

基于设计、选型与特殊地形的电缆火灾防范措施

为提高高压电缆线路的防火设计及火灾防范水平，以一起高压电缆火灾为案例，综合电气量保护及电缆光纤温度在线监测信息分析了事故成因，并对事故暴露出的薄弱环节进行反思，提出了基于设计、选型与特殊地形的电缆火灾防范措施。

雷龙武/国网福建省电力有限公司电力科学研究院

0 引言

电力电缆火灾事故蔓延快，火势猛，抢救难，在燃烧时热释放速率高、热值高，同时产生大量的浓烟和有毒气体，不仅危害环境，也会对人员的安全造成严重的威胁^[1-3]。引起火灾电弧的因素有电缆接头爆炸、护层悬浮电压高、绝缘击穿和重合闸操作等四个方面。其中电缆护层悬浮电压过高因素常被运维人员忽视，据不完全统计占电缆火灾起因的20%左右，成为引起电缆火灾的主要原因之一^[1-2]。2016年4月，国家电网公司某220 kV同沟并架双回高压电力电缆发生火灾。火灾发生地点位于城区某山体公园的山坡段，坡度约为30°。因具备“烟囱效应”，火势迅速往高处蔓延，烧毁长度约为150 m，事故的发生与其设计、选型考虑不周及其所处特殊地形关系密切。

1 事故原因分析

1.1 基本信息

事故双回电缆烧毁段护层保护的接线方式如图1所示。采用交叉互联方式。电缆终端外护层采用直接接地方式，与

终端相邻的5#工井则采用交叉互联并经保护器接地的方式。

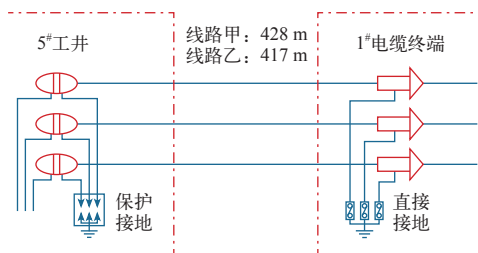


图1 事故双回电缆接线示意图

事故双回电缆的敷设方式如图2所示。采用双回共沟、沟内同侧上下层排列敷设的方式，沟道设有盖板防护。金属支架上垫有玻璃钢板，考虑到坡度的影响，每隔4~5个支撑段采用内衬绝缘垫的刚性抱箍夹持。排列顺序：线路甲位于上方，线路乙位于下方。双回线路上敷设有通信光缆及光纤测温线，其中通信光缆带有穿管保护，经检验为聚乙烯管，可燃且具有延燃特征。

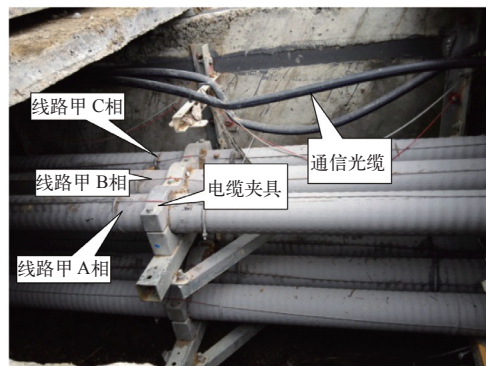


图2 事故双回电缆及通信光缆布置方式

1.2 监测信息汇总分析

查阅电缆护层光纤测温系统及电缆继电保护相关记录，其信息时序如表1所



雷龙武/高级工程师

关键词/Keywords

电缆·
火灾·
保护器·
绝缘配合·

示。从表1可以发现，电缆护层光纤测温系统在临近凌晨4点时就已发现温度异常，此时电缆线路运行正常；到接近凌晨6点时，两回线路的主绝缘相继发生故障并跳闸。该时序亦可排除电缆着火因主绝缘故障引起，电缆起火最大的原因应来自于外护套。

表1 故障相关信息时序

序号	时刻	信息来源	事件描述
1	3:51:21	光纤测温系统	线路乙B相温度为115.9℃
2	4:45:42	光纤测温系统	线路乙C相温度为100.1℃
3	5:56:14	保护装置	线路甲、线路乙两套保护通道均异常
4	6:01:26	保护装置	线路甲两侧后备保护动作，C相故障，开关跳闸
5	6:01:37	光纤测温系统	线路甲B相温度为386.6℃
6	6:01:49	保护装置	线路乙两侧后备保护动作，C相故障，开关跳闸
7	6:02:12	光纤测温系统	线路甲C相温度为226.3℃

经巡查，发现1[#]电缆终端塔上，双回电缆自塔上引下的六根接地引下线中五根均被盗割。从时序上可以看出，盗割行为发生在当天凌晨3:51之前。

1.3 电缆护层悬浮电位估算

根据电缆结构参数， $R_1=32.45\text{ mm}$ ， $R_2=57.65\text{ mm}$ ， $R_3=71.45\text{ mm}$ ， $R_4=76.65\text{ mm}$ ，XLPE（绝缘）相对介电常数为2.3，HDPE（外护套）相对介电常数取2.35。

