

10 kV 短路限流装置人工短路试验研究与实践

介绍了 10 kV 短路限流装置的工作原理，为考核短路限流装置动作性能的有效性，研究在 110 kV 上桥变电站进行人工短路试验的技术方案。分析了基于对电网和设备安全运行的影响因素，制定技术措施及继电保护措施，提出了适于设备运行现场的人工短路设置方式，试验接线方式及测点布置，并计算了人工短路期间短路电流变化范围。根据确定的试验方案在变电站现场实施了人工短路试验，根据短路电流录波，分析了人工短路期间短路电流变化规律，验证了 10 kV 短路限流装置动作的可靠性。

文春雷¹ 安昌萍² 唐世宇² 肖波¹ 张亚扶¹ 周刚^{1/1} 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

0 引言

随着电网规模的不断扩大，系统短路电流水平也越来越接近或超过断路器的遮断容量，严重威胁到电网和运行设备的安全^[1-2]。电力系统主变压器 10 kV 侧短路电流随电网建设逐年增大，而通常 10 kV 母线没有配置母线差动保护，采用主变压器带时限过电流保护方式，在 2 s 内切除故障，对主变压器抗短路能力具有极大挑战，由此造成的变压器绕组变形移位乃至损毁的事故全国各地均有案例。为降低对主变压器电动力冲击，研制了一套限制 110 kV 主变压器 10 kV 侧短路电流限流装置，于 2013 年 6 月安装在 110 kV 上桥站 2#主变压器 10 kV 侧套管出线与 10 kV 总路 902#开关柜之间。为验证限流装置的可靠性和有效性，在 10 kV 母线侧进行人工短路试验。短路试验对电网和设备安全运行有一定的风险，需要安排特殊的运

行方式及保护配合方式，设置合理的短路故障点及短路参数的测试，将短路电流值调整到适当的范围，达到既能考核限流装置的目的，同时对电网的影响降低到最小。

1 限流装置的工作原理

限流装置的原理如图 1 所示。图 1 中，ZK-A、ZK-B 和 ZK-C 为 3 个单相换流器，采用快速涡流驱动技术的真空断路器，由涡流盘推动动触头完成分合操作，分闸时间可以控制在 5 ms 以内；LR-A、LR-B 和 LR-C 为 3 个单相限流电抗器；KC-A、KC-B 和 KC-C 为 3 个分相控制器。正常运行时，换流器为合闸状态，限流电抗器处于短路状态，不产生损耗。外部发生短路故障后，分相控制器对故障电流进行计算分析后向换流器发出跳闸指令，限流装置在故障发生后 20 ms 内换流器跳闸完成，限流电抗器随即投入短路回路实现限流功能^[4]。

2 人工短路试验影响因素

人工短路试验电网运行方式的安排，以及短路点的选取首要考虑以下因素。

- 1) 不影响 110 kV 母线及 1#主变压器、10 kV 1#母线及出线设备的正常运行。
 - 2) 保证 10 kV 侧送出负荷的供电可靠性。
 - 3) 短路电流产生的电动力冲击对主变压器不造成损伤。
- 为此，确定人工短路试验涉及的变电设备仅为 110 kV 2#主变压器、10 kV



