

特高压换流站 OCT 故障对换流站的影响及其运行可靠性统计分析

孙文, 刘俊杰, 禹佳

(国家电网公司运行分公司宜宾管理处, 四川 宜宾 644000)

摘要: OCT 是特高压直流换流站中常用且十分重要的测量设备, 但目前在运的 OCT 会出现故障率高的特点。根据宜宾换流站 OCT 测量模块与直流控保系统的关系, 结合宜宾站投运以来出现的因 OCT 合并单元 POMI 异常导致单套保护误动的情况, 理论分析其成因。并引用概率论对比分析直流保护“三取二”逻辑和“二取一”逻辑中保护误动和拒动的概率情况。最后对目前的直流保护动作逻辑中存在的隐患可能导致直流闭锁的情况进行深入分析, 提出合理化建议, 进而保证特高压直流输电系统在电网中的安全稳定运行。

关键词: 特高压直流; OCT; 直流控保; POMI 异常; 概率; 直流闭锁

Abstract: OCT is an important measurement equipment which is commonly used in UHVDC converter station, but there is a high failure rate in the running UHVDC converter station at present. According to the relationship between OCT measurement module and DC control and protection system in Yibin converter station, and combined with the maloperation of a single set protection caused by merging unit (POMI) exception since YiBin converter station being put into operation, the theoretical analysis of its causes is done. By using the probability theory, the probability of maloperation and rejection of "two out of three" logic and "one out of two" logic in DC protection are compared and analyzed. Finally, the existing hidden troubles in DC protection logic which may lead to DC blocking are analyzed, and the reasonable suggestions are put forward so as to ensure the safe and stable operation of UHVDC system in power grid.

Key words: UHVDC; OCT; DC control and protection; POMI exception; probability; DC blocking

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)03-0035-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.03.008

0 引言

电流互感器是电力系统中能量计量和继电保护的重要设备, 尤其是对于特高压换流站, 电流互感器的测量结果将直接作用于控制及保护, 因此其精度和可靠性对于电力系统安全经济运行起着至关重要的作用。

OCT 电子式电流互感器(简称光 CT 或 OCT)是利用光学和电子学原理实现电力系统电流测量。与传统电磁式电流互感器相比, OCT 体积小、重量轻、频带响应宽, 可以测量直流电流, 使其在特高压换流站中得以广泛应用, 主要应用于 ± 800 kV 直流换流站, 测量极母线、阀厅内极线、中性线、直流滤波器高压侧和不平衡电流, 输出信号供控制及保护设备使用。

然而, 从特高压换流站 OCT 的运行情况看, 故

障较为频繁, 由于 OCT 及其二次回路构造复杂、硬件故障率高, 同时更换备件需要在停电状态下进行, 因此得到了业界的广泛关注。

宜宾站直流场区域共安装 18 台 OCT, 对应的 OCT 测量接口屏 8 个。直流场部分于 2014 年 4 月 6 日投运以来, 曾发生过 8 次由激光发射板引起的故障, 故障率 22.2%; 14 次远端模块引起的故障, 故障率 12.9%; 1 次电源板卡故障, 故障率 3%。

2016 年出现的两次 OCT 测量故障, 合并单元均未监测到测量故障, 异常电流导致单套保护误动, 对电网稳定运行造成了极大的威胁。

1 OCT 原理及结构介绍

一次电流流经 OCT, OCT 头部电流传感器把一次电流值转换为电压信号, 由安装于互感器头部的远端数据模块输出。转换后的电流信号通过远端模

块转换为串行数字信号并通过光纤发送至 POMI 测量接口屏内。

OCT 利用光纤复合绝缘子保证绝缘,产品有悬式及支柱式两种结构方式,可以满足不同的现场安装需求。OCT 具有绝缘简单可靠、重量轻、测量精度高、动态范围大、频率范围宽、响应快、运行稳定可靠等特点。

