

[开关设备]

GIS 内置避雷器阻性电流测试方法的优化研究

文/ 国网浙江省电力有限公司宁波供电公司 姜炯挺 蒋科若 岳 龙 梁流铭 赖靖胤

GIS 内置避雷器以其免于维护、结构紧凑等优点成为 GIS 设备过电压保护的首要保障。为安全、快速并且准确地掌握 GIS 内置避雷器的绝缘性能，针对当前试验方法和所用仪器存在的问题，以投影法作为算法基础，对 GIS 内置避雷器阻性电流的试验方法进行了优化。

近年来，凭借着可靠性高、维护工作量小、检修周期长和占地面积小等优点，气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）在征地困难、用地紧张的城市电力系统中得到了较为广泛的应用。作为电网安全运行的保障，避雷器已经成为电网系统中不可或缺的电气设备，而避雷器的安全运行决定着 GIS 设备的可靠运行。作为过电压保护的有效方法，封闭的 GIS 罐体内部提前安装金属氧化物避雷器（MOA），而且只从 MOA 的尾端引出一段连接线，并将其与 GIS 罐外的计数器接在一起。

对 GIS 内置避雷器在运行电压下的阻性电流进行测量，可以准确反映出阀片的老化和劣化程度，所以要判断 GIS 内置避雷器是否存在安全隐患，需要对 GIS 内置避雷器进行定期的带电阻性电流测试，这也是当前排除 MOA 潜在缺陷的一种可行方法和必要手段。根据当前国内外最新的研究成果，MOA 的检测方法主要包括投影法、90° 补偿法、谐波法以及全电流法。因为在测试 MOA 阻性电流时，一般都需要从感应板或电压互感器二次侧采集电压信号，但是这样的采集方式比较危险，可能威胁到测试人员的人身安全，因此迫切需要找到新的方法来获取电压信号，避免使用传统的电压信号采集

方式。

本文结合 A/D 转换原理和傅里叶变换理论，采用无线电传输信号的方法，并以投影法为算法基础对 GIS 内置避雷器阻性电流的测试方法进行优化，以期能够安全、准确并且快速测试 GIS 内置避雷器的阻性电流，早日实现摆脱通过电压互感器二次侧或利用感应板采集电压信号以测试 GIS 内置避雷器阻性电流的方法，从而在安全高效测试出 GIS 内置避雷器阻性电流并且保障电网可靠性的同时，确保检修人员的人身安全。

现场调研

某单位运维人员在 110 kV 某变电站进行巡视工作时，发现某线路避雷器 B 相泄漏电流 0.75 mA，为初值的 1.5 倍，属于紧急缺陷。该线路避雷器泄漏电流读数如图 1 所示。

经现场调查发现，此次缺陷是由于避雷器下引线布置杂乱引起的。避雷器的生产厂家在设计上没有采取措施防止引线与避雷器阀片短接，装配环节工艺控制不佳，而顶部绝缘盆子密封前也没有进行下引线状态的检查，使得 B 相避雷器下引线与阀片发生触碰，在雷电

过电压的情况下,下引线局部击穿,短接了下部6个阀片。

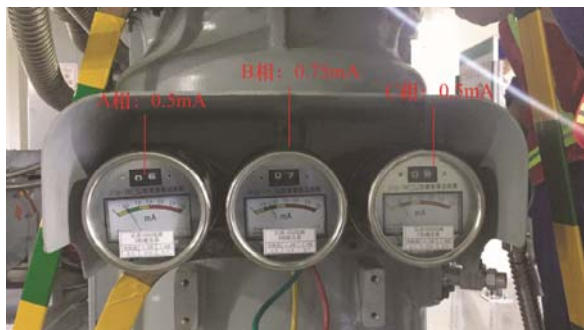


图1 故障线路避雷器泄漏电流数值

在测试过程中,发现利用电压互感器二次侧或感应板来采集电压信号的方法存在着严重的安全隐患,因此,寻找其他更加安全的方法采集电压信号是非常必要的。经过查阅资料并反复讨论研究,找到了获取电压信号较为安全的方法,即通过现场的检修动力箱获取所需的电压信号,再将施加于GIS内置避雷器电压的相位角和检修动力箱的电压信号相位角进行比较与修正,从而能够间接得到施加在GIS内置避雷器电压信号的相位角。虽然通过这种方法获取电压相位角存在一定的困难,但是与通过纯电阻分压器获取电压信号的方法相比,测试人员的人身安全能够得到保障,同时,测试过程所用的设备也变得更加便捷。

