基于PDC方法的XLPE中压电缆绝缘性能的检测及分析

通过极化－去极化电流法对中压电缆的绝缘状况进行检测，并对检测数据进行分析。由于去极化电流的高频成分特性与被测电缆的长度相关，当标准新电缆长度与老化电缆长度相差较大时，会影响对电缆老化状况的判定。尝试通过分析对电缆长度相对更不敏感的去极化电流低频成分来克服电缆长度带来的影响。通过分别分析去极化电流低频成分的幅值范围、平均放电速率及受到不同极化时间的影响来判定电缆的绝缘老化状况。最后将该分析用于已修复电缆，可以发现已修复电缆特性接近于相同长度的新电缆，说明该分析确实可以实现鉴定电缆老化状况的功能。

马雪莲[1] 李延春[2] 龚 彬[3] 巩 峰[4] 杨 建[1]／1.华北油田公司水电厂 2.河北华北石油港华勘察规划设计有限公司 3.华北油田公司第一采油厂 4.华北油田采油工程研究院

马雪莲／工程师

关键词／Keywords
中压电缆·
绝缘性能检测·
PDC方法·
低频成分分析·
已修复电缆分析·

0 引言

交联聚乙烯电力电缆（以下简称“XLPE电力电缆”）因其可靠的电气及力学性能，目前在我国得到了广泛的应用[1]。我国在20世纪90年代初，开展了大量的城市电网改造工作。

由于电缆在长期运行中产生的电树、水树老化现象，极大地破坏了电缆的绝缘性[2-3]。在区域中心城市，电缆的敷设长度和工作年限都在迅速增加。除人为因素外，大部分电缆事故由电缆绝缘老化引起[4-6]。由绝缘老化带来的停电事故可能导致极大的经济损失，严重危害电网安全，一旦发生故障，将影响设备的安全稳定运行，导致大面积停电[7]。为此需要检测电缆的绝缘状况，以确保电缆安全运行的任务越来越重[8]。

人们对于XLPE电缆绝缘中电树的研究还有很长的路要走[9]。目前的电缆绝缘状况老化测试技术主要有直流分量法、直流叠加法、介质损耗正切角值tgδ法、局部放电法和极化－去极化电流法（PDC法）[10-11]等。

这些方法都取得了不同程度的成功，但是要想完整地评估电缆的绝缘状况，需要两种类型的方法[12]：一种用于检测大段电缆的总体性能；另一种用于检测局部区域的性能。

本文采用的PDC法是一种用于检测大段电缆整体性能的方法，所使用的测量仪器简单、轻便，并且该方法已经在工业中证明可以有效地检测出多种原因导致的电缆绝缘性能的下降。

1 极化－去极化电流法基本原理

极化－去极化电流法（PDC法）的测量原理如图1所示[13]。

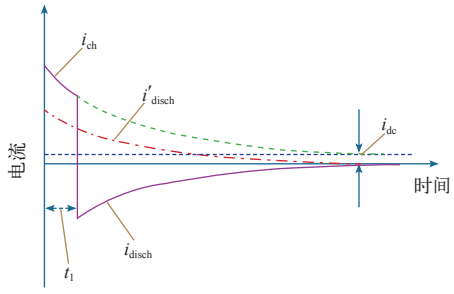

图1 PDC方法中电流的变化

在PDC测量方法中，通过一个恒压源给测试电缆充电，此时产生充电电流i_{ch}，该电流经过足够长时间的充电后会达到稳态电流i_{dc}。经过确定的一段充电时间t，断开电源进行放电，此时产生放电电流i_{disch}，经过足够长的放电之后，该电流将减少至0。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由于充放电过程与电源电压和电缆的电气特性相关，在使用确定恒压源进行试验的情况下，可以通过分析充电电流i_{ch}及放电电流i_{disch}来判断电缆的电气特性，从而确定电缆是否过度老化。

采用PDC方法进行电缆绝缘状况的测量时，需要对测量数据进行分析，通过特定的标准判断电缆是否过度老化。

然而目前并没有通行的用于测量、判断的方法，一些相关研究中所用的分析方法往往也针对的是长度相近的电缆样本。本文尝试采用一些自拟的方式对数据进行分析，通过对比长度差异较大的电缆的试验数据，提出一些对电缆长度相对更不敏感的分析方法，同时尝试将该分析用于已修复电缆，已验证其可行性。

