

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.05.003

变电站站用电源系统在线状态评估系统架构及关键策略研究

Architecture and key strategy of online state assessment system for substation auxiliary power supply system

王立鼎¹, 詹庆才^{1*}, 殷建军¹, 杨常府¹, 王均慧¹, 聂晓波²

WANG Liding¹, ZHAN Qingcai^{1*}, YIN Jianjun¹, YANG Changfu¹, WANG Junhui¹,
NIE Xiaobo²

(1.北京四方继保自动化股份有限公司,北京 100085;2.北京交通大学 电气工程学院,北京 100044)

(1.Beijing Sifang Automation Company Limited, Beijing 100085, China; 2.School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

摘要:变电站站用电源系统是保障变电站安全可靠运行的重要环节,主要由站用交流电源系统、直流电源系统和交流不间断电源系统 3 部分组成。为了有效在线评估变电站站用交、直流电源的运行状态,提出一种主、子系统协同配合的变电站站用电源在线评估系统,介绍了主、子系统的主要功能及组成部分,详细阐述了评估流程,以及交流电源设备、逆变电源设备、直流/直流(DC/DC)通信电源设备和直流电源设备的评估原则及策略。结合系统在现场的实际应用情况,验证其可有效保障变电站站用电源系统的安全稳定运行,具备一定工程推广应用价值。

关键词:变电站;电源系统;在线状态评估;交流电源设备;逆变电源设备;DC/DC 通信电源设备;直流电源设备

中图分类号:TK 323;TM 734 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)05-0015-08

Abstract: Auxiliary power supply system of a substation is important to the station's safe and reliable operation. The system is mainly composed of AC power supply system, DC power supply system and AC uninterruptible power supply system. To effectively evaluate the operation states of AC and DC power supply systems, an online state assessment system for substation auxiliary power supply system is proposed which works with the collaboration of the main system and the subsystem. After introducing the main functions and components of the main and sub-systems, the assessing process and the criteria for assessing the AC power supply equipment, inverter power equipment, DC/DC communication power supply equipment and DC power supply equipment are expounded. According to its application situation in a substation, the assessment system is proven to be effective in keep the safe and reliable operation of auxiliary power supply system in substation. It is of engineering application value.

Keywords: substation; power supply system; online state assessment; AC power supply equipment; inverter power supply equipment; DC/DC communication power supply equipment; DC power supply equipment

0 引言

变电站站用电源系统是保障变电站安全可靠运行的一个重要环节,主要由站用交流电源系统、直流电源系统和交流不间断电源系统 3 部分组成^[1-6]。变电站直流电源系统是为变电站内自有设备供电的最重要的系统,其主要负荷为保护、测控及其他自动装置的电源、控制回路电源、操作回路

电源和事故照明负荷等。变电站直流系统的主要组成部分包括位于蓄电池室的蓄电池组、位于继电保护室的充电屏和馈电屏,以及位于各功能室的直流母线和直流负荷等^[7-10]。

如果变电站内的直流电源系统不能正常运行,变电站运行也会出现异常^[11-17]。针对变电站的站用电源系统安全和可靠运行问题,文献[1]提出了 500 kV 变电站在严重故障状态下如何保证站用电源可靠供电的方法。文献[2]针对站用电源系统存在单一故障导致站用电源系统全站失压的风险,从站用交流电源系统接线方式、运行方式及自动转换

收稿日期:2020-11-20;修回日期:2021-04-30

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(E17JB00030)

开关电器(ATSE)等角度进行了风险分析,提出了站用交流电源系统全站失压风险控制策略。文献[3]分析了站用电源系统的运行与检修现状,提出基于蓄电池内阻监测的状态检修方式,建立不同检修方式下站用电源系统的四状态 Markov 可靠性模型。但这些都是基于变电站内本地系统进行电源健康状态的评价和分析,没有采用调度主站和变电站协同配合的方式。同时,由于无法完全采集变电站低压电源系统的数据和状态信息,仅能反应系统已发生的故障情况,无法掌握低压电源系统设备运行状态的变化趋势,更不具备对变电站电源系统运行信息的在线状态评估能力,无法指导运维部门及时开展针对性的检修工作,无法切实保障变电站电源系统的安全稳定运行。因此,为了有效在线评估站用交、直流电源的运行状态,为变电站电力设备提供稳定运行和高质量的电源,研究与开发变电站站用电源系统在线状态评估系统是非常有必要的。

