

[高压电缆]

基于光纤光栅的高压电缆在线监测方法研究

文/中国铁路设计集团有限公司电化电信院 何秋玲

针对27.5 kV高压电缆在高速铁路的应用中出现的问题，首先对27.5 kV高压电缆故障特点进行分析，并通过光纤光栅传感器对高压电缆的关键部位进行温度参数的实时监测，及时发现故障潜伏区域，对供电系统存在的突发事件进行快速定位和预警，遏制安全隐患，对于供电部门及时掌握现场情况、及时定位故障点、做到事故提前预防及进一步实现供电电缆的全生命周期健康管理具有重要意义。

近年来我国高速铁路实现了跨越发展，未来高速铁路在我国有很大的发展空间和潜力，27.5 kV高压电缆在牵引供电系统中的运用也必将越来越普遍。相较于架空线路占用空间多、不美观和裸露在外易损耗等缺点，27.5 kV高压电缆优势明显：美观；占用空间少；不易受雷击、风害和冰雪等自然灾害影响；供电可靠性明显提高。但是我国高压电缆发展起步较晚，各类技术标准制定滞后，电缆故障率较高。由于电缆实际工作环境较为复杂，一旦发生故障，设备管理单位很难对其故障点进行定位。因此必须对27.5 kV高压电缆的实时状态监测系统进行研究，依靠科技创新，运用先进的装备，对供电系统存在的突发事件进行快速定位和预警，最大限度减少对运输的干扰，保障供电设备运行安全。

本文通过对27.5 kV高压电缆在线监测技术的必要性和温度在线监测对电缆安全运行的意义、温度在线监测基本要求及测温方式、光纤光栅测温系统的原理及应用分析，提出了利用光纤光栅传感器对高压电缆的关键部位进行温度参数的实时监测，运营单位可实时有效地监测27.5 kV高压电缆运行状态，及时发现故障潜伏区域，对供电系统存在的突

发事故进行快速定位和预警，遏制安全隐患，保障牵引供电系统高压电缆安全可靠运行。

高压电缆故障特点分析

1. 常见的高压电缆故障原因梳理

工程中常见的27.5 kV高压电缆故障有以下几个原因导致：

1) 电压等级。在实际使用中，常用35 kV电缆代替27.5 kV电缆。由于27.5 kV系统单相对地相电压高于35 kV相电压，使得产生过电压击穿电缆绝缘。

2) 绝缘老化。由于制造工艺水平不良，造成电缆浸水受潮。且电缆在长期运行中，电厂分布设计不周密，由于电场作用产生局部放电引起绝缘老化变质，电缆绝缘性能下降最终导致故障。

3) 机械损伤。由于电力及外力原因引发的电缆碰伤、拉伤和损伤等。

4) 过载运行。由于过载电流的作用或谐波的影响，高压脉冲及高次谐波引起绝缘加速老化，造成电缆导体运行温度超过电缆正常运行温度。

2. 高压电缆故障主要原因分析

引起27.5 kV高压电缆故障主要分为制造和使用

两大因素。

1) 在制造过程中, 由于绝缘偏心、绝缘屏蔽、厚度不均匀、绝缘内有杂质、绝缘剂填充问题及密封圈漏油问题等导致电缆本体和电缆接头产生缺陷。有些情况比较严重, 可能在竣工试验中或投运后不久出现故障, 大部分在电缆系统中以缺陷形式存在, 对电缆长期安全运行造成严重隐患。

2) 在使用过程中, 由于施工不当以及运营维护不当都会导致电缆出现故障。在铁路建设过程中, 施工现场环境条件较差, 温湿度和粉尘都无法控制, 加上选型不合理、敷设工艺不当和外力破坏等因素给长期安全运行留下隐患。

在铁路牵引供电系统实际施工中, 27.5 kV 高压电缆在牵引所内和区间线路的敷设, 大部分情况都是几根高压电缆同时敷设在同一个电缆沟里。并且不可能一直在同一环境直线敷设。在弯曲敷设处会有电场分布和热场分布不对称现象, 产生畸变, 最终导致该部位温度异常, 发生故障。若其中一根电缆发生故障, 则导致与其同沟敷设的其他电缆也出现问题。即使是单根电缆敷设, 出现故障时也会影响其前后连接的高压设备, 导致事故范围扩大。常见的27.5 kV高压电缆故障如图1所示。



