

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191498

# 基于动态规划的配电台区三相负荷不平衡治理方法

唐冬来<sup>1</sup>, 郝建维<sup>1</sup>, 刘荣刚<sup>1</sup>, 马铁丰<sup>2</sup>, 李欢欢<sup>1</sup>, 刘云杰<sup>1</sup>

(1. 四川中电启明星信息技术有限公司, 四川 成都 610041; 2. 西南财经大学统计学院, 四川 成都 610074)

**摘要:** 电力客户用电的不确定性给配电台区三相负荷不平衡治理带来了极大的挑战, 泛在电力物联网是实现从源头治理配电台区三相负荷不平衡的有效技术手段。提出了一种基于负荷动态规划的配电台区三相不平衡治理方法。首先, 通过 HPLC 户相关系识别与户表电压序列变化相关性分析获得准确的户相关系。其次, 利用户表高频次负荷数据, 建立用户负荷特征曲线。最后, 通过对各相位下的单相户表的历史负荷数据进行关联分析, 采用负荷动态规划算法得出户表相位关系调整建议。算例实际应用结果验证了该方法的调整精度优于线路负荷改接法和换相开关装置治理方法。

**关键词:** 配电台区; 时间序列; 动态规划; 三相负荷不平衡

## Control method of three phase load imbalance in a distribution station area based on dynamic programming

TANG Donglai<sup>1</sup>, HAO Jianwei<sup>1</sup>, LIU Ronggang<sup>1</sup>, MA Tiefeng<sup>2</sup>, LI Huanhuan<sup>1</sup>, LIU Yunjie<sup>1</sup>

(1. Aostar Information Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, China;

2. School of Statistics, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu 610074, China)

**Abstract:** The uncertainty of electricity consumption by power customers brings great challenges to the treatment of three-phase load imbalance in distribution station areas. The ubiquitous power internet of things is an effective technical means to control three-phase load imbalance from the source. A three-phase imbalance control method based on dynamic load programming is proposed. First, the accurate watt-hour meter-phase correlation is obtained by identifying the watt-hour meter-phase correlation by HPLC and comparing the changing trend of the watt-hour meter voltage sequence. Secondly, the curve of the user load characteristic is established using the high frequency load data of a watt-hour meter. Finally, the historical load data of single-phase users are correlated and analyzed, and the load dynamic programming algorithm is used to get a suggestion for adjustment of the watt-hour meter-phase relationship of the household meter. The practical application results of examples show that the adjustment accuracy of this method is better than that of the power distribution line load switching method and the three-phase imbalance phase-changing switch managing method.

This work is supported by Science and Technology Planning Program of Sichuan Province (No. 2016GZ0143).

**Key words:** distribution station area; time series; dynamic programming; three-phase load imbalance

## 0 引言

在农村及城乡结合区域, 因低压用户接线随意性大、单相用户负载容量增长不可控、低压单相负载运行随机性高、负荷季节性变化大<sup>[1-2]</sup>等原因, 造成了配电台区三相负荷不平衡。配电台区三相负荷不平衡将会对配电网的供电安全、供电质量和经济运行产生不良影响, 是配电网薄弱环节中亟待解决

的问题之一<sup>[3]</sup>。泛在电力物联网可实现户表相位关系识别、户表负荷数据采集等应用, 是配电台区三相负荷不平衡治理的有效技术手段<sup>[4]</sup>。

配电台区三相负荷的不平衡度易受单相电力客户负载不同和用电时序不同所影响<sup>[5-6]</sup>, 电力客户用电的不确定性给配电台区三相负荷不平衡治理带来了极大的挑战。目前较为成熟的配电台区三相负荷不平衡治理技术有换相开关型、电容型和电力电子型三种。换相开关型装置由一个智能换相终端和若干个换相开关单元组成。当一定监测周期内配变低

压侧三相负荷不平衡度超限, 智能终端分析计算后, 控制各换相开关单元按照规定换相流程执行换相操作, 实现配电台区三相负荷均衡分配<sup>[7]</sup>。电容型装置是在相线间跨接电力电容器, 实现有功功率转移, 平衡相间的有功功率<sup>[8]</sup>。电力电子型装置通过快速检测出接入处无功、负序、谐波电流, 根据空间矢量脉宽调制(SVPWM)控制方法产生触发脉冲信号驱动控制晶闸管输出与检测到的无功、负序、谐波电流大小相等、方向相反的补偿电流<sup>[9]</sup>。采用装置是治理三相负荷不平衡的一种有效方式, 但仍然存在一定的局限性。首先, 换相开关型装置在切换时, 造成载波通信中断, 户表采集成功率降低<sup>[10]</sup>; 其次, 电容型装置在功率因数大约 0.85 时, 调节作用甚微<sup>[11]</sup>; 另外, 使用装置治理配电台区三相负荷不平衡成本高、设备可靠性不佳、运维难度大、补偿适用范围小<sup>[12]</sup>, 使用需求响应策略对三相负荷不平衡调节作用甚微<sup>[13]</sup>, 不能从源头上解决实际负荷分配问题。

