

变电站工程现场智能测量设备数据批量 导出系统设计应用研究

苏纪臣

(国网宁夏电力有限公司,宁夏 银川 750001)

摘要: 由于当前变电站工程现场智能测量设备数据处理效率较低以及导出时延较高,造成变电站工程施工进度缓慢,因此设计变电站工程现场智能测量设备数据批量导出系统。利用信息采集仪采集变电站工程现场智能测量设备数据,在此基础上利用SDH光纤环网将采集到的数据远程传输至数据中心,数据中心通过转换数据格式实现数据归一化处理,将完成归一化处理的数据利用K-means算法进行聚类处理,利用批量导出算法将聚类处理结果导出至Excel文件,便于变电站工程现场生产与管理人员使用。系统测试结果表明,所设计系统的数据处理与聚类时间较短,可批量导出变电站工程现场智能测量设备数据,且单条数据导出时延低于120 ms,运行40 s吞吐量高达8 264条,实际应用效果好。

关键词: 变电站;工程现场;智能测量设备;数据批量导出系统;应用

中图分类号: TM733 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22988

Design and Application of Data Batch Export System for Intelligent Measurement Equipment in Substation Engineering

SU Jichen

(State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, Ningxia, China)

Abstract: Due to the low efficiency of data processing and high export delay of intelligent measurement equipment in substation engineering, the construction progress of substation engineering is slow. Therefore, the data batch export system of intelligent measurement equipment in substation engineering was designed. The information acquisition instrument was used to collect the data of intelligent measurement equipment in the substation project. On this basis, the collected data was transmitted to the data center remotely by using the SDH optical fiber ring network. The data center realized the data normalization processing by converting the data format. The K-means algorithm was used to cluster the normalized data, and the batch export algorithm was used to export the clustering results to Excel, it is easy to use by the production and management personnel in the substation project. The system test results show that the data processing and clustering time of the designed system is short, and the data of intelligent measurement equipment in substation engineering field can be exported in batches. The time delay of single data export is less than 120 ms, and the throughput is up to 8 264 after running for 40 s. The practical application effect is good.

Key words: substation; project site; intelligent measurement equipment; data batch export system; application

随着我国电力自动化水平的稳步提升,针对变电站的管理也逐渐趋于智能化^[1]。由于变电站生产安全决定了电力系统运行的安全性和高效性,再加上通过变电站工程现场的智能测量设备实时监测变电站运行情况^[2],对提高变电站内设备检修与维护的准确性、实时性与经济效益,降低变电站运行维护成本等方面都有着重要意义。

由于智能化变电站是我国电力发展的一个趋势,同时,智能化变电站在线监测与诊断技术近年来在电力行业受到了高度重视,其在线监测数据现场并行处理技术得到了深入研究,这对电力系统的安全运行具有重要的意义。在变电站工程现场中有很多智能测量设备,如直流电源监控装置、高压设备绝缘监测装置、谐波在线监测装置、电压监测仪以及小电流接地装置等设备,

这些智能测量设备均具有数据上传功能^[3]。但是,目前缺乏统一的管理以及采集手段^[4],智能测量设备具有各自的监控领域以及监控任务,使得变电站管理维护费用上升。不仅如此,智能测量设备传输信息量较少,受通讯规约约束,导致传输距离短以及传输速度慢,无法接入具有串口通信功能的设备^[5]等,不能够实现设备信息资源的充分利用。

目前,针对数据导出的研究已经取得了一定的研究成果,例如数字化变电站中测量仪表数据采集系统设计^[6]以及基于信息融合的智能变电站继电保护设备自动测试系统^[7],这两种系统分别利用STM32处理器和信息融合技术实现变电站继电保护设备测试,实现变电站机电保护设备数据采集与导出处理,但是这两种系统在设计过程中并未考虑到要对数据进行进一步处理,导致数据处理效率较低以及导出时延较高。因此,本文研究时考虑到以上问题,利用归一化方法对数据进行处理,在此基础上利用K-means算法对数据处理结果进行聚类处理,以期提升变电站工程现场智能测量设备数据导出效率,并提升变电站工程智能测量设备数据管理水平。

