

# 低压配电网三相不平衡度计算方法与应用<sup>\*</sup>

朱明星, 李开金

(安徽大学 电气工程与自动化学院, 合肥 230601)

**摘要:** 低压配电网三相不平衡已成为广泛关注的共性问题, 分析、评估及治理工作均需要准确的算法来保证。为了了解不平衡度估算算法在三相不平衡系统计算中产生的误差, 研究电流序分量相角的变化对三种电流不平衡度算法的影响, 进而选择一种最有效的、误差最小的估算方法。文中首先介绍了标准中电压和电流不平衡度的几种算法, 理论推导了不平衡电压的产生的原因, 并给出了不平衡电流的几种计算方法。在此基础上, 通过 MATLAB 仿真实验研究了影响三种电流不平衡度估算方法的因素, 并提出了可行性建议。文章最后通过实测数据的分析, 验证了以上结论。文中对四种电流不平衡度估算算法的研究, 对工程实践有很大的指导意义, 对三相不平衡系统的治理与补偿提供一定的借鉴。

**关键词:** 不平衡度; 算法; 电流序分量; 相角

**DOI:** 10.19753/j.issn1001-1390.2019.02.006

**中图分类号:** TM93

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-1390(2019)02-0041-06

## Calculation method and application of three-phase unbalance in low voltage distribution network

Zhu Mingxing, Li Kaijin

(School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The three-phase unbalance of low voltage distribution network has become a common problem of widespread concern. Analysis, evaluation and management need accurate algorithms to ensure. In order to understand the error produced by unbalanced estimation algorithm in three-phase unbalanced system, the influence of phase angle variation of current sequence components on the algorithm of three kinds of current imbalance is studied, and then, a most effective and least error estimation method is chosen. This paper firstly introduces several algorithms of voltage and current unbalance in standard, theoretically deduces the cause of unbalanced voltage, and gives several calculation methods of unbalanced current. On this basis, the factors that affect the estimation methods of three kinds of current imbalances are studied by MATLAB simulation experiments, and some feasible suggestions are put forward. In the end, the above conclusion is verified by the analysis of the measured data. In this paper, the research of four kinds of current imbalance estimation algorithm has great guiding significance for engineering practice, and it can provide some reference for the treatment and compensation of three-phase unbalanced system.

**Keywords:** unbalance degree; algorithm; current sequence component; phase angle

### 0 引言

三相不平衡是低压配电网普遍存在的问题, 尽管在设计上考虑到了低压配电网三相不平衡问题, 但由于单相负荷过多等因素, 三相不平衡仍将成为低压配电网的主要问题之一。

电力系统三相不平衡可以分为事故性不平衡和正

常性不平衡两大类<sup>[1]</sup>, 不平衡电压存在着正序、负序、零序三个电压分量。负序电压会引起旋转电机的附加发热和振动, 使其效率降低, 绝缘老化过程加快。零序电流通过配变中的钢构件时将产生磁滞和涡流损耗, 使配变的钢构件局部温度升高, 从而加快配变的老化, 同时增加配变的损耗<sup>[2]</sup>。国家标准《电能质量三相电压允许不平衡度》明确规定, 在正常情况下电网各级电

<sup>\*</sup> 基金项目: 国网科技项目 (PDB17201700022)

压的三相不平衡度不大于 2%, 每个用户在公共连接点引起的三相电压不平衡度不得超过 1.3%<sup>[3-4]</sup>。因此, 如何计算不平衡度是贯彻国家标准、提高电能质量的基础。但是, 对于三相不平衡的治理需要对系统电流三相不平衡度进行准确计算, 尽管国标对电压不平衡有着详细的规定, 但并对不平衡电流做出明确的计算方法; 且由于在检测计算时, 不同算法的计算方法不同, 各算法误差差异性较大, 使得难以对系统的不平衡度做出精确的分析, 从而使得系统评估不科学, 装置选型不合理, 治理效果也难以达到预期的目标<sup>[4-6]</sup>。三相不平衡度的计算是治理三相不平衡系统的前提, 计算三相不平衡度不仅是影响补偿装置控制策略的重要参数指标, 同时也对项目立项到治理效益的评价都有重要的影响<sup>[7-8]</sup>。

