并最终可以化简为三相负荷平衡度、不平衡度与三相电流有效值的关系。三相负荷不平衡度可以统一表述为 ε_{ui} , 三相负荷平衡度可以统一表述为 ε_i , 其计算结果均被钳定在 0~1 之间, 为基于序分量治理三相负荷不平衡以及建立三相负荷不平衡与损耗的关系提供了理论模型, 可以不用对各相分别采样序分量, 就能得到准确的计算结果, 可以有效提高工程中计量准确度和算法效率。

考虑到低压供配电系统实际情况, 对式(25)的实部和虚部进行离散化表述, 令其实部为 m_i , 虚部为 n_i , 可得式(36)。

$$\left\{ \begin{aligned} m_i &= (1 + \beta_{ai}) \cos(\omega t - \varphi_{1i}) + \\ & (1 + \beta_{bi}) \cos(\omega t - 120^\circ - \varphi_{2i}) + \\ & (1 + \beta_{ci}) \cos(\omega t + 120^\circ - \varphi_{3i}) \\ n_i &= (1 + \beta_{ai}) \sin(\omega t - \varphi_{1i}) + \\ & (1 + \beta_{bi}) \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi_{2i}) + \\ & (1 + \beta_{ci}) \sin(\omega t + 120^\circ - \varphi_{3i}) \end{aligned} \right. \quad (36)$$

式中: β_{ai} 、 β_{bi} 、 β_{ci} 分别为 i 时刻 A、B、C 三相电流不平衡度系数^[30]; φ_{1i} 、 φ_{2i} 、 φ_{3i} 分别为 i 时刻 A、B、C 三相负荷功率因数角。

基于上述分析, 若想通过治理使得三相负荷平衡, 流过中性线的电流为 0, 则只有

$$m_i^2 + n_i^2 = 0 \quad (37)$$

代入相关参数, 并按照三角函数关系展开整理可得

$$\begin{cases} \cos[(\omega t - \varphi_{1i}) - (\omega t - 120^\circ - \varphi_{2i})] = -\frac{1}{2} \\ \cos[(\omega t - \varphi_{1i}) - (\omega t + 120^\circ - \varphi_{3i})] = -\frac{1}{2} \\ \cos[(\omega t - 120^\circ - \varphi_{2i}) - (\omega t + 120^\circ - \varphi_{3i})] = -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (38)$$

可见针对三相相位不平衡系统, 若使得三相负荷平衡, 必须通过补偿来实现三相负荷瞬时功率因数角 φ_{1i} 、 φ_{2i} 、 φ_{3i} 平衡, 否则即使三相电流幅值平衡、相位不平衡, 中性线仍会有电流流过, 造成隐形三相负荷不平衡和产生附加电能损耗。

3 三相负荷不平衡仿真分析

按照上述 3 种三相负荷不平衡条件进行实验, 三相负荷不平衡实验原理如图 1 所示。

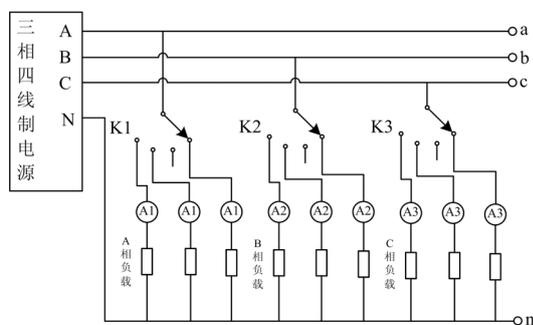


图 1 三相负荷不平衡实验原理

Fig. 1 Principle of three-phase load unbalance experiment

三相负荷分配可以按照 3 种情况分析^[31]。

- 1) 一相负荷重、一相负荷轻、一相负荷居中;
- 2) 一相负荷重、两相负荷轻;
- 3) 一相负荷轻、两相负荷重。

结合 3 种三相负荷不平衡条件进行实验测试, 三相序分量通过继电保护测试软件测量, 三相负荷不平衡度计算对比结果如表 1—表 3 所示。

由表 1 可以看出: 此种实验条件下 5 种三相负荷不平衡度算法均可以反映三相负荷不平衡, 且线性变化关系一致。从对比看, 本文提出的第 1 种三相负荷不平衡度算法更能有效度量三相负荷不平衡, 提出的第 5 种三相负荷不平衡度算法更能有效降低三相负荷不平衡度。

