

# 550kV 同塔双回输电接地开关开和感应电流问题的研究

谢寅志 王江涛 王恩旭 李昕莹 张罗锐  
天津平高智能电气有限公司 天津 300300

**【摘要】**同塔双回输电线路中使用的高压接地开关要求具有开合感应电流能力。本文对接地开关开合感应电流所遇到的问题以及解决办法进行了讨论：对接地开关开不断感应电流时产生的危害进行了阐述，并结合实例对产生的感应电流高于国家接地开关的标准时所采取的解决办法进行了说明，对怎样提高接地开关操作的可靠性提出了解决方案。

**【关键词】**感应电流；接地开关；同塔双回路

## 0 前言

随着同杆双回线的普及和电压等级的升高，对接地开关开合感应电流的能力要求越来越普遍，也越来越高。而我国对于接地开关开合感应电流能力的问题还不够重视，国内制造厂家开发的产品也远远跟不上电网发展的需要，国家相应的技术标准和试验标准、试验手段发展滞后。

在许多情况下所计算和测量的感应电流要高于接地开关的国家标准，普通的接地开关不能满足开断感应电流的要求，针对这种情况本文对接地开关开不断感应电流时产生的危害进行了阐述，提出了先用更高性能的接地开关和外加小电感和电阻的方法来提高接地开关的性能。

## 1 接地开关开不断电流时产生的危害

当感应产生的电流高于接地开关的额定值时，接地开关将无法开断，会在接地开关的动静触头间产生电弧，将烧坏接地开关<sup>[1]</sup>。

### 1.1 电弧的产生和熄灭条件

电弧的产生和熄灭过程，实际上是气体介质由绝缘变为导通和由导通又变为截止的过程。

#### 1.1.1 电弧产生的条件

(1) 触头开断初瞬间自由电子的生成。触头刚分离时，由于触头间的间隙很小，在电压作用下其间形成很高的电场强度，当电场强度超过  $3 \times 10^6 \text{V/m}$  时，阴极触头表面的自由电子在强电场力的作用下，被拉出金属表面，强电场发射电子；同时，触头刚刚分离时，触头间的接触压力和接触面减小、接触电阻增大，使接触表面剧烈发热，局部高温，使此处电子获得动能发射出来。这些自由电子存在于触头间隙间。

(2) 碰撞游离形成电弧。触头间隙中的自由电子，在触头间电场的作用下加速运动，撞击间隙中的中性气体质点（原子或分子），使中性质点游离，产生自由电子和正离子，这种游离过程称为碰撞游离。碰撞游离不

断进行、不断加剧，带电质点成倍增加，发展成为“雪崩”。大量带电质点充满间隙，气体导通，强烈放电，形成电弧。

#### 1.1.2 电弧的熄灭条件

电弧达到某种平衡而稳定燃烧，是由于弧隙中不但进行着游离过程，同时还进行着去游离过程。去游离过程是指自由电子和正离子相互吸引而中和的过程。去游离的主要方式是复合与扩散：异性带电质点相遇，电荷中和成为中性质点的现象称为复合；扩散是指电弧中的自由电子和正离子散溢到电弧外面，并与周围未被游离的冷介质相混合的过程。要想使电弧熄灭，就必须使去游离的作用大于游离。如果去游离的强度大于游离的强度，弧隙中导电质点的数目减少，点导下降，电弧越来越弱，弧温下降，使热游离下降或停止，最终导致电弧熄灭。

#### 1.1.3 交流电弧的熄灭

交流电弧电流每半个周期 (0.01s) 均通过一次自然过零值，此时电源停止向弧隙输入能量，热游离强度下降，这有利于交流电弧的熄灭（直流电弧相对困难些）。但是，也应该看到，由于热惰性的原因，在高电压、大电流的装置中，即使在电流过零的瞬时电弧温度仍然很高，热游离仍未停止，熄灭电弧仍然会遇到困难。但是无论如何，也要充分利用这一有利时机，采取最有效的措施加强对弧柱的冷却，使其热游离减弱，去游离加强。

