

文章编号:1001-1609(2003)01-0001-03

直流专题

嵊泗直流工程调试中的特殊技术问题及解决方法

尚金城, 苟锐锋, 李宾宾

(西安高压电器研究所, 陕西 西安 710077)

SPECIAL TECHNICAL PROBLEMS IN COMMISSIONING OF SHENGSI HVDC PROJECT AND THEIR SOLUTIONS

SHANG Jin-cheng, GOU Rui-feng, LI Bin-bin

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, Xi'an 710077, China)

摘要: 分析并讨论了弱受端嵊泗直流工程系统调试中出现直流急停机后弱网稳定性问题, 停运极关合空载换流变压器对运行极干扰问题及换流阀误触发问题, 介绍了现场解决方法, 这对今后的国产直流工程具有重要参考价值。

关键词: 嵊泗直流工程; 稳定性; 励磁涌流; 误触发

中图分类号: TM721.1

文献标识码: B

Abstract: In this paper, the problems of stability of weak power system as DC system urgently shutdown, disturbing the running pole caused by idle pole closing no load converter transformer and erroneous firing of converter valves, which occurred in commissioning of Shengsi HVDC project with weak receiving terminal, are analyzed and discussed. The solutions are introduced as well. Revealment of these problems will be valuable references to future HVDC projects made domestically.

Key words: Shengsi HVDC project; stability; inrush exciting current; erroneous firing

1 嵊泗直流工程简介

嵊泗双极海缆弱受端直流输电工程额定电压 ± 50 kV, 额定电流 600 A, 从上海芦潮港换流站经 59.7 km 海缆、5.1 km 及 1.4 km 两段架空线向嵊泗岛及马迹山宝钢码头供电。芦站交流母线电压 110 kV, 由 240 MVA 南汇变电站经 20 km 架空线供电。嵊站交流母线电压 35 kV, 由嵊山电厂 2 台 3 MW 汽轮机组供电, 每极换流变 10.5 kV 绕组侧还各接 1 台 30 Mvar 调相机, 用于调节无功功率, 实现交流定电压调节, 提高系统稳定性。直流系统主控方式为适合于弱受端的定电流控制及满足宝钢码头动态冲击负荷要求的频率控制, 并具有故障极负荷向运行极自动转移功能。为了提高弱受端运行稳定性, 在全微机化的阀

控系统中还采用了快速 VDCL, 熄弧角限制、快速拉入等措施。双极直流保护功能由每站极的多 CPU 直流保护屏完成, 它可根据阀控或站控命令自动改变保护模式及定值, 满足不同运行方式的要求。建立在 Lon 网及以太网基础上的站控系统具有远程监控及顺序控制功能, 实现了全系统的综合自动化。站控及阀控站间通讯通过 PCM, 光端机及复合在海缆钢丝铠装层的两极互为备用的双路光纤进行, 最小通讯延时 20 ms, 满足阀控及直流保护的快速要求。系统主要运行方式为双极运行 (BP)、双极低功率运行 (LBP)、金属回线 (MR) 及大地回线 (GR) 运行, 最大输送功率双极 60 MW, 最小输送功率单极 2.7 MW (DC30 kV, 90 A)。稳态调频精度 ± 0.2 Hz, 码头动态负荷冲击下 ± 0.4 Hz。水冷换流阀组为 6 脉波接线, 每个单阀由 45 个 3.6 kV 晶闸管串联构成。换流变为整侧 115/40.5/10.5 kV, 5/7 次、11/13 次及 17 次 AC 滤波器接 10.5 kV 母线, 逆侧 35/39.2/10.5 kV, 含上述支路及 3 次支路的 AC 滤波器接 35 kV 母线。油浸式平波电抗器每站极 1 台, 每台 0.4 H。阀避雷器 (B)、极线避雷器 (D)、中性线避雷器 (E) 均为多柱并联的直流氧化锌产品。用于运行方式在线转换的直流高速开关 MRTB, MRTS, LVHS 为采用 10 kV SF₆ 灭弧室专用产品。为同时满足双极及单极运行中控制、保护要求, 地极线 CT 采用具有双量程自动切换功能的光电直流电流传感器, 其余 DCCT 为常规电磁式产品。极线及中性线的 DCPT 为带光电隔离的阻容式分压器。该工程的系统研究、施工设计、成套设备制造、系统调试及试运行全部由国内单位承担。于 2002 年 3 月完成系统主要调试项目, 投入非正式使用。下面介绍这期间出现的一些特殊技术问题的分析及处理, 供后续国产化直流工程参考。