本文首先介绍了标准中电压不平衡度的几种算法, 理论推导了不平衡电流与不平衡电压的内在联系, 证明了负荷产生的负序电流流入电网在系统阻抗形成负序电压, 由此并给出了不平衡电流的计算算法。然后通过 MATLAB 仿真实验研究了影响四种电流不平衡度估算方法的因素, 比较了三种估算算法的误差值。最后, 通过实测数据的分析, 比较了在实际应用中的三种电流不平衡度估算值的差异, 验证了仿真结论的正确性。

## 1 电力系统不平衡算法

### 1.1 电压不平衡度算法

#### 1.1.1 国家标准对于电压不平衡度的计算方法

三相电压不平衡度包括三相电压零序不平衡度和三相电压负序不平衡度, 对于三相电流的幅值和相位均已知的情况下, 采用对称分量法分解法按照式(1)计算正序、零序和负序电流分量, 然后按照式(2)、式(3)计算零序和负序电流不平衡度。

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) \\ \dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \alpha \dot{U}_B + \alpha^2 \dot{U}_C) \\ \dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \alpha^2 \dot{U}_B + \alpha \dot{U}_C) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $U_0$  是零序电压;  $U_1$  是正序电压;  $U_2$  是负序电压;  $\alpha$  是旋转因子,  $\alpha = e^{j120^\circ}$ 。

其中, 负序不平衡度  $\varepsilon_{u2}$  计算如下:

$$\varepsilon_{u2} = \frac{u_2}{u_1} \times 100\% \quad (2)$$

零序不平衡度  $\varepsilon_{u0}$  计算如下:

$$\varepsilon_{u0} = \frac{u_0}{u_1} \times 100\% \quad (3)$$

#### 1.1.2 IEEE std 112-1991 对于电压不平衡度的计算方法

IEEE std 112-1991 定义的电压不平衡度为相电压不平衡率(PVUR), PVUR 等于三相相电压方均根值与三相相电压方均根值的平均值之差的极大值与三相相电压方均根值的平均值的比值<sup>[9]</sup>:

$$\varepsilon_3 = \frac{\max\{|U_A - U_{ave}|, |U_B - U_{ave}|, |U_C - U_{ave}|\}}{U_{ave}} \times 100\% \quad (4)$$

式中  $U_{ave}$  为  $U$  三相电压有效值的平均值, 单位为 V;  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  为 A、B、C 三相电压的有效值, 单位为 V。

#### 1.1.3 IEEE std'936-1987 对于电压不平衡度的计算方法

IEEE std 936-1987 定义的电压不平衡度为相电压不平衡率(PVUR), PVUR 等于三相相电压中的最大方均根电压与最小方均根电压的差值与平均相电压方均根值的比值:

$$\varepsilon_4 = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{ave}} \times 100\% \quad (5)$$

式中  $U_{ave}$  为三相电压有效值的平均值, 单位为 V;  $U_{max}$  为三相电压有效值的最大相电压, 单位为 V;  $U_{min}$  为三相电流有效值中的最小值, 单位为 A。

第一种标准三相不平衡度需要知道三相相电压的大小和相位, 运算较复杂, 且由于在实际测量中, 电压相位是随着时间变化的, 不易得到, 运用该方法较为困难。其余两种标准是一种估算算法, 存在较大误差, 但较为实用。

#### 1.2 电压三相不平衡产生的原因

电力系统中, 产生电压不平衡问题大致分为两种, 一种是由发电机参数不对称或高电压等级三相不平衡传递至本级系统, 造成本级系统三相不平衡, 这是一种电压的渗透<sup>[10]</sup>; 另一种是由于本级负荷三相不对称, 负荷向系统注入负序(零序)电流在系统阻抗上形成负序(零序)电压导致三相不平衡<sup>[11]</sup>。本文不涉及由背景不平衡引起的三相不平衡, 只讨论第二种情况。