1 系统总体架构

本文设计的系统分为变电站站用电源在线状态评估主系统(以下简称主系统)和变电站站用电源在线状态评估子系统(以下简称子系统),架构如图1所示。

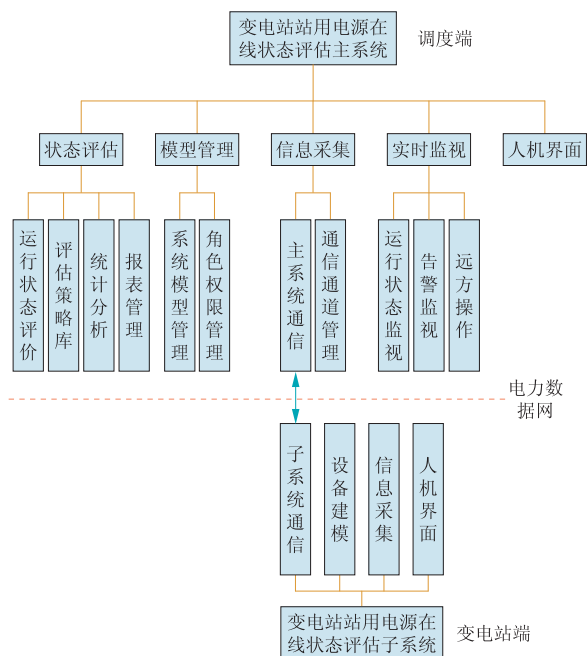


图1 变电站站用电源在线状态评估系统架构

Fig. 1 Architecture of the online state assessment system for auxiliary power supply system in substation

1.1 主系统架构

本文所设计的主系统部署在调度端,由采集服务器、数据服务器、应用服务器、工作站及通信网络

构成,主要功能模块包括信息采集模块、模型管理模块、实时监控模块、状态评估模块和人机界面模块。具体情况如下。

(1)信息采集模块包含负责与子站完成实时通信的主系统通信子模块,以及负责管理及配置主系统与子系统通信通道的通信通道管理子模块。

(2)模型管理模块包含负责解析子系统上送站用电源模型文件,实现主系统建模、系统模型编辑及信息关联策略配置的系统模型管理子模块,以及负责系统用户信息、角色及权限管理的角色权限管理子模块。

(3)实时监控模块包含负责处理实时信息的运行状态监视子模块,负责将告警信息解析、存储并推送至告警窗口的告警监视子模块,以及负责形成操作命令、监护操作命令执行过程的远方操作子模块。

(4)状态评估模块包含负责实时评价站用电源系统各设备及整体系统运行工况的运行状态评价子模块,负责编辑、存储及配置评估策略条件、逻辑、影响因素及结果的评估策略库子模块,负责统计分析系统历史信息的统计分析子模块,以及负责实时计算及形成考核数据的报表管理子模块。

(5)人机界面模块包含所有变电站电源系统及其子设备的设备树,全站级、站级、装置级3级状态监视及操作界面,以及告警窗、历史信息查询界面。

1.2 子系统架构

子系统部署在变电站端,由子系统服务器与站用电源系统及通信网络构成,主要功能模块包括如下几项。

(1)子系统通信模块,负责与主系统交互,转发站用电源系统各设备运行信息至主系统。

(2)设备建模模块,负责配置、编辑站用电源系统及各设备信息模型,并输出模型文件。

(3)信息采集模块,负责与站用电源系统各设备通信,采集设备实时运行信息。

(4)人机界面模块,包含站用电源系统各设备通信状态及子系统各子模块运行状态监视画面。

2 主要评估流程

变电站站用电源在线状态评估系统方法流程包括设备建模、运行信息采集、实时交互、形成监视界面、状态评估、状态评估结果输出和远方操作共7个主要步骤,11个子过程(①—⑪),如图2所示。