2　测量电路及测量步骤

PDC法测量电路原理如图2所示。

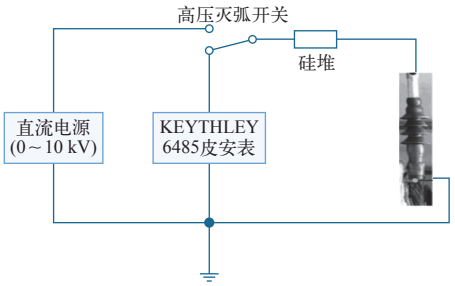

图2　PDC法测量电路原理

试验开始时，将高压灭弧开关拨至与电源相连，通过电压源给电缆充电。经过一段确定的极化时间后，再将开关拨至与皮安表相连，将电源切出电路。

通过皮安表KEYTHLEY6485观测并记录去极化电流，并将数据传送至电脑，以便分析。

以上过程通过电脑程控，实现自动化的测试与记录。

在极化阶段，由于电源的干扰，记录到的极化电流中噪声成分较大，尤其是极化电流的低频部分，受到极大的影响。为此，本文的数据分析主要是针对去极化电流进行的。同时，由于开关切换可能带来的冲击电流的影响，故去极化电流的数据均忽略最开始的一段。

3　去极化电流低频成分的分析

3.1　电缆长度对去极化电流的影响

若将电缆视作纯容性元件，则去极化电流应当是指数函数，其半对数图是一条负斜率的直线。然而实际上电缆的去极化过程并非完全吻合理论上的电容曲线，当去极化电流减小到一定数值时，放电速率将极大减慢，在半对数图上表现出明显的拐点。因此，可以将电缆的去极化过程分为高频部分与低频部分。其中高频成分在约1 min内可由几十微安变化至几纳安，而低频成分则可能经由几分钟乃至十几分钟由几纳安变化至几十皮安。

试验中，对60 m新电缆及0.5 m充分老化电缆的去极化电流记录，如图3所示。

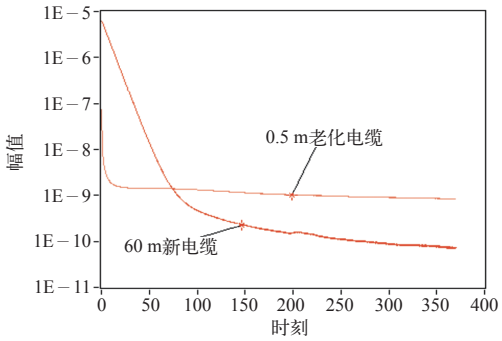

图3　60 m新电缆及0.5 m老化电缆去极化电流

从图3中可以看出，去极化电流的高频成分受电缆长度的影响。当电缆长度有较大差异时，去极化电流高频成分的放电速率与持续时间有明显差异。通过图3可以验证，当老化电缆长度相对较短时，其高频成分放电速率仍快于新电缆，而高频成分的持续时间则要短的多。

相对而言，去极化电流的低频成分受电缆长度的影响较小，更便于反映老化电缆与新电缆间的电气特性的差异。

3.2　去极化电流低频成分的数值范围

从图3中可以看出，充分老化电缆和新电缆的去极化电流低频成分的电流大小有明显的差异。

当老化电缆的去极化电流降低至数纳安时，其放电速率大幅下降，进入去极化电流的低频成分，在半对数图上表现为明显的拐点。在整个试

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

验数据记录过程中，老化电缆的去极化电流的低频成分始终保持在纳安级别。

新电缆的高频成分不仅持续的时间相对要更长，进入拐点时的电流值也更小。新电缆的低频成分可以由几百皮安逐渐降低至几十皮安。当放电时间超过10 min时，电缆经过充分放电，其去极化电流将降至1 pA以下。

通过多组对比试验可以验证，电缆长度有较大差异时，去极化电流高频成分的持续时间有与电缆长度正相关的明显差异，但老化电缆的去极化电流低频成分的数值范围与新电缆相比，仍有较明显的不同。

