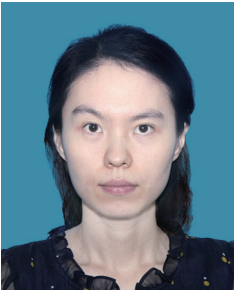


回复电压法在电缆老化诊断中的应用研究

对配电电缆的老化状况进行有效评估，从而避免因电缆绝缘老化造成事故，对于提高电网供电可靠性具有重要的作用。基于回复电压法的电缆老化诊断应用研究，在大量现场测试的基础上，对电缆老化诊断原理、测试步骤、评估方法和实测应用等方面进行了分析，为可以提高回复电压法在电缆老化诊断过程中的有效性和准确性，积累了一定的实测经验。

吴麒麟¹ 李子轩² 李伟¹ 陶诗洋¹ 王文山¹ 程序¹ 李明忆¹/1.国网北京电科院
2.国网北京检修公司



吴麒麟/工程师

关键词/Keywords

- 电力系统 ·
- 电缆老化 ·
- 油纸绝缘 ·
- 回复电压法 ·
- 现场测试 ·

0 引言

目前采用的电缆绝缘状态判定方法依然主要通过目视和耐压试验，只能粗略判定电缆是否已经损坏，无法细致地判定电缆的绝缘状态。在这种情况下，电缆运行状态是好是坏、是否应该维修或更换只能凭借运行维护人员的经验确定。因此如何评估配电电缆的老化状况和残余寿命、避免因电缆绝缘老化造成事故，对于提高电网供电可靠性有着重要的作用。

本文对基于回复电压法的电缆老化诊断应用，具体对诊断原理、测试步骤、评估方法和现场实测等方面进行了研究，并进行了大量电缆老化现场测试，为RVM法在电缆老化诊断中的实际应用积累了必要的实测经验。

1 电缆老化诊断原理分析

电缆极化现象通常发生在含有杂质的绝缘中，基本上绝缘缺陷为杂质、半

导电层和绝缘老化导致。这些缺陷包括绝缘老化和水分（对于XLPE电缆为水树）。而电缆中绝缘性能良好的部分通常是不能被极化的。施加于电缆一个相对低的直流电压来极化所有这些可极化成分，之后使电缆（电容）在一个短暂的时间内接地放电，通过对两极间残存电荷的释放情况，包含幅度和时间进行分析，从而判断电缆的老化情况。

测试原理如图1所示，首先对电缆施加一个很低的直流电压 U ，使得电缆中的不同老化程度的材料产生极化，然后经过短暂接地放电后，测量这些材料产生的回复电压。

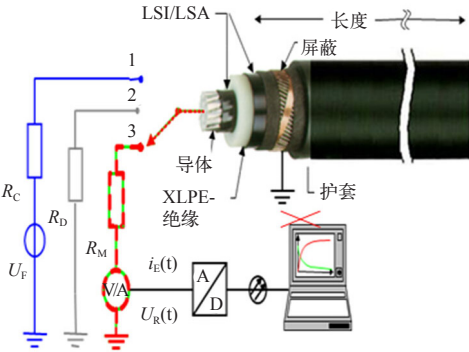


图1 电缆老化测试原理图

诊断测试分为3个阶段：第一阶段为加压阶段，对被测电缆持续加压，使得电缆中不同的成分产生极化；第二阶段则短暂接地放电，使得电缆电容放电；第三阶段为测试阶段，测量不同老化材料此时产生的回复电压信号。

