# 特高压固定串补火花间隙拒触发事故分析及解决方案

刘涛,郭果

(国网河南省电力公司检修公司,河南 郑州 450051)

摘要:当前超、特高压固定串补用火花间隙的试验及考核均以工频和倍频故障电流为主,基本未考虑故障电 流含有直流分量的情况。分析了1000 kV 特高压南阳站一起特高压固定串补用火花间隙拒触发事故,认为 本次线路故障电流中直流分量幅值较大导致火花间隙触发控制回路中电压测量传感器磁饱和,导致火花间 隙触发控制单元未能正确测量出串补过电压水平而拒触发。提出维持现状的南阳站现场临时解决办法。解 决该问题的根本途径是提高火花间隙触发控制回路中电压测量传感器在直流电流下的抗饱和能力。根据对 火花间隙触发控制回路中元器件的试验室研究结果,提出减小该电压传感器励磁电流、增大铁芯面积以及降 低原边和副边匝数以提高传感器在直流电流下的抗饱和能力的解决方案。

关键词:特高压输电;特高压固定串补;火花间隙;拒触发保护;直流分量;传感器磁饱和

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202012026

#### 0 引言

2011年11月,1000 kV晋东南一南阳一荆门特 高压交流试验示范工程串补工程成功投入商业运 行,该工程包含4套特高压固定串补装置,是世界首 个1000 kV 特高压固定串补工程;2016年7月,我国 第2个1000 kV 特高压固定串补工程1000 kV 承德 串补站建成投运,该工程是锡盟一山东特高压交流 输电工程的重要组成部分,包含4套特高压固定 串补装置。至2019年12月,我国共投运以上2个 1000 kV 特高压固定串补工程,工程设计、制造、运 维检修经验相对较少<sup>[1-3]</sup>。10余年来,国内500 kV固 定串补工程发生过若干次火花间隙(下文简称GAP) 自触发保护误动事故,一般均为GAP触头间的空隙 存在异常所致,GAP拒触发保护一般为可靠不动作, 未发生过GAP 拒触发保护误动作事故;国内运行 中的8套1000 kV特高压固定串补装置投运至今 共发生保护动作事件15次左右,除本文所述事件 外,未有其他GAP自触发保护、GAP拒触发保护动 作的案例。1000 kV 晋东南一南阳一荆门特高压交 流试验示范工程南阳站长南Ⅰ线特高压固定串补装 置GAP在2018年6月10日线路接地故障期间发生 了护触发事件,本文结合该事件介绍了事故发生的 过程,重点分析了GAP拒触发的原因,提出了改进 意见,为我国后续1000 kV 特高压串补成套设备的 设计、制造和运维检修工作提供了借鉴。

### 1 事故介绍

### 1.1 工程概况

1000 kV长南 I 线及其串补工程投运于2011年 11月,长南 I 线线路全长为358.7 km,线路两侧的长 治站和南阳站均安装了补偿度为20%的特高压串 补装置,串联电容器额定电压为98.4 kV,额定容量 为1500 Mvar;另外,长治站和南阳站还分别安装了 一组高压并联电抗器(下文简称为高抗),长治站高 抗容量为960 Mvar,南阳站高抗容量为720 Mvar,安 装位置均为串补装置的变电站侧<sup>[45]</sup>。南阳站侧系 统接线图如图1所示。



图1 南阳站长南Ⅰ线系统接线图



图1中,C为串联电容器组电容;L为线路高抗; T631为串补装置旁路开关;T031、T032分别为线路 边、中开关;金属氧化物限压器 MOV (Metal-Oxide Varistors)的额定电压为169.7 kV,过电压保护水平 为2.3倍电容器组额定电压(即2.3 p.u.,电容器组额 定电压 U<sub>n</sub>=98.4 kV),最大持续运行电压为118 kV, 并联单元为每相20支(含5支备用),能量吸收能力为 每相68.7 MJ(不含备用单元);GAP系统主要包含2 台自放电型主间隙,整体绝缘水平为410 kV,故障电 流承载能力为63 kA,允许触发电压峰值为250 kV, 工频自放电电压峰值为352 kV;主间隙绝缘水平为 205 kV,故障电流承载能力为63 kA。

