

# 基于相序分解和量测值的三相不平衡度计算方法

乔昌阔, 魏军强

华北电力大学, 北京

Email: qiaochangkuo@163.com

收稿日期: 2021年4月2日; 录用日期: 2021年4月16日; 发布日期: 2021年5月8日

## 摘要

国标定义的三相不平衡度需要测得三相向量的幅值和相位, 且计算过程中需要进行向量运算, 运算较为繁琐, 而在实际工程应用中, 三相向量的相位不易测得, 也使得基于相序分解的计算方法不适用; 一些国际组织或团体为了简化计算, 采用三相向量的量测值进行计算, 此类方法虽然舍去了复杂的向量运算, 但也同时造成计算结果与国标定义的相比误差较大。基于此, 本文提出了以三相零序分量和负序分量量测值的平方和与三相正序分量量测值的平方之比来定义三相不平衡度, 该方法只需要三相向量的幅值即可计算, 且经过算例分析, 该方法与较接近国标定义的计算结果。

## 关键词

三相不平衡度, 三相向量, 零序分量, 相序分解, 量测值

# Three-Phase Unbalance Calculation Method Based on Phase Sequence Decomposition and Measured Value

Changkuo Qiao, Junqiang Wei

North China Electric Power University, Beijing

Email: qiaochangkuo@163.com

Received: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Apr. 16<sup>th</sup>, 2021; published: May 8<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

The three-phase unbalance degree defined by the national standard needs to measure the ampli-

文章引用: 乔昌阔, 魏军强. 基于相序分解和量测值的三相不平衡度计算方法[J]. 电力与能源进展, 2021, 9(3): 109-117. DOI: 10.12677/aepe.2021.93012

tude and phase of the three-phase vector, and the vector operation is needed in the calculation process, which is more complicated. In practical engineering applications, the phase of the three-phase vector is not easy to be measured, which makes the calculation method based on phase sequence decomposition not applicable. In order to simplify the calculation, some international organizations or groups use the measurement value of three-phase vector for calculation. Although this kind of method eliminates the complex vector operation, it also causes a large error compared with the calculation result defined by the national standard. Based on this, this paper proposes to define the three-phase unbalance degree by the square ratio of the square sum of the measured values of the three-phase zero-sequence component and the negative sequence component to the measured values of the three-phase positive sequence component. This method only needs the amplitude of the three-phase vector to calculate, and through the calculation example analysis, this method is close to the calculation result of the national standard definition.

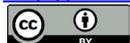
## Keywords

the Three-Phase Unbalance Degree, Three Phase Vector, Zero Sequence Component, Phase Sequence Decomposition, Measurement Value

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国在低压配电网地区,采用的是三相四线制,即三根火线、一根中性线。我国居民用电大多是采用单相负荷,即单相线与零线之间承担居民用电负荷,而随着我国经济水平的飞速发展,人民生活水平的日益提高,家用电器越来越复杂化、多样化,这就造成我国居民用电低压台区的三相不平衡现象日益严重[1]。特别对于农村地区,由于用电用户具有分布范围广、输电线路长、用电不规范等特点,更加加重了我国电网系统的不平衡问题。日常生活中,我们经常用三相平衡度、不平衡度来衡量三相不平衡的程度。因此准确快速简便的计算三相不平衡度是我们日益追求的目标。

三相平衡是指三相电压或电流幅值相等、相位相差 $120^\circ$ 的对称系统。如果三相幅值不同或者相位不对称,则会出现三相不平衡,并随之带来一系列危害。

目前常用的三相不平衡度计算方法主要分为两大类:一是基于相序分解的三相不平衡度,另一则是基于量测值的三相不平衡度。

国家标准GB/T15543-2008《电能质量三相电压不平衡》[2]中用负序电压(电流)的有效值与正序电压(电流)的有效值的比来定义三相不平衡度,与国际电工委员会[3]的计算方法相同。这类方法需要得到三相电压(电流)的大小和相位来进行相序分解进而得到正负序以及零序分量。计算较为繁琐,并且在工程应用中,无法用仪表得到三相电压(电流)的相位,因此应用范围较窄。

