

不同绝缘材料制作的高压电缆附件的寿命评估

介绍了一种基于材料电热老化试验后电气绝缘强度劣化程度的测定来评估利用该种绝缘材料制造的电缆附件的设计使用寿命的评估方法,介绍了目前电缆附件寿命评估的现状、电缆附件老化的主要因素、老化条件的确定和试验设备及结果计算等内容。

高智益 郭长春 刘青 李光 林一轩 李譔 张成/国网北京市电力公司检修分公司

电缆上的成功应用,交联聚乙烯绝缘电力电缆逐步取代了油纸电缆,同时也促使电缆附件的生产技术向适宜于交联电缆的方向发展,短短的 20 几年,交联电缆附件形式不断创新,先后出现了绕包—热缩—预制—冷缩等形式,电压等级从 6 kV—35 kV—110 kV~220 kV,现在正在向 500 kV 迈进,制造技术发展可以用飞越来形容,现国内电缆附件的成形制造技术已赶上国外的生产企业。

现代电缆附件的设计、制造技术所涉及的领域很广,包括边缘电场分布、绝缘配合、机械、力学、化学及橡塑成型技术等多领域,是一种综合了多学科的应用技术。对各学科进行深入的基础研究,才能创造各方面适用的专用技术,支撑整个行业的发展,单一的成型技术的突破将制约行业的深化发展。目前我国电缆附件企业与国外企业相比,在设计基本理论、材料研究、专用设备、与电缆的配套及实际运行经验上都存在较大差距,要真正赶超国外同行企业还需在基础研究上进一步学习。

高压交联电力电缆结构单一,且几何尺寸基本一至(有标准规定),所用材料也较单一,国际上对电缆的绝缘寿命评估有很多研究,文献[1、5-6、8-11]均是对电缆绝缘寿命的研究报导,且国际电工委员会也发布有交联电缆寿命的估算公式及相关老化因子的取值,因而电缆的寿命评估可借鉴国际上有关对电缆寿命的评估成果来计算,其特征参数也可参考国际上一些经验取值,有一定准确性和可信度;

0 引言

近年,随着我国经济的高速发展,城市化进程的提速,我国城市的规模不断扩大,城市用电急剧增长,城市电网建设需求增长迅猛,电缆输电已经成为城市电网的主流,电缆线路的安全运行已成为城市供电可靠性的主要影响因素,越来越受到电力运管部门的关注。早期投运的电缆线路至今运行时间已达 20 年,即将接近国际上对交联电缆的预计使用寿命 30 年,这些线路上的附件是否与交联电缆本体具有相同的使用寿命,还能正常运行多久?电网运管部门无法评判,而我国各生产企业对产品寿命也没有有效的评估。是否需要更换新的电缆附件防止电网事故发生成了电网运管部门的一个难题。

我国的电缆附件行业起步比国外晚,第一批电缆附件专业生产企业在 60 年代末才成立,刚开始是油纸电缆附件,附件的成型主要是在安装现场,附件的工厂制造以机械加工为主,生产企业的技术含量低。直到 20 世纪 80 年代,随着交联聚乙烯绝缘在电力



高智益/工程师

关键词/Keywords

寿命评估 ·
老化 ·
电场强度 ·
电场畸变 ·

但电缆附件的结构形式多种多样,不同厂家选材不一,结构尺寸也不相同,附件中的正常工作场强不一致,借用电缆寿命评估计算式计算,算式中的参数也采用电缆的经验取值,评估结果没有可信度。目前对电缆附件寿命评估的研究很少,仅文献[2]是对特定电缆终端的寿命评估,且采用的方法仅仅是对材料在热老化后的机械性能变化来推断寿命,不能完全模拟实际运行条件。而电缆系统的寿命评估是对装有终端的电缆系统进行不同时间的绝缘电老化,然后采用逐级升压击穿法,获得不同老化时期后电缆系统的绝缘特性,来推算电缆系统的绝缘寿命。这一方法只能评估特定的电缆附件与电缆的组合系统,其结果不能推广,且影响因素多,评估成本高。如何来评估不同材料、不同结构尺寸的电缆附件的设计寿命是行业技术的一个难题,且目前国际同行中也没有相关研究的报道。

