

硅橡胶热老化特性及其对电缆附件运行可靠性的影响

费益军¹, 张云霄², 周远翔²

(1. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210000;
2. 清华大学电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 电力电缆大力发展,使得新型硅橡胶绝缘材料由于其优良的机电热性能得以广泛应用在超高压电缆附件绝缘领域,但是绝缘故障时有发生,成为电缆输电线路的薄弱环节。本文提出材料老化特性是影响超高压电力电缆附件运行可靠性的重要因素,对硅橡胶材料电树老化性能进行了深入研究,研究温度对电树起始电压、形态的影响规律和电树随着时间的发展规律。研究显示硅橡胶电树起始电压随温度的升高明显下降,电树形态从树枝状、松枝状向丛状树枝过渡,表明硅橡胶绝缘材料在电缆运行温度范围内存在明显的热破坏特性,对硅橡胶电缆附件绝缘可靠性造成不利的影响,而较高温度的丛状电树的滞长特性则将成为电缆附件的长期性故障隐患。在特性研究的基础上,对比分析了温度对硅橡胶和聚乙烯电树老化性能的差异,认为当前硅橡胶电缆附件故障频发的主要原因之一是对硅橡胶老化特性缺乏了解,造成现有的常规结构设计上冗余不足。

关键词: 电缆附件; 硅橡胶; 电树; 老化; 热破坏

中图分类号: TM301.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-3076(2014)12-0030-05

1 引言

20 世纪 80 年代以来,我国电网改造中大量使用高压交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电力电缆代替架空输电线路^[1]。2009 年的上海世博园主供电线路采用的 XLPE 电力电缆系统最高电压等级已达到交流 500kV^[2]。2013 年我国陆续建成的舟山±200kV 五端柔性直流工程、南澳±160kV 三端柔性直流工程及目前正在建设的大连和厦门±320kV 两端柔性直流工程均采用 XLPE 电缆^[3]。XLPE 电力电缆已经呈现全面替代充油电缆及浸渍纸绝缘电缆的趋势,并在更广泛领域得以应用。

随着国民经济的快速发展,电力电缆在城市电网中得到了越来越广泛的应用。截止 2013 年,国家电网公司在运 6~500kV 电缆线路总长度为 367600km,同比增加 55159km,增长了 17.7%。其中 66kV 及以上电缆线路总长度为 16014km,同比增

加 1738km,增长了 12.2%。江苏省电力公司截止 2012 年年底,在运 220kV 电缆 131 回,回路长度 374.6km;在运 110kV 电缆 1454 回,回路长度 2541.8km。交联聚乙烯电力电缆由于其良好的工艺结构,耐酸碱、耐腐蚀能力较强,安装敷设简单,运行维护工作量较少,不存在油的淌流问题。基于上述原因,江苏省各主要城市电网中的 110kV、220kV 输电线路均已采用交联聚乙烯电力电缆。

电缆系统中,由于结构紧凑、安装工艺要求高、连接处使用环境恶劣等原因,对绝缘性能的要求较高,用于连接电缆与电缆及电缆与其他设备的电缆附件的击穿故障率要远高于电缆本体。近年来,硅橡胶由于其高弹性、耐温范围广、电气性能优异等特点,作为主绝缘材料在预制式超高压电缆附件中得到了越来越多的应用。目前,中国对于电缆附件的研究比较落后,且绝缘故障时有发生。近年来在北京、广东、青海等地先后发生了多起硅橡胶电缆附件绝缘故障^[4],江苏省电缆输电线路也出现多起电

收稿日期: 2014-10-31
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB239501)、国家自然科学基金(51377089)、国家电网公司科技项目(EPRIGYJSKF(2013)2441)资助项目
作者简介: 费益军(1978-),男,江苏籍,高级工程师,从事输电领域的技术与管理研究工作;
张云霄(1990-),男,福建籍,博士研究生,从事电力电缆材料及结构的研究工作。

附件故障。图 1 是 220kV 秦码 2M16 线 2012 年 11 月发生的硅橡胶电缆接头故障现场。固体绝缘的击穿过程, 目前尚未明确, 有研究提出击穿是逐步累积发展的, 为此开展了电树老化机理的初步研究^[5-8]。如何提高电缆附件的运行可靠性, 是当前电网工作者的重要任务。



