DOI: 10.7667/PSPC171589

基于低压配网功率和用电量信息的三相不平衡负荷调整

郭兆成[1]，车建涛[1]，郭启栋[1]，万 涛[2]，孙 文[3]

(1. 国网大连供电公司，辽宁 大连 116041；2. 大连维深自动识别技术有限公司，辽宁 大连 116023；
3. 国网电力科学研究院，江苏 南京 210000)

摘要：传统的低压配网三相不平衡负荷在人工调整时，存在受瞬时检测电流波动影响大等问题。提出了一种基于台区历史功率数据和用户用电量信息的台区三相不平衡负荷调整方法，建立了不平衡负荷调整的数学模型。分析了在存在销户和新用户接入情况下的负荷调整模型修正问题。最后，对某一台区历史功率样本数据进行测试，结果表明应用该模型进行台区负荷调整可以有效降低配电台区的三相总体不平衡度。

关键词：农网配电台区；三相负荷；不平衡度；历史功率数据；用户接入相序调整

Adjustment of three-phase unbalanced load in distribution network based on its historical power data and power consumption

GUO Zhaocheng[1], CHE Jiantao[1], GUO Qidong[1], WAN Tao[2], SUN Wen[3]

(1. State Grid Dalian Power Supply Company, Dalian 116041, China;
2. Dalian Weishen Automatic Identification Technology Co., Ltd., Dalian 116023, China;
3. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China)

Abstract: In the manual adjustment of the three-phase unbalanced load in distribution network, those factors, such as the fluctuation of the instantaneous detection current, and so on, would decrease the adjustment effect significantly. To address this problem, a method is proposed to adjust the unbalanced three-phase load in the distribution network based on its historical power data and each customer's power consumption in this paper. In addition, the problems of customer reduction and new customer accessing are illustrated and the model updating method is elaborated. Finally, the model is tested by a certain distribution network historical samples data, and it is proved that the unbalance degree of the three-phase load of distribution station could be decreased significantly.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577051) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGJS0000YXJS1501044).

Key words: rural distribution network; three-phase load; unbalance degree; historical power data; adjustment of users' accessing phase sequence

0 引言

我国配电网网架薄弱，配电系统自动化和智能化程度低，配电网单相负荷多，单、三相负荷交叉混合，特别是农村地域较广、用户多而分散等原因，导致配电网存在严重的三相负载的不平衡问题[1]。配电台区三相负荷长时间分布不平衡，会增加配电变压器和线路损耗，降低电能质量和配变出力，严重时会危及设备安全，对电网安全、经济运行和可靠供电产生严重的影响。

目前，对配电台区三相负荷不平衡问题的主要解决方案有：人工离线调整负荷相序、无功补偿方式、不对称调补方式和采用台区控制器等方法[2-7]。其中，无功补偿方式和不对称调补方式是在配电变压器低压侧，通过补偿方式调整三相负荷，它能在一定程度上改善配变自身问题，但不能够解决配电台区低压线路的三相负荷不平衡问题[8-9]。而对于台区控制器，由于每个台区控制器接入的用户有限，且台区控制器价格昂贵，其在广大配电台区中推广

基金项目：国家自然科学基金项目(51577051)；国家电网公司科技项目(SGJS0000YXJS1501044)

应用难度大[10]。因此，人工离线调整负荷相序方式是目前配电台区不平衡负荷调整的主要方式。然而，由于目前配电网用户负荷数据一般只有用电量电表数据，实时功率、电压、电流数据只有计量关口数据，现阶段人工离线调整方式仍是通过用电流表现场检测三相负荷电流来确定需要调整的用户。这种方式受瞬时负荷影响较大，不能体现台区负荷不平衡的总体水平(通常台区负荷调整的周期为一个月)，调整具有滞后性，测量工作量大[11-13]。另外，为了使三相不平衡调整效果的最大化，人工调整必须在台区负荷高峰时段进行，停电将给居民生活造成极大的不便，严重降低服务优质率。

配电网的调度、运行和营销等环节每天都会产生海量的数据，具有大数据的典型特征。通过对配电网的运行、统计数据进行特征化、关联分析和演变分析等，挖掘各相负荷变化情况和趋势，并对配电网运行状态进行估计，进而对配电网运行方式进行分析调整，增强电网的可靠性、运行经济性和提升电力用户满意度[14-15]。目前，国内外对配电网的相关研究一般只涉及 10 kV 配电网，对于 380 V 配网系统，特别是农配网相关研究甚少[8-13]。而对于配网系统三相负荷不平衡问题的研究，多为研究采样电力装置进行无功补偿和不对称调补等[5,7]，以及采用一些数学算法，如最小二乘法、人工智能方法、内点法和粒子群算法等，对配电网运行状态进行估计[1, 16-17]，而并未真正地解决目前我国农配网系统严重的三相不平衡问题，且对于目前农网配电台区的三相不平衡调整策略的制定的指导作用十分微弱。因此，随着用户对供电可靠性和电能质量要求的提高，探索解决配电台区负荷不平衡调整方法迫在眉睫。

为此，本文提出了一种基于配电台区历史各单相功率数据和台区各用户用电量信息的不平衡负荷调整方法，建立了制定不平衡负荷情况下用户接线调整策略的模型。这种方法避免了采用现场检测负荷电流来指导负荷调整时瞬时随机负荷接入或波动导致的误调整问题，提升了工作效率，可以为用户接入相别选择提供指导，确保台区三相负荷的动态平衡，通过模型测试，该方法可以明显地降低台区负荷三相不平衡度。

1　配电台区不平衡负荷调整基础数据

1.1 有功功率和用电量信息

配电台区负荷数据主要有配电变压器关口有功功率、电流、低压数据和用户电表数据，而单个用户实时功率数据现场无法实时采集。在实际中，三相负荷不平衡对电气设备影响的根本电气量是负荷电流(有功电流和无功电流之和)，而在用户用电采集系统中，有功功率才是最直观的数据，且是最容易获得的信息。本文采用的配变关口有功数据和用户电度表数据作为分析基础数据。

1.2 时间周期

在理论上，选取的负荷数据所持续的周期越长，数据量越大，越能体现数据特征和负荷变化的内在规律；同时，数据采集频率越高，负荷的波动特征越精细，分析计算结果的准确性也越高。但是，由于台区负荷的波动、增长一般与季节、天气、区域经济发展速度、新接入用户和居民的用电习惯密切相关，因此时间周期因以适中为宜，在时间周期选取得当时，这些影响因素在前后周期内负荷序列数据内不会出现阶跃现象。因此，目前现场台区负荷调整一般以一个月为周期，月末调整各相用户接入的相别。本文选择的时间周期为 1 个月。目前，用户用电采集系统的功率采样频率为 15 min/次。一个周期内采样点为 2 880 个。