图1 常见的27.5 kV高压电缆故障

其次在运营维护过程中, 27.5 kV 高压电缆相比裸露架空的接触网导线, 其维护难度增大。27.5 kV 高压电缆敷设于地下电缆沟内, 维护人员无法直接观察状态, 无法发现故障征兆点, 进而无法进行提前干预。潜在故障点没有及时消除, 会导致高压电缆过热, 超负载效应明显。如此反复, 直到电缆损坏, 导致牵引所或接触网上出现断电事故。27.5 kV 高压电缆故障演化过程如图2所示。

3. 高压电缆内部热故障的特点

27.5 kV 高压电缆通过一定负载电流时都会发热, 负载电流越大, 电缆温度就越高。若由于电缆

导体电阻不符合要求、电缆相间绝缘不好、接头制造技术不好及铠装层被破坏等导致绝缘电阻过大, 会造成电缆发热逐步严重。若不及时找到原因排除故障, 电缆继续通电运行后会产生绝缘热击穿现象, 发生严重的事故。故可以对高压电缆头表面温度进行实时监控, 根据高压电缆温度的变化情况, 掌握其运行状态。若温度一旦出现可疑情况, 可根据温度变化数据判断内部是否存在故障隐患, 及时采取措施避免恶性事故的发生。

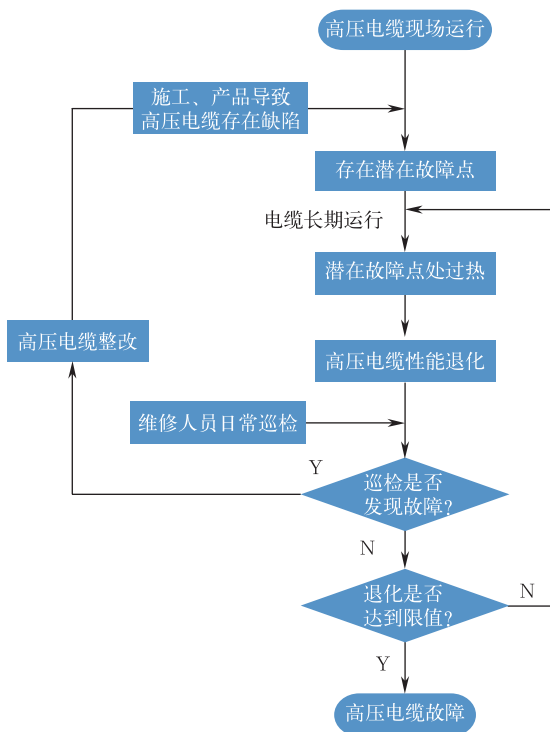


图2 27.5 kV高压电缆故障演化过程

高压电缆在线监测技术必要性分析

我国铁路牵引供电设施的维修模式多年来一直是定周期维修制及离线试验, 这种模式已经越来越不适应当前社会的发展形势。随着传感器技术的发展, 如何对牵引供电设备, 尤其是像高压电缆这种难以定期巡检的设备采取合理的维修策略和维修计划, 已成为铁路维管部门极为关注的问题。

牵引变电所内及区间使用的27.5 kV 高压电缆出现故障主要是由于制造、施工、运营维护和运行环境等几方面原因。各方因素长时间累积起来, 导致电缆逐步出现问题。如图3所示, 代表27.5 kV 高压电缆电气特性、机械物理性能等的变化情况。