通过进行大量油纸电缆老化的现场测试，为了保证测试的有效性，总结出如下几点诊断测试的现场要求。

1) 新电缆的选取必须为运行一段时间以上的（建议1年），不能为未投运电

缆或电缆盘上的新电缆。

2) 运行电缆的停电试验, 其接地放电时间必须大于2 h, 使电缆绝缘内部彻底放电以减小干扰。

3) RVM法测试油纸绝缘电缆, 可仅拆除远端屏蔽和钢铠接地, 其测试的回复电压为伏特级, 受干扰影响较小。

4) 如为SF₆终端, 须将电缆头从T型靴套中拔出, 且需要清洁干净表面上的油脂, 油脂等脏污会对测试结果有较大影响。

2 测试步骤和评估方法

2.1 测试步骤

采用RVM回复电压法测试油纸电缆时主要分为如下七个步骤。

- 1) 加压1 000 V, 持续1 800 s。
- 2) 瞬间接地放电2 s。
- 3) 测量1 kV的回复电压1 800 s。
- 4) 接地放电900 s。
- 5) 加压2 000 V, 持续1 800 s。
- 6) 瞬间接地放电2 s。
- 7) 测量2 kV的回复电压1 800 s。

总测试时间约2 h, 测试时采用的接线图如图2所示。

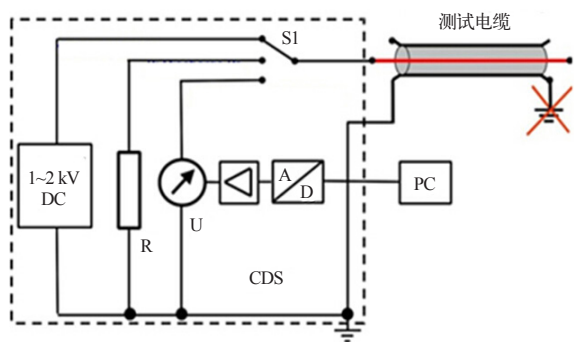


图2 测试纸绝缘电缆接线图

2.2 评估方法研究

RVM回复电压法测试结果的评估基于起始斜率系数Q_a因子和定义阈值来进行, Q_a因子的计算公式为

Q_a = \frac{S[\frac{V}{s}(2\text{ kV})]}{S[\frac{V}{s}(1\text{ kV})]} \tag{1}

式中, S为回复电压曲线的初始斜率; Q_a的计算值

为2 kV下回复电压曲线初始斜率和1kV下回复电压曲线初始斜率的比值。

Q_a因子计算方法如图3所示, 图中U_m表示回复电压最大值, S表示电压升高的初始斜率, t_m表示电压达到最大值时用的时间。

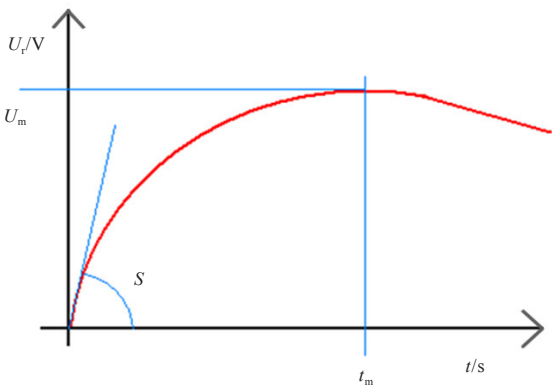


图3 Q_a因子计算方法图

通过大量现场测试的总结和研究, 当Q_a因子在2.0~1.87范围内时, 判断电缆处在干燥状态; 当Q_a因子在1.86~1.65范围内时, 判断电缆处在受潮状态; 当Q_a因小于1.65时, 判断电缆处在潮湿状态。

测试中起始斜率改变依赖于含水量和充电电压的非线性关系。为了找出非线性关系, 要测量出两个充电电压的回复电压起始斜率, 而两个充电电压值是2:1的关系。对于理想干燥电缆和变成接近于1.5倍湿度的电缆, 起始斜率的关系是2:1。

同时, 测试中的另一个重要的评估因数定义为P因数, 其计算公式为

p = \frac{U_m}{St_m} \tag{2}

式中, U_m表示回复电压最大值; S表示电压升高的初始斜率; t_m表示电压达到最大值时用的时间。

当P因数小于0.1时, 判断电缆状态为新; 当P因数在0.1~0.2范围内时, 判断电缆处在中度老化或老化状态; 当P因数大于0.2时, 判断电缆处在老化或严重老化状态。