电弧中的发热过程和电弧与周围介质间的热交换过程，对电弧的持续燃烧或熄灭起着重要的作用。在电弧电流过零值之前，由于电流在快速地下降、输送给弧隙的能量减少，但弧隙却不断地向周围介质散出能量，电流过零时，热游离有可能停止，电弧不再重燃。但是，由于电流过零的速度太快，热量又存在惰性，因此，在电流过零的一段时间内，弧隙温度仍然很高，热游离仍在继续，电流过零后，电弧会重燃而不能熄灭。

综上所述，在交流电弧的灭弧中，应充分利用交流电流的自然过零点，采取有效的措施，加大弧隙间去

游离的强度，使电弧不再重燃，最终熄灭。

### 1.2 电弧的危害

电弧实际上是一种气体放电现象。是在某些因素作用下，气体强烈游离、由绝缘变为导通的过程。电弧形成后，由电源不断地输送能量，维持它燃烧，并产生很高的高温。电弧燃烧时，中心区温度可达到 10000K 以上，表面温度也有 3000 ~ 4000K。同时发出强烈的白光，故称弧光放电为电弧。电弧的高温，可能烧坏电器触头和触头周围的其他部件。如果电弧较长时间不能熄灭，将会引起电器被烧毁甚至有爆炸的可能，危及电力系统的安全运行，造成人员的伤亡和财产的重大损失。

### 2 接地开关开合感应电流的情况

随着电力建设的发展，500 kV 系统已成为我国电力系统的主干网，500 kV 输电走廊越来越紧张，采用同杆架设双回输电线路已成为必然的选择。同杆架设双回输电线路一回带电运行，一回停运接地检修时，运行线路将在停运线路上产生较大的电容性和电感性感应电流，线路接地开关需有能力切断这些感应电流。

电磁感应电流(电感性电流)两端接地开关均接地，由运行线电流在检修线上感应的电势引起的环流。两端接地的不带电路中的感性电流取决于带电路中的电流以及与带电路的耦合系数(由杆塔上的线路布置情况决定)。完全同杆架设不换位线路一回线运行，另一回线停电检修时，流过接地开关的电磁感应电流与运行线路传输的功率成正比，与线路长度的关系不大。

静电感应电流(电容性电流)一端接地开关接地，从运行线与检修线间的电容经检修线流入大地的电流。一端接地的不带电路中的容性电流取决于带电路上的电压与带电路的耦合系数(由杆塔上的线路布置情况确定)，以及不带电路的接地端和开路端之间的距离。完全同杆架设不换位的线路一回线带电运行，另一回线停电检修时流过接地开关的静电感应电流与运行线路传输的功率无关，与线路的长度呈正比例关系，在同杆架设线路中还有非同杆架设线路时，静电感应电流比原同杆架设线路的静电感应电流大，一般而言，同杆架设线路长度超过 15 km 后，静电感应电流就大于 1.6 A。

#### 2.1 接地开关国家标准

根据国家标准接地开关应满足以下要求 [3]：

当线路一端不接地，另一端进行接地开、合时，应有关合和开断电容电流的能力。

当线路一端接地，另一端进行接地开、合时，应有关合和开断电感电流的能力。

具有连续通过电容电流和电感电流的能力。

1992 年，我国依据 IEC60129-1984 编制 T 机械行业标准 JB/T6461-1992《交流高压接地开关开合感应电流试验》，2000 年我国电力行业修订 DL/T486《交流高压隔离开关和接地开关订货技术条件》时，也依据 IEC60129-1984，在附录中包含了“接地开关开合感

电流的试验”。随后，我国 IEC62271-102:2001(第一版)重新修订了 GB1985-2004《高压交流隔离开关和接地开关》国家标准。标准规定，对于 40.5kV 及以上的接地开关有可能要求开合感应电流和电压的能力，主要通过额定感应电流和额定感应电压参数来确定 [4]。接地开关一般可分为 A 类和 B 类，额定感应电压电流标准值按表 1 给出。