1.3 数据剪枝

在大数据处理中，数据的有效性尤其重要。在配变负荷较低的时段，负荷三相不平衡受单个用户影响较大，同时在负荷较低时段通常不会出现线路负荷过载现象。另外，在实际运行中，配电线路总负荷一般不超过额定负荷，线路不会发生过载。所以，本文选择配变输出三相瞬时功率和大于或等于额定功率的 30%时刻数据作为有效数据进行分析。

2　负荷调整量的计算

2.1 不平衡度的定义及计算

根据国标 GB/T 15543-2008《电能质量−三相电压允许不平衡度》对三相不平衡度的定义：采用电压、电流负序基波分量或零序基波分量与正序基波分量的方均根值的百分比表示[18]。在三相对称电源供电的三相四线制配电系统中，不平衡度 g_k 可以用式(1)表示[12,19]。

$$g_k = \left| \frac{i_k - \bar{I}}{\bar{I}} \right| \times 100\% \quad (k = \text{A、B、C}) \tag{1}$$

$$\bar{I} = \frac{i_\text{A} + i_\text{B} + i_\text{C}}{3} \tag{2}$$

式中：i_A、i_B、i_C 表示 A、B、C 三相瞬时电流值；$\bar{I}$ 为瞬时三相平均电流值。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%[20]。同时，台区总体功率因数通常在 0.80 以上，且正常情况下在配电变压器关口处各相功率因数差

异很小，且目前线路电压波动在 5%以内。另外，对于台区配电变压器而言，关口电流是配变低压侧电流，关口电压是配变低压侧出口电压，由于台区总功率因数和关口电压不会剧烈波动，各单相功率因数和电压波动范围均在很小的变化范围内，所以有功功率能够较好地反映负荷电流变化。所以，在实际运行中有

$$u_{\mathrm{A}} \approx u_{\mathrm{B}} \approx u_{\mathrm{C}} \tag{3}$$

$$\cos\theta_{\mathrm{A}} \approx \cos\theta_{\mathrm{B}} \approx \cos\theta_{\mathrm{C}} \tag{4}$$

式中：u_{A}、u_{B}、u_{C}表示 A、B、C 三相电压有效值；$\cos\theta_{\mathrm{A}}$、$\cos\theta_{\mathrm{B}}$、$\cos\theta_{\mathrm{C}}$表示 A、B、C 三相功率因数值。由式(1)—式(4)可得不平衡度 g_k 为

$$g_k = \left|\frac{p_k - \overline{p}}{\overline{p}}\right| \times 100\% \quad (k = \mathrm{A}、\mathrm{B}、\mathrm{C}) \tag{5}$$

$$\overline{p} = \frac{p_{\mathrm{A}} + p_{\mathrm{B}} + p_{\mathrm{C}}}{3} \tag{6}$$

式中：p_{A}、p_{B}、p_{C}表示 A、B、C 三相瞬时功率值；$\overline{p}$ 为瞬时三相平均功率。采样周期内不平衡度矩阵 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{Matrix}}$ 为

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{Matrix}} = \begin{bmatrix} g_{1\mathrm{A}} & g_{1\mathrm{B}} & g_{1\mathrm{C}} \\ g_{2\mathrm{A}} & g_{2\mathrm{B}} & g_{2\mathrm{C}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N\mathrm{A}} & g_{N\mathrm{B}} & g_{N\mathrm{C}} \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中，$g_{i\mathrm{A}}$、$g_{i\mathrm{B}}$和 $g_{i\mathrm{C}}$ (i=1, 2,⋯, N)分别表示在第 i 时刻 A、B 和 C 相负荷瞬时不平衡度。那么，第 i 个采样点不平衡度矩阵 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{Matrix}i}$ 为

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{Matrix}i} = \begin{bmatrix} g_{i\mathrm{A}} & g_{i\mathrm{B}} & g_{i\mathrm{C}} \end{bmatrix} \tag{8}$$

对于任意功率采样时刻点，以时刻点 A、B、C 三相中负荷最大不平衡度作为此时的负荷不平衡度 G_i，则

$$G_i = \max(g_{i\mathrm{A}}, g_{i\mathrm{B}}, g_{i\mathrm{C}}) \tag{9}$$

计及一个周期，则一个分析周期内不平衡度矩阵如式(10)所示。

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} G_1 & G_2 & G_3 & \cdots & G_N \end{bmatrix} \tag{10}$$

其中 G_1 表示第一个采样点的 A、B、C 三相负荷不平衡度，G_N 表示第 N(N=2 880)个采样点 A、B、C 三相负荷不平衡度。

总不平衡度为 $\overline{G}_{\mathrm{Total}}$：

$$\overline{G}_{\mathrm{Total}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} G_i \tag{11}$$

一个计算周期内 A、B、C 三相中负荷平均不平衡度为

$$\begin{cases} G_{\mathrm{A}} = \dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{i=1}^{N} g_{i\mathrm{A}} \\ G_{\mathrm{B}} = \dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{i=1}^{N} g_{i\mathrm{B}} \\ G_{\mathrm{C}} = \dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{i=1}^{N} g_{i\mathrm{C}} \end{cases} \tag{12}$$

式中：G_{A}、G_{B}和 G_{C}分别表示一个周期内 A、B、C 三相中负荷平均不平衡度；$g_{i\mathrm{A}}$、$g_{i\mathrm{B}}$和 $g_{i\mathrm{C}}$分别表示在第 i(i=1, 2,⋯, N)时刻 A、B 和 C 相负荷瞬时不平衡度。在一个计算周期内，采样数据共 2 880 组功率数据，N=2 880。

我国变压器运行规程中规定配电变压器正常运行时三相负荷电流不平衡度不允许超过 15%[18]。为了验证和指导不平衡负荷调整，本文将不平衡度分为三个等级：1) L1，$\overline{G}_{\mathrm{Total}}$<15%，为合格时刻，不需要调整；2) L2，15%≤$\overline{G}_{\mathrm{Total}}$<50%，为较不平衡时刻，单口累计运行小时达 1 h 时，应及时整改；3) L3，$\overline{G}_{\mathrm{Total}}$ > 50%，为特别不平衡时刻，单口累计运行小时达 1 h 时，应限时整改。