电气与电子工程师协会(IEEE)用三相相电压定义的 $PVUR_{936}$  [4],  $PVUR_{112}$  [5], 美国电气制造商协会(NEMA) [6]和国际大电网委员会(CIGRE) [7]用三相线电压有效值定义的LVUR公式和GIGER公式等,此类方法虽然采用三相电压(电流)的有效值进行计算,大大简化了计算量,相应的造成计算结果与国标定义相比误差较大,而且无法计算正负序分量,此外有些方法只适用于没有零序分量的三相三线制系统,应用范围不广泛。基于此,我们急需一种基于相序分解和相电压有效值的计算方法。

本文提出以三相负序分量有效值的平方和三相零序分量有效值的平方和的和与三相正序分量有效值

的平方之比用于度量三相不平衡。此种方法使用于我国低压台网地区的三相四线制系统。

电源学会团体标准T/CPSS1001-2018《低压配电网有源不平衡补偿装置》附录B中给出了补偿装置不平衡电流补偿需量计算公式

$$I_{\varepsilon} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2} \quad (1)$$

根据上式, 我们可以定义三相电流不平衡度计算公式如下:

$$I_{\varepsilon b} = \frac{I_0^2 + I_2^2}{I_1^2} \quad (2)$$

其中:  $I_0$  为零序电流分量,  $I_1$  为正序电流分量,  $I_2$  为负序电流分量。

负载接线方式分为两种, 三角形接线方式和星形接线方式。这里我们只考虑星形接线方式, 电机星形接法时因为有中性点(电机一般都是三相对称负载所以一般不引出中性线), 具体方法是电机的三相绕组的三条尾线连接在一起, 三条头接电源, 这时有两种电压等级, 即线电压和相电压, 且线电压等于相电压的 $\sqrt{3}$ 倍, 线电流大小等于相电流大小。

## 2. 文献回顾

### 2.1. 基于相序分解的三相不平衡度定义

IEC 定义三相电压不平衡度为电压的负序分量与电压的正序分量之比

$$CVUF = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (3)$$

$$U_1 = \frac{1}{3}(U_A + \alpha U_B + \alpha^2 U_C) \quad (4)$$

$$U_2 = \frac{1}{3}(U_A + \alpha^2 U_B + \alpha U_C);$$

$$U_0 = \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C)。$$

式中 $\alpha$ 为旋转算子,  $\alpha = e^{-j120^\circ} = \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,  $\alpha^2 = e^{-j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,  $U_1, U_2, U_0$ 分别为正序分量、负序分量和零序分量。

在三相三线制系统中, 由于没有零序分量, 此方法可以准确表达三相不平衡度, 在表示三相分量幅值的大小的同时能够反映正负序电压的相角差值。而在三相四线制系统中, 零序分量的存在使得此方法不再使用, 且此方法需要进行向量运算, 需要得到三相向量的幅值和相位, 进而造成计算量大, 计算速度慢。而在工程应用中, 三相向量的相位不易测得, 因此此方法无法推广使用。

IEC [4]定义电压的负序分量有效值与电压的正序分量有效值之比来计算三相电压不平衡度, 其表达式为:

$$VUF = \frac{|U_2|}{|U_1|} \times 100\% \quad (5)$$

此方法能反映三相电压幅值的大小, 虽然避免了相位运算, 但也无法反映出正负序电压的相角差值。

当在三相四线制系统中时, 由于含有零序分量, 也可以用电压的零序分量与电压的正序分量之比来表示三相不平衡度。即

$$\varepsilon_{umb} = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% \quad (6)$$

## 2.2. 基于量测值的三相不平衡度定义

在工程应用中, 由于基于相序分解的三相不平衡度不适用, 许多组织和团体定义了一些三相不平衡度的近似计算方法。

IEEEStd.936-1987 定义电压不平衡度为相电压不平衡率 (PVUR) 为最大均方根电压值和最小均方根电压值之差与平均相电压的比值, 其表达式

$$PVUR_{936} = \frac{\max\{U_A, U_B, U_C\} - \min\{U_A, U_B, U_C\}}{U_{pav}} \quad (7)$$

