

基于智能电能表数据三相不平衡治理的研究与实践

唐伟宁,鞠默欣,孔凡强,于 旭  
(国网吉林省电力有限公司电力科学研究院,吉林 长春 130021)

**摘 要:**国网吉林电力城网和农网有约 11 万公变台区,三相不平衡对电压合格率、线损、变压器负载能力及设备健康水平等指标影响较大,在传统的三相负载不平衡调整方法中,一线员工常常根据运行数据,凭借经验解决现场问题,由于没有科学的调整方法,效果往往不佳。国网吉林电力已经实现智能电能表全覆盖,充分利用智能电能表的非计量数据和相关应用技术,创新提出基于电力线窄带载波同步过零技术,开展低压客户自动相位识别技术研究,实现对客户所在相位的判别,运用贪心算法智能生成三相不平衡治理策略,开发简单易用的智能辅助工具,为一线员工提供解决实际问题的有效技术手段,在保证各项指标的基础上,进一步提高供电可靠性和公司经济效益。

**关键词:**智能电能表;自动相位识别;三相不平衡

**文章编号:**2096-4633(2018)10-0032-06 **中图分类号:**TM93 **文献标志码:**B

由于电力用户接线方式、用电时间、用电负荷特性等不同,导致台区三相不平衡问题的存在,台区三相不平衡会造成低压电网零线损耗大、中性点对地电位高、台区变压器涡流损耗增加、绕组铜耗增加、运行温度升高及设备寿命缩短等不良后果<sup>[1]</sup>,因此三相不平衡度是供电电能质量的重要指标。

在传统的三相负载不平衡调整中,一线员工仅根据运行数据凭借经验解决现场问题,往往效率不高,收效甚微<sup>[2-3]</sup>。随着大数据技术的发展,如何利用用电信息采集系统<sup>[4-5]</sup>,将智能电能表<sup>[6]</sup>中的海量数据<sup>[7-8]</sup>应用于台区三相不平衡治理中,科学指导现场一线人员工作意义重大。

按照国家电网公司的部署,借助更换智能电能表、建设用电信息采集系统契机,开展基于三相不平衡治理研究及实践工作<sup>[9]</sup>,本文针对现场实际问题,通过对客户供电相位自动识别<sup>[10]</sup>,运用贪心算法智能生成三相不平衡治理策略,解决现场三相不平衡治理难度大的问题,为一线员工解决现场实际问题提供有效技术手段。

1 智能表自动相位识别技术

1.1 过零点传输方法

在低压电力线载波通信的过程中,利用低压电网的同一相交流电首尾电压相位严格同步的特点<sup>[11-12]</sup>,在每一个台区下,一个采集终端的每相电压分别和其下所安装所有的电能表的电压均为同一电压。以此为

同步源,设计实现检测同步源电路如图 1。

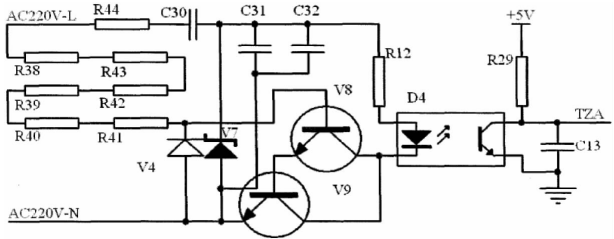


图 1 过零同步方法检测电路图  
Fig. 1 Detection circuit diagram of zero-crossing synchronous method

图 1 中,电路对 220 V、50 Hz 信号进行检测,经过光耦(D4)得到过零同步信号 TZA,TZA 给载波控制芯片提供电力线过零信号,保证载波信号在电力线过零时,得到最利于传输的 3.3 ms 微分时段同步传输,为使数据帧能自动同步,利用外部引入的同步节拍器自动完成帧同步,在交流电正或负过零处产生下降沿,要求在过零后 0~400 us 产生,比单纯使用扩频方式的通信能力和稳定性都有较大提高,即只要供电的交流工频电源不消失,该同步方法就能够使收发两端严格同步,从而彻底的解决了数据帧同步问题。利用过零同步方法,在时域和频域规避了电网相线周期性的低阻抗和高噪声时隙,利用高阻抗和低噪声的过零时隙实现数据的可靠传输通信。