文春雷/高级工程师

关键词/Keywords

短路限流装置 ·
短路电流计算 ·
人工短路试验 ·
限流深度 ·

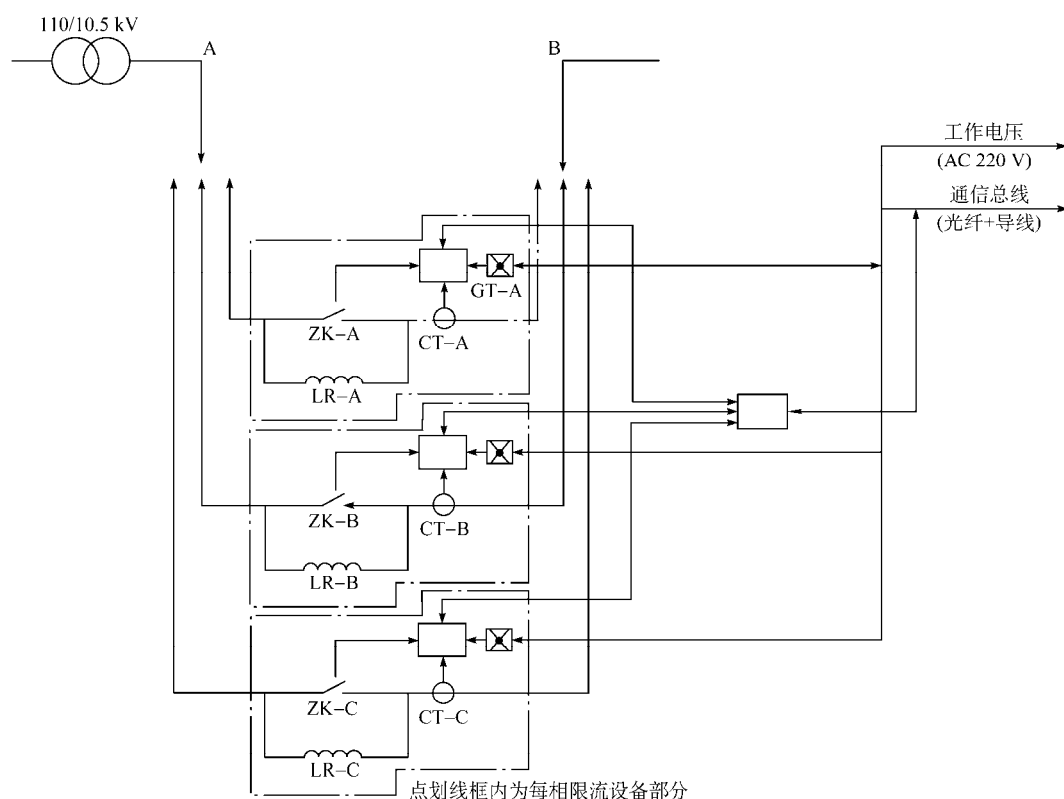


图1 短路限流装置工作原理图

2#母线，采取的技术措施包括：10 kV 两段母线分段运行，试验前将 10 kV 2#母线送出负荷切换至 10 kV 1#母线；在短路回路串接适当的电抗，降低短路电流对主变压器的冲击，适当调低限流装置的动作电流值。

保护措施包括：为将人工短路的影响限制在 110 kV 2#主变压器 10 kV 侧，调整原继电保护定值，将 902#断路器两段复合电压闭锁过电流保护动作时间从 2 s 缩短为 0.3 s；在 902#断路器跳闸回路设置紧急跳闸控制开关，用于短路回路主保护断路器拒动的后备跳闸；在一次回路三相短路接地前分别串入三相熔断器，人工短路试验时靠熔断器本身的物理特性动作，作为切除短路点的最后一道可靠的措施。

3 试验接线及测试点布置

3.1 短路故障设置

结合 110 kV 上桥变电站 10 kV 变电设备布局，短路点设置在连接在 10 kV 2#母线上的 3#、4#电容器组室内空地，将 10 kV 3#电容组中的

串联电抗器进线端与 4#电容器组回路 9443#隔离开关三相间连接母排拆除，将 10 kV 3#、4#电容组中的串联电抗器出线端与电容器之间的连接三相母排拆出，用 10 kV 等级 180 mm² 绝缘导线将两串联电抗器进出线端同相间分别并联，再将出线端并接线分别经熔断器短接入地。

熔断器的熔体额定电流按躲过 10 kV 短路限流装置投入时间选取，根据最大运行方式下短路电流计算值及熔断器安秒特性，选择熔断器额定电压为 10 kV，熔体额定电流为 50 A。

3.2 试验接线

试验时的系统接线方式如图 2 所示。将 10 kV 4#电容器回路 944#断路器作为人工短路试验控制开关，并将定时限过电流保护时限由 0.3 s 调整为 0.1 s，缩短短路切除时间。

3.3 测试布置

在 2#主变压器 10 kV 侧出口避雷器处临时装设一组（3 只）0.5 级电压互感器，将该电压互感器、110 kV 母线 PT、10 kV 2#母线 1928#PT 二次信号接入暂态分析仪 Synergy（16 个通道，

采样率为 2 MS/s, 每通道最多有 16 MS 的 RAM, 可采集 8 s 的瞬态数据) 数据分析仪的 CH1~CH9 端子; 902[#]、944[#]回路 CT 二次信号用屏蔽电缆