1 变电站工程现场智能测量设备数据批量导出系统

1.1 系统总体结构

变电站具有利用智能电子设备实现众多设备的信息采集、信息监测、协同互动、分析决策以及智能调节等众多功能。所设计变电站工程现场智能测量设备数据批量导出系统总体结构如图1所示。

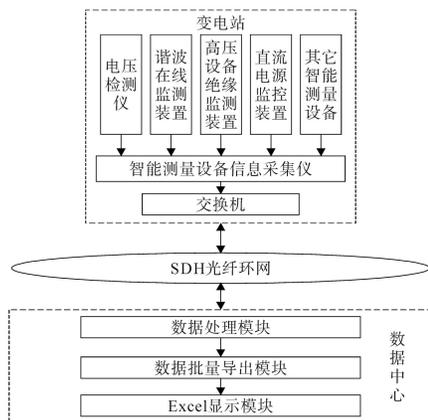


图1 系统总体结构图

Fig.1 Overall structure of the system

设置智能测量设备信息采集仪(下文简称采

集仪)作为变电站工程现场智能测量设备数据批量导出系统的数据采集装置,其可与变电站工程现场各类智能测量设备连接,利用透明转发技术实现不同设备接入。选取SDH光纤环网将所采集到的海量数据远程发送至数据中心,数据中心处理所采集的海量智能测量设备数据^[8],利用批量导出算法将数据导出至Excel表格中。变电站管理人员及生产运行人员通过批量导出的Excel表格查询与处理变电站工程现场智能测量设备的测量结果。

1.2 硬件设计

1.2.1 串口设备光电隔离总线

将RS485串行通信口应用于采集仪中,实现与众多变电站工程现场智能测量设备通信。为提升智能测量设备通信可靠性,导出智能测量设备数据时,需重视不同智能测量设备之间的信号隔离与抗干扰情况^[9]。将光电信号隔离装置安置于不同智能测量设备接入总线端口中,令不同电位的智能测量设备可实现与系统保持良好的通信。RS485通信线路处于室外时,需设置雷击保护电路,避免通信线路损坏。

1.2.2 智能测量设备采集仪

选取RS485,RS232以及RJ45等端口接入不同的电能采集终端等智能测量设备。通过应答方式采集智能测量设备数据^[10],利用以太网通过透明转发方式传送至数据中心,数据中心向各个智能测量设备发送数据采集以及遥控设备等各种指令。

系统选取透明转发技术,无需将编写协议解释程序应用于现场设备中以实现数据规约,具有调试安装简单以及成本投入低的优势^[11]。选取网络地址转发技术,以改善变电站工程现场智能测量设备IP地址资源过于紧缺的情况。

1.3 数据处理

1.3.1 数据归一化处理

采集智能测量设备数据时,不同设备所采集数据格式存在较大差异,因此数据的归一化处理极为重要^[12]。采用标准转换方式转换采集仪所采集到的数据。用 $X = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ 表示维度为 p 的矢量,所采集数据观测矩阵如下:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

经标准化处理后的数据矩阵如下:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11}^* & x_{12}^* & \cdots & x_{1p}^* \\ x_{21}^* & x_{22}^* & \cdots & x_{2p}^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1}^* & x_{n2}^* & \cdots & x_{np}^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵中随机元素公式如下:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{\sqrt{s_{ij}}} \quad (3)$$

其中

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, p$$

$$\sqrt{s_{ij}} = \sqrt{\frac{1}{p-1} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \quad (4)$$

