

新型固体环网柜在线监测系统设计

刘树鑫, 曹云东, 侯春光, 刘晓明, 李 静

(沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 针对固体环网柜绝缘在线监测问题, 提出一种综合在线监测方案, 同时监测母线温升、泄漏电流值和介质损耗值来反映固体环网柜绝缘状态。针对母线温升监测, 采用取能电流互感器、温度传感器以及红外传输方式的配合, 解决了对母线电连接处温升测量隔离的难题。同时监测泄漏电流值和介质损耗值, 二者相结合作为绝缘状态的判据, 并通过老化实验验证了各项参数判据值大小选取的合理性。最后, 通过现场在线产品的测量表明, 该装置满足测量的准确度和稳定性的要求, 为固体环网柜绝缘在线监测提供参考。

关键词: 环网柜; 在线监测; 介质损耗; 泄漏电流; 绝缘老化; 母线温升

中图分类号: TM591 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)06-0038-07

Design of Online Monitoring System for Solid-insulated Ring Main Unit

LIU Shuxin, CAO Yundong, HOU Chunguang, LIU Xiaoming, LI Jing

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: For improving reliable operation of ring main unit (RMU) in power system, an approach for on-line monitoring the insulation characteristic and bus-bar temperature rising of the RMU is proposed. The bus-bar temperature monitoring system adopts draw-out current transformer, temperature sensor and infrared transmission to solve the problem of high voltage isolation. The leakage current and dielectric loss are monitored simultaneously to judge the insulation state, and insulation aging test is conducted to verify the rationality of the determination of the parameters values as criteria. In addition, online monitoring results verify the accuracy and reliability of the on-line monitoring system.

Key words: ring main unit(RMU); online monitoring; dielectric loss; leakage current; insulation aging; bus-bar temperature rising

0 引言

随着经济社会的发展, 电力需求持续快速增长, 配电系统规模不断扩大, 其配电设备的安全运行重要性日益凸显^[1], 亟待实现科学高效的管理。固体环网柜是近些年来逐步被广泛关注和使用的配电设备, 固体环网柜是采用固体绝缘材料作为主绝缘介质的环网柜, 将真空灭弧室及其导电连接、隔离开关、接地开关、主母线、分支母线等主导电回路单一或组合后用固体绝缘介质包覆封装为一个或几个具有一定功能、可再次组合或扩展的具备全绝缘、全密

封性能模块, 人可触及的模块表面涂覆有导电或半导体屏蔽层并可直接可靠接地的环网柜^[2]。固体环网柜具有体积小、无毒、结构简单、无污染及绿色环保等优点, 符合全球绿色产品发展概念。固体环网柜是当前主流环网柜的升级换代产品, 据统计, 仅 2012 年固体环网柜当年的投入运行数量就达到 4.5 万面, 预计到 2016 年, 年新投入运行的固体环网柜数量将达到 13.5 万面。国家电网公司发布的《国家电网公司第一批重点推广新技术目录》(国家电网科[2011]1285 号), 文件指出:“从技术可靠性和环保要求更加严格的发展趋势看, 固体绝缘环网柜具有全面取代 SF₆ 气体绝缘环网柜的趋势”。随着固体环网

收稿日期: 2013-12-08; 修回日期: 2014-01-13

基金项目: 辽宁省特聘教授项目资助。

Project Supported by Distinguished Professor Fund of Liaoning Province.

柜大规模的应用, 对于固体环网柜在线监测对于配电系统安全可靠运行具有重要意义。近些年中国电力系统配电电压等级的开关故障中, 绝缘故障和温升故障位居环网柜故障的前三位^[3-7]。因此, 对固体环网柜的绝缘状态以及母线温升的监测是十分重要的。

对于固体环网柜绝缘状态和母线温升的在线监测, 抗干扰问题、母线温升监测高电压隔离问题以及正确合理的绝缘特征量判据大小选取问题是固体环网柜在线监测系统设计的 3 个重要因素和难点问题。基于此, 文中就如上 3 个问题, 分别通过硬件的合理设计、母线温升监测模块的设计及通过老化实验验证绝缘特征量判据大小合理性选取 3 个方面进行研究, 解决了上述 3 个难点问题, 从而设计了一套新型固体环网柜在线监测系统。实验研究证明了该方法对于母线温升和绝缘状态的监测具有很好的精度和运行可靠性, 为固体环网柜在线监测提供可参考的方案。