2.2 功率数据样本构建

用户用电采集系统每次采样时获取了 A、B、C 三相负荷值一组，一个采样周期获取的功率矩阵如式(13)所示。

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{Matrix}} = \begin{bmatrix} p_{1\mathrm{A}} & p_{1\mathrm{B}} & p_{1\mathrm{C}} \\ p_{2\mathrm{A}} & p_{2\mathrm{B}} & p_{2\mathrm{C}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{N\mathrm{A}} & p_{N\mathrm{B}} & p_{N\mathrm{C}} \end{bmatrix} \tag{13}$$

式中，$p_{i\mathrm{A}}$、$p_{i\mathrm{B}}$和 $p_{i\mathrm{C}}$ (i=1, 2,⋯, N)分别表示在第 i 时刻处 A、B 和 C 相功率。则 A、B、C 相的平均功率为

$$\begin{cases} \overline{P}_{\mathrm{A}} = \dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{i=1}^{N} p_{i\mathrm{A}} \\ \overline{P}_{\mathrm{B}} = \dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{i=1}^{N} p_{i\mathrm{B}} \\ \overline{P}_{\mathrm{C}} = \dfrac{1}{N}\displaystyle\sum_{i=1}^{N} p_{i\mathrm{C}} \end{cases} \tag{14}$$

式中：$\overline{P}_{\mathrm{A}}$、$\overline{P}_{\mathrm{B}}$和 $\overline{P}_{\mathrm{C}}$分别表示一个周期内 A、B、C 相负荷平均功率；$p_{i\mathrm{A}}$、$p_{i\mathrm{B}}$和 $p_{i\mathrm{C}}$ (i=1, 2,⋯, N)分别表示在第 i 时刻 A、B 和 C 相功率。式(13)、式(14)中，N=2 880。

计算周期内单相平均功率 $\overline{P}$ 为

$$\overline{P} = \frac{\overline{P}_{\mathrm{A}} + \overline{P}_{\mathrm{B}} + \overline{P}_{\mathrm{C}}}{3} \tag{15}$$

三相总平均功率 $\overline{P}_{\text{Total}}$ 为

$$\overline{P}_{\text{Total}}=\overline{P}_{\text{A}}+\overline{P}_{\text{B}}+\overline{P}_{\text{C}} \tag{16}$$

2.3 功率调整量求解

求解功率调整量，首先需求解出 A、B、C 相在一个周期内的不平衡度，根据式(5)和式(6)计算得到 A、B、C 相在任意时刻的不平衡度为

$$\begin{cases} g_{m\text{A}}=\left|\dfrac{p_{m\text{A}}-\overline{p}_m}{\overline{p}_m}\right| \\ g_{m\text{B}}=\left|\dfrac{p_{m\text{B}}-\overline{p}_m}{\overline{p}_m}\right| \\ g_{m\text{C}}=\left|\dfrac{p_{m\text{C}}-\overline{p}_m}{\overline{p}_m}\right| \end{cases} \tag{17}$$

$$\overline{p}_m=\frac{p_{m\text{A}}+p_{m\text{B}}+p_{m\text{C}}}{3}\quad(m=1,2,\cdots,2\,880) \tag{18}$$

式中：$p_{m\text{A}}$、$p_{m\text{B}}$ 和 $p_{m\text{C}}$ 分别表示在第 m(m=1, 2,⋯, N)时刻A、B和C相负荷瞬时不平衡度；$\overline{p}_m$ 为第 m(m=1, 2,⋯, N)时刻三相平均负荷。再结合公式(12)可计算得出 A、B、C 三相平均不平衡度，并确定负荷不平衡度最大相，以负荷不平衡度最大相的负荷来计算负荷调整量。设确定的负荷不平衡度最大相为 W 相(W 取 A、B 或 C 中某一个)，假定调整之后各相负荷能达到完全平衡为最优调节，则 W 相需要调整的负荷量ΔP 为

$$\Delta P=\overline{P}_{\text{W}}-\overline{P} \tag{19}$$

$\overline{P}_{\text{W}}$ 为负荷不平衡度最大相的平均功率。负荷调整量ΔP 可取正数或负数，其分别对应 W 相负荷调小或调大。实际中，若 W 取 A 相，即 A 相不平衡度最大(下文为了便于分析，以 A 相为不平衡度最大相分析。若换成 B 相或 C 相，计算过程类似)，则：

$$\Delta P_{\text{A}}=\Delta P=\overline{P}_{\text{A}}-\overline{P} \tag{20}$$

虽然通过式(20)可以计算负荷调整量，但台区经理在现场调整时并不知道待调整的用户在该相总功率中所占的比例，但是，用户负荷在总负荷中所占的比例与这个周期内其售电量在该相总电量的比例是一致的(因为对于三相用户而言，可以通过用电稽查、用电管理的手段使三相用户内部调整接线来达到三相用户的三相负荷平衡，所以本文所述三相负荷调整只能对单相用户进行接线调整)，所以，根据负荷调整量比例分配原则，计算得到 B 相和 C 相的调整量ΔP_{B} 和ΔP_{C} 分别为

$$\Delta P_{\text{B}}=-\frac{\overline{P}_{\text{C}}}{\overline{P}_{\text{B}}+\overline{P}_{\text{C}}}\times\Delta P_{\text{A}} \tag{21}$$

$$\Delta P_{\text{C}}=-\frac{\overline{P}_{\text{B}}}{\overline{P}_{\text{B}}+\overline{P}_{\text{C}}}\times\Delta P_{\text{A}} \tag{22}$$

实际中，调整各相不平衡度是以最优化调整量为目标来确定实际调整量，并制定现场调整方案、调整方式与调整比例。在理论计算上，显然能够做到不平衡度降低的目的，但是实际用户用电量可调整容量值并非连续值，在调整过程中，更多的是在ΔP 附近选取调整的负荷量。因此，为满足调整效果，调整后的负荷平衡度必须满足一定的边界条件。

设实际调整量为 $\Delta P'$，且 $\Delta P'$ 取值为ΔP 附近范围值，则按 $\Delta P'$ 调整负荷分布，须满足调整后 A、B、C 相负荷不平衡度 G_{A}'、G_{B}'、G_{C}' 低于调整前 A、B、C 相负荷不平衡度 G_{A}、G_{B}、G_{C}(假设调整前 A 相负荷不平衡度最高)：

$$\begin{cases} G_{\text{A}}'\le G_{\text{A}} \\ G_{\text{B}}'\le G_{\text{A}} \\ G_{\text{C}}'\le G_{\text{A}} \end{cases} \tag{23}$$