MOV是电容器组主保护,GAP是MOV主保护,也 是电容器组后备保护<sup>[68]</sup>。本线路区外故障情况 下,电容器组承受的过电压水平将不会高于1.8 p.u., MOV单元可靠不导通,串补保护可靠不动作;本线 路区内故障且电容器组承受电压不高于1.8 p.u.的 情况下,MOV单元可靠不导通,串补保护可靠不动 作;本线路区内故障且电容器组承受电压高于1.8 p.u. 的情况下,MOV单元可靠导通,将电容器组两端过 电压水平限制在2.3 p.u.以内,串补保护可靠动作。

线路与串补相互联动,线路单相故障情况下,线路保护跳开线路开关同时联动串补保护发GAP触发命令、合旁路开关,线路重合闸成功后串补自动重投,若线路重合不成功,则由线路保护加速跳开线路开关,同时联动串补保护合三相旁路开关并永久闭锁。若串补旁路开关合闸失灵,则由串补保护联跳线路开关,同时发远传跳开线路对侧开关。

# 1.2 事故发生

2018年6月10日21:00时,南阳站全方式运行, 长南 I 线计划输送功率800 MW,21:30:53:70(故障0 时刻)时,监控系统出现事故告警,长南 I 线线路保 护主要事故信息为:第0 ms长南 I 线第1、2 套线路 保护均整组启动;第11 ms长南 I 线第1、2 套线路保 护均 A 相出口;第51 ms开关T031、T032 均为 A 相分 闸位置;第711 ms开关T031 重合闸出口;第760 ms 开关T031 为三相合闸位置;第1020 ms开关T032 重 合闸出口;第1050 ms开关T032 为三相合闸位置。

长南 I 线串补控制保护系统主要事故信息为: 第0 ms长南 I 线串补控保系统A、B均整组启动;第 27 ms长南 I 线串补控保系统A、B均收到线路保护 A 相联动命令,发出GAP触发命令;第39 ms长南 I 线串补控保系统A、B的GAP触发控制箱均收到 GAP触发命令;第52 ms开关T631处于A 相合闸位 置;第127 ms长南 I 线串补控保系统A、B的GAP拒 触发保护均动作,系统永久闭锁;第183 ms开关T631 处于三相合闸位置。

根据以上监控信息及故障录波文件,现场第一时间分析认为1000 kV长南 I 线发生了 A 相接地故障,故障电流约为1.7 kA,长南 I 线重合闸成功。长南 I 线串补双套控保系统均收到线路联动命令,发出 GAP 触发命令,MOV 导通,GAP 触发不成功,GAP 拒触发保护动作。南阳站长南 I 线串补永久闭锁, 旁路开关三相合闸。线路重合闸成功而串补装置永久闭锁重投,该结果是不正常的。

根据工程设计原则,特高压串补线路发生接地故障,当流经串联电容器组的瞬间故障电流超过 1.8 *I*<sub>n</sub>(*I*<sub>n</sub>=5.08 kA,为电流额定值)时,MOV导通将电容器组两侧电压限制在2.3 p.u.内,同时GAP触发导 通以释放短路能量;当流经串联电容器组的瞬间故 障电流小于1.8 *I*<sub>n</sub>时,电容器组两侧电压不会高于 1.8 p.u.,GAP不会被触发导通<sup>[9-10]</sup>。本次事故中GAP 拒触发保护动作正确与否是分析此次故障的关键 环节。

#### 1.3 GAP拒触发原因分析

特高压串补GAP 拒触发保护需同时满足下列 动作条件:有保护动作命令、GAP 触发箱收到 GAP 触发命令、并联 MOV 有流(大于 5% *I*<sub>n</sub>)且 GAP 无流 时间大于 90 ms。图 2 为本次事件中南阳站串补故 障录波图形,保护动作命令为线路故障联动 A 相串 补命令,GAP 触发箱收到了 GAP 触发命令,MOV 电 流为 850 A > 5% *I*<sub>n</sub>,GAP 始终无电流,双套控保系统 均显示满足 GAP 拒触发保护动作条件,因此 GAP 拒 触发保护动作正确。



根据特高压串补控保系统故障录波数据和MOV 伏安特性,计算得线路故障期间串补电容器两端存 在过电压 1.9 p.u., GAP应正常触发。因此, 在本次线路故障中 GAP未正常触发是造成 GAP 拒触发保护动作的直接原因, 是串补永久闭锁和三相退出的根本原因。GAP 触发的充分必要条件是 GAP 触发控制箱发出触发命令。结合监控系统信息"串补控保A、B系统 GAP 触发控制箱均收到 GAP 触发命令", 推断出本次事故中 GAP 触发控制系统收到了 GAP 触发命令, 但未正确输出 GAP 触发命令。特高压 GAP 触发控制原理如图 3 所示。图中,  $G_1$ 、 $G_2$ 为自放电型主间隙;  $TG_1$ 、 $TG_2$ 为触发放电型密封间隙;  $R_1$ 、 $R_2$ 为限流电阻器,  $T_1$ 、 $T_2$ 为脉冲变压器;  $HT_1$ 、 $HT_2$ 为高压脉冲变压器;  $C_1 - C_4$ 为均压电容;  $C_{SYN}$ 为同步电容。