阻性电流测试算法的优化

通常认为总泄漏电流10%~20%的增加量中的阻性电流是GIS内置避雷器绝缘性能降低的主要原因,因此总泄漏电流中阻性电流的占比成为了判断GIS内置避雷器工作状态的关键。一般情况下,阻性电流的测试是GIS内置避雷器带电检测的基本内容。本文采用的投影法是通过测得流经GIS内置避雷器上的泄漏电流(I_x)作用在MOA两边电压(U)上的投影($I_R = I_x \cos \phi_{I-U}$)来达到测试目的。MOA端部电压中的谐波对阻性电流测试的结果产生一定的影响,而测量阻性电流基波的数值能够消除此影响。GIS内置避雷器的等效电路图如图2所示。

从图2可以看出,GIS内置避雷器主要是由非线性电阻 R 和电容 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 以并联的方式组成电路。其中,GIS内置避雷器的阻性电流为 I_r ,容性总电流为

I_c ,总泄漏电流为 I_x ,三者之间的关系为

$$I_x = I_r + I_c \quad (1)$$

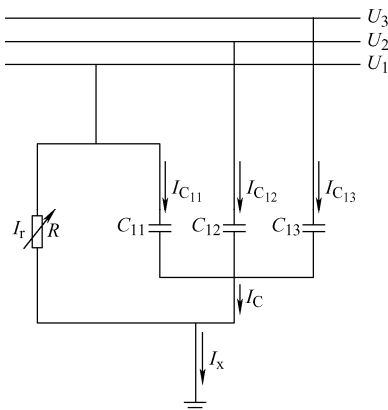


图2 GIS内置避雷器的等效电路图

同时,由图2可以看出,由于相间杂散电容的影响,现场采集得到的全电流 I_x 与实际数值存在一定的偏差,因此,这部分内容主要利用全电流的容性分量来反映,其表达式为

$$I_c = C_{11} \frac{du_1}{dt} + C_{12} \frac{du_2}{dt} + C_{13} \frac{du_3}{dt} \quad (2)$$

式中, u_1 是GIS内置避雷器的电压; u_2 、 u_3 是相邻两相GIS内置避雷器电压; C_{11} 是GIS内置避雷器的对地电容; C_{12} 、 C_{13} 是相间杂散电容。

因为电力系统的三相电压的关系是镜像的,因此利用采集到的电压信号 u_1 ,按照三相电压镜像的关系得到电压信号 u_2 、 u_3 以及时频域转换后的容性电流 I_c 。利用海森矩阵的方法,可以计算得到 C_{11} 、 C_{12} 和 C_{13} 的数值,再利用雅克比矩阵对容性电流 I_c 进行计算。

经过与真实的测试结果相比较,GIS内置避雷器的阻性电流可以通过对指数波 Ae^{-gt^2} 进行曲线拟合得到,其中 g 表示的是与指数波形状有关的参数, A 表示的是指数波的幅值。因为阻性电流的正、负半波的幅值不一定完全相等,因此GIS内置避雷器的阻性电流可以利用分段的方法对指数波进行拟合,表达式为

$$I_r = \begin{cases} A_1 e^{-gt_1^2} & 0 \leq t_1 < \frac{\pi}{\omega} \\ A_2 e^{-gt_2^2} & \frac{\pi}{\omega} \leq t_2 < \frac{2\pi}{\omega} \end{cases} \quad (3)$$

式中, A_1 是阻性电流正半波的最大瞬间值; A_2 是阻性电流负半波的最大瞬间值。

利用最大程度减少相间杂散电容后的 I_c 、收集并处

理过的时域信号 I_x 以及通过拟合方法得到的阻性电流 I_r ，使用最小二乘法计算 I_r 表达式中的未知参数 g 和 A 。优化原理为

$$\varepsilon = I_x - I_r - I_c \quad (4)$$

在对各个变量进行反复寻优的过程中使用固定的步长，并且只有在误差 ε 满足工程运算要求的准确度时才停止寻优，最终可得到 GIS 内置避雷器的阻性电流。

优化测试方法的具体应用

对 MOA 不间断地施加运行电压才能进行 GIS 内置避雷器阻性电流的测试。传统的测试方法工作量很大，试验时间较长，最大的弊端是需要反复拆装 GIS 内部的导体，使得 GIS 设备存在着一定的安全隐患，这也是 GIS 内置避雷器阻性电流测试方法需要改进优化的主要原因。