接入暂态分析仪 Synergy 数据分析仪的 CH10~CH15 端子；944#开关起动跳闸时间接点接入 CH16 端子。

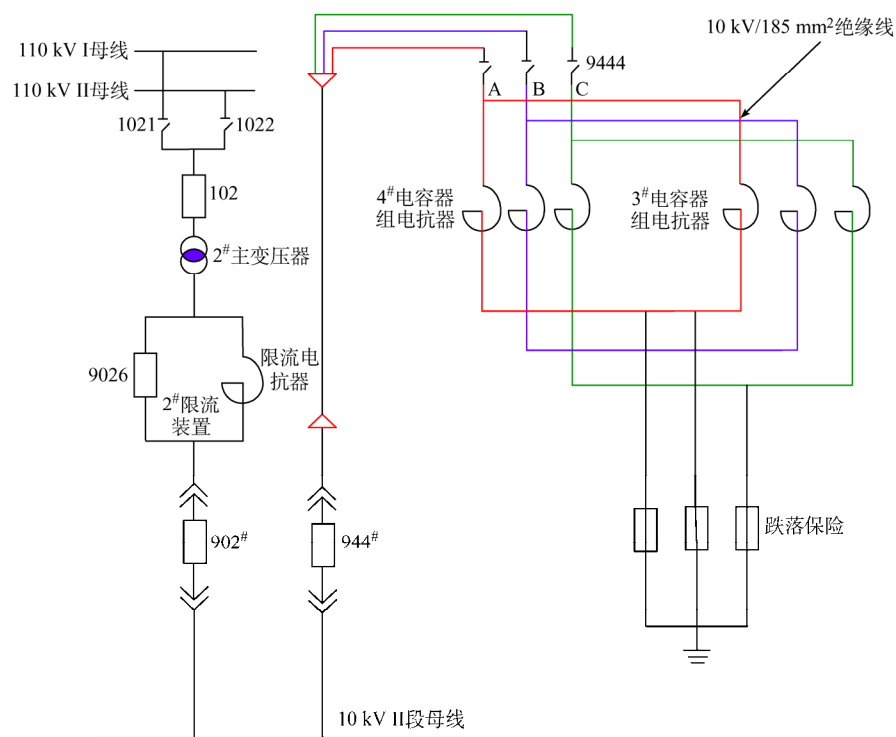


图 2 人工短路系统接线图

4 短路电流计算

110 kV 上桥变电站 110 kV 为单母线接线, 10 kV 两段母线分段运行。采用调度部门提供的 2014 年度 110 kV 母线最大、最小运行方式下短路容量分别为 $2231 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 、 $769 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 2[#]主变压器容量为 $63 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 电压比为 110/10.5 kV, 阻抗电压降为 10.23%; 限流电抗器有名值为

0.211 4 Ω 。按标准短路容量 100 MV $\cdot$ A 计算出 10 kV 2[#]母线在短路限流装置动作前后的稳态短路电流标幺值及有名值,如表 1 所示。

10 kV 3[#]、4[#]电容组回路串联电抗器并联后电抗值为 0.4364Ω ，串入短路回路后，计算10 kV 2[#]母线在短路限流装置动作前后的稳态短路电流标幺值及有名值，如表2所示。

表 1 10 kV 母线短路电流计算

运行方式	限流装置状态	系统标么值	主变压器阻抗标么值	限流电抗器阻抗标么值	合成阻抗标么值	10 kV 母线短路电流有名值 / kA
最大	动作前	0.044 82	0.162 38	/	0.207 2	26.54
最大	动作后	0.044 82	0.162 38	0.191 75	0.398 95	13.78
最小	动作前	0.130 1	0.162 38	/	0.292 48	18.80
最小	动作后	0.130 1	0.162 38	0.191 75	0.484 23	11.36