基于上述背景, 本文提出适用泛在电力物联网, 基于负荷动态规划的配电台区三相不平衡治理分析方法, 首先, 通过总表与户表电压时间分布序列的相似程度对泛在电力物联网中高速载波(HPLC)模块识别的户表关系进行校验, 其次, 通过回归方程, 对高速载波模块采集失败的户表缺失电流值进行预测补录, 形成准确的 96 点用户负荷曲线, 再次, 通过动态规划配电台区三相负荷不平衡治理算法分析用户负荷变化情况与相位之间的关联关系, 并计算出配电台区用户相位关系调整清单, 以支撑台区经理在表箱侧进行户表相位关系改接, 从而实现配电台区三相负荷不平衡治理的目的, 最后通过算例以及实际应用结果对所提技术方案进行验证。

## 1 户表相位识别与校验

随着泛在电力物联网技术的迅速发展, 高速载波(HPLC)技术逐步应用于低压户表的数据采集, 低压户表的电流、电压、功率因数等各项电气状态数据得以实时回传, 这为配电台区三相负荷不平衡分析提供了可能<sup>[14-16]</sup>。获取准确的户表相位关系分相位识别与相位校验两部分, 首先通过户表的 HPLC 模块进行相位识别, 在此识别过程中, 因“共用零线”配电台区相位识别信号串扰<sup>[17]</sup>, 造成识别信号串扰。本方法在 HPLC 户变相位识别的基础上, 对配电台区总表、户表的电压序列的相关性进行比对, 以校验户表关系的准确性。

### 1.1 户表相位识别

我国的工频三相电力供电系统, 三相的相位差

是  $120^\circ$ ; 在时间上三相交流电信号的正向过零点(或反向过零点)相差  $6.67\text{ ms}$ <sup>[18-19]</sup>, 如图 1 所示。目前, 可通过用采集器向户表发送相位识别命令的方式来实现户表相位关系识别<sup>[20]</sup>。首先, 用采集器与户表进行广播对时, 确保两者的时间一致; 其次, 用采集器发送相位识别帧信号, 信号中携带相位信息、帧发送时刻和过零时刻的时间差信息; 再次, 户表在接收到相位识别帧时, 首先计算帧同步时刻与过零时刻的时间差, 再使用此时间差和帧信息中的时间差计算出本地过零时刻与对应相过零时刻的时间差, 通过时间差值可判别本地所在相位, 并将相位信息存储在户表中。最后, 户表将所属相位信息发送给用采集器。

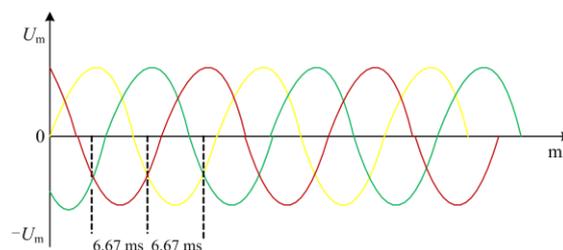


图 1 三相电力供电系统相位差示意图

Fig. 1 Schematic diagram of phase difference in three-phase power supply system

由于节约配网投资的原因, 我国存在大量的“共用零线”台区, 用采集器的识别信号将出现串扰, 导致户表相位识别成功率低, 需采总表与户表电压序列变化相关性进行精确校验。

### 1.2 户表电压序列变化相关性校验

配电变压器低压侧各相的瞬时电压波动将影响该相下低压户表的电压<sup>[21]</sup>。从理论上讲, 户表的电压波动趋势将和配电变压器低压侧该相电压波动趋势成正相关的关系<sup>[22-23]</sup>。正相关情况下, 户表电压变量随着总表电压变量发生相同方向的变化, 即两个变量同时变大或者变小。在户表关系校验中, 自变量是变压器低压侧的相电压, 因变量是该相下户表的电压, 为准确地校验该户表所在台区的相位, 可采用周期内总表电压的波动曲线和对应时间段内用户电压的波动曲线之间的相关性或相似性来校验。

通过相关系数来判断总、户表之间的电压时间曲线相关强弱程度, 涉及到的相关系数方法包括: 皮尔逊相关系数(Pearson Correlation Coefficient), 斯皮尔曼等级相关系数(Spearman Correlation Coefficient), 肯德尔秩相关系数(Kendall Correlation Coefficient)等, 相关系数取值范围为 $[-1, 1]$ 。相关系

数越接近 1，正相关性越高。另外，总、户表之间的电压时间曲线相似性以及相似程度也可以用各种距离刻画，包括：欧拉距离(Euclidean Distance)、余弦距离(Cosine Distance)、汉明距离(Hamming Distance)等，距离值越小，相似度越高。

因配电台区的户表未冻结同一时间点的负荷数据，用采集器采用轮询的方法采集户表负荷数据，造成了各电表之间的采集时间点不一致，即总表的电压曲线与户表的电压曲线在时间轴上出现偏移，在这种情况下，如果直接使用相关系数或者距离衡量用户电压曲线和变压器低压侧电压曲线之间的关系，计算结果会出现较大误差。

本文采用了动态时间规整(Dynamic Time Warping)算法在时间轴上压缩或者拉伸总、户表电压曲线，从而使曲线之间的形态趋于一致，以获得最大的相似度，本方法采用动态时间规整与皮尔逊相关系数结合的方法对总表与户表电压时间分布序列的相似程度进行校验，从而有效地弥补了户表未冻结同一时间点的负荷数据带来的负荷曲线时间轴偏移影响。