3 回复电压法现场测试应用

在回复电压法的应用方面, 进行了大量现场测试, 为方法的有效应用奠定了一定的研究基

础。以下为两段油纸电缆老化状态评估的具体测试，其中包含一段退运电缆用品和一段在运电缆。

电缆一为退运油纸绝缘电缆，电缆段长度为10 m，1 kV和2 kV下情况相同,电缆三相6条充电电流现场测试曲线如图4所示。

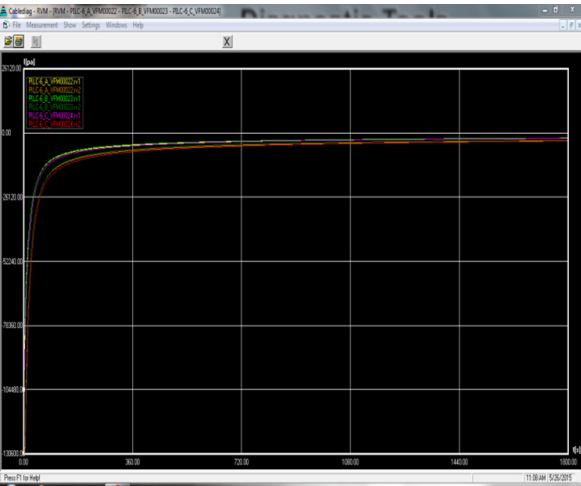


图4 电缆一充电电流曲线

1 kV和2 kV下情况相同,电缆三相6条回复电压测量曲线如图5所示。

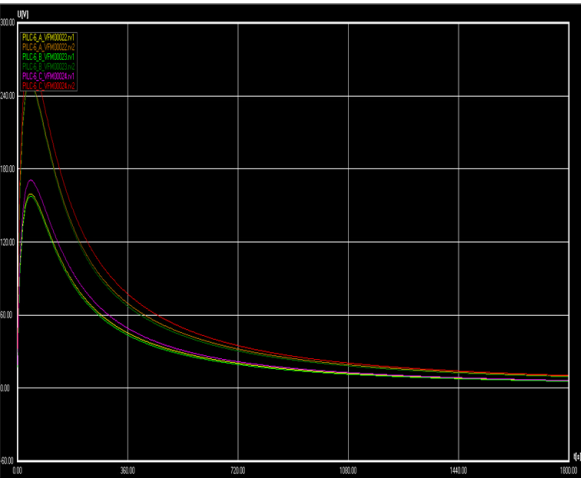


图5 电缆一回复电压测量曲线

根据回复电压曲线计算得到的 Q_a 值和 P 值如下。

- 1) 电缆A相。 $Q_a=1.652$ ， $P_1=0.418$ ， $P_2=0.429$ 。
- 2) 电缆B相。 $Q_a=1.65$ ， $P_1=0.418$ ， $P_2=0.431$ 。
- 3) 电缆C相。 $Q_a=1.65$ ， $P_1=0.417$ ， $P_2=0.429$ 。

测试结果显示，电缆在1 kV和2 kV下的充电电流曲线与0坐标有一定的偏离，表明存在较小的泄露电流，可能是电缆纸绝缘受潮的影响；电缆

诊断结果三相 Q_a 因数值均在1.65左右，表明电缆油纸绝缘处于受潮与严重受潮的临界状态；电缆诊断结果三相 P 值均大于0.2，表明电缆绝缘处于严重老化状态。现场电缆仓库测试现场，对电缆端部绝缘材料剥除过程中，可见到电缆老化受潮现象，验证了试验数据的有效性。

电缆二为XLPE与PILC混接的某段在运电缆，电缆长度为1 046 km，中间接头数为4，其1 kV和2 kV下情况相同，电缆三相6条充电电流现场测试曲线如图6所示。