220



#### 图3 特高压GAP触发控制原理图

Fig.3 Principle diagram of triggering and control of UHV GAP

导致 GAP 未正确输出触发命令的可能原因有  $C_1 - C_4$ 、 $C_{SYN}$ 构成的分压回路故障、GAP 触发控制箱 触发回路(由储能电容、触发阈值判断、触发脉冲输 出电路构成)故障。串补双套保护火花间隙触发控 制回路和一次火花间隙等均需重点检查,以上设备 均布置于串补平台上。

#### 1.4 平台设备检查试验

将长南 I 线固定串补装置停电转检修后,运维 检修人员对平台上的设备进行以下检查。

(1)进行 GAP 触发控制箱及一次设备外观检查,检查后未发现异常。

(2)测量得到GAP触发控制箱内触发控制模块 电压为DC 12 V、储能电容电压为AC 402 V,两者 均为正常值。

(3)使用GAP触发测试仪进行GAP触发回路功 能测试,模拟线路保护A相联动串补,同时施加同步 电压6.31 V(由1.8 p.u.折算至二次侧),10次试验中 GAP触发箱均可靠发出触发命令;检查得同步电压 的临界值为6.03 V(由1.72 p.u.折算至二次侧),该结 果合格;检查得同步电压为5.7 V(由1.62 p.u.折算至 二次侧)时GAP可靠不触发,结果为合格。则GAP 触发控制回路功能正常。排除因GAP放电击穿电 压本身的分散性(击穿电压提高)导致本次GAP拒 触发行为。

(4)使用电桥测量 $C_1 - C_4$ 电容值(额定值为

3000 pF)、*C*<sub>SYN</sub>电容值(额定值为20 μF),结果均为 合格,且分压变比无异常。

以上检查完毕后,认为平台GAP触发控制一、 二次设备功能均正常,试验结果符合功能设计要求。

# 1.5 过电压水平验算

GAP 触发控制箱通过检测 C<sub>SYN</sub>的电压测量 GAP 两端过电压水平,当GAP 两端过电压水平超过 1.8 p.u.时,输出GAP 触发命令;当GAP 两端过电压 水平不超过1.8 p.u.时,不执行GAP 触发命令。综合 现场检查测试结果及保护动作信息,可以推断出本 次事故中GAP 触发控制箱测得的同步电压未达到 1.8 p.u.的过电压水平,因此未发出GAP 触发命令。

由于GAP触发控制箱通过对C<sub>SYN</sub>的电压进行采 样,相当于对线路故障电流进行积分来获得故障瞬 间串补两侧的过电压水平,因此故障电流也可反映 出串补两侧的真实过电压水平。对本次线路故障电 流(如图2(c)所示)按照式(1)进行积分运算,得到电 容器两侧电压波形如图4所示。

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \tag{1}$$

其中,对于长南 I 线串补装置, C=164.2 μF。





根据图4可知,电容器两端电压(GAP承受电压) 最大值为267 kV,过电压水平约为1.92 p.u.>1.8 p.u., GAP触发控制箱应可靠发出触发命令(如图2(c)、 图4中折线所示)。图2(c)所示故障电流在故障瞬 间(0时刻)完全偏向于电流轴负半侧,其含有较大 幅值的直流分量,而交流分量相对幅值较小,因此在 故障电流的直流偏置作用下,图4所示积分电压波 形在较长时间(约80 ms)内一直处于负半波,这是本 次事故中GAP触发控制箱未能正确采样和检测出 过电压水平的关键原因。

