

环网柜蓄电池健康状态监测及防盗报警系统设计

李永彬¹ 高永强¹ 张志东¹ 胡晓艳¹ 宋翔昱¹ 栾贻青²

LI Yongbin GAO Yongqiang ZHANG Zhidong HU Xiaoyan SONG Xiangyu LUAN Yiqing

摘要

环网柜蓄电池受其运行中自然环境、电气环境、运维环境等因素影响,健康状况较差,经常存在失效、丢失等问题,造成大量的故障隐患。基于此,文章介绍了一种环网柜蓄电池健康状态监测及防盗报警系统的开发过程,通过实时检测单体蓄电池的电压、电流、内阻、温度等参数,计算蓄电池的充放电电量,估计蓄电池的衰减状态,实现蓄电池健康状态的全面在线监测;同时开发了防盗报警系统,通过防盗检测、视频监控、声光报警等方式解决蓄电池盗窃丢失问题。本系统已在东营供电公司多个环网柜进行了安装应用,确保了环网柜蓄电池作为后备供电的可靠性,保障了系统的安全可靠运行。

关键词 环网柜; 蓄电池; 健康状态; 在线监测; 防盗报警

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.02.015

0 引言

环网柜因其结构简单、使用灵活、体积小、价格低等优点,在城市住宅小区、高层建筑、大型公共建筑、工厂企业等负荷中心的配电站以及箱式变电站中得到广泛应用^[1]。环网柜一般采用小容量铅酸蓄电池作为后备电源,由于环网柜长期在室外运行,环境较为复杂^[2],尤其在北方地区,夏天运行温度高达40~50℃,冬天温度可能低于-10℃,且湿度变化大,容易导致蓄电池出现膨胀、端子生锈、腐蚀等问题,蓄电池运行的健康状态较差,使用寿命达不到设计要求。另一方面,由于环网柜长期暴露在室外,容易发生蓄电池盗窃、丢失等问题,而且蓄电池丢失后难以及时发现,给系统运行带来很大的安全隐患,增加运维成本。

1 系统功能设计及系统架构

本系统用于对环网柜内电源系统的健康状态进行监测评估,环网柜内一般安装有4组铅酸蓄电池,电池容量7~12 Ah不等,电池通过串联方式连接,输出电压为48 V。蓄电池出厂时总会存在一定的个体差异,在运行过程中主要体现在电池的内阻、电压、温度上^[3]。由于电池组串联使用,每个蓄电池流过的电流相同导致内阻较大的电池发热较多,发热进一步导致内阻变大,形成正反馈过程。因此,在运行一段时间后,蓄电池组会产生严重的不均衡现象,加剧整组蓄电池的劣化。

该系统深入研究了蓄电池的运行、监测、维护等关键技术,通过全面监测蓄电池的单体电压、单体内阻、充放电电流、充放电次数等各个参数,计算蓄电池的充放电电量,估计蓄电池的衰减状态,通过RS485采用Modbus协议上传至后台系统,对蓄电池的健康状态进行综合评判,实现电池实时性能的可视化展示、历史状态的查询对比以及使用寿命的分析预估。该系统同时具备防盗报警功能,一方面通过检测蓄电池开路电压的变化判断电池组是否受到人为破坏,并向后台系统发出报警信号;另一方面通过监测环网柜开门状态、人体感应和识别等方式触发防盗报警和录像,保障系统安全运行。该系统总体架构如图1所示。