低压台区负序阻抗模型如图 1 所示, 其中  $U_2$  为低压台区供电末端的负序电压,  $R_2 + jX_2$  为供电变压器和输电线路的等效负序阻抗,  $I_{l2}$  为流经输电线路负序电流,  $I_{s2}$  为流向负载的负序电流,  $Z_2$  为负荷负序阻抗,  $I_{s2}$  为负荷三相不平衡产生的负序电流。

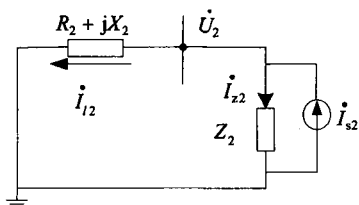


图1 低压台区负序阻抗模型

Fig. 1 Negative impedance model of low voltage area

由基尔霍夫电流定律可得,  $I_{s2}$  流入系统阻抗的电流  $I_{l2}$  为:

$$I_{l2} = \frac{Z_2}{Z_2 + R_2 + jX_2} I_{s2} \quad (6)$$

在实际测试中,  $Z_2 \gg R_2 + jX_2$ , 所以  $I_{s2}$  与  $I_{l2}$  近似相等; 在电力系统中, 系统负序阻抗与系统正序阻抗相等, 则负序电流在变压器和输电线路的等效负序阻抗  $R_2 + jX_2$  上产生的负序电压  $U_2$  为:

$$U_2 = I_{l2} (R_2 + jX_2) \approx I_{s2} (R_1 + jX_1) \quad (7)$$

由式(7)可见, 负荷产生的负序电流流入电网在系统阻抗形成负序电压, 造成电力系统电压三相不平衡。故电压负序不平衡度  $\varepsilon_{u2}$  为:

$$\varepsilon_{u2} = \frac{u_2}{u_1} \times 100\% \approx \frac{I_{s2} (R_1 + jX_1)}{I_1 Z} \times 100\% = \varepsilon_{I2} \frac{R_1 + jX_1}{Z} \times 100\% = k \varepsilon_{I2} \quad (8)$$

式中  $R_1 + jX_1$  为系统阻抗;  $Z$  为电力系统总阻抗;  $\varepsilon_{I2}$  为电流不平衡度;  $k$  为常数。

零序电流和零序电压同样存在相同的关系, 篇幅所限本节不再详细推导。

### 1.3 电流不平衡度的算法

目前一些标准中只给出了电压不平衡度计算方法, 并未给出三相电流不平衡度的计算方法。考虑到目前配电网中的三相电压不平衡度是由三相负荷不平衡电流引起, 因此, 可以借鉴电压不平衡度的计算方法对电流进行不平衡度计算。本文在总结有关标准的基础上给出4种电流不平衡度的计算方法。方法1为对于三相电流的幅值和相位均已知的情况下, 采用对称分量法分解法按照式(9)计算正序、零序和负序电流分量, 然后按照式(10)、式(11)计算零序和负序电流不

平衡度。

$$\begin{cases} I_0 = \frac{1}{3} |\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C| \\ I_1 = \frac{1}{3} |\dot{I}_A + \alpha \dot{I}_B + \alpha^2 \dot{I}_C| \\ I_2 = \frac{1}{3} |\dot{I}_A + \alpha^2 \dot{I}_B + \alpha \dot{I}_C| \end{cases} \quad (9)$$

式中  $I_0$  为零序电流;  $I_1$  为正序电流;  $I_2$  为负序电流;  $\alpha$  为旋转因子,  $\alpha = e^{j120^\circ}$ 。

其中, 负序不平衡度  $\varepsilon_{I2}$  计算如下:

$$\varepsilon_{I2} = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% \quad (10)$$