设总表的电压时间序列集合为  $x, x_1, \dots, x_n$  表示一个时间段内总表各采集点的电压值；户表的电压时间序列为  $y, y_1, \dots, y_n$  表示一个时间段内户表各采集点的电压值。

$$x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \quad (1)$$

$$y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_n] \quad (2)$$

总表与户表电压时间序列曲线的皮尔逊相关系数计算如下。

$$\text{Corr}(x, y) = \frac{\text{Covariance}(x, y)}{\text{StandardDeviation}(x)\text{StandardDeviation}(y)} \quad (3)$$

式中：

$$\begin{cases} \text{Covariance}(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \\ \text{StandardDeviation}(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ \text{StandardDeviation}(y) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (5)$$

在时间段内的两个时间序列/曲线分别为

$$x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_m] \quad (6)$$

$$y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_m] \quad (7)$$

通过在时间轴上缩放寻找两条曲线之间的最佳匹配，构造距离矩阵：

$$d = \begin{bmatrix} d_{1n} & \dots & d_{mn} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{11} & \dots & d_{m1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum (x_i - y_j)^2} \quad (9)$$

动态时间规整可以归结为寻找一条通过上述距离矩阵中若干格点的路径，路径通过的格点即为两个序列进行计算的对齐的点。动态路径  $D$  定义为

$$D = D_1, D_2, D_3, \dots, D_k \quad (10)$$

$$\max(m, n) \leq k \leq m + n - 1$$

$D_k$  取值距离矩阵中的元素。

规整路径需满足以下条件：

(a) 边界限制

$$D_1 = d_{11}; D_k = d_{mn} \quad (11)$$

(b) 连续性和单调性限制

假如  $D_{n-1} = d_i$ ，那么对于规整路径中的下一个点  $D_n$  取值  $[d_{i+1}, j; d_{i,j+1}; d_{i+1}, j+1]$  其中之一。在路径规整中不允许跨过某个点去匹配，只能和自己相邻的点匹配，并且在时间轴上单调。

满足以上条件的规整路径有多种，其中最佳规整路径满足以下条件：

$$DTW(x, y) = \min\left(\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k D_k}\right) \quad (12)$$

这样找到总表与户表两个时间序列之间的最佳匹配，即通过对时间轴的局部拉伸或者压缩，使曲线在形状上尽可能的一致。然后计算皮尔逊相关系数，总表与户表电压时间分布序列的相似程度大于 90% 的曲线组，即可判定属于同一相位判定为在该相位下，反之，则为其他相位或台区的户表。

总表与户表的两个电压时间序列的最佳匹配路径和最佳匹配位置对应关系，如图 2 和图 3 所示。本文构造了按时间波动的电压曲线，电压波动范围为 210~235 V，并截取了时长为一天 96 点的不同时段的两段曲线：图 2(a)与图 2(b)验证动态时间规整算法。图 2(c)中由格点组成的路径即为规整之后，图 2(a)、图 2(b)两条曲线在相应格点对齐的时间点。图 3(c)以更加直观的方式展现了规整之后两条曲线在时间轴上的对应关系。图 3(a)为截取的两段电压曲线的对比，图 3(b)展示了两条曲线经过规整之后的对比。可以看出时间轴有一定的拉伸，规整之后两条曲线比规整之前在时间轴上有更好的匹配，形状趋于一致。

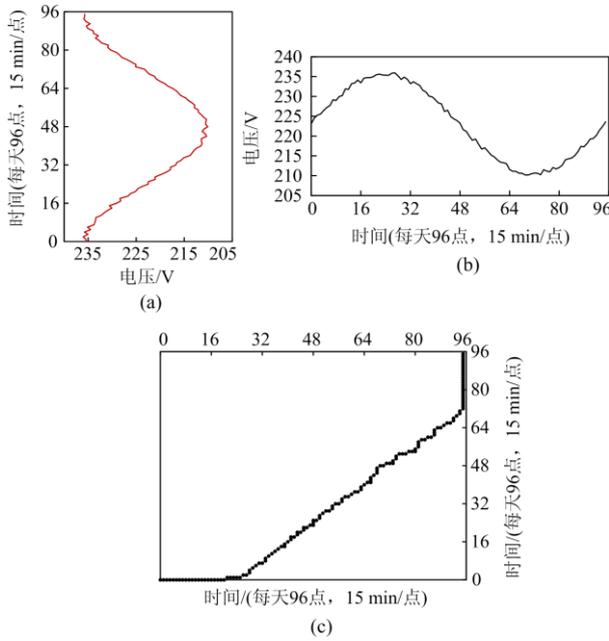


图2 总表与户表时间序列的最佳匹配路径

Fig. 2 The best matching path of time series between master table and household table

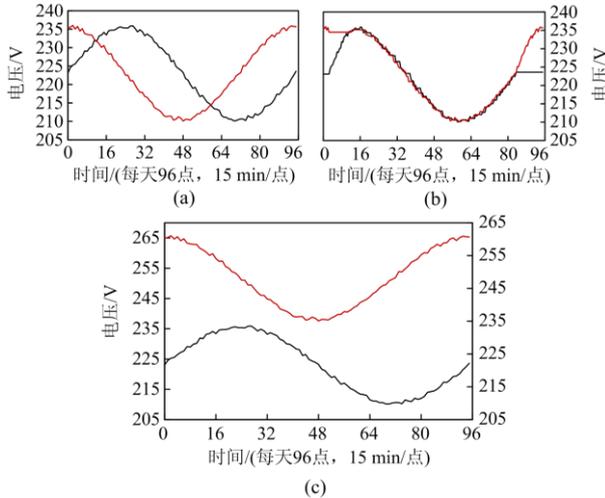


图3 总表与户表时间序列的最佳匹配位置对应关系

Fig. 3 The best matching position correspondence between total table and household table time series