根据 OCT 电子式电流互感器的原理,其结构主要由四部分组成,如图 1 所示。

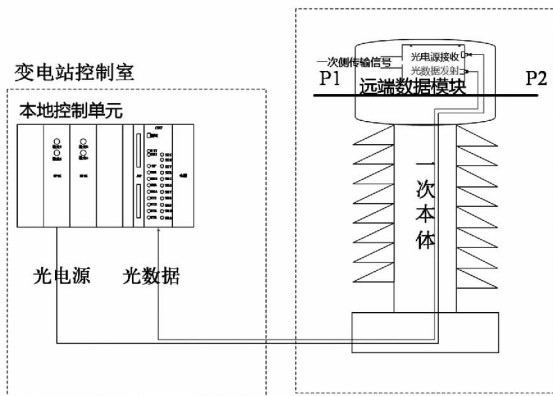


图 1 OCT 电子式电流互感器原理图

1) 一次传感器。一次传感器位于高压侧,作用是把一次电流值转换为电压信号,由安装于互感器头部的远端数据模块输出,一次传感器可根据工程需求实现冗余配置。

2) 远端模块。远端模块也位于高压侧。远端模块接收并处理由一次传感器传输过来的电压信号,将其转换为串行数字光信号后输出。远端模块的工作电源由合并单元内的激光器提供,OCT 电子式电流互感器可根据工程需求配置多个完全相同的远端模块,以保证其可靠性。

3) 光纤绝缘子。绝缘子为内嵌光纤的实芯复合绝缘子。绝缘子内嵌多根 62.5/125 μm 的多模光纤,留有足够的备用光纤。光纤绝缘子高压端光纤通过光纤头接至远端模块的电源口和数据口,低压端光纤以熔接的方式与光缆对接。

4) 合并单元。合并单元置于屏柜内,合并单元一方面为远端模块提供供能激光,另一方面接收并处理互感器远端模块下发的数据。所有合并单元的数字式输出均为 7 路 IEC 60044-8 光纤数字信号,输送至控制保护及相关监视系统;所有合并单元的输入为扩展 FT3 光纤数字信号,取自安装在一次本体处的远端模块,具体输入信号的数量由测点位置

决定。同时,合并单元装置由以下板卡组成:电源板(Power)、激光发射板(PPM)、开入开出板(DI-DO)、数据处理板(CPU)。

2 特高压换流站直流 OCT 配置

特高压换流站直流场区域共安装有 18 台 OCT,其位置如图 2 所示。由图 2 可知,18 台 OCT 分别为安装于极母线上的户外极线 800 kV OCT(2 台)、安装于直流场区域的户外滤波器高压侧 800 kV OCT(2 台)、安装于各阀厅内的阀厅极线 800 kV OCT(2 台)、阀厅极线中点 400 kV OCT(4 台)、阀厅中性线 100 kV OCT(2 台)以及安装于直流场区域的户外滤波器不平衡 OCT(6 台)。

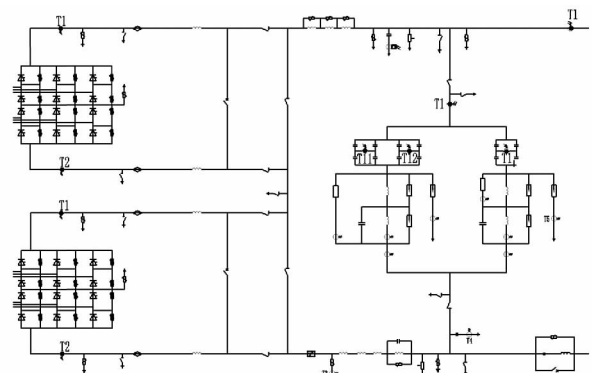


图 2 极 I OCT 分布图(极 II 与此相同)

OCT 将采集数据传输到测量接口屏,供控制及保护装置使用,其配置如图 3 所示。

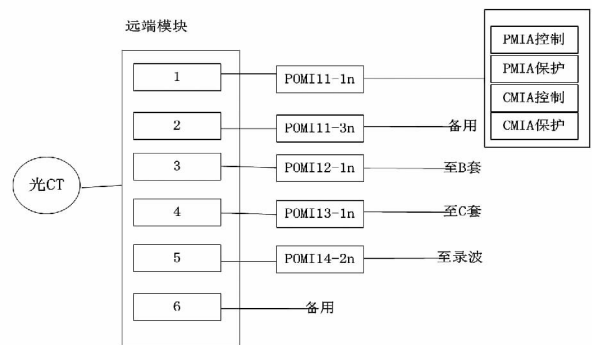


图 3 极 I 直流场不平衡 OCT 接线示意图

图 3 中,OCT 模拟量采集回路涉及到相应的极保护和阀组保护。POMI 为 OCT 合并单元,PMI (pole measuring interface) 为极测量接口屏,CMI (converter measuring interface) 为阀组测量接口屏。每个 OCT 的模拟量经过 POMI 的信号转换板卡转换为数字量信号,再经过 IEC 60044-8 总线协议送至相应的控制系统和保护系统。

