

「高压电缆」

采用柔性电流钳开发电缆外护套绝缘状态监测的测量装置应用研究

文/国网甘肃省电力公司天水供电公司 何彦平 苏 炜

护层循环电流和绝缘电阻作为高压电缆安全运行的重要指标，测量方式尤其重要。分析了国内外绝缘外护套监测方法及其存在的问题，设计了利用柔性电流钳采样，接地环流法测量的监测装置，介绍了采用柔性电流钳开发电缆外护套绝缘状态监测测量装置的构造和功能，实验室搭建了高压电缆外护套绝缘状态在线监测的模型，并验证了测量结果与理论计算的一致性。

近年来电缆输电线路逐年在增多，而电缆敷设现场由于施工环境恶劣，加之大规模基建开挖地面，造成电缆绝缘外护套破损情况非常普遍。电缆护套外绝缘若损坏，则金属护套环流增大，不仅影响电缆载流量，而且使金属护套发热，以致损害电缆主绝缘，加速电缆绝缘老化，甚至发生电缆爆炸事故。因此，要提高运行电缆维护水平，保障运行电缆安全指标，降低电缆线路事故率，需要对电缆金属护套的绝缘状况进行必要的在线监测。

本文研究了一种采用柔性电流钳开发电缆外护套绝缘状态监测的测量装置的新技术，并进行实验室模型创建。

国内外绝缘外护套监测方法分析

目前国内外高压电力电缆监测方法主要有直流叠加法、直流分量法、交流叠加法、局部放电法、温度分布测量法、环流法等，其中直流分量法是依据直流分量与水树枝的发展成正比原理实现，其缺点为当电缆屏蔽接地化学电动势较大而护套绝缘电阻较小时会在检测回路形成较大干扰电流，使得被检测电流信号被干扰电流淹没；直流叠加法是在接地电压互感器中性点处施加低压直流电流（通常为50 V），其测量结果与停电后再加直流分量检测结果很相近，但绝缘电阻与电

缆绝缘剩余寿命的相关性不好；交流叠加法（交流频率=工频频率 $\times 2 + 1$ Hz）根据新电缆不产生特征电流，老化电缆产生特征电流且在电压频率为101.4 Hz时特征电流达到最大值来监测电缆绝缘状态；局部放电法利用电缆中间绝缘连接盒的差分法和预制中间连接头电磁耦合进行现场局部放电信号的在线监测方法；温度监测法主要依据绝缘老化与温度的密切关系，用于监测电缆沿线温度，为合理调整电缆载流量提供实际运行数据；接地电流法通过电流传感器监测电缆绝缘外护套及其屏蔽层电流变化实现绝缘诊断。

本文利用接地电流法，采用柔性电流钳开发电缆外护套绝缘状态监测的测量装置。

电缆外护套绝缘状态监测测量装置原理

针对目前电缆在线检测仪对绝缘外护套电流测量的现状，以及当前电流互感器精度和量程测量限制，本文采用柔性电流钳依据国网带电检测技术规范对电缆的主芯线与外护套同时进行监测，监测数据更具有参考性和说服力。

1. 检测技术规范

最新国网带电检测技术规范如表1所述，分为正常、缺陷、异常三种状态，满足正常的所有条件时才为正常，任意一项条件满足异常或者缺陷均视为异常或缺陷。

表1 电缆运行状态评估表

	接地电流 绝对值	接地电流 与负荷比值	单项接地电流 最大值/最小值
正常	<100 A	<20%	<3
缺陷	≥100 A, ≤200 A	≥20%, ≤50%	≥3, ≤5
异常	>200 A	>50%	>5

2. 柔性电流钳采样原理

如图1所示为柔性电流钳用于交流电流的测试装置线圈采样原理图, R_0 为空芯线圈等效内阻, L_0 为空芯线圈等效自感, C_0 为线圈杂散电容, R_f 为外接采样电阻。线圈的感应电势 $e(t)$ 与被测电流 $i_1(t)$ 成微分关系, 因此感应电势 $e(t)$ 的波形不能代表被测电流 $i_1(t)$ 的波形, 需要通过积分环节以将输出电压转换成与被测电流 $i_1(t)$ 呈同相关系。忽略线圈的杂散电容 C_0 , $i(t)$ 在 L_0 和 R_0 上的压降, 且若 R 取值足够大, 使 $u_{out}(t) \ll R i(t)$, 则 $e \approx R i(t) \Rightarrow i(t) \approx e / R$ 则

$$u_{out}(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{1}{C} \int \frac{e}{R} dt = \frac{1}{C} \int \frac{M}{R} \frac{di_1}{dt} dt = \frac{M}{RC} i_1$$