由式(19)—式(21)推导得到边界条件为

$$\begin{cases} \left|\Delta P'\right|\le 2\times\left|\Delta P\right| \\ \left|\overline{P}_{\text{B}}+\dfrac{\overline{P}_{\text{C}}}{\overline{P}_{\text{B}}+\overline{P}_{\text{C}}}\Delta P'-\overline{P}\right|\le\left|\Delta P\right| \\ \left|\overline{P}_{\text{C}}+\dfrac{\overline{P}_{\text{B}}}{\overline{P}_{\text{B}}+\overline{P}_{\text{C}}}\Delta P'-\overline{P}\right|\le\left|\Delta P\right| \end{cases} \tag{24}$$

式中：$\overline{P}_{\text{A}}$、$\overline{P}_{\text{B}}$ 和 $\overline{P}_{\text{C}}$ 分别表示一个周期内 A、B、C 相负荷平均功率；$\Delta P'$ 为实际功率调整量；ΔP 为理论计算功率调整量。

3　用户调整数的确定

3.1 用户数样本空间

假定配电台区 A、B、C 三相线路上所接入的单相用户数分别为 r、s、t 户。设 A 相用户为 $u_{\text{A}i}$(i=1, 2,⋯, r)，B 相用户为 $u_{\text{B}j}$(j=1, 2,⋯, s)，设 C 相用户为 $u_{\text{C}k}$(k=1, 2,⋯, t)，则用户数样本空间为

$$\begin{cases} \Theta_{\text{A}}=\{u_{\text{A1}}\quad u_{\text{A2}}\quad u_{\text{A3}}\quad\cdots\quad u_{\text{A}r}\} \\ \Theta_{\text{B}}=\{u_{\text{B1}}\quad u_{\text{B2}}\quad u_{\text{B3}}\quad\cdots\quad u_{\text{B}s}\} \\ \Theta_{\text{C}}=\{u_{\text{C1}}\quad u_{\text{C2}}\quad u_{\text{C3}}\quad\cdots\quad u_{\text{C}t}\} \end{cases} \tag{25}$$

为简化计算，假定台区内所有三相用户合为一个大三相用户，记为 u_0，且该大三相用户的负荷不可调整。

3.2 用电量样本空间

设 A 相用户 u_{Ai} 的月度用电量为 Q_{Ai} (i=1, 2,…, r)，B 相用户月度用电量为 Q_{Bj}(j=1, 2,…, s)，C 相用户月度用电量为 Q_{Ck} (k=1, 2,…, t)，则各单相用户月度用电量空间为

$$\begin{cases}\Phi_{\mathrm{A}}=\{Q_{\mathrm{A1}} \quad Q_{\mathrm{A2}} \quad Q_{\mathrm{A3}} \quad \cdots \quad Q_{\mathrm{A}r}\} \\ \Phi_{\mathrm{B}}=\{Q_{\mathrm{B1}} \quad Q_{\mathrm{B2}} \quad Q_{\mathrm{B3}} \quad \cdots \quad Q_{\mathrm{B}s}\} \\ \Phi_{\mathrm{C}}=\{Q_{\mathrm{C1}} \quad Q_{\mathrm{C2}} \quad Q_{\mathrm{C3}} \quad \cdots \quad Q_{\mathrm{C}t}\}\end{cases} \tag{26}$$

设大三相用户的用电量为 Q_0，则总用电量为

$$Q_{\mathrm{Total}}=\sum_{i=1}^{r}Q_{\mathrm{A}i}+\sum_{j=1}^{s}Q_{\mathrm{B}j}+\sum_{k=1}^{t}Q_{\mathrm{C}k}+Q_0 \tag{27}$$

3.3 负荷调整用户数的计算

在一个周期内，考虑统计意义，一个周期内各相平均负荷小时数相同。用户的总用电量等于平均负荷小时数和计算得到的平均功率的乘积，所以调整负荷分配可以用调整的用电量分配来表征。仍假设 A 相负荷不平衡度最高，则各相别调整的功率分配可用式(20)和式(28)表示。所以，总的理论待调整电量，也即 A 相调整的用电量 ΔQ(或 ΔQ_{A})为

$$\Delta Q=\Delta Q_{\mathrm{A}}=\Delta P\cdot\frac{Q_{\mathrm{Total}}}{\bar{P}_{\mathrm{Total}}} \tag{28}$$

同理，可以计算得到 B、C 相调整的用电量 ΔQ_{B}、ΔQ_{C} 分别为

$$\Delta Q_{\mathrm{B}}=-\frac{\bar{P}_{\mathrm{C}}}{\bar{P}_{\mathrm{B}}+\bar{P}_{\mathrm{C}}}\times\Delta Q_{\mathrm{A}} \tag{29}$$

$$\Delta Q_{\mathrm{C}}=-\frac{\bar{P}_{\mathrm{B}}}{\bar{P}_{\mathrm{B}}+\bar{P}_{\mathrm{C}}}\times\Delta Q_{\mathrm{A}} \tag{30}$$

由于每个月用户用电量是离散数据，所以总调整电量不可能与理论计算得到的调整量完全匹配，同时，在调整过程中，还必须考虑普通居民用电用户和商业用电用户的均衡分配问题，以及各总体调整用户数量的问题，所以实际调整中只能根据约束条件选择最优用户。选取的待调整用户数为 f 户，则用电量满足式(31)。

$$\Delta Q\approx\Delta Q'=Q_1'+Q_2'+Q_3'+\cdots+Q_f' \tag{31}$$

式中：Q_1'、Q_2'、Q_3'、…、Q_f' 表示待调整的 f 个用户的月度用电量；$Q_j'\in\{Q|Q=\Phi_{\mathrm{A}}\cup\Phi_{\mathrm{C}}\cup\Phi_{\mathrm{C}}\}$ ($j=1,2,\cdots,f$)。详细地，若 A 相不平衡度最大，负荷调整量ΔP 大于零，且 A 相负荷需要调小(用户接出)，B、C 相负荷调大(用户接入)，则 Q_j' 满足 $Q_j'\in\{Q|Q=\Phi_{\mathrm{A}}\}(j=1,2,\cdots,f)$，$\Delta P$ 取其他值或最大不平衡相为其他相时均可以此类推。

依前假设，A 相不平衡度最大，则 A 相实际负荷调整量 $\Delta P_{\mathrm{A}}'$ 为

$$\Delta P_{\mathrm{A}}'=\Delta P'=\frac{\Delta Q'}{Q_{\mathrm{Total}}}\cdot\bar{P}_{\mathrm{Total}} \tag{32}$$

式(28)和式(32)中，Q_{Total}、$\bar{P}_{\mathrm{Total}}$ 分别表示一个周期内台区总用电量和总平均功率，且式(32)满足边界条件式(24)。