2.1 步骤1: 设备建模

按照变电站站用电源系统的设备组成、信息构成、通信协议及接口,对站用电源系统进行建模,从

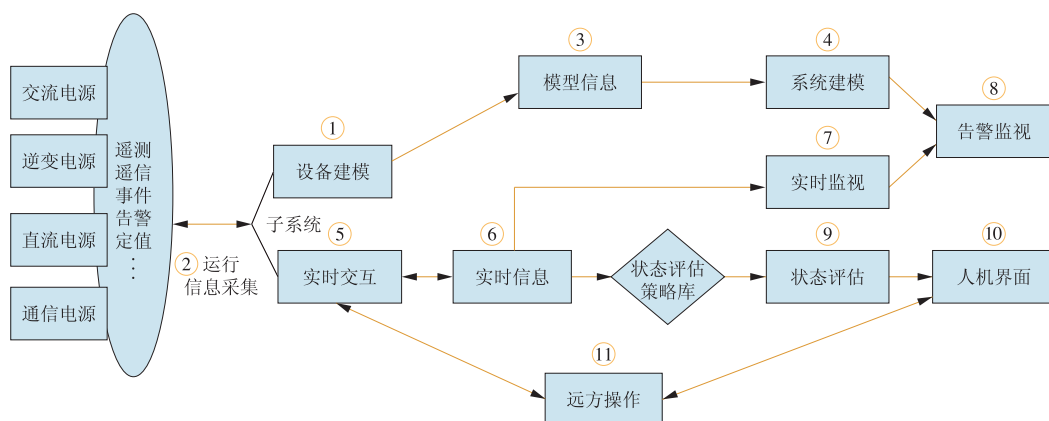


图2 变电站站用电源在线状态评估系统方法流程

Fig. 2 Working flow of the online state assessment system for auxiliary power supply system in substation

而构成变电站站用电源在线状态评估子系统。设备组成包括低压交流电源、通信电源、逆变电源、直流母线、直流电源、蓄电池组、蓄电池单体、充电装置、整流模块等设备;信息构成包括遥信、遥测、事件、告警及定值等信息;通信协议包括 IEC103, MODBUS, IEC61850 及厂家协议;通信接口包括 RJ45, RS485, RS232 及硬接点。建模模型文件以可扩展标记语言(XML)格式文件描述:XML 格式模型文件以变电站名称作为根元素,根元素下包含低压交流电源、通信电源、逆变电源、直流母线、直流电源、蓄电池组、蓄电池单体、充电装置、整流模块 9 个设备子元素。每个设备子元素包含遥信、遥测、事件、告警及定值 5 类信息子元素。低压交流电源、通信电源、逆变电源、直流母线、直流电源、蓄电池组、蓄电池单体、充电装置、整流模块设备均按照对应设备提供的信息点表划分为上述 5 类信息子元素,按照信息归属分别配置在相应的设备子元素下,最终形成变电站根元素、设备子元素和变电站电源系统模型。

2.2 步骤2: 运行信息采集

子系统按照“步骤1”中模型文件描述的设备通信接口、通信协议对站用电源系统各设备进行信息接入,实现站用电源系统的运行信息采集。

2.3 步骤3: 实时交互

子系统以基于传输控制协议(TCP)的主子站通信协议方式与主系统进行通信,子系统上送占用电源系统的模型信息、实时运行信息及操作交互信息。

2.4 步骤4: 形成监视界面

主系统收到子系统上的站用电源系统的模型信息,利用模型信息构建主系统端站用电源系统的数据模型,利用数据模型形成主系统人机界面使用的站用电源监视系统的监视界面,包括可缩放的矢

量图形(SVG)、表格及系统设备树等。

2.5 步骤5: 状态评估

主系统接收到子系统上的站用电源系统的实时运行信息后,利用主系统构建模型数据与“电源系统运行状态评估策略库”的评估项、评估量及评估策略(算法),对实时信息进行识别和判定,如图2中“状态评估策略库”。判定结果分为故障告警类与状态评估类。故障告警类直接判定设备状态异常,状态评估类为评价当前站用电源系统可用率及构成各设备的运行健康状态,如图2中“状态评估”。两类信息分别应用于主系统告警监视窗口及状态评估浏览窗口。

2.6 步骤6: 状态评估结果输出

主系统接收到子系统上的站用电源系统的实时运行信息及操作交互信息后,实时反馈至主系统对应的监视界面,以便监视浏览。同时实时信息会及时存储于主系统历史信息库中,用于主系统状态评估模块的状态评价、统计分析及报表管理。