零序不平衡度  $\varepsilon_{I0}$  计算如下:

$$\varepsilon_{I0} = \frac{I_0}{I_1} \times 100\% \quad (11)$$

在三相电流相位未知的情况下, 工程中应采用较为精确地速算算法, 结合电压算法, 本文给出以下三种不平衡度估算方法(估算方法计算的三相不平衡度是零、负序计算方法共同对系统造成的不平衡度的计算总和<sup>[11-12]</sup>), 估算方法一利用了三相电流有效值的最大值与最小值计算电流不平衡度见式(11); 估算方法二采用了每相电流的有效值与平均值计算电流不平衡度见式(13); 估算方法三则综合利用了以上电流有效值见式(14)。

$$\varepsilon_2 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \times 100\% \quad (12)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\max\{|\dot{I}_A - I_{\text{ave}}|, |\dot{I}_B - I_{\text{ave}}|, |\dot{I}_C - I_{\text{ave}}|\}}{I_{\text{ave}}} \times 100\% \quad (13)$$

$$\varepsilon_4 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{ave}}} \times 100\% \quad (14)$$

式中  $I_{\max}$  为三相电流有效值中的最大值, 单位为 A;  $I_{\min}$  为三相电流有效值中的最小值, 单位为 A;  $I_{\text{mid}}$  为三相电流有效值中的中间值, 单位为 A;  $I_{\text{ave}}$  为三相电流有效值的平均值, 单位为 A;  $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 、 $\dot{I}_C$  为三相电流的有效值, 单位为 A。

## 2 仿真研究

在三相四线制系统中, 构造三相不平衡电流如下:

$$I_i = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 220\sqrt{2} \cos(2\pi ft) + 20\sqrt{2} \cos(2\pi ft + th2) + 20\sqrt{2} \cos(2\pi ft + th1); \\ 220\sqrt{2} \cos(2\pi ft - 2\pi/3) + 20\sqrt{2} \cos(2\pi ft + th2) + 20\sqrt{2} \cos(2\pi ft + 2\pi/3 + th1); \\ 220\sqrt{2} \cos(2\pi ft + 2\pi/3) + 20\sqrt{2} \cos(2\pi ft + th2) + 20\sqrt{2} \cos(2\pi ft - 2\pi/3 + th1) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中  $th1$  为负序电流角变量;  $th2$  为零序电流角变量; 通过程序计算出不平衡电流有效值, 然后根据以上四种电流不平衡度估算方法, 计算三相不平衡度。

当负序电流角变量  $th1$  在  $-180$  到  $180$  变化时, 零序电流角变量  $th2$  分别取  $0 \sim 5/12\pi$  对不平衡度三种估算方法(由理论可知第一种方法不受相位角的影响)的影响, 分别如图 2 所示。

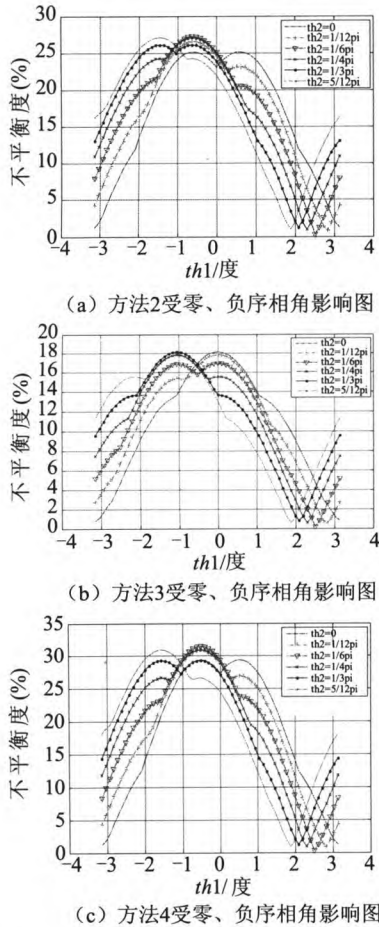


图 2 三种方法受零、负序相角影响图

Fig. 2 Three kinds of methods affected by zero and negative sequence phase influence diagram