表 1 接地开关的额定感应电流和额定感应电压的标准值

额定电压 Ur/ kV	电磁感应				静电感应			
	额定感应电 流 /A (有效值)		额定感应电 压 /kV (有效值)		额定感应 电流 /A (有效值)		额定感应 电压 /kV (有效值)	
	类别		类别		类别		类别	
	A	B	A	B	A	B	A	B
72.5	50	80	0.5	2	0.4	2	3	6
126	50	80	0.5	2	0.4	2	3	6
252	80	80	1.4	2	1.25	3	5	12
363	80	160	2	10	1.25	18	5	17
550	80	160	2	20	2	25	8	25
800	80	160	2	20	3	25	12	32

#### 2.2 实例仿真

目前，很多 550 kV 变电工程建设中，停电接地线路很长、带电线路负荷很大，其感应电流和感应电压都高于国家标准规定的 B 类接地开关标准值。

现以一条 550kV 线路为例，作出其 ATP-EMTP 的仿真波形图并得出了其有效值加以说明。其电路参数为线路长度 240km，土壤电阻率为 500Ω·km。系统运行电压为 550kV，相导线型号为 LGJ-680/45，导线直径 d=15.5mm，直流电阻为 0.0585Ω/km；采用对称 4 分裂导线，分裂间距 450mm；杆塔采用鼓型塔，正相序排列，全线路均匀换位；地线型号为 GLB4-150，导线直径 8mm，直流电阻为 0.304Ω/km；地线采用水平布置，两地线间距为 20.4m；地线悬挂高度为 44m。

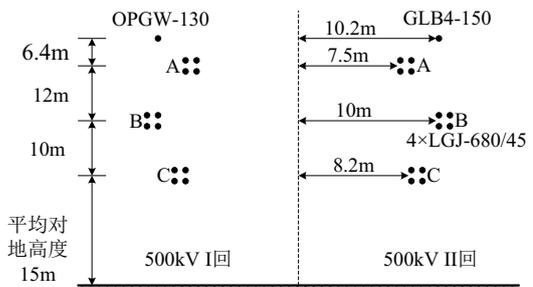


图 1 线路的导线位置示意图

表 2 550kV 同塔双回输电线路感应电压电流仿真结果的有效值

名称	电磁感应		静电感应	
	电磁感应电压 (kV)	电磁感应电流 (A)	静电感应电压 (kV)	静电感应电流 (A)
A	13.5	195.3	27.2	25.9
B	13.3	196.5	25.1	26.3
C	13.7	202.8	21.6	22.2

从表中我们可以看出电磁感应电流和静电感应电流以及静电感应电压都高于国家标准中 B 类接地开关的参数, 若选用 B 类接地开关, 则不能开断感应的电流, 在这种情况下提出三种解决办法。

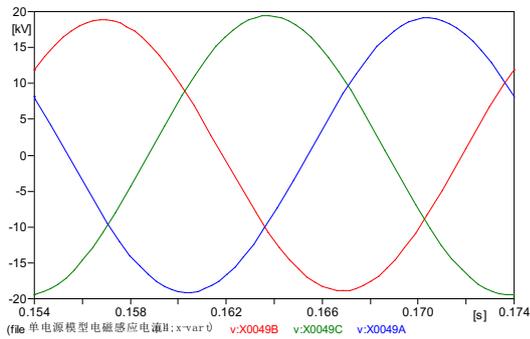
### 2.3 选用更高性能的接地开关

早期, 我国电网对具有开合感应电流能力的接地开关需求很少, 国内厂家对此认识也不是很深。随着电网的发展, 同杆双回线路越来越多, 对接地开关开合感应电流的能力要求越来越高, 这种需求也越来越普遍。在早期并未引起制造企业的重视, 国内 3 家生产 550 kV 隔离开关和接地开关的制造企业, 很长时间不能提供具有开合感应电流能力的接地开关, 因此华东、广东、东北等地区的一些 550 kV 变电工程建设不得不采用国外进口产品<sup>[5]</sup>。