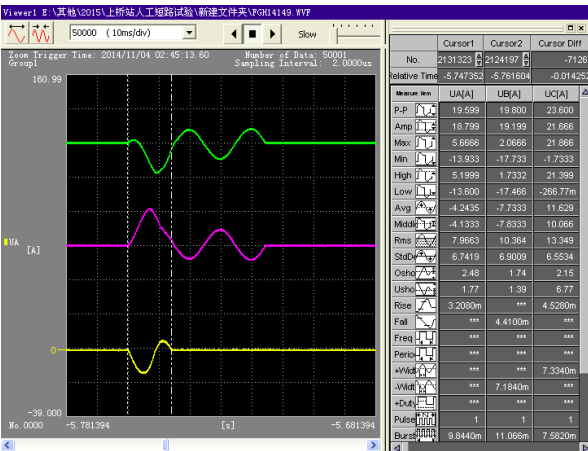
表 2 短路回路串联电抗器后 10 kV 2# 母线短路电流值

运行方式	限流装置状态	系统标么值	主变压器标么值	限流电抗器标么值	串联电抗器标么值	合成标么值	10 kV 母线短路电流有名值/kA
最大	动作前	0.044 82	0.162 38	/	0.395 83	0.602 3	9.13
最大	动作后	0.044 82	0.162 38	0.191 75	0.395 83	0.794 8	6.92
最小	动作前	0.13 01	0.162 38	/	0.395 83	0.688 4	7.99
最小	动作后	0.13 01	0.162 38	0.191 75	0.395 83	0.880 1	6.25

5 现场人工短路试验与分析

5.1 短路试验

短路试验时间为 2014 年 11 月 4 日凌晨 2 时 45 分 13 秒。接到短路试验命令后，变电运行人员合上 944# 断路器将 10 kV 2# 母线三相短路接地。测录到的短路回路电流暂态录波如图 3 所示。从图 3 中可以看出，14.3 ms 后 A 相熔断器熔断并熄弧，三相短路转化为 A 相开路，B、C 两相短路，44.5 ms 后 944# 断路器跳闸，短路切除。A 相熔断器提前熔断的原因在于熔体动作分散性影响。



注：黄、绿、红色曲线分别对应 A、B、C 三相电流，以下相同。

图 3 短路试验电流录波图

5.2 短路电流分析

由图 3 可以看出，短路过程可以分为 3 个阶段，即三相对称短路、限流电抗器投入和两相短路阶段。

5.2.1 三相对称短路阶段

A、B、C 三相电流首半波峰值分别为 13.933、-17.733 和 21.866，含有明显的非周期分量，CT 电流比为 400 0/5，折算到一次侧的峰值分别为

11.146 kA、14.186 kA 和 17.483 kA。计算短路电流周期分量有效值，与冲击系数的选取有直接关系，而冲击系数又受与短路初相角的制约。以 C 相为例，取冲击系数最大值 1.8 时折算到一次侧周期分量有效值 6.871 kA，取冲击系数为 1.5 时折算到一次侧的周期分量有效值为 8.242 kA。

由于人工短路是在 2014 年 11 月 4 日凌晨 2 时 45 分进行的，这个时段负荷恰好属于低谷阶段，上桥变电站 110 kV 的运行状态应当是接近最小运行方式。对比表 2 中的短路电流计算结果，限流装置动作后短路电流由 7.99 kA 限到 6.25 kA，这与试验数据相当吻合。

5.2.2 限流电抗器投入阶段

限流装置启动及 9026# 快速开关跳闸，约 10.3 ms 后三相短路电流波形发生畸变，如图 4 所示，短路电流急速下降，表明限流电抗器投入短路回路开始限流。

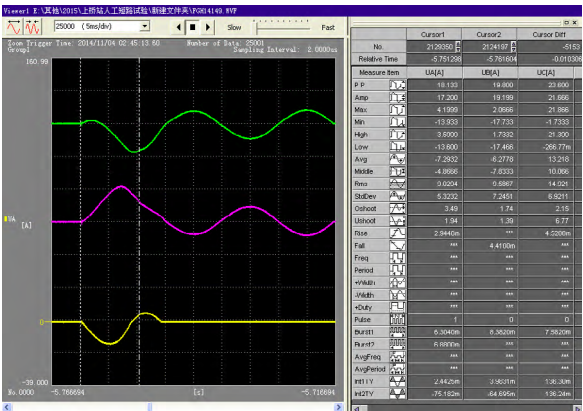


图 4 限流前后短路电流

5.2.3 两相短路阶段

由于串入短路回路的 A 相跌落保险熔断并熄弧，A 相回路处于开断状态，三相对称短路转化为 B、C 两相短路状态，短路电流峰值分别为 9.733 kA 和 9.666 kA，折算到一次侧的峰值分别

