10 kV电缆超低频介质损耗检测技术应用

阐述了10 kV电缆超低频介质损耗检测的原理和方法，对一条10 kV电缆开展了超低频介质损耗测试，发现介质损耗超标，找出介质损耗超标的原因，对有问题电缆接头进行解体分析，为电缆超低频介质损耗检测的应用提供参考。

张家午[1] 杨军亭[1] 刘兴瑞[2] 张 玉[1]/1.国网甘肃省电力公司电力科学研究院
2.甘肃省交通科学研究院有限公司

张家午/工程师

关键词/Keywords

电缆·
超低频·
介质损耗·
测量·

0 引言

随着我国社会经济的快速发展，各地的城市化进一步提高，电缆线路已逐步成为输电线路和配电线路的主体，10 kV电缆线路长度已大比例超出架空线路的长度。因此，10 kV电缆线路的安全稳定运行是整个电网安全运行的重要保证[1]。据统计，近十年期间电力系统输电和配电电缆线路发生的各类故障中，配电电缆线路故障占比高达85%左右。配电电缆线路故障中，电缆附件故障占配电电缆线路故障总数的比重约为83%。

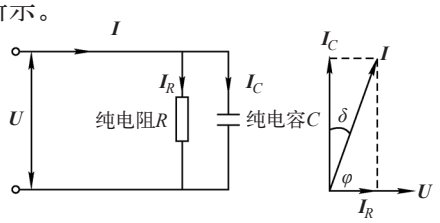
电缆通常可以有很长的寿命周期，然而电缆在实际运行中往往受到各种不利因素的影响使得寿命减少，比如绝缘劣化、外力破坏等，其中绝缘故障是电缆事故的主要原因。因此，对电缆进行定期的绝缘性能测试和诊断是非常重要的。介质损耗因数（tan δ）是反映电缆绝缘性能的一项重要指标。通过测量介质损耗值的大小，可以发现电缆绝缘整体受潮、油或浸渍物脏污及劣化变质等缺陷，对确保电缆的安全运行具有重要作用[2]。

国网甘肃省电力公司科技项目（52272216002W）。

1 电缆介质损耗测量的原理及意义

在电压作用下，电缆绝缘介质产生一定的能量损耗，这部分损耗称为介质损耗，简称介损。产生介质损耗的主要原因是绝缘介质电导、极化和局部放电。介质损耗的大小直接反映电缆绝缘性能的优劣。对于同一电缆，介损越小，绝缘性能就越好，反之亦然。

为便于分析，通常将绝缘介质看成等效电阻R和等效电容C的并联电路。绝缘介质的并联等效电路及相量图如图1所示。



（a）并联等效电路　　（b）相量图

图1 绝缘介质的并联等效电路与相量图

图1a中，在交流电$\boldsymbol{U}$的作用下，绝缘介质中流过的电流为$\boldsymbol{I}$，总电流$\boldsymbol{I}$由流过R的有功电流$\boldsymbol{I}_R$和流过C的无功电流$\boldsymbol{I}_C$组成。电压$\boldsymbol{U}$与电流$\boldsymbol{I}$之间的夹角φ为功率因数角，称功率因数角的余角δ为介质损耗角，如图1b所示。常用δ的正切值tan δ来表示介质损耗的大小，tan δ是阻性有功功率损耗P与无功功率Q的比值，即

$$\tan\delta=\frac{P}{Q}=\frac{I_R}{I_C}=\frac{1}{\omega RC}$$

通过测量tan δ可以发现一系列绝缘缺陷。一般情况下，若电气设备的绝缘良好，tan δ不会随着电压的变化而变化，但是如果绝缘有缺陷，特别是绝缘内部存在气隙时或介质进水潮湿时，tan δ随电压的变化会很明显[3-5]。