假设，调整至 B 相的负荷为：Q_1'、Q_2'、…、Q_s'，分配至 C 相的负荷为 Q_{s+1}'、Q_{s+2}'、…、Q_f'。在实际调整中，用户的选择应考虑用电性质和回路均衡问题。

4 实际案例理论测试

本文采集了某农网配电台区一个月的功率数据和各用户月用电量，运用大数据分析方法计算台区用户负荷调整量。该台区三相用户 51 户，A 相单相用户 18 户，B 相单相用户 29 户，C 相单相用户 14 户。一个月周期内采集的功率采样数据共 2 880 组。其中三相瞬时功率和小于 30%台区配变额定功率的功率采样点共 135 个数据点，剩余有效功率样本点共 2 745 个。台区 A、B、C 三相功率如图 1 所示。

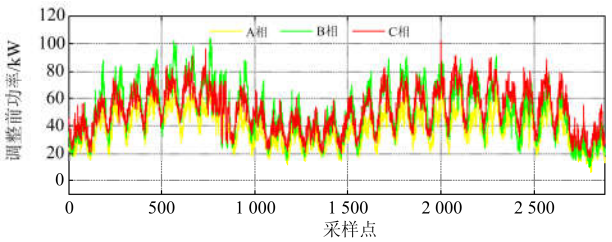


图 1 调整前配电台区一个月内三相负荷功率曲线

Fig. 1 Three-phase power curves in a cycle (one month) before adjustment of distribution area

图 2 所示为负荷调整方法计算流程图。根据图 2 计算得到各相平均不平衡度和周期内总体不平衡度。表 1 所示为负荷调整前实际采集的数据计算得到的 A、B、C 三相负荷功率的不平衡度计算结果。由表 1 可知，台区 B、C 相平均不平衡度分别为 10.47%和 12.49%，均小于 15%，且处于[15%, 1]的功率样本点数相对较少，而 A 相平均不平衡度为 16.97%，大于 15%，而且处于[15%, 1]的功率样本点数达到 A 相总有效样本点数的 58.36%。另外，该台区三相负荷总体不平衡度为 19.91%，大于 15%，处于[15%, 1]的功率样本点数达到总有效功率样本点数的 71.73%，且有 6 个时刻点不平衡度大于 50%，这说明该台区不平衡时刻出现的概率大，因

此需要对该台区三相负荷进行调整。

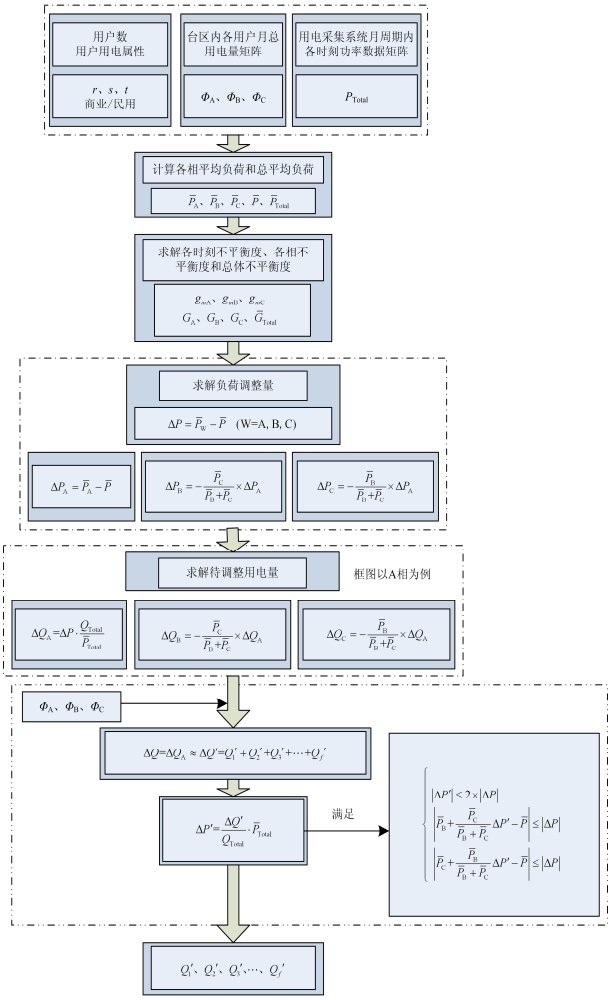


图 2 负荷调整方法流程图

Fig. 2 Flow chart of load adjustment method

表 1 负荷调整前三相负荷功率的不平衡计算结果

Table 1 Three-phase load unbalance degree before adjustment

不平衡度		A 相	B 相	C 相	总计
不平	[0,15%]	1 143	2 047	1 811	776
衡度	[15%,50%]	1 602	698	928	1 963
区间	[50%,1]	0	0	6	6
不平衡度		16.97%	10.47%	12.49%	19.91%
功率/kW		39.30	50.94	51.46	141.70

根据用户用电数据可知，台区 8 月份居民总用电量为 90 564 kW·h。由表 1 可知，A 相负荷不平衡度最高，所以根据式(20)计算得到需调整的功率为

$$\Delta P_A=\Delta P=\bar{P}_A-\bar{P}=39.30-\frac{141.71}{3}=-7.94\ \text{kW} \quad (33)$$

则 A 相需调整的负荷如下所示，且 A 相负荷为调大。

$$\Delta Q=\Delta Q_A=\Delta P\cdot\frac{Q_{Total}}{\bar{P}_{Total}}=-5\,074\ \text{kW}\cdot\text{h} \quad (34)$$

B、C 相调整的用电量分别为

$$\Delta Q_B=-\frac{\bar{P}_C}{\bar{P}_B+\bar{P}_C}\cdot\Delta Q_A=2\,549\ \text{kW}\cdot\text{h} \quad (35)$$

$$\Delta Q_C=-\frac{\bar{P}_B}{\bar{P}_B+\bar{P}_C}\cdot\Delta Q_A=2\,524\ \text{kW}\cdot\text{h} \quad (36)$$

通常，在实际调整中，考虑不同类型负荷均衡和调整工作量的问题，一般地，每个台区一次调整用户数不宜超过 10 户。该台区 B 相单相用户 29 户，C 相单相用户 14 户。本文根据 A、B、C 三相负荷类型、用户数和接线情况，选择 B 相用户 4 户和 C 相用户 3 户作为调整用户，采用枚举法，且满足实际选择的用户用电量偏差和理论计算的调整用电量偏差不大于3%的边界条件，则得到待调整的用户如表 2 所示。