为 7.786 和 7.733 kA。以 C 相为例，忽略非周期分量，计算出周期分量有效值为 5.468 kA，将两相短路电流值折算为三相对称短路电流，约为 6.314 kA。

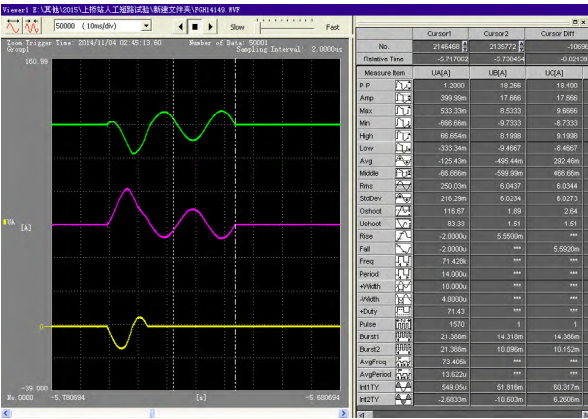


图 5 限流后短路电流

5.2.4 短路电流验算

根据短路切除前短路电流为 6.314 kA，计算限流电抗器投运前后合成的短路阻抗标么值，以及限流电抗器投入前的母线短路电流，如表 3 所示。

表 3 人工短路试验 10 kV 母线短路电流值

限流装置状态	系统阻抗标么值	限流电抗器阻抗标么值	合成阻抗标么值	10 kV 母线短路电流有名值 / kA
动作后	0.031 84	/	0.870 86	6.314
动作前	0.031 84	0.191 75	0.679 1	8.097

由限流装置动作前的三相短路电流为 8.097 kA，根据录波图显示 C 相电流峰值为 17.483 kA，可推算出冲击系数为 1.526 8，这与 5.2.1 节的分析结论是一致的。

由表 3 给出的限流装置动作前后的短路电流可以计算出限流电抗器对短路电流的限流深度，即

$$K = (1 - I_{k1}/I_k) \times 100\% = (1 - 6.314/8.097) \times 100\% = 22.02\%$$

6 结束语

结合 110 kV 上桥变电站运行实际情况，研究并制定了在 10 kV 母线进行人工短路试验考

核限流电抗器应用效果的试验方案，并按试验方案成功实施了人工短路试验，结论如下。

1) 人工短路试验需综合考虑电网供电可靠性、保护配置、短路电流及对主变压器的冲击等因素，合理布置短路故障点，控制短路回路电流大小，选择非常规的保护方式，既能验证限流装置的效果，又能够将对系统的影响减低到最小。

2) 人工短路试验中限流装置在短路发生后 10.3 ms 内投入限流电抗器，将短路电流从 8.097 kA 限制到 6.314 kA，验证了限流装置动作准确性和可靠性。

3) 所研制的 10 kV 短路电流限制装置具有结构简单、快速投入和无损耗特点，可有效防止变压器近区短路导致的损坏事故，具有很好的推广价值。

参考文献

[1] 孙树敏, 刘洪顺, 李庆民, 等. 电力系统故障限流器研究综述[J]. 电网技术, 2008, 32 (21): 75-79.

[2] 江道灼, 敖志香, 卢旭日, 等. 短路限流技术的研究与发展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (3): 8-19.

[3] 黄永宁, 艾绍贵, 李延军, 等. 快速真空断路器在限流技术中的应用[J]. 宁夏电力, 2014, (6): 18-23.

[4] 安昌萍, 文春雷, 唐世宇, 等. 10 kV 开关型无损耗故障限流装置的研制及试运行[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2013, 18 (6): 34-38.

[5] 陶荣明, 冯煜尧, 傅晨钊, 等. 超高压电网故障电流限制器人工短路试验的分析研究[J]. 华东电力, 2011, 39 (1): 60-65.

[6] 艾绍贵, 高峰, 黄永宁, 等. 330 kV 开关型零损耗故障限流装置的研制及人工短路试验[J]. 智能电网, 2015 (4): 15-18.

作者简介

文春雷 (1974-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高电压技术及变电设备技术管理。

(收稿日期: 2015-12-10) EA
(编辑: 崔岩)