式中: \bar{x}_i, s_{ij} 分别为变量 X_i 的观测值平均值以及方差; $\sqrt{s_{ij}}$ 为变量 X_i 的标准差。

经过标准化变换后的原矩阵各行均值以及标准差分别为0和1。

1.3.2 智能测量设备数据分析

K-means 聚类算法是目前应用较为广泛的聚类算法, 设存在样本数量以及聚类数量分别为 N 和 K , 随机选取 K 个样本作为初始聚类算法的簇中心, 计算未被划分为簇中心的样本1次迭代至初始簇中心点的距离, 迭代过程中需设置聚类准则^[13], 根据聚类准则进行簇类分配。簇类分配完成后, 获取簇内全部数据平均值, 将聚类中心不停移动, 直至类内误差平方和最小且数据集内数据无变化时表示聚类完成。

K-means 聚类算法实现过程如下:

1) 设置初始聚类中心 $\{g_1, g_2, \dots, g_k\}$ 为数据集内数量为 k 的随机对象;

2) 依据最小距离原则将样本集内全部样本分配至聚类的不同类别, 公式如下:

$$L_i = \min \{ \|x - g_i\| \} \quad x \in DataSet \quad (5)$$

其中

$$i = 1, 2, \dots, k$$

3) 更新聚类中心, 聚类中心为各聚类中全部样本均值, 其计算公式如下:

$$g_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} X_j \quad (6)$$

4) 聚类中心变化时, 重复步骤2)和步骤3), 直至聚类中心不发生改变, 此时聚类中心的公式如下:

$$R_c = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} |X_j^{(i)} - g_i| \quad (7)$$

K-means 聚类算法是基于划分的聚类算法, 具有较好的聚类效果, 可应用于处理大规模变电站工程现场智能测量设备数据处理中, 算法简单, 可伸缩性高, 实际应用效果更好。

由于变电站工程现场智能测量设备数据量大, 系统采集海量数据后, 需采用合理的聚类分析处理方法实现数据分析^[14], 以提升数据批量导出效果。海量智能测量设备数据处理流程如下:

1) 数据准备。采集不同的智能测量设备数据后, 将所采集的数据置于HBase表内, 存储于本地;

2) 提取信号特征。提取智能测量设备数据特征, 并将所提取特征结果存储于SequenceFile内;

3) 获取聚类中心。提取已知类别的少量样本, 其聚类中心的计算公式如下:

$$Center_j = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_m}{m} \quad (8)$$

式中: $Center_j, x_i$ 分别为类别 G_j 的聚类中心以及全部样本; m 为样本数量。

利用式(8)获取第1次迭代时聚类中心, 并将聚类中心存储于SequenceFile内;

4) K-means 聚类。设置 K-means 聚类的终止条件, 并将已完成特征提取的智能测量设备数据以及聚类中心的 SequenceFile 路径进行聚类, 将聚类结果发送至HDFS内, 同样存储于 SequenceFile 内;

5) 将利用 K-means 聚类方法所获取结果应用于数据批量导出中。

以上过程可将海量变电站工程现场智能测量设备数据聚类处理, 所获取聚类结果可直观体现智能测量设备数据具体情况^[15], 令所导出的数据更为精准。

1.4 批量导出算法

将完成数据处理的变电站工程现场智能测量设备数据批量导出至 Excel 文件中, 一是通过提取系统所在服务器的 Excel 进程使用数量, 将数据集转存至数组内; 二是通过将系统所采集的智能测量设备数据集存放至数组内, 以此获取 Excel 内众多单元格。通过以上两个过程控制 Excel 使用进程在合理范围, 将所采集的数据批量导出至 Excel 文件内, 实现智能测量设备数据的批量导出^[16], 提升所采集的智能测量设备数据实用性。

2 系统测试

为检测所设计的变电站工程现场智能测量

设备数据批量导出系统的有效性,选取某电力公司作为实验对象,该电力公司包含两个智能变电站,变电站内包含智能测量设备16台。采用所设计系统于2019年11月13日批量导出该电力公司两个变电站智能测量设备的数据,以验证系统的有效性。为直观验证所设计系统批量导出性能,选取文献[6]系统和文献[7]系统作为对比系统。