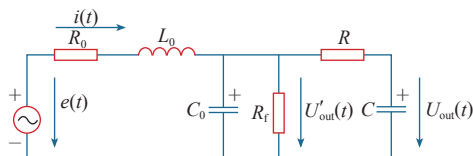


图1 柔性电流钳原理图

3. 电缆外护套检测原理

电缆外护套采用一端接地时的一个标准单元及护套绝缘监测接线图如图2所示, A-1、B-1、C-1分别为三相电缆主芯线, A-2、B-2、C-2分别为三相电缆外护套或其屏蔽层, A-11、B-11、C-11为放置于三相电缆主芯线的柔性电流钳, A-21、B-21、C-21为放置于三相电缆外护套或其屏蔽层的柔性电流钳。

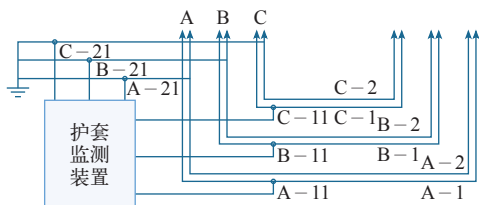


图2 护套绝缘状态监测装置接线图

图2中的三相电缆可以看做是三条独立的单相电路, 以A相为例: A-1电缆主芯线与A-2电缆外护套及其屏蔽层之间存在很高的电势差, 主芯线的负荷电流会产生感应电流, 高压施加绝缘外

护套也会产生容性电流, 也就是电缆主芯线与外护套之间存在容抗。绝缘状态良好的情况下, 容性电流较小且相对稳定, 绝缘状态异常时, 主芯线与外护套及其屏蔽层的容抗值和阻抗值会发生变化, 导致容性电流变大, 本文中的采用柔性电流钳开发电缆外护套绝缘状态监测的测量装置就是利用容性电流值的变化和其与负荷电流比值判定电缆外护套绝缘状态的。

本装置中的6路独立量程的电流测量电路采用隔离方式, 6路采样结果互不干扰。

监测装置的构造及系统功能

采用柔性电流钳开发电缆外护套绝缘状态监测的测量装置有柔性钳采样线圈、信号调理电路、微处理器、供电模块、数据发送终端及Windows数据管理后台组成。

1. 柔性钳采样线圈装配保障小电流测试精度

本装置研制了柔性电流钳测量电缆主芯线及外护套电流抗干扰及电场屏蔽措施, 可以实现大、小电流信号的准确实时测量, 并保证柔性电流钳满足不同现场条件下使用要求。

1—线圈外层的良好屏蔽, 有效地减小测量时的噪声信号干扰; 2—自由端完全装入到自由端壳体底部, 几乎接近无缝对接, 有效减少气隙对电磁信号强度的干扰; 3—线圈固定外壳结构采用曲面流线型, 用于补偿因线圈位置放置导致的偏差; 4—引出线的屏蔽层应良好, 确保接入积分电路前的微分信号不受使用环境周围干扰源的影响, 分别是回流线、漆包线、屏蔽线, 漆包线与屏蔽线连接至电路部分 V_{in-} , 回流线连接至电路部分 V_{in+} 。

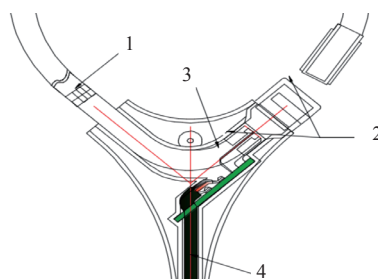


图3 线圈装配保障小电流测试精度的关键点

2. 信号调理电路设计

如图4所示, 放大电路对小信号做初级放大, 便于数据的滤波和采样; 无源滤波电路可以滤除信号中的高频成分; 差动放大电路对信号放大同

时具有消除零点漂移和抑制共模干扰的作用；信号中的低频杂波很难通过无源滤波实现，而二阶有源滤波很容易做到；积分电路调整信号相位偏移；可变增益放大电路由微处理器控制，根据电流信号的大小调整放大器的放大倍数，实现不同等级电流信号的测量；AD转换电路将模拟信号转换为微处理器可以处理的数字信号。