研究一种能针对不同材料制造的不同结构的电缆附件的寿命评估方法,能较准确评定电缆附件的设计寿命,能大大提升电缆附件的设计水平,同时也可作为电力运管部门对在运电缆附件的处理提供决策依据,是电缆附件制造业的一个难题。本文介绍一种基于电缆附件绝缘材料电老化试验后获取电气性能的变化规律,经数学拟合,获取老化寿命曲线,依据电缆附件实际运行的相关数据来评判附件的寿命。

1 绝缘材料的老化特性

绝缘结构有固体、气体和液体三态。由于GIS设备的绝缘结构为相对简单的气固绝缘结构,其在长期运行中老化现象并不明显,且由于油纸绝缘方便试验,可以采用加速老化方法来等效现场情况,所以国内外的研究主要集中于以局部放电及油中溶解气体特征信息对变压器或电缆等油纸绝缘设备故障的严重、风险程度进行评估和故障预警预测,而对GIS局部放电的预警问题研究较少。

绝缘材料在使用或贮存过程中,其性能随时间发生的不可逆的劣化。电工设备运行的可靠性,很大程度上决定于绝缘材料的老化特性。据统计,电工设备的故障率与绝缘材料的使用时间有明显关系,其相关曲线称浴盆曲线如图1所示。

曲线中三个区域:A为早期故障区,大体上是由于材料质地或随后的制造工艺的缺陷所致;B为随机故障区,大体上是由于运行中的异常条件所致;C为老化所致故障区,故障率随使用时间的增加而增大。

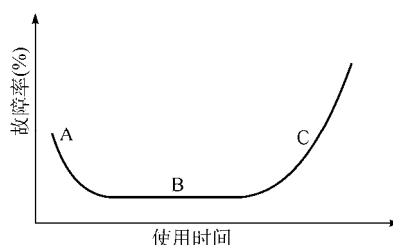


图1 浴盆曲线

造成绝缘材料老化的因素很多,排除环境因素对绝缘材料的影响,绝缘材料的老化主要是热老化、电老化和机械老化等。

1) 热老化。电工设备长期在运行温度作用下,由于绝缘材料发生热分解和热氧化裂解等反应,造成分子量、交联度及结晶度的变化,使材料发脆、厚度减薄及形成气隙,生成新的离子杂质和挥发物,导致材料的性能劣化。

2) 电老化。高压电工设备中因介质不均匀或电场分布不均匀,特别是在固体或液体材料内部或表面存在气体,就可能产生局部放电。放电产生的带电质点会直接轰击绝缘材料,使材料分解;在放电点可产生很高的温度,使材料发生热裂解或碳化;放电也可能产生各种新的生成物(如臭氧等)而腐蚀材料;放电会发出各种射线及声波,对材料也会起破坏作用。这些都会引起绝缘材料老化。

3) 其他老化因素。绝缘材料在许多场合下要承受各种机械应力的作用,有恒定的、振动的及热胀冷缩循环的。这些应力会导致蠕变破坏或疲劳破坏。在户外使用的绝缘材料受日光直接照射,在紫外线作用下也会发生老化。在核反应堆、X射线装置中用的绝缘材料受到辐射作用,均会发生老化。绝缘材料受潮会使电导增大,加大损耗。水还会溶解许多物质,加速导致老化的各种化学反应。酸、臭氧等也会导致化学老化。对于某些绝缘材料,例如聚乙烯,由于水分的存在,在很低的电场强度下也会发生树枝现象(见固体电介质击穿)。此外,

在温热带地区绝缘材料还会受到各种微生物的损害，即所谓微生物老化。

绝缘材料在实际应用中往往同时受到多种老化因素的作用，其效应并不是各种单一因素老化效应的简单叠加。它们之间还存在着相互作用，所以老化机理很复杂。掌握这些机理可以找出防止老化的方法和制定可靠的人工加速老化试验方法。

电缆附件中内在的机械振动较小，对绝缘材料的老化影响小，但任一电缆附件中其绝缘材料既要承受电缆系统长期运行电压产生的电场作用，同时又因电缆传送负载造成的线路损耗而发热，使电缆附件长期在一较高温度下工作，电、热老化成为电缆附件绝缘老化的主因。

