

电量信息采集设备线损故障自动检测方法

杨莉萍¹,王海云¹,丁冬²,于希娟¹,王立永²,吴红林²

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院,北京 100075;

2. 国网北京市电力公司,北京 100032)

摘要:当前电量信息采集设备线损故障检测存在检出率偏低、应用适用性较差问题,现提出一种电量信息采集设备线损故障自动检测方法。通过确定线损故障检测系统整体架构,将硬件部分分为主站、C/S分布式处理器与用户终端等模块,同时将软件划分为储存层、处理层与表示层,制定每个层次对应的任务,并对采集到的相同用户负荷数据做归一化处理。利用果蝇算法设计搜索操作,不断迭代优化果蝇群体中心位置。分别利用相关系数与相对距离指标实现时间序列的模式匹配,获取匹配度偏好程度,设定线损故障预警阈值,完成电量信息采集设备线损故障的自动检测。实验结果表明,该方法故障检出率高、适应性强,与传统方法相比具有更好的应用性能。

关键词:电量信息采集设备;线损故障;自动检测;负荷模式;时间序列

中图分类号:TM714 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22841

Automatic Detection Method for Line Loss Fault of Electric Quantity Information Acquisition Equipment

YANG Liping¹, WANG Haiyun¹, DING Dong², YU Xijuan¹, WANG Liyong², WU Honglin²

(1. *Electric Power Research Institute of State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100075, China;*

2. *State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100032, China*)

Abstract: At present, there are some problems in line loss fault detection of electric quantity information acquisition equipment, such as low detection rate, poor applicability and so on. An automatic line loss fault detection method for electric quantity information acquisition equipment was proposed. By determining the overall architecture of the line loss fault detection system, the hardware was divided into modules such as master station, C/S distributed processor and user terminal. At the same time, the software was divided into storage layer, processing layer and presentation layer. The corresponding tasks of each layer were formulated, and the collected load data of the same user were normalized. The drosophila algorithm was used to design the search operation, and the central position of drosophila population was optimized iteratively. The correlation coefficient and the relative distance index were respectively used to realize the pattern matching of time series, obtain the matching degree preference, set the line loss fault early warning threshold, and complete the automatic detection of line loss fault of electric quantity information acquisition equipment. The simulation results show that this method has high fault detection rate, strong adaptability and better application performance compared with the traditional method.

Key words: electric quantity information acquisition equipment; line loss fault; automatic detection; load mode; time series

电量信息采集设备将数字通信、计算机软硬件等高科技技术通过无线传输完成用电数据的采集与处理,可实现对电力线路与设备现场用电情况的实时检测,为电力企业管理提供技术支持

的同时,还能适应未来生产与经营管理发展需要。线损率为考核电力企业的关键经济指标,也是表示电力系统设计、生产与运营情况的综合性评价指标。由于电力体制改革的不断深化,降低

基金项目:国家电网有限公司科技项目(52022319003P)

作者简介:杨莉萍(1991—),女,硕士,工程师,Email:ylpsimple@126.com

通讯作者:王立永(1973—),男,博士,高级工程师,Email:13810007912@163.com

线损率变得格外重要,它直接关系到企业经济效益与国家节能政策的落实。

为降低线损故障,相关领域也取得了研究成果。文献[1]利用激光点云技术设计线损故障检测系统。使用激光探测传感器、信号放大器以及后台监控中心共同组成系统硬件模块;软件部分则利用主成分分析法获取电力系统线损参数,通过激光探测传感器采集点云特性,确定线损数据样本,建立样本特征矢量,计算判别函数,实现线损故障检测;文献[2]在BP神经网络基础上研究一种降低线损故障的方法。将支路线损变化率与三相电压、电流不平衡率当作线损指标,并对其进行归一化处理,完成线损故障检测。但是两种传统方法均忽略了对输电任务的分层处理,导致线损故障的检测结果不够准确。

为解决传统方法存在的问题,本文构建电量信息采集设备线损故障自动检测系统。首先明确某时间段内用户类型,利用指定技术将用户划分到某类型中,再结合故障检测系统需求与特征,利用该算法完成线损故障自动检测。仿真实验结果验证了本文研究成果不仅能够提高故障检出率,还能准确划分故障类型。

