

[断路器]

断路器辅助开关弧光短路原因分析研究

文/厦门华电开关有限公司 廖灿茹 钟昌盛 李凌杰 张周文

针对F10辅助开关在中压真空断路器新产品应用中出现的弧光短路问题进行原因分析和试验验证，确定主要故障原因在于与之配合的感性负荷时间常数及操动机构起始角度对其灭弧特性的影响，并推荐了最佳的故障解决方案。

F10辅助开关由于角度控制灵活，适用于各种特殊角度的分合切换，且体积小、触点数量多，常常被应用于中高压开关操动机构的分合信号转换。中压真空断路器新产品（单模块操动机构）沿用旧产品（双模块操动机构）的F10辅助开关设计，新产品应用过程中出现辅助开关触点烧蚀问题，影响产品正常使用，不利于新产品的市场推广。所以找到辅助开关触点烧蚀故障原因，彻底解决故障问题，对产品的技术升级及新产品的市场推广具有重要意义。

问题背景

中压真空断路器辅助开关S3选用上海飞力FLF10系列产品，主要技术参数见表1，内部触点结构如图1所示。

表1 FLF10辅助开关特性参数

项目	特性	
使用类别	AC-12	DC-12
额定绝缘电压/V	AC 380	
约定发热电流/A	20	
额定工作电压/V	AC 380	DC 250
额定工作电流/A	10	6
接触电阻/mΩ	≤30	

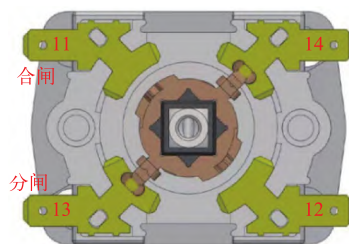


图1 FLF10辅助开关触点结构

S3辅助开关标准配置有8NO8NC、11NO11NC两种可选规格，用以提供断路器的分合闸位置信号。S3的辅助触点S3:11-12/13-14、21-22/23-24、31-32/33-34等两两一组，同一组辅助触点处于同一隔室且共用同一动触头。

1. 故障现象

断路器分闸（辅助开关切换）时，有刺眼白光闪现（弧光短路），辅助触点S3:13-14烧黑，部分伴随回路空开跳闸。触点烧蚀状态如图2所示。



图2 触点烧蚀图片

2. 故障触点电气回路

断路器电气方案中S3:11-12固化串联于分闸回路，提供合闸位置信号作为断路器分闸操作判断条件；S3:13-14接到航空插头提供分闸位置信号供外部回路使用。当S3:13-14用于监视、闭锁和信号指示等电气回路时，断路器分闸（转换触点切换）过程中，电弧通过动触头引入下一回路，回路之间通过电弧短路，能量以弧光形式释放。故障触点电气简化回路如图3所示。

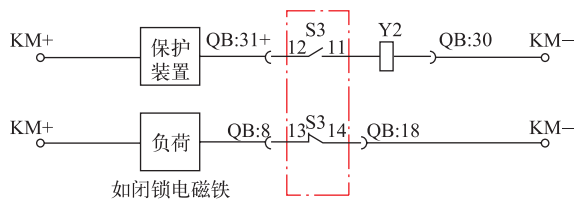


图3 故障触点电气简化回路示例

故障原因分析

整理转换触点烧蚀故障的历史案例发现，虽然单模块断路器与双模块断路器均出现过触点烧蚀问题，但是单模块断路器故障概率远高于双模块断路器。基于两种产品的故障概率差异，结合电弧灭弧原理，对两种产品进行关键特性对比分析。

1. 特性相同点

对可能影响辅助开关灭弧特性的触头金属材质、灭弧介质、触头开距及转换触点机械切换时间进行分析。

(1) 触头材质、灭弧介质与触头开距

单、双模块断路器产品均使用FLF10辅助开关。辅助开关静触头材质为黄铜H62，动触头材质为锡青铜QSn6.5，动静触头表面均镀银，壳体材质为PC-G20。动静触头处于非真空壳体隔室，转换触点通过主轴带动动触头转动实现位置信号的切换，切换过程中动静触头间产生的电弧通过拉长电弧的方式实现灭弧。FLF10动静触头开距为50°，开距结构示意图如图4所示。

(2) 机械切换时间

选用普通锂电池、指示灯（阻性负荷）搭接外部辅助回路，回路图如图5所示。示波器采集转换触点S3:81/83端电流信号，则电流下降时间即为动触头在常闭点、常开点机械切换时间。测得单、双模块产品辅助触点切换时间均为5 ms，波形图