表 2 选取的待调整的 B、C 用户信息

Table 2 Users information of B and C phase to be adjusted

用户名称	所属回路	接线相序	8 月份电量/kW·h
用户 1	3	B	977
用户 2	3	B	405
用户 3	3	B	521
用户 4	3	B	683
用户 5	1	C	883
用户 6	1	C	696
用户 7	1	C	882

根据表 2 得到，B 相实际调整的电量调小 2 586 kW·h；C 相实际调整的电量调小 2 461 kW·h，A 相实际调整的电量调大为

$$\Delta Q'=2\,586+2\,461=5\,047\ \text{kW}\cdot\text{h} \quad (37)$$

根据式(31)可以计算得到

$$\Delta P_A'=\Delta P'=\frac{\Delta Q'}{Q_{Total}}\cdot\bar{P}_{Total}=-7.90\ \text{kW} \quad (38)$$

且 $\Delta P'$ 满足边界约束条件(23)：

$$\begin{cases}|\Delta P'|=7.90\le 2\times|\Delta P|=15.88\\ \left|\bar{P}_B+\dfrac{\bar{P}_C}{\bar{P}_B+\bar{P}_C}\Delta P'-\bar{P}\right|=0.24\le|\Delta P|=7.94\\ \left|\bar{P}_C+\dfrac{\bar{P}_B}{\bar{P}_B+\bar{P}_C}\Delta P'-\bar{P}\right|=0.29\le|\Delta P|=7.94\end{cases} \quad (39)$$

根据式(21)和式(22)计算得到实际 B、C 相调整的平均功率值为

$$\Delta P_B'=-\frac{\bar{P}_C}{\bar{P}_B+\bar{P}_C}\times\Delta P_A'=3.97\ \text{kW} \quad (40)$$

$$\Delta P_{\mathrm{C}}'=-\frac{\overline{P}_{\mathrm{B}}}{\overline{P}_{\mathrm{B}}+\overline{P}_{\mathrm{C}}}\times\Delta P_{\mathrm{A}}'=3.93\ \mathrm{kW} \tag{41}$$

假设调整后，各用户用电规律仍保持不变，各功率采样时刻，各用户的用电功率不变。为了从理论上验证调整效果，则可以将 A、B、C 三相调整的功率值按比例分配至各采样功率点。那么，B 相和 C 相功率调整比例 R_{B} 和 R_{C} 分别为

$$R_{\mathrm{B}}=\frac{\Delta P_{\mathrm{B}}'}{\overline{P}_{\mathrm{B}}-\Delta P_{\mathrm{B}}'}=\frac{3.97}{50.94-3.97}=0.084\ 52 \tag{42}$$

$$R_{\mathrm{C}}=\frac{\Delta P_{\mathrm{C}}'}{\overline{P}_{\mathrm{C}}-\Delta P_{\mathrm{C}}'}=\frac{3.93}{51.46-3.93}=0.082\ 68 \tag{43}$$

在调整前任意采样 i 时刻点功率值 P_i 为

$$P_i=\begin{bmatrix}p_{i\mathrm{A}} & p_{i\mathrm{B}} & p_{i\mathrm{C}}\end{bmatrix} \tag{44}$$

式中，$p_{i\mathrm{A}}$、$p_{i\mathrm{B}}$ 和 $p_{i\mathrm{C}}$(i=1, 2,⋯, N)分别表示在第 i 时刻 A、B 和 C 相功率。在 i 时刻三相功率和 p_i 为

$$p_i=p_{i\mathrm{A}}+p_{i\mathrm{B}}+p_{i\mathrm{C}} \tag{45}$$

根据式(42)和式(43)计算得到调整后 i 时刻 A、B、C 三相功率值为

$$\begin{cases}p_{i\mathrm{A}}'=p_i-p_{i\mathrm{B}}(1-R_{\mathrm{B}})-p_{i\mathrm{C}}(1-R_{\mathrm{C}})\\ p_{i\mathrm{B}}'=p_{i\mathrm{B}}(1-R_{\mathrm{B}})\\ p_{i\mathrm{C}}'=p_{i\mathrm{C}}(1-R_{\mathrm{C}})\end{cases} \tag{46}$$

那么，调整后式(13)所示的功率矩阵为

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{Matrix}}'=\begin{bmatrix}p_{1\mathrm{A}}' & p_{1\mathrm{B}}' & p_{1\mathrm{C}}'\\ p_{2\mathrm{A}}' & p_{2\mathrm{B}}' & p_{2\mathrm{C}}'\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ p_{N\mathrm{A}}' & p_{N\mathrm{B}}' & p_{N\mathrm{C}}'\end{bmatrix} \tag{47}$$

式(46)—式(47)中，$p_{i\mathrm{A}}'$、$p_{i\mathrm{B}}'$ 和 $p_{i\mathrm{C}}'$(i=1, 2,⋯, N)分别为调整后 A、B、C 相负荷功率。

同样地，计算得到调整后各相平均不平衡度和周期内总体不平衡度如表 3 所示。对比表 1，调整后台区三相负荷总体不平衡度为 11.84%，小于 15%，低于目前要求的配电台区三相总体不平衡度小于 15%的要求，且对比于调整前的 19.91%，取得了明显的调整效果。同时，总体不平衡点分布情况中，处于[15%,50%)的功率样本点数由 1 963 个降低至 781 个，且不平衡度大于 50%的时刻点已完全没用了。该台区 B、C 相平均不平衡度分别为 10.47%和 12.49%，均小于 15%，且处于[15%,1]的功率样本点数相对较少，而 A 相平均不平衡度为 16.97%，大于 15%，而且处于[15%,1]的功率样本点数达到 A 相总有效样本点数的 58.36%。

表 3 负荷调整后三相负荷功率的不平衡计算结果

Table 3 Three-phase load unbalance degree after adjustment

不平衡度		A 相	B 相	C 相	总计
不平衡度区间	[0,15%]	2 547	2 312	2 280	1 964
	[15%,50%)	198	433	465	781
	[50%,1]	0	0	0	0
不平衡度		6.70%	8.26%	8.87%	11.84%
功率/kW		47.85	46.63	47.21	141.70

另外，A、B、C 三相平均不平衡度都有不同程度的降低，分别降低至 6.70%、8.26%和 8.87%，不平衡度大于 15%的时刻点明显减少，而三相总体不平衡度小于 15%的时刻增大至 1 964 个，占总时刻点的百分比由较调整前的 28.27%增大至 71.54%。A 相不平衡度处于[0%,15%]的时刻点由 1 143 个增加至 2 547 个，而处于[15%,50%]的时刻点由 1 602 个降低至 198 个。B 相不平衡度处于[0%,15%]的时刻点由 2 047 个增加至 2 312 个，而处于[15%,50%]的时刻点由 698 个降低至 433 个。C 相不平衡度处于[0%, 15%]的时刻点由 1 811 个增加至 2 280 个，而处于[15%, 50%)的时刻点由 928 个降低至 465 个，且不平衡度大于 50%的时刻已经消除了。具体对比图如图 3 所示。