线芯导体屏蔽与XLPE绝缘屏蔽间电容为

$$C_1=2\pi\epsilon_{r1}\epsilon_0\frac{l}{\ln(R_2/R_1)}=0.2225\text{ nF}$$

金属护套与地间电容为

$$C_2=2\pi\epsilon_{r2}\epsilon_0\frac{l}{\ln(R_4/R_3)}=1.8601\text{ nF}$$

当聚乙烯护套外石墨层有良好接地情况下，金属护层悬浮电位为

$$U_2=\frac{C_1}{C_1+C_2}=13.57\text{ kV}$$

实际电缆外护套外石墨层附着性差使得外护套的接地不会全部良好，且电缆支架垫有绝缘的玻璃钢板，此时 C_2 将与空气杂散电容串联后接地，即 C_2 变小，导致金属护层悬浮电压大于上述理论计算值（受周围环境杂散电容等因素影响实际值可达数十千伏）。

1.4 护层保护器的检查与分析

电缆回路5[#]工井装设护层保护器，护层保护器的功能是当金属护套出现过电压的情况下，保护电缆外护套不被击穿。电缆回路外护套出厂试验为25 kV直流耐压，时间为5 min；交接试验为10 kV直流耐压，时间为1 min。线路甲、线路乙护层保护器1 mA参考电压分别为5.3、9 kV。因此正常情况下，悬浮电压应首先击穿护层保护器，起到保护外护套的作用。

对5[#]工井的护层过电压保护器进行检查与测试，测试结果如表2所示。试验结果表明，线路甲A相、线路乙A、C两相的过电压保护器未损坏。线路乙C相因接地线未被盗割，其保护器未损坏属正常；而线路甲A相、线路乙A相保护器，在接地线被盗割后长时间承受前述的高悬浮电位情况下未损坏，间接说明外护套存在薄弱环节，对保护器形成放电保护。

为验证护层悬浮电位对保护器的影响，在实验室进行了模拟试验。根据电缆电容与外护套电容的比例关系，分别采用1 000 pF电容及10 000 pF电容等效一段电缆及其护层，将现场取下的护层保护器

表2 电缆护层保护器试验结果

线路	相别	型号	绝缘电阻/Ω	$U_{1\text{ mA}}/\text{kV}$	$0.75U_{1\text{ mA}}$ 下漏电流/μA	备注	接地线情况
甲	A	YH5W-4/9.5	>1 000 M	5.9	1	正常	盗割
甲	B	YH5W-4/9.5	49	/	/	已损坏	盗割
甲	C	YH5W-4/9.5	1 200	/	/	已损坏	盗割
乙	A	FBY-12	>1 000 M	10.1	2	正常	盗割
乙	B	FBY-12	19	/	/	已损坏	盗割
乙	C	FBY-12	>1 000 M	9.8	3	正常	未被盗割

接入试验回路的对应节点处。试验情况如下。

1) 当接入已损坏的护层保护器时,金属护套对应节点处的电位接近零电位(约为18 V)。

2) 当接入未损坏的护层保护器(FBY-12)时,等效施加电缆运行电压后,保护器将电压限制在8.6 kV(有效值),电压波形如图3所示。电压施加约10 s后保护器存在明显发热现象。

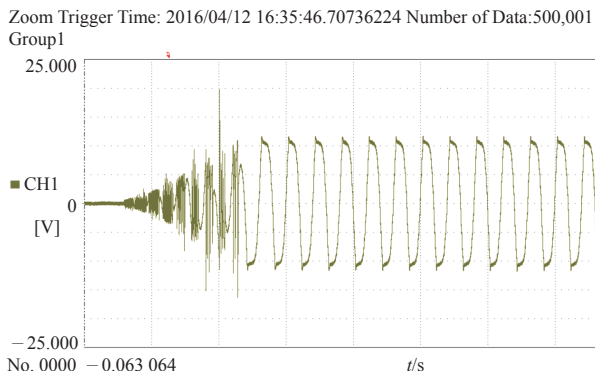


图3 实验室试验情况及保护器动作电压波形

试验表明,电缆护层接地被盗割后,护层保护器能够有效限压,保护正常绝缘的电缆外护层不被击穿;在长时间的电压作用下保护器将发生损坏,此时相当于保护器短路接地,对护层也有保护作用。但是,一旦护层绝缘存在薄弱点,则很容易发生间歇性击穿放电,甚至发展为持续性电弧击穿并产生高温,引燃电缆护套。从现场情况看,电缆支架上抱箍处是对地绝缘相对较薄弱的位置,有对地放电打火痕迹。

需要指出的是,电缆护层过电压保护器在持续运行电压满足单端接地要求的前提下,直流1 mA参考电压选择越小,越有利于对护层形成保护。本次故障电缆双回采用的保护器参数不一致,线路乙参数属错配。