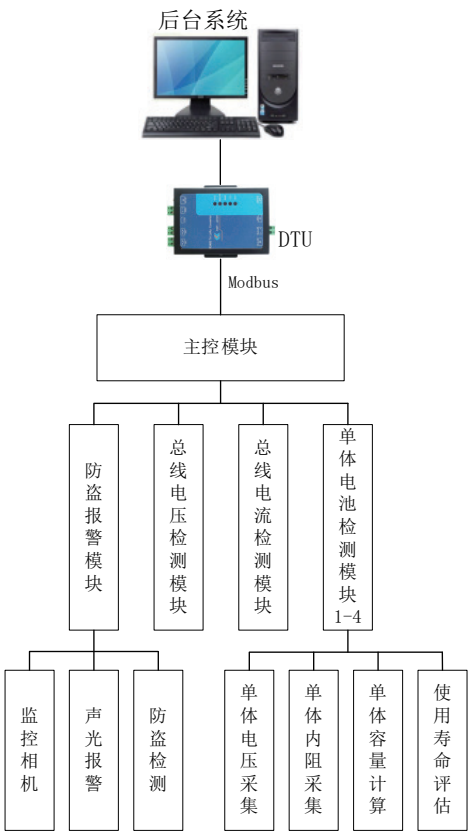


图1 系统架构

1. 国网山东省电力公司东营供电公司 山东东营 257000
2. 山东乐普韦尔自动化技术有限公司 山东济南 250101

1.1 主控模块

主控模块是本系统的核心控制单元，基于 TM32F103CB 单片机开发，包含电源电路、4 路 AD 采集电路、4 路 IO 输入输出电路、SBUS 总线驱动电路、RS485 总线驱动电路等，实现 485 通讯与 SBUS 通讯之间的转化，将采集的蓄电池电压、温度、内阻、充电状态等参数通过 Modbus 协议经 DTU 传输给后台系统。

SBUS 用于实现多个单体电池检测模块与主控模块之间的双向数据交换，该总线为电压驱动模式，采用两组屏蔽双绞线（TX+GND+VCC 及 RX+GND+VCC）将各个单体电池检测模块串接起来，最大可支持 254 个设备。SBUS 是一种半双工系统，信息只能单方向传输^[4]，数据传输率为 9600 bit/s，使用时主控模块通过设备 ID 循环向各个检测单元发送数据请求，以启动测量和获取蓄电池参数。SBUS 接口电路原理如图 2 所示，由于 SBUS 的信号采用负逻辑，需要将电平进行反向^[5]，为提高系统的抗干扰性能，接口采用光电隔离电路。

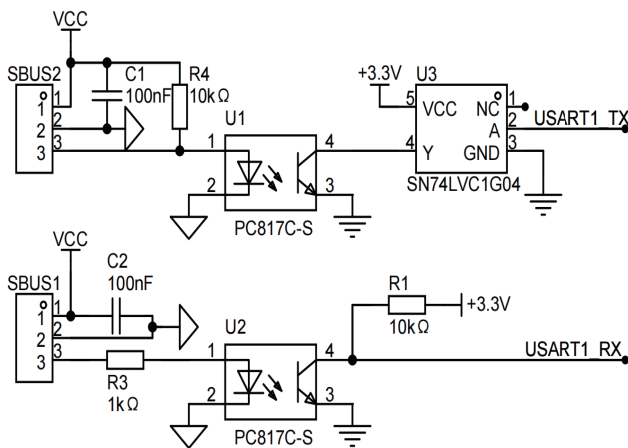


图 2 SBUS 接口电路

RS485 总线驱动电路基于 SN65HVD72 芯片开发，采用自动收发电路设计，支持 485 接口级联通信。主控模块预留了 4 路 AD 采集电路，可实现多组蓄电池的总线电压和电流检测。预留 4 路 IO 输入和 4 路 IO 输出电路，用于实现开门、入侵等状态信号的检测，声光报警、相机动作的控制，以及系统开关状态变量的输出。

Modbus 是一种开放式现场总线通信协议，广泛应用于工业控制领域^[6]。该协议定义一个与物理层无关的数据单元，帧结构包含地址、功能码、数据段和校验码^[7]。其中数据段是请求和响应的主要内容，由寄存器读取的初始地址和读取的寄存器个数组成，寄存器地址用 2 个字节表示。本系统基于开源的 Modbus 协议库 FreeModbus 开发，定义了系统信息、单体电池信息、电池组信息等数据。

1.2 单体电池内阻测量

蓄电池的健康状态与电池内部综合状态密切相关，而蓄电池内部状态任意变化都会引起电池内阻的变化，因此蓄电池内阻是反应电池健康状态和老化程度的重要特征参数。蓄电池内阻值一般较小，通常在 50 mΩ 以下^[8]，且电池内部化学反应也会对电池内阻造成影响，因此导致蓄电池内阻测量非常困难，普通方法难以实现精确测量。

针对环网柜小容量电池的特点，本系统采用脉动直流放电法测量蓄电池的内阻，测量原理为：以一定频率对电池进行小电流放电，测量电池上的瞬间电压降和瞬间放电电流，然后通过欧姆定律计算出电池内阻。该方法放电电流在零点几到几安不等，一般不超过 5 A，对蓄电池寿命不造成影响，实现简单，测量精度高，可在线全天测量。