图 1 现场电缆接头故障

Fig. 1 Silicone rubber cable joint failure on site

在正常运行条件下, 电缆允许运行的最高温度为 90°C , 当电缆处于过载或短路状态, 短时间内电缆允许承受的温度高达 250°C 。系统工作时由于载流量大, 电缆绝缘实际上长期处于较高温度运行状态, 容易引起绝缘材料无法恢复的老化损伤, 导致绝缘性能下降乃至绝缘故障。目前, 温度作用下硅橡胶绝缘老化破坏特性尚缺乏系统研究。

本文在大量电缆现场运行数据的分析基础上, 对硅橡胶电树老化性能进行了研究, 重点研究了温度对电树起始电压和形态的影响, 通过对比分析温度对硅橡胶和聚乙烯电树老化性能的差异, 对当前硅橡胶电缆附件故障频发的原因进行了讨论。

2 试验

2.1 试验样品

本文利用经典的针板电极试样进行硅橡胶电树老化试验^[9], 试样如图 2 所示。选用电力电缆附件用的热硫化液体硅橡胶, 注入预埋电极的模具, 制成了如图 2 所示的预埋式针板电极硅橡胶电树老化测试样品, 其中针板间距 $(3 \pm 0.1) \text{ mm}$, 钢针直径 $250 \mu\text{m}$, 针尖曲率半径 $30 \mu\text{m}$ 。针尖预埋保证针尖附近无气泡及应力集中。

2.2 电树老化观测实验系统

试验测量系统包括显微图像实时采集系统和高压试验系统, 接线如图 3 所示。

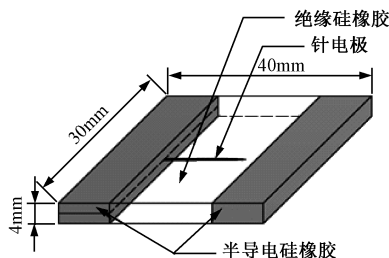
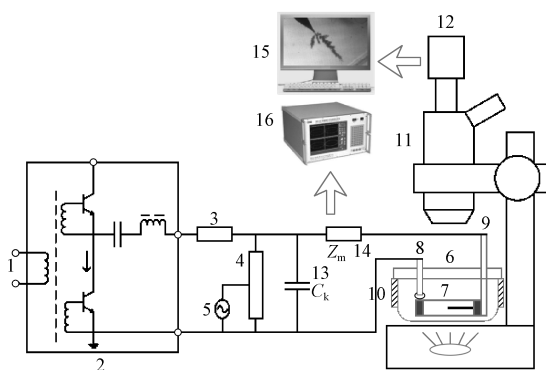


图 2 硅橡胶缺陷模拟试样

Fig. 2 Experiment sample with needle in SIR



1—50Hz 交流稳压电源; 2—谐振式变压变频电源; 3—保护电阻; 4—分压器; 5—示波器; 6—试样容器; 7—试样; 8—低压引出线; 9—高压引出线; 10—电加热; 11—透射光源体视显微镜; 12—高速摄像头; 13—耦合电容; 14—检测阻抗; 15—计算机图形分析; 16—数字式局部放电综合分析仪

图 3 电树实时观测测量系统

Fig. 3 Optical observer measurement system of electrical treeing

进行观测温度对电树影响的实验时, 实验开始前, 将试样及硅油 (防止沿面放电、闪络和电晕) 放入烘箱, 迅速加热至所需温度, 然后一并放入实验容器, 同时在容器外部安设电加热带以保持实验温度恒定。完成上述准备工作后, 在试样上施加工频电压, 以 500 V/s 的速度均匀升压, 直到观测到针尖处电树长度达到约 $10 \mu\text{m}$ 时, 记下电压的有效值, 将这个电压值定义为此试品的起树电压数值。在每个温度点保持实验条件不变, 重复 20 次实验, 获得该温度点下起树电压的统计结果。电树起始后, 即将电压保持在起树电压, 观测硅橡胶中电树的生长特性。

3 温度对硅橡胶电树老化特性的影响

3.1 温度对硅橡胶电树起树电压的影响

选取 25°C 、 50°C 、 75°C 、 100°C 、 125°C 、 150°C 6 个温度点进行试验, 在工频 (50Hz) 电压下测量硅橡

胶的起树电压。图 4 为不同温度下硅橡胶和聚乙烯材料的起树电压标么值分布图,其中硅橡胶材料的起树电压基准值为 25℃ 时的 9.7kV, 聚乙烯材料的起树电压基准值为 40℃ 的 6.4 kV。