1 电量信息采集设备线损故障自动检测

1.1 电量信息采集系统

电量信息采集系统主要结构包括系统主站、通信信道与采集终端三部分,其结构示意图如图1所示。

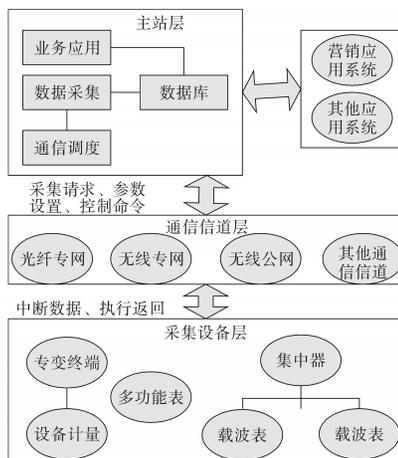


图1 电量信息采集系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of electric quantity information acquisition system

由图1可知,电量信息采集系统中主站

系统主要负责数据采集、管理等任务^[3-4];通信信道可实现主站和采集终端之间的数据传输;采集终端是安置在现场的计量工具,负责提供整体系统的初始用电情况。

1.2 线损检测系统设计

1.2.1 系统整体架构

线损故障检测系统包括主站、通信通道^[5]以及现场终端,整体结构如图2所示。

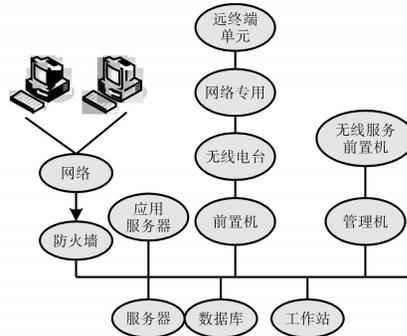


图2 系统整体结构图

Fig.2 Overall structure of the system

由于检测目标的不一致性,因此系统各模块功能也具有差异,主站系统通过分布式结构对数据统一管理,各模块之间相互独立^[5-7]。根据系统整体结构对硬件与软件功能进行详细设计。

1.2.2 系统硬件设计

系统硬件结构如图3所示。

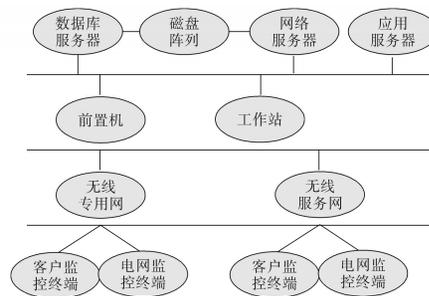


图3 系统硬件示意图

Fig.3 Schematic of the system hardware

通过C/S分布式处理器为客户机、中间层以及后台提供服务^[8-9],其结构示意图如图4所示。

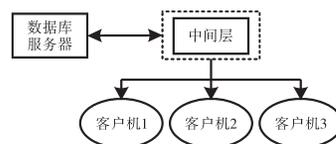


图4 C/S服务器结构图

Fig.4 Schematic of the C/S server structure

客户终端客户端以32位单片机为设计中心,通过嵌入式形式^[10]确保检测可靠性,采用模块组合形式,结合不同用户需求配置终端系统,其分

布情况如图5所示。

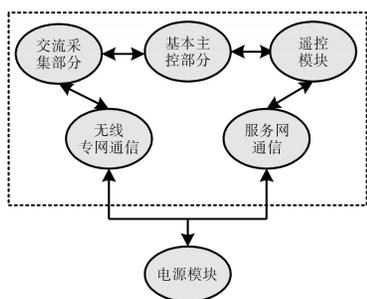


图5 终端模块分布

Fig.5 Terminal module distribution

1.2.3 系统软件设计

结合硬件模块结构,软件系统可分为储存层、处理层与表示层^[11-12]。储存层主要任务为向网络用户提供图形页面,处理层主要任务为服务器应用;表示层主要任务为提供数据库服务器。

线损故障检测系统程序设计能够实现系统终端参数维护,同时对线损数据检测,用户利用浏览器检测各路线损数据,生成报表。

1.3 负荷模式线损故障检测方法

对于线损故障的检测实际上就是对用户用电数据异常的检测,本文利用负荷模式检测法,经过数据处理、模式提取与模式匹配完成线损故障检测。

1.3.1 电量信息预处理

1) 数据收集

使用上文设计的检测系统采集用户负荷信息,由于用户用电情况随季节变化较大,因此本文的数据采集方式为按月收集方式(每月按30 d计算)^[13]。系统每间隔20 min进行一次负荷测量,需采集相同区域相似用户的正常用电数据、历史数据以及当月负荷数据^[14-15]。具体包含去年此区域N个正常用户该月用电负荷信息:

$$X_{ij} = [x_{ij}(1), x_{ij}(2), \dots, x_{ij}(72)] \quad (1)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, N$ $j = 1, 2, \dots, 30$