## 2 配电台区负荷数据采集

基于泛在电力物联网高速载波(HPLC)技术,采集配电台区的负荷数据<sup>[24]</sup>,配电台区的负荷数据分配变低压侧的总表三相负荷数据与用户智能电表的负荷数据两种<sup>[25-26]</sup>。

首先,进行配电台区计量装置改造,在配电台区内,将用采集器与用户智能电表的窄带载波通信模块更换为正交频分复用(OFDM)的高速载波

HPLC 模块,频段为 0.781~2.930 MHz,通讯速度最高达 6 Mbps,使其具备每天采集用户电表 96 点的负荷数据;其次,用采集器采用 485 接口读取配电台区总表每天 96 点的电流数据,再次,通过主站向用采集器下发每天 96 点用户电表电流读取指令。用采集器通过 HPLC 模块轮询的方式,实现对用户电表的电流数据的采集、汇总及上传主站。最后,对户表采集的缺失数据项进行补正。

由于部分配电台区电表数量多,采集成功率低的情况下,异常的数据主要包括有较多为 0、缺失值、出现负值以及数据类型错误等情况。对于此类用户电表的电流数据,采用回归方程,对缺失的值进行预测补录。

设开始时间点的数据值为  $x$ , 结束时间点的数据值为  $y$ , 之间的缺失断点为  $a$ , 首先采用离差的平方和计算回归直线,再在所有直线中选取最小值,从而获得回归方程式的回归系数  $b$ , 如式(13)所示。

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \quad (13)$$

根据回归系数  $b$ , 计算出缺失点数据值  $a$ 。

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (14)$$

通过对缺失的值进行回归方程预测补录,最终获得完整的配电台区户表负荷数据。

## 3 配电台区三相负荷不平衡治理算法

基于动态规划的配电台区三相负荷不平衡治理算法是以数月的用户负荷日曲线为基础<sup>[27]</sup>,分析户表相位最优组合关系以达到配电台区侧的三相负荷不平衡度最小,并将户表最优相位组合关系与电表当前相位关系进行比较,得出户表相位关系调整建议,以指导台区经理在现场进行户表相位关系改接。在配电台区内,因户表相位最优组合关系涉及到用户负荷信息较多,算法复杂,计算时间较长,因此,需采用三相负荷平衡度全局优化的方式进行计算。

本文所提到动态规划配电台区三相负荷不平衡治理算法以全局最优为目标基础,在笛卡尔乘积的基础上进行扩展,通过负荷动态规划,来实现数据计算量最小。

设配电变压器低压侧的总电流为  $X$ ,  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  表示 A、B、C 三相用户的电流集合, 则

$$X = I_1 U I_2 U I_3 \quad (15)$$

根据笛卡尔乘积求解,三相用户的组合方式为

$$I_1, I_2, I_3 \in \prod_{i=1}^3 I_i \quad (16)$$

设 A 相的用户数为  $m$ , B 相的用户数为  $n$ , C 相的用户数为  $h$ , 用户总数为  $z$ , 则

$$\begin{aligned} x_i \in I_{1i} \quad x: \{1, L, m\} &\rightarrow I_1 \\ y_i \in I_{2i} \quad y: \{1, L, n\} &\rightarrow I_2 \\ h_i \in I_{3i} \quad h: \{1, L, h\} &\rightarrow I_3 \\ z &= m + n + h \\ \bar{I}_i &= \frac{x_i + y_i + h_i}{3} \end{aligned} \quad (17)$$

从每相用户的历史负荷中作最优分析, 得出用户电表相位最优组合关系清单。

$$f = \min \left\{ \sum_{i=1}^z \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{I}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{I}_i)^2 + \sum_{i=1}^h (h_i - \bar{I}_i)^2}{z}} \right\} \quad (18)$$

由于笛卡尔乘积算法的计算量非常大, 例如 200 个用户的配电台区, 算例的组合次数为  $3^{200}$  次, 为减少计算次数, 算例可优化为动态规划算法, 将配电台区每相中的负荷较小的部分用户作为初始状态, 不参与调整, 负荷较大的部分用户参与动态调整, 从而减少调整数量。

设配电台区有  $n$  个用户, 每个用户电表的电流为  $I_{ai}$ , 每个用户对配电台区三相负荷影响度为  $I_{pi}$ , 用三个不平衡最大影响度的  $I_{a_{max}}$  的背包, 用一个数组  $f[i, v]$  表示取  $i$  个用户填充一个相位下不平衡度为  $I_p$  的背包的最大电流, 方程求解  $f[n, I_{a_{max}}]$ , 最佳调整算法为

$$f[i, v] = \begin{cases} f(i-1, v), v < I_{ai} \\ \max \{ f[i-1, v], f(i-1, v - I_{ai}) + I_{pi} \}, v \geq I_{ai} \\ 0, iv = 0 \end{cases} \quad (19)$$

其中:  $I_{a_{max}}$  表示时间  $t$  为  $\frac{1}{3} \sum_{i=1}^n I_{ai}$ 、 $I_{ai}$  各用户  $t$  时刻的电流。