#### 2 故障电流直流分量

#### 2.1 同步电压判断电路原理

GAP同步电压判断电路原理如图5所示,电阻  $R_a$ 、 $R_b$ 和传感器T均位于GAP触发控制板卡上,构成 信号隔离电路, $\beta$ 为流控电流源的电流放大系数。 电容器组电压经 $C_1 - C_4$ 、 $C_{SYN}$ 分压后作为GAP触发 控制箱入口电压 $U_i$ ,再经隔离转换后成为判断电路 的输入电压 $U_o$ 。长南I线串补电容器组额定电压为 98.4 kV,经分压后U,的有效值为3.514 V。GAP触发 整定值的有效值为6.325 V(由1.8 p.u.折算至二次 侧),实际设定U<sub>set</sub>的有效值约为6.009 V(0.95×6.325)、 峰值为8.944 V。



图5 GAP同步电压判断电路原理

Fig.5 Principle of judgment circuit of GAP synchronized voltage

GAP触发控制箱输出触发命令需要同时满足2 个条件:(1)GAP两端过电压水平达到1.8 p.u.;(2) GAP触发控制箱已接收到保护发来的触发命令。2 个条件同时满足才能输出点火脉冲。典型线路故障 电流波形中,串补电容器两侧电压波形呈现为快速 上升、正负交替的工频正弦波形,直至 MOV 和火花 间隙动作。而此故障情况较为特殊,电容器组的电 压波形在较长时间(约为80 ms)内偏于电流轴负半 侧,该电压波形为工频基波上叠加了较大幅值的直 流分量<sup>[11]</sup>,该直流分量可能是导致本次 GAP 拒触发 保护动作的根本原因。

#### 2.2 试验验证

建立和模拟试验环境,将宽度为80 ms、幅值为 8.9 V(过电压水平1.8 p.u.,一次值250 kV)的直流方 波信号作为U<sub>i</sub>输入至图5所示的电路中,试验结果 如图6所示,图中U<sub>o</sub>>U<sub>set</sub>(虚线上方)为有效部分。 试验结果表明,U<sub>o</sub>的有效部分最短为22 ms,最长为 35 ms,这说明GAP同步电压判断电路中信号隔离转 化元件在22~35 ms之内发生饱和,其输出电压U<sub>o</sub>快 速降低至0,该电路无法正常测量和判断GAP两端 电压。





Fig.6 Saturation voltage waveform output of judgment circuit of synchronized voltage

本次长南 I 线串补电容器组过电压波形可等效 为 80 ms 直流方波,其幅值和宽度超出了本工程 GAP触发控制系统参数设计范围<sup>[12]</sup>,在保护触发命 令到来前,图5所示的GAP同步电压判断电路中的 传感器 T铁芯已处于磁饱和状态,导致输出 U。=0, 该电路的过电压测量功能失效,同步电压判断电路 判定不满足触发条件,导致 GAP 触发控制箱不能输 出触发脉冲,这是本次特高压固定串补 GAP 拒触发 保护动作的根本原因。

#### 2.3 本次事故的故障电流的说明

电力系统短路电流中包含周期分量和直流分量,随着时间的无限增长,直流分量按本系统时间常数 τ 衰减到 0。关于特高压电网故障电流直流分量 衰减过程计算及去衰时间已有大量成熟的研究和结论<sup>[13-15]</sup>。文献[13]建立了特高压电网分布参数模型,该文献认为特高压电网非周期分量衰减时间常数 τ 一般为 100~220 ms,给继电保护的测量和动作快速性带来了严重影响。电力系统各种对称和不对称故障、变压器合闸励磁涌流、非同期并网等过程均 会产生直流分量。直流分量反映的是电力系统状态 变化过程中电磁能量的转换。因此在任何一次系统 故障期间,一般均会产生直流分量。

长南 I 线串补线路发生接地故障后,结合故障 测距(基于阻抗原理)、双端行波测距结论,线路巡线 人员现场巡视检查后发现,长南 I 线距南阳站 215 km处的253号塔A相直线悬垂绝缘子串处有放电痕 迹,结合本次故障电流波形分析和河南省雷电监测 定位系统数据,确定本次线路故障为雷电绕击该塔 A 相直线悬垂绝缘子串处导线后对铁塔放电。由于 1000 kV线路外绝缘水平很高,雷电绕击导线造成 的闪络一般弧道较长,过渡电阻大,所以故障电流小 且持续时间短,直流分量占比相对较大,是造成本次 特高压串补 GAP同步电压检测电路传感器T饱和的 本质原因。图7为本次特高压线路雷击闪络跳闸与 异物导致接地跳闸故障电流的波形对比。



# 图 7 特高压线路雷击闪络跳闸与异物导致接地跳闸 故障电流波形对比

Fig.7 Comparison of current waveform between grounding faults on UHV line caused by lightning and foreign objects