根据上述原理设计的单体电池参数检测模块如图 3 所示。主要包含激励电路、采样电路和信号处理电路三部分。激励信号通过 MOS 管控制放电电路的通断，并通过精确控制开关时间，从而产生瞬时放电电流。采用直流放电进行检测时，放电电流越大可以得到更加精确的测量结果，但电流较大时会导致蓄电池和负载发热。本系统放电电路选用 5 Ω 水泥电阻，放电电流控制在 0.2~0.3 C，放电时间低于 100 ms，避免放电对蓄电池造成冲击。

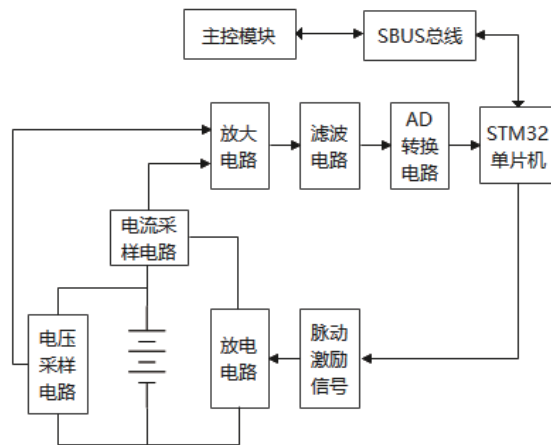


图 3 单体电池参数检测模块原理

在蓄电池放电过程中，通过采样电路分别获取放电电流 I 以及放电期间的蓄电池电压降 ΔU ，经过信号处理电路传输给单片机进行转换，最后通过欧姆定律即可计算得到蓄电池内阻 $R_b = \Delta U / I$ 。

1.3 蓄电池的容量计算

蓄电池的容量（SOC）是表示其放电能力的重要指标参数，环网柜中蓄电池一般作为备用电源使用，如电池长期处于馈电状态会严重损害电池的性能，会导致在需要蓄电池供电时无法提供充足的电能而影响设备安全。蓄电池容量的常用检测方法主要包括电流积分法、内阻法、密度法、

放电曲线近似法等^[9]，本文采用电流积分法测量蓄电池的剩余容量。

首先将电池电量充满，当浮充电压符合厂家推荐值时，蓄电池容量达到厂家的标称容量，此时其电量为 100%。接入负载后，通过电流采样电路实时采集放电电流，电流与时间积分为安时 (Ah) 即为电池的放电容量，用蓄电池的标称容量减去放电容量，可得到电池的剩余容量。电池的容量计算方法用公式表示为：

$$SOC = \int_0^t i(t) dt \quad (1)$$

实际设计应用中，通过高速周期性采样获取电池电流，采样频率 1 kHz，采用离散求和的方式计算电池的实际容量其公式为：

$$SOC = \sum I \times \Delta t \quad (2)$$

式中：I 为周期性采样的实时电流；Δt 为采样周期 1 ms。

充电过程中，同样用上述方法计算电池的充电容量。多次循环充放电后，该方法会产生累积误差导致电量计算出现偏差，因此在电池每次充满电达到浮充状态时，自动对电池电量进行一次校准。实际上，环网柜电池大部分时间处于浮充备用状态，因此该方法获取的电池容量精度足够满足应用需求。而且，为进一步提高检测的准确度，系统安装时会对电池的标称容量进行核定。用百分比表示的电池剩余电量：

$$\text{剩余电量}(\%) = \frac{\text{核定容量} - \text{使用容量}}{\text{核定容量}} \times 100\% \quad (3)$$

1.4 蓄电池健康状态的综合预估

环网柜蓄电池作为备用电池，正常情况下长期处于浮充状态，因此其浮充“服役寿命”是最重要的参考指标。对于新投入使用的蓄电池，其实际容量能够达到标称容量值，但随着蓄电池“服役”时间的增加，蓄电池会逐渐老化，实际放电能力会下降，根据 ANSI/IEEE 1188—2005 的规定，当蓄电池实际有效容量下降到电池额定容量的 80% 时，应当进行维护或更换^[10]。

通常用电池当前有效容量与电池标称容量的比值来描述蓄电池的健康状态 (SOC)，其公式为：

$$SOC = \frac{\text{当前有效容量}}{\text{电池标称容量}} \times 100\% \quad (4)$$

蓄电池的当前有效容量需要通过电池的满充满放来获取。按照前面所述的电池容量计算方法，当蓄电池充满电时电量记为 100%，此时电池容量即标称容量。在蓄电池放电使用过程中，通过式 (2) 电流时间积分的方法计算蓄电池的实际放电容量，当完全放电时所使用的容量即为蓄电池的当前有效容量。在放电过程中，对蓄电池满放状态的判断通过