1.2 基于过零同步方法的自动相位识别技术

利用电力线窄带载波过零同步技术,本文创新提出低压客户电能表相位识别功能,其原理是利用

台区内窄带载波电压过零时同步通讯的方式<sup>[13]</sup>,台区集中器在某相电压过零时刻依次与该台区内客户电表通讯,同时刻过零的能够通讯,为同相位客户,从而实现客户相位判别,其过程如图 2 所示。

在图 2 中,各相电压半个周波里均有一个过零点,以各相电压过零点为中心划定 3.3 ms 时段,在半个周波内三相电压各自形成一个通信时段,即 TS1(A 相)、TS2(B 相)和 TS3(C 相)三个时段,以电压过零时间点为时间基准进行通信,台区内载波通信时集中器 TS1(A 相)只能与同步过零的 A 相位智能电表进行通信,其余相位上电能表载波模块均不能与集中器通信,将能同时通讯的智能电表的相位信息记录并报送采集主站,则完成客户智能电表相位数据采集与管理(三相智能电表可从客户信息上区分管理)。

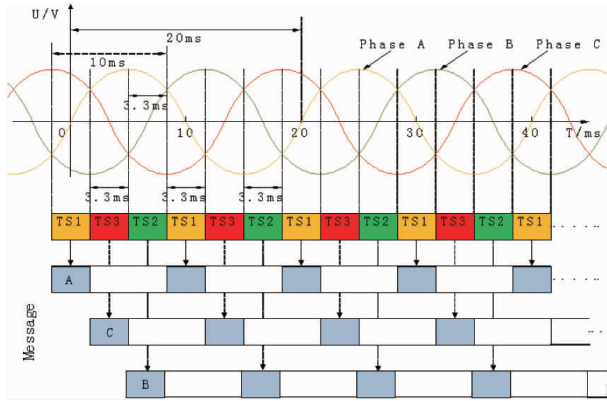


图 2 载波通信原理图

Fig. 2 Principle diagram of carrier communication

## 2 基于贪心算法的三相不平衡调整算法

传统调整方法是根据三相负载及客户情况,主要凭经验判断客户相别的调整方案,对操作人员专业水平要求高,且工作效率低、效果差。经过多种方法的研究和探索<sup>[14-15]</sup>,本文提出了基于贪心算法的三相不平衡调整算法,特点如下:通过寻找局部最优来求得整体最优,算法采用自顶向下迭代的方法进行选择,简化了穷尽所有可能造成的大量计算工作。

基于贪心算法的三相不平衡调整算法的具体流程如下。

### 2.1 设定三相不平衡优化目标

根据实际情况计算给定的三相不平衡度优化目标  $S$ ,通过供用电分析平台获取的每用户月电量的值,可以计算调整前的 A、B、C 每相总电量  $WA$ 、 $WB$ 、

$WC$  分别为:

$$\begin{aligned} WA &= \sum_{i=1}^L Wa(i) \\ WB &= \sum_{i=1}^M Wb(i) \\ WC &= \sum_{i=1}^N Wc(i) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $L$ 、 $M$ 、 $N$  分别为每相用户数量。根据接线方式,所有用户可以分为固定用户和可调用户。其中固定用户的相别无法调整,可调用户的相别可以在 A、B、C 三相中任意调整。根据用户特点,为了保证调整效果和减少调整现场工作量,对用户选择方式进行了优化。用电量过小的用户由于对三相不平衡的影响较小,考虑到降低调整用户相别工作量的需要,在满足不平衡调整目标的前提下不列入调整范围。

利用三相不平衡度计算公式,可以计算台区当前三相不平衡度,如果不平衡度大于目标值,则需进行优化调整,使调整后的三相负荷电量值满足  $\varepsilon \leq S$ 。