通常充分老化电缆的去极化电流在本文所用的数据记录时间内，保持在1 nA以上，在半对数图上进入拐点时的电流值有几纳安。而新电缆的去极化电流进入拐点时的电流值更小，不足1 nA，经过长时间放电后可由几百皮安降低至几十皮安。

3.3 去极化电流低频成分的放电速率

去极化电流高频成分的放电速率和持续时间都与电缆长度有明显相关性。当电缆长度差异较大时，老化电缆去极化电流高频成分的放电速率可能明显快于新电缆，难以通过高频成分的放电速率鉴别电缆是否老化。但通过试验可以发现，在老化电缆和新电缆之间，低频成分的放电速率有较明显不同。

为了对比老化电缆和新电缆间低频成分放电速率的差异，需要拟定一个参数，用于反映低频成分的放电速率。为此可以考虑对低频成分做拟合，通过拟合函数的参数来反映平均放电速率。

由于各电缆低频成分的放电速率很低，幅值较小，直接选取去极化电流低频成分电流值做拟合，不能明显地展示差异。为了更好地展现不同电缆低频成分放电速率间的差异，可以选择低频成分的自然对数作为拟合对象，对其进行线性拟合。拟合图形如图4所示。

从图4中可以看出，拟合直线较好的与低频成分相吻合，说明低频成分自然对数数据确实近于线性数据。事实上通过多种拟合方式对低频成分做拟合，得到的拟合函数图形均近似于直线。

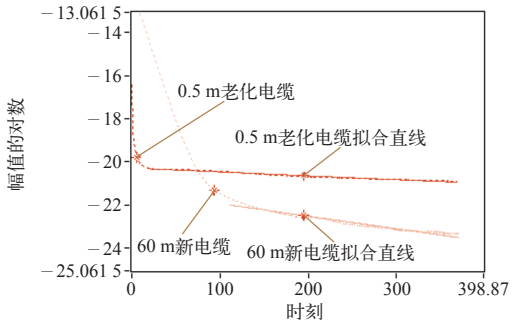

图4 60 m新电缆及0.5 m老化电缆去极化电流拟合直线

通过计算可以得出，60 m新电缆去极化电流低频成分的拟合直线斜率为−0.005 83，而0.5 m老化电缆去极化电流低频成分的拟合直线斜率为−0.001 79。通过拟合直线斜率，不难看出新电缆低频成分的放电速率远快于老化电缆。

需要注意的是，由于去极化电流低频成分幅值极小，测量过程中较容易受到环境干扰，故由低频成分测量数据拟合成的直线斜率也并不是确定常数，会因为试验环境的变化而变化。但通过多次试验可以验证，新电缆及老化电缆拟合直线斜率间的始终存在明显差异。新电缆的拟合直线斜率往往大于−0.004，而老化电缆的拟合直线斜率不足−0.002。

3.4 不同极化时间对低频成分的影响

当极化时间不同时，相同电缆的去极化电流也是不相同的。由于0.5 m老化电缆过短，可知仅需不长的时间就可以几乎充电至饱和，对于检测极化时间差异带来的去极化电流变化的试验是不合适的。故使用10 m部分老化电缆来代替。不同极化时间对去极化电流低频成分影响如图5所示。

从图5中可以看出，对于不同极化时间，老化电缆去极化电流低频成分的差异更大。对比极化时间分别为5 s、60 s和120 s时的去极化电流，选取确定的记录时间点。如240 s时，老化电缆的低频成分电流值差异超过0.1 nA。而新电缆的差异仅在20 pA左右。

这种差异显然是与上述关于低频成分幅值范围和放电速率的分析相一致的。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