由图 2 可得, 方法 2、方法 3 和方法 4 计算结果趋势大致相同, 随着零序电流相角的增大电流不平衡度逐渐向左平移, 但移动幅度变化不大。方法 2 和方法 4 计算结果受零序和负序电流相位角影响较大, 不平衡度随着负序电流相位角的增大逐渐增大, 在  $0^\circ$  达到最大值, 然后逐渐减小, 并随着零序相位角增大逐渐向左移动。可见三种不平衡度估算方法受零序相位角和负序相位角共同作用, 并非呈现一定的线性关系。

当负序电流角变量  $th1$  和零序电流角变量  $th2$  在

$-180^\circ$  到  $180^\circ$  变化时, 四种不平衡度估算方法大小变化如图 3 所示。

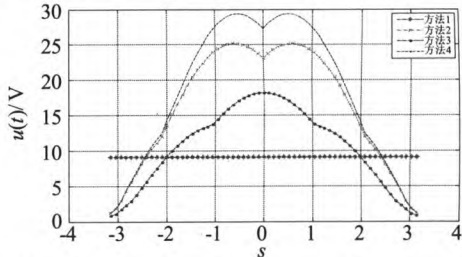


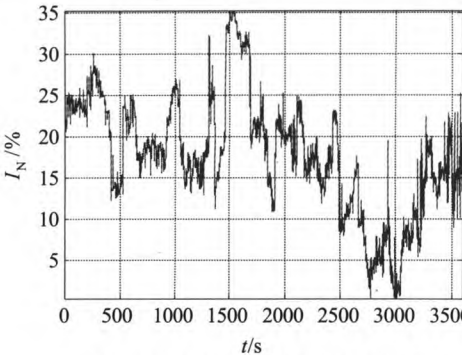
图 3 序电流角变量对四种不平衡度估算方法的影响图  
Fig. 3 Influence diagram of sequence current angle variable on four kinds of unbalance estimation methods

由图 3 可知; 当零序和负序的幅值相同时, 负序电流相位和零序电流相位对四种方法的影响相同(电流角变量对零序和负序的影响合并为一个图如图 3), 不平衡度随着相位的变化关于  $0^\circ$  对称。当相位角从  $0 \sim 180^\circ$  逐渐增大时, 方法 2、方法 3 和方法 4 电流不平衡度随着电流相位的增大而减小。方法 4 电流不平衡度随着负序电流相位的增大波动最大, 幅值在  $0 \sim 30\%$  之间变化; 方法 2 电流不平衡度随着负序电流相位的增大的趋势与方法 4 相同, 幅值在  $0 \sim 25\%$  之间变化; 方法 3 电流不平衡度随着负序电流相位的增大波动较小, 幅值在  $0 \sim 18\%$  之间变化, 仿真结果说明电流相位的变化对方法 3 的影响较小。在零序和负序相位不发生较大变化下, 估算方法 3 计算的结果最接近方法 1, 计算最为准确。

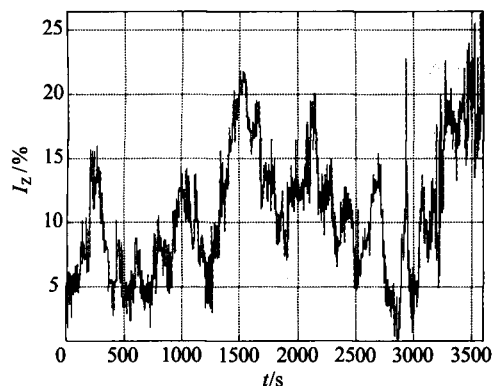
综合考虑, 在三相四线制电力系统中, 建议采用方法 3 估算系统不平衡。

3 不平衡算法算例

某光伏三相四线制  $0.4 \text{ kV}$  低压系统配电台区变压器为  $10/0.4 \text{ kV}$ , 负载侧接入用户负荷与光伏发电设备。根据实测数据, 采用第一种方法计算的负荷电流不平衡度如图 4 所示。