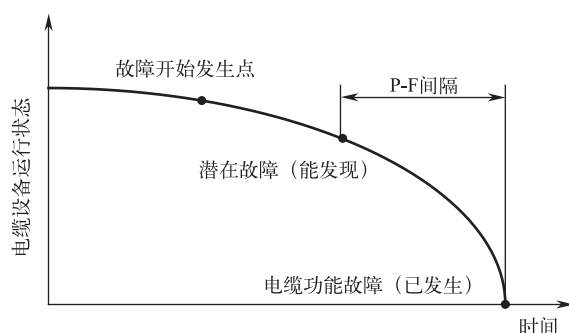


图3 电缆功能退化P-F曲线

高压电缆在新安装投运期间暴露的问题最多，而后随着运行时间的增长而近乎平缓。但是长时间运行后，电缆出现老化、外力破坏等问题，暴露的问题又逐渐增多，近似于盆浴曲线的图形。具体如图4所示。

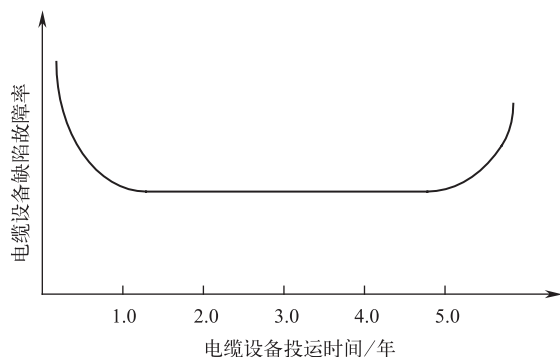


图4 常见的高压电缆性能退化曲线

高速铁路供电维修为定期检查维修，每检修一次都会使常规设备的运行曲线发生变化。每一次检修后工作人员针对薄弱点进行维修，维修过后设备会产生新的磨合期，如此循环反复直至电缆达到寿命极限。传统的离线监测无法实时采集电缆状态，无法及时发现存在的安全隐患。此时可利用在线监测技术对电缆状态进行实时监测。如图5所示。

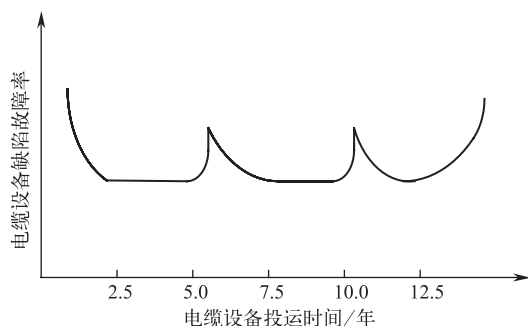


图5 应用在线监测技术后的高压电缆性能退化曲线

基于温度的高压电缆在线监测系统的基本要求及测温方式

1. 高压电缆在线监测系统的基本要求

电流流经高压电缆，电缆必定会因热效应而发热，而绝缘材料在额定电压下存在介质损耗，也会以发热的形式表现出来。实际运用中，大部分高压电缆设备故障是以温升发热的形式表现出来，因此，温度是设备安全运行的重要参数，也是对设备监视和控制的重要指标。高压电缆的温度参数对反映高压电缆的运行状况至关重要，通过电缆温度在线监测能够发现大部分电缆运行中的安全隐患。基于高压电缆运行温度的在线监测系统应具备以下功能：

1) 兼容性。能与牵引变电所内及区间接触网一二次设备兼容，不会对其他设备造成影响。自身也不会受到其他设备干扰。

2) 实时温度采集。能实时对多组电缆同时进行多点连续测温。

3) 温度告警。当监测到的电缆温度超过某一阈值时能启动报警功能。

4) 自动检压。可随时采集电压电量，当电压过低时，应启动报警功能。

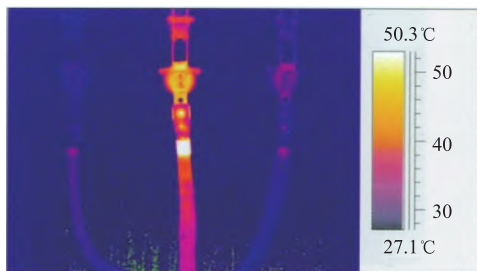
5) 可靠性。保证监测数据结果准确可靠。

2. 常见高压电缆测温方式

高压电缆的测温方式主要有红外测温、热电式测温 and 光纤光栅测温。三种测温方式的主要特点为：红外测温价格较昂贵且受环境影响大，抗干扰和防雷击能力差，测量误差较大；热电式测温成本低，测温范围大，抗干扰能力较强，但线性差、灵敏度低、重复性差和防雷击能力差；光纤光栅测温的体积小易安装，测量精度高，重复性好，测量误差小且抗干扰能力和防雷能力都较好，但是成本比较高。