1 在线监测系统的硬件实现

1.1 固体环网柜在线监测系统原理

固体环网柜在线监测系统监测内容为: 绝缘套筒介质损耗值、泄漏电流值以及母线排温升。其硬件设计原理框图见图 1, 介质损耗值测量采用串联分压电容方式提取末屏电流信号, 通过计算末屏电流信号与主电路电压信号的角差来实现介质损耗值的测量; 泄漏电流测量采用微电流传感器采集信号, 经信号调理电路, 送入上位机; 母线温升测量采用数字温度传感器采集母线以及环网柜柜内温度, 数字模拟开关选通传感器通道, 温度值通过红外通信发送到上位机中。

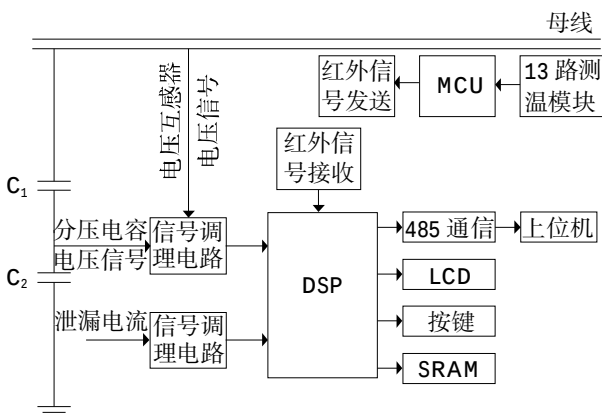


图 1 系统设计原理图

Fig. 1 Schematic diagram of system design

对于环网柜绝缘套筒, 当外加交流电压作用下, 其等效电路及向量图见图 2(a)、(b)、(c)。介质损耗测量原理是提取高压母线的电压信号和套筒末屏分压

电容的电压信号^[8-13], 进一步计算这 2 个电压向量夹角的正切值 $\tan\varphi$, 其测量原理及向量图见图 2(d)、(e), 介质损耗值 $\tan\delta$ 计算公式见式(1), 串联分压电容容值为 C_1 , 由向量图可以得到式(2)。

$$\tan\delta = \frac{U_R}{U_C} = \omega CR; \quad (1)$$

$$\tan\varphi = \frac{\omega CC_1 R}{C_1 + C} = \frac{\omega CR}{1 + C/C_1} = \frac{\tan\delta}{1 + C/C_1} \quad (2)$$

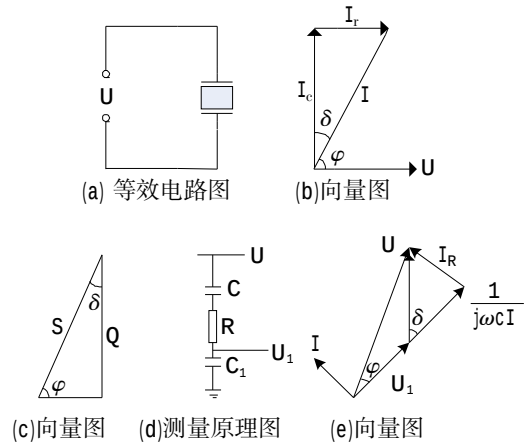


图 2 绝缘介质等效电路及向量图

Fig. 2 Equivalent circuit and vector diagram of insulation

在选择串联分压电容容值的时候, 要尽量满足 $C_1 \gg C$, 这样, 式(2)就可以得到式(3)

$$\tan\varphi = \frac{\omega C_1 CR}{C_1 + C} \approx \omega CR = \tan\delta \quad (3)$$

因此, 通过式(3)就可以测量 $\tan\varphi$ 的值, 从而求出 $\tan\delta$ 。

1.2 滤波电路的研究与设计

干扰问题一直是影响在线监测系统安全可靠运行的重要因素^[14-17], 所以模拟滤波器的合理设计在电力系统中复杂的电磁干扰环境对于微弱信号的监测具有十分重要的作用。其中模拟滤波器的幅频特性可以通过良好的设计和相关元器件参数的选择得以提高, 而在介质损耗在线监测中, 滤波器仅有良好的幅频特性是远远不够的, 还需要滤波器具有极好的相位特性。通过对比各种不同的滤波器效果, 得出巴特沃斯滤波器的通带幅度最平坦, 过渡带比较窄, 在通带内相移也接近线性, 因此文中采用巴特沃斯滤波器。