收稿日期: 2002-08-30; 修回日期: 2002-11-09

2 直流系统故障急停机时维持受端交流弱网稳定的措施

嵊泗岛目前负荷很小,主要负荷量如图 1 所示。稳定常规负荷由泗礁电厂 5 条 10 kV 线路供给,其中化纤厂对供电可靠性要求最高。宝钢码头动态负荷由嵊泗换流站 35 kV 线路马 1,马 2 供给。为了提高运行经济性,正常情况下要求电厂只开 1 台机,且维持最低出力约 2 MW,其余容量均由直流系统输送。直流系统当前主要运行方式为双极低功率运行(LBP)及单极运行(MP)。LBP 运行时双极仅带 1 台调相机及 1 极滤波器,定电流主控方式具有故障极直流功率 P_d 自动转移功能,当一极故障急停机时,由运行极承担全部 P_d (≤ 30 MW),对交流网稳定无影响。但当 MP 运行时 P_d 丢失将可能造成岛上交流网崩溃。为此,在各条负荷线路出口开关处均设置了低频减载保护,按 49,48.5 Hz 及 48 Hz 分段减负荷。但由于低频减载装置均需设置数百 ms 的延时,系统调试中发生的情况表明,即使只有夜间 6 MW 负荷,当直流急停机时,3 MW 机组频率在低频减载装置作用下仍跌至 48 Hz 以下,造成交流网崩溃。为了解决这一问题,现场决定增设直流保护联切负荷措施,由于直流保护动作的快速性,可以将负荷线路开关全分断时间压缩到 100 ms 以内。联切措施同时分断马 1,马 2 及 10 kV 4 路出线,仅保留化纤厂负荷。联切功能仅在逆变侧阀控(FK)及直流保护柜(DCB)中设置。原理框图见图 2。具体措施如下。

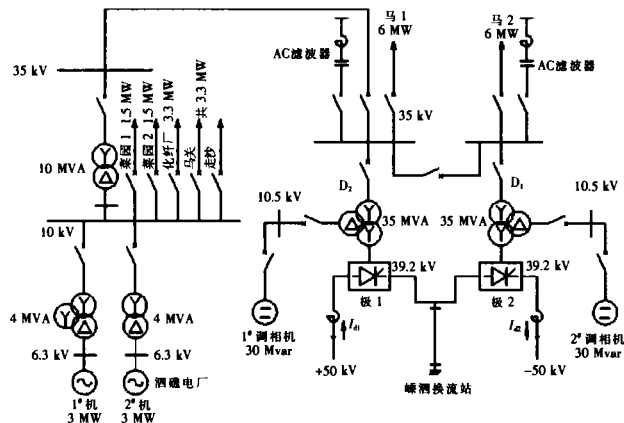


图 1 嵊泗电网简化示意图

(1)MP 运行时,当嵊泗换流站内发生非严重故障,逆侧直流保护屏 DCB 执行逆侧移相急停机,即经海缆光纤通道发令整流侧阀控柜 FK 移相急停机,同时经出口继电器 CJ_1 的两对常开接点闭合马 1,马 2 分闸线圈,经 CJ_2 的一对常开接点经光端机及光纤启动泗礁电厂出口继电器,分断除化纤厂

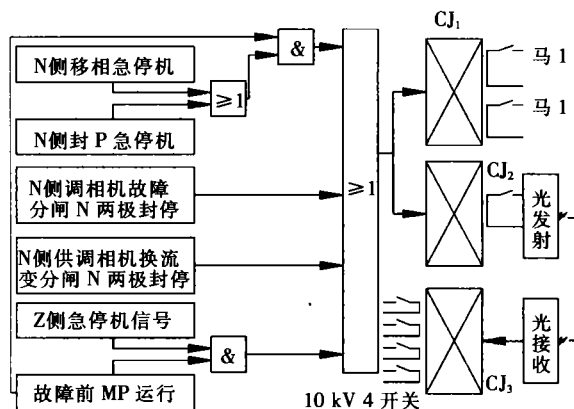


图 2 嵊泗站联切负荷原理框图

外的 4 路 10 kV 出线开关。整(Z)站经 20 ms 延时后执行急停机命令,将控制角 α_z 后移至 120° ,在 Z 阀反电势作用下直流电流 I_d 约 10 ms 后过零。从该时刻起算,设联切出口继电器延时 20 ms,开关固分时间 60 ms,则马 1,马 2 负荷约在直流功率为零后 50 ms 分断,10 kV 负荷多一级 CJ_3 ,约在 70 ms 分断。

(2)MP 运行,若嵊(N)站发生严重故障,DCB 执行 N 侧封 P 急停机,令阀控立即封触发脉冲 P_n ,并投旁路对 BPP,使交、直流故障电流隔离,与此同时,经出口继电器 CJ 分马 1,马 2 等 6 开关。Z 侧 FK 经 20 ms 通讯时延(τ_T)接到 N 侧封 P 急停机命令后动作同(1),后移 α_z 至 120° 使 I_d 过零。从 BPP 投入 P_d 丢失起算,35 kV 负荷分断时延 τ_{35} 约 80 ms,10 kV 负荷分断时延 τ_{10} 约 100 ms。

(3)MP 运行,当 Z 站发生非严重故障,Z 站 DCB 执行 Z 侧移相急停机,移 α_z 至 120° ,并送急停机信号给 N 站,经 $\tau_T=20$ ms 后,N 站 FK 接到命令,立即经 CJ 启动负荷联切,从 I_d 过零起算, τ_{35} 约 80 ms, τ_{10} 约 100 ms。

