

化工环境下电力电缆绝缘老化机理及检测诊断技术研究

李俊梅

(中国石油化工股份有限公司齐鲁分公司党校(培训中心), 山东 淄博 255400)

摘要 化工生产环境中存在着大量的腐蚀性介质、高低温交替、机械应力和强电磁干扰等, 这些都会加快电缆绝缘层的老化速度, 造成绝缘性能变差、局部放电或者击穿故障的发生, 给化工生产的连续性和人身、设备的安全带来很大的隐患。本文从化工环境特殊性出发, 对电缆绝缘电、热、化学、机械和多因素耦合老化机理进行系统的分析, 整理出传统的、新型的以及在线监测智能诊断技术的应用原理和应用场景, 并且研究检测技术在化工环境中的适应性改进方法, 以为电缆绝缘状态评价、故障预知和运维改善提供参考, 助力企业削减故障出现次数。

关键词 化工环境; 电力电缆; 绝缘老化; 老化机理; 检测诊断技术

中图分类号: TM75

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.039

0 引言

化工企业是国民经济的支柱产业, 其生产过程存在连续性高、工况繁杂以及介质腐蚀性高的特点。电力电缆是企业设备、控制系统等用电的输送线, 运行状况好坏直接影响到整个生产系统的正常运转。绝缘老化属于缓慢的不可逆过程, 刚开始时只是绝缘电阻变小、介电损耗增加, 后来才会有绝缘层开裂、击穿的情况发生, 进而引发电缆短路或者漏电现象, 导致生产被中断并带来火灾或爆炸的风险。本文对化工环境下电力电缆绝缘老化机理进行分析, 整理出检测技术要点, 提出适应性改进方案, 为电缆的安全运维提供技术支持。

1 化工环境下电力电缆绝缘老化机理及检测诊断的重要性

化工企业的生产连续性需要电力系统的稳定运行, 电力电缆是主要的传输部件, 它的绝缘情况直接影响到运行的安全。化工环境的复杂性, 使得电缆绝缘的老化速度大大加快, 导致电缆绝缘故障的发生率比一般的工业环境要高得多。在化工企业的电力系统当中, 超过六成的故障是由电缆绝缘老化引起的, 造成生产被迫中断的同时也可能会引发腐蚀性介质泄漏以及电气火灾这类次生危害事件, 并对人员的生命安全以及财物造成损害。对化工环境下电力电缆绝缘老化机理进行深入研究, 可以使得技术人员清楚地认识到电力

电缆绝缘老化的原因、规律以及影响因素, 从而给电力电缆绝缘老化预防和控制提供理论基础。通过对机理的解析, 技术人员可以对电缆进行选择、敷设方式加以改善、运维措施予以制订, 从而减缓老化速度、提升电缆使用寿命。精确的检测诊断技术可以对老化过程进行及时监控, 并且能够快速识别出存在的隐患问题, 从而达成对可能出现的故障做出准确预判的目的, 进而采取有效的措施加以处理, 防止事故的发生。化工生产的关键环节对于电力供应的可靠程度要求非常高, 一旦发生停电事故, 就会造成无法挽回的巨大损失。电缆绝缘老化故障有隐蔽性、突然性的特点, 传统的手工巡检不能及时发现早期的缺陷。对老化机理进行研究并应用于检测技术的使用上, 可以促使运维方式由原来的“事后维修”变为现在的“事前预警、状态检修”, 从而减少运维成本并提高供电的稳定性。另外, 还可以为化工企业的智能化、绿色化转型和智能运维体系创建提供支持。

2 化工环境下电力电缆绝缘老化机理

2.1 电老化机制

电老化是电缆绝缘老化的主要因素, 本质就是电场作用下绝缘材料的电气性能劣化的过程。在化工环境中, 电缆一直处在额定电压之下, 由于敷设不合理、接头制作不合格或者绝缘层有微小的缺陷, 容易产生局部电场集中现象, 从而加快老化速度。局部放电属

作者简介: 李俊梅(1980-), 女, 本科, 讲师, 研究方向: 电力系统及其自动化。

于电老化的主要体现和主要因素。绝缘层内存在气隙、杂质等缺陷的时候,局部的电场强度会比其他地方高得多,到达气体击穿场强后就会产生局部放电。放电时产生的高能电子撞击绝缘分子,使分子链遭到破坏,导致介电性能下降。另外,产生的臭氧、氮氧化物等活性物质还会继续氧化绝缘材料,从而加快老化进程。化工环境中腐蚀性气体、水分会渗透到绝缘层里,使材料的击穿场强降低,局部放电的可能性增大。