如图6所示，通道一（上）采集上述电流信号（反向），通道二（下）采集S3:11-12/13-14回路间电流信号。

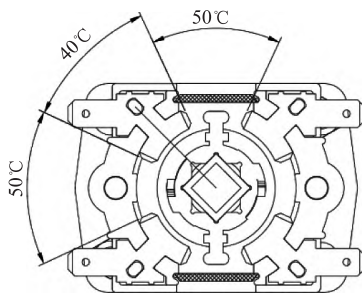


图4 FLF10辅助开关动静触头开距示意图

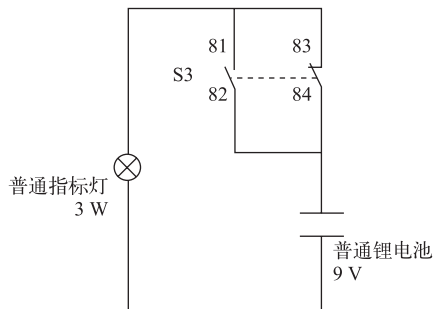


图5 外部辅助回路图



a) 单模块产品辅开主轴速度、时间



b) 双模块产品辅开主轴速度、时间

图6 单、双模块转换触点机械切换时间测量波形图

综上所述,单模块与双模块产品辅助开关F10的使用环境、触头材质和灭弧介质、主轴固有机机械速度一致,排除了故障因素可能性。

2. 特性异同点

上述分析并未发现单模块产品发生弧光短路故障概率比双模块产品高的原因。再对单、双模块产品的机械和电气参数进一步作差异分析,发现在电流大小、线圈时间常数和机构角度上存在差异。

(1) 电流大小

由于单模块断路器的传动机构空间紧凑,产品开发时选用外形尺寸较小的弹簧内置合分闸电磁铁。单、双模块断路器分闸回路主要负有分闸线圈的电气参数对比见表2。单模块断路器的分闸回路电流为1.1 A,高于双模块断路器(1 A)。因此,单模块断路器辅助开关在切断回路电流时对触点的灭弧性能要求相对提高。但是,试验过程中,在电气配件允许工作电源电压范围内,对单、双模块断路器均进行了从额定工作电压DC 220 V到DC 300 V(级差10 V)的测试,双模块断路器在工作电压升至DC 300 V,回路电流超过1.6 A的情况下仍然正常工作,未出现弧光短路故障。

可见,0.1 A的电流差异不是导致单模块断路器辅助开关弧光短路故障的主要原因。

表2 单、双模块断路器分闸线圈电气参数

项目	电流/A	电阻/ Ω	线圈功率/W
双模块分闸线圈	1.0	220	220
单模块分闸线圈	1.1	220	242

(2) 分闸线圈时间常数

分闸脱扣电磁铁是带有铁心的线圈,回路电流的变化表现为RL回路的暂态过程。用时间常数 $\tau(\tau=L/R)$ 表征负荷感性部分对回路电流上升、下降速度的影响。其中,电感L与铁心线圈能量的关系为 $W=LI^2/2$ 。铁心线圈充电电流曲线示意如图7所示。

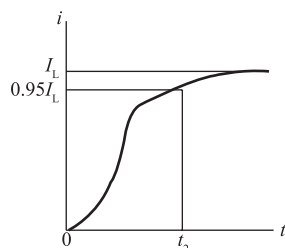


图7 铁心线圈充电电流曲线

在相同试验条件下,采用线圈电流分析方法,在冷态下对单、双模块断路器分闸线圈施加额定直流电压励磁(DC 220 V),由线圈放电电流曲线测得回路负荷电感部分的时间常数。测得单、双模块断路器分闸线圈感性分量时间常数相对值为。

- 1) 单模块线圈时间常数 $\tau_1=2.5$ ms。
- 2) 双模块线圈时间常数 $\tau_2=2$ ms。
- 3) $\tau_1-\tau_2=0.5$ ms。

分闸线圈带电动作后,辅助开关动触头切换到转换触点,动触头与静触头间产生电弧。 τ 越大,电极(触头)电荷积聚时间越长,分闸时电弧熄弧时间就越长(熄弧角度越大),越容易通过动触头将电弧引入下一回路,从而发生弧光短路。单模块辅助开关熄弧角度约后移 5° 。