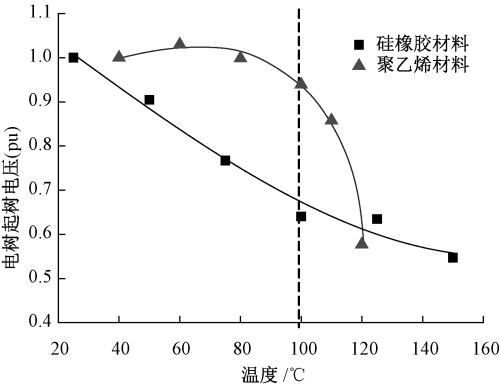


图 4 温度对硅橡胶、聚乙烯起树电压的影响
Fig. 4 Effects of temperature on electrical tree initiation voltages in silicone rubber and PE

图 4 中,随着温度的升高,硅橡胶起树电压呈单调下降趋势,温度较低时下降的速度较快,随着温度升高降幅趋缓。25℃ 时起树电压为 9.7kV, 100℃ 时为 6.7kV, 150℃ 时为 5.3kV。从 25℃ 到 100℃,起树电压降低了 33%, 温度每升高 1℃,起树电压降低 0.44%; 从 100℃ 到 150℃ 降低了 21%, 温度每升高 1℃,起树电压降低 0.42%。

图 4 也给出了聚乙烯的起树电压随温度变化的趋势,聚乙烯试样制作除材料有所不同外,针尖预埋条件为:同样采用预埋技术,针尖曲率半径为 2μm, 直径为 30μm, 针尖距离地电极为 (1 ± 0.1)mm。随着温度的上升,聚乙烯起树电压从 40℃ 时的 6.4 kV 下降到 100℃ 的 6.0 kV, 仅下降了 7%, 温度每升高 1℃,起树电压降低 0.12%。当温度大于 100℃ 时,起树电压则明显下降,从 100℃ 时的 6.0kV 下降至 120℃ 的 3.7kV, 下降了 38%, 温度每升高 1℃,起树电压降低 1.9%。

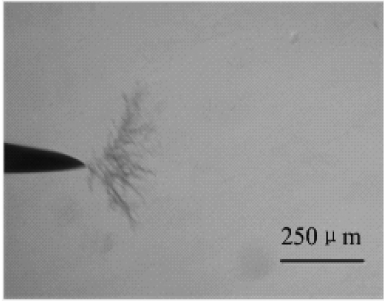
硅橡胶与聚乙烯的电树起始电压均受温度影响,但影响特性不同。随着温度从 20℃ 升高到 150℃, 温度每升高 1℃ 硅橡胶起树电压下降约 0.42% ~ 0.44%, 从室温开始就表现出明显的热破坏特性。而对于聚乙烯材料,在 100℃ 之前,随着温度升高,起树电压没有明显变化,表明在此温度范围内,聚乙烯无明显的热破坏特征。只有温度超过 100℃ 时,聚乙烯才体现出明显的热破坏特性。

因此,以硅橡胶为绝缘材料的电缆附件,处于将

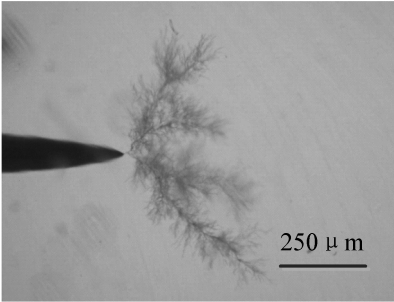
近 90℃ 的运行温度中,其内部电场控制必须考虑热破坏特性这一因素,否则容易引发热破坏,导致电缆附件故障。

3.2 温度对硅橡胶电树形态的影响

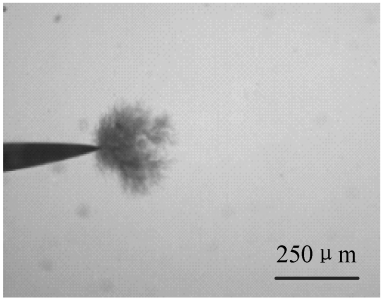
电树起始后,随着电压作用时间的延长,硅橡胶材料中电树将会发展成为树枝状、松枝状和丛状三种典型的电树形态^[10],如图 5 所示。其中树枝状电树仅有少量的树枝通道,如图 5(a) 所示,树枝的颜色较浅,通道的分叉较少;松枝状电树如图 5(b) 所示,树枝的颜色较深,生长速度快,树枝具有较为明显的粗大主通道即“枝干”,枝干通道上引发出多条分枝并在分枝上生长出密集的针状“松叶”;丛状电树如图 5(c) 所示,电树起始后,针尖处短时间内引发出大量新的树枝通道,集聚在针尖附近形成了较