2.7 步骤7: 远方操作

主系统的监视界面发起远方操作命令,命令包括:远方控制交流电源切换、充电装置充电方式切换、远方控制交流电源进线开关、交流电源母线分段开关、直流电源交流进线开关、充电装置输出开关、蓄电池输出保护电器、直流母线分段开关、交流不间断电源(逆变电源)输入开关、直流变换电源输入开关、蓄电池带载放电。操作命令由子系统实时下传到站用电源系统的相应设备,操作过程及结果由子系统实时交互模块反馈至主系统,并在主系统人机界面显示命令执行过程及结果。

3 关键评估原则和策略

本文设计的变电站站用电源在线状态评估系统按照变电站站用电源的系统组成及设备工况关

键特征形成评估策略,如图 3 所示,图中 AST 为自动转换开关电器。

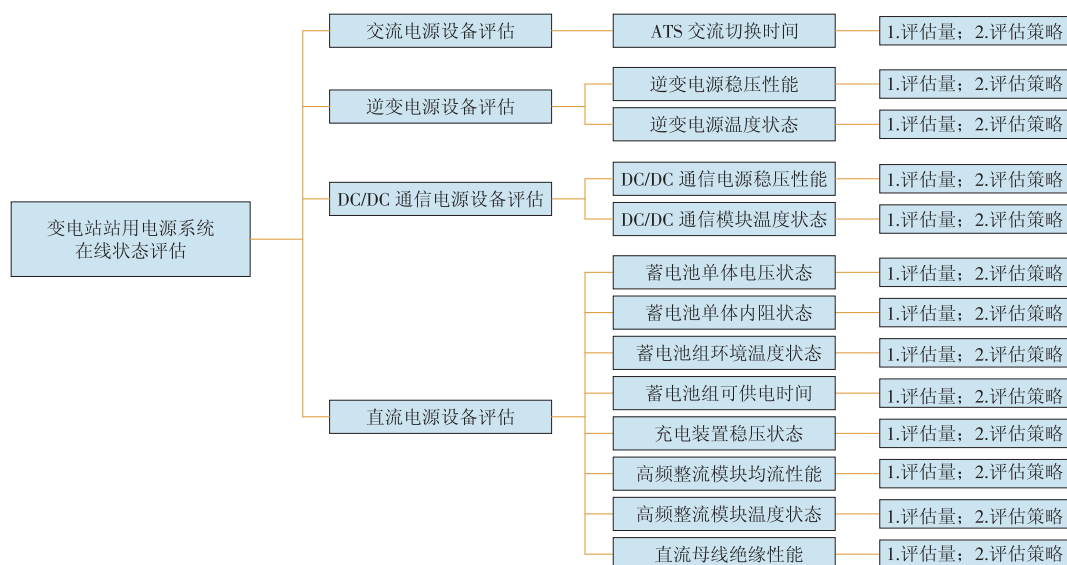


图3 变电站站用电源在线状态评估系统的评估策略

Fig. 3 Strategy of the online state assessment system for auxiliary power supply system in substation

评估策略包括交流电源设备评估、逆变电源设备评估、直流/直流(DC/DC)通信电源设备评估与直流电源设备评估。

3.1 交流电源设备评估

交流电源设备评估关键是对 ATS 交流切换时间的评估,包括交流电源进线 1 路开关(状态)、交流电源进线 2 路开关(状态)2 个评估量。

评估策略为:ATS 不同次的交流切换时间应无变化。每次 ATS 切换后,计算切换变化时间差,进行分值评估。评估策略为:获取交流电源 1,2 路开关状态。1 路开关变位开始计时,时标 t_1 ,2 路开关变位说明切换完成,时标 t_2 。ATS 交流切换时间就是 $t = t_2 - t_1$ 。