图6 电缆二充电电流曲线

可见电缆三相6条充电电流曲线重叠在底部的一条直线上，初步判断为始端T型靴套未拔出或者电缆绝缘进水受潮的泄露电流影响所致。

1 kV和2 kV下情况相同，电缆三相6条回复电压测量曲线如图7所示。

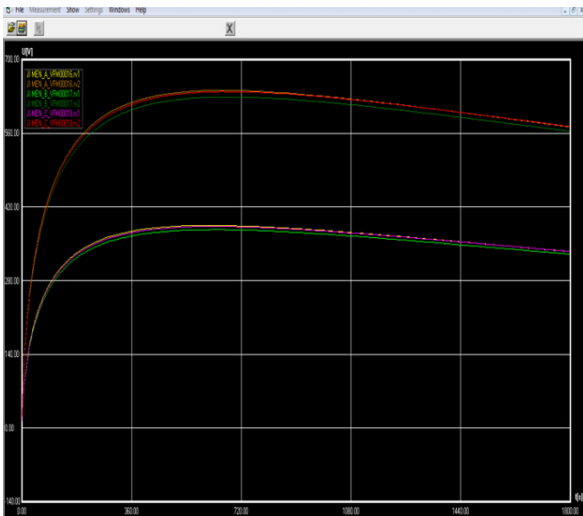


图7 电缆二回复电压测量曲线

根据回复电压曲线计算得到的 Q_a 值和 P 值如下。

- 1) 电缆A相。 $Q_a=1.624$, $P_1=0.074$, $P_2=0.075$ 。
- 2) 电缆B相。 $Q_a=1.626$, $P_1=0.074$, $P_2=0.075$ 。
- 3) 电缆C相。 $Q_a=1.621$, $P_1=0.074$, $P_2=0.076$ 。

测试结果显示, 电缆1 kV和2 kV下的充电电流都较大, 超出系统量程, 可能由于始端T型靴套未拔出或者电缆绝缘进水受潮的泄露电流影响; 电缆诊断结果三相 Q_a 因数值均在1.62左右, 表明电缆油纸绝缘处于受潮与严重受潮的临界点; 电缆诊断结果中三相 P 值均小于0.1, 表明电缆绝缘处于未老化状态。

在对其他XLPE与PILC混接电缆进行测试时, 同样发现XLPE电缆段会使得油纸绝缘RVM法测试结果 Q_a 值偏大、 P 值偏小的现象。

4 结束语

本文主要探讨了基于回复电压法的电缆老化诊断应用, 具体对诊断原理、测试步骤、评估方法和现场实测等方面进行了研究, 并进行了大量电缆老化现场测试, 发现应用振荡波局放试验先消除局放缺陷、排除外护套缺陷及掌握XLPE与PILC混合绝缘的比例等, 都可以提高回复电压法在电缆老化诊断过程中的有效性和准确性, 为RVM法的应用积累了必要的实测经验。

参考文献

[1] 刘振亚.特高压电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[2] 杨以涵.电力系统稳定分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[3] 许树楷, 谢小荣.国家电网公司供电可靠性要求导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[4] 刘刚, 张高言, 周凡.基于等温松弛法的110kV高压电缆老化状况评估[J]. 高电压技术, 2014 (02): 497-504.

[5] 杨雁, 杨丽君, 徐积全, 等.用于评估油纸绝缘热老化状态的极化/去极化电流特征参量[J]. 高电压技术, 2013 (02): 336-341.

[6] 孙仲民, 何正友, 戴铭.基于灰色预测的电力电缆老化过程预警仿真研究[J]. 高电压技术, 2012 (13): 55-60.

[7] 吴倩, 刘毅刚, 李熙谋.高压交联聚乙烯电缆绝缘老化检测技术调研[J]. 电力设备. 2005 (07): 40-50.

[8] 江裕熬, 张百华, 高乃奎, 等.充油电缆纸绝缘老化中局部放电特性的研究[J]. 高电压技术, 2006 (07): 54-57.

[9] 欧阳本红, 赵健康, 陈铮铮, 等.老化方式对交流交联聚乙烯电缆空间电荷分布的影响[J].高电压技术. 2012 (08): 2123-2128.

[10] 杜伯学, 马宗乐, 高宇, 等.采用温差法的10kV交联聚乙烯电缆水树老化评估[J]. 高电压技术. 2011 (01): 143-149.

作者简介

吴麟琳 (1982-), 女, 博士研究生, 工程师, 主要从事电力系统分析与保护研究。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**

(编辑: 杨得润)