2 超低频介损检测方法

目前对配电网电缆进行介损检测试验已具备较高准确度，但当配电电缆进水或受潮时，电缆绝缘介质的参数发生改变，大大降低了介损试验的可靠性和有效性。目前电缆绝缘测试相关国际标准，如IEC 60502、IEEE 400.2等都推荐采用超低频(Very Low Frequency，VLF)介损检测技术来实现电缆绝缘性能的检测。

电缆超低频介损检测就是在0.1 Hz超低频正弦电压下进行介损测试，对被测电缆施加0.5U_o、1.0U_o和1.5U_o三个电压，每相电缆单独进行测试，通过采集流经电缆的泄漏电流信号以及电缆电容、电阻得到介损值，超低频介损检测加压顺序如图2所示[6]。

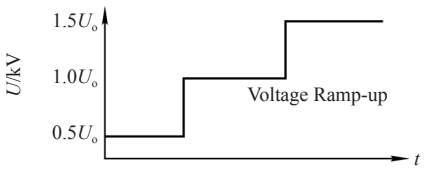


图2 超低频介损检测加压顺序

在每个测试电压下，分别测量8个介质损耗（TD）数值，然后得出TD的平均值、差值、标准误差以及介损值随测试电压变化的曲线，如图3所示。

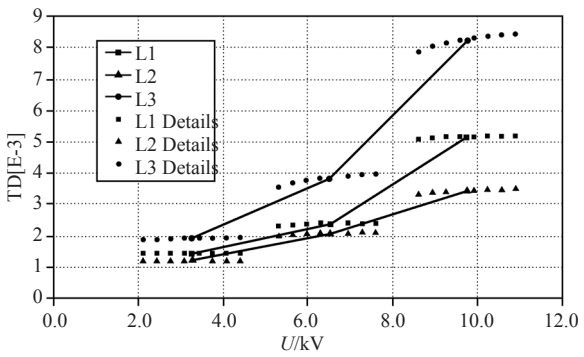


图3 超低频介损测试曲线

超低频介损试验方法如下：

1）电缆测距。测量电缆的长度、所有接头位置与数量。

2）绝缘电阻测量。采用5 kV绝缘表测量电缆的绝缘电阻。

3）超低频介损测试。检查电缆终端清洁并处于良好状态，将高压连接电缆一侧与被测电缆终端连接，另一侧与测试主机连接，将其他相电缆终端与检测装置接地，确定所有接线连接无误后开展试验，根据试验数据和超低频介损诊断标准，判断被测电缆的绝缘状况。电缆超低频介损试验诊断标准如下表所示。

表 超低频介损试验诊断标准

电缆绝缘层老化状态评价结论	超低频介损随时间稳定性（U_o下测的标准误差）	关系	介损变化率（1.5U_o与0.5U_o超低频介损平均值的差值）	关系	U_o下的介损平均值
无须采取行动	<0.000 1	与	<0.005	与	<0.004
建议进一步测试	0.000 1～0.000 5	或	0.005～0.08	或	0.004～0.05
需采取检修行动	>0.000 5	或	>0.08	或	>0.05

3 电缆超低频介损测试的应用

2016年8月文博会保电期间，对敦煌供电公司鸣山开闭站111至会展中心111的10 kV XLPE电缆进行超低频介损测试。此线路全长1 887 m，线路有中间接头3个，电缆投运时间不详。检测三相电缆绝缘电阻，发现A、B两相电缆的绝缘电阻严重偏低，A相为44 MΩ，B相为32 MΩ，C相电缆绝缘电阻8 GΩ；A、B两相介损“随时间稳定性”和“介损平均值”两个指标均达到异常状态标准，其中介损平均值为59.9‰。检测数据如图4所示。