(1)记录首次交流切换时间为 t_0 ,当再次发生交流切换时,得到交流切换时间 t_x ,计算与第 1 次交流切换的时间差 $t = t_x - t_0$ 。

(2)当计算的 ATS 交流切换时间差大于 10 s,对 ATS 进行预警。评估默认时间点为每次 ATS 切换的时刻。

3.2 逆变电源设备评估

对逆变电源设备评估关键是对逆变电源稳压性能和逆变电源温度状态进行评估。

3.2.1 逆变电源稳压性能评估

逆变电源稳压性能评估包括输出电压、故障状态、异常状态 3 个评估量。评估策略如下。

(1)获取逆变电源装置输出电压的当前测量值 U_i 。检测周期内,更新最大值 $U_{\max}$ 、最小值 $U_{\min}$ 。计算平均值为

$$U_0 = (\sum_{i=0}^n U_i) / n, \quad (1)$$

式中: n 为输出电压采样测量次数。

计算偏离值为

$$U = \max(|U_{\max} - U_0|, |U_0 - U_{\min}|)。 \quad (2)$$

(2)稳压精度 x 的计算公式为

$$x = \frac{U}{U_0} \times 100\%。 \quad (3)$$

计算逆变电源装置的稳压精度,当稳压精度大于 2.75,对逆变电源进行预警。

(3)逆变电源装置异常时,不进行预警;恢复正常后宜重新开始检测周期。

(4)逆变电源装置故障时,不进行预警;恢复正常后宜重新开始检测周期。

3.2.2 逆变电源温度状态评估

逆变电源温度状态评估包括逆变电源装置温度 1 个评估量。评估策略如下。

(1)获取第 i 台逆变电源装置的温度 t_i ,计算平均值为

$$\bar{t} = (\sum_{i=0}^n t_i) / n, \quad (4)$$

式中: n 为逆变电源装置数。

(2)计算模块温度与平均温度差 $t = t_i - \bar{t}$ 。当温度差大于 70 ℃,逆变电源进行预警。

3.3 DC/DC 通信电源设备评估

DC/DC 通信电源设备评估关键是对 DC/DC 通信电源稳压性能和 DC/DC 通信模块温度状态的评估。

3.3.1 DC/DC通信电源稳压性能评估

对DC/DC通信电源稳压性能评估包括母线电压、直流输入异常状态、直流输出异常状态3个评估量。评估策略如下。

(1)获取通信电源装置输出电压的当前测量值 U_i 。检测周期内,更新最大值 $U_{\max}$ 、最小值 $U_{\min}$ 。计算平均值为

$$U_0 = (\sum_{i=0}^n U_i)/n, \quad (5)$$

式中: n 为输出电压采样测量次数。

(2)根据式(2)计算偏离值,根据式(3)计算稳压精度,若稳压精度大于55%,则对DC/DC通信电源进行预警。

(3)DC/DC通信电源直流输入异常时,不计算稳压精度,不评估DC/DC通信电源;恢复正常后宜重新开始检测周期。

(4)DC/DC通信电源母线电压越限,DC/DC通信电源直流输出异常,此时不进行预警;恢复正常后宜重新开始检测周期。

3.3.2 DC/DC通信模块温度状态评估

对DC/DC通信模块温度状态评估包括通信模块温度、模块故障状态2个评估量。评估策略如下。

(1)获取DC/DC通信电源第 i 个模块的温度 t_i ,用式(4)的方法计算平均值 $\bar{t}$,计算各DC/DC通信模块温度与平均温度的差 $t = t_i - \bar{t}$ 。

(2)当温度差大于10℃,对该DC/DC通信模块进行预警。

(3)DC/DC通信模块故障时,不进行预警。

需要说明的是,本文提出的评估策略3.2和3.3比较相似。

3.4 直流电源设备评估

直流电源设备评估关键是对蓄电池单体电压状态、蓄电池单体内阻状态、蓄电池组环境温度状态、蓄电池组可供电时间、充电装置稳压状态、高频整流模块均流性能、高频整流模块温度状态与直流母线绝缘性能进行评估。