2 电缆附件寿命评估方法的设想

电缆附件中的绝缘材料主要受电、热两种老化因素的影响，而它们对材料的老化作用又有相互影响，单独进行两种老化试验无法评估其综合作用的结果，如果能同时对材料进行电、热老化试验，获取电、热共同老化后的材料性能变化，就能有效反映出材料在实际运行条件下，在电、热老化共同作用下的老化规律。获取电缆附件使用的绝缘材料老化前的原始击穿场强和相同老化条件下不同老化周期后的击穿场强，采用数值计算方法，获取绝缘材料在试验条件下的电热老化后绝缘劣化的时间曲线，从而推导出绝缘材料在这一老化条件下的老化寿命。如果将电热老化试验的条件与运用该材料制造的电缆附件实际运行条件等效，即可得到对应的电缆附件的老化寿命曲线。

3 绝缘老化试验研究

3.1 试验设备

3.1.1 电热复合老化箱

为了能同时对绝缘材料进行电热老化试验，现有试验设备无法满足要求，设计了一专用老化箱，通过对恒温老化试验箱进行改造，加入高电压试验和控制系统，并运用特殊设计的高压套管将高压引入到恒温箱中，利用专用电极对绝缘材料施以均匀电场，可实现对绝缘材料同时进行电热老化试验，试验设备原理图如图 2 所示。

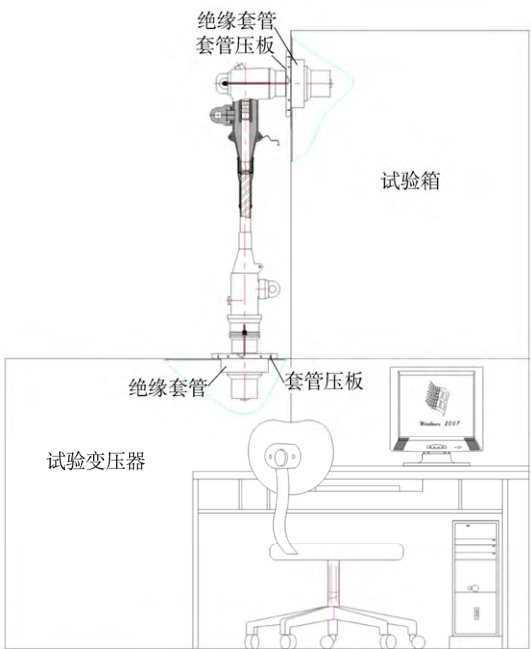


图 2 试验设备原理图

3.1.2 电极设计

为了确保对材料施加到材料试样上的电场的均匀性，根据后期试验要求，设计了几种不同规格和形状的电极，运用 ANSYS 对其进行分析比较，最后选一种最优的方案，电极形状及电场分布如图 3 所示。

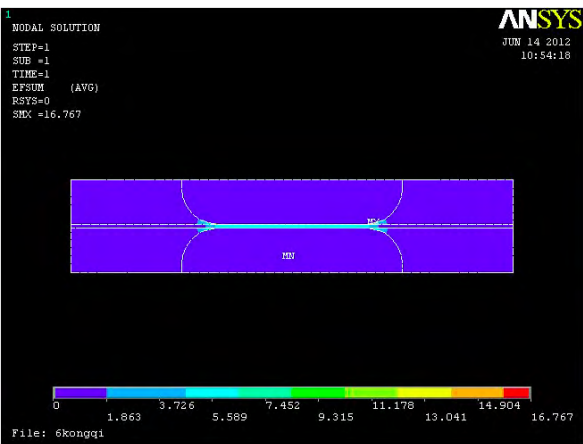


图 3 电极形状及电场分布

计算结果显示，这种结构的电极中间绝大部分区域的电场是均匀场，用它来给绝缘材料样片施加电老化可确保绝缘材料各部位所施加的电场的一致性。

3.2 老化条件的选取

试验结果是否能真实反映实际情况，取决于

试验条件的选取,为了使绝缘材料的电热老化试验结果能有效反映电缆附件的老化寿命,以电缆接头为例来说明老化条件的确定过程。首先,对相应的电缆接头建立电场和热场分布的数学模型,进行实际运行情况下的电场和热场分布的仿真计算,获取电缆接头在实际运行条件下的最高电场和最高温度。