式中: x_{ij} 为第*i*个类似用户第*j*天的负荷数据。

则去年和前年的用户本月正常负荷情况表示为

$$Y_{kj} = [y_{kj}(1), y_{kj}(2), \dots, y_{kj}(72)] \quad (2)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, 6$

式中: y_{kj} 为过去第*k*年此月第*j*天的负荷信息。

用户当月负载信息表示为

$$Z_j = [z_j(1), z_j(2), \dots, z_j(72)] \quad (3)$$

式中: Z_j 为此月第*j*天负载数据,全部负载信息构成一条负载曲线。

2) 数据归一化

通常情况下,相同区域中相似用户用电负荷之间具有相似度较高的特征,用户负荷变化情况趋于一致,用电高峰与低谷的时间也大致相同。但由于用电绝对负荷以及电器设备种类不同,导致用电量存在一定差异。因此,对同一区域用户负荷情况需强调变化趋势,而针对用户历史负荷需重点关注绝对值。所以需利用不同方式对数据做预处理,即对相同用户负荷数据做归一化处理,而对历史负荷数据不做任何处理。对式(1)中的数据进行归一化处理^[16]的表达式如下:

$$x_{ij}(t) = \frac{x_{ij}(t) - x_{imin}}{x_{imax} - x_{imin}} \quad (4)$$

其中 $t = 1, 2, \dots, 72$

式中: t 为月数。

1.3.2 基于果蝇算法的判断函数

果蝇算法属于一种模仿果蝇寻食行为的智能搜索算法。结合果蝇寻食过程中对嗅觉与视觉的利用,设置搜索操作,经过不断迭代实现对果蝇群体中心位置的优化,进而得到近似最佳解。

基于果蝇算法整体流程如下:

步骤一:对于种群中心位置进行初始化处理;

步骤二:嗅觉搜寻,在种群中心附近,随机形成NP个邻域解;

步骤三:评判个体,利用评价机制,获取所有个体适应度值;

步骤四:视觉搜寻,挑选最佳邻域解,将其当作最佳种群中心位置;

步骤五:判断是否符合终止条件,如果符合则输出最佳解,反之,回到步骤二重新开始。

任意一个果蝇均代表一个解,利用负荷矢量 $F = [f_1, f_2, \dots, f_{72}]$ 描述,矢量中每个元素均表示不同时间点的负荷情况。通过随机方式对种群中的解进行初始化处理,则根据下述方法进行:

$$f_i = f_i + a \quad (5)$$

式中: a 为随机数。

结合聚类算法中判断函数,则味道浓度计算公式如下:

$$S(F) = \sqrt{\frac{1}{72} \sum_{i=1}^{72} d^2(f_i, s_g)} \quad (6)$$

式中: d 为符合曲线总数; s_g 表示第*g*条曲线负荷情况。

则本文构建的味道判断函数为

$$smell(\mathbf{F}) = 1/S(\mathbf{F}) \quad (7)$$

在上述嗅觉操作程序与评价机制基础上,经过不断优化迭代,获得种群中最佳果蝇个体,其描述的负荷矢量就是果蝇算法提取出的模式。其迭代机制为判断是否符合终止条件,如果符合则输出最佳解,反之,回到步骤二重新开始^[17]。利用该方法可以获得包含归一化的相同区域用户的负荷模式曲线 $L[l_1, l_2, \dots, l_{72}]$, 将其记为 SLD ; 用户过往负载模式曲线 $H = [h_1, h_2, \dots, h_{72}]$, 记作 HLD 。

1.3.3 负载模式匹配

利用果蝇算法判断函数获取用户负载模式后,利用时间序列方法对负载模式进行匹配。负载模式注重用户和 SLD 的变化趋势以及 HLD 的绝对值匹配。因此分别利用相关系数与相对距离指标实现时间序列的模式匹配。

