

一起 3/2 接线方式敞开式隔离开关发热故障分析

王来源,雷昌成

(国网宁夏电力有限公司超高压公司,宁夏 银川 750011)

摘要:文中主要针对一起 3/2 接线方式隔离开关接触不良引起保护装置异常事件,从 3/2 接线方式等值电路、电流分配、接触电阻增大和线路负载变化所引起接触点温升特性等方面进行分析,并与双母线接线方式中隔离开关接触不良引起温升特性进行对比,得出 3/2 接线方式中隔离开关接触不良所引起接触点温升特性与负荷变化、标准回路电阻变化的对应关系和差异。

关键词:隔离开关;3/2 接线;接触电阻;温升极限

中图分类号:TM 564.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)01-0090-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230117

Heating Fault Analysis of Open-type Isolation Switch under 3/2 Connection Mode

WANG Laiyuan, LEI Changcheng

(Ultra-high Voltage Company of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd.,
Yichuan 750011, Ningxia, China)

Abstract: Aiming at an abnormal event of protection device caused by poor contact of isolation switch under 3/2 connection mode, the characteristics of contact temperature rise caused by the equal circuit under 3/2 connection mode, current distribution, the increase of contact resistance and line load are analyzed. The characteristics are compared with that of temperature rise caused by poor contact of isolation switch under double bus connection mode. The relationship and differences between contact temperature rise caused by poor contact of isolation switch and the change of load and preferred circuit resistance under 3/2 connection mode are obtained.

Key words: isolation switch; 3/2 connection; contact resistance; temperature rise limit

0 引言

隔离开关是电力设备在无载流情况下进行运行方式切换和对被检修电气设备与带电设备实施电气隔离的电器,是电力系统输变电系统必不可少的设备。运行于户外的敞开式隔离开关由于运行条件不佳,容易在机械或电气方面产生故障^[1]。常见电气故障为触头烧蚀、接触松动、接触表面污染等问题引起隔离开关接触区域发热或电网设备断流现象,严重时可能使电气设备发生损毁或保护装置异常等故障^[2]。

下面,以某 330 kV 变电站 3/2 接线方式隔离开关接触不良引起保护装置异常为例,对 3/2 接线方式中隔离开关接触不良所导致电流异常变化和接触面发热特性进行分析,与双母线接线方式中隔离开

关接触不良所引起的电流变化和隔离开关发热进行对比,分析不同接线方式中隔离开关接触不良所导致的后果。

1 事件经过

1.1 异常前运行方式

某 330 kV 变电站采用 3/2 接线方式,共 6 个完整串。6 个完整串均成串运行,330 kV 第三串 3332 与 3330 断路器带 5 号主变压器运行,3330 与 3331 断路器带 31331 安枣 II 线运行。如图 1 所示。

1.2 异常信号及处置过程

2020 年 11 月 30 日 23:05,某地调监控通知某变电站 330 kV 5 号联络变压器 A、B 柜装置异常,信号长时间未复归。

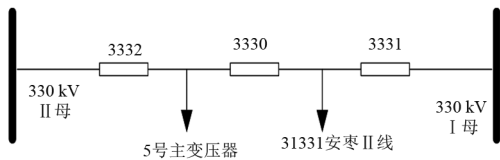


图 1 异常前运行方式

监控后台显示 3330 断路器 A 相电流为 0, B 相电流为 163 A, C 相电流为 153 A; 3332 断路器 A 相电流 533 A, B 相电流为 380 A, C 相电流为 391 A。后台报文显示 5 号主变压器保护柜 I 侧 1 支路电流互感器异常, 5 号主变压器保护柜 I 侧 2 支路电流互感器异常; 5 号主变压器公用测控柜报 5 号主变压器公用测控 A、B 柜装置报警。

现场检查发现 33302 隔离开关 A 相触指未夹紧。将 33302 隔离开关处理使触指夹紧后, 监控后台 3330 断路器 A 相电流恢复为 207 A, 3332 断路器 A 相电流恢复至 387 A, 5 号主变压器保护 A、B 柜装置报警信号复归; 5 号主变压器保护柜 I 侧 1 支路、2 支路电流互感器异常信号复归。

上述 5 号主变压器保护柜 I 侧 1 支路和 2 支路电流互感器异常原因为 33302 隔离开关 A 相接触不良造成 3330 断路器和 3332 断路器三相电流不平衡。因此, 33302 隔离开关 A 相接触不良是此次异常信号的直接原因。