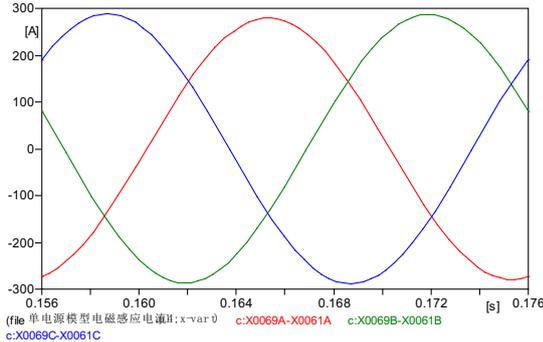
国内制造企业生产的都是常规的接地开关, 没有装设开合感应电流的相应机构。如果用常规接地开关去开合感应电流, 因为没有进行这方面的试验, 究竟能开合多少数值的感应电流, 以及开合操作中表现如何, 均不得而知。由于没有专门的开合感应电流装置, 其可靠性也难以保证。

国外开关行业的著名厂家对此类开关认识较早, 经验也很丰富, 产品也很成熟, 现在都积极向中国推销其产品。现在我国三大开关厂和长沙高压开关有限公司均开发出自己的具有开合感应电流能力的接地开关, 下面进行简要介绍。

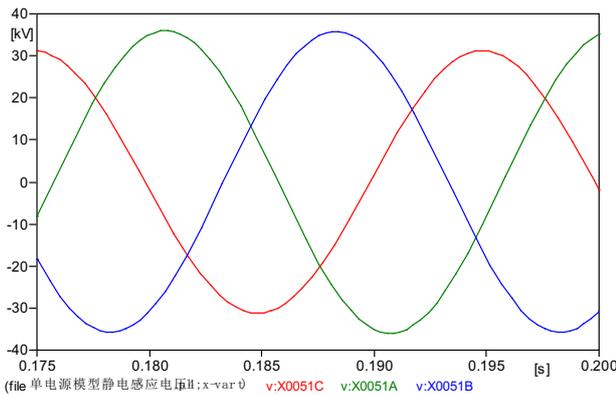
AREVA 公司生产具有开合感应电流能力的接地开关, 其型号为 STB+CK, 在我国华东地区上海、江苏、浙江的诸多 550 kV 变电站中使用。其主要技术参数如下: 额定电压: 145 ~ 800 kV, 短时耐受电流: 63 kA, 开合感应电流能力: 容性电流 25 A, 容性电压 70 kV; 感性电流 200 A, 感性电压 70 kV。AREVA 公司 STB-550/63+CK 型接地开关是在常规 STB 型接地开关的基础上, 增设了开合感应电流的装置 (见图 3、图 4)。具体说, 就是附装在接地闸刀上的具有弹性的辅助触杆以及安装在底座上的 SF6 或真空灭弧室。两者通过柔性杆连接起来。接地开关合闸时, 接地闸刀与辅助触杆一起从水平位置向上摆, 在接近合闸位置时, 辅助触杆先接触, 接着感应电流在灭弧室中接通, 而后接地开关主闸刀合闸, 持续感应电流由主闸刀承载。接地开关分闸时, 主闸刀先分开将感应电流转移到辅助回路时, 主闸