图 3 为 2 阶、4 阶、8 阶巴特沃斯低通滤波器的幅频特性, 可见阶数 n 越高, 其幅频特性越好, 低频检测信号保真度越高。

8 阶巴特沃斯低通滤波器采用集成芯片 MAX7480, 电路图见图 4, 通过设置 C_4 容值大小调整截止频率, 其计算公式为式(4)。

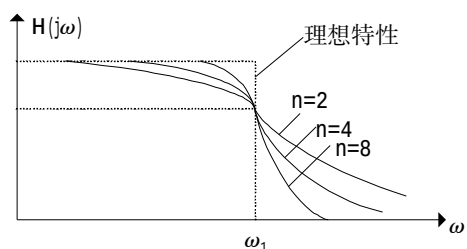


图 3 巴特沃斯低通滤波器幅频特性

Fig. 3 Amplitude-frequency characteristics of Butterworth filter

$$f_{jc} = \frac{530}{C_4} \quad (4)$$

式(4)中: f_{jc} 为截止频率, kHz; C_4 单位为 pF。

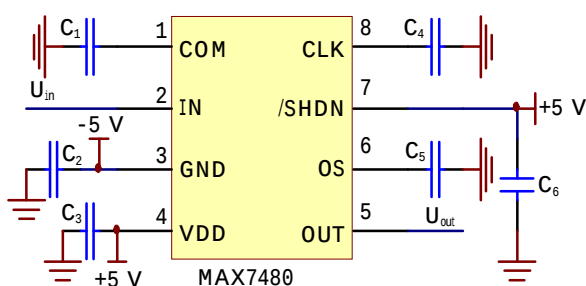


图 4 8 阶巴特沃斯滤波器电路图

Fig. 4 The diagram of 8th Butterworth filter circuit

设置滤波器开始截止的频率为 60 Hz, 留有 10 Hz 的裕度, 防止元器件误差, 误将 50 Hz 的信号滤除, 所以文章采用 60 Hz 为 8 阶巴特沃斯滤波器开始作用的频率点。

通过对比可知, 当信号频率处于 20、30、50、60 Hz 时, 信号能够完整无差别的输出, 而当 70 Hz 时, 信号开始衰减, 在 80~90 Hz 的区间, 衰减相当厉害, 当信号频率在 100 Hz 时, 已经近乎截止, 图 5 为输入 100 Hz 时, 信号通过 8 阶低通滤波器输出后, 被截止的信号波形图。信号频率大于 120 Hz 以后, 高次谐波分量完全被截止。所以 8 阶巴特沃斯低通滤波器具有相当良好的幅频特性, 能够在幅频上很好的满足了信号的滤波效果。

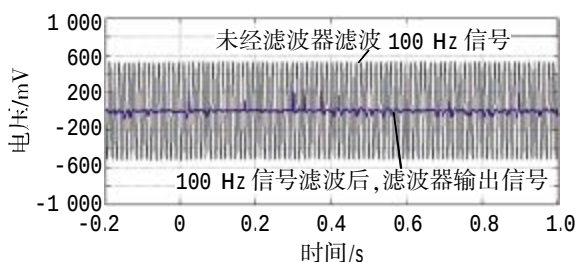


图 5 滤波器对于 100 Hz 信号的滤波效果

Fig. 5 The filtering effect of the filter for 100 Hz signal

高压母线的电压信号和套筒末屏分压电容的电压信号经过滤波器滤波时, 应该保证滤波相位的一

致性, 即理想情况下, 同一路信号分别经过两路滤波器之后, 两者的夹角应该为零。这样就保证了滤波器的相位特性。经过大量实验计算对比可得, 同一路信号经过两路滤波器产生的相角差基本可以控制到 0.001° , 完全满足介质损耗角测量误差的要求, 见图 6。