由图7可见,典型异物导致接地跳闸的故障电 流工频分量占比较大,直流分量占比较小;雷电闪络 导致跳闸的故障电流工频分量占比较小,直流分量 占比显著。串补GAP触发箱一般在故障发生后15~ 30 ms内检测同步电压信号是否满足条件,并输出 GAP触发命令(在满足条件的情况下)。根据现场故 障录波数据,本次故障发生后15~30 ms内,直流分 量幅值最大可达基波分量幅值的251.7%。对于国 内目前在运8套1000 kV 特高压固定串补装置:由雷 击跳闸导致的线路跳闸共计5次,最大的直流分量 幅值为基波分量幅值的164.1%;由其他原因造成的 线路跳闸共计12次,最大的直流分量幅值为基波分 量幅值的85.7%,均显著低于本次故障数据。GAP 同步电压判断电路能否正确检测出过电压倍数,不 仅与直流分量占比有关,还与直流分量和交流分量 各自的幅值有关,本文对此暂不作深入研究。本次 故障电流波形有明显的特殊性和偶然性(与故障初 始相位角、故障点电弧性质、故障点与保护安装处 距离等密切相关)。这也是10余年来,国内在运8套 1000 kV 特高压固定串补、40余套 500 kV 及以下电 压等级固定串补装置历次线路故障期间GAP拒触 发保护同步电压判断电路均正确动作或可靠不动作 (未发生类似本次GAP 拒触发保护误动)的根本原 因所在。

### 3 现场暂时解决方案

(1)方案1:提高串补保护GAP 拒触发保护的GAP 两端电压判据门槛值,即由原来的1.8 p.u.提高到2 p.u.。该方案的优点是出现类似故障时,GAP 拒触发保护不会动作,降低了类似故障情况下GAP 拒触发保护动作的概率,故障相重投后串补正常运行,不会造成串补退出;缺点是提高该电压门槛值牺牲了GAP 拒触发保护动作的灵敏性,存在GAP 无法正确动作而引起 MOV 等设备损坏的风险。

(2)方案2:降低U。的过电压定值U<sub>set</sub>,提高GAP 同步电压判断的灵敏性。该方案的优点是若再次发 生线路故障电流存在较明显直流分量的故障,则可 以显著提高GAP触发命令发出的灵敏性;缺点是如 果线路故障电流存在直流分量的情况更为严重,造 成U。基本为0,则该方案无法进行反应,GAP依然不 能正确触发,同时该方案提高了特高压串补线路区 内远端故障下GAP触发的概率(GAP两端电压低于 1.8 p.u.时,这种触发是无意义的,非GAP误触发)。

(3)方案3:鉴于本次事故中GAP 拒触发保护动 作是正确的,GAP 触发控制箱未正确发出GAP 触发 命令,可以通过提高GAP 控制触发箱发出GAP 触发 命令的灵敏性解决。对GAP 触发箱内A、B 套触发 系统中的一套取消就地同步电压判据,另一套取或 逻辑出口。该方案优点是能保证在类似线路故障条 件下,电容器组两端过电压超过1.8 p.u.时,GAP 触 发控制箱在收到触发命令时能够灵敏地发出GAP 触发命令,GAP 拒触发保护不会动作,串补不会退 出;缺点是该方案会造成2套 GAP 触发控制系统动 作后果不一致,且取消同步电压判断的GAP触发控制系统容易受到干扰而误动,增加了GAP误触发的风险。

(4)方案4:维持现状。综合考虑在特高压线路 单相接地或相间短路等典型故障情况下,串补装置 能够可靠动作;在本次故障的特殊工况下,虽然存在 GAP拒触发的风险,但在该工况下过电压水平较低, 不会造成串补装置损坏,风险可以承受,因此可以允 许GAP拒触发保护动作,串补短时退出。通过分析 监控和录波信息确定无异常后,可重新投入串补。

综合考虑,建议暂时维持当前串补装置的设计和结构,现场按照方案4将1000kV长南 I 线串补投入运行。

## 4 改进方案

本次长南 I 线接地故障过程中,故障电流中存 在较大比例的直流分量,从而导致 GAP 同步电压判 断电路未能正确检测出串补两侧实际过电压倍数, GAP 控制触发箱未能正确输出触发信号,GAP 未能 正确触发,导致 GAP 拒触发保护动作。该问题不是 长南 I 线串补装置存在的特例,而是该型号设备普 遍存在的问题。1000 kV 长治一南阳—荆门特高压 交流试验示范工程中的4套特高压固定串补装置、 1000 kV 锡盟—山东特高压交流输电工程中的4套 特高压固定串补装置均采用同样的设计原理和参 数,应从根本上对此进行改进,主要办法就是提高在 故障电流直流分量下图 5 所示 GAP 同步电压判断电 路中传感器T的抗饱和能力<sup>[16-17]</sup>。