2.1 理论深度比较

为检验所设计的变电站工程现场智能测量设备数据批量系统的理论深度,对不同系统的数据处理时间进行了比较,结果如表1所示。

表1 数据处理时间对比

Tab.1 Comparison of data processing time

文件大小/MB	处理时间/ms		
	所设计系统	文献[6]系统	文献[7]系统
500	254	1 596	1 147
1 000	356	1 978	1 658
1 500	396	2 014	2 017
2 000	425	2 536	2 354
2 500	472	2 789	2 674
3 000	498	2 937	2 945
3 500	524	3 478	3 478
4 000	583	3 967	3 984
4 500	635	4 366	4 421
5 000	785	4 715	5 369

分析表1可知,随着实验文件数量的增加,三种系统的数据处理时间均呈现上升趋势,但是所设计系统的数据处理时间始终是最底的,这是因为该系统采用归一化方法,提升了数据处理效率。

为进一步验证所设计系统在理论上的优势,对三种系统的数据聚类时间进行了比较,结果如表2所示。

表2 数据聚类时间对比

Tab.2 Comparison of data clustering time

文件大小/MB	聚类时间/ms		
	所设计系统	文献[6]系统	文献[7]系统
500	156	1 236	969
1 000	236	1 647	1 235
1 500	279	1 698	1 674
2 000	356	2 174	1 977
2 500	381	2 456	2 301
3 000	392	2 578	2 647
3 500	417	3 017	2 974
4 000	436	3 321	3 541
4 500	489	3 978	4 122
5 000	569	4 233	4 875

分析表2可知,随着实验文件数量的增加,三种系统的数据聚类时间均呈现上升趋势,但是所设计系统的数据聚类时间始终是最底的,这是因为所设计系统采用K-means聚类算法对数据进行了聚类处理,降低了数据聚类时间,提升了数据聚类效率。

2.2 实际应用效果比较

统计不同系统处理海量智能测量设备数据的迭代次数,并将所设计系统与另两种系统对比,对比结果如图2所示。

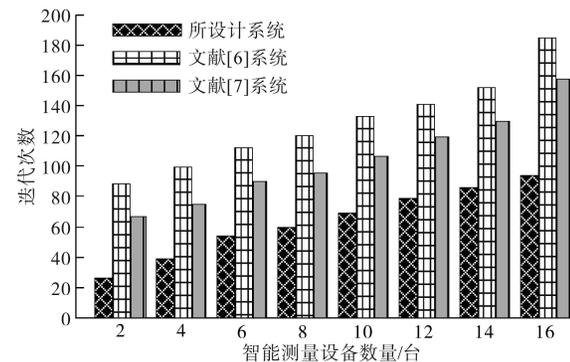


图2 不同系统迭代次数对比

Fig.2 Comparison of iteration times of different systems

从图2实验结果可以看出,随着智能测量设备数量的增加,不同系统处理数据的迭代次数有所增加。所设计系统在智能测量设备数量为16台时,达到全局最优收敛的迭代次数仅为86次;另两种系统在智能测量设备为16台时,分别需要186次以及159次才可实现全局最优收敛,验证了所设计系统具有较高的数据处理迭代性能,可有效提升数据批量导出速率。

Sort是衡量数据管理性能的重要工具,可有效衡量不同系统的数据处理能力,Sort中自带排序程序^[7]。利用所设计系统采集智能测量设备数据并排序,重复3次排序取其中间值,将所设计系统与文献[6]系统及文献[7]系统对比,统计所设计系统批量导出数据的排序时间,对比结果如表3所示。

表3 不同系统导出数据排序时间对比

Tab.3 Comparison of sorting time of exported data in different systems

设备名称	排序时间/ms		
	所设计系统	文献[6]系统	文献[7]系统
直流电源监控装置	385	856	1 254
高压设备绝缘监测装置	346	815	1 352
谐波在线监测装置	385	956	1 125
电压监测仪	326	974	1 365
小电流接地装置	378	826	1 152

