

500 kV 断路器切空线引发的设备故障分析

高压断路器切除空载线路操作是一个非常复杂的电磁暂态过程，断路器重击穿可能产生很高的操作过电压，威胁设备绝缘，并对设备绝缘耐受水平提出了较高要求，若绝缘配合不当可能引发设备故障。结合某地区 500 kV 电网，在近几年切空线操作中相继发生的多起 500 kV 断路器设备绝缘故障案例，通过提取案例故障录波等特征信息，并结合仿真计算、设备诊断试验及设备绝缘设计等方面的数据，对切除空载线路操作期间引发回路断路器均压电容故障原因进行了分析。

安昌萍² 文春雷¹ 唐世宇² 何宁³ 肖波¹ 张亚扶¹ 龙英凯^{2/1}. 国网重庆市电力公司市区供电分公司 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院 3. 国网重庆市电力公司

0 引言

断路器切空线期间，由于空载线路属容性负载，存储了与电弧熄灭瞬间电压值有关的电场能量，其电压保持为电弧熄灭瞬间电压值，并缓慢振荡衰减，电源侧电压与系统电压一致，断路器断口电压即恢复电压为线路侧和电源侧电压之差。在分断过程中，若断路器灭弧室断口介质绝缘强度低于恢复电压，断口间隙发生电弧重击穿，进而发生能量交换和电流、电压振荡，在线路上产生过电压，过电压最高可达 $3U$ ，可能会危及相关设备的绝缘性能^[1]。

但是，断路器切空线期间的电磁暂态过程很复杂，受断路器开断性能、电网结构及运行方式、设备选型、保护配置和运行环境等因素的影响^[2]。本文针对电网运行中切空线引发断路器均压电容故障案例，结合故障录波、仿真计算和诊断试验等信息，对切除空载线路操作期间引发回路断路器均

压电容故障原因进行了分析。

1 故障案例

自 2005 年以来，某地区电网在 500 kV 断路器切除空载线路操作期间共发生四起断路器并联均压电容故障。

2005 年以前，500 kV 乙变电站通过甲乙一、二线与 500 kV 甲变电站相连，2007 年末新增 500 kV 丙变电站，通过乙丙一、二线与 500 kV 乙变电站相连。网架结构如图 1 所示。

1.1 案例 1

2005 年 1 月 24 日 7:46，乙变电站 500 kV 甲乙一线 5052[#]、5053[#]断路器转备用，8:01 甲变电站断开 5022[#]断路器；8:04 甲变电站操作断开 5021[#]断路器时，乙变电站 5053[#]断路器 C 相线路侧均压电容发生爆炸。均压电容从断路器掉落地上，两端法兰盘由于巨大的爆炸能量喷离事故现场，掉落地面的均压电容外表面有明显闪络痕迹。

1.2 案例 2

2005 年 4 月 18 日 7:50，乙变电站 500 kV 甲乙一线 5052[#]、5053[#]断路器转备用后甲站将 5022[#]断路器转备用，甲变电站在拉开 5021[#]断路器操作时，甲变电站 5021[#]断路器 B 相靠母线侧均压电容出现火花。检查发现该均压电容两端有放电烧伤痕迹，开关机械特性、均压电容的电容量及介质损耗值处于正常范围。

1.3 案例 3

2008 年 3 月 10 日 8:24，500 kV 丙站 5012[#]、5013[#]断路器运行转备用，乙站 5032[#]断路器已断开，8:39 在操作断开 5033[#]断路器时，5033[#]断路器 C