基于负荷动态规划的配电台区三相负荷不平衡调整, 以全局优化目标值, 该策略可以采用方法 1 整体不平衡度最优或方法 2 用户电表相位关系调整量最优两种方式, 其中方法 1 整体不平衡度最优为配电台区低压侧的三相负荷不平衡度最小, 但可能用户电表相位关系调整量较大; 采用方法 2 电表相位关系调整量最优, 则在保证配电台区三相负荷不平衡度在一定范围内, 调整用户数量最少。

综上所述, 基于负荷动态规划的配电台区三相负荷不平衡调整的用户相位调整计算过程可以概述如下, 流程见图 4。

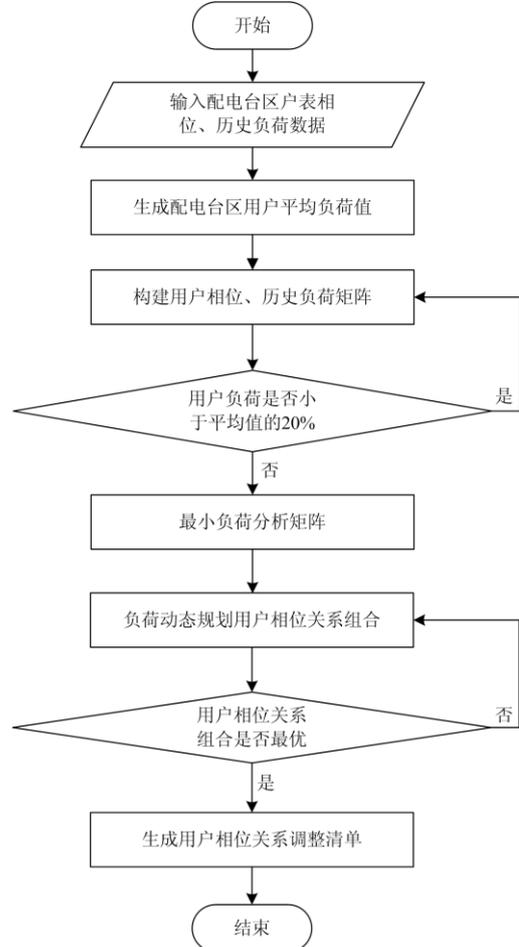


图 4 负荷动态规划配电台区三相负荷不平衡调整流程图  
Fig. 4 Flow chart of three-phase load unbalance adjustment in distribution station area based on load dynamic programming

步骤 1: 根据三相电表、单相电表的历史负荷数据, 生成配电台区的平均负荷值, 以此平均值的 20% 作为调整数量基准, 低于基准值的用户负荷不参与计算, 仅针对高于基准值的用户负荷计算, 避免配电台区内所有的户表都参与模型计算, 造成计算周期过长。

步骤 2: 根据配电台区用户的相位、总表、三相电表、单相电表的数据建立用户相位、负荷分析关联分析矩阵, 可利用笛卡尔乘积求解, 算出各用户组合排列的方式。

$$\begin{cases} x: \{1, L, m\} \rightarrow I_1 \\ y: \{1, L, n\} \rightarrow I_2 \\ z: \{1, L, h\} \rightarrow I_3 \end{cases} \quad (20)$$

步骤 3: 筛选用户相位、负荷关联矩阵中的小于平均负荷 20% 的用户电表, 筛选完成后跳转到步骤 4, 否则继续进行步骤 2。

步骤 4: 建立用户电表负荷大于户表平均负荷 20% 的用户的用户相位、负荷关联矩阵, 从而减少全量计算对计算性能的影响。

步骤 5: 采用负荷动态规划算法, 对  $n$  个用户, 电流为  $V_i$ , 三相负荷影响度为  $P_i$ , 求解三相用户最佳组合方式  $f[n, V_{\max}]$ , 此步骤可设置为整体不平衡度或调整量优先两种方式。

步骤 6: 重复步骤 5, 直至迭代过程中, 用户相位组合关系是否为最优。

步骤 7: 将配电站区最优用户相位组合与原用户相位关系进行比较, 生成户表相位关系调整建议清单。

#### 4 算例分析

为验证基于负荷动态规划的配电站区三相不平衡治理策略的有效性, 在四川某县城选取了接线方式为 Yyn0 的三相负荷不平衡的配电站区进行治理。通过泛在电力物联网 HPLC 技术, 对配电站区低压侧按 15 min 采集一个数据点, 形成了全天 96 点的三相电流曲线, 如图 5 所示。该配电站区三相负荷不平衡时长达 24 h, 最大三相负荷不平衡达 82.43%, 如表 1 所示, 远大于电网公司标准中的配电站区不平衡度小于 15%, 每天不超过 1 h 的标准。

利用泛在电力物联网的 HPLC 技术识别户相关系后, 采用户表与总表电压序列变化相似度比较进行校验, 相似度大于 90%, 即可判断为在该相下, 如表 2 所示; 由此可得该配电站区的用户电表相位关系, 如表 3 所示, 同时, 采集配电站区总表、户表的历史负荷数据数据, 以具备配电站区三相负荷治理分析基础条件。

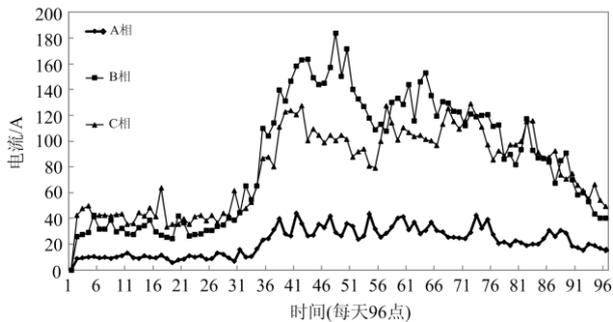


图 5 治理前的某台区低压侧三相电流日变化曲线图

Fig. 5 Diurnal variation curve of three-phase current at low voltage side of a station before treatment