在进行匹配前,需结合用户此月真实负载情况,确定负载模式^[18-19]。先将用户该月负载 z_j 做归一化处理,获得归一化后的该月负载 z'_j , 根据如下形式获得线损模式曲线 $U = [u(1), u(2), \dots, u(72)]$ 与归一化之后的模式曲线 $U' = [u'(1), u'(2), \dots, u'(72)]$, 其中

$$u(t) = \frac{1}{30} \sum_{j=1}^{30} z_j(t) \quad (8)$$

$$u'(t) = \frac{1}{30} \sum_{j=1}^{30} z'_j(t) \quad (9)$$

因此,获得用户负载曲线和相似用户负载曲线的匹配度 m_1 表示为

$$\begin{cases} m_1 = \rho(L, U') \\ \rho(L, U') = \frac{\sum_{t=1}^{72} [l(t) - \bar{l}][u'(t) - \bar{u}']}{\sqrt{\sum_{t=1}^{72} [l(t) - \bar{l}]^2 \sum_{t=1}^{72} [u'(t) - \bar{u}']^2}} \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\bar{l} = \frac{1}{72} \sum_{t=1}^{72} l(t)$ $\bar{u}' = \frac{1}{72} \sum_{t=1}^{72} u'(t)$

经过归一化处理后的匹配度 m_2 表示为

$$m_2 = 1 - \sqrt{\frac{1}{72} \sum_{t=1}^{72} \left[\frac{u(t) - h(t)}{h(t)} \right]^2} \quad (11)$$

式中: $h(t)$ 为线损后的负载模式曲线。

1.3.4 线损故障检测的实现

获得用户负载曲线和相似用户负载曲线的匹配度 m_1 , 以及经过归一化处理后的匹配度 m_2 后,结合线损后的负载模式曲线与归一化处理模式曲线确定两个匹配度的偏好程度 ω_1 与 ω_2 , 通过

加权获得用电正常度 η :

$$\eta = \omega_1 \times m_1 + \omega_2 \times m_2 \quad (12)$$

电力企业根据该值设定线损故障阈值,若用电正常度 η 高于预警值,则断定线损正常,反之断定线损故障,并结合用户过往用电情况,判断出故障类型。

2 实验分析

为验证本文检测方法的应用性能,选取某地区实际运行的低压配电网为实验环境,该配电网中节点总数量为80个,其中用户节点为40个,均属于单相用户,三相供电线路共50段。供电线路长度较短,轻载状况比较显著。该地区过去一年线损情况如下:电网整体线损率为40%,配电线损率为15%,低压线损率为0.5%,单台区域线损率为0.5%。

为验证本文构建的检测系统检测线损的适应能力,分别与文献[1]提出的激光点云技术设计的线损故障检测系统、文献[2]基于BP神经网络的降低线损故障的方法进行对比,不同方法适应度对比如表1所示。

表1 不同方法适应度对比表
Tab.1 Comparison of different methods

迭代次数/次	适应度(标么值)		
	本文方法	文献[1]	文献[2]
5	0.91	0.88	0.78
10	0.92	0.89	0.76
15	0.90	0.86	0.74
20	0.88	0.84	0.70
25	0.87	0.82	0.71
30	0.86	0.81	0.73
35	0.86	0.83	0.72

结合上述参数,对比文献[1]、文献[2]及本文方法的适应能力,实验对比结果如图6所示。

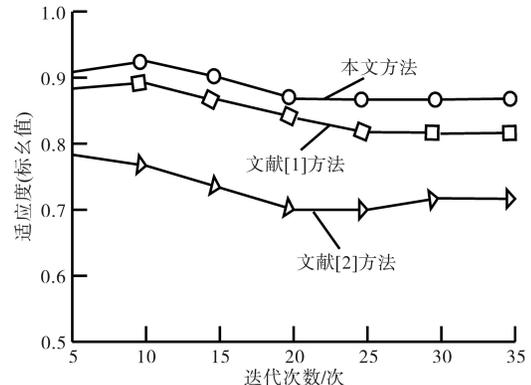


图6 不同方法适应度对比图

Fig. 6 Comparison of fitness with different methods

设定完全满足要求的适应度为数值1,由图6可知,本文方法与文献[1]方法适应度值都较高,但是本文方法在迭代次数为20后趋于平稳,而文献[1]方法在迭代次数为25后才呈现出平稳状态。这表明本文检测方法具有较强适应能力,局部收敛性能更强。为进一步对比三种方法对线损故障检测的全面性,对检出率进行测试,测试结果如图7所示。