目前国内在运的8套1000 kV特高压固定串补装置GAP同步电压判断与隔离电路中,传感器T的型号均为SPT204A,其主要技术参数见附录中表A1。SPT204A型传感器使用的超微晶材料的剩磁系数*K*≈0.2,饱和磁感应强度*B*≈1.2 T,其饱和磁感应强度较小,具有很高的磁导率,同时还具有低矫顽力、低损耗和良好的稳定性、耐磨性、耐腐蚀性,因而被广泛应用于信号变换用的小型传感器中。可以采取以下措施改善该传感器T的抗饱和能力<sup>[16-17]</sup>。

(1)减小传感器励磁电流。

在传感器铁芯、匝数不变的情况下,励磁电流大 小与图 5 中限流电阻  $R_a$ 的大小成反比,因此可以通 过增大  $R_a$ 减小传感器励磁电流,从而抑制传感器铁 芯磁饱和。目前  $R_a$ 的设计值为 4 k $\Omega$ 。通过试验得 到了  $R_a$ 分别为 4、14.4 k $\Omega$ 时信号隔离电路的输出特 性,如附录中图 A1 所示。由图可知,当 $R_a$ 分别为 4、 14.4 k $\Omega$ 时, $U_a$ 的有效时间分别约为 30、50 ms,这说明 通过增大 $R_a$ 可有效减小励磁电流,使传感器在 80 ms 内的抗磁饱和性能得到明显提升。

(2) 增大传感器铁芯尺寸。

增大传感器铁芯尺寸能够降低传感器铁芯磁通 密度,从而抑制铁芯饱和。在铁芯材质、形状和线圈匝 数均相同的情况下,选取型号为SPT204B的传感器 进行对比,其铁芯内径为13.2 mm,外径为21.5 mm, 高为10 mm,截面积约为SPT204A型传感器的2.3 倍。 取 $R_a$ =14.4 k $\Omega$ ,信号隔离电路分别采用SPT204A 和 SPT204B型传感器时的输出电压波形见附录中图 A2。由图可见,通过增大铁芯尺寸,传感器的抗磁 饱和性能得到了进一步提升, $U_a$ 的有效时间由约50 ms 延长至约60 ms。

(3)减少传感器原、副边匝数。

减少传感器原、副边匝数能够降低线圈的直流 电阻和传感器励磁安匝数,抑制铁芯磁饱和。使用 SPT204B型传感器的铁芯,取 $R_a$ =14.4 k $\Omega$ ,原、副边 匝数分别为1500、1000、500时的试验波形见附录中 图A3。由图可见,在增大传感器铁芯尺寸的基础上, 传感器原、副边匝数分别为1500、1000和500时, $U_a$ 的有效时间分别为60 ms、75 ms和不小于80 ms,说 明减少传感器原、副边匝数,可进一步延长信号隔离 电路输出电压的有效时间。当原副边匝数为500匝 时,若持续输入 $U_i$ ,实测数据表明 $U_a$ 的有效时间可达 120 ms,完全满足本次线路故障工况的要求。

综合上述改进措施,将*R*。的阻值由4kΩ增大至 14.4 kΩ,将传感器T的铁芯由SPT204A型改为 SPT204B型,将传感器T的原、副边匝数由1500减小 为500,可以有效提高GAP同步电压判断电路中传 感器T在直流电流下的抗饱和能力,避免类似本次 长南 I 线接地故障过程中,因故障电流中存在较大 比例的直流分量而导致的特高压固定串补GAP拒 触发事故。

对传感器进行改进试验时需进行输出电压角差、比差校验,改进完毕后需进行实验室 GAP 触发试验。采用上述改进措施后,输出电压角差、比差校验结果为合格;模拟本次线路故障时的 GAP 触发试验结果表明,GAP 触发控制箱命令能可靠发出。

#### 5 结语

(1)本次事故中,GAP同步电压判断电路中传感 器饱和是造成GAP触发命令未发出的主要原因。 平台杂散电容也会降低对触发系统工作的可靠性, 这是本次GAP触发命令未发出的次要原因,限于篇 幅,不再赘述。