(a) 方法1负序电流不平衡度趋势图



(b) 方法1零序电流不平衡度趋势图

图4 方法1负序和零序电流不平衡度计算图  
Fig.4 Negative sequence and zero sequence current imbalance calculation diagram of method 1

四种电流不平衡度计算方法对同一测试数据趋势分析的统计报表见表1。

表1 四种电流不平衡度计算方法趋势分析统计报表  
Tab.1 Four kinds of current unbalance calculation methods, trend analysis and statistical reports

计算方法		Max (%)	Min (%)	Mean (%)	95% 概率 大值(%)
方法 1	负序	35.27	0.33	17.69	31.29
	零序	26.38	0.83	10.69	19.28
方法 2		65.85	1.27	37.43	58.85
方法 3		50.87	0.76	26.11	43.46
方法 4		96.54	1.28	46.69	81.03

由图4、表1可得,方法1计算的负序电流不平衡度95%概率大值为31.29%,零序电流不平衡度95%概率大值为19.28%,总不平衡度约为50.5%;方法2、3、4计算的电流不平衡度95%概率大值分别为58.85%、43.46%、81.03%,与方法1的计算结果最接近的是方法3;且从最大值、最小值、平均值统计数据来看,方法3的计算结果与方法1的计算结果也是较为接近,实际测试数据统计结果与仿真结果一致。在实际测试中,当数据的相位难以确定时,电流不平度估算计算方法3是最为精确的估算方法。

负序电压含有量较大典型工况下基波序电压、序电流和功率报表如表2所示。

由表2实测数据,根据标准计算电流不平衡度如表3所示。

表2 基波序电压、序电流和功率统计报表  
Tab.2 Fundamental waveform sequence voltage, sequence current and power statistics

相序		A	B	C	Σ
电压	幅值(V)	236.52	237.08	236.54	
	相位(°)	-96.16	144.09	23.82	
电流	幅值(A)	111.08	67.87	112.05	
	相位(°)	-97.79	147.64	21.56	
功率角(°)		1.63	-3.54	2.26	
功率因数		1	1	1	1
功率	P(kW)	26.26	16.06	26.48	68.81
	Q(kvar)	0.75	-1	1.05	0.8
	S(kVA)	26.27	16.09	26.5	68.81

表3 电流不平衡度统计表  
Tab.3 Current unbalance statistics

算法1	算法2	算法3	算法4
负序:15%			
	39.4%	30%	46.39%
零序:15.66%			

由表3,算法1负序不平衡度为15%,零序不平衡度为15.66%,总不平衡度为30.66%,算法3不平横度为30%,算法2不平横度为39.4%,算法4不平横度为46.39%,相比可得即使在负序电压含有量较大典型工况下,算法3和算法1的计算结果都最为接近。可见在负序电压含有量较大典型工况下,估算方法3的计算结果是最精确的。验证了以上结论的正确性。

4 结束语

在三相四线制电力系统中,由于存在零序分量,影响不平衡算法的因素较为复杂,其结论如下:

- (1)存在零序向量时,不平衡度算法方法2和方法4随着负序相位角变化,幅值变动更大,误差也相对较大;
- (2)当零序和负序的幅值相同时,负序电流相位和零序电流相位对四种方法的影响相同;
- (3)三相四线制电力系统中,在零序和负序相位不发生较大变化下,建议采用算法3计算电流不平衡度。

参考文献

[1] 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): 2185-2194.  
Fang Hengfu, Sheng Wanxing, Wang Jinli, et al. Research on the method for real-time onlinecontrol of three-phase unbalanced load indistribution area[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2015, 35(9): 2185-2194.