安昌萍/高级工程师

关键词/Keywords

断路器 ·
空载线路 ·
操作过电压 ·
设备故障 ·

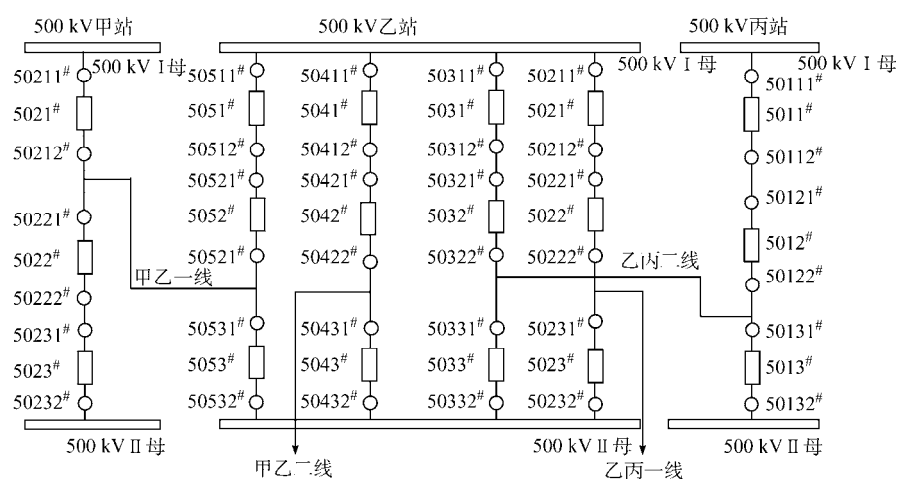


图 1 500 kV 电网结构图

相上部两侧均压电容器瓷套表面有强烈电弧放电现象, 伴有巨大放电声, 持续时间约 2 s。

1.4 案例 4

2012 年 3 月 29 日 9:37, 500 kV 丙站 5012[#]、5013[#]断路器运行转备用, 500 kV 乙站 5032[#]断路器运行转备用, 在拉开 500 kV 5033[#]断路器过程中, 5032[#]断路器 A 相靠 5031 侧均压电容 A 相断口外绝缘闪络。检查发现该均压环上部和靠 5031[#]断路器侧断口均压电容靠三联箱一侧均有放电灼伤痕迹, 均压电容表面有放电痕迹。

2 故障相关信息

2.1 设备参数

四起操作时段当地天气均为阴天, 空气湿度较大。涉及操作的断路器为支柱式双断口, 在 2005 年 7 月前投运。均压电容为国外某公司生产。500 kV 甲乙一线线路长度为 89.6 km, 乙丙二线 51.9 km, 线路空载电流约为 73.5 A、42.5 A。

2.2 断路器操作顺序

四起故障均发生在切除线路两侧最后一个断路器时, 引起断路器并联均压电容器故障, 其中 3 次导致操作断路器本侧相关回路断路器均压电容故障, 1 次导致线路对侧变电站该线路回路断路器均压电容故障。

2.3 故障录波信息

操作过程中, 被切除线路电压峰值最高约为额定电压的 1.5 倍, 线路电压、系统母线及其出线均为规则的工频波形, 无谐波电流、电压信号。

故障录波图显示, 从断路器触头分离到均压

电容外绝缘连通瞬间(起弧)的时间差, 案例 1 为 20 ms, 案例 2 为 25 ms, 案例 3 为 28 ms, 案例 4 为 50 ms。

断路器均压电容外绝缘燃弧时间, 案例 1 为 200 ms, 案例 2 为 1 6250 ms, 案例 3 为 2 257 ms, 案例 4 为 462 ms。

2.4 诊断试验

对案例 4 取下的并联均压电容进行工频耐压试验。当电压升到 368 kV (均压电容工频耐压 460 kV) 时, 500 kV 乙变电站 5032[#]断路器靠 5031[#]侧断口 A 相均压电容的紧固法兰处发生强烈放电(强烈的辉光), 此时电压电流均稳定, 1 min 耐压结束后, 降压至 300 kV 时, 放电仍然明显, 再降压至 256 kV 时放电减弱(辉光消失, 但仍有放电声)。

5033[#]断路器 C 相断口并联两只均压电容工频耐压试验基本相似, 电压升至 275 kV 时出现辉光放电, 电压升到 368 kV 时, 目测弧长 6~8 cm。

对断路器并联均压电容瓷套外绝缘盐密实测为 0.145 mg/cm², 属 d 级污区^[3]。

3 电磁暂态仿真计算

针对案例 4, 采用仿真软件 PSCAD 对切空线期间过电压进行仿真模拟计算。用频率相关参数模型对乙丙二线进行建模, 仿真建模按变电站实际运行方式进行模拟, 500 kV 侧电压设置为故障时运行电压 523 kV, 额定相电压峰值 427 kV; 主变按实测参数建模; 被操作线路空载运行, 并按实际物理参数建模, 其余 500 kV 相