式中  $U_A, U_B, U_C$  ——三相相电压,  $U_{pav}$  为平均相电压,  $U_{pav} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}$ 。

IEEEStd.112-1991 定义电压不平衡度为相电压不平衡率 (PVUR), 即三相相电压和平均相电压值差值最大值与平均相电压的比值, 其表达式

$$PVUR_{112} = \frac{\max\{U_A - U_{pav}, U_B - U_{pav}, U_C - U_{pav}\}}{U_{pav}} \quad (8)$$

式中  $U_A, U_B, U_C$  ——三相相电压,  $U_{pav}$  为平均相电压,  $U_{pav} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}$ 。

美国电器制造商协会(NEMA)用三相线电压的有效值定义电压不平衡度为线电压不平衡率(LVUR), 其表达式

$$LVUR = \frac{\max\{U_{AB} - U_{Lav}, U_{BC} - U_{Lav}, U_{CA} - U_{Lav}\}}{U_{Lav}} \quad (9)$$

式中  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  ——三相线电压量测值,  $U_{Lav}$  为平均线电压,  $U_{Lav} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}$ 。

国际大电网委员会[8] (以下简称 CIGRE)用三相线电压定义电压不平衡度, 用符号  $\varepsilon_G$  表示, 其表达式为:

$$\varepsilon_G = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100\% \quad (10)$$

$$\beta = \frac{|U_{AB}^4| + |U_{BC}^4| + |U_{CA}^4|}{(|U_{AB}^2| + |U_{BC}^2| + |U_{CA}^2|)^2}$$

式中,  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  ——三相线电压。

## 2.3. 两大类方法的改进

在工程应用中, 由于无法测得三相相位, 故而多采用基于量测值定义的三相不平衡度, 这样可以避免进行相位计算进而简化计算过程, 加快计算速度; 基于相序分解定义的三相不平衡度不唯一, 由 IEC 定义的公式可知, 在三相三线制电路系统中没有零序分量中, 可用式(1)来衡量三相不平衡度, 而在既含有负序分量也含有零序分量的三线四线制中, 可用式(1)来表示负序不平衡度, 式(2)来表示零序不平衡度,

而在衡量三相系统不平衡时采用哪种公式, 不一而足。因此有必要对三相不平衡度定义的进行改进。

### 3. 三相不平衡度定义的改进

根据对称分量法, 任何一组不对称的三相向量都可以分解成三组相角不同的对称分量: 正序分量、负序分量和零序分量。如图 1 所示

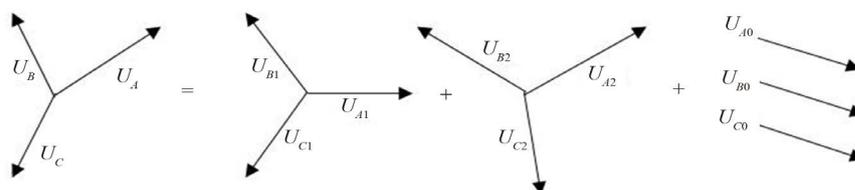


Figure 1. Schematic diagram of symmetrical component method  
图 1. 对称分量法示意图

设 A 相相电压为  $U_A$ , B 相相电压为  $U_B$ , C 相相电压为  $U_C$ ; A 相的正序分量为  $U_1$ , 其相角为  $0^\circ$ , 负序分量为  $U_2$ , 其相角为  $\theta_1$ , 零序分量为  $U_0$ , 其相角为  $\theta_2$ 。

则三相相电压为:

$$\begin{cases} U_A = U_1 + U_2 + U_0 \\ U_B = U_1 + \alpha U_2 + \alpha^2 U_0 \\ U_C = U_1 + \alpha^2 U_2 + \alpha U_0 \end{cases} \quad (11)$$