### 2.2 计算每相目标值

令  $W0$  为调整前三相电量之和的平均值,设三相电量的总电量优化目标值分别为:

$$\begin{aligned} WA' &= W0 \times (1 - \frac{S}{2} \times K0) \\ WB' &= W0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$WC' = 3W0 - WA' - WB'$$

式中, $K0$  为调整系数, $0 \leq K0 \leq 1$ 。

因此,调整后的三相不平衡度为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_w' &= \frac{WC' - WA'}{WA'} \\ &= \frac{S \times K0}{1 + \frac{S}{2} \times K0} \leq \frac{S}{1 + \frac{S}{2} \times K0} < S \end{aligned} \quad (3)$$

必然满足调整目标的要求,因此可将式(2)和式(3)定义的三相电量作为每一相的总电量优化目标。由于每一相中均可能存在不能进行相别调整的固定用户,因此每一相电量的调整优化目标为该相总电量优化目标减去该相不可调电量。

### 2.3 基于贪心算法的优化调整

以 A 相调整为例,对于给定的 A 相总电量优化调整目标  $WA'$ ,减去 A 相不可调节的用户电量  $WA0$ ,剩余电量  $WI = WA' - WA0$ , $WI$  为利用贪心算法在所有可调用户中进行选择后应实现的目标电量。

利用贪心算法进行用户选择时,首先令调整系

数  $K0 = 1$ 。将所有可调用用户按照电量进行排序,从大到小的顺序进行迭代选择,并与调整优化目标电量  $WI$  进行比较。记第  $k$  次选择后,入选  $A$  相的可调用用户总电量为  $WA(k)$ ,第  $k+1$  次选择的用户电量为  $We(k+1)$ ,如果  $WA(k) + We(k+1) \leq WI$ ,令  $WA(s) = WA(k) + We(k+1)$ ,继续选择用户进行分配。

当  $WA(k) + We(k+1) > WI$  时,判断当前相负荷值和优化目标电量值的距离。

若  $WI - WA(s) \leq WA(k) + We(k+1) - WI$ , $WA(s)$  为满足调整优化目标电量的所有可调用用户电量值和;若  $WI - WA(s) > WA(k) + We(k+1) - WI$ , $WA(k)$  为满足调整优化目标电量的所有可调用用户电量值和。

确定  $A$  相可调电量值的同时也确定了应调整到  $A$  相的用户。按照相同的步骤,同样可以确定应调整到  $B$  相的用户,剩余可调整的用户均调整至  $C$  相即可。

## 2.4 不平衡度调整目标判断和迭代调整

确定所有用户的调整方案后,进行调整后的不平衡度计算,如果不平衡度不满足目标要求,则按照一定步长间隔减小  $K0$  值,直到调整满足目标。

图 3 给出了基于贪心算法的三相不平衡调整算法的流程图。

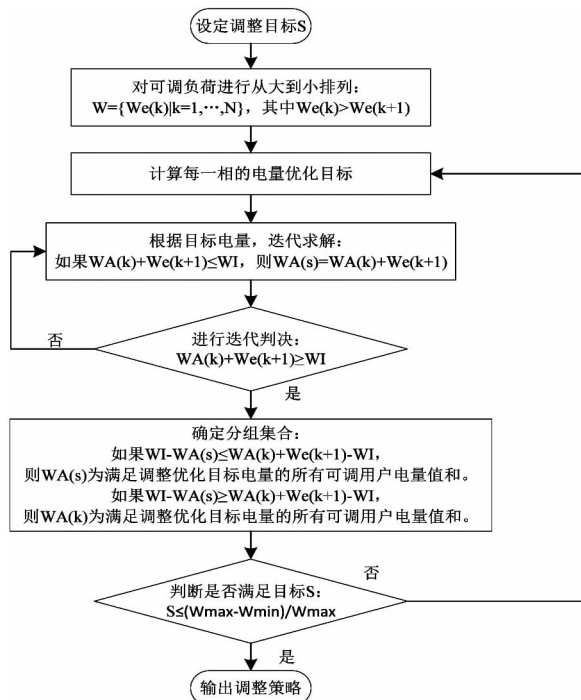


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm

## 3 多源数据供用电分析平台

电力用户用电信息采集系统、生产 PMS、营销 SG186、调度 EMS 等系统为供用电生产运行及营销服务等业务开展提供了较大支持,但随着电力市场的服务要求提高、以及企业应用数据的积累,各业务数据的融合分析及应用成了迫切需求。随着大数据技术进步和对其理念认识的提高,为多源数据供用电融合分析应用提供了可能,利用供电、用电、生产、营销等各业务信息系统的数据,深入分析生产运行和营销服务工作所形成的数据、业务指标,开发了多源数据供用电分析平台。