- [2] 成达, 温和, 滕召胜, 等. 一种三相不平衡度相量快速算法[J]. 电测与仪表, 2014, 51(16): 67-72.  
Cheng Da, Wen He, Teng Zhaosheng, et al. A three-phase unbalance phasor algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(16): 67-72.
- [3] 钱辰辰, 朱明星, 夏振武, 等. 基于参考阻抗法的多不平衡责任分摊定量评估[J]. 电力系统及其自动化, 2014, 38(6): 61-67.  
Qian Chenchen, Zhu Mingxing, Xia Zhenwu, et al. Quantitative evaluation for responsibility proration among multiple three-phase unbalanced sources based on reference impedance method[J]. Automation of Electric Power, 2014, 38(6): 61-67.
- [4] GB T15543-2008, 电能质量 三相电压不平衡[S].
- [5] 王茂海, 孙元章. 通用瞬时功率理论在三相不平衡负荷补偿中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, (11): 60-63.  
Wang Maohai, Sun Yunzhang. Application of universal instantaneous power theory to unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 22(11): 60-63.
- [6] 朱明星, 钱辰辰, 胡婷芳. 配电网三相不平衡源的定位研究[J]. 电气应用, 2012, (17): 28-31, 63.  
Zhu Mingxing, Qian Chenchen, Hu Tingfang. The study of the three-phase unbalanced source location of the distribution network[J]. Electrotechnical Application, 2012, (17): 28-31.
- [7] 张有玉, 郭柯, 周林. 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. A method to compute voltage unbalance factor in three-phase three-wire system[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 123-128.
- [8] 卓放, 翟灏, 易皓, 等. 不平衡负荷的优化治理与责任判定技术研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015, (24): 16-23.  
Zhuo Fang, Zhai Hao, Yi Hao, et al. Study on Optimized Compensation and Responsibility Allocation for Multiple Unbalanced Loads in Electrical Distribution Network[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015, (24): 16-23.

- [9] 同向前, 王海燕, 尹军. 基于负荷功率的三相不平衡度的计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 24-30.  
Tong Xiangqian, Wang Haiyan, Yin Jun. Calculation method of three-phase unbalance based on load power[J]. Proceedings of the Electric Power System and Automation, 2011, 23(2): 24-30.
- [10] 成达, 温和, 滕召胜, 等. 一种三相不平衡度相量快速算法[J]. 电测与仪表, 2014, 51(16): 67-72.
- [11] 房雪涛. 配电网三相不平衡负载的无功补偿技术研究[D]. 东南大学, 2015.
- [12] 王代弟. 配电网三相不平衡问题的分析与研究[D]. 沈阳工业大学, 2007.

作者简介:



朱明星(1968—),男,副教授,硕士研究生导师,从事大用户电网电能质量分析与控制领域的科研与教学工作。Email: xysah@163.com



李开金(1990—),男,硕士研究生,从事电能质量分析与控制领域的科研研究。

收稿日期: 2017-12-12; 修回日期: 2018-01-24  
(杜景飞 编发)

(上接第15页)

- [15] G. Hinton, S. Osindero, Y.-W. The. A fast learning algorithm for deep belief nets[J]. Neural computation, 2006, 18(7): 1527-1554.
- [16] Larochelle H, Bengio Y, Louradour J, et al. Exploring strategies for training deep neural networks[J]. The Journal of Machine Learning Research, 2009, 10: 1-40.

作者简介:



朱萌(1993—),女,硕士研究生,从事高压电力设备智能化在线监测与故障诊断技术研究。  
Email: zm93meng@163.com

梅飞(1982—),男,博士研究生,主要从事智能电网、电气设备在线监测与故障诊断等方面的研究工作。

郑建勇(1966—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力电子与电力传动。

沙浩源(1990—),男,博士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

戴永正(1969—),男,工程师,研究方向为电力电子与电力传动。

顾宇锋(1980—),男,工程师,研究方向为电力电子与电力传动。

收稿日期: 2017-11-28; 修回日期: 2018-01-02  
(王艳丽 编发)