如图3可知,每个OCT通过光纤将测得的数据通过6个远端模块(其中有1个远端模块为备用)传输到5个合并单元,再分别传输至A、B、C三套测量屏录波、备用。在OCT测量接口屏内,合并单元通过PPM激光发射板为OCT的远端模块供能,远端模块将采集到的电流量送至合并单元的CPU插件,CPU插件再将各个远端模块采集的量转送出去。

3 OCT故障对换流站的影响分析

3.1 直流出线及阀厅OCT故障对换流站的影响

直流出线OCT及阀厅OCT故障导致极闭锁风险极高,主要表现在OCT故障后直流电流测量异常时差动保护误动风险极高。假设每套保护的误动概率为 p ,拒动概率为 q 。根据概率论原理,在“三取二”逻辑中:只要两套或两套以上保护发生误动才能出口,所以保护的误动概率 $P = 3p^2 - 2p^3$;只有两套或两套以上保护发生拒动时才出口,所以拒动概率为 $Q = 3q^2 - 2q^3$ 。而“二取一”逻辑中:只要有一套保护误动即出口,所以“二取一”保护的误动概率 $P = 2p - p^2$;只有当两套保护全部拒动才不出口,所以拒动概率 $Q = q^2$ 。

所以当因更换PPM激光发射板将阀组或极保护一套退出运行后,相应保护的“三取二”逻辑将变为“二取一”逻辑出口,由上述计算得知“二取一”逻辑误动概率较高,对运行设备极为不利。

以极母线差动保护为例,其保护原理如下。

正常运行、仅高端阀组运行时:

$$I_{dif} = |I_{DC1P} - I_{DL} \pm I_{ZT1}|$$

$$I_{RES} = \max(I_{DC1P}, I_{DL}, I_{ZT1})$$

$$I_{dif} > \max(I_{set}, k_{set} \times I_{RES}); \text{报警延时 } 2 \text{ s};$$

I段动作延时150 ms; II段动作延时6 ms。

其中 I_{DC1P} 、 I_{DL} 均由OCT测量得到。如果OCT设备异常,导致某个电流值测量失真,进而可能导致二次侧动作电流大于整定值,致使保护误动。

3.2 OCT故障处理过程对换流站的影响

3.2.1 交流滤波器场OCT故障处理过程对换流站的影响

交流滤波器场OCT故障对换流站的影响主要体现在减少可用滤波器组的数量上,因OCT检修期间,相应滤波器需要陪停。

根据特高压直流无功控制方式,交流滤波器场

无功控制有以下控制功能:1)绝对最小滤波器控制;2)最大交流电压控制;3)最大无功功率控制;4)最小滤波器控制;5)电压/无功控制。其中,绝对最小滤波器组是为了保证流经交流滤波器的电流不超过其额定值,按照设计单位规定,投入相关组别滤波器。如果绝对最小滤波器组无法满足,直流极将回降功率,甚至导致闭锁。同时,即使绝对最小滤波器组数满足要求,滤波器投入过少也会导致系统电能质量及无功补偿能力严重下降。

由此可见,当交流滤波器OCT故障时,检修期间滤波器必须处于停电状态,减少了换流站可用的滤波器组数,可能导致系统谐波超标、电压偏低等风险,甚至在某些方式下可能导致直流闭锁。

3.2.2 直流滤波器场OCT故障处理过程对换流站的影响

直流滤波器场OCT故障对换流站的影响,也主要体现在OCT检修期间相应滤波器需要陪停上。由于直流滤波器数量远少于交流滤波器组数,因此其影响较交流滤波器场更为明显。

根据特高压直流工程的典型设计,直流每极将配置两组直流滤波器,整流站、逆变站各一组。正常情况下,需要保证每极至少有一组直流滤波器运行,否则将造成极闭锁。由此可见,当一组直流滤波器的OCT出现故障检修时,直流滤波器单组运行,一旦运行的滤波器故障跳开,会出现直流单极闭锁,难以满足检修 $N-1$ 的要求。