检测蓄电池的端电压实现，当蓄电池的电压降至低于蓄电池的截止电压时，认为蓄电池达到满放状态。对于 12 V 铅酸蓄电池，放电截止电压一般为 10.5 V。在电池充电过程中，采用上述同样的方法计算蓄电池的健康状态。

对于环网柜蓄电池，由于大部分时间处于浮充状态，仅采用以上方法难以及时对电池的健康状态做出判断，因此在浮充状态下，本系统结合电池的内阻测量预估电池的健康状态。研究表明，蓄电池的有效容量与其内阻存在负相关的关系，即电池有效容量越高，内阻越小，反之电池有效容量越低，内阻越大^[11]。但对于不同的电池单体，由于个体性能存在差异，无法用统一的容量 vs 内阻函数描述其对应关系，因此只能通过与单体电池自身的历史数据进行比较，对其健康状态进行估计。在蓄电池充放电过程中，对电量每 1% 的变化记录一个内阻值，建立一个 SOC 与内阻的对应关系表，从而得到 SOC 与内阻的关系模型。浮充状态，蓄电池的理论剩余容量为 100%，根据 SOC 与内阻的关系模型，蓄电池的实际容量通过检测内阻获得，从而根据式 (4) 预估蓄电池的健康状态。本系统蓄电池健康状态的综合预估方法如图 4 所示。

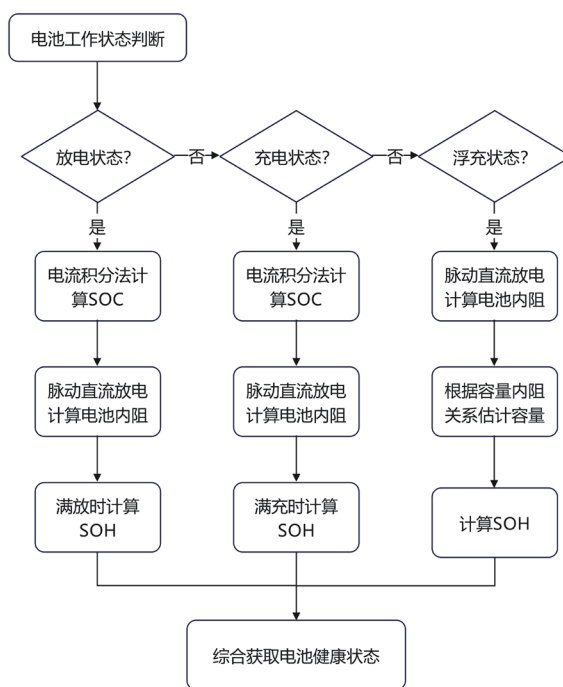


图 4 蓄电池健康状态综合预估流程

1.5 防盗报警模块

防盗报警模块主要用于环网柜门被外部打开或者电池被盗取时，自动检测入侵状态并与监控摄像头联动获取操作人员的图像、视频数据，为管理人员判断是否为非法入侵提供依据，同时现场进行声光报警。防盗报警模块主要包括入侵检测和监控摄像两部分，其工作原理如图 5 所示。

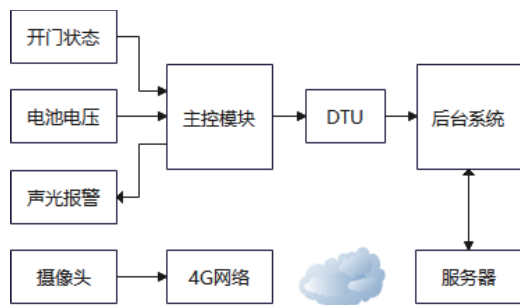


图 5 电池防盗报警模块

入侵检测主要包含开门检测和电池盗取两种方法，开门检测通过安装在门沿上的行程开关实现，电池盗取检测通过检测电池端电压实现，如果电池电压突变为零，则认为电池正被盗取。检测到入侵信号后，主控模块通过 DTU 向后台系统发送状态信息。同时监控摄像头通过移动物体侦测功能自动获取开门人员图像信息并录制短视频，该数据一方面在本地存储器存储，同时通过 4G 网络上传到后台系统服务器，管理人员可根据是否有巡视检修任务选择是否调入入侵人员信息。