2 隔离开关接触不良分析

2.1 3/2 接线方式电路模型

3/2 接线方式可以简化为两端电压幅值相等、相位相同的两端供电网络。取其中一串一相作单一环网的等值电路, 如图 2^[3] 所示。

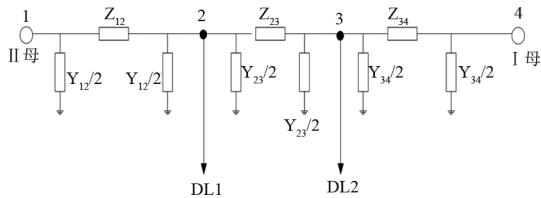


图 2 3/2 接线方式单相单串等值电路

将一完整串各断路器以及所属隔离开关整体合并为一个阻抗单元。由于站内设备长度相比与线路长度可忽略不计, 因此等值电路中导纳值可忽略不计; 由于断路器及隔离开关等设备可近似为短引线, 因此设备的感抗和互感均可忽略不计。最终电路可简化为由各断路器及所属隔离开关回路电阻 R 所

组成的简单电路, 如图 3 所示。

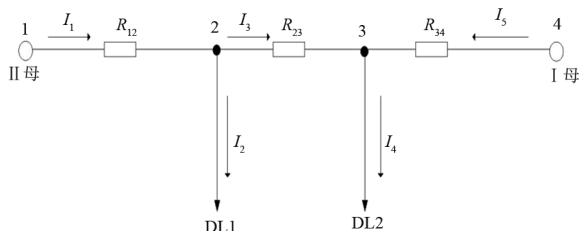


图 3 3/2 接线方式单相单串简化电路

假设从母线注入的电流为 I_1 、 I_5 , 线路负荷为 I_2 、 I_4 , 流经 R_{23} 的电流为 I_3 。由于 330 kV I、II 母环网运行, U_1 与 U_2 电压相等, 依据基尔霍夫电流和电压定律可求得:

$$I_1 = \frac{I_2(R_{23} + R_{34}) + R_{34}I_4}{R_{12} + R_{23} + R_{34}} \quad (1)$$

$$I_3 = \frac{I_4R_{34} - R_{12}I_2}{R_{12} + R_{23} + R_{34}} \quad (2)$$

$$I_5 = \frac{I_4(R_{12} + R_{23}) + R_{12}I_2}{R_{12} + R_{23} + R_{34}} \quad (3)$$

计算结果表明, 成串运行的 3 个断路器之间的电流与回路电阻之间存在分配关系。

2.2 接触电阻变化与电流分配

正常运行中断路器及所属隔离开关整体回路电阻为微欧级的电阻值, 下面假定某个隔离开关接触不良, 其接触电阻按照标准回路阻值的整数倍增长, 分析相关电流变化趋势。

假定两条线路负荷均为 500 A。环境温度为 25 °C, 各断路器及所属隔离开关标准回路电阻为 20 $\mu\Omega$, 330 kV I 母侧断路器的某一侧隔离开关发生接触不良, 接触电阻按照标准回路电阻整数倍增长。根据式(1)~式(3)可得出如图 4 所示电流分配曲线。

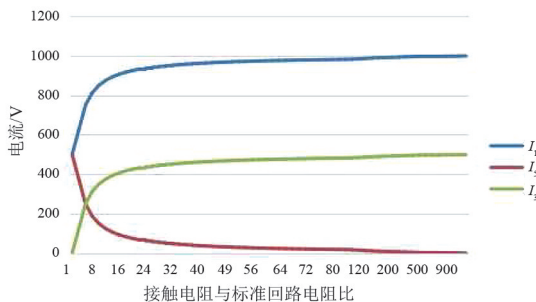


图 4 I 母隔离开关电阻增大时电流分配情况

由图 4 可知, 当隔离开关接触电阻接近标准回路电阻 60 倍左右时, 该隔离开关所在断路器载流量接近于 0。

2.3 接触电阻变化与温升

当隔离开关接触点电阻增大,通入电流后,接触点温度迅速增大。文献[4]给出了电流通过触头时,接触点温升计算公式。

$$\tau_k = \frac{I_k^2 R_k^2}{8LT} \quad (4)$$

式中: τ_k 为接触点温升,K; I_k 为流经触点的电流,A; R_k 为接触点接触电阻, Ω ; L 为系数, $2.4 \times 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2$; T 为触头平均温度,K。

在 3/2 接线方式中,随着某一隔离开关接触电阻增大,根据式(1)一式(3)可得出电阻增大时电流同步减少的趋势,按照第 2.1 节所述假定条件,根据式(4)可得出如图 5 所示温升曲线。