由表 2 可以看出: 此种实验条件下只有前 3 种三相负荷不平衡度算法可以反映三相负荷不平衡, 且线性变化关系一致。从对比看, 本文提出的第 1 种三相负荷不平衡度算法更适宜于度量三相负荷不平衡, 更能有效地降低三相负荷不平衡度。

表 1 三相相位平衡、幅值不平衡时三相负荷不平衡度对比
Table 1 Comparison of three-phase load unbalance under three-phase phase balance and amplitude imbalance

试验条件/A	$\cos \varphi$	$\varepsilon_A/\%$	$\varepsilon_{I2}/\%$	$\varepsilon_{I0}/\%$	$\varepsilon_{ub}/\%$	$\varepsilon_{ui}/\%$
$I_a = 30.4$	0.99					
$I_b = 30.4$	0.99	0	0	0	0	0
$I_c = 30.4$	0.99					
$I_a = 33.44$	0.99					
$I_b = 30.4$	0.99	1.5	5.8	5.8	1.3	0.7
$I_c = 27.36$	0.99					
$I_a = 33.44$	0.99					
$I_b = 28.88$	0.99	1.0	5.0	5.0	1.0	0.5
$I_c = 28.88$	0.99					
$I_a = 33.44$	0.99					
$I_b = 24.32$	0.99	5.5	10	10	3.6	2.0
$I_c = 33.44$	0.99					

表 2 三相相位不平衡、幅值平衡时三相负荷不平衡度对比
Table 2 Comparison of three-phase load unbalance under three-phase phase imbalance and amplitude balance

试验条件/A	$\cos \varphi$	$\varepsilon_p/\%$	$\varepsilon_{I2}/\%$	$\varepsilon_{I0}/\%$	$\varepsilon_{ub}/\%$	$\varepsilon_{ui}/\%$
$I_a = 30.4$	0.64					
$I_b = 30.4$	0.64	0	0	0	0	0
$I_c = 30.4$	0.64					
$I_a = 30.4$	0.64					
$I_b = 30.4$	0.84	3	10.1	10.1	0	0
$I_c = 30.4$	0.84					
$I_a = 30.4$	0.64					
$I_b = 30.4$	0.84	11	16.8	20.2	0	0
$I_c = 30.4$	0.97					
$I_a = 30.4$	0.64					
$I_b = 30.4$	0.64	4	11.1	11.1	0	0
$I_c = 30.4$	0.85					

表 3 三相相位、幅值均不平衡时三相负荷不平衡度对比
Table 3 Comparison of three-phase load unbalance when three-phase phase and amplitude are unbalanced

试验条件/A	$\cos \varphi$	$\varepsilon_{Ap}/\%$	$\varepsilon_{I2}/\%$	$\varepsilon_{I0}/\%$	$\varepsilon_{ub}/\%$	$\varepsilon_{ui}/\%$
$I_a = 30.4$	0.64					
$I_b = 30.4$	0.64	0	0	0	0	0
$I_c = 30.4$	0.64					
$I_a = 33.44$	0.68					
$I_b = 30.4$	0.97	0.7	15.0	21.5	1.3	0.7
$I_c = 27.36$	0.89					
$I_a = 33.44$	0.68					
$I_b = 28.88$	0.89	0.5	13.0	13.0	1.0	0.5
$I_c = 28.88$	0.89					
$I_a = 33.44$	0.68					
$I_b = 24.32$	0.93	2.0	17.4	17.4	3.6	2.0
$I_c = 33.44$	0.68					