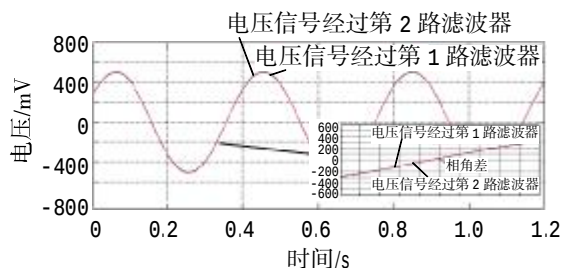


图 6 信号通过两路滤波器相位对比

Fig. 6 Amplitude comparison chart of two roads filter

系统测试平台见图 7。



图 7 系统测试平台

Fig. 7 System test platform

2 温升在线监测

2.1 温升在线监测原理

固体环网柜母线排连接处会因电磨损、机械操作和短路电力引起的机械振动等原因, 使接触条件恶化, 接触电阻增加, 引起接触点的温度升高, 加剧接触表面氧化, 导致局部熔焊或接触松动处产生火花甚至电弧放电, 最终造成设备的损坏。而且由于环网柜柜体空间狭小, 人工排查的工作量很大, 所以在线温升监测对于环网柜的安全、可靠运行具有很重要的意义。文中设计了采用接触式测温方式, 采用低功耗数字温度传感器和红外通讯结合的方式, 针对高压隔离的问题, 监测装置与测温点处同一高电位, 监测器工作电源不能从外部供给, 故采用在主回路上安装取能电流互感器, 电流互感器采用铁基纳米晶铁心材料, 可以通过调整导磁面积, 改变启动电流^[18-21]。文中选用的电流互感器横截面积为 6 mm^2 , 最小启动电流为 6.5 A, 通过取能电流互感器高压侧电源设计和锂电池联合供电, 为温升监测装置提供

电源。

2.2 温升在线装置结构设计

系统的总体设计图见图 8。

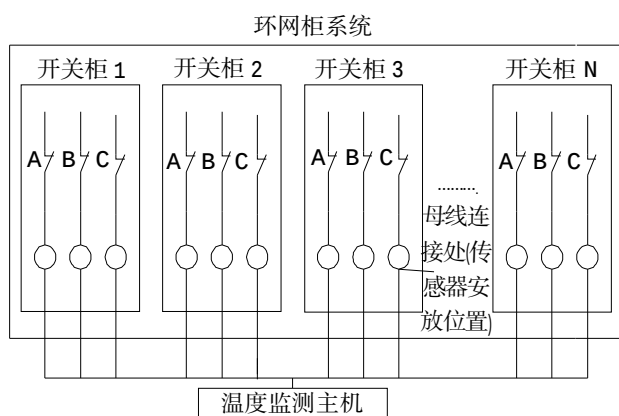


图 8 测温模块总体设计图

Fig. 8 Schematic diagram of temperature measurement module

文中监测的环网柜为标准配置的环网柜一进三出式,即为四个单元的柜体构成环网结构,文中设计标准监测装置监测温度路数为 13 路,12 路监测每相母线连接处的温升,1 路监测柜体内的实际温度。根据环网柜的配置,可以增加测温的路数。满足了不同用户的需求。测温分机将采集到的温度通过红外通讯方式将数据传送到接收端分机上,接收端分机通过 RS485 通信,将数据传送到主控电脑上,这样监测人员就可以不亲临现场,仅仅需要通过主控电脑即可完成对整个环网柜系统的温度监测,及时发现柜体可能产生的情况,发出报警,对事故进行预判,大大提高了供电的可靠性。

测温系统下位机设计结构见图 9。

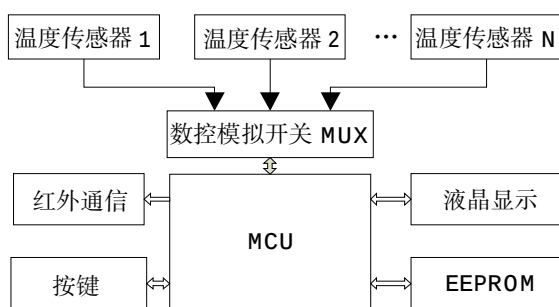


图 9 测温系统下位机设计图

Fig. 9 Hardware design of lower machine

测温的数字温度传感器选择 DALLAS 公司的 DS18B20 数字温度传感器,其测温范围是 $-55\sim+125\text{ }^{\circ}\text{C}$,供电范围在 $3.0\sim5.5\text{ V}$,其采用独特的单线接口方式,与微处理器连接时仅需要一条线即可实现微处理器与 DS18B20 的双向通信,并且使用时不需要任何外围器件,功耗低,抗干扰能力强,所以综合环网