(a) 树枝状 (10.5kV, 生长 150s)



(b) 松枝状 (11.5 kV, 生长 200s)



(c) 丛状 (10.0 kV, 生长 200s)

图 5 典型硅橡胶电树形态

Fig. 5 Typical forms of electrical trees in silicone rubber

为茂密的丛状电树。松枝状电树生长快, 容易导致绝缘材料在短时间内击穿, 丛状电树虽然长得茂密, 但有明显的滞长现象, 短时间内不容易发生击穿现象, 具有潜伏性。

在温度和起树电压数据的基础上, 对电树形态进行了观察与数据统计, 结果如图 6 所示。可以看到, 温度较低时起树电压较高, 但是起树电压的分散性较大, 电树多呈树枝型和松枝型, 随着温度的升高, 起树电压明显降低, 分散性呈下降趋势, 电树形态向松枝型、丛状型转化, 当温度高于 100℃ 后, 起树电压已经降至室温起树电压的 2/3 左右, 但是分散性明显降低, 且电树形态全部为丛状电树, 不再出现树枝状、松枝状形态。

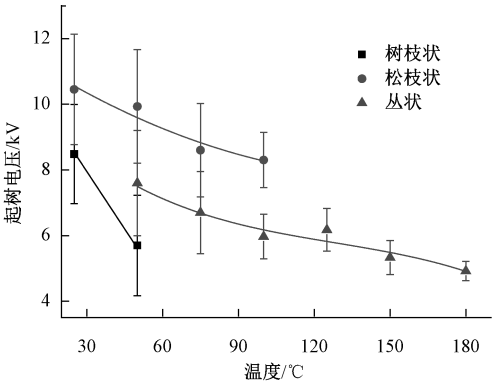


图 6 温度对形成不同形态电树对应的起树电压的影响
Fig. 6 Effects of temperature on electrical tree initiation voltages with different electrical tree formations

从电树形态数据分析可以发现, 随着温度上升, 树枝型电树和松枝型电树出现的概率逐渐减少, 丛状电树出现的概率增大。每种形态的起始电压与总体趋势相同, 呈现随温度升高而降低的趋势, 且松枝状电树的起始电压始终高于丛状电树的起始电压, 没有交叉。

电树在硅橡胶内部的发展, 会经过起始期-生长期-滞长期之后进入下一个生长期-滞长期循环, 直到电树通道接近对面电极, 电树长度快速增加直至击穿^[7]。实验发现, 当电树呈现丛状形态, 往往处于滞长期阶段, 宏观参数变化不明显, 难于诊断。而电缆运行在不超过 90℃ 的较高温度范围, 容易在较低的电压条件下就在电缆附件中硅橡胶内部出现电树, 而且根据上述试验结果, 该电树容易呈现丛状形态, 具有滞长特性, 可潜伏较长时间, 成为电缆附件的故障隐患。

4 硅橡胶热破坏特性对绝缘可靠性的影响

目前不同电压等级电力电缆及其附件均有相应的国家标准。以 220kV 电缆及其附件为例, 国家标准 GB/Z 18890.2-2002 和 GB/Z 18890.3-2002 分别对电缆和附件用绝缘材料聚乙烯和硅橡胶的短时工频击穿强度提出要求, 均为不小于 22kV·mm⁻¹。由此可见, 在电缆的应用中, 对硅橡胶电气击穿性能的要求与聚乙烯的相同。而硅橡胶的短时击穿特性能够满足标准的要求, 同时也由于其优良的电、热和机械性能, 近年来作为新型内绝缘材料在电缆附件中得到广泛的应用。

然而, 由图 4 的试验结果发现, 长期运行在将近 90℃ 的较高温度范围, 聚乙烯具有较好的温度特性, 相形之下硅橡胶电树老化呈现出明显的热破坏特性。这意味着, 在结构相当的情况下, 由于热破坏特性的影响, 硅橡胶在这个温度范围内的绝缘可靠性下降。因此, 在绝缘结构设计中, 应充分考虑硅橡胶在长期老化过程中的热破坏特性, 否则其绝缘可靠性会出现冗余不足。设计上缺乏足够的试验和理论依据, 是目前硅橡胶绝缘电缆附件故障频发的原因之一。