2 事故过程推断

综合上述分析,可作如下推断。

事故当夜3:51前,两回电缆线路的1#终端塔护层接地引下线被盗割;由于潮湿、绝缘衬垫错位等因素,电缆与支架刚性抱箍处存在绝缘薄弱点,其工频耐受电压比护层过电压保护器限压值低,导致发生间歇性或持续性电弧击穿放电并引

发火情。同时,因线路甲、线路乙通信光缆位于线路甲电缆层上方,着火后的延燃特性加速了火情的发展,最终引起电缆主绝缘烧毁跳闸。而电缆材料为非阻燃电缆及缆沟所在约30°的山坡地形,是造成火势快速蔓延的主要原因。

3 电缆火灾防范措施

3.1 关于采用阻燃电缆与否的问题

设计部门从环保角度出发,弃用具有阻燃特性的聚氯乙烯护套电缆,而采用非阻燃的聚乙烯护套电缆,反映了电缆选型思维的固化或趋于保守,对成熟可靠、兼具防火及环保需求但造价稍高的电缆选型缺乏安全经济性综合论证。事实上,在兼顾防火需求与环保、人员安全的场合,可以选择无卤低烟阻燃电线电缆。

3.2 电缆同沟防火的问题

事故暴露出设计过程中因现场条件约束,与技术标准发生重大偏离时缺乏全面的论证与思考。应遵行国网十八项反措规定:同一负载的双路或多路电缆,不宜布置在相邻位置。

3.3 城市高压电缆通道规划问题

通道规划建设全局意识不足,缺乏主动与城市整体规划相融合的前瞻性。事故电缆因需要跨越山体公园兼美观要求,不得不采取特殊地形及环境下的敷设方式(即陡坡敷设),先天性就存在不足。事件警醒规划、设计部门应积极与城市规划部门、建设部门联系沟通,在道路敷设、建设公路隧道、海底隧道建设时,同期建设高压输电电缆通道。

3.4 电缆监控设施的投入问题

对电缆监控设备的必要性认知不足。由于基建和生产在监控设备安装方面未有统一意见,目前在初设审查阶段,高压电缆基建工程在线监控(含防火、防盗措施)设施的需求在评审阶段极易被取消。应进一步协调统一基建与生产关于电缆监控设备的标准差异。对110 kV及以上电缆线路基建工程,普通电缆通道应配置护层电流监控

设备；隧道应配置温控、环境监测、护层电流监控、视频、火灾报警及消防联动系统等；防火门安装自动开闭装置（与消防联动）；户外终端头配置防盗设施。

3.5 电缆敷设质量管控缺位

主要表现为①部分电缆外护套存在破损，因操作失误造成电缆挤压变形，牵引电缆时未采用拉力表，造成牵引头拉断、开裂，敷设时防火墙被破坏未修复。②电缆敷设前通道、管线未清理干净，敷设完后管口未封堵，易造成电缆外护套损伤。③电缆未按要求固定。④存在未按设计施工图施工的现象。

3.6 电缆外护套绝缘系统的保护配合问题

一是事故电缆采用抱箍加绝缘垫的方式，因存在局部包裹的特征，易受潮气、水汽的影响。二是电缆线路交接试验除主绝缘耐压外，其余小试验项目容易被忽视，个别存在漏做、误做，甚至试验报告数据造假的现象。特别是护套保护器试验等。

3.7 光纤保护管的选型问题

本次电缆火灾事故，光纤保护管的延燃可能造成了致命的破坏。事故警醒电缆通道设计时，应将通信线与一次动力电缆分别置于不同通道内，如无法分通道布置，应布置在不同侧。光纤应套在具有阻燃或耐火的保护管或槽盒内，禁止使用具有延燃和熔融特性的聚乙烯（PE）、高密度聚乙烯（HDPE）等保护管。

4 结束语

通过电缆光纤温度在线监测信息及继电保护信息，分析了一起高压电缆的火灾事故成因。电力电缆在护层接地线被盗割的情况下，护层绝缘、过压保护器、光纤保护管和通道防火设施等各方面的薄弱环节均可能导致火情及事故的扩大。事故暴露出的薄弱环节值得反思并为广大电力电缆设计、建设及运维工作者借鉴。综上所述，总结以下结论。

1) 在兼顾防火需求与环保、人员安全的情况下，可以优先选择无卤低烟阻燃电线电缆。

2) 对于特殊地形与环境的电缆通道，应进行差异化设计，如长陡坡缆沟应增设防火隔断数量；户外的电缆终端且具有被盗风险时，应设计保护接地端，将直接接地端改设在工井或沟道内。

3) 高压电缆护层电压的保护，应与接地方式、护层保护器和电缆支架等相配合，建议110 kV及以上电压等级的电缆采用金属支架，抱箍不应全段采用绝缘垫片或采用半导材料。

参考文献

- [1] 丛光，韩晓鹏，周作春，等．高压单芯电缆接地系统破坏后的悬浮电压分析[J]．供用电，2009，26(5)：61-64．
- [2] 张春旭，李明，刘民，等．外护套环流及接地不良对电力电缆的影响分析[J]．山东电力技术，2009(2)：6-9．

(收稿日期：2018-02-10) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告