柜的测温要求以及经济性考虑,采用 DS18B20 传感器很好的满足要求。

测温下位机的数字温度传感器,通过数控模拟开关 MUX 进行通道的选择,这样可以十分方便地进行现场安装以及每个通道的确认。温度数值每 10 s 采集一次,获取各个通道的温度值,然后通过红外通讯发送到上位机中。这样任何一相母线出现温度值异常即可进行报警。

温度传感器采用环氧树脂浇铸封装,环氧树脂是一种具有高介电性能、耐电弧、耐表面漏电的优良绝缘材料,传感器表面涂抹工业级高导热绝缘硅脂,可使其 1 mm 厚度硅脂可以承受 20 kV 的耐击穿电压强度,并且拥有良好的导热效果,满足母线温升在线监测要求。传感器采用十分靠近母线连接处的位置,可以十分快速的感应到母线连接处的温度变化。并且采用反复多次采集数据,排除异常数据这样可以保证数据的可靠性。

综合上述测温下位机模块的设计、传感器的安装、红外通信方式以及电源的设计,使得测温系统具有很好的抗干扰能力,测量数据稳定可靠。

3 绝缘材料老化特性研究

3.1 绝缘材料热老化实验

文中针对环网柜普遍采用的以环氧树脂为主绝缘材料的绝缘体进行展开研究,根据 GB 2567 的规定,将环氧树脂绝缘体做成规则的长方体^[18-20],尺寸为 $12\text{ mm}\times15\text{ mm}\times6\text{ mm}$ 。其试验流程图见图 10。

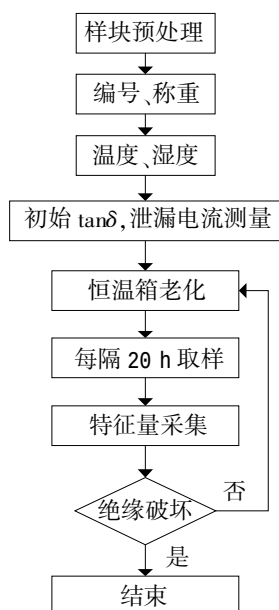


图 10 绝缘老化特性研究流程图

Fig. 10 Schematic diagram of insulation aging characteristics experiment

采集对象为样块的介质损耗值、泄漏电流值、现场环境的温度、湿度以及样块的质量。通过对环氧树脂绝缘老化过程中这些特征参量的测量,能够得到其在老化过程中,各种电参数的变化情况,及时跟踪环氧树脂在老化过程中各电参数的变化过程,并通过算法拟合,得到电参数对应老化时间的曲线对比图,能够清楚地了解绝缘状态在各个状态中的电参数对应关系。为绝缘判据大小的合理选取提供参考和验证,从而提高绝缘状态识别准确度。

3.2 实验数据及结果分析

表 1 为不同温度下热质量损失与时间关系的数据表。

表 1 不同温度下热质量损失与时间关系

Tab. 1 Relationship between mass loss and aging time		
时间/h	质量损失(170 °C)/%	质量损失(200 °C)/%
60	0.075 5	0.122 2
160	0.086 5	0.200 2
300	0.112 3	0.455 4
440	0.122 1	0.604 4

图 11 为样块老化过程中的质量损失与时间的关系曲线图。

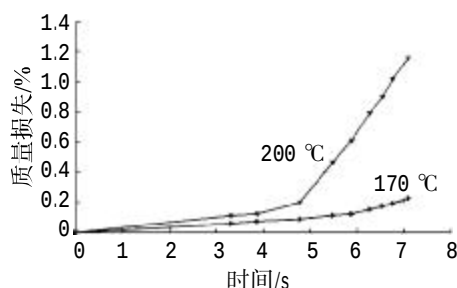


图 11 质量损失和时间的关系曲线图

Fig. 11 Curve of loss of mass and time

图 12 为介质损耗值随老化时间的变化关系图,介质损耗值在老化初期呈下降趋势,这是因为热老化的作用使绝缘材料中的水分、溶剂等不断挥发,使得介质损耗值变小。随着老化试验的继续,热老化作用使得绝缘材料分子链断裂,内部缺陷增加,并且造成的绝缘膨胀有利于放电气隙发展,所以随着老化试验的持续进行,介质损耗值将不断变大,200 °C 下介质损耗值变化趋势要大于 170 °C 下绝缘样块的介质损耗值。