(2)本文的传感器改进方案不改变原有的信号 隔离电路结构,仅需更换电阻*R*<sub>a</sub>和传感器,因此改造 后的电路稳定性与原电路相当,同时施工难度小,周 期短、成本低。也可以采用线性光耦作为隔离元件, 虽然不存在磁饱和问题、对直流电压信号的响应较 好,但需增加运算放大器,并重新设计外围电路,改 变了原有电路原理和结构,且需要进行电路板设计、 加工及相关检测,周期长、成本高;同时线性光耦、运 算放大器等属于有源元件,易受电源、电磁干扰等因 素影响,工作可靠性低于无源器件,因此不做推荐。

(3)现有特高压串补工程中若出现类似本文所 述事故,建议进行现场检查,若无其他异常则可以及 时恢复送电,设备不再做软硬件改进。对于新建特 高压串补工程,建议采用本文所述GAP同步电压判 断电路传感器改进方案。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1]夏毅,姚文军,赵淑珍,等.一起串联补偿电容器复杂故障的分析[J].电力系统自动化,2011,35(7):91-96.
   XIA Yi, YAO Wenjun, ZHAO Shuzhen, et al. Analysis on a complicated fault of series capacitor compensation equipment
   [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7):91-96.
- [2] 李振兴,王玲,黄悦华,等.大串补线路电流差动保护拒动因素 及改进保护方法[J].电力自动化设备,2018,38(1):199-205.
   LI Zhenxing, WANG Ling, HUANG Yuehua, et al. Analysis of current differential protection maloperation in power transmission line with high series compensation and corresponding improved protection method[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(1):199-205.
- [3]张健毅,刘涛,郭果,等.超(特)高压串联补偿控制保护系统与 线路保护接口方案[J].中国电力,2013,46(7):77-81.
   ZHANG Jianyi,LIU Tao,GUO Guo,et al. Investigations on interface program of series capacitors's control & protection system and line protection system in an EHV(UHV) transmission engineering[J]. Electric Power,2013,46(7):77-81.

 [4] 张媛媛,班连庚,项祖涛,等.1000 kV 特高压固定串联补偿 装置关键元件工作条件研究[J]. 电网技术,2013,37(8):2218-2224.
 ZHANG Yuanyuan, BAN Liangeng, XIANG Zutao, et al. Re-

search on working condition of key components for fixed series compensation in 1000 kV UHVAC power transmission project[J]. Power System Technology, 2013, 37(8):2218-2224.

- [5] 刘涛,郭凯,岳雷刚,等.特高压串补控制保护系统若干逻辑改进方案[J].水电能源科学,2015,33(7):196-199,195.
   LIU Tao,GUO Kai,YUE Leigang, et al. Improved programs on several issues of UHV series capacitors control and protection system[J]. Water Resources and Power,2015,33(7):196-199,195.
- [6] 孙为民,曾嵘,盛新富.用于串补的激光触发与电脉冲触发火花间隙对比实验研究[J].高电压技术,2015,41(2):693-698.
   SUN Weimin, ZENG Rong, SHENG Xinfu. Experimental study of laser-triggering and electrical-triggering methods for a high voltage spark gap in high-voltage series capacitor protection [J]. High Voltage Engineering,2015,41(2):693-698.
- [7] 郭凯,刘涛,郭果,等. 特高压交流试验示范工程串补工程控保系统定值整定方案[J]. 水电能源科学,2016,34(6):199-202,139.
  GUO Kai,LIU Tao,GUO duo,et al. Relay setting value calculation scheme on UHV AC demonstration project's fixed series compensation control and protection system[J]. Water Resources and Power,2016,34(6):199-202,139.
- [8]朱晓彤,黄蕙,徐晓春,等. 串联补偿线路电流反向对差动保护

的影响及对策[J]. 电力系统自动化,2015,39(14):151-156. ZHU Xiaotong, HUANG Hui, XU Xiaochun, et al. Influence and countermeasures for current reversal on differential protection of series compensated lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14):151-156.