根据多源数据供用电分析平台业务功能和多源数据处理的需求,平台采用多层结构技术架构,层与层之间相互独立且信息互通,数据处理与业务操作并行执行,从而解决大量数据处理计算过程中程序资源占用率高而影响到业务应用速度的问题。平台架构如图 4 所示。

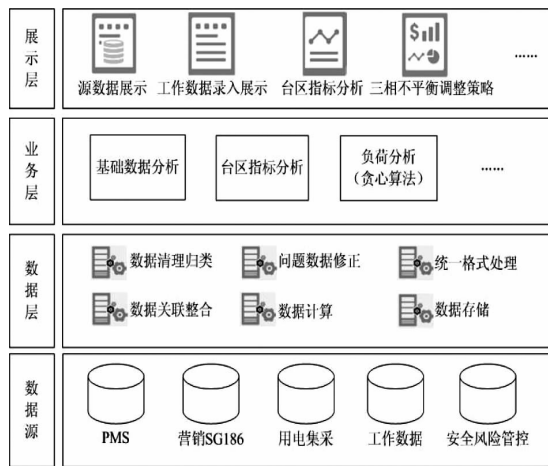


图 4 多源数据供用电分析平台技术架构

Fig. 4 Technical framework of multi-source data supply and utilization analysis platform

## 4 应用实例

下面以编号 686815023 的配变台区三相不平衡度超标治理过程为例进行说明。

该台区  $A$  相原有用户 10 户、 $B$  相原有用户 19 户、 $C$  相原有用户 47 户,4 月份台区三相不平衡度高达 91.94%。5 月 18 日台区的供电所人员用多源供电分析平台对台区运行数据进行了分析,系统分析界面如图 5 所示。

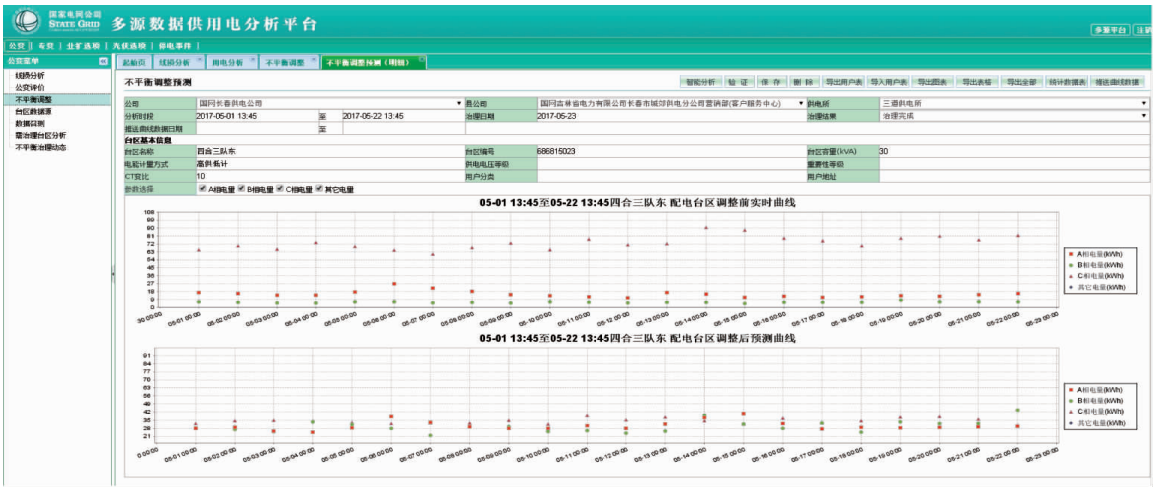


图 5 系统分析界面

Fig. 5 System analysis interface

通过不平衡智能调整方法对该台区进行操作，系统提供的策略共需调整用户 8 户。其中，将 3 户（杨德才，姚贵山，迟秀清）从 C 相调整到 A 相；将 5 户（杨臣，丁宝生，孟凡杰，葛正久，葛新波）从 C 相