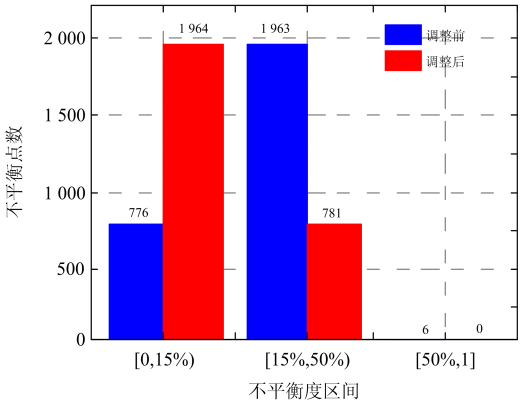


图 3 调整前后周期内各采样点三相总体不平衡度分布图

Fig. 3 Distribution of sampling points of unbalance degree in a cycle before and after adjustment

图 4 所示为调整前后一个周期内各采样时刻点的三相总体不平衡度。可知，通过调整用户接入相别，三相总体负荷不平衡度明显降低了。图 5 为调整前后一个周期内各采样时刻点三相不平衡度分布图。对比图 3，可以看出，调整后 A、B、C 三相瞬时功率大小基本接近相等，台区内三相负荷总体上达到了平衡，只有在按日为单位负荷波动的波峰和波谷处，三相不平衡度稍微偏大。

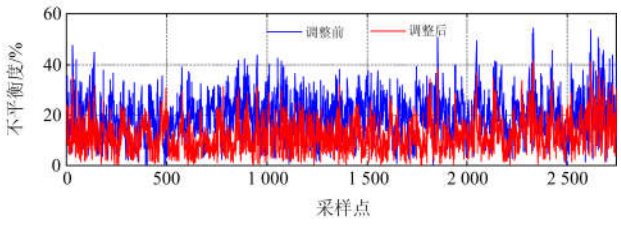


图 4 调整前后周期内各采样点的三相总体不平衡度

Fig. 4 Three phase total unbalance degree in a cycle before and after adjustment

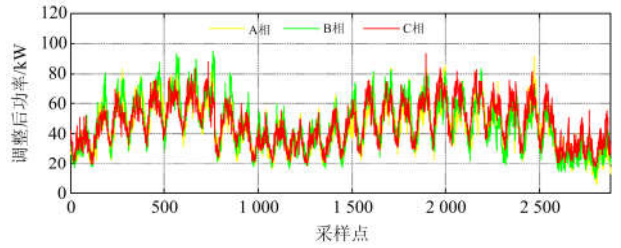


图 5 调整后配电台区一个月内三相负荷功率曲线

Fig. 5 Three-phase power curves in a cycle (one month) after adjustment of distribution area

图 6 所示为采用该调整策略采集到的调整前后两天内的三相功率曲线。可知，通过调整用户接入相别，三相功率曲线重合度增加，经计算得出调整前三相负荷不平衡度为 24.52%，调整后三相负荷不平衡度为 14.01%，小于 15%，所以该调整方法可以明显地降低三相负荷的不平衡度。

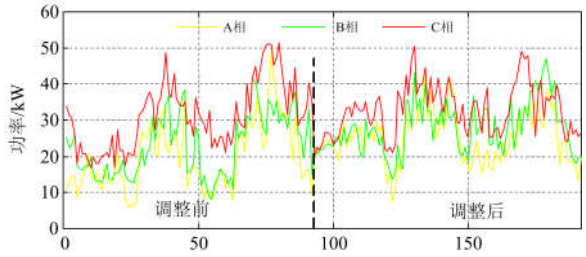


图 6 调整前后各采样点实测功率数据

Fig. 6 Measured power data before and after adjustment

5 考虑销户、新用户接入情况下的用户调整

在实际的配网系统中，必然会存在台区用户销户和新用户接入的情况。发现这类情况时，对于销户用户，可以将销户的用电数据纳入模型计算中；对于新接入用户，可以通过对接入用户的性质进行分析(只针对单相用户，因为对于三相用户而言，可以通过用电稽查、用电管理的手段使三相用户内部调整接线来达到三相用户的三相负荷平衡)，并对新接入用户的月度用电量进行估计。

假设销户用电量为 Q_{del}，新接入用户的估计用电量为 Q_{new}。仍然以前文所述为例，假定 A 相不平衡度最大，且 A 相负荷处于偏小状态。则：

(1) 情况 1

若销户的用户挂接在 A 相，则根据公式(28)计算得到修正后的 A 相调整量 $\Delta Q_{\mathrm{correct}}$ 为

$$\Delta Q_{\mathrm{correct}}=\Delta Q_{\mathrm{A}}=\Delta P\cdot\frac{Q_{\mathrm{Total}}}{\overline{P}_{\mathrm{Total}}}+Q_{\mathrm{del}} \tag{48}$$

而在又同时存在新用户接入时，可以选择将新用户接入 A、B 或 C 相中的任一相。

若接入 A 相，则根据式(28)计算得到 A 相调整量 $\Delta Q_{\mathrm{correct}}$ 为

$$\Delta Q_{\mathrm{correct}}=\Delta Q_{\mathrm{A}}=\Delta P\cdot\frac{Q_{\mathrm{Total}}}{\overline{P}_{\mathrm{Total}}}+Q_{\mathrm{del}}-Q_{\mathrm{new}} \tag{49}$$

若接入 B 相，则根据式(29)计算得到修正后的 B 相调整量 $\Delta Q_{\mathrm{B_correct}}$ 为

$$\Delta Q_{\mathrm{B_correct}}=-\frac{\overline{P}_{\mathrm{C}}}{\overline{P}_{\mathrm{B}}+\overline{P}_{\mathrm{C}}}\times\Delta Q_{\mathrm{A}}-Q_{\mathrm{new}} \tag{50}$$

若接入 C 相，则根据公式(30)计算得到修正后的 C 相调整量 $\Delta Q_{\mathrm{C_correct}}$ 为

$$\Delta Q_{\mathrm{C_correct}}=-\frac{\overline{P}_{\mathrm{B}}}{\overline{P}_{\mathrm{B}}+\overline{P}_{\mathrm{C}}}\times\Delta Q_{\mathrm{A}}-Q_{\mathrm{new}} \tag{51}$$