由表 3 可以看出：此种实验条件下第 3 种三相负荷不平衡度算法存在度量缺陷。从对比结果看，本文提出的第 1 种三相负荷不平衡度算法归一化后与本文提出的第 5 种三相负荷不平衡度算法结果一致，更适宜于度量三相负荷不平衡，能更有效地降解三相负荷不平衡度，尤其针对低压供配电系统具有较强的实用性。

4 三相负荷不平衡算例分析

以三相四线制低压供配电系统为例，设 A、B、C 三相电流分别为： $i_a = 50\angle -47.1^\circ \text{ A}$ 、 $i_b = 45\angle -147.1^\circ \text{ A}$ 、 $i_c = 55\angle 106^\circ \text{ A}$ ，根据继电保护测试软件 Power Advance 可以测得正序、负序、零序分量分别为： $\dot{I}_1 = 48.54\angle -28.9^\circ \text{ A}$ 、 $\dot{I}_2 = 10.64\angle -101.7^\circ \text{ A}$ 、 $\dot{I}_0 = 6.87\angle -156.6^\circ \text{ A}$ ，取三相电流和三相序分量有效值并计算可得： $I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 = \frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) = 2516.5 \text{ A}$ ，符合式(6)结论。按照上述 3 种情况分配实验负荷，计算如表 4 所示。由表 4 可以看出：算例结果与仿真结果一致。

表 4 三相负荷不平衡度的度量对比

Table 4 Measurement comparison of three phase load unbalance

$\varepsilon_{A\phi}$ (归一化)	ε_{i2}	ε_{i0}	ε_{ub}	ε_{ui}
0.7%	21.9%	14.2%	1.3%	0.7%

5 结论

现有关于三相负荷不平衡度的度量式形式多样，不具有唯一性，一定程度上存在缺陷。基于序分量建立的三相不平衡度量式虽然在形式上实现了唯一，但计算复杂，只能反映幅值不平衡引起的三相负荷不平衡问题。

1) 三相负荷不平衡表现在 3 个方面：三相相位不平衡、幅值平衡；三相相位平衡、幅值不平衡；三相相位和幅值均不平衡。本文分别讨论并建立数学模型，提出了对应的三相负荷不平衡度算法。

2) 针对只考虑幅值不平衡引起的三相负荷不平衡，可以将上述 3 种不平衡条件的三相负荷不平衡度的度量式统一，且三相负荷平衡度和不平衡度均能被钳定在 0~1 之间。

3) 低压供配电系统往往表现为三相相位和幅值均不平衡的电力系统，本文提出的三相负荷不平衡度量式 $\varepsilon_{A\phi}$ 归一化后与统度量式 ε_{ui} 计算结果一致，可以有力反映工程实践中的三相负荷不平衡问题。

后续将研究基于本文提出的三相负荷不平衡度

算法与低压供配电系统损耗之间的关系及三相负荷不平衡度与配电变压器效率的关系。

参考文献

[1] 王联智, 冯建伟, 谢敏, 等. 基于遗传算法的低压配电网三相不平衡负载控制方法[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(5): 8-10, 22.
WANG Lianzhi, FENG Jianwei, XIE Min, et al. Three-phase unbalanced load control method for low-voltage distribution network based on genetic algorithm[J]. Automation Technology and Application, 2022, 41(5): 8-10, 22.

[2] 胡明月, 张慧芬, 苗淑平, 等. 基于改进鸽群算法的台区三相负荷不平衡相序调整方法[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 121-128.
HU Mingyue, ZHANG Huifen, MIAO Shuping, et al. Phase sequence adjustment method for three-phase load imbalance in station area based on improved pigeon-Inspired optimization[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 121-128.