(3) 机构分闸起始角度

对比分析单、双模块断路器辅助开关的机构传动部分发现,由于拐臂角度、连杆长度的差异,合闸状态单模块断路器辅助开关动静触头的起始角度比双模块延迟。单、双模块动静触头搭接起始角度如图8所示。单模块机构分闸起始位置A更居中,比双模块分闸起始位置B延迟 $3^\circ\sim 5^\circ$ 。同样的熄弧时间里,动触头搭接角度需达到 $\theta_1+\theta_2+\theta_3$ 时方能熄弧,在动触头搭接角度达到 $\theta_1+\theta_2+\theta_3$ 之前,电弧被引入下一回路,出现弧光短路。



a) 合闸保持状态辅助开关位置

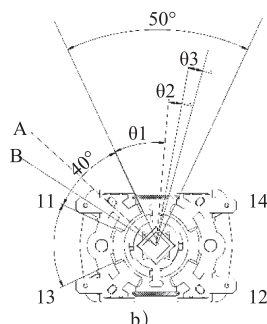


图8 触头搭接角度示意图

图8中，A表示单模块分闸起始位置，B表示双模块分闸起始位置，A、B偏差 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ ； θ_1 为参照双模块产品熄弧需要达到的角度， θ_2 为线圈时间常数延长后增加的熄弧角度， θ_3 为分闸时机构起始位置延迟增加的熄弧角度。

综上所述，单模块断路器分闸线圈时间常数比双模块大和机构起始角度比双模块延迟，是导致单模块断路器辅助开关转换触点切换时发生弧光短路的两个主要因素。在两者的共同作用下，辅助开关触点的开距角度增加 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。单模块断路器辅助开关S3:11-12\13-14用于不同回路时， 50° 开距角度无法满足转换触点回路切换的熄弧开距角度要求，从而发生弧光短路，故障波形如图9所示。示波器通道一指示机械切换时间，通道二输入S3:12/14回路间电流信号。在切换时间约2.5 ms位置电弧重燃，两个回路通过电弧短路。



图9 短路故障波形图

故障解决方案

如图8所示，线圈的时间常数延长使得辅助开关触点开距角度增加了 θ_2 ，机构的起始角度延后使得辅助开关触点开距角度增加了 θ_3 。防止弧光短路故障发生的总原则是保证动静触头间的电弧在开距角度达到 θ_1 位置之前熄弧。基于这个原则，确定了五个解决方案：

- 1) 更改接线，取消S3:13-14接线，消除电弧短路条件。
- 2) 加大触头开距角度（如静触头 40° 为 32° ），所有 θ 角提前。
- 3) 抑制回路负荷自感分量，线圈两端并联RC回路，减小 θ_1 角度。

4) 调整机构拐臂、连杆，改变动触头起始角度，消除 θ_3 。

5) 降低线圈功率并调整外形尺寸，降低线圈时间常数，消除 θ_2 。

根据上述五个解决方案，确定具体改进方案，逐一进行了试验验证，并对各方案进行利弊分析，试验结果及方案优缺点对比见表3。综合考虑技术、经济因素，推荐方案一为最佳解决方案。

表3 试验结果及方案优缺点对比

	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
改进方案	S3:13-14取消接线	静触头 40° 更改为 32°	并RC回路	辅开连杆改为可调连杆	降低线圈功率，更改线圈外形
测试结果	故障消除	故障消除	正常工况下基本消除	正常工况下基本消除	正常工况下基本消除
优点	较容易实现	改动量少	较容易实现	搭接角度可调	—
缺点	可用触点减少	机构精度要求提高	不符合国网十八项反措“断路器机构分合闸控制回路不应串接整流模块、熔断器或电阻器”要求	提高机构装配要求	线圈改动量大，影响其他电气参数

注：额定电压DC 220 V条件下，线圈动作电压范围为65%~110%（242 V），故设定试验工作电源电压升压至DC 260 V且不发生弧光短路，即为满足要求。

结束语

本文基于中压真空断路器的产品特性，结合电弧灭弧原理，通过结构分析和试验研究，提出了中压真空断路器F10辅助开关出现弧光短路从而烧蚀辅助开关触点的原因，并提出了相应的解决方案，还通过试验验证，推荐了最佳的解决方案。文中主要参数通过实际试验测量所得，与理论计算值可能存在偏差，通过同等条件下单、双模块产品的参数对比，使用相对值消除偏差部分对试验过程及结果的影响。EA

参考文献

[1] 谢志文，何宏明，韩博文，等．基于时空源三维度的高压开关柜的可靠性分析[J]．电气应用，2020，39（9）：23-28．

（收稿日期：2021-11-09）