2.2 热老化机制

热老化是化工环境电缆绝缘的老化要素之一,主要是由于电缆运行产生的热量不能迅速散发出去或者环境温度过高,造成绝缘材料发生热分解和氧化反应,进而影响到它的物理以及化学性质。化工车间高温设备、蒸汽管道较多,环境温度较高,再加上电缆敷设密集、散热条件不好,使得热老化更加严重。电缆在运行中,由于导体通流会产生焦耳热,将热量传给绝缘层,使绝缘层的温度上升。当温度超过允许工作温度的时候,绝缘材料分子链会发生热裂解,大分子分解成小分子,使机械强度降低、弹性变差,造成变硬、变脆、开裂。高温加快氧化反应,产生羰基、羟基等极性基团,使介电性能变差,介损增大,从而加快老化。化工环境温度的变化也会加重热老化,一些工艺中升降温交替造成绝缘层热胀冷缩,产生热应力而产生微小裂纹,从而成为腐蚀性介质和水分渗透的途径。另外,电缆接头的接触电阻大,运行中发热多,绝缘层热老化速度比其他地方要快得多,是故障易发点。

2.3 化学老化机制

化学老化是化工环境下的电缆绝缘特有的老化类型,它是指绝缘材料同腐蚀性介质发生化学反应而造成分子结构被破坏,并使性能变差的过程。化工生产中产生的酸碱溶液、有机溶剂、腐蚀性气体等会通过绝缘层的裂纹、接头缝隙渗入绝缘材料里,并和绝缘材料发生化学反应。不同的腐蚀性介质有不同的破坏机理,酸性介质会和绝缘材料中的酯键、醚键发生水解反应,使分子链断裂,机械性能和介电性能都会受到影响,碱性介质会使氧化加快,造成绝缘层变色、发黏、脱落,有机溶剂会溶解增塑剂,使绝缘材料失去弹性而变脆,从而影响到绝缘性能。交联聚乙烯(XLPE)电缆接触有机溶剂之后会发生溶胀,分子间的距离变大,介电常数上升,绝缘电阻降低,最后会失效。

2.4 机械老化机制

机械老化指的是绝缘层在长时间的机械应力影响之下出现物理性损害以及性能变差的情况。化工车间

机械设备繁杂,运行过程中产生的振动传到电缆上,再加上敷设过程中的拉伸、弯曲、挤压等应力作用,都会造成绝缘层受损。敷设时拉伸强度太大,会使得绝缘层分子链断裂产生裂纹,弯曲半径太小会造成应力集中裂纹扩展。设备振动给电缆带来不断的机械冲击,使绝缘层产生疲劳老化、开裂剥落;车间的重物撞击、施工破坏等也会造成机械上的缺陷。机械裂纹是腐蚀性介质、水分、氧气的渗透途径,加快了化学、热、电的老化速度。机械损伤会降低绝缘层的机械强度和击穿场强,增加故障的概率,和其他的老化方式一起使电缆寿命变短。

2.5 多因素耦合老化

化工环境下的电缆绝缘老化是由电、热、化学、机械等许多因素共同起作用而引起的,这些因素的相互影响会产生协同效应,从而使老化速度远远大于单一因素的作用。协同效应主要表现在两个方面:一是老化给另一种老化创造了条件,比如机械裂纹加快化学介质渗透,化学老化降低击穿场强加重电老化,热老化减小机械强度加大损伤概率。二是多种因素一起破坏分子结构,高温加快化学反应和局部放电,造成绝缘性能迅速下降。不同的化工场景耦合老化模式也不同,高温、腐蚀性气体环境主要为热、化学、电耦合;机械设备密集、振动频繁的车间主要是机械、热、化学耦合。确定耦合老化机理,就是对绝缘老化进行准确的评价和控制^[1]。

3 化工环境下电力电缆绝缘检测与诊断技术

3.1 传统检测技术

传统的检测技术为化工企业的主流使用技术,主要有绝缘电阻试验、介损试验、直流耐压试验等。其优点在于操作简单、成本低、设备体积小。绝缘电阻试验属于基本检测手段,利用兆欧表对绝缘层施加直流电压并测得电阻值来评价其性能,比较不同时间段的数据可以判定老化情况。该方法只能反映整体的绝缘性能,不能发现局部的缺陷,并且受到环境温湿度的影响,在化工高湿、高腐蚀的环境下准确性会受到影响。介损试验是用于测定介质的损耗因数来评价介电性能的方法,损耗因数越大,说明介质的老化程度越高,可以检测出早期局部老化的部分以及受潮的情况,但是由于化工环境中存在较强的电磁干扰而信号不稳定,从而产生误差。直流耐压测试是用直流电压来检验耐压性能,可以直接发现击穿缺陷,但是属于破坏性的试验,不能进行多次检测,并且需要具有良好的防腐防潮性能的设备^[2]。