关线路按实测的集中参数建模，线路末端以等值电源代替；220 kV 相关网络以负荷代替。整个仿真系统潮流按当时运行情况调整^[4-5]，仿真模型图如图 2 所示。

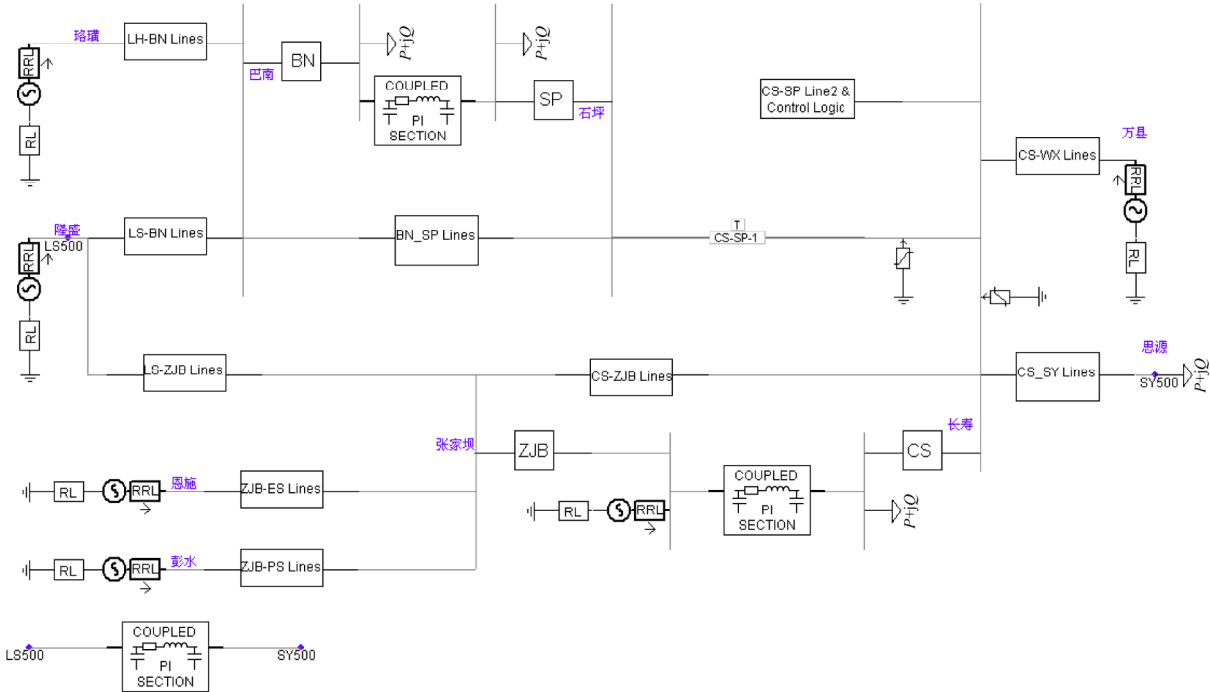


图 2 过电压仿真模型图

为了便于分析过电压产生的具体原因，对 500 kV 乙变电站 5033#断路器按电弧重燃、不重燃，三相同期和不同期分断过程分别进行仿真，分析在对应情况下 5032#断路器断口过电压情况，计算结果如下。

3.1 断路器同期分断且无重燃

5032# 断路器断口电压峰值最高可达 913 kV，约为系统额定相电压的 2.14 倍；分断 500 ms 后相断口电压峰值最高可达 587 kV。

3.2 断路器不同期分断且无重燃

5032# 断路器相断口电压峰值最高可达 1 028 kV，约为系统额定电压的 2.41 倍；分断 500 ms 后断口电压峰值最高可达 575 kV，如图 3 所示。

3.3 断路器同期分断且重燃

5032#断路器断口电压峰值最高可达 1 232 kV，约为系统额定电压的 2.89 倍；分断 500 ms 后断口电压峰值最高可达 635 kV。假设 A 相断路器在电压正峰值时分闸，并设 A 相断路器在滞后初始分闸时刻 1/2 周波发生重燃，仿真波形如图 4 所示。

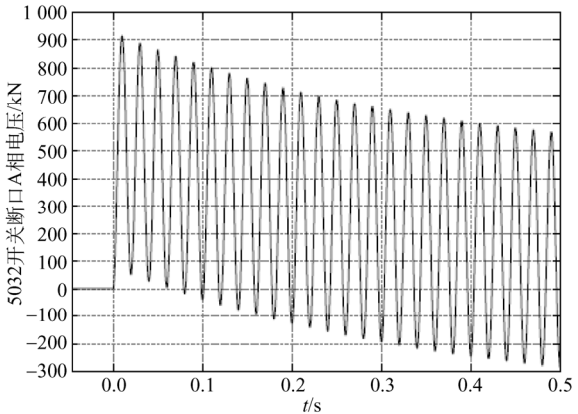


图 3 同期分断且无重燃情况下 5032#断口 A 相电压

3.4 断路器不同期分断重燃

5033#断路器断口电压峰值最高可达 1 229 kV，约为系统额定电压的 2.88 倍；分断 500 ms 后断口电压峰值最高可达 633 kV。

另外，经仿真分析，切除空载线路时，系统阻抗的变化（即电网运行方式或网架结构的改变）、系统电压水平的不同对过电压的影响均较小。

4 故障原因分析

500 kV 空载线路投切时产生的过电压是电

力系统绝缘配合设计中必须考虑的一个重要因素。在切除空载线路过程中,线路两侧变电站断路器断口承受的电压是对称的,导致线路的电源侧或对侧变电站相关设备故障的发生均有可能。