3.2.3 直流场OCT故障处理过程对换流站的影响

直流OCT二次测量接口屏按照常规直流模式划分为极I区域和极II区域,但高低端阀组层、极层之间的测量设备没有按照区域单独配置,由此将导致故障影响范围严重扩大,主要包括以下两个方面:

1)OCT激光发射板接线示意图如图4所示。由图4可知,高低端阀厅、直流极线共6个OCT的远端测量模块的PPM激光发射板共同接入同一个机箱。由第2节中的分析知,PMI输出的数字量信号会经过IEC 60044-8总线协议送至相应的PMI极测量接口屏和CMI阀组测量接口屏,进而送至相应的保护及控制系统。假如上述6个OCT中任何一个OCT的远端模块测量故障需要更换激光发射板,均需将整个PMI机箱退出运行,从而导致对应的高、低端阀组保护、极保护和双极保护

均需退出运行。

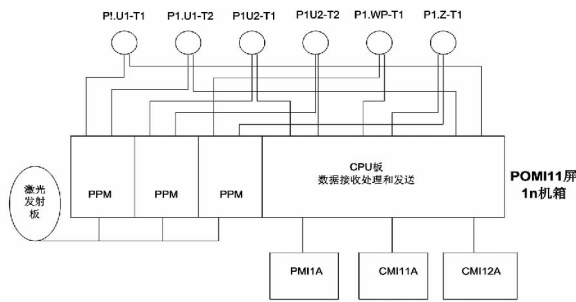


图4 OCT激光发射板接线示意图

2) 远端模块配置示意图如图5所示。由图5可知,远端模块通过光纤将信号传至5个不同的合并单元中,而其中的每个合并单元又同时连接了同一极中的不同远端模块。并且在合并单元内,不同远端模块的数据光纤紧密排列。为避免在故障处理过程中误碰其他模块而产生异常(试验发现误动远端模块数据光纤,会产生10 kA左右的故障电流),在远端模块数据传输光纤更换或清洁时,需要提前将本测点的所有远端模块置于检修状态,这样势必会影响极或双极保护的正常运行。

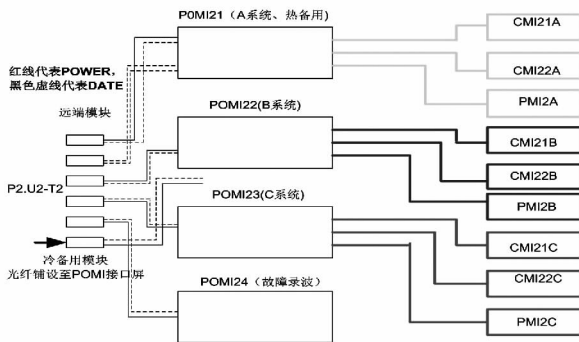


图5 远端模块配置示意图

4 直流 OCT 运行可靠性故障统计

自系统调试以来,宜宾站直流 OCT 共计故障21次,其中激光发射板故障永久2次、短时2次、瞬时4次,远端模块故障13次。更换过4块激光发射板、9个远端模块。除此之外,PPM激光发射板失效、单一电源供电问题也会影响OCT的安全稳定运行。

4.1 激光供能模块故障

根据故障情况的分析,当OCT合并单元某一测量通道的激光供电功率波动(下降)或由于温度等原因导致远端采集模块消耗功率增加时,会导致远

端模块电压下降,当降低到一定程度,则AD采集芯片的电压基准降低,引起AD采集不准确致使数值大幅增加,而当激光供电功率恢复正常时,由于电压上升过程中,电压基准上升需要一个过程,表现的现象是AD采样突然上升到一定高度然后再缓慢下降的过程。

在此过程中,合并单元会给控制保护系统提供不正确的数据,从而导致了相应保护动作及直流闭锁信号。

斯尼汶特在实验室模拟了激光供能模块瞬间失电,证实了激光供能模块失电会导致远端模块工作电压波动,使AD采集芯片无法正确采集电流信号。

由录波可知,PPM激光发射板的激光供能模块若出现瞬时异常,会导致与其相应的远端模块工作电压波动甚至掉电,从而引起远端采集模块上的电压基准故障,AD芯片采集到错误的电流信号。从几次事故的故障录波中可以看到,从异常出现到恢复的时间大约为30~50ms,这个极短的时间使得设备中光功能调制保护功能来不及被触发。