[3] 王立斌, 杜晓东, 刘成龙, 等. 基于改进 NSGA-II 的配电网台区三相负荷不平衡治理[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(8): 122-129.
WANG Libin, DU Xiaodong, LIU Chenglong, et al. Three phase load unbalance treatment of distribution transformer station area based on improved NSGA-II[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(8): 122-129.

[4] 赵波, 胡娟, 程怡捷, 等. 一种配变三相负荷不平衡的自动均衡控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 41-47.
ZHAO Bo, HU Juan, CHENG Yijie, et al. An automatic balancing control method on unbalanced three-phase loads of distribution transformer[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 41-47.

[5] 杨航, 周羽生, 许振华, 等. 基于储能和序分量控制的直驱永磁风电系统非对称故障穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 60-68.
YANG Hang, ZHOU Yusheng, XU Zhenhua, et al. Asymmetric fault ride-through of a direct-drive permanent magnet wind power system based on the control of energy storage and sequence components[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 60-68.

[6] 孙震, 徐昊, 朱洪志, 等. 基于接地故障比的不平衡配电网单相接地故障选相方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 108-116.
SUN Zhen, XU Hao, ZHU Hongzhi, et al. Phase selection method of single line to ground fault in unbalanced

- distribution network based on ground fault ratio[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 108-116.
- [7] 周丽莹, 夏昌浩. 三相桥式变流器负序电流补偿策略[J]. 电气传动, 2022, 52(9): 39-45.
ZHOU Liying, XIA Changhao. Negative sequence current compensation strategy of three-phase bridge converter[J]. Electric Drive, 2022, 52(9): 39-45.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 孙惠娟, 彭春华, 余廷芳. 配电网三相平衡优化重构策略[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 789-794.
SUN Huijuan, PENG Chunhua, YU Tingfang. A three-phase equilibrium reconfiguration strategy for distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 789-794.
- [11] 朱明星, 李开金. 低压配电网三相不平衡度计算方法与应用[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2): 41-46.
ZHU Mingxing, LI Kaijin. Calculation method and application of three-phase unbalance in low voltage distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(2): 41-46.
- [12] 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.
- [13] 汪清. 配电网三相不平衡度计算方法研究[J]. 电子制作, 2020(20): 21-22, 58.
WANG Qing. Research on calculation method of three phase unbalance of distribution network[J]. Electronic Production, 2020(20): 21-22, 58.
- [14] 艾精文, 张华赢, 汪清, 等. 基于有效值的台区电流不平衡度计算方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 30-36.
AI Jingwen, ZHANG Huaying, WANG Qing, et al. Study on calculation method of unbalanced factor based on RMS of fundamental current[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 30-36.
- [15] 吴俊, 诸军, 沈海平, 等. 配电网三相不平衡度近似计算方法简析[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 211-214.
WU Jun, ZHU Jun, SHEN Haiping, et al. Analysis of the three-phase voltage unbalance computing formula used for distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 211-214.
- [16] 叶润潮, 贺建闽, 高敬贝. 基于牵引负荷的三相不平衡度计算方法比较[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 130-133.
YE Runchao, HE Jianmin, GAO Jingbei. Comparison of different calculation methods for three-phase voltage unbalance based on measured traction load[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2013, 25(6): 130-133.
- [17] 张铨文. 基于改进遗传算法的配电网三相不平衡控制技术[D]. 长春: 长春工业大学, 2021.
ZHANG Huawen. Research on three-phase imbalance control technology of distribution network based on improved genetic algorithm[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.
- [18] Testing and measurement techniques: unbalance, immunity test: IEC Standard 61000-4-27[S].
- [19] 何月军, 郝思鹏, 刘思亦, 等. 基于序分量和量测值的三相不平衡度量研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 44-51.
HE Yuejun, HAO Sipeng, LIU Siyi, et al. Research on three-phase unbalance measurement based on sequence components and measured values[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 44-51.
- [20] 刘明顺, 付俊波, 康鹏, 等. 基于正负零三序形式牛顿法的三相不平衡系统潮流计算方法[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(7): 78-83.
LIU Mingshun, FU Junbo, KANG Peng, et al. Three-phase unbalanced power flow calculation method based on positive-negative three-sequence newton method[J]. Techniques of Automation and Application, 2019, 38(7): 78-83.
- [21] 张永华. 复杂配电网三相不平衡潮流计算方法研究[D]. 塔里木: 塔里木大学, 2018.
ZHANG Yonghua. Research on calculation method of three-phase unbalanced power flow in complex distribution network[D]. Tarim: Tarim University, 2018.
- [22] 孟晓丽, 唐巍, 刘永梅, 等. 大规模复杂配电网三相不平衡潮流并行计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 45-51.