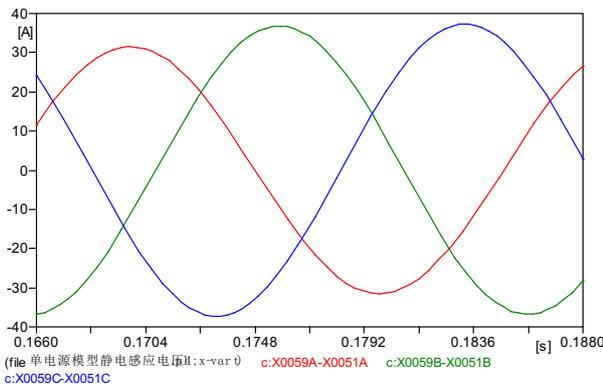
a) 电磁感应电压波形图



b) 电磁感应电流波形图



c) 静电感应电压波形图



d) 静电感应电流波形图

图 2 感应电流感应电压波形图

刀先分开将感应电流转移到辅助回路中，先由灭弧室将感应电流切断，而后辅助触杆分开，并与主闸刀一起下摆运动到水平位置。



图3 AREVA STB+CK型接地开关配用的SF6灭弧室

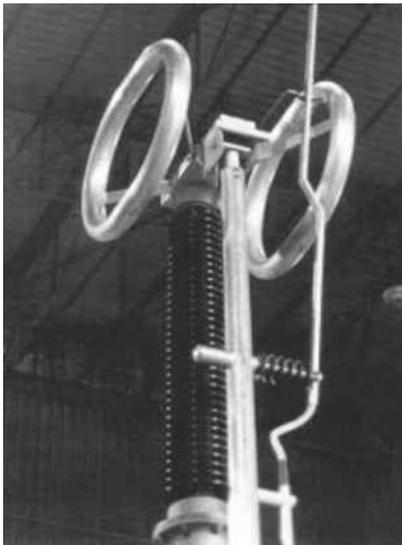


图4 AREVA STB+CK型接地开关辅助触杆

#### 2.4 外加小电抗法

外加小电抗法适用于对电磁感应电流的限制。当接地开关与地之间接上一组小电抗时，我们可以这样认为，相当于增加了检修线路的自电感。下面是电磁感应电流的计算公式：

$$I_1 \approx I \approx -(M_{Aa}I_A + M_{Ba}I_B + M_{Ca}I_C) / L \quad (3-1)$$

从公式中我们可以看出当自感L增加时，电流I会减小。图3-5为加电抗后电磁感应电流的波形图，表3-3为对应的各相的有效值。所加电感为1H。

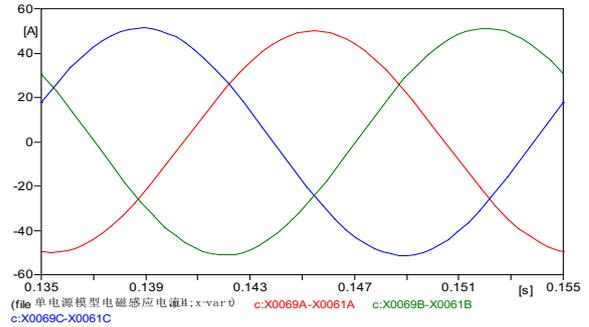


图5 加小电抗后的电磁感应电流波形图

表3 加小电抗后的电磁感应电流有效值

名称	A	B	C
电磁感应电流 (A)	35.1	34.8	36

从波形图和表格中了一看出我们通过加电感为1H的小电抗后，可以明显降低电磁感应电流，使其被控制在B类接地开关额定电流范围之内。

由于小电抗的加入再开和接地开关时可能会对接地开关两端的电压产生影响，图6，图7是接地开关开合过程中接地开关与大地之间的电压波形图。

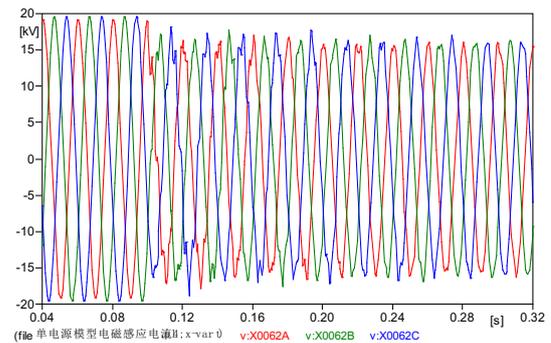


图6 末端接地开关闭合时接地开关与地之间的电压波形图

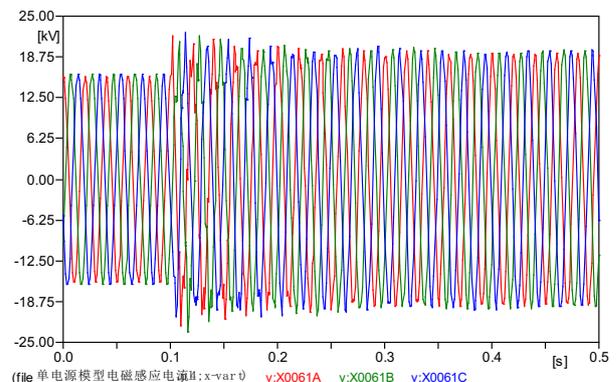


图7 末端接地开关打开时接地开关与地之间的电压波形图

从仿真的波形可以看出所加开关对电压产生的影响都在接地开关允许的范围内。

## 2.5 外加小电阻法

所感应出的静电感应电流也超出了接地开关的允许值，基于所超出的并不太高，可以选用在接地开关与大地之间外加电阻的方法来限制，依据的原理是串联电阻具有分压限流的作用。所加电阻为  $500\Omega$ 。图 8 为加入电阻后静电感应电流的波形图，表 4 是对应的各相的有效值。