3.4.1 蓄电池单体电压状态评估

蓄电池单体电压状态评估只有蓄电池浮充电压(历史数据)1个评估量。

评估策略为:各单体蓄电池浮充电压应稳定。获取每天新的浮充电压数据后,纵向计算电压变化率,进行分值评估,评估策略如下。

(1)获取单体电池电压 U_2 与上一次的电池电压 U_1 ,计算电压变化率为

$$M_1 = \frac{|U_2 - U_1|}{U_1}。 \quad (6)$$

(2)计算单体电池电压 U_i 的平均电压为

$$U_0 = (\sum_{i=0}^n U_i)/n, \quad (7)$$

式中: n 为蓄电池单体数。

计算电压偏差率为

$$M_2 = \frac{|U_2 - U_0|}{U_0}。 \quad (8)$$

(3)计算单电池电压的综合偏差率为

$$M = M_1 \times k_1 + M_2 \times k_2, \quad (9)$$

式中: k_1 为电压变化率系数; k_2 为电压偏差率系数; $k_1 + k_2 = 1$,一般 $k_1 = k_2 = 0.5$ 。

(4)当综合偏差率 M 大于0.75时,进行预警。

(5)单体电池电压不在正常范围内,不进行预警,而是直接报警。评估数据源为蓄电池浮充电压值,评估默认周期是1d。

3.4.2 蓄电池单体内阻状态评估

蓄电池单体内阻状态评估包括蓄电池内阻(历史数据)1个评估量。

评估策略为:蓄电池故障,如板栅腐蚀、接触不良等,都会导致蓄电池单体内阻增大的现象。蓄电池组进行一次内阻测试,按照内阻标准值进行修正后作为内阻分析初始值 R_1 。然后按照周期进行内阻测试,每次测试的结果 R_2 与初始值进行比较,系统根据变化趋势来分析该只电池的当前状态。每月获取新的内阻数据后,纵向计算内阻增大的变化率并进行评估,具体如下。

(1)内阻变化率计算公式为

$$N_1 = (R_2 - R_1)/R_1。 \quad (10)$$

(2)获取每只蓄电池的内阻 R_i ,计算所有蓄电池的平均内阻为

$$R_0 = (\sum_{i=0}^n R_i)/n, \quad (11)$$

式中: n 为蓄电池数。

计算差异比值为

$$N_2 = (R_2 - R_0)/R_0。 \quad (12)$$

(3)计算综合差异率为

$$N = N_1 \times l_1 + N_2 \times l_2, \quad (13)$$

式中: l_1 为变化率得分系数; l_2 为差异比值得分系数; $l_1 + l_2 = 1$,一般 $l_1 = l_2 = 0.5$ 。

(4)当综合差异率 N 大于0.15,对此蓄电池进行预警。

(5)超过20%的蓄电池需要预警时,对蓄电池组报警。评估数据源为蓄电池内阻值,评估默认周

期为1个月。

3.4.3 蓄电池组环境温度状态评估

对蓄电池环境温度评估包括蓄电池组环境温度1个评估量。

评估策略为:蓄电池组环境温度直接影响蓄电池容量,其环境温度应稳定。在设定时间点对环境温度数据进行分值评估。评估策略为:(1)获取蓄电池组问题;(2)蓄电池组环境温度大于35℃或小于0℃时,对蓄电池组环境温度进行预警。评估数据来源为蓄电池在线监测装置实时上送蓄电池组的环境温度数据,评估默认周期为1d。

3.4.4 蓄电池组可供电时间评估

对蓄电池组可供电时间评估包括站用交流失电信号、蓄电池监测装置反馈的电池组电压、蓄电池可供电时间3个评估量。

评估策略为:(1)由站用交流失电信号启动蓄电池组可供电时间评估;(2)获取蓄电池在线监测装置实时上送的蓄电池组电压、蓄电池可供电时间信息;(3)设置可供电时间预警值,一般为2h,当蓄电池组单体电压小于1.8V或蓄电池可供电时间小于2h,对蓄电池组可供电时间进行预警。