经过改进优化之后，测试电压施加在距离变电站很远的电缆端子上。同时，在谐振升压装置的电压信号输出端便可测得所需的电压信号，随后电压信号通过无线发射装置传输到阻性电流测试仪，并在 GIS 内置避雷器末端的接地点可测得所需要的电流信号。改进后的测试方法如图 3 所示。

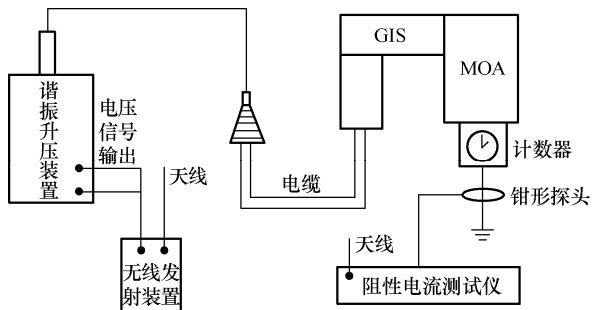


图 3 GIS 内置避雷器阻性电流测试接线图

由图 3 可以看出，无线发射装置可以将采集到的电压信号通过无线传输的方式传递给阻性电流测试仪中。无线发射装置中发送装置和接收装置的结构框图如图 4 和图 5 所示。

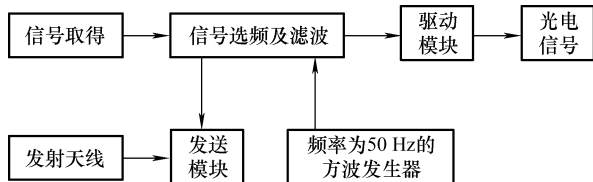


图 4 发送装置结构框图

由图 4 和图 5 可以看出，发送装置是由方波发生器、

信号选频及滤波电路、发送天线、驱动模块、光电信号电路和发送模块等构成，它的作用就是收集电网中的电压信号。而接收装置包括 LCD 显示电路、A/D 转换电路、移相器、接收天线、方波发生器（50 Hz）、接收模块、整形电路和单片机，它主要负责接收电网的全电流幅值和相位信号、电压幅值和相位信号，并通过 LCD 显示屏显示全电流的相位差和采集结果等内容。

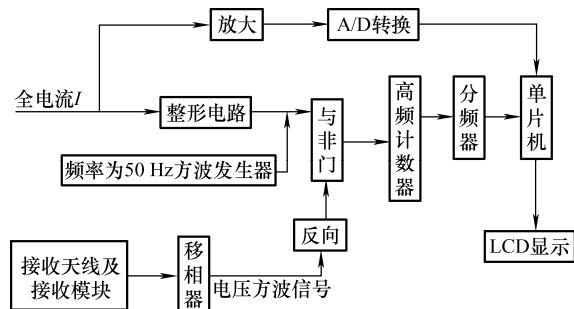


图 5 接收装置结构框图

与传统测试方法相比，改进后的方法操作得到简化，测试的工作量减少，这也使得测试时间大大缩短，从而显著地提高了工作效率，并在很大程度上降低了工程成本。

结束语

本文针对 GIS 内置避雷器阻性电流测试方法进行了研究，以期对避雷器阻性电流的测试找到更加安全、准确和高效的方案。通过优化后的测试方法有利于当前电网安全平稳运行。根据研究内容得到以下结论：

1) 因为 GIS 内置避雷器长期承受着系统电压、过电压等因素的影响，使得 GIS 内置避雷器绝缘性能降低，从而使得 GIS 内置避雷器老化，进而增大阻性电流，导致局部温度过高，若未及时处理，则会造成绝缘击穿，甚至发生避雷器爆炸。

2) 对阻性电流的测试可以有效弥补当前 GIS 内置避雷器检测盲区，能够及时发现 GIS 内置避雷器的缺陷并避免发生避雷器事故，从而保障了 GIS 设备安全稳定运行。

3) 利用优化后的方法对 GIS 内置避雷器的阻性电流进行测试时，能够在很大程度上减少测试的工作量，在测试效率得到提高的同时，便于变电站 GIS 内置避雷器的维护。EA

（收稿日期：2020.08.24）