3.2 新型检测技术

新型检测技术克服了传统技术的不足之处,具有检测精度高、非破坏性、可以检测局部缺陷的特点,已经被广泛地应用到化工环境中,主要有局部放电、红外热成像、超声波检测等。局部放电检测属于早期老化主要检测手段,依靠捕捉到的放电产生时所发出的电、超声波或者光信号来判定放电强度、位置以及种类,并以此来评价老化状况。常用的超高频、特高频等检测方法要依靠改进的传感器,并且使用抗干扰算法来克服化工环境下电磁干扰以及介质腐蚀的困难。该石化公司使用特高频技术,对电缆接头早期放电缺陷进行了检测,并且防止了由于放电而造成的击穿故障的发生。红外热成像技术用热像仪来观测电缆表面的温度分布,依靠温度异常找到老化和缺陷的位置,具备非接触式、检测速度快、可以对大面积进行检测的特点,适合于车间快速巡检。使用抗干扰镜头和图像处理算法来克服高温蒸汽、烟雾给成像带来的影响。超声波检测是用超声波发射器向被测物发出超声波,然后接收反射回来的信号来判断绝缘层内有无裂纹、气隙等缺陷的一种方法,主要用于对接头、终端等重要部位进行检测。需要使用防腐型传感器来解决化工介质对设备造成的腐蚀问题^[3]。

3.3 在线监测与智能诊断技术

传统的和新型的技术都是离线检测的,不能对绝缘进行实时监测,不能满足化工企业的实时运维要求。在线监测和智能诊断技术依靠在设备上安装各种传感器来获取数据,并用大数据、人工智能进行实时评价和预警,属于运维的发展方向。在线监测系统是由传感器、数据采集、传输和智能诊断平台组成的。传感器采集局部放电、温度、绝缘电阻等参数,采集单元处理转换信号,传输单元用光纤或者无线把数据传到平台上,平台根据诊断模型和历史数据来评价绝缘状况并发出预警。智能诊断技术依靠大数据以及人工智能算法来剖析绝缘数据,从而创建起老化预估模型,可以准确地预知老化走向和剩余寿命。在该化工园区建立的在线监测及智能诊断系统中,采用对局部放电进行监测的同时配合温度监控的方式,并借助人工智能的预警手段来达到减少电缆故障的目的,在整个过程中实现了电缆故障发生频率下降到原来的30%以下的效果。在线监测和智能诊断技术可以对绝缘状态进行实时的监测和准确的预警,提高运维效率,但是需要解决化工环境中高温、高腐蚀、强电磁干扰等问题来保证传感器和传输单元正常工作^[4]。

3.4 化工环境适应性改进技术

化工环境中的高温、高腐蚀、强电磁干扰对检测技术提出了更高的要求。需做防腐、抗干扰、耐高温处理,保证检测准确性及可靠性。防腐改善对传感器、采集单元等设备用氟塑料、不锈钢等防腐材料做外壳,密封内部的电子元件,防止介质渗透。把局部放电传感器外壳做成氟塑料密封圈,密封等级达到IP68级,可以抗腐蚀性介质。抗干扰改善依靠优化电路设计,使用金属屏蔽罩等屏蔽手段来削减电磁干扰,联合小波去噪,自适应滤波这些算法对信号实施处理,从而加强稳定状况。介损试验使用小波去噪法可以去除设备的电磁干扰,提高测试准确度。耐高温改进就是选择耐高温的电子元件和材料,并对散热结构进行优化,保证设备正常工作。在线监测采集单元使用耐高温芯片,并且用散热片和风扇组合来散热,在-40℃到85℃的环境下可以正常工作。另外,还要考虑化工生产的连续性,对检测过程进行优化,使用非接触式检测手段来保证生产不受影响,并且创建检测数据的标准化管理体系,实现数据共享和分析的目的,从而给运维决策提供全方位的支持^[5]。

4 结束语

化工环境的复杂性,使得电缆绝缘的老化表现出多种因素相互作用、老化速度快、故障不易被发现等特点,对安全生产和供电可靠造成隐患。未来,随着化工企业的智能化转型,电缆绝缘检测技术将向着更加准确的、智能化的、高效的方向发展。可以进一步研究耦合老化定量评价的方法,研发适合复杂工况的新型检测技术,依托数字孪生、物联网构建全生命周期的运维体系,并推进技术标准化的建设工作,从而为电缆的安全运行提供更为强大的支撑力量,推动化工行业的绿色安全高效发展。

参考文献:

- [1] 吴娟. 化工行业低压电动机电缆与断路器选型研究[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(11): 120-122.
- [2] 王娟. 石油化工行业单芯电缆屏蔽层电压计算及接地方式综合研究[J]. 电气应用, 2025, 44(11): 147-152.
- [3] 马欣, 武传姣, 李树正. 石油化工企业电力电缆敷设技术分析[J]. 化工管理, 2025(32): 149-152.
- [4] 王娟. 石油化工行业单芯电缆屏蔽层电压计算及接地方式综合研究[J]. 电力与能源, 2025, 46(05): 497-501.
- [5] 祝玉政, 赵文迪, 于新江. 基于绿色化工工艺的电缆生产尾气处理研究[J]. 四川化工, 2025, 28(04): 52-55.