4 实验结果及分析

文中对于温度的校验采用模拟方式进行,将文中采用的 DS18B20 温度传感器方案和 IRCON UX-40P 型红外测温仪(其精度为 1%)通过在恒温箱中进行了温度的模拟对比实验,实验对比图见图 13。

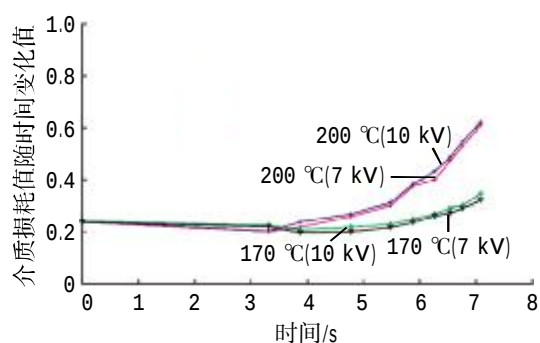


图 12 介质损耗值随老化时间的变化

Fig. 12 Relationship between dielectric loss and aging time

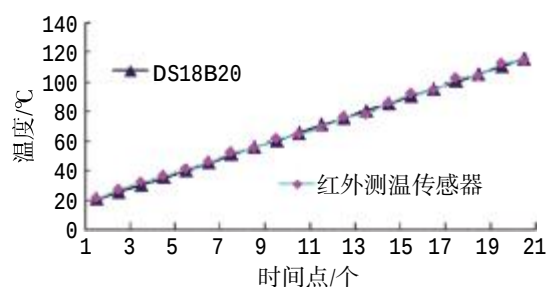


图 13 温升实验数据对比图

Fig. 13 Comparison chart of temperature experiment

通过实验表明,对于文中测温方案,在测量范围内,该系统的绝对测量误差小于 1 °C,满足环网柜在线监测温升的测量精度要求。当环网柜柜体内部的温度值与母线连接处的温度值差值为 70 °C,产生报警信号,并及时提醒相关人员采取措施,避免事故发生。

泄漏电流的测量,文中通过对某公司出产的 10 kV 等级环网柜各种绝缘状况的绝缘套筒进行了大量的实验,即新的绝缘套筒,运行不超过一年的套筒且污秽较轻、运行了很长时间且污秽比较严重的套管和已经濒临破坏并且污秽相当严重的套管。根据上述绝缘严重情况,将之分成 I、II、III、IV 4 种等级。表 2 为经过统计得出的套管泄漏电流值(均为实验后数值的均值)。

表 2 绝缘套管泄漏电流值

Tab. 2 The leakage current of insulation sleeve μA				
等级	7 kV	10 kV	12 kV	放电
I	5.8	7.2	8.4	忽略
II	8.9	13.8	21.2	38.4(22 kV)
III	14.4	28.4	32.4	56.2(18 kV)
IV	32.8	49.8	68.6	88.2(14 kV)

根据表 2 分析得知,随着套筒绝缘情况的降低,污秽的加重,泄漏电流值明显增大。通过实验比对,文中采用当泄漏电流值达到 50 μA 时为一级预警,需要提醒用户注意;当泄漏电流值达到 90 μA 时为二级预警,提醒用户进行停电检修。

对于介损值的测量, 通过比对上述 4 种等级的绝缘套筒的绝缘情况, 在 10 kV 电压等级下, 分别做了大量实验, 对所测到的介损值进行求均值, 并通过西林电桥进行校验并得出相对误差, 见表 3。

表 3 20 ℃绝缘套筒介损值 $\tan\delta$
Tab. 3 The dielectric loss $\tan\delta$ of
insulation sleeve under 20 ℃ %

等级	文中方法	西林电桥	相对误差
I	0.242	0.243	0.41
II	0.331	0.332	0.30
III	0.465	0.467	0.43
IV	0.560	0.558	0.36