考虑到对27.5 kV高压电缆的测温需要将测温元件安装到电缆接头、断路器触点等位置，光纤光栅的传感器体积小，安装灵活可操作性强。不仅安装施工方面，光纤光栅还具有极高的可靠性、安全性和准确性。可以对温度进行全数字化处理，且具有远程通信功能。运用于铁路牵引网供电系统能实时将电缆温度状态上传至调度中心，以便工作人员及时发现电缆存在的隐患。常见的高压电缆故障时的

电缆温升如图6所示。



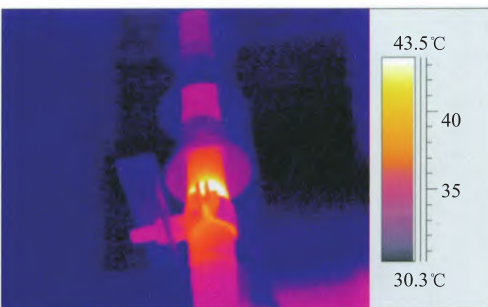
设备名称：6.6 kV 交联电缆终端
检测仪器：AGEMA590PAL
镜头度数：24
故障类型：接触不良



设备名称：35 kV 交联电缆终端
检测仪器：AGEMA570PAL
镜头度数：24
故障类型：接头工艺不良



设备名称：35 kV 交联电缆热缩终端
检测仪器：AGEMA570PAL
镜头度数：24
故障类型：热缩不均匀有空气残留



设备名称：35 kV 交联电缆终端
检测仪器：AGEMA570PAL
镜头度数：24
故障类型：场强不均匀

图6 常见高压电缆故障时的电缆温升

基于光栅测温系统的原理

光纤光栅的制作方法是将掺入如锗、锡、硼等具有光敏特性的杂质，通过某些方法使通过光敏光纤的激光发生折边。跟随光强的空间分布变化，光纤的折射率也随之发生变化并且呈周期性变化，这样就形成了光纤光栅。如图7所示，光纤光栅可以说是一个在光纤纤芯内的细长的滤波器。当宽光谱光通过光纤光栅时，满足光纤光栅布拉格条件的波长会被反射，留下需要的波长继续通过光栅光纤传输。由此可见光纤光栅是一种具有波长选择性能的全光栅器件。

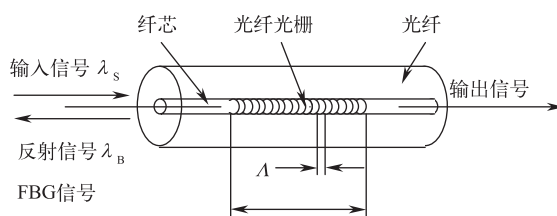


图7 光纤光栅结构示意图

反射光波的中心波长（布拉格波长）满足布拉格定律，即

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

式中， n_{eff} 为光栅的有效折射率（折射率调制幅度大小的平均效应）； Λ 为光栅条纹周期（折射率调制的空间周期）；布拉格波长 λ_B 与 n_{eff} 、 Λ 成正比。

光纤光栅的中心反射波长 λ_B 随光纤有效折射率 n_{eff} 和光纤光栅周期 Λ 的改变而改变，由于应力（应变）和温度的变化都将导致 n_{eff} 和 Λ 发生改变，所以光纤光栅对于应力（应变） ε 和温度 ΔT 都是敏感的。应力（应变）影响 λ_B 是由弹光效应和光纤光栅周期 Λ 的变化引起的，而温度影响 λ_B 则是由热光效应和热膨胀效应引起的。在应力和温度同时变化的情况下，中心反射波长的变化可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (1)$$