表 1 治理前的某台区三相负荷不平衡度统计

Table 1 Statistics of unbalanced degree of three-phase load in a station before treatment

时间	A 相电流/A	B 相电流/A	C 相电流/A	不平衡度
0:00	8.683	24.346	44.113	80.32%
2:00	9.479	25.293	38.345	75.28%
4:00	11.527	25.029	65.611	82.43%
6:00	8.318	26.96	41.92	80.16%
8:00	10.397	51.099	56.074	81.46%
10:00	44.041	121.12	157.513	72.04%
12:00	26.321	121.629	133.402	80.27%
14:00	28.334	79.631	155.129	81.74%
16:00	36.92	87.722	147.862	75.03%
18:00	42.545	93.722	144.858	70.63%
20:00	21.139	78.843	114.524	81.54%
22:00	28.563	85.484	75.474	66.59%
23:45	15.488	37.936	51.244	69.78%

表 2 某台区户表与总表电压序列相似度关系表

Table 2 Table of voltage sequence similarity between household table and total table in a certain station area

用户名	总表 A 相	总表 B 相	总表 C 相
张*亮	93.11%	72.75%	78.37%
黄*飞	92.16%	73.62%	76.38%
李*江	94.12%	79.53%	72.74%
王*图	91.62%	71.43%	66.73%
谭*香	92.36%	76.52%	77.42%
黄*江	97.68%	78.38%	69.59%
N	N	N	N
古*宁	73.37%	91.37%	78.51%
*惠	74.52%	92.86%	76.42%
祖*云	77.69%	90.57%	63.91%
郑*生	69.32%	93.68%	78.42%
蒋*冬	77.52%	96.15%	65.58%
*余	68.43%	93.08%	67.72%
N	N	N	N
黄*波	75.42%	66.54%	96.33%
张*林	69.77%	72.58%	94.52%
李*双	70.43%	75.63%	91.68%
王*梅	63.92%	77.82%	92.43%
王*杰	70.59%	65.19%	91.36%
李*峰	79.25%	68.12%	90.59%

表 3 治理前的某台区用户相位关系表

Table 3 User phase relation table of a station before governance

用户名	相位	用户名	相位	用户名	相位
张*亮	A	古*宁	B	黄*波	C
黄*飞	A	*惠	B	张*林	C
李*江	A	祖*云	B	李*双	C
N	N	N	N	N	N
王*图	A	郑*生	B	王*梅	C
谭*香	A	蒋*冬	B	王*杰	C
黄*江	A	*余	B	李*峰	C

利用本文的基于负荷动态规划的配电台区三相不平衡治理算法，按照方法 1 整体不平衡度最优或方法 2 用户电表相位关系调整量最优两种方式的计算结果进行比较，两种方法均满足电网公司配电台区三相负荷不平衡标准要求，如表 4 所示。

表 4 方法对比结果表

Table 4 Methods comparison table

方法	调整用户数量	最大不平衡度	最小不平衡度
1	46	7.53%	3.85%
2	15	9.69%	7.04%

方法 1 考虑了配电台区三相负荷尽可能平衡，但调整的用户较多，台区经理调整用户电表相关关系工作量大；方法 2 考虑了调整数量最少，在不平衡度方面略有增加，台区经理调整用户电表相关关系工作量较小。因台区经理往往管理数十个台区，工作量较大，因此按方法 2 对现场进行户表相位关系调整，调整建议清单如表 5 所示。

表 5 户表相位关系调整建议清单

Table 5 List of suggestions for adjustment of household table phase relationship

序号	用户名	原相位	建议调整相位
1	张*亮	A 相	B 相
2	李*江	A 相	C 相
3	黄*江	A 相	C 相
4	*惠	B 相	A 相
5	祖*云	B 相	C 相
N	N	N	N
13	张*林	C 相	B 相
14	李*双	C 相	A 相
15	王*杰	C 相	A 相

在表箱侧，台区经理按照用户相位关系调整建议进行户表相位关系改接后，该配电台区的全天 96 点的三相电流曲线，如图 6 所示。该配电台区的三相负荷不平衡度如表 6 所示。

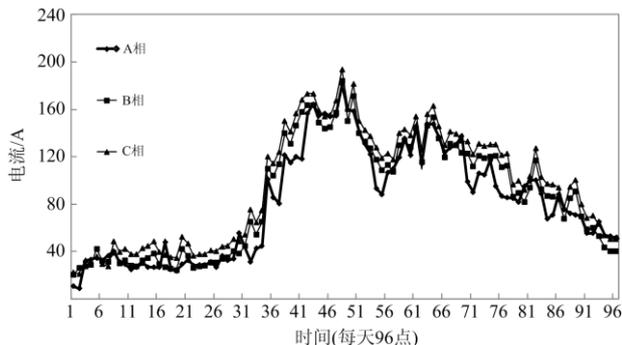


图 6 治理后的某台区低压侧三相电流日变化曲线图

Fig. 6 Diurnal variation curve of three-phase current at low voltage side of a station after treatment