则等式两边平方相加得

$$U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 = 3(U_1^2 + U_2^2 + U_0^2) \quad (12)$$

即

$$U_1^2 + U_2^2 + U_0^2 = \frac{1}{3}(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) \quad (13)$$

式中  $U_A, U_B, U_C$  为三相相电压的量测值,  $U_1, U_2, U_0$  为正序、负序和零序分量的量测值。

由上式可知, 正序、负序、零序分量的平方和为三相向量的平方和的 1/3, 而在三相四线制系统中, 负序分量和零序分量是引起不平衡的主要原因, 本文提出以三相零序分量和负序分量量测值的平方和与三相正序分量量测值的平方之比来定义三相不平衡度。即

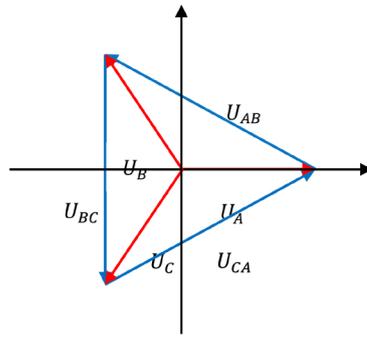
$$\varepsilon_{umb} = \frac{U_0^2 + U_2^2}{U_1^2} \quad (14)$$

由图 2 可得三相线电压为

$$\begin{cases} U_{AB} = \sqrt{3}(U_B - U_A) = \sqrt{3}(U_1 \angle 30^\circ + U_2 \angle \theta_1 - 30^\circ) \\ U_{BC} = \sqrt{3}(U_C - U_B) = \sqrt{3}(U_1 \angle -90^\circ + U_2 \angle \theta_1 + 90^\circ) \\ U_{CA} = \sqrt{3}(U_A - U_C) = \sqrt{3}(U_1 \angle 150^\circ + U_2 \angle \theta_1 - 150^\circ) \end{cases} \quad (15)$$

两边同时平方得到三相线电压有效值的平方为:

$$\begin{cases} U_{AB}^2 = 3 \left( U_1^2 + 2U_1U_2 \cos \left( \theta_1 - \frac{\pi}{3} \right) + U_2^2 \right) \\ U_{BC}^2 = 3 \left( U_1^2 + 2U_1U_2 \cos (\theta_1 + \pi) + U_2^2 \right) \\ U_{CA}^2 = 3 \left( U_1^2 + 2U_1U_2 \cos \left( \theta_1 + \frac{\pi}{3} \right) + U_2^2 \right) \end{cases} \quad (16)$$



**Figure 2.** The relationship between three phase voltage and three phase line voltage  
**图 2.** 三相相电压与三相线电压的关系

即

$$U_{AB}^2 = 3 \left( U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \left( \frac{1}{2} \cos \theta_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta_1 \right) \right) \quad (17)$$

$$U_{BC}^2 = 3(U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \theta_1) \quad (18)$$

$$U_{CA}^2 = 3(U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos \theta_1) \quad (19)$$

式(17)、式(18)、式(19)相加得

$$U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 = 9(U_1^2 + U_2^2) \quad (20)$$

式(17)与式(19)的和与式(18)的 2 倍相减得到

$$U_{AB}^2 + U_{CA}^2 - 2U_{BC}^2 = 18U_1U_2 \cos \theta_1 \quad (21)$$

式(17)与式(19)相减得到

$$U_{AB}^2 - U_{CA}^2 = 6\sqrt{3}U_1U_2 \sin \theta_1 \quad (22)$$

整理式(21)(22)得

$$\frac{U_{AB}^2 + U_{CA}^2 - 2U_{BC}^2}{9} = 2U_1U_2 \cos \theta_1 \quad (23)$$

$$\frac{U_{AB}^2 - U_{CA}^2}{3\sqrt{3}} = 2U_1U_2 \sin \theta_1 \quad (24)$$

式(23) (24)等式两边同时平方相加得

$$4U_1^2U_2^2 = \frac{4U_{AB}^4 + 4U_{BC}^4 + 4U_{CA}^4 - 4U_{AB}^2U_{BC}^2 - 4U_{AB}^2U_{CA}^2 - 4U_{BC}^2U_{CA}^2}{81} \quad (25)$$