调整到 B 相。  
作业人员在 5 月 23 日下午进行了现场调整作业，调整前后的曲线图如图 6 ~ 图 8 所示。

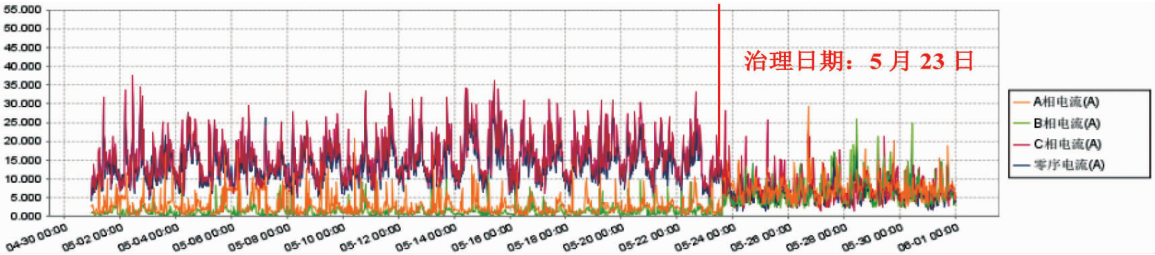


图 6 台区三相不平衡调整前后实际电流曲线

Fig. 6 Actual current curve before and after three-phase unbalanced adjustment for substation

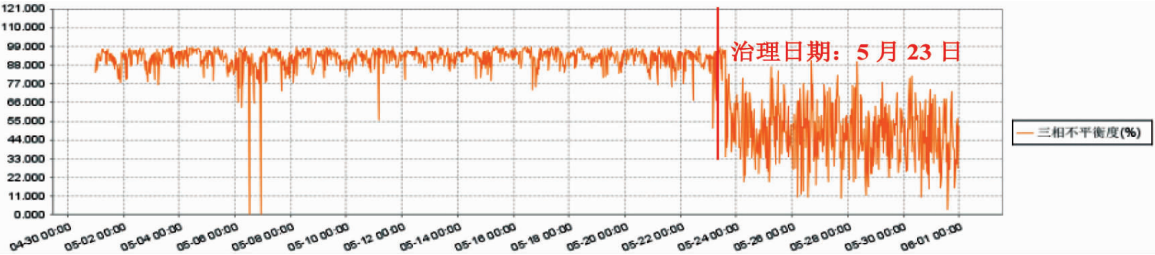


图 7 台区三相不平衡调整前后实际三相不平衡度曲线

Fig. 7 Actual three-phase unbalanced curve before and after three-phase unbalanced adjustment for substation

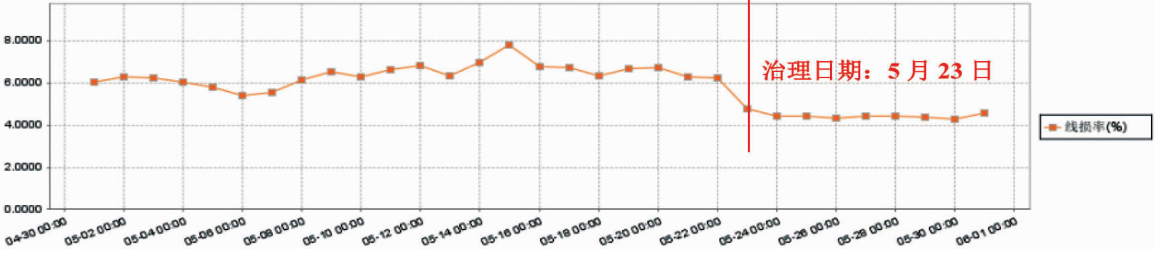


图 8 台区三相不平衡调整前后实际线损率曲线

Fig. 8 Actual line loss curve before and after three-phase unbalanced adjustment for substation