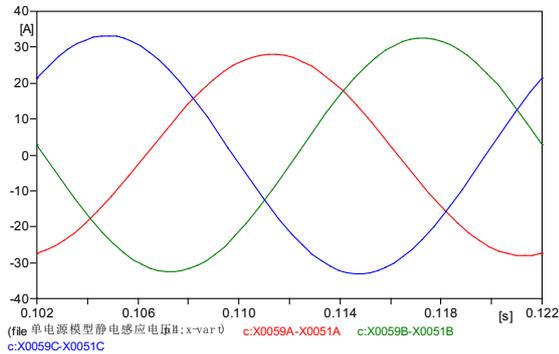


图 8 加电阻后的静电感应电流波形图

表 4 加电阻后的静电感应电流有效值

名称	A	B	C
静电感应电流 (A)	19.8	22.9	23.4

通过仿真的结果可以看出，在接地开关与地之间加电阻的方法可以明显的降低流过接地开关的静电感应电流，使其控制在接地开关允许的范围之内。

## 3 对接地开关的可靠性操作

通过上面我们的分析已经的出了限制静电感应电流、电磁感应电流的方法。考虑到经济性和可靠性，我们可以只选择一套电阻和电抗。将电阻串接在线路末端的接地开关和大地之间，将电抗串接在线路首端的接地开关和大地之间。当检修线路时，闭合接地开关可以按以下的步骤进行：

- (1) 将线路末端的电阻投入
- (2) 闭合线路末端的接地开关
- (3) 将线路首端的电抗投入
- (4) 闭合线路首端的接地开关

当检修完线路打开接地开关时，其操作顺序与闭合时相反。通过这样的操作不仅可以是操作可靠，而且更加经济。

## 4 结论

在同塔双回输电线路中，当一回线路正常运行另一回线路检修时，由于两回线路间的电磁耦合和静电耦合作用会在检修线路上感应出电流和电压。在很多情况下这些感应出的电流和电压将高于接地开关的国家标准。我们可以用在接地开关与大地之间加电抗的方法来限制电磁感应电流，并且效果明显。可以用接地开关与大地之间接电阻的方法来限制静电感应电流。通过对接地开关合理的操作可以提高接地开关的可靠性和安全性。

## 【参考文献】

- [1] 钟振蛟. 接地开关的选用, 沈阳开关厂 (110025), 高压电器, 1992 年 (01).
- [2] 钟振蛟. 高压交流隔离开关和接地开关的选用 [J]. 北极星电力技术网, 2009 (07).
- [3] 陈少静, 王金辉. 接地开关开合静电感应电流实验工况分析 [D]. 机械工业高电压电器产品质量检测中心, 中国电机工程学会高电压专业委员会, 2004.
- [4] 韩彦华, 齐卫东, 张鹏, 薛军, 解秀余. 750kV 输变电工程中中性点小电抗和接地开关的选择 [J]. 陕西省电力公司, 陕西, 西安, 2008.
- [5] 郭贤珊, 李虎. 交流高压接地开关开合感应电流的问题 [J]. 华中电网有限公司, 湖北, 武汉, 2006 (04).