通过表 3 得出, 文中的测量方法具有较高的精确度, 可以满足系统的高精度要求。由表 3 可知, 设定当介质损耗值大于 0.55 时, 设为一级预警值, 当介质损耗值大于 0.65 时为二级预警值。同时系统通过双判据来监测绝缘套筒的绝缘状态。当泄漏电流值或者介质损耗值任何一个值大于一级预警值时, 提示用户要对运行产品注意。当泄漏电流值或者介质损耗值任何一个值大于二级预警值时, 系统将提示用户进行停电检修。这样将很大程度上提高监测的准确度。

5 结论

1)设计了一套新型固体环网柜在线监测系统, 实现了对环网柜绝缘套筒介质损耗和泄漏电流的在线监测, 二者结合作为绝缘状态的判据, 对绝缘套筒绝缘状况进行有效监测。并提出了利用取能电流互感器、温度传感器以及红外传输方式的配合, 实现了柜体母线连接处以及柜体内的温度监测, 并通过二者温度的差值来提供报警信号。

2)对比各种滤波器的优缺点, 设计了八阶巴特沃斯滤波器, 实验证明了该滤波器在幅频特性和相位特性上均满足在线监测系统的要求, 提高了监测系统的精度。

3)针对环网柜普遍采用的环氧树脂为主绝缘材料老化机理数据不完善, 严重制约环网柜绝缘状态在线监测, 通过老化实验系统的研究了环氧树脂绝缘材料在逐步老化过程中, 各种电特征量在老化过程中的变化规律。为环网柜绝缘状态监测的评估以及故障诊断提供科学、可靠的数据支撑。

最后, 通过实验验证了该监测系统具有较高的监测精度和运行可靠性, 为固体环网柜在线监测提供可参考的方案。

参考文献:

- [1] 孔祥玉, 赵 帅, 贾宏杰, 等. 智能电网中电力设备及其技术发展分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2):21-26.
KONG Xiangyu, ZHAO Shuai, JIA Hongjie, et al. Analysis of equipment and technology in smart grid development[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2012, 24(2):21-26.
- [2] Q/GDW 730-2012 12 kV 固体绝缘环网柜技术条件[S]. 2012.
Q/GDW 730-2012 Specifications for 12 kV solid-insulated ring main units[S]. 2012.
- [3] 潘长明, 刘 刚, 熊 炬, 等. 高压开关柜绝缘事故的分析及防范措施[J]. 高压电器, 2011, 47(7):90-93.
PAN Changming, LIU Gang, XIONG Ju, et al. High voltage switchgear insulation accident's analysis countermeasures[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 90-93.
- [4] 左丽霞. 基于 DSP 的高压电气设备绝缘在线监测系统的设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10):144-147.
ZUO Lixia. DSP-based online monitoring system for insulation of HV electric equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10):144-147.
- [5] 时 斌. 光纤传感器在高压设备在线测温系统中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(8):169-173.
SHI Bin. HV switchgear temperature on-line monitoring system with distributed optical sensor[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8):169-173.
- [6] 巩宪锋, 衣红钢, 王长松, 等. 高压开关柜隔离触头温度监测研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1):155-158.
GONG Xianfeng, YI Honggang, WANG Changsong, et al. Research on temperature monitoring of isolators in HV switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1):155-158.
- [7] 韩玉兰, 芦 兴, 路 灿, 等. 高压开关柜隔离触头温度红外检测系统的研制[J]. 高压电器, 2008, 44(6):578-581.
HAN Yulan, LU Xing, LU Can, et al. Temperature monitoring system for contacts of high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6):578-581.
- [8] 田成凤. 变压器电容式套管电容量及介损的正确测量[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4):147-149.
TIAN Chengfeng. Properly measure capacitance and dielectric loss of condenser-type transformer bushings[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4):147-149.
- [9] 高 阳, 潘宏侠, 吴 升, 等. 基于 DSP 电力设备远程监测分析系统[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1):127-131.
GAO Yang, PAN Hongxia, WU Sheng, et al. Remote monitoring and analysis system based on DSP for electrical equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1):127-131.