整理得

$$2U_1U_2 = \frac{2}{9} \sqrt{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4 - U_{AB}^2U_{BC}^2 - U_{AB}^2U_{CA}^2 - U_{BC}^2U_{CA}^2} \quad (26)$$

这里为方便计算, 我们令  $U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 = A$ ,  $U_{AB}^2U_{BC}^2 + U_{AB}^2U_{CA}^2 + U_{BC}^2U_{CA}^2 = B$ 。  
 显然有

$$\begin{aligned}
& U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4 - U_{AB}^2 U_{BC}^2 - U_{AB}^2 U_{CA}^2 - U_{BC}^2 U_{CA}^2 \\
&= U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4 + 2U_{AB}^2 U_{BC}^2 + 2U_{AB}^2 U_{CA}^2 + 2U_{BC}^2 U_{CA}^2 - 3U_{AB}^2 U_{BC}^2 - 3U_{AB}^2 U_{CA}^2 - 3U_{BC}^2 U_{CA}^2 \\
&= (U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2 - 3(U_{AB}^2 U_{BC}^2 + U_{AB}^2 U_{CA}^2 + U_{BC}^2 U_{CA}^2) \\
&= A^2 - 3B
\end{aligned} \tag{27}$$

则

$$U_1^2 + U_2^2 = \frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2}{9} = \frac{A}{9} \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
2U_1 U_2 &= \frac{2}{9} \sqrt{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4 - U_{AB}^2 U_{BC}^2 - U_{AB}^2 U_{CA}^2 - U_{BC}^2 U_{CA}^2} \\
&= \frac{2\sqrt{A^2 - 3B}}{9}
\end{aligned} \tag{29}$$

则我们有

$$(U_1 + U_2)^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 = \frac{A}{9} + \frac{2\sqrt{A^2 - 3B}}{9} \tag{30}$$

$$(U_1 - U_2)^2 = U_1^2 + U_2^2 - 2U_1 U_2 = \frac{A}{9} - \frac{2\sqrt{A^2 - 3B}}{9} \tag{31}$$

一般的  $U_1 > U_2$ , 可求得  $U_1^2$ 、 $U_2^2$

联立式(30) (31)整理得

$$U_1^2 = \frac{A}{18} + \frac{\sqrt{3}\sqrt{-A^2 + 4B}}{18} \tag{32}$$

$$U_2^2 = \frac{A}{18} - \frac{\sqrt{3}\sqrt{-A^2 + 4B}}{18} \tag{33}$$

由于

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

则

$$U_0^2 = \frac{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}{3} - (U_1^2 + U_2^2) = \frac{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}{3} - \frac{1}{9}A \tag{34}$$

所以三相不平衡度为

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{unb} &= \frac{U_0^2 + U_2^2}{U_1^2} \\
&= \frac{\frac{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}{3} - \frac{A}{9} - \frac{\sqrt{3}\sqrt{-A^2 + 4B}}{18}}{\frac{A}{18} + \frac{\sqrt{3}\sqrt{-A^2 + 4B}}{18}} \\
&= -1 + \frac{\frac{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}{3}}{\frac{A}{18} + \frac{\sqrt{3}\sqrt{-A^2 + 4B}}{18}} \\
&= -1 + \frac{3(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2)(A - \sqrt{3}\sqrt{-A^2 + 4B})}{2(A^2 - 3B)}
\end{aligned} \tag{35}$$

## 4. 算例分析

本文用 Matlab 仿真计算来验证本文所提出的算法的准确性, 这里, 我们对给定的三组电压的相位和幅值进行计算, 如表 1 所示。计算得出的三相线电压的幅值如表 2 所示, 本文采用公式法、坐标法、LVUR<sub>936</sub>, PVUR<sub>112</sub>, LVUR, GIGRE 推荐的方法以及本文所提出的方法计算的三相不平衡度结果如表 3 所示。