3.4.5 充电装置稳压状态评估

对充电装置稳压状态评估包括直流母线电压、直流母线电压异常状态、蓄电池组放电状态这3个评估量。

评估策略为:蓄电池组浮充状态下,充电装置的输出电压应保持稳定。在设定时间点对充电装置稳压状态进行分值评估。评估策略如下。

(1)获取直流电源母线电压当前测量值。检测周期内,更新最大值 $U_{\max}$ 、最小值 $U_{\min}$ 。计算平均值 U_0 。

(2)计算充电装置的稳压精度,当稳压精度大于45%,对充电装置进行预警。

(3)预警仅在浮充条件下实施。

(4)直流母线电压异常时,不进行预警;恢复正常后宜重新开始检测周期。

(5)蓄电池放电时不进行预警;恢复正常后宜重新开始检测周期。评价数据源是实时遥测及遥信信息,评估默认周期是1d。

3.4.6 高频整流模块均流性能评估

高频整流模块均流性能评估包括充电装置高频整流模块输出电流、直流电源高频整流模块故障状态2个评估量。

评估策略为:整流模块具有均流功能,充电、浮充电装置在额定负载电流的50%~100%范围内,其均流不平衡度应不超过±5%,均流特性变差也一定

程度上预示着高频整流模块的性能变化。在设定时间点对充电装置的高频整流模块的均流性能进行分值评估。评估策略如下。

(1)获取充电装置各个高频整流输出电流 I_i ,计算平均值为

$$I_a = (\sum_{i=0}^n I_i) / n, \quad (14)$$

式中: n 为周期 T 内的采样点数。

(2)计算各整流模块与平均电流的偏差为

$$\delta = |I_i - I_a|, \quad (15)$$

当 δ 大于0.75时,对高频整流模块均流性能进行预警。

(3)直流电源高频整流模块为故障状态,不必预警,不参与计算。评估数据源为实时和历史的遥测信息,评估默认周期是1d。

3.4.7 高频整流模块温度状态评估

对高频整流模块温度状态评估包括充电装置高频整流模块温度、直流电源高频整流模块故障状态2个评估量。评估策略为:各高频整流模块温度应相差不大。在设定时间点对充电装置的高频整流模块温差值进行分值评估。评估策略为:(1)获取充电装置第 i 个高频整流模块温度 t_i ,计算平均值 $\bar{t}$,计算该模块温度与平均值的差 $t = t_i - \bar{t}$;(2)温差大于10℃,对该高频整流模块进行预警;(3)该高频整流模块故障时,不进行预警。评估数据源为召唤遥测信息和实时遥测信息,评估默认周期为1d。

3.4.8 直流母线绝缘性能评估

对直流母线绝缘性能评估包括直流母线正对地电阻、直流母线负对地电阻2个评估量。评估策略为:220V直流系统要求以上2个参与评估的电阻在25kΩ以下报警。直流电源支路绝缘接地或者母线绝缘接地都会体现在直流母线对地电阻上,根据直流母线正对地电阻、负对地电阻的变化判断直流系统的绝缘状态。评估策略为:获取直流母线正对地电阻、负对地电阻信息,取正、负对地电阻阻值较低者,当上述较低者对地电阻小于25kΩ(220V)时报警,小于50kΩ时预警。评估数据源为遥测信息、实时遥信信息,评估默认周期是1d。

4 现场应用情况

本文设计的变电站站用电源在线状态评估系统已于2019年年初部署应用到福建省电力公司的泉州、三明、厦门和福州等地区的供电公司调控一体化平台中。通过1年多的实际运行与对系统进行的优化完善,目前整体运行情况良好。以2019年5

月某个在线状态评估结果为例,共评估122个设备,105个设备正常,正常率为86.06%,总体评估结果如图4所示。ATS历史数据的变化趋势曲线如图5所示。直流电源状态评估结果如图6所示,小于等于60分的结果以粉红色预警标志,高于60分的结果给出正常标志。



图4 总体评估结果

Fig. 4 Overall assessment results

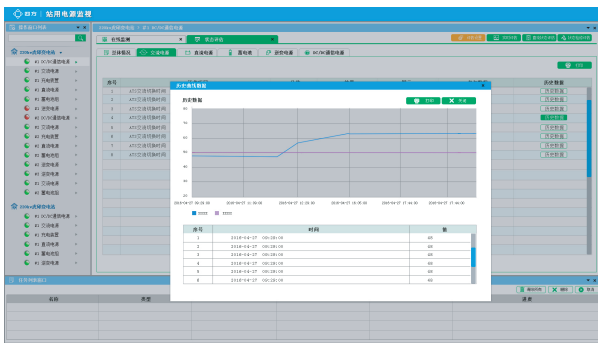


图5 ATS历史曲线

Fig. 5 ATS historical curve



图6 直流电源状态评估结果

Fig. 6 State assessment results of DC power supply

5 结束语

本文所设计的变电站站用电源在线状态评估系统、方法及策略,可实时采集变电站站用电源系统的数据、状态信息,即时反映系统发生的故障,在线评估站用电源系统设备运行状态的变化趋势,有效辅助运维人员分析处理变电站站用电源系统运行异常及故障,指导运维人员即时开展针对性的检

修工作,切实保障变电站站用电源系统的安全稳定运行。

参考文献:

- [1]万仲海.在严重故障下保证站用交流电源可靠供电的处理方法[J].电工技术,2020(4):141-142,152.
- [2]肖星,李新海,范德和,等.变电站站用交流电源系统失压风险分析与控制策略研究[J].电工技术,2019(23):86-89.
- [3]滕明星,胡敏,苏盛.基于蓄电池状态检修的站用电源系统可靠性研究[J].电测与仪表,2019,56(11):26-31.
- [4]王祥东,谢旭琛,宋莹.500 kV变电站站用电系统故障原因分析及应对措施[J].通信电源技术,2018,35(11):267-270.
- [5]汪斌,慕德凯,吴傲,等.临沂换流站站用电系统设计[J].山东电力技术,2018,45(9):34-37.
- [6]滕明星.基于故障树与Markov模型的站用电源系统可靠性分析[D].长沙:长沙理工大学,2018.
- [7]李世亮,刘耀辉,宋琪.特高压换流站直流电源系统方案设计[J].电力安全技术,2018,20(3):16-19.
- [8]熊铠.220 kV变电站站用电源系统改进设计与运维[D].广州:广东工业大学,2017.
- [9]梁国坚,李福鹏,朱玲芬,等.浅析智能变电站电源系统的设计及应用[J].电源技术,2017,41(9):1371-1373.
- [10]王婷,杨铭,张侃君,等.湖北电网变电站站用交直流电源系统运行分析[J].湖北电力,2017,41(7):6-11.

- substation in Hubei power grid[J]. Hubei Electric Power, 2017, 41(7): 6-11.
- [11] 王石祥. 一起 110 kV 变电站交流电源系统事故分析[J]. 山东工业技术, 2017(7): 181, 246.
- [12] 谭明, 庞鹏. 500 kV 变电站站用交流电源全失事件的分析及建议[J]. 电工技术, 2017(3): 105-106.
- [13] 陈禹安, 金戈. 500 kV 东坡变电站站用交流电源系统的配置及探讨[J]. 电气开关, 2016, 54(5): 99-101.
CHEN Yu-an, JIN Ge. Configuration and discussion of AC power substation system in 500 kV Dongpo station [J]. Electric Switcher, 2016, 54(5): 99-101.
- [14] 贺瞰, 刘邦银, 段善旭. 一种逆变电源组网的选择性保护策略[J/OL]. 高电压技术 (2021-04-19) [2021-04-25]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201608>.
HE Jian, LIU Bangyin, DUAN Shanxu. A selective protection strategy for the inverter-based power grid[J/OL]. High Voltage Engineering (2021-04-19) [2021-04-25]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201608>.
- [15] 沈学良, 王贺云, 贾亚飞. 用户多电源供电储能系统蓄电池充放电控制研究[J]. 机械与电子, 2021, 39(4): 59-64.
SHEN Xueliang, WANG Heyun, JIA Yafei. Study on battery charge and discharge control of user multi-power supply energy storage system[J]. Machinery & Electronics, 2021, 39(4): 59-64.
- [16] 郑丽娟, 郭强, 胡翔, 等. 基于物联网信息集成的箱式变电站运行状态综合监控系统研究[J]. 华电技术, 2021, 43(1): 12-18.
ZHENG Lijuan, GUO Qiang, HU Xiang, et al. Research on comprehensive monitoring system for in-service states of prefabricated substations based on IoT information integration[J]. Huadian Technology, 2021, 43(1): 12-18.
- [17] 郭强, 郑丽娟, 余桂华, 等. 箱式变电站出厂试验智能化测试管理系统设计[J]. 华电技术, 2021, 43(1): 24-30.
GUO Qiang, ZHENG Lijuan, YU Guihua, et al. Research on intelligent management system of prefabricated substation delivery test[J]. Huadian Technology, 2021, 43(1): 24-30.

(本文责编: 张帆)

作者简介:

王立鼎(1974—), 男, 福建福安人, 高级工程师, 硕士, 从事电力自动化方面的工作(E-mail: liding.wang@sf-auto.com).

詹庆才*(1982—), 男, 江西上饶人, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统软件开发与项目管理方面的工作(E-mail: zhanqingcai@sf-auto.com).

殷建军(1981—), 男, 甘肃酒泉人, 高级工程师, 从事智能运行管控产品解决方案和项目管理方面的工作(E-mail: yinjianjun@sf-auto.com).