由上图得出,该台区在5月23日之前电流不平衡度较大,电流C相较较大,A、B相电流较小,电流曲线较分散,调整后24日开始三相电流曲线明显均衡,不平衡度下降较大,达到国网公司相关标准要求,线损由6.3%下降至4.2%,调整效果明显<sup>[16-19]</sup>。

在供电公司应用实践表明,本研究形成的三相不平衡调整策略形成方法,简约易用,成效显著。

## 4 结论

基于智能电能表数据三相不平衡治理通过对客户供电相位自动识别,运用贪心算法智能生成三相不平衡治理策略,解决了现场三相不平衡治理难度大的问题,在提高供电电压合格率、同期线损高损台区治理率、重过载公用配变比率、三相不平衡公用配变比率等指标的同时,有效提高了供电可靠性和公司经济效益,是一线员工解决现场实际问题的有效技术手段。

### 参考文献:

- [1] 杨云龙,王凤清. 配电变压器三相不平衡运行带来的附加损耗、电压偏差及补偿方法[J]. 电网技术,2004,28(08):73-76.  
YANG Yunlong, WANG Fengqing. Additional loss and voltage deviation caused by unbalanced operation of distribution transformer and countermeasures[J]. Power System Technology, 2004,28(08):73-76.
- [2] 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(09):2185-2193.  
FANG 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(09):2185-2193.
- [3] 赖声礼,李心广,秦华标. 电网无功及三相不平衡综合补偿研究[J]. 电网技术,2001,25(10):30-33.  
LAI Shengli, LI Xinguang, QIN Huabiao. An approach of integrated compensation for reactive three phase unbalance[J]. Power System Technology, 2001,25(10):30-33.
- [4] 朱彬若,杜卫华,李蕊. 电力用户用电信息采集系统数据分析与处理技术[J]. 华东电力,2011,39(10):1682-1686.  
ZHU Binruo, DU Weihua, LI Rui. Data analysis and processing technology for power consumption information acquisition system[J]. East China Electric Power, 2011,39(10):1682-1686.
- [5] 胡江溢,祝恩国,杜新纲,杜蜀薇. 用电信息采集系统应用现状及发展趋势[J]. 电力系统自动化,2014,38(02):131-135.  
HU Jiangyi, ZHU Enguo, DU Xingang, et al. Application status and development trend of power consumption information collection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,38(02):131-135.
- [6] 朱中文,周韶阳. 智能电能表的概念、标准化和检测方法初探[J]. 电测与仪表,2011,48(06):48-53.  
ZHU Zhongwen, ZHOU Shaoyuan. A tentative study of basic concepts standardization and testing for smart meters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011,48(06):48-53.
- [7] 李占英. 智能配电网大数据应用技术与前景分析[J]. 电力大数据,2017,20(11):18-20.  
LI Zhanying. Intelligent power distribution network and prospect analysis technology of data applications[J]. Power Systems and Big Data, 2017,20(11):18-20.
- [8] 栾文鹏,王冠,徐大青. 支持多种服务和业务融合的高级量测体系架构[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5088-5095.  
LUAN Wenpeng, WANG Guan, XU Daqing. Advanced metering infrastructure solution supporting multiple services and business integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(29):5088-5095.
- [9] JASIM A. GHAEB, OSAMA M. ALOQUILI. High performance reactive control for unbalanced three-phase load[J]. European Transactions on Electrical Power, 2010,20(06):710-722.
- [10] 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(S1):77-79.  
ZHENG Jie, ZHENG Jingfeng, WANG Haijing, et al. A method to recognizing phase of power based on carrier communication[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015,52(S1):77-79.
- [11] 潘雨晴,冯隆基,金萍. 窄带 OFDM 低压电力线载波技术及标准化发展趋势分析[J]. 电测与仪表,2015,52(13):124-128.  
PAN Yuqing, FENG Longji, JIN Ping. Narrowband OFDM low-voltage power line communications techniques and analysis of their standardization development trend[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015,52(13):124-128.
- [12] WEILIN LIU, BUMILLER G, HONGJIAN GAO. Power line communications and its application[C]. Proceedings of IEEE 18th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), Glasgow, Scotland: IEEE, 2014:81-86.
- [13] KATAYAMA M, YAMAZATO T, OKADA H. A mathematical model of noise in narrowband power line communication systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006,24(07):1267-1276.
- [14] 聂长海,蒋静. 覆盖表生成的可配置贪心算法优化[J]. 软件学报,2013,24(07):469-1483.  
NIE Changhai, JIANG Jing. Optimization of configurable greedy algorithm for covering arrays generation[J]. Journal of Software, 2013,24(07):469-1483.