通常地，考虑到台区员工工作量，新接入用户一般地都是接入负荷偏下的相别。若出现新接入的用户用电量较大，在接入负荷较小相后可能出现负荷较小，式(49)仍成立，此时 $\Delta Q_{\mathrm{correct}}$ 为负值，表示在接入新用户后，需要将 A 相原有用户转接部分至 B 或 C 相。

(2) 情况 2

若销户用户挂接在 B 相时，则根据公式(29)计算得到修正后的 B 相调整量 $\Delta Q_{\mathrm{B_correct}}$ 为

$$\Delta Q_{\mathrm{B_correct}}=-\frac{\overline{P}_{\mathrm{C}}}{\overline{P}_{\mathrm{B}}+\overline{P}_{\mathrm{C}}}\times\Delta Q_{\mathrm{A}}+Q_{\mathrm{del}} \tag{52}$$

若 $\Delta Q_{\mathrm{B_correct}}$ 大于零，表示销户后 B 相负荷小于单相平均负荷值，B 相需要从其他相转接入；若 $\Delta Q_{\mathrm{B_correct}}$ 小于零，表示即使有销户情况，B 相上仍需调整用户出去，以达到三相负荷平衡。对于销户用户挂接在 C 相上的情况分析也类似。而对于新接入用户，首先仍考虑接入负荷较低的相别，公式修正与情况 1 相同。

综上，本文提出的基于配电台区历史各功率数据和台区用户用电量信息的不平衡负荷调整方法，可以为调整用户接入相别选择提供指导，能明显地降低台区负荷三相不平衡度。另外，在后期还可以建立台区用电信息数据库，并加强气象条件、经济

因素等对用户用电行为影响的大数据分析，为更好地指导配电台区三相不平衡负荷调整决策提供更加丰富有效的指导意见。

6 结论

1) 我国配电台区三相负荷不平衡问题一直存在，尤其是在农网配电台区中三相负荷不平衡问题尤其严重。针对目前广泛采用的人工在线检测三相负荷电流来确定调整用户的方法存在的一系列问题，本文提出了一种基于台区历史功率数据和用电量信息的台区三相不平衡负荷调整方法，建立了一个不平衡负荷调整的数学模型，并对存在销户和新用户接入情况下的负荷调整模型进行了修正。

2) 通过对历史功率样本数据进行测试得出，采样该模型进行台区负荷调整后该台区的三相总体不平衡度显著降低，且能够满足目前国家电网标准要求的配电网台区三相不平衡度低于 15%的规定。

参考文献

[1] 马纪, 刘希喆. 基于序关系-熵权法的低压配网台区健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 88-93.
MA Ji, LIU Xizhe. Evaluation of health status of low-voltage distribution network based on order relation-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 88-93.

[2] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.

[3] 傅军栋, 喻勇, 黄来福. 不平衡负载的一种更加经济的补偿方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 126-131.
FU Jundong, YU Yong, HUANG Laifu. A more economical compensation method for unbalanced load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 126-131.

[4] 余乐, 张茜, 刘燕, 等. 含分布式电源的配电网无功补偿分区平衡优化调节方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 58-64.
YU Le, ZHANG Xi, LIU Yan, et al. An adjustment method of distribution network reactive power compensation partition balance with distributed power sources[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 58-64.

[5] 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.
WANG 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.

[6] 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.

[7] 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): 91-95.
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): 91-95.

[8] 应丽云, 刘敏, 邓磊, 等. 配电网降损综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 162-168.
YING Liyun, LIU Min, DENG Lei, et al. A comprehensive review of the loss reduction in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 162-168.

[9] PIYUSH L, MAHESH K M, KOTTAISAMY K, et al. A minimally switched control algorithm for three-phase four-leg VSI topology to compensate unbalanced and nonlinear load[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 1935-1944.

[10] 应丽云, 欧家祥, 王俊融, 等. 配电台区的三相负荷不平衡治理技术[J]. 贵州电力技术, 2017, 20(6): 16-18.
YING Liyun, OU Jiaxiang, WANG Junrong, et al. Three phase load unbalance control technique in radio distribution station[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2017, 20(6): 16-18.

[11] 喻勇. 三相不平衡综合治理措施及智能换相 GUI 系统研究[D]. 上海: 华东交通大学, 2015.
YU Yong. Unbalanced three-phase comprehensive treatment measures and research on intelligent commutation GUI system[D]. Shanghai: East China Jiaotong University, 2015.

[12] SITI M W, NICOLAE D V, JIMOH A A, et al. Reconfiguration and load balancing in the LV and MV distribution networks for optimal performance[J]. IEEE

Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2534-2540.

[13] 张欢. 基于用户分类的低压配网三相平衡化降损研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
ZHANG Huan. Research of three-phase balance loss reduction of low voltage distribution networks based on users classified[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013.

[14] 中国电机工程学会信息化专委会. 中国电力大数据发展白皮书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[15] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 503-511.
PENG Xiaosheng, DENG Diyuan, CHENG Shijie, et al. Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 503-511.

[16] 刘科研, 何开元, 盛万兴. 基于协同粒子群优化算法的配电网三相不平衡状态估计[J]. 电网技术, 2007, 35(7): 24-27.
LIU Keyan, HE Kaiyuan, SHENG Wanxing. A cooperative particle swarm optimization based state estimation of unbalanced three-phase distribution network[J]. Power System Technology, 2007, 35(7): 24-27.

[17] ZHENG Y J, LING H F, XUE J Y, et al. Population classification in fire evacuation: a multiobjective particle swarm optimization approach[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2014, 18(1): 70-81.

[18] 电能质量—三相电压不平衡: GB-T 15543—2008[S]. 2009.
Power quality—three-phase voltage unbalance: GB-T 15543—2008[S]. 2009.

[19] 任远, 霍成军, 张韦维, 等. 基于大数据的配变三相不平衡分析与负荷调整综合研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(11): 166-169.
REN Yuan, HUO Chengjun, ZHANG Weiwei, et al. Integrated research of three phase unbalance analysis and load adjustment based on large data[J]. Automation & Instrumentation, 2016(11): 166-169.

[20] 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): 24-29.
TONG Xiangqian, WANG Haiyan, YIN Jun. Calculation method of three-phase unbalance factor based on load power[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(2): 24-29.

收稿日期：2017-10-27；　修回日期：2018-03-02

作者简介：

郭兆成(1963—)，男，本科，高级工程师，主要研究方向为电力系统配网自动化技术。E-mail: lndl_gzc@126.com

(编辑　魏小丽)