3.2.1 电缆接头的热场分布

电力电缆一般由线芯、绝缘层、衬垫层和外被层等部分构成,其等效热阻如图 4 所示。

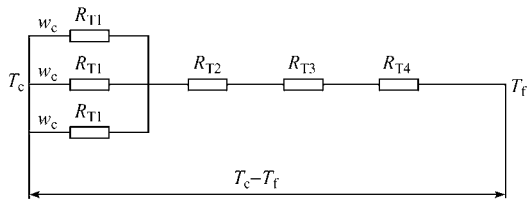


图 4 电力接头的热场分布

电力电缆的接头的发热与散热情况与电缆本体相似,但其结构复杂,一般由电缆导电线芯、电缆绝缘层、接头绝缘、内防水保护层及外防水保护层等部分构成,由于电缆接头外形较复杂,沿长度方向的外径不一,因而其温度分布沿长度方向会有差异,不能只求解某一个断面,为了准确分析其热场分布,采用 ANSYS 分析计算软件,建立接头的热场模型,对接头在额定运行温度下的温度分布进行分析计算,图 5 为 110 kV 接头的温度分布计算结果。

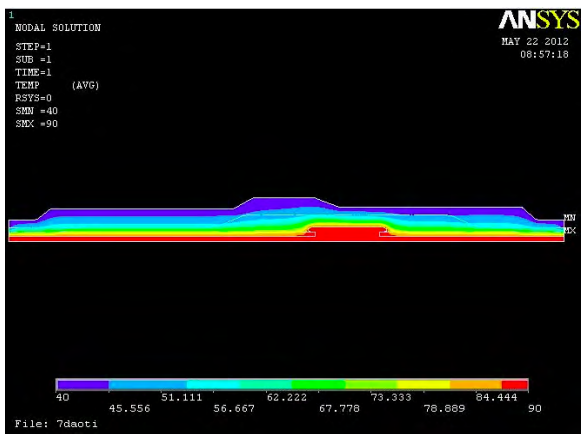


图 5 110 kV 接头的温度分布计算结果

根据计算结果就能获得接头绝缘材料在运行中所要承受的最高温度,作为老化试验温度条件的选取依据。

3.2.2 电缆接头的电场分布

电缆接头中的电场分布也很不规则,在两端和中间电场畸变较严重,人工无法对其进行分析计算,采用 ANSYS 分析软件,建立接头的电场分析模型,可准确计算出接头各部位的电场强度。图 6 为 110 kV 接头等位线和电场强度的分析结果。

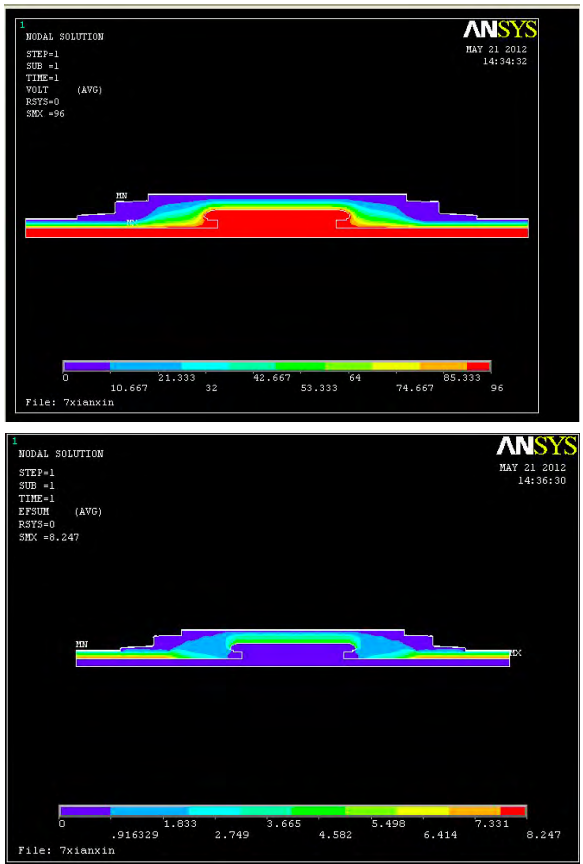


图 6 110 kV 接头等位线和电场强度的分析结果

4 老化特性曲线

通过计算得到的参数 A 和 b ,可得到绝缘材料在该老化条件下的绝缘强度衰减函数 $E(t)=Ae^{bt}$ 。

选择一种绝缘材料按上述方法进行试验,每次检测的老化周期取一个恒定时间,获得的试验结果如下表所示。

表 试验结果

周期数 (t)	0	1	2	3	4	5
击穿场强 (E)	35.0	34.8	34.5	34.2	33.8	33.3

(下转第 260 页)