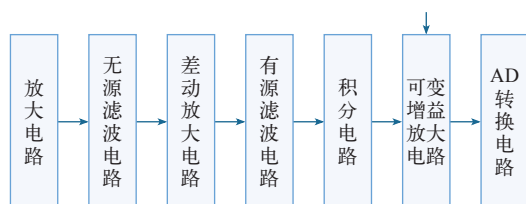


图4 信号调理电路

3. 高压自取电电源设计

本文涉及的高压取电为CT取电法。CT取电技术就是利用互感器原理把部分高压导线上的能量转换成电能输出。本装置可实现取电电源在

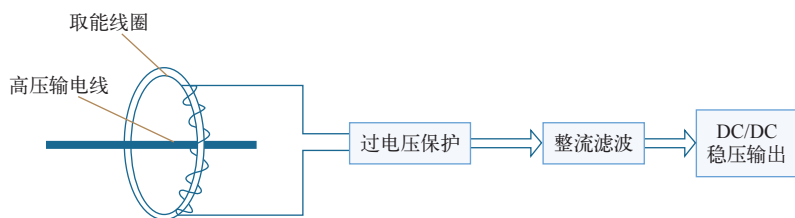


图5 CT取电电源设计

30~1 000 A的电流范围内稳定输出近1 W功率。其取电线圈副边输出电压在磁心未饱和状态的表达式为

$$E_2 = -j4.44fN_2\Phi_m$$

式中， E_2 为取电线圈副边输出电压； f 为输电线路电流频率； N_2 为副边线圈匝数； Φ_m 为取电线圈磁心内通过的磁通有效值。

本文中取电电源设计包括取电线圈设计、和保护电路设计。取电线圈通过理论计算得到磁心的尺寸和副边线圈的匝数；保护电路包括过压保护和电压滤波。

4. 数据发送及windows数据管理后台

护套监测系统为实时连续在线监测，每间隔10 s采样处理一次数据，采样数据依据标准规定电流绝对值和比值设定监测电缆线路的绝缘状态告警值，并将采集的数据以GPRS方式上报至数据管理后台。

Windows数据管理后台包括数据的判断与报

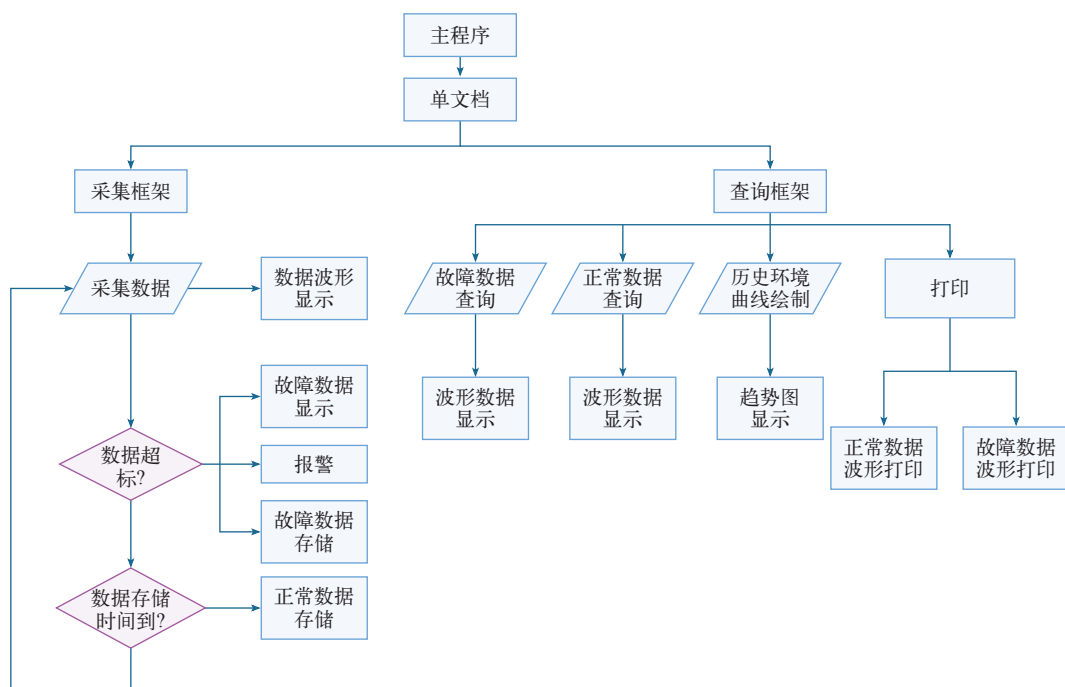


图6 Windows数据管理后台软件流程

警、数据及其波形的查询与显示、电流的变化趋势及数据的打印。

实验室高压电缆外护套绝缘状态在线监测模型的搭建

采用柔性电流钳开发电缆外护套绝缘状态监测测量装置应用于现场之前，需要大量的模拟试

验，以便完成系统的调试和校对。试验模型如图7所示，高压电缆的输入端采用三相电源和隔离变压器提供，隔离变输出为220 V交流电压，电缆主芯线与接地外护套之间的绝缘可以用电容模拟，电力系统感性负荷通过电容和电阻共同调整，绝缘外护套故障采用虚线标注的电阻或者电容表示，电缆外护套正常情况下无 R_1 、 R_2 、 C_7 。