5 结论

- (1) 在电缆运行温度范围内, 聚乙烯电树老化在温度低于 100℃ 的范围内没有明显的热破坏特征, 而硅橡胶则具有明显的热破坏特性。
- (2) 随着温度的增加, 电树形态呈丛状电树发展的趋势。
- (3) 较高温度范围内的硅橡胶中丛状形态电树滞长特性是电缆中长期性潜伏故障隐患。
- (4) 硅橡胶电缆附件故障频发的原因是对硅橡胶老化过程中热破坏特征不了解, 造成现有的常规结构设计上冗余不足。

参考文献 (References):

[1] 应启良 (Ying Qiliang). 交联聚烯烃、特别是交联聚乙烯材料及绝缘技术发展前景 (The insulation technology development prospect of XLPO, especially XLPE material) [J]. 电线电缆 (Electric Wire & Cable), 1999, (4): 2-5.

[2] 陈海波 (Chen Haibo). 500kV 世博输变电工程启动调试方案研究 (Study on startup and commissioning scheme of 500kV world expo transmission and

- transformation project) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 2010, 1 (4): 475-479.
- [3] 杨黎明, 朱智恩, 杨荣凯, 等 (Yang Liming, Zhu Zhi'en, Yang Rongkai, et al.). 柔性直流电缆绝缘料及电缆结构设计 (Insulation material and structure design of HVDC flexible cables) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power System), 2013, 37 (15): 117-124.
- [4] 聂琼, 周远翔, 陈铮铮, 等 (Nie Qiong, Zhou Yuanxiang, Chen Zhengzheng, et al.). 频率对硅橡胶起树电压及电树枝形态的影响 (Influence of frequency on tree initiation voltage and electrical tree shape in Silicone rubber) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2009, 35 (1): 141-145.
- [5] Danikas M, Tanaka T. Nanocomposites-a review of electrical treeing and breakdown [J]. Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2009, 25 (4): 19-25.
- [6] 谢安生, 李盛涛, 郑晓泉, 等 (Xie Ansheng, Li Shengtao, Zheng Xiaoquan, et al.). 外施电压频率对XLPE电缆绝缘中电树枝生长特性的影响 (Influence of frequency of voltage applied on the propagation characteristics of electrical trees in XLPE cable insulation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2006, 25 (3): 33-36.
- [7] 聂琼 (Nie Qiong). 高压电缆附件用硅橡胶的电树枝老化特性研究 (Study on electrical tree ageing characteristics of Silicone rubber used in HV cable accessories) [D]. 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 2009.
- [8] Tanaka T. Space charge injected via interfaces and tree initiation in polymers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8 (5): 733-743.
- [9] Kitchin D W, Pratt O S. Treeing in polyethylene as a prelude to breakdown [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III (Power Apparatus and Systems), 1958, 77 (3): 180-185.
- [10] 周远翔, 侯非, 聂琼, 等 (Zhou Yuanxiang, Hou Fei, Nie Qiong, et al.). 温度对硅橡胶电树枝老化特性的影响 (Temperature effects on electrical tree aging characteristics of Silicone rubber) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2012, 38 (10): 2640-2646.

Thermo characteristics of Silicone rubber and its effects on operational reliability of extra-high voltage cable accessories

FEI Yi-jun¹, ZHANG Yun-xiao², ZHOU Yuan-xiang²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With fast development of power cable, Silicone rubber (SIR), as an advanced internal insulating material, has been widely used in high voltage cable accessories due to its excellent insulation and mechanical performance, but there is still a lot of insulation failure. It was reported that material aging properties are main reason which influences the operational reliability of extra-high voltage cable accessories. In this paper, electrical tree aging characteristics was analyzed including the effects of temperature on electrical tree initiation voltage and tree shape in SIR. It was found that the electrical tree initiation voltage was declined badly with the temperature rise. And electrical tree shape transits from the branch tree and pine tree to bush tree. It was shown that there is thermo destruction under cable operating temperature which causes bad influence on cable operational reliability. Long hysteresis characteristics of bush tree in SIR may become hidden danger of long-term operating cable accessories. The difference of PE and SIR in temperature characteristics was discussed. It was considered that thermo destruction is the main reason of the problem above and the lacking understand of SIR aging characteristics is the main reason of frequent failure in high voltage cable accessories which causes insufficient allowance of architectural design of cable accessories.

Key words: cable accessories; silicone rubber; electrical tree; aging; thermo destruction