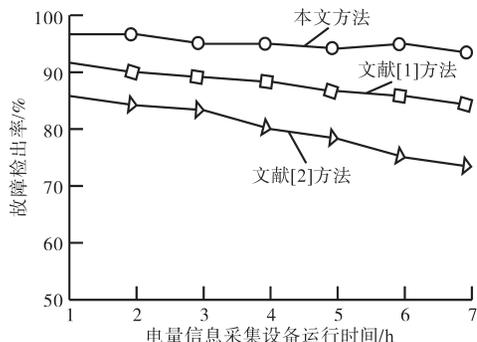


图7 不同方法故障检出率对比图

Fig.7 Comparison of fault detection rate with different methods

由图7可知,随着信息采集设备运行时间的推移,系统采集到的信息量不断增多,因此三种方法检出率均有所下降,但本文方法的检出率始终处于较高水平。这是因为本文构建的检测系统信息处理能力更强,可有效处理海量采集信息。对于线损故障检测而言,不仅要全面检测出故障发生概率,还要准确判断故障类型,不同方法对故障类型的判断能力如表2所示。

表2 不同方法故障类型判断能力对比表

Tab.2 Comparison of fault type judgment ability with different methods

故障类型	准确率/%		
	本文方法	文献[1]	文献[2]
馈线数据丢失	100.0	90.6	94.0
用户数据丢失	97.8	91.2	95.1
系统故障	97.3	94.1	92.1
档案差错	96.9	95.2	93.7

通过表2可以看出,本文方法对于馈线数据丢失的故障类型可以完全判断正确,对于其他故障判断准确率也高达95%以上。主要因为果蝇算法能够有效获取不同故障类型特征,提高判断精准度。

3 结论

随着电量信息采集技术的不断发展,在线损

故障检测中引入智能化管理方式,为线损管理带来新的机遇。本文利用模式匹配方法将线损故障检测转换为用户异常用电分析问题,设定预警阈值,若高于阈值则表示存在线损故障。仿真实验证明,本文方法不但可以全面检测出故障问题,还能对故障进行准确分类。在上述研究基础上要进一步制定降损方案,达到提高能源利用效率,构建绿色电网的目的。

参考文献

- [1] 陈海涛,周鑫,雷才嘉.基于激光点云的中压配电网日同期线损检测系统设计[J].电网与清洁能源,2019,35(10):28-33,42.
Chen Haitao, Zhou Xin, Lei Caijia. Design of the same day line loss detection system based on laser point cloud for medium voltage distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(10): 28-33, 42.
- [2] 黄星知,杨奕纯,杨兰,等.基于BP神经网络的配电网防窃电降线损研究[J].电力科学与技术学报,2019,34(4):143-147.
Huang Xingzhi, Yang Yichun, Yang Lan, et al. Study of anti-power theft and line loss reduction for power distribution network based on BP neural network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 143-147.
- [3] 崔振辉,赵剑慧,于洋,等.基于移动通信网络的舰船电力设备线损检测研究[J].舰船科学技术,2019,41(4):107-109.
Cui Zhenhui, Zhao Jianhui, Yu Yang, et al. Research on line loss detection of ship power equipment based on mobile communication network[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(4): 107-109.
- [4] 吕伟嘉,翟术然,乔亚男.电力电能计量与采集网格化融合体系研究与应用[J].中国电子科学研究院学报,2018,13(5):103-108.
Lü Weijia, Zhai Shuran, Qiao Yanan. Research and application of grid integration system of electric power metering and acquisition[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(5): 103-108.
- [5] 宋安,王琴,谷大武,等.基于FPGA的时钟同步功耗信息采集方法[J].计算机工程,2020,46(6):115-121.
Song An, Wang Qin, Gu Dawu, et al. Clock synchronization power consumption information acquisition method based on FPGA[J]. Computer Engineering, 2020, 46(6): 115-121.
- [6] 郑国权,唐悦,刘宣.基于光纤技术的电能信息采集系统设计[J].激光杂志,2020,41(5):173-177.
Zheng Guoquan, Tang Yue, Liu Xuan. Design of power information acquisition system based on optical fiber technology[J]. Laser Journal, 2020, 41(5): 173-177.
- [7] 赵文清,沈哲吉,李刚.基于深度学习的用户异常用电模式检测[J].电力自动化设备,2018,38(9):34-38.
Zhao Wenqing, Shen Zheji, Li Gang. Detection of abnormal