从表3的实验结果可以看出,所设计系统可对批量导出的智能测量设备数据进行Sort排列,具有较短的排序时间。采用所设计系统排序批量导出的不同智能测量设备数据时间均在300~400 ms之间;采用文献[6]、文献[7]系统导出的智能测量设备数据排序时间均高于800 ms。所设计系统具有较短的排序时间,验证所设计系统具有较强的数据计算能力。

统计采用所设计系统批量导出变电站工程现场智能测量设备数据的导出时延,并将所设计系统与另两种系统对比,对比结果如表4所示。

表4 不同系统批量导出性能对比

Tab.4 Comparison of batch export performance of different systems

文件大小/ MB	所设计系统		文献[6]系统		文献[7]系统	
	批量导出时间/ ms	单条数据导出 时延/ms	批量导出 时间/ms	单条数据导出 时延/ms	批量导出 时间/ms	单条数据导出 时延/ms
500	586	23	3 854	235	2 658	352
1 000	675	34	4 521	258	3 452	368
1 500	758	38	4 952	264	4 152	428
2 000	816	42	5 134	295	4 856	495
2 500	935	51	5 856	352	5 346	568
3 000	1 052	64	6 235	378	6 025	685
3 500	1 165	75	7 852	425	7 152	795
4 000	1 268	82	8 156	485	8 236	821
4 500	1 389	105	8 985	596	9 458	866
5 000	1 485	115	9 865	758	10 256	988

从表4对比结果可以看出,采用所设计系统批量导出变电站工程现场智能测量设备数据的时间明显低于另两种系统,且导出单条数据的平均时延均低于另两种系统,有效验证所设计系统具有较高的实时性。因此所设计系统具有较高的灵活性以及扩展性,可实现海量智能测量设备数据快速导出,数据处理性能优越。

变电站工程现场智能测量设备数据具有多变性,其采集以及导出操作较为频繁,系统的读取性能极为重要^[18]。统计采用所设计系统批量导出变电站工程现场智能测量设备数据的吞吐量,统计结果如图3所示。

从图3统计结果可以看出,采用所设计系统批量导出智能测量设备数据的吞吐量明显高于另两种系统,运行40 s时的吞吐量高达8 264条;另两种系统批量导出智能测量设备数据运行40 s时的吞吐量仅为4 056条以及3 867条。所设计系统具有较高的吞吐量,有效验证采用所设计系统不仅可批量导出智能测量设备数据,并且具有