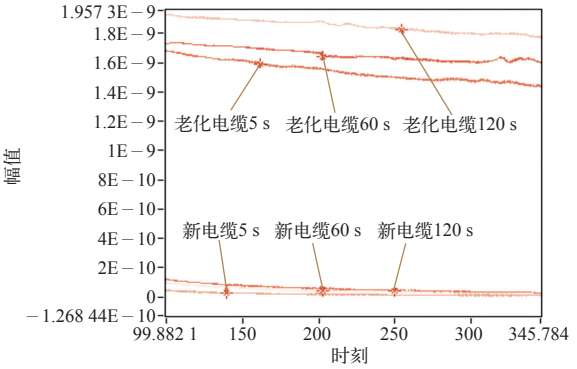

图5　不同极化时间对去极化电流的影响

当电缆越是充分放电，去极化电流就越趋向于0，不同极化时间对应的去极化电流曲线就越重合。

由于老化电缆低频成分电流较大、放电速率较慢，所以在有限的观测时间内，远未能充分放电，导致去极化电流间有相对更明显的差异。而新电缆则因放电速率较快、低频成分电流较小，此时已经相对更近于完全放电，电流值间的差异也就更小。

若适当延长观测时间，新电缆去极化电流间的差异将由于完全放电而趋于0；而老化电缆则因为未能完全放电，其去极化电流间仍有明显差异。

4　关于已修复电缆的分析

通过分析去极化电流低频成分，可以判断电缆是否老化。接下来，将用相同的标准分析修复电缆，观察其去极化电流低频成分的特性。

以10 m新电缆和10 m部分老化电缆为参照，图6为10 m已修复电缆的去极化电流。

从图6中可以看出，修复电缆的去极化电流介于新电缆和老化电缆之间，且十分接近新电缆。

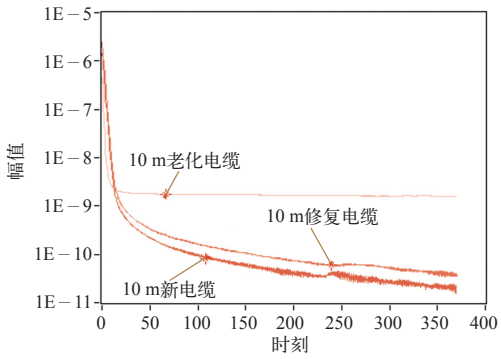

图6　新电缆、老电缆及修复电缆对比

依照上文所述拟合直线的方式观察三者低频成分的平均放电速率，可以计算发现，修复电缆的拟合直线斜率为－0.005 62，而新电缆和老化电缆的拟合直线斜率分别为－0.005 91和－0.000 41，即修复电缆的低频成分放电速率与新电缆十分接近。

通过上述对比，可以看出修复电缆的绝缘状况接近于相同长度的新电缆，而远远优于相同长度的老化电缆。说明修复工作确实起到了良好的改善电缆绝缘老化的效果，同时也验证了关于低频成分的分析确实适用于鉴别电缆的绝缘状况。

5　结束语

通过极化－去极化电流法对XLPE电力电缆的绝缘状况进行检测，并尝试对观测数据进行分析。由于电缆长度的差异可能影响去极化电流，考虑分析对电缆长度相对更不敏感的去极化电流低频成分来判端电缆的老化状况。通过试验对比分析，可以发现在试验数据记录时间内，新电缆去极化电流的低频成分仅有数百至数十皮安，而老化电缆的低频成分有数纳安；采用将低频成分拟合成直线的方式，由直线斜率来表征低频成分平均放电速率，新电缆的拟合直线斜率一般不小于－0.004，而老化电缆拟合直线斜率则不超过－0.002。通过对比不同极化时间下相同电缆的去极化电流可以发现，在数分钟的放电时间后，老化电缆的去极化电流差值可以达到0.1 nA，而新电缆仅有几十皮安。将上述分析应用于已修复电缆，可以发现修复电缆去极化电流低频成分的特性与相同长度的新电缆很接近，说明对于去极化电流低频成分的分析确实可以起到鉴别电缆绝缘老化状况的功能。如何选取更充分的数据分析标准及搭建轻便的在线检测设备是下一步将要解决的问题。