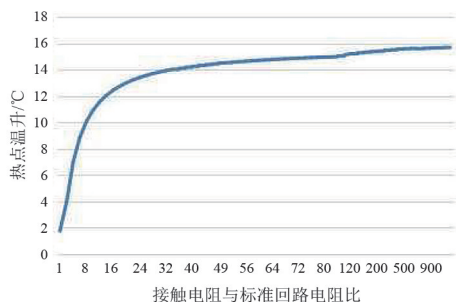


图 5 I 母隔离开关电阻增大时热点温升情况

根据图 5 所示,当隔离开关接触电阻接近标准回路电阻的 60 倍左右时,该隔离开关接触点温升接近于温升上限。

2.4 回路电阻变化与温升

根据式(1)一式(3)可知,在同一完整串中,流过各断路器的电流与各设备单元回路电阻之间存在分配关系。接触电阻增长与该设备单元负载电流减小存在线性关系,该线性关系与接触电阻绝对数值关联性不高,主要与接触电阻和标准回路电阻之间的比值有关。例如:对于 10 000 $\mu\Omega$ 的接触电阻,当正常标准回路电阻为 10 $\mu\Omega$ 时,由图 4 和图 5 可知,该接触电阻所对应的电流曲线和温升曲线已接近平稳极限值;但当标准回路电阻为 1000 $\mu\Omega$ 时,该接触电阻所对应的电流曲线和温升曲线正好处于曲线斜率最大范围内。因此对于相同负载电流情况下的不同标准回路电阻的电气回路,同一接触电阻值所引起的温升效果不同。考虑最不利的情况,假设线路负荷均为流出方向的 500 A,分别以标准回路电阻为 10 $\mu\Omega$ 、20 $\mu\Omega$ 、30 $\mu\Omega$ 、40 $\mu\Omega$ 、50 $\mu\Omega$ 所对

应接地电阻成倍增大的温升情况进行分析,结果如图 6、图 7 所示。

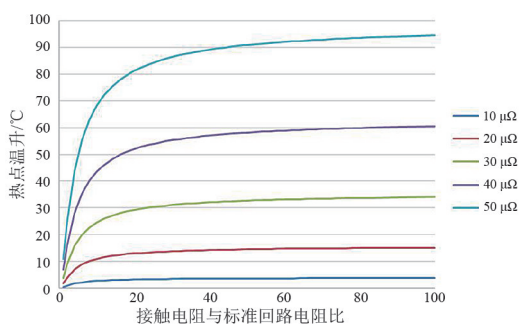


图 6 不同标准回路电阻电气设备热点温升情况

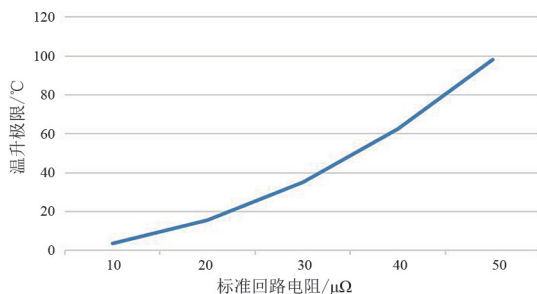


图 7 标准回路电阻成比例增大时的温升极限趋势

根据图 7 所示,当隔离开关标准回路电阻按照线性倍率增长时,因整体设备回路电阻增大所引起接触不良点温升极限呈正向指数增长趋势。

2.5 线路负载变化与温升

在实际应用中,电气设备安装调试结束后,忽略外部环境及运行影响,其回路电阻相对固定。电力设备负荷因运行方式或潮流变化不定期发生变化。

假设标准回路电阻为 20 $\mu\Omega$,依据式(1)一式(4)计算线路负荷为 100 A、200 A、300 A、400 A、500 A、600 A、700 A 时的温升变化。根据计算结果得出温升趋势如图 8 所示。