较高的数据处理能力,系统运行时具有较高的吞吐量,导出性能较好。

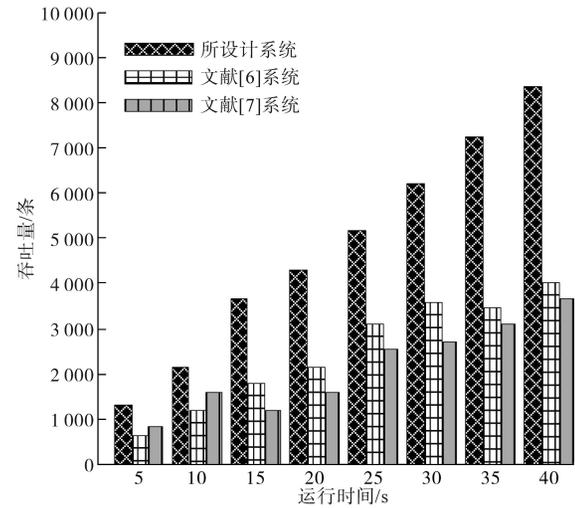


图3 不同系统吞吐量对比结果

Fig.3 Throughput comparison results of different systems

统计采用不同系统批量导出智能测量设备数据时的加速比,统计结果如图4所示。

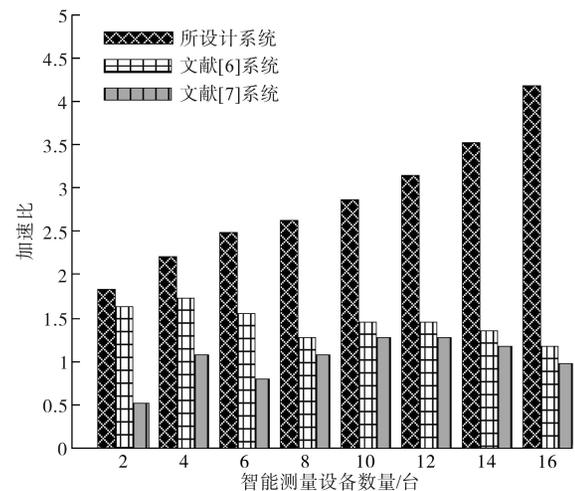


图4 不同系统加速比对比

Fig.4 Comparison of acceleration ratio of different systems

从图4统计结果可以看出,采用所设计系统批量导出智能测量设备数据的加速比明显高于另两种系统^[19],有效验证所设计系统具有较高的批量导出性能。原因在于所设计系统采用的K-means聚类算法具有较高的并行性能^[20],因此随着智能测量设备数量的增加,加速比有所提升,另两种系统在不同数量智能测量设备情况下均有较低的加速比。所设计系统可在较高加速比情况下实现智能测量设备数据的批量导出,可应用于变电站工程现场,主要原因是所设计系统充分考虑变电站不同智能测量设备的通信情况,为众多智能测量设备通信提供便利,实现智能测量

设备与数据中心的快速通信^[21]。

3 结论

设计变电站工程现场智能测量设备数据批量导出系统,利用统一的数据采集手段采集变电站工程现场智能测量设备数据,采用透明转发技术实现设备运行信息快速接入,利用现有网络资源实现变电站工程现场智能测量设备数据批量导出,以实现设备数据的采集与集中管理以及众多智能测量设备的数据共享,提升数据利用率。系统测试结果验证采用该系统批量导出智能测量设备数据,可靠性较高,可满足变电站智能测量设备海量数据存储与处理需求,为变电站智能测量设备运行信息提供统一处理平台。