[ 15 ] 陈静鹏,朴龙健,艾芊. 基于改进贪心算法的大规模电动汽车充电行为优化[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):38 - 44.  
CHEN Jingpeng, PIAO Longjian, Ai Qian. Charging optimization based on improved greedy algorithm for massive EVs[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):38 - 44.

[ 16 ] 孟德. 智能费控电能表的改造及应用[J]. 内蒙古电力技术, 2016,34(05):77 - 79.  
MENG De. Upgrading and application of intelligent charge control energy meter[J]. Inner Mongolia Electric Power,2016,34(05): 77 - 79.

[ 17 ] 韩霄汉,黄金娟,孙钢. 智能电能表库在计量精益化管理中的应用[J]. 浙江电力,2016,35(11):10 - 13.  
HAN Xiaohan, HUANG Jinjuan, SUN Gang. Application of smart meter library in lean metering management[J]. Zhejiang Electric Power,2016,35(11):10 - 13.

[ 18 ] 李梦宇,张泽亚等. 基于 CART 算法的电能表故障概率决策树分析[J]. 电力大数据 2017,20(10):7 - 10.

Li Mengyu, Zhang Zeya, et al. Analysis of decision tree for power meter fault probability based on CART algorithm [ J ] . Power Systems and Big Data. 2017,20(10):7 - 10.

[ 19 ] 陈晓科,钟榜,李钙,等. 三相不平衡配电系统不同补偿方式下的线路损耗[J]. 广东电力,2017,30(07):96 - 100.  
CHEN Xiaoke, ZHONG Bang, LI Gai, et al. Line loss of three-phase unbalanced power distribution system under different compensation modes [ J ] . Guangdong Electric Power, 2017, 30 (07):96 - 100.

收稿日期:2018 - 08 - 06

作者简介:



唐伟宁(1985),男,硕士,高级工程师,主要从事营销管理、电力计量、用电信息采集管理相关工作。

(本文责任编辑:范 斌)

Research and practice of three-phase unbalanced treatment based on the data of smart meter

TANG Weining, JU Moxin, KONG Fanqiang, YU Xu

(Power Science Research Institute of Jilin Electric Power Co. ,Ltd. ,Changchun 130021Jilin,China)

**Abstract:** There are about 110 thousand low voltage areas in city and rural power network in Jilin. Three-phase unbalance has great influence on voltage qualification rate, line loss, load capacity of transformer and level of equipment health. In the traditional adjustment method of three-phase load imbalance, front-line employees often solve on-site problems based on operation data and experience. As there is no scientific adjustment method, the effect is often poor. Full coverage of smart meter has been realized in state grid Jilin company. Making full use of the non-metering data and related application technologies of smart meters, and innovatively proposed the technology of synchronous zero crossing based on power line narrow band carrier, carrying out the research on automatic phase recognition technology of low-voltage customers, realizing the discrimination of the phase of the customer, and three-phase unbalanced governance strategy is generated intelligently based on the greedy algorithm, which can develop simple and easy to use intelligent auxiliary tools, provide effective technical means to solve practical problems for front-line staff, and further improve power supply reliability and economic benefit on the basis of guaranteeing various indexes.

**Key words:** smart meter; automatic phase recognition; three-phase unbalance