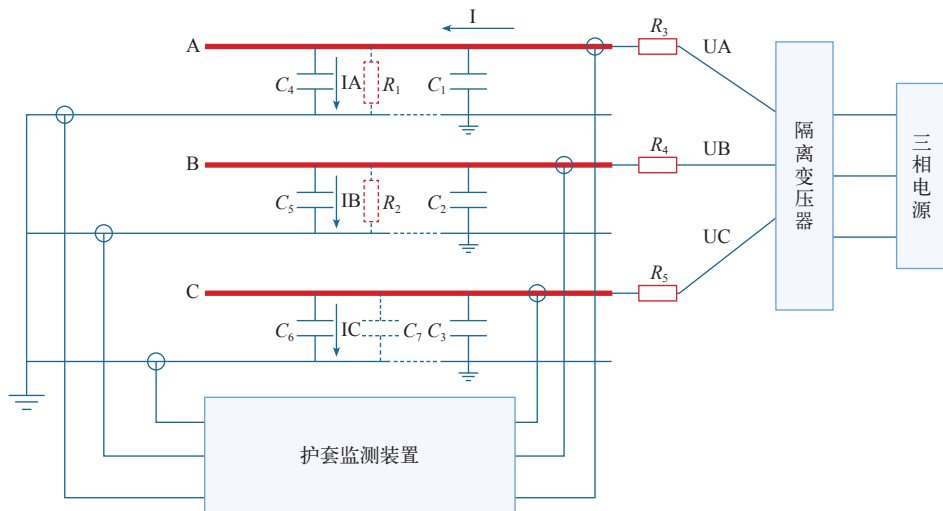


图7 高压电缆外护套绝缘状态在线监测等效电路模型

模拟装置中，电容 C_1 、 C_2 、 C_3 值均为1 000 $\mu\text{F}/600\text{ V}$ ，电容 C_4 、 C_5 、 C_6 值均为1 00 $\mu\text{F}/400\text{ V}$ ，隔离变压器输出电压值 U_A 、 U_B 、 U_C 为AC 220 V。现场条件下三相系统电压 U_A 、 U_B 、 U_C 与三相负荷电流之间有一个相位差值 α ，这是由电力系统负载呈现感性引起的，所以电压值超前电流 α 角度。假设系统功率因数为 $\cos \alpha = 0.8$ ，得到 $\tan \alpha = 0.75$ 。A相为例，相位差值依靠电阻 R_3 、电容 C_1 和电容 C_4 调节（电力电缆真实环境下 C_4 相对于 C_1 很小，可以忽略）。根据公式

$$U_A = I \left(R_3 + \frac{1}{j\omega(C_1 + C_4)} \right)$$

计算得到

$$I = U_A \frac{[\omega(C_1 + C_4)]^2 R_3 + j\omega(C_1 + C_4)}{[R_3\omega(C_1 + C_4)]^2 + 1}$$

根据功率因数 $\tan \alpha = 0.75$ ，得到 $[\omega(C_1 + C_4)]^2 R_3$ 与 $\omega(C_1 + C_4)$ 比值为3 : 4；根据交流电压频率50 Hz，计算得到 R_3 值为2.17 Ω ；

电缆接地外护套正常情况下流过电缆主芯线总电流 $I = 36.493\text{ A}$ ，绝缘外护套接地电流 $I_A = 3.317\text{ A}$ ；模拟电缆故障情况下，电缆主芯线与外

护套之间存在阻抗的变化，假设电缆主芯线与外护套存在 $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ 电阻，总电流 $I = 36.493\text{ A}$ ，绝缘外护套接地电流 $I_A = 5.561\text{ A}$ 。理论计算结果与实际结果相符，验证设备的准确性。

结束语

本文依据国网带电检测运行规定设计了一种通过监测电缆主芯线负荷电流与外护套接地电流来诊断电缆外护套绝缘状态的装置，该装置采用柔性电流钳作为电流互感器取样，高压感应方式取电，数据可以实时传输至数据处理终端，实时监控并发出异常报警，解决了人工现场采样工作效率低和需要断电监测的问题。

为了验证装置设计的正确性，实验室自行搭建电缆外护套绝缘状态监测电路的等效模型。对正常情况下和异常情况的理论数据做了计算和分析，其结果与实际测量结果一致。

该装置依据国网电缆发展要求，可以对110 kV以上的单芯电力电缆进行实时监测。EA

（收稿日期：2017.06.18）

（编辑：白文亭）