极 1 组 1 熄弧角降低至 17° ，同时换流变档位到 0 档，此时极 1 组 2，熄弧角为 20° ，档位为 1 档，由于侨乡站极 1 双阀组换流变档位只允许相差 1 档，同时极 1 阀组 1 熄弧角到了最小限定值，所以当 U_{dH} 测量值偏低至 0.97 (pu)、0.96 (pu) 时，逆变侧 U_{dH} 实际值与 U_{dH} 测量值偏低至 0.98 (pu) 时一致，均为 788 kV，整流侧 U_{dH} 保持在 808 kV。

5 结论

根据上述原理分析和仿真试验验证，可以得到如下结论。

- 1) 若逆变站直流电压 U_{dH} 测量异常导致的整流站直流电压 U_{dH} 偏高，则逆变侧高低端阀组的熄弧角存在明显差异；逆变侧高低端阀组的换流变分接头档位相差一档。
- 2) 若整流站直流电压 U_{dH} 测量异常偏高时，逆变站高低端阀组的触发角与档位不会存在差异。
- 3) 可以根据本文结论及如表 3 所示的 U_{dH}

测量异常特征，快速判断两站 U_{dH} 测量值是否异常及异常程度。

6 结束语

南方电网所辖直流工程多次发生过直流电压测量值异常问题，如果电压互感器本体或二次测量回路故障，导致逆变侧送至控制系统的直流电压测量值相比实际值偏低，将导致直流侧电压异常升高，严重时可能危及设备安全。因此，通过简洁有效的方法快速判断直流电压测量值异常显得尤为必要，本文研究所提方法可满足该需求。

—————

作者简介

王学之 (1983-)，男，硕士研究生，工程师，研究方向为直流输电控制保护系统研究及仿真。

(收稿日期：2015-12-10) EA
(编辑：杨帆)

(上接第 236 页)

将试验结果，输入上述计算程序中可得：
 $A=35.12$ ， $b=-9.846$ ， $E(t)=35.12$ 。

5 结束语

运用对所用绝缘材料同时施加模拟电缆附件运行条件的电热老化试验，并在不同老化周期下测定绝缘材料电气击穿强度，运用计算拟合得到绝缘材料在试验老化条件下的电气绝缘衰减曲线，可获得材料的老化寿命，也就是电缆附件等效的设计老化寿命。

参考文献

[1] 喻岩琰，李晟，孙辉，等. XLPE 电缆绝缘老化与剩余寿命评估的试验方法[J]. 电网与清洁能源，2012，27 (4).

[2] 施启达. 高压电缆热缩聚合物终端寿命评估[J]. 化工施工技术，1992.

[3] 刘少克，等. 电绝缘寿命评估的发展概况[C]. 第五界绝缘材料与绝缘技术学术交流会，1993.

[4] 蒋雄伟，等. 绝缘材料老化寿命评估模型的研究

进展[J]. 高电压技术，2000，26 (3).

[5] 李艳. 高压 XLPE 电缆绝缘检测及评估系统的设计与实现[D]. 上海：上海交通大学，2009.

[6] 吕事桂，等. 船用橡胶电缆整体老化剩余寿命研究[J]. 船海工程，39 (4).

[7] 叶强，等. 高压脉冲下绝缘材料电老化寿命模型[C]. 第十一届全国工程电介质学术会议论文集，2007.

[8] 霍振星. 基于 10kV XLPE 电缆的绝缘老化分析研究[J]. 天津：天津大学.

[9] 李金伴，陆一心. 电气材料手册[M] 北京：化学工业出版社，1990.

[10] 刘予王，王惠明. 电力电缆结构设计原理[M]. 西安交通大学出版社，1996.

—————

作者简介

高智益 (1983-)，男，本科，工程师，主要从事电缆运维检修工作。

(收稿日期：2015-12-10) EA
(编辑：杨帆)