当环境温度不变，光纤光栅仅受应力作用时，中心反射波长的变化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon \quad (2)$$

当不受任何应力作用而环境温度发生变化时，中心反射波长的变化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (3)$$

（下转第40页）

快切装置的应用

1. 快切装置的选择

本配电系统设有两段母线供电，主要考虑到脱硫除尘设备及工艺流程的特殊性，需要保证整个工厂的不间断供电，所以选用快切装置来保证电源快速切换，以防生产设备的停运、工艺流程中断或者设备的报废等严重后果。传统的备自投装置已逐渐退出了配电系统，主要原因是没有针对工业需要和特点进行设计，动作时间长达1~2 s。在电动机已完全失电压至无电压后，再起动机没有考虑保护启动和失电启动以及对母线的残压、频率和相位实时跟踪，感应电动机失电压后反馈电压下降较慢，再次上电后由于反相和相位差大产生较大冲击电流，在这些因素的影响下，备自投必须要将切换时间延长，所以不可能实现快切的效果。

2. 快切装置的优点

选用金智科技的MFC5103快切装置，对高压母线的各参数实时监控，提供多种启动方式和切换方式，能够保证快速可靠地投入备用电源，保护电动机的启动。硬件采用新型的DSP+ARM+CPLD硬件平台提高精度，而且还设计了抗干扰措施。装置提供了快速合闸方案，既能保证电动机的安全又能保证转速损失较小，冲击电流也不大。频差调整为1.0~1.5 Hz，相差设定为

$$\Delta\varphi+360\times\Delta fT_{cb}\ll 63$$

式中， $\Delta\varphi$ 为相差定值； Δf 为实际频差； T_{cb} 为备用开关的合闸时间； 63° 为允许合闸极限角，此值一般为 $20^\circ\sim 45^\circ$ 。在实际应用中，能否实现快速合闸，要比较两段母线的初始相位差、备用断路器的固有合闸时间以及负载情况。快速合闸必须保证压差、频差和相差都小于并联切换的相应数值。在不满足此方案时则使用同期捕捉合闸，此后备方案是实时跟踪母线残压和备用电压的频差角差，以同相点为合闸目标，弥补了前者的不足之处。在实际调整后，可以做到在过零点附近较小范围内合闸，在母线电压65%~75%时完成切换，同样能满足电动机失速较小完成自启动的要求，冲击电流仍然很小，对用电设备和配线系统同样起到了有效的保护。

结束语

通过配备先进的电弧光保护和快切装置，弥补了传统设计的技术缺陷，提高了中低压配电系统的保护级别，并且随着自动化控制的引进，系统能够智能地将母线故障切除及电源的可靠切换，减少或避免了由于母线故障而造成的人员伤亡和用电设备的损坏，为工业生产提供了安全的保障。EA

(收稿日期：2021-08-20)

(上接第33页)

式(1)~式(3)即为光纤光栅传感的基本原理。根据这一原理，运用到工程实际中，采用光纤光栅作为敏感元件，在电缆接头处嵌入光纤光栅，利用光纤光栅的高灵敏度、高感知力，实现对高压电缆接头内部温度、应力和振动状态的实时监测，对异常状态点进行定位。同时利用光纤的通信功能，可实现与调度中心的点对点通信。实现运营单位对高压电缆状态的实时观测，做到及时掌握现场状态，发现故障。从而可对高压电缆进行预见性维修和对设备全生命周期的管理。

结束语

利用光纤光栅反射中心波长的变化获知的光纤

光栅处的温度场信息，在一个特定的光谱范围内，不同波长值的光纤光栅能实现分布式组网测量的原理，可组成高压电缆在线温度监测系统。将高压电缆接头进行合理改造，使光纤光栅传感器具备连接条件，用于搭建和感知网络。通过内置光纤光栅传感器对高压电缆的关键部位进行温度参数的实时监测，及时发现高压电缆运行中的安全隐患，找出潜伏故障的可能，做到对其进行预见性维修和对设备全生命周期的管理，保证牵引供电系统安全运行，最大限度地减少对运输的干扰。EA

(收稿日期：2021-12-06)