试验完成后，对绝缘电阻及介损缺陷进行处理，步骤如下：

1）将新旧电缆交接处的电缆中间接头切除，经检测靠近鸣山开闭站一侧电缆介损正常，靠近会展中心的1 263 m长的电缆介损异常。

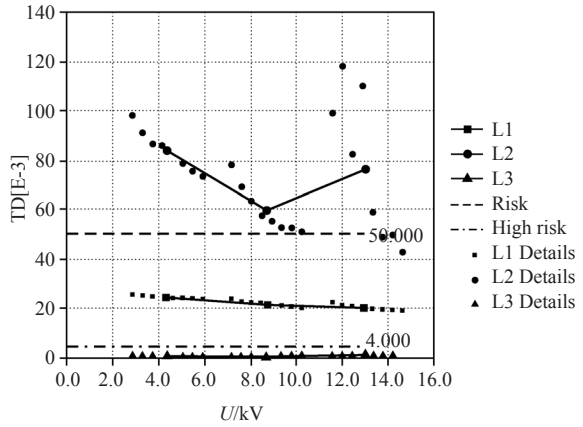


图4　故障电缆测试曲线

2）将异常段电缆中间位置（靠近会展中心664 m）的中间接头切除，经检测靠近鸣山开闭站一侧电缆介损正常，靠近会展中心的电缆介损仍异常，测试过程中发生中间接头加压击穿事件。

3）将距离会展中心的238 m处中间接头切除，再次测量两侧电缆均恢复正常状态，由此可知，此接头是导致电缆低频介损及绝缘电阻异常的原因。

4）对处理后的电缆进行整体检测，三相电缆的绝缘电阻恢复至14 GΩ，介损值均在3‰以下，检测数据曲线如图5所示。

对电缆第三个中间接头进行解体分析，通过解体发现中间接头应力锥端部防水带材明显进

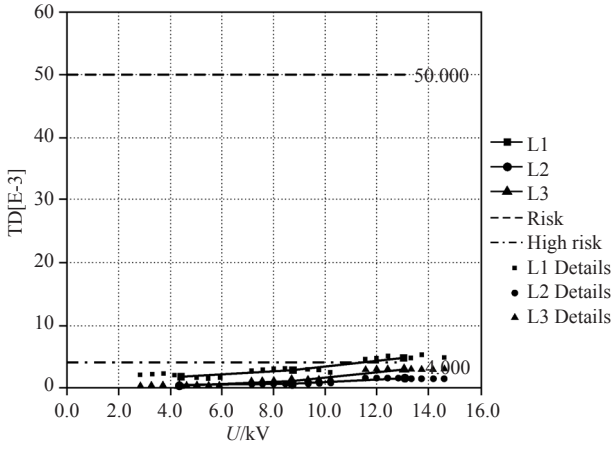


图5　故障电缆复测曲线

图6　电缆接头解体图

水，应力锥内部进水，最终导致绝缘电阻和低频介损测试异常。解体结果如图6所示。

4　结束语

10 kV电缆超低频检测技术是国际先进的电缆绝缘状态评估和检测方法，在国外的应用较为广泛，国内则开展甚少。超低频介损检测技术可以提高电缆介损检测的准确性，尤其是当电缆进水受潮时，检测结果可靠性较高。

参考文献

[1] 褚晓锐，颜怀梁，钱波．电缆试样的介质损耗测试试验及分析[J]．西华大学学报：自然科学版，2006(5)：63-65，107．

[2] 尹燕民，杜永刚，王德胜．电缆超低频(VLF)正弦波耐压试验的应用[J]．设备管理与维修，2014(增刊1)：103-104．

[3] 张宗喜，曾宏，方欣，等．电力电缆绝缘整体老化测试技术的研究及应用[J]．中国电业：技术版，2016(2)：49-51．

[4] 袁野，陈剑，贾志东，等．10 kV XLPE电缆受潮绝缘特性研究[J]．电网技术，2014，38(10)：2875-2880．

[5] 曾菰．基于局放和介损的10 kV XLPE电缆绝缘诊断研究[D]．武汉：华中科技大学，2014．

[6] 赵建刚，侯建设．0.1 Hz超低频试验在交联电缆中的应用[J]．高电压技术，2004(增刊1)：77-78．

(收稿日期：2018－03－21)EA