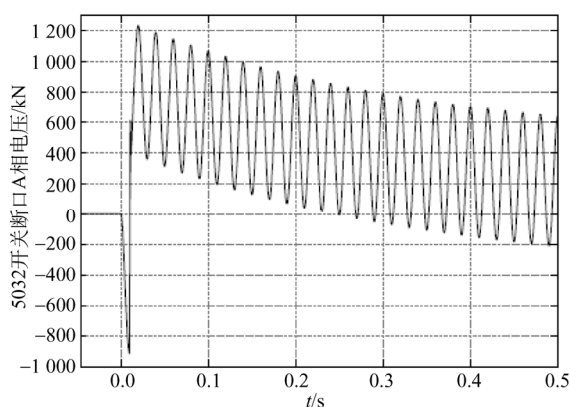


图4 同期分断且重燃情况下5032[#]断口A相电压

在断路器操作过程中引发设备绝缘故障的原因有两种可能:①系统结构或电容、电感参数相比变电站设计时发生改变,切除空载长线时引起谐振过电压,或者是断路器发生重燃,在线路、断路器断口上产生了很高的操作过电压,超过设备绝缘耐受能力;②在断路器开断过程中,由于断路器断口承受系统工频电压与线路电压叠加形成的电压升高,但由于断路器本体或并联均压电容设计标准、质量等原因瓷套表面不能承受断口电压而发生绝缘故障。

第三、四起案例发生时电网结构与第一、二次差异很大,但根据故障录波中电压、电流波形,以及对系统参数分析计算后,排除了切除空载线路后系统参数变化引发谐振,发生谐振过电压的可能^[6]。

4.1 开断过程产生过电压超过设备耐受水平

本文涉及案例线路长度较短,线路投运前的空载投切试验中没有操作过电压超标的记录。断路器动静触头分离后,案例中均压电容起弧时间均大于20 ms(1个工频周波),对比500 kV断路器分断特性,该时刻断路器分断过程基本完成,因SF₆气体绝缘强度很高,断路器分断完成后,断口间的电场分布比较均匀,此后在断口发生重燃的可能性比较小;其次是灭弧室断口要维持时间200 ms以上的电弧几乎不可能,断路器内部元件包括触头必定会遭到损坏,接触电阻等

试验值与出厂值间会有较大的偏差。

该产品研发单位做过投切空线试验,该产品在国内外有不少的使用业绩,未曾有过投切空线发生重燃的现象。

各次案例中故障录波装置均没有捕获到重击穿电流的记录;鉴于断路器灭弧室内绝缘故障为不可自恢复故障,SF₆气体成份分析合格,排除了断路器本体灭弧室内绝缘击穿的可能。由此基本可以排除断路器开断过程中由于断路器重燃产生过高操作过电压导致设备故障。由此可以判断仿真分析中非同期无重燃状态比较符合实际状况。

4.2 断路器或均压电容外绝缘强度设计偏低

在断路器分断过程中均压电容承受的电压与断路器断口电压相同,即恢复电压。仿真计算表明,在三相分闸不同期且不发生重燃的情况下,断口恢复电压峰值最高可达1028 kV。仅需进一步分析断路器或均压电容外绝缘强度。

4.2.1 断路器外绝缘耐受水平

四项案例涉及断路器设备设计的本体断口工频耐受电压(860/519+479) kV,操作冲击耐受电压(1 175/1 050+450) kV;均压电容工频耐受电压2×460 kV,操作冲击耐受电压2×695 kV。满足DL/T 593—2000《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》规定500 kV断路器断口工频耐压水平790 kV,操作冲击耐受电压(1175+450) kV的要求^[7]。

但是该标准现行版本DL/T 593—2006《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》^[7]规定550 kV断路器断口工频耐受电压提高到740(+220/315) kV,操作冲击耐受电压仍为(1 175+450) kV,当前国家电网公司设备采购技术规范对550 kV瓷柱式交流断路器断口工频耐压的标准为(740+315) kV,操作冲击耐受电压仍为(1175+450) kV。显然,案例涉及断路器本体断口依然满足现行标准要求,但并联均压电容的工频耐受电压水平已经低于现行标准的要求。