- MENG Xiaoli, TANG Wei, LIU Yongmei, et al. Parallel computing of three-phase unbalanced power flow in large-scale complex distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 45-51.
- [23] 姚伟, 刘彦彦, 彭龙生, 等. 关于低压配电网系统三相不平衡度监测的研究[J]. 电子设计工程, 2021, 29(14): 106-110.
- YAO Wei, LIU Yanyan, PENG Longsheng, et al. Research on the three-phase imbalance degree monitoring of low-voltage distribution system[J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(14): 106-110.
- [24] 常栋梁, 何立柱, 李洋, 等. 配电网功率平衡调节与无功补偿研究及装置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(4): 132-138.
- CHANG Dongliang, HE Lizhu, LI Yang, et al. Research and devices for power balance regulation and reactive compensation in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(4): 132-138.
- [25] 程湘, 田昊, 周群, 等. 考虑相位不平衡的智能换相开关控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 48-55.
- CHENG Xiang, TIAN Hao, ZHOU Qun, et al. Control strategy of intelligent commutation switch considering phase imbalance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 48-55.
- [26] 康党兴, 赵航. 低压配电网三相不平衡对线损影响的分析[C] // 陕西省电网节能与电能质量技术学会 2018 年学术交流会论文集, 2018: 35-39.
- [27] 刘科研, 贾东梨, 王薇嘉, 等. 考虑负荷不平衡分布的低压配电网线损实用计算策略[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(6): 81-86.
- LIU Keyan, JIA Dongli, WANG Weijia, et al. Practical calculation strategy for low-voltage network line loss considering unbalanced load distribution[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(6): 81-86.
- [28] 魏梅芳, 胡毕正, 庞文龙, 等. 基于动态三相不平衡度的配电网线损计算方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 104-108.
- WEI Meifang, HU Bizheng, PANG Wenlong, et al. Calculation method of distribution line loss based on dynamic three-phase unbalance degree[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 104-108.
- [29] 张鹏, 罗建, 吉畅, 等. 低压配电网三相不平衡负载参数的辨识方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 90-95.
- ZHANG Peng, LUO Jian, JI Chang, et al. Three-phase unbalanced load parameters identification of low voltage power utilization network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 90-95.
- [30] 孔惠文, 代双寅, 蒋建东, 等. 三相不平衡对低压配电网能耗影响的量化分析[C] // 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会第九届电能质量研讨会论文集, 2018: 296-306.
- [31] 闫志强, 雷霞, 何建平, 等. 三相不平衡对配电变压器带负载能力的影响研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(8): 51-57.
- YAN Zhiqiang, LEI Xia, HE Jianping, et al. Study on the influence of three-phase unbalance on the load capacity of distribution transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(8): 51-57.

收稿日期: 2022-10-07; 修回日期: 2022-11-27

作者简介:

姚伟(1988—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为三相负荷不平衡与治理研究、低压电力系统保护与自动控制; E-mail: 511489138@qq.com

刘彦彦(1991—), 女, 学士, 讲师, 主要研究方向为电气自动化、自动控制; E-mail: 1371549419@qq.com

张玉良(1960—), 男, 通信作者, 主要研究方向为低压电器保护与自动控制。E-mail: zyl8121110@126.com

(编辑 魏小丽)