表 6 治理后的某台区三相负荷不平衡度统计

Table 6 Statistics of unbalanced degree of three-phase load in a station after treatment

时间	A 相电流/A	B 相电流/A	C 相电流/A	不平衡度
0:00	20.61	20.52	22.17	7.44%
2:00	31.07	29.85	32.85	9.13%
4:00	37.68	34.88	36.88	7.43%
6:00	32.47	30.48	29.48	9.20%
8:00	95.75	104.03	106.03	9.69%
10:00	152.02	158.06	168.06	9.55%
12:00	158.40	160.40	170.40	7.04%
14:00	109.88	107.56	117.56	8.51%
16:00	136.51	135.38	145.38	6.88%
18:00	114.68	118.96	125.96	8.96%
20:00	95.11	85.91	91.91	9.68%
22:00	81.87	90.50	85.50	9.53%
23:45	51.04	46.11	50.11	9.67%

由表 6 中统计情况可得知，在 1 天的 24 h 中，执行方案 2 调整量最优，调整用户数量为 15 户，配电台区最大相的三相负荷不平衡率为 9.69%，不仅可满足电网公司的配电台区三相负荷不平衡管理要求，而且大幅降低了台区经理的工作量。

### 5 结论

配电台区三相负荷不平衡治理是配电台区供电安全、供电质量和经济运行管理的关键所在。本文基于泛在电力物联网 HPLC 高频户表负荷采集和户相识别及校验技术，提出了一种基于负荷动态规划的配电台区三相不平衡治理算法，并按配电台区用户电表调整数量最优方法进行了调整及评估，结果表明，基于负荷动态规划的配电台区三相不平衡治理算法改变了台区经理采用线路负荷改接法、换相开关装置治理方法等传统治理方式，能够从源头上彻底解决配电台区三相负荷不平衡的问题。最后，算例的实际应用验证了基于负荷动态规划的配电台区三相不平衡治理算法的有效性。

本文所述的基于负荷动态规划的配电台区三相不平衡治理算法主要针对 0.4 kV 线路三相供电到表箱的配电台区，对于部分单相供电到表箱的配电台区，后续还要对采用低压分支线路与用户电表相结合方式做进一步研究。

### 参考文献

[1] 史贵风, 刘朋, 常帅. 三相负荷不平衡自动调节装置测试研究[J]. 电器与能效管理技术, 2018(19): 58-62.  
SHI Guifeng, LIU Peng, CHANG Shuai. Testing study on three-phase unbalanced load automatic adjusting

- device[J]. *Electric Apparatus and Efficiency Management*, 2018(19): 58-62.
- [2] 刘毅. 配电三相负荷不平衡产生及影响线损的解决措施[J]. *电子测试*, 2018(21): 105-106.  
LIU Yi. Solution for unbalance of power distribution three-phase load and affecting line loss[J]. *Electronic Test*, 2018(21): 105-106.
- [3] 张孝云, 张洪波, 刘鼎立, 等. 换相技术在三相负荷不平衡治理中的应用研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2019, 40(2): 131-135, 159.  
ZHANG Xiaoyun, ZHANG Hongbo, LIU Dingli, et al. Study on the application of phasing rotation technology in three-phase imbalance control[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2019, 40(2): 131-135, 159.
- [4] 王洪勉, 孙慧, 郑利斌, 等. 泛在电力物联网智联单元设计与实现[J]. *供用电*, 2019, 36(6): 5-9.  
WANG Hongmian, SUN Hui, ZHENG Libin, et al. Design and implementation of wisdom unit in the ubiquitous internet of things in electricity[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(6): 5-9.
- [5] 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.
- [6] 马大中, 王雪纯, 王昊, 等. 三相不平衡的单/三相交流直流混合微网能量协同管理策略[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(14): 90-99.  
MA Dazhong, WANG Xuechun, WANG Hao, et al. Energy coordination management strategy for single/three-phase power imbalance in hybrid microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(14): 90-99.
- [7] 曹磊, 王蕊, 胡鹏飞. 低压配电网三相负荷不平衡解决方法研究[J]. *电器与能效管理技术*, 2017(16): 44-51.  
CAO Lei, WANG Rui, HU Pengfei. Research on the solution for three-phase unbalanced load in low voltage distribution network[J]. *Electric Apparatus and Efficiency Management*, 2017(16): 44-51.
- [8] 姚伟, 刘彦彦, 王兵维. 低压线路三相负荷不平衡电容补偿算法及仿真研究[J]. *电子设计工程*, 2017, 25(20): 157-160.  
YAO Wei, LIU Yanyan, WANG Bingwei. Low voltage circuit three-phase unbalanced load capacitance compensation algorithm and simulation research[J]. *Electronic Design Engineering*, 2017, 25(20): 157-160.
- [9] 邓惠华, 李国良, 周晓明, 等. 基于协调控制 SVG 的低压配网三相负荷不平衡治理技术[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(增刊 1): 75-83.  
DENG Huihua, LI Guoliang, ZHOU Xiaoming, et al. The Control technology of three-phase unbalance load in low voltage distribution networks based on coordinated controlled SVGs[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(S1): 75-83.
- [10] 冯勇军, 李明霞. 基于窄带高速双模通信的智能换相开关系统[J]. *制造业自动化*, 2017, 39(11): 154-156.  
FENG Yongjun, LI Mingxia. Intelligent exchange switching system based on narrow-band high-speed dual mode communication[J]. *Manufacturing Automation*, 2017, 39(11): 154-156.
- [11] 李传军, 李旭明. 新型三相不平衡负载逆变器及控制策略研究[J]. *信息技术*, 2019(6): 106-110.  
LI Chuanjun, LI Xuming. Research on new three-phase unbalanced load inverter and its control strategy[J]. *Information Technology*, 2019(6): 106-110.
- [12] 孙曙光, 刘建强, 刘旭林, 等. 基于 SVG+智能电容的混合式无功补偿系统研究与设计[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(1): 128-135.  
SUN Shuguang, LIU Jianqiang, LIU Xulin, et al. Research and design of a hybrid reactive power compensation system based on SVG + intelligent capacitance[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(1): 128-135.
- [13] HUANG Wujing, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(2): 148-150. DOI: 10.1186/s41601-019-0126-4.
- [14] NADERIPOUR A, ABDUL-MALEK Z, RAMACHANDARAMURTHY V K, et al. Hierarchical control strategy for a three-phase 4-wire microgrid under unbalanced and nonlinear load conditions[J]. *ISA Transactions*, 2019, 94: 352-369.
- [15] JIN Wei, LI Yongli, SUN Guangyu. Admittance model for three-phase AC micro-grid with unbalanced load compensated by the multi-functional grid-connected inverter[J]. *Energy Procedia*, 2019(1): 2475-2480.
- [16] ZHAI H F, YANG M, CHEN B. Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2018(12): 1-10.
- [17] 丁锐, 王官涛, 刘海泳, 等. 配电网三相不平衡负荷补偿方案研究[J]. *电网与清洁能源*, 2018, 34(4): 22-28.  
DING Rui, WANG Guantao, LIU Haiyong, et al. Research on three-phase unbalanced load compensation