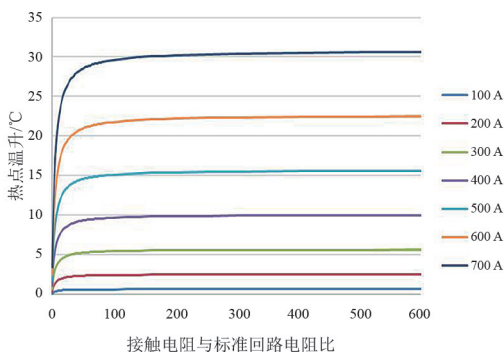


图 8 不同负载电气设备热点温升情况

根据图 9 所示,当线路负荷按照线性整数倍率

增长时,因线路负荷大所引起接触不良点温升极限呈正向指数增长趋势。

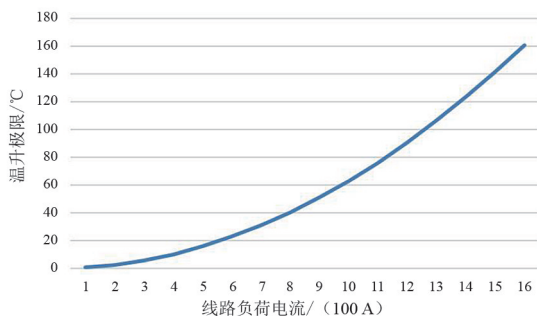


图 9 线路负荷成比例增大时的温升极限趋势

2.6 双母线接线方式中接触不良点温升

对于双母线接线方式,由于不存在环网供电,负荷电流在电气设备接触电阻增大时不会降低。现假设某双母线接线回路负荷电流为 100 A,正常回路电阻为 $20 \mu\Omega$,根据式(4)计算所得温升趋势如图 10 所示。

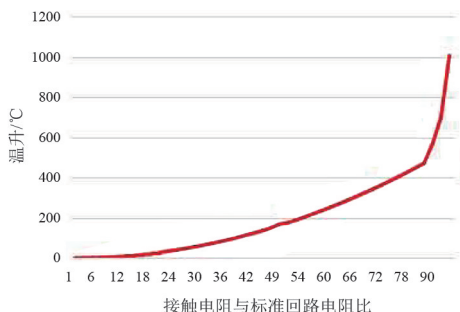


图 10 双母线接线接触不良点热点温升情况

由图 10 可知,当电气回路中隔离开关接触电阻增大至 90 倍标准回路电阻时,接触点温度开始呈直线上升趋势,并且已经接近 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温。

在上述分析过程中,对于 3/2 接线方式中隔离开关接触点温升过程,忽略了风速和接触面热对流的散热、阳光照射的升温影响以及温升点向周围设备热传导效应,因此,实际中温升应在理论计算值附近振荡。对于双母线接线方式隔离开关接触点温升过程,忽略了随着温度升高,氧化反应加速,腐蚀物皮膜加厚,接触电阻快速增大,过热越加严重产生恶性循环^[5]的影响,因而在实际中温升曲线斜率应比理论计算曲线斜率更大,温升速度更快。

3 结 论

经过上述分析,由于 3/2 接线方式具有环网供电的特点,处于某一串的隔离开关所流过的电流遵

循本串电气元件电阻的线性分配关系。基于线性分配关系,当某一元件电阻增大时,该元件所流过的电流呈线性减小。

对于 3/2 接线方式隔离开关接触不良时,所展现的特性主要表现在以下方面:

1) 当某一隔离开关接触增大时,其对本串负荷电流的分配取决于接触电阻与标准回路电阻比,与接触电阻绝对值本身相关性不大。由图 4 可知当接触电阻达到 60 倍的标准回路电阻时,该元件流过电流接近于 0,此时二次采样值为 0,保护装置会报异常。

2) 接触电阻热点温升极限与线路负荷和标准回路电阻的增长关系呈正向指数增长。当接触不良点电阻增大到某一值时,该热点极限温升由该点接触电阻阻值与流过的电流共同决定,流过的电流与标准回路电阻相关。当标准回路比较大或接触不良点接触电阻达到 60 倍标准回路电阻时,流过该点的电流会呈线性增大,接触不良点温升极限呈指数增大。

3) 相对于 3/2 接线方式而言,双母线接线由于不存在环网供电特性。当接触电阻增大时,流过接触不良点的负荷电流不会降低,因此热点温度极限值与标准回路电阻无关,仅取决于接触电阻绝对值本身。

根据上述结论,提出以下建议:

1) 加强 3/2 接线方式中低温发热设备关注,通过分析该发热设备所在元件及相邻元件三相电流,判断是否存在设备接触不良导致的低温发热及负荷电流不平衡。当出现电流不平衡时可利用式(1)一式(3)计算接触电阻的严重程度来制定状态检修策略。当负荷电流超过 1000 A 时需要预防因线路大负荷引起设备高温发热情况。

2) 当两条线路负荷同向时,根据负荷电流分配方式需要加强对边断路器及其所属隔离开关的关注;当线路负荷非同向时,要加强对中断路器及其所属隔离开关进行关注。

3) 设备检修时应注意同一串同一相回路电阻的测试,并确保回路电阻的一致性。防止因回路电阻不匹配在长期运行过程中的微发热,以及环境的影响造成高回路电阻的元件接触点电阻持续增加导致设备接触不良。

4) 在设备制造过程中,采取优化工艺降低各个元件的标准回路电阻,降低设备运行过程中发热极

限。应确保隔离开关更换或大修后的设备与未更换继续运行的设备回路电阻的一致性,降低设备发热缺陷机率。

参考文献

- [1] 张丽娟.敞开式隔离开关发热故障分析及防范措施[J].山东电力技术,2019,46(2):46-49.
- [2] 滕松,刘新,李毅,等.电网中高压隔离开关触头接触温升实验测试分析[J].电子测量技术,2019,42(8):119-121.