- [10] 周洪, 罗星, 邓其军. 基于 DSP 的智能配电网网柜 FTU 设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 32(2): 124-128.
ZHOU Hong, LUO Xing, DENG Qijun. Design of DSP-based FTU for RMU of intelligent distribution grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 32(2): 124-128.
- [11] LIU Shuxin, CAO Yundong, HOU Chunguang, et al. Development of on-line monitoring system of switchgear[C]// International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology, [S.l.]: IEEE, 2011: 295-298.
- [12] 王红亮, 黄新波, 王宏, 等. 智能变电站电容型设备介质损耗在线监测 IED 设计[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 1-7.
WANG Hongliang, HUANG Xinbo, WANG Hong, et al. Design of an on-line monitoring IED of dielectric loss in capacitive equipment in intelligent substation[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 1-7.
- [13] 刘曦, 濮峻嵩, 冯运, 等. 大电容量高压电气设备介质损耗测量装置的研制与应用[J]. 高压电器, 2012, 48(10): 17-21.
LIU Xi, PU Junsong, FENG Yun, et al. Development and application on dielectric loss testing device for large-capacity and high-voltage electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10): 17-21.
- [14] 马立新, 林家隽, 肖川, 等. 电流突变抑制与智能化谐波检测系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 49-53.
MA Lixin, LIN Jiajun, XIAO Chuan, et al. Current mutation suppression and intelligent harmonic detection system[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2012, 24(1): 49-53.
- [15] 李天云, 范夕庆, 汪剑波, 等. 基于小波滤波和跟踪微分器的介质损耗因素检测方法[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 223-226.
LI Tianyun, FAN Xiqing, WANG Jianbo, et al. A method to detect dielectric loss factor based on wavelet filtering and tracking differentiator[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 223-226.
- [16] 乐江源, 谢运祥, 张志, 等. 有源电力滤波器状态反馈精确线性化控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 81-85.
LE Jiangyuan, XIE Yunxiang, ZHANG Zhi, et al. State feedback exact linearization control for APF[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 81-85.
- [17] 王小华, 荣命哲, 徐铁军, 等. 中压开关柜在线监测系统硬件抗电磁干扰技术研究[J]. 高压电器, 2007, 43(5): 321-324.
WANG Xiaohua, RONG Mingzhe, XU Tiejun, et al. Study on anti-electromagnetic interference technology by hardware for online monitoring system of medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 321-324.
- [18] 郝建, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 应用频域介电谱法的变压器油纸绝缘老化状态评估[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 187-193.
HAO Jian, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. Aging status assessment of power transformer oil-paper insulation by frequency domain dielectric spectroscopy[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 187-193.
- [19] 杨丽君, 邓帮飞, 廖瑞金, 等. 应用时-温-水分叠加方法改进油纸绝缘老化寿命模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 196-203.
YANG Lijun, DENG Bangfei, LIAO Ruijin, et al. Improvement of lifetime model on thermal aging of oil-paper insulation by time-temperature-moisture superposition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 196-203.
- [20] TANG C, CHEN G, FU M, et al. Space charge behaviour in multi-layer oil-paper insulation under different DC voltages and temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 778-788.
- [21] 高迎霞. 电子式电流互感器高压侧电路及电源的研究[D]. 河北: 燕山大学, 2006.
GAO Yingxia. Research of the high voltage circuit and power supply for electronic current transformer [D]. Hebei: Yanshan University, 2006.

刘树鑫(1982—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能电器化、绝缘在线监测。

曹云东(1963—), 男, 博士生导师, 主要研究方向为电器智能化。

侯春光(1978—), 男, 讲师, 从事智能电器研究。

(上接第 37 页)

- [23] 汲胜昌, 程锦, 李彦明, 等. 油浸式电力变压器绕组与铁芯振动特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(6): 616-619.
JI Shengchang, CHENG Jin, LI Yanming. Study on the winding and core vibration characteristics of oil filled transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(6): 616-619.
- [24] 郑建军, 刘兴业, 周欣竹. 边界元法及其在结构分析中的应用[M]. 安徽: 安徽科学技术出版社, 2006.
ZHENG Jianjun, LIU Xingye, ZHOU Xinzhong. Boundary element method and its application in structural analysis [M]. Anhui: Anhui Science and Technology Press, 2006.

莫娟(1979—)女, 博士研究生, 主要从事输变电设计技术及环保技术研究。

刘吉轩(1957—), 男, 研究员, 主要从事振动和噪声分析与控制等方面的研究(通信作者)。