参考文献

- [1] 李刚,黄继东,倪传坤,等.智能变电站就地化保护仿真测试系统设计与探讨[J].电力系统保护与控制,2018,46(17):161-166.
Li Gang, Huang Jidong, Ni Chuankun, *et al.* Design and discussion of simulation test system for local protection of intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17):161-166.
- [2] 吴文宣,唐志军,晁武杰,等.基于智能变电站组合设备仿真测试与集成联调技术方案研究[J].电网与清洁能源,2018,34(4):42-48.
Wu Wenxuan, Tang Zhijun, Chao WuJie, *et al.* Research on simulation test and integrated joint debugging technology scheme of combined equipment based on intelligent substation[J]. Power Grid and Clean Energy, 2018, 34(4):42-48.
- [3] 邓科,李挺,蔡昂,等.基于Hopfield神经网络的变电站数据负载均衡系统研究[J].制造业自动化,2019,41(3):12-16.
Deng Ke, Li Ting, Cai Ang, *et al.* Research on substation data load balancing system based on Hopfield neural network[J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(3):12-16.
- [4] 李劲松,陆鑫,张金虎,等.基于IEC 61850的智能变电站数据隐私保护方法研究[J].陕西电力,2019,47(7):69-75.
Li Jinsong, Lu Xin, Zhang Jinhui, *et al.* Research on data privacy protection method of intelligent substation based on IEC 61850[J]. Shaanxi Electric Power, 2019, 47(7):69-75.
- [5] 黄海军,汤嘉立,冯新翎.数字化变电站数据通信不确定性阻塞仿真分析[J].计算机仿真,2019,36(9):194-197,287.
Huang Haijun, Tang Jiali, Feng Xinling. Simulation analysis of data communication uncertainty blocking in digital substation[J]. Computer Simulation, 2019, 36(9):194-197,287.
- [6] 李永兴,刘连义.变电站数据采集器专线MODEM的设计[J].计算机与数字工程,2019,47(9):2315-2320.
Li Yongxing, Liu Lianyi. Design of modem for substation data collector line[J]. Computer and Digital Engineering, 2019, 47(9):2315-2320.
- [7] 刘萍.数字化变电站中测量仪表数据采集系统设计[J].现代电子技术,2018,41(23):44-48.
Liu Ping. Design of measurement instrument data acquisition system in digital substation[J]. Modern Electronic Technology, 2018, 41(23):44-48.
- [8] 丁蓉,杨俊杰,吴猛,等.变电站巡检机器人高精度定位增强系统的设计与实现[J].仪表技术与传感器,2018,429(10):47-50,66.
Ding Rong, Yang Junjie, Wu Meng, *et al.* Design and implementation of high precision positioning enhancement system for substation inspection robot[J]. Instrument Technology and Sensor, 2018, 429(10):47-50,66.
- [9] 郝越峰,任曦,刘文明,等.电力系统变电站数据存储可靠性优化仿真[J].计算机仿真,2018,35(9):84-87.
Hao Yuefeng, Ren Xi, Liu Wenming, *et al.* Optimization simulation of data storage reliability of power system substation[J]. Computer Simulation, 2018, 35(9):84-87.
- [10] 孟荣,赵冀宁,褚罡.基于设备监控大数据的变电站运行风险评估[J].信息技术,2020,44(6):162-165,175.
Meng Rong, Zhao Jining, Chu Gang. Substation operation risk assessment based on equipment monitoring big data[J]. Information Technology, 2020, 44(6):162-165,175.
- [11] 许宗光,文继锋,李彦,等.一种基于数据冗余校验的数字化变电站继电保护装置防误方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(5):166-170.
Xu Zongguang, Wen Jifeng, Li Yan, *et al.* An error prevention method for digital substation relay protection device based on data redundancy check[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5):166-170.
- [12] 赵乐.铁路智能变电站变压器状态数据挖掘研究[J].陕西电力,2018,46(4):75-81.
Zhao Le. Research on status data mining of transformer in railway intelligent substation[J]. Shaanxi Electric Power, 2018, 46(4):75-81.
- [13] 任浩,闫卫国,王强,等.变电站历史数据分布式存储系统设计与实现[J].电气自动化,2019,41(4):83-85.
Ren Hao, Yan Weiguo, Wang Qiang, *et al.* Design and implementation of distributed storage system for historical data of substation[J]. Electrical Automation, 2019, 41(4):83-85.
- [14] 刘庆伟,刘炜,徐波,等.智能变电站过程层网络数据丢帧原因分析[J].自动化技术与应用,2020,39(4):61-65.
Liu Qingwei, Liu Wei, Xu Bo, *et al.* Analysis of the causes of network data frame loss in intelligent substation[J]. Automation Technology and Application, 2020, 39(4):61-65.
- [15] 韩伟,姜帅,马伟东,等.基于短地址关联数据标识的智能变电站虚回路可视化技术研究及应用[J].电力科学与技术学报,2018,33(4):95-101.
Han Wei, Jiang Shuai, Ma Weidong, *et al.* Research and application of virtual circuit visualization technology for intelligent substation based on short address associated data identification[J]. Journal of Power Science and Technology, 2018, 33(4):95-

101.

[16] 陈斌, 牛津文, 万红, 等. 变电站辅助设备监控系统三维建模及展示技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 180-186.
Chen Bin, Niu Jinwen, Wan Hong, *et al.* Research on 3D modeling and display technology of substation auxiliary equipment monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 180-186.

[17] 许鹏, 孙毅, 张健, 等. 基于人工智能代理的负荷态势感知及调控方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 178-189.
Xu Peng, Sun Yi, Zhang Jian, *et al.* Load situation awareness and regulation method based on artificial intelligence agent[J]. Power System Automation, 2019, 43(3): 178-189.