- scheme of distribution networks[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(4): 22-28.
- [18] 范洁, 熊政, 王黎明, 等. RS485 通信及相位差结合的电能表相位识别方法[J]. 电子设计工程, 2019, 27(19): 69-72, 76.  
FAN Jie, XIONG Zheng, WANG Liming, et al. Phase recognition of watt-hour meter based on RS485 communication and phase difference[J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(19): 69-72, 76.
- [19] 李昂, 刘亚东, 孙鹏, 等. 基于  $\mu$  PMU 相位数据的配电网拓扑识别方法[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 31-36.  
LI Ang, LIU Yadong, SUN Peng, et al. Distribution network topology identification method based on  $\mu$  PMU phase data[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 31-36.
- [20] 郑杰, 赵敬凤, 王海江, 等. 一种基于载波通信的电力相位识别方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(增刊 1): 77-79.  
ZHENG Jie, ZHAO Jingfeng, WANG Haijiang, et al. A method to recognizing phase of power based on carrier communication[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(S1): 77-79.
- [21] 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.
- [22] 喻伟, 李新家, 徐博, 等. 基于电压曲线相似度的电力相位识别技术研究[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(9): 60-63.  
YU Wei, LI Xinjia, XU Bo, et al. Research on the power phase identification technology based on voltage curve similarity[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2019, 48(9): 60-63.
- [23] 张波, 赵永红, 唐亮, 等. 基于 AMI 数据的城市低压配电网拓扑校验方法研究[J]. 电子测量技术, 2019, 6(1): 67-71.  
ZHANG Bo, ZHAO Yonghong, TANG Liang, et al. Research on topology verification of city LV power distribution network based on AMI[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 6(1): 67-71.
- [24] 洪智勇, 林青瑜. 基于电力载波通讯的泛在低压泛在电力物联网共享终端的设计[J]. 电子测试, 2019(18): 28-29.  
HONG Zhiyong, LIN Qingyu. Design of ubiquitous low-voltage ubiquitous power Internet of things sharing terminal based on power carrier communication[J]. Electronic Test, 2019(18): 28-29.
- [25] 黄廷城, 叶琳浩, 张勇军. 基于 AHP-熵权法的配电网用电可靠性综合评估[J]. 广东电力, 2018, 31(1): 44-50.  
HUANG Tingcheng, YE Linhao, ZHANG Yongjun. Comprehensive evaluation on electricity consumption reliability of power distribution network based on AHP-entropy weight method[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(1): 44-50.
- [26] 钱斌, 蔡梓文, 肖勇. 基于边缘计算的电表计量系统数据协同检测方案[J]. 中国电力, 2019, 52(11): 145-152.  
QIAN Bin, CAI Ziwen, XIAO Yong. Data collaborative detection scheme of electric metering system based on edge computing[J]. Electric Power, 2019, 52(11): 145-152.
- [27] 范苏纯, 江浩侠, 曹琪娜, 等. 基于王氏定理的台区三相不平衡补偿与应用[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 111-119.  
FAN Suchun, JIANG Haoxia, CAO Qina, et al. Three-phase unbalanced compensation in transformation region and its application based on Wang's theorem[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 111-119.

收稿日期: 2019-12-03; 修回日期: 2020-01-21

作者简介:

唐冬来(1980—), 男, 通信作者, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为配电网量测、分析和电网信息化咨询等; E-mail: tangdonglai@sgitg.sgcc.com.cn

郝建维(1988—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力市场、电力系统可视化及智能电网等; E-mail: haojianwei@sgitg.sgcc.com.cn

刘荣刚(1974—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电网信息技术信息化咨询、信息化规划等。E-mail: liuronggang@sgitg.sgcc.com.cn

(编辑 周金梅)