2 测试和应用

为了验证本系统的测量精度和可靠性，选用 FirstPower 公司的 7 Ah 电池和 12 Ah 电池进行测试（环网柜常用电池），着重测量蓄电池的内阻、容量以及两者的相互关系，如表 1 所示。为了验证对比测试结果，并采用第三方的高精度内阻测试仪进行对比测试，两者测试结果一致，电池容量低时误差略大，最大偏差为 3.6% 左右。

表 1 FirstPower 公司 7 Ah 电池和 12 Ah 电池的测试结果

7 Ah 蓄电池			12 Ah 蓄电池		
容量 /%	仪器测内阻 /mΩ	自测内阻 /mΩ	容量 /%	仪器测内阻 /mΩ	自测内阻 /mΩ
100	25.676	26.45	100	21.241	21.53
90	26.528	27.04	90	21.77	22.16
80	27.023	27.93	80	22.536	22.70
70	27.985	28.14	70	23.052	23.68
60	29.374	30.52	60	23.559	24.45
50	33.569	34.84	50	24.17	25.33
40	36.254	37.82	40	25.678	26.24
30	40.238	42.15	30	27.441	28.61
20	45.217	46.96	20	28.146	29.21
10	51.682	53.55	10	30.517	32.19

目前该系统已在东营供电公司多个环网柜安装运行，配合公司综合后台管理系统，实现了环网柜电池各个参数数据、历史参数数据的实时在线查看，可选择历史时间段、不同数据自动生成历史趋势曲线，根据历史数据预测电池使用寿命。支持根据不同设备情况自主设置告警阈值等参数，侦测到异常情况可自动告警并在界面区别显示，全面实现了环网柜蓄电池的远程在线监测、维护、预警功能。

3 总结

目前配电系统中，环网柜使用数量庞大，环网柜内使用的蓄电池厂家、种类繁多，单体电池之间的性能差异较大，给批量应用管理带来巨大挑战，而且存在较大的故障隐患。通过本系统对电池参数检测关键技术的研究，实现了对蓄电池健康状态的准确评估，及时了解蓄电池剩余容量是否满足备用供电要求，电池组或单体电池是否需要维修更换等，能够有效指导电池的使用和维护，对保障配电系统的安全运行意义重大。同时，本系统还有诸多不足之处，比如对采用电流积分计算电池容量时没有考虑环境温度的因素，且偏重电池参数的检测，对电池的均衡、活化等维护技术缺少研究，还需要开展更深入的研究和完善。

参考文献：

- [1] 孙博. 配电网中箱变及环网柜技术应用研究[J]. 电力设备管理, 2024(9):144-146.
- [2] 王隽. 基于多源节点数据的环网柜放电故障识别[J]. 信息技术, 2024(4):176-182.
- [3] 宋延辉. 直流系统蓄电池健康状况及内部故障监测装置的研制与应用分析[J]. 通信电源技术, 2020,37(18):25-27.
- [4] 胡明飞, 杨艳, 漆静群, 等. 基于 RS485 的多主机通信协议的设计[J]. 自动化与仪表, 2015,30(7):22-24.
- [5] 毛晓燕. SBUS 现场总线研究与开发[D]. 杭州:浙江大学, 2004.
- [6] 周树桥, 于晖, 黄晓津. 基于 Modbus 协议的通信设计及调试方法研究[J]. 自动化仪表, 2023,44(S1):158-164.
- [7] 史先传, 殷帅, 许议元. 基于 LwIP 和 Modbus TCP 协议的网络控制器设计[J]. 自动化与仪表, 2023,38(2):19-24.
- [8] 苗壮, 孔慧, 王金生, 等. 铅酸蓄电池内阻温度特性研究与探讨[J]. 蓄电池, 2023,60(2):58-61.
- [9] 王斯成, 陈子平, 杨军, 等. 蓄电池剩余容量 (SOC) 数学模型探讨和在线测试仪的开发[J]. 太阳能学报, 2005, 26(1): 10-17.
- [10] 张利国, 李宇剑, 刘乐, 等. 基于参数分析的蓄电池模型健康状态估计[J]. 自动化仪表, 2022,43(2):69-75.
- [11] 张德宏, 郑庆华, 温侠. 蓄电池容量与电导相关性的研究[J]. 通信电源技术, 2012, 29(2): 21-24.

【作者简介】

李永彬（1990—），男，山东利津人，硕士研究生，工程师，研究方向：配网运维、检修、带电作业等。

（收稿日期：2024-10-21）