- [9] 周启文,潘勇斌,王德昌,等. 500 kV 串补系统中火花间隙系统 研究[J]. 高压电器,2012,48(8):40-44. ZHOU Qiwen, PAN Yongbin, WANG Dechang, et al. Improvement of spark gap system for 500 kV series compensation system[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 40-44.
- [10] 孙健,阳少军,周启文,等. 500 kV 串补火花间隙设计与试验验 证[J]. 南方电网技术,2014,8(1):33-37. SUN Jian, YANG Shaojun, ZHOU Qiwen, et al. Design and experimental verification of 500 kV series-capacitor spark gap[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(1): 33-37.
- [11] 段建东, 雷阳, 金转婷, 等. 电流互感器暂态饱和特性的实证分 析[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):207-213. DUAN Jiandong, LEI Yang, JIN Zhuanting, et al. Empirical analysis on transient saturation characteristic of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 207-213.
- [12] 薛蓉,秦昱. 特高压交流输电系统暂态故障电流分析[J]. 江 苏电机工程,2008,27(6):65-68. XUE Rong, QIN Yu. Analysis of transient fault current of UHV AC transmission system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2008,27(6):65-68.
- [13] 李杨,李永丽. 750 kV 及特高压输电线路的暂态电流研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2006,18(3):18-23. LI Yang, LI Yongli. Research on transient current of 750 kV and UHV transmission line[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(3): 18-23.
- [14] 曹炜,张捷,陈春阳,等. 短路电流直流分量的构成特点和计算

方法[J]. 水电能源科学,2019,37(6):178-182.

CAO Wei, ZHANG Jie, CHEN Chunyang, et al. Composition characteristics and calculation method of DC component of short-circuit current[J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (6):178-182.

- [15] 刘平,刘朴,姚远,等. 特高压串补用火花间隙试验技术研究 [J]. 高压电器,2018,54(1):51-56,63. LIU Ping, LIU Pu, YAO Yuan, et al. Research on test method of spark gap for UHV series compensation device[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1):51-56, 63.
- [16] 翁汉琍,杨国稳,相艳会,等.变压器饱和对交流电网直流电流 分布的影响[J]. 高电压技术,2016,42(10):3295-3300. WENG Hanli, YANG Guowen, XIANG Yanhui, et al. Effect of transformer saturation on the DC distribution of AC power system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3295-3300.
- [17] 郑涛,马玉龙,黄婷,等. 保护用电流互感器铁芯剩磁衰减规律 分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):126-131. ZHENG Tao, MA Yulong, HUANG Ting, et al. Attenuation law analysis of core residual magnetism for protective current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37 (10):126-131.

#### 作者简介:



# Analysis of spark gap refusal trigger accident in UHV fixed series compensation and corresponding solutions

LIU Tao, GUO Guo

(Maintenance Company of State Grid Henan Electric Power Corporation, Zhengzhou 450051, China)

Abstract: Fault current for test and assessment of spark gap used in UHV (Ultra High Voltage) and EHV (Extra High Voltage) fixed series compensation is mainly based on power frequency and double frequency, DC component in fault current is not considered. A spark gap refusal trigger accident of UHV fixed series compensation in 1000 kV Nanyang substation is analyzed, which shows that the large amplitude of DC component in fault current leads to the magnetic saturation of voltage measurement sensor in spark gap trigger control circuit, so the spark gap trigger control circuit unit fails to measure the series compensation overvoltage level correctly and refuses to trigger. Temporary solution is proposed to maintain the status quo, which is accepted in Nanyang substation. The fundamental way to solve this problem is to improve the anti-saturation ability under DC current of voltage measurement sensor in spark gap trigger control circuit. According to the results of laboratory research on the components of spark gap trigger control circuit, the solutions of reducing the excitation current, increasing the area of the iron core and reducing the turns of the primary and secondary side of the voltage sensor are proposed to improve its anti-saturation ability of the sensor under DC current.

Key words: UHV power transmission; UHV fixed series compensation; spark gap; trigger refusal protection; DC component; sensor magnetic saturation



附录

表 A1 SPT204A 传感器技术参数 TableA1 Technical parameters of SPT204A transformer

参数	参数值
原、副边额定电流	2mA
原、副边匝数比	1500 : 1500
频响带宽	20~50kHz
等效直阻	约 200Ω
铁芯材料	超微晶
铁芯尺寸	内径 9.6mm,外径 13.2mm,高 10mm









different values of  $R_a$ 



(a) 铁芯型号为 SPT204A



(b) 铁芯型号为 SPT204B

图 A2 不同铁芯截面积下的输出电压波形 Fig.A2 Voltage waveform output under

different core section areas



图 A3 不同原、副边匝数时输出电压波形 Fig.A3 Voltage waveform output with

different number of primary and secondary side turns