参考文献

[1]　孙建涛，文习山，胡京，等．高压XLPE电缆绝缘多参数在线监测 [J]．电力自动化设备，2008，28(7)：7-11．

(下转第62页)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

法与研究 [D]．济南：山东大学，2013．
[2] 刘海波，高厚磊，刘文格．GPS定位和授时原理及其在电力系统中的应用 [J]．山东电力技术，1998 (5)：12-14．
[3] 傅鸿志，朱祖仪．关于电网时间统一系统的探讨 [J]．电力系统自动化，1994，18 (10)：44-46．
[4] 陈小林，罗毅，王伟平，等．基于故障录波数据的保护特性分析方法及其实现 [J]．电网技术，2005，29 (18)：71-74．
[5] 章坚民，朱炳铨，蒋月良，等．继电保护故障信息处理主站系统设计的核心问题 [J]．电力系统自动化，2003，27 (14)：72-74．
[6] 陈德．500 kV变电站故障录波器联网后台信息调取系统的组建 [J]．中国新技术新产品，2010 (14)：23．
[7] 杜一，张沛超，郁惟镛，等．基于故障录波数据的分布式电网故障诊断系统 [J]．继电器，2003，31 (1)：26-38．
[8] 毛鹏，许扬，蒋平．输电网故障诊断研究综述及发展 [J]．继电器，2005，33 (22)：79-86．
[9] 郭创新．电力企业信息融合及知识管理研究 [D]．杭州：浙江大学，2005．
[10] 廖志伟，孙雅明，叶青华．人工智能技术在电力系统故障诊断中应用 [J]．电力系统及其自动化学报，2003，15 (6)：71-79．
[11] 廖志伟，叶青华，王钢，等．基于GRNN的多故障自适应电力系统故障诊断 [J]．华南理工大学学报：自然科学版，2005，33 (9)：6-9．
[12] Dash P K，Samantaray S R．Fault classification and section identifacation of an advanced series-compensated transmission line using support vector machine [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2007，22 (1)：67-73．

（收稿日期：2015－09－14）EA

(上接第55页)

[2] 赵洪，胡柱国，屠德民，等．用全息摄影术测量XLPE高压电缆绝缘中杂质颗粒的研究 [J]．电工技术学报，1990，5 (3)：56-61．
[3] 李锐．监测电缆绝缘击穿的新方法 [J]．电力系统自动化，2002，26 (23)：58-59．
[4] 姚林朋，王辉，钱勇，等．基于半监督学习的XLPE电缆局部放电模式识别研究 [J]．电力系统保护与控制，2011，39 (14)：40-46．
[5] 郑文栋，杨宁，钱勇，等．多传感器联合监测技术在XLPE电缆附件局部放电定位中的试验研究 [J]．电力系统保护与控制，2011，39 (20)：84-88．
[6] 沈小军，江秀臣，达世鹏．轨道交通直流电缆诊断技术现状及展望 [J]．电工技术学报，2007，22 (9)：22-27．
[7] 邢海瀛，袁汉川，邓春，等．基于分布参数的电力电缆故障定位新型算法研究 [J]．电力系统保护与控制，2011，39 (14)：16-25．
[8] 孙鸣，谢芝东，张航．10 kV电力电缆绝缘在线监测的一种新方法 [J]．继电器，2006，34 (22)：32-35．
[9] 郑晓泉，Chen G，Davies A E．交联聚乙烯电缆绝缘中的电树枝与绝缘结构亚微观缺陷 [J]．电工技术学报，2006，21 (11)：28-33．
[10] 龙望成，高炎辉，关根志，等．交叉互联接线的交联聚乙烯 (XLPE) 电力电缆绝缘在线监测理论分析 [J]．电力自动化设备，2008，28 (3)：59-62．
[11] Abou-Dakka M，Bulinski A，Bamji S S．On-site diagnostic technique for smart maintenance of power cables [C]．2011 IEEE Power & Energy Society General Meeting，2011，5 (22)：1-5．
[12] Dakka M A，Bulinski A，Bamji S S．On-site diagnostics of medium-voltage underground cross-linked polyethylene cables [J]．IEEE Electrical Insulation Magzine，2011，27 (4)：34-44．
[13] Oyegoke B，Birtwhistle D，Lyall J．New techniques for determining condition of XLPE cable insulation from polarization and depolarization current measurements [J]．2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics，2007：150-153．

（收稿日期：2015－10－03）EA

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net