4.2.2 断路器外绝缘爬电距离

上述案例涉及均压电容爬电距离实测1 480 cm,爬电比距26.9 mm/kV,高于GB/T 5582—1993《高压电力设备外绝缘污秽等级》外绝缘污秽等级III级电站设备公称爬电比距不低

于 25 mm/kV 的规定, 预留裕度系数 1.076。但现场实测并联均压电容瓷套的干弧距离、爬电距离均明显小于断路器灭弧室瓷套的干弧距离、爬电距离。

该公司 500 kV 断路器产品收集的数据表明, 2006 年 6 月以前出厂的单只均压电容器瓷套干弧距离 2 000 mm, 爬电距离 7 402 mm, 而 2006 年 6 月后出厂的电容器瓷套干弧距离不变, 爬电距离提高至 9 064 mm, 爬电比距 32.9 mm/kV, 裕度系数 1.318, 高于 DL/T 593—2006《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》“对于处于反相条件下和热备用状态下的开关装置, 其断口需要更长的爬电距离, 此时推荐的应用系数 1.15”的标准。

从断路器外绝缘配置分析表明 2006 年 6 月前出厂的断路器均压电容瓷套爬距明显小于灭弧室瓷套爬距, 均压电容成为绝缘耐受的薄弱点。且均压电容工频耐受水平 2×460 kV 低于现行标准 (740+315) kV 的规定。在空气湿度大、III 级污秽的情况下, 均压电容瓷套表面可能先出现局部放电, 几个周波的时间后发生沿面闪络, 电弧在电流过零时熄灭。由于均压电容沿面闪络形成放电通道后, 固体绝缘没有自恢复特性, 瓷套表面可能再次闪络, 形成了反复重燃, 持续时间超过 200 ms 以上。

由此可以得出, 造成上述四项案例的原因在于早期该型断路器并联均压电容外绝缘强度配置偏低, 不能承受断路器分断过程断口上的恢复电压, 发生瓷套沿面闪络。

5 结束语

1) 切除空载线路过程中, 断路器断口与均压电容承受的电压为系统工频电压与线路电压的叠加, 受非同期分断的影响, 断路器不重燃情况下断口电压最高可达 2.4 倍相电压, 远低于 DL/T 593—2006《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》断口工频耐压 3.32 倍的规定 (740+315) kV。本文案例涉及断路器系某公司 2006 年以前产品, 采用早期 DL/T 593—1996《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》标准, 造成断路器均压电容外绝缘水平配置偏低, 在空气潮湿情况下, 均压电容瓷套表面不能承受

断路器切除空载线路期间在断口上形成的恢复电压, 发生沿面闪络。

2) 对运行中某断路器早期产品的均压电容器进行更换, 在更换前, 尽量不安排同型号断路器的线路操作, 如有线路停电操作时, 拉开线路一侧断路器后, 先断开断路器两侧隔离开关, 将该断路器转停用后, 以形成较大的空气间隙, 再轮流将线路另一侧断路器和隔离开关转停用, 减少过电压等情况导致设备绝缘故障几率。

3) 500 kV 断路器的选型应执行 DL/T 593—2006《高压开关设备和控制设备标准的公用技术要求》, 对工频耐压断口采用 (740+315) kV, 操作冲击耐受电压采用 (1175+450) kV 的水平。断路器断口及均压电容外绝缘爬电距离应根据污秽等级适当提高标准, 确保应用系数超过 1.15 倍, 即爬电距离应超过 20 625 mm。

参考文献

- [1] 陈维贤. 电网过电压教程[M]. 武汉: 武汉水利电力大学, 2011.
- [2] 蔡汉生, 聂定珍, 王淳, 等. 220 kV 空载长线分闸过电压计算和分析[J]. 1996, 22 (4): 54-57.
- [3] GB/T 5582—1993 高压电力设备外绝缘污秽等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [4] 郭志红, 逯怀东, 王保利, 等. 500 kV 断路器并联电容外绝缘击穿几率的分析[J]. 高电压技术, 2009, 35 (10): 2383-2389.
- [5] 周莉, 董雪芳, 文习山, 等. 断路器均压电容爆炸原因的仿真分析与研究[J]. 高电压技术, 2005, 31 (9): 34-37.
- [6] 李兴斌, 陈新. 断路器均压电容引起的铁磁谐振分析[J]. 东北电力技术, 1994 (9): 39-43.
- [7] DL/T 593—2006 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

作者简介

安昌萍 (1973-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为从事高电压技术、高压开关设备运检技术管理。
文春雷 (1974-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事高电压技术研究。

(收稿日期: 2015-12-10) EA

(编辑: 杨帆)