**Table 1.** Three groups of voltage data used in simulation

**表 1.** 仿真所用的 3 组电压数据

序号	A 相		B 相		C 相	
	幅值	相位	幅值	相位	幅值	相位
1	221.97553	2.1368537	230.78633	0.23363273	214.37579	4.1567753
2	208.76426	2.2756429	221.67975	0.24186366	230.45053	4.5125563
3	230.39131	2.2331652	209.43392	0.22164635	222.43652	4.2198753

**Table 2.** Three groups of line voltage data used in simulation

**表 2.** 仿真所用的 3 组三相线电压的幅值

序号	$U_{AB}$	$U_{AB}$	$U_{AB}$
1	368.7426	411.6507	369.5292
2	366.1453	382.0018	395.1553
3	371.6321	392.8948	379.4321

**Table 3.** Three phase unbalance degree calculated by different methods

**表 3.** 采用不同方法计算的三相不平衡度

序号		公式法	坐标法	PVUR <sub>936</sub>	PVUR <sub>112</sub>	LVUR	GIGRE	新定义																		
1	负序不平衡度	0.075542	0.075542	0.0738	0.0378	0.0739	0.0755	0.0137																		
	零序不平衡度	0.089217	0.089217						2	负序不平衡度	0.043979	0.043979	0.0984	0.0524	0.0392	0.0440	0.0051	零序不平衡度	0.055897	0.055897	3	负序不平衡度	0.032707	0.032707	0.0949	0.0513
2	负序不平衡度	0.043979	0.043979	0.0984	0.0524	0.0392	0.0440	0.0051																		
	零序不平衡度	0.055897	0.055897						3	负序不平衡度	0.032707	0.032707	0.0949	0.0513	0.0304	0.0327	0.0075	零序不平衡度	0.080377	0.080377						
3	负序不平衡度	0.032707	0.032707	0.0949	0.0513	0.0304	0.0327	0.0075																		
	零序不平衡度	0.080377	0.080377																							

由表 3 可以看出, 本文所提出的方法与公式法和坐标法的计算结果较为接近, 具有良好的准确性, 但本文提出的方法用零序分量和负序分量的平方和与正序分量的平方作比, 不需要三相分量的相位, 只需要三相分量的有效值且计算简便, 具有较广的应用前景; 而相序分解下的定义的三相不平衡度计算复杂、计算量大, 当处理大量数据时, 计算速度较慢。

本文提出的方法比工程上应用的近似算法更为接近公式法, 计算结果更加精确, 工程上应用的近似算法没有考虑零序分量, 不适于三相四线制系统中, 而我国城市和农村居民用电大多是三相四线制系统, 因此, 这些方法存在误差较大, 且应用范围不广的缺点。

## 5. 总结

本文用三相负序分量和零序分量的平方和与三相正序分量平方和之比来定义三相不平衡度, 既避免

了相序分解下定义的方法需要三相幅值相位, 只需要三相幅值, 计算量大为减少, 又具有较高的准确性, 避免有效值定义下的计算方法的计算误差较大的特点。此外, 本文新定义的三相不平衡度适用于存在零序分量的三相四线制系统, 因此, 本文所提出的计算方法具有更广的应用前景。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 侯铁信, 朴正良, 林海雪, 等. GB/T15543-2008 电能质量 三相电压不平衡[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2008.
- [3] IEC6100-4-30 (2003) Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4-30 Testing and Measurement Techniques-Power Quality Measurement Methods.
- [4] Pillay, P. and Manyage, M. (2001) Definitions of Voltage Unbalance. *IEEE Power Engineering Review*, **21**, 50-51.
- [5] IEEE Std 112-2004 (1991) IEEE Standard Test Procedure for Poly-Phase Induction Motors and Generators.
- [6] NEMA Std. (2009) Publication MG 1-2009.
- [7] CIGRE (1986) A New Simple and Effective Approximate Formulation for the Determination of Three-Phase Unbalances by Voltmeter Method. CIGRE, Belgique.
- [8] 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.