(上接第 49 页)

流系统电流超过额定值,通过最小程度地减小有功功率的输出降低交流电流幅值,避免交流系统过电流。针对在受端有功功率输出减小、不平衡功率增大的现象,通过增大抽水蓄能电站有功功率的输出,保证新能源风电场最大功率输出,同时维持直流电压的稳定。最后,在 PSCAD/EMTDC 上搭建的四端柔性直流输电系统模型验证了所提控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 袁志昌,郭佩乾,刘国伟,等.新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J].高电压技术,2020,46(5):1460-1475.
- [2] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2016:8-9.
- [3] 张文亮,汤涌,曾南超.多端高压直流输电技术及应用前景[J].电网技术,2010,34(9):1-6.
- [4] 吴俊宏,艾芊.多端柔性直流输电系统在风电场中的应用[J].电网技术,2009,33(4):22-27.
- [5] 陈鹏,刘继春,余熙,等.混合三端直流输电系统应用于风电场并网的研究[J].可再生能源,2015,33(3):357-362.
- [6] 全国电力电子系统和设备标准化技术委员会.柔性直流输电换流器技术规范:GB/T 34139—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [7] 中国电力企业联合会.柔性直流输电术语:GB/T 40865—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [8] 周鑫.多端柔性直流输电系统故障穿越控制策略研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [9] 黄伟煌,李明,刘涛,等.柔性直流输电受端交流侧故障下的控制策略[J].南方电网技术,2015,9(5):27-31.
- [10] 刘天琪,陶艳,李保宏.风电场经 MMC-MTDC 系统并网的几个关键问题[J].电网技术,2017,41(10):3251-3260.
- [11] 邱子鉴,刘晋,周鑫,等.多端柔性直流输电系统交流

- [3] 李振望.二分之三接线方式隔离开关烧毁原因分析[J].云南电力技术,2016,44(S2):103-104.
- [4] 黎斌.高压电气设计[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [5] 钟振蛟.户外隔离开关导电回路过热的原因及对策[J].高压电器,2005,41(4):307-309.

作者简介:

王来源(1988),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统稳定性分析;

雷昌成(1990),男,学士,主要研究方向为电力系统稳定性分析。
(收稿日期:2022-07-26)

故障穿越控制策略[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(6):32-40.

- [12] 邵冰冰,韩民晓,郭抒颖,等.多端柔性直流输电系统交流侧故障穿越功率协调控制[J].电力建设,2017,38(8):109-117.
- [13] 王岩,魏林君,高峰,等.光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J].电力系统保护与控制,2017,45(14):70-78.
- [14] 蔡新雷.广东南澳多端柔性直流输电系统调度运行策略探讨[J].广东电力,2016,29(7):93-96.
- [15] 魏伟,许树楷,李岩,等.南澳多端柔性直流输电示范工程系统调试[J].南方电网技术,2015,9(1):73-77.
- [16] 董云龙,凌卫家,田杰,等.舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J].电力自动化设备,2016,36(7):169-175.
- [17] 高强,林焯,黄立超,等.舟山多端柔性直流输电工程综述[J].电网与清洁能源,2015,31(2):33-38.
- [18] 韩亮,白小会,陈波,等.张北±500 kV 柔性直流电网换流站控制保护系统设计[J].电力建设,2017,38(3):42-47.
- [19] 杜晓磊,郭庆雷,吴延坤,等.张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(9):164-173.
- [20] 高悦.基于 MMC-HVDC 的多端柔直电网继电保护新原理研究[D].西安:西安科技大学,2021.
- [21] 李向阳.多端柔性直流输电系统的控制方法研究[D].郑州:郑州大学,2017.
- [22] 任敬国,李可军,刘合金,等.基于改进定有功功率控制特性的 VSC-MTDC 系统仿真[J].电力系统自动化,2013,37(15):133-139.
- [23] 陈磊.MMC-HVDC 换流站控制与低电压穿越策略[D].合肥:合肥工业大学,2021.

作者简介:

张世豪(1998),男,硕士研究生,研究方向为柔性直流输电技术;

石若林(1995),男,工程师,从事水力发电工作;

丁义轩(1994),男,工程师,从事超高压输电工作。
(收稿日期:2022-07-12)