[18] 高旭, 马迎新, 王可, 等. 基于连通状态矩阵的智能变电站安措校核方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 195-202.
Gao Xu, Ma Yingxin, Wang Ke, *et al.* Security measures checking method for intelligent substation based on connected state matrix[J]. Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 195-202.

[19] 胡劲松, 石改萍, 孔祥玉, 等. 新技术对模块化智能变电站设计的影响分析和建议[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3): 107-112.

Hu Jinsong, Shi Gaiping, Kong Xiangyu, *et al.* Influence analysis and suggestions of new technology on modular intelligent substation design[J]. Journal of Power System and Automation, 2020, 32(3): 107-112.

[20] 庞传军, 余建明, 冯长有, 等. 基于LSTM自动编码器的电力负荷聚类建模及特性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 57-67.
Pang Chuanjun, Yu Jianming, Feng Changyou, *et al.* Power load clustering modeling and characteristic analysis based on LSTM automatic encoder[J]. Power System Automation, 2020, 44(23): 57-67.

[21] 韦明杰, 张恒旭, 石访, 等. 基于谐波能量和波形畸变的配电网弧光接地故障辨识[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 148-161.
Wei Mingjie, Zhang Hengxu, Shi Fang, *et al.* Arc grounding fault identification of distribution network based on harmonic energy and waveform distortion[J]. Power System Automation, 2019, 43(16): 148-161.

收稿日期: 2021-01-19
修改稿日期: 2021-01-26

~~~~~  
(上接第31页)

Huang Huazhen, Ke Junji, Sun Peng, *et al.* Influence of parasitic inductance mismatch on the parallel SiC MOSFET current distribution[J]. Semiconductor Technology, 2018, 43(11): 833-840.

[9] 张培远, 蒋伟, 吴应华, 等. 谐波电流的分频检测与分频控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(6): 17-22.  
Zhang Peiyuan, Jiang Wei, Wu Yinghua, *et al.* Strategy on frequency dividing detection and control of harmonic current[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6): 17-22.

[10] 宋建成, 王雪, 吝伶俐, 等. 基于无变压器型混合有源滤波器的快速重复控制策略的研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2037-2045.  
Song Jiancheng, Wang Xue, Lin Lingyan, *et al.* Study of fast repetitive control strategy based on transformerless hybrid active power filter[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2037-2045.

[11] 谢卫才, 王世豪, 何力, 等. 一种基于虚拟同步发电机的多逆变器微电网频率无差调节策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 169-175.  
Xie Weicai, Wang Shihao, He Li, *et al.* A frequent deviation-free regulation strategy of microgrid based on the VSG of multi-inverter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 169-175.

[12] 程启明, 王玉娇, 程尹曼, 等. 非理想条件下 MMC-SAPF 的

无源控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 7023-7032.  
Cheng Qiming, Wang Yujiao, Cheng Yinman, *et al.* Research on passive control strategy of MMC-SAPF under non-ideal conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 7023-7032.

[13] 刘正春, 朱长青, 王勇, 等. 抗 IPS 频率波动的两种改进重复控制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 3014-3023.  
Liu Zhengchun, Zhu Changqing, Wang Yong, *et al.* Two improved repetitive control methods against frequency fluctuation in IPS[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 3014-3023.

[14] 杨向真, 邓湾湾, 段梦珂, 等. 一种孤岛微电网先导节点选取方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 13-20, 26.  
Yang Xiangzhen, Deng Wanwan, Duan Mengke, *et al.* A selection method for pilot buses in an islanded micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(14): 13-20, 26.

[15] 张茂松, 池帮秀, 李家旺, 等. 有源电力滤波器基于准比例谐振的电流协调控制策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1614-1623.  
Zhang Maosong, Chi Bangxiu, Li Jiawang, *et al.* Study on quasi-pr current coordinated control for active power filter[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1614-1623.

收稿日期: 2020-09-15  
修改稿日期: 2021-01-27