4.2 远端模块失效

OCT远端模块可靠性偏低严重制约了OCT的性能。宜宾站调试期间出现过3次远端模块故障更换的情况,正式运行后至2016年1月份出现过11次远端模块故障的情况,经统计主要原因是:1)滤波电容损坏;2)光纤端面或连接器污染。

4.3 PPM发射板失效

PPM发射板失效问题和上述的瞬间供能模块失电问题性质相同,直接原因为激光供能模块的永久性故障。激光二极管损坏是导致激光供能模块出现问题的最大可能,而有三种原因可能引起激光二极管损坏:

- 1) 静电放电,包括高电压、脉冲;
- 2) 回波损耗,一般由光纤端面或连接器污染造成;
- 3) 芯片质量问题。

4.4 单一电源模块供电隐患

直流OCT测量接口屏内机箱有两块电源板供电,其中一块用于激光发射板激光模块供电,另一块用于CPU模块及通讯模块供电,两路电源无物理上的联系,均为单一电源供电模式,单一电源模块断电

(下转第72页)

26(Z2): 130 - 134.

[6] 关海鸥,杜松怀,苏娟,等. 一种触电信号的自动快速检测模型[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2328 - 2335.

[7] 韩晓慧,杜松怀,苏娟,等. 基于参数优化的最小二乘支持向量机触电电流检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 238 - 245.

[8] IEC. Methods of Measurement of Touch Currents and Protective Conductor Current [S]. IEC 60990, 1999 - 2008 (2nd Ed) .

[9] 徐垦. 交流信号真有效值数字测量方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 51 - 54.

[10] Turner L W. Electronic Engineer's Reference Book (4th Edition) [M]. London: Newnes Butterworths Co. Ltd., 1976.

[11] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

[12] Albu M, Heydt G T. On the Use of RMS Values in Power Quality Assessment [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 1586 - 1587.

[13] 熊晓祎,肖先勇,赵恒. 基于自适应算法的触电事故电流检测[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 139 - 144.

作者简介:

左金威(1991), 硕士研究生, 研究方向为剩余电流保护技术;

赵恒(1983), 博士研究生, 研究方向为漏电保护与电气安全。

(收稿日期: 2017 - 05 - 01)

(上接第 38 页)

会造成单套保护故障退出和控制系统的严重故障。

5 结 论

前面在介绍特高压换流站 OCT 结构的基础上, 分析了 OCT 故障对特高压换流站的影响, 并从宜宾换流站实际出发分析了换流站中 OCT 的可靠性及故障原因, 得出了如下结论:

1) OCT 是特高压直流换流站中常用且又十分重要的测量设备, 其安全可靠运行对直流输电的可靠性有着重要的作用。当交流滤波器 OCT 故障时, 检修期间滤波器必须处于停电状态, 减少了换流站可用的滤波器组数, 可能导致系统谐波超标、电压偏低等风险, 甚至在某些方式下可能导致直流闭锁; 当一组直流滤波器的 OCT 出现故障而检修时, 直流滤波器单组运行, 一旦运行的滤波器故障跳开, 直流也会出现单极闭锁, 难以满足检修 $N - 1$ 的要求; 直流出线 OCT 及阀厅 OCT 故障导致直流控制保护误动, 极闭锁风险极高。

2) 直流 OCT 二次测量接口屏按照常规直流模式划分为极 I 区域和极 II 区域, 但高低端阀组层、极层之间的测量设备没有按照区域单独配置, 由此将导致故障影响范围严重扩大。

3) 宜宾站直流 OCT 共计故障 21 次, 其中激光

发射板故障 8 次, 远端模块故障 13 次。故障概率极高, 因此增加 OCT 的备品备件, 同时做好改造前故障处置预案对保障直流运行有着重要的意义。

参考文献

[1] 郑晓冬, 郇能灵, 杨光亮, 等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 10 - 14.

[2] 谢绍宇, 王秀丽, 王锡凡. 交直流混联系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 10 - 16.

[3] Aik D L H, Andersson G. Power Stability Analysis of Multi - infeed HVDC Systems [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(3): 923 - 931.

[4] IEEE PES Transmission and Distribution Committee. IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short - circuit Capacities [R]. New York: IEEE, 1997.

作者简介:

孙文(1980), 本科、高级工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

刘俊杰(1989), 本科、助理工程师, 研究方向为特高压直流输电技术;

禹佳(1983), 本科、高级工程师, 研究方向为特高压直流输电技术。

(收稿日期: 2017 - 03 - 27)