- power consumption patterns of users based on deep learning [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38 (9): 34-38.
- [8] 李春阳,王先培,田猛,等.AMI环境下异常用电检测研究[J]. *计算机仿真*, 2018, 35(8): 66-70.
- Li Chunyang, Wang Xianpei, Tian Meng, *et al.* Research on abnormal power consumption detection in AMI environment[J]. *Computer Simulation*, 2018, 35 (8): 66-70.
- [9] 郭丽娟,张玉波,尹立群,等.基于离群点检测的变电主设备异常辨识与规律分析[J]. *南方电网技术*, 2018, 12(9): 14-21.
- Guo Lijuan, Zhang Yubo, Yin Liqun, *et al.* Anomaly identification and regularity analysis of substation main equipment based on outlier detection [J]. *Southern Power System Technology*, 2018, 12 (9): 14-21.
- [10] 朱玉祥,彭延军.机泵群设备故障监测及定位技术研究[J]. *计算机工程与应用*, 2018, 54(14): 217-223.
- Zhu Yuxiang, Peng Yanjun. Research on fault monitoring and location technology of pump group equipment [J]. *Computer Engineering and Application*, 2018, 54 (14): 217-223.
- [11] 潘瑾,高树国,陈志勇,等.红外与紫外一体化变电设备故障的检测系统设计[J]. *现代电子技术*, 2018, 41(1): 120-124.
- Pan Jin, Gao Shuguo, Chen Zhiyong, *et al.* Design of fault detection system for integrated infrared and ultraviolet substation equipment [J]. *Modern Electronic Technology*, 2018, 41 (1): 120-124.
- [12] 阴锡君,刘郁,王一珺.图像融合技术在变电站设备热故障监测中的应用研究[J]. *科技通报*, 2019, 35(12): 121-124, 129.
- Yin Xijun, Liu Yu, Wang Yijun. Application of image fusion technology in thermal fault monitoring of substation equipment [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2019, 35 (12): 121-124, 129.
- [13] Pillai D S , Rajasekar N . An mppt-based sensorless line-line and line-ground fault detection technique for PV systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(9): 8646-8659.
- [14] Yoo H J , Shin M C , Lee J H , *et al.* DC line ground fault detection scheme for line commutated converter high voltage direct current connected to renewable energy source[J]. *Science of Advanced Materials*, 2018, 10(2): 267-274.
- [15] 赵洪山,高玉峰.基于振动特征估计的GIS设备故障检测与分析[J]. *高压电器*, 2020, 56(6): 114-120.
- Zhao Hongshan, Gao Yufeng. GIS equipment fault detection and analysis based on vibration feature estimation[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56 (6): 114-120.
- [16] 刘军,赵晨聪,谢宙桦,等.电网不平衡故障下风电并网逆变器的控制综述[J]. *电气传动*, 2020, 50(8): 65-73.
- Liu Jun, Zhao Chencong, Xie Zhouhua, *et al.* An overview on control of wind power grid-connected inverter under unbalanced grid fault[J]. *Electric Drive*, 2020, 50(8): 65-73.
- [17] 陈家璘,周正,冯伟东,等.一种无线传感器网络节点的故障检测算法[J]. *计算技术与自动化*, 2021, 40(1): 38-42.
- Chen Jialin, Zhou Zheng, Feng Weidong, *et al.* A node fault detection algorithm for wireless sensor networks [J]. *Computing Technology and Automation*, 2021, 40(1): 38-42.
- [18] 吴娟娟,皮薇薇.永磁同步电机轻微匝间短路故障的检测方法[J]. *电气传动*, 2020, 50(4): 98-103.
- Wu Juanjuan, Pi Weiwei. Method for detecting short circuit slight fault of the PMSM[J]. *Electric Drive*, 2020, 50 (4) : 98-103.
- [19] 李洪乾,韩松,周忠强.利用Rayleigh熵和并行计算的大规模电网异常负荷快速识别[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(23): 37-43.
- Li Hongqian, Han Song, Zhou Zhongqiang. Fast identification of abnormal load in large-scale power grid using rayleigh entropy and parallel computing[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47 (23): 37-43.

收稿日期:2020-12-20

修改稿日期:2021-02-11