(4)MP 运行,当 Z 站发生严重故障,Z 站 DCB 执行 Z 侧闭锁急停机,FK 立即封触发脉冲 P_2 并通知 N 站,经 $\tau_T=20$ ms 后,N 站 FK 接到命令,立即经 CJ 启动负荷联切,从 I_d 过零起算, τ_{35} 约 80 ms, τ_{10} 约 100 ms。

(5)当 LBP 运行时,双极中只有 1 极有调相机。当调相机故障或向其供电的换流变 35 kV 开关 (D_1 或 D_2)分断时,需经开关辅助接点联动两极 FK 封 P 急停机。这时亦应联动 CJ 启动负荷联切。 τ_{35},τ_{10} 同(2)。

(6)手动急停机时,上述过程同样有效。

(7)MP 运行,N 侧换流阀组发生持续换相失败时,N 侧移相急停机延时 250 ms 动作。由于换相失败,立即使 P_d 丢失,联切负荷延时增至 300 ms,可能与低频减载交叉动作。

3 停运极投空载换流变对运行极的影响

当嵊泗直流系统由单极 MP 运行转为双极低功率 LBP 运行时, 顺序控制 SK 使停运极首先由冷备 2 状态进入 AC 带电状态, 首步操作为合空载换流变, 由此产生的励磁涌流随合闸角度不同而不同, N 站最大幅值 1.03 kA, 达到额定电流幅值的 1.3 倍, 持续时间 2 s。N 站合极 2 换流变时, 35 kV 侧 A, B, C 三相电流典型录波图见图 3 中的 I_a, I_b, I_c , A 相电流畸变最大。励磁涌流波形分析表明, 其中含有很大的直流分量, 及 2, 3, 4 次谐波分量, 相当于 1 个低次谐波电流源。由于运行极交流滤波器的存在, 低次谐波可能激发滤波器容抗和系统短路电抗之间的谐振, 产生换流站中特有的饱和过电压。嵊泗工程系统研究中已考虑到该问题, 通过参数选择避免了谐振的发生。但交流母线电压波形畸变不可避免。嵊泗侧为弱系统, 这个问题更突出。现场示波图表明, 由于嵊侧滤波器中有 3 次滤波支路, 3 次谐波已被滤除, 所以由二次谐波压降造成的 35 kV 线电压波形上下及左右均不对称的扭曲特别明显(见图 4 中的 U_{AC})。

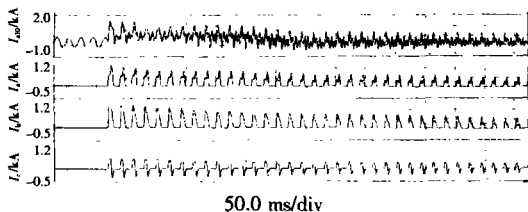


图 3 2002 年 3 月 30 日极 1 运行, N 站极 2 投空载换流变时的励磁涌流及注入极 1 调相机的电流

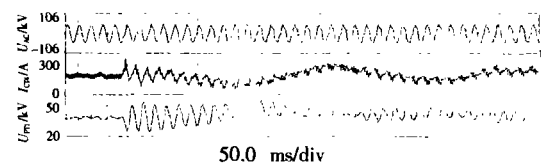


图 4 同次操作, 极 2 励磁涌流对 N 站 35 kV 母线电压、极 1 直流电流及 N 侧线路直流电压的影响

此外, 嵊侧运行极换流变 10.5 kV 侧调相机容量大, 直流电阻小, 二次谐波阻抗 $2X_2$ (负序阻抗 $X_2 = (X_d'' + X_q'')/2$) 数值也很小, 10.5 kV 线圈要求直接耦合, 与 35 kV 线圈间漏抗 X_{1-3} 近于零, 使得大量直流分量及二次谐波电流注入调相机(见图 3 的 I_{a10}), 引起调相机保护误动, 加二次谐波制动后方被消除。运行极换流变阀侧绕组接直流系统, 由于平波电抗器谐波阻抗很大, 无二次谐波注入, 但在直流电流 I_d 中产生工频 50 Hz 分量(见图 4 的 I_{CT4})。这是由于每工频周波内换流阀桥端直流输出电压波形由宽 60° 的 6 段线电压依 AB, AC, BC, BA, CA, CB 的顺序连

接而成, 正常情况下, 6 段线电压波形完全相同, 只有 6n 次谐波分量存在(n 为正整数)。今最大畸变且上下半波不对称的线电压, 例如 U_{AB} , 在 AB 段造成电压升高, 在 BA 段造成电压降低, 从而产生 50 Hz 交流分量, 经平波电抗器在直流线路上激起 50 Hz 振荡电压(见图 4 的 U_{PI1})及振荡电流, 后者引起 50 Hz 分量 2 段保护动作, 造成运行极 Z 侧封 P 急停机。Z 站投空载换流变时也有同样现象, 但因 Z 侧 110 kV 交流网短路容量大, 电压畸变小, 50 Hz 分量保护偶尔动作。该保护原为检出 Z 侧阀丢脉冲而设, 定值可调。为了避免投空载换流变时该保护动作, 将定值最终加大到 60 A, 延时 600 ms, 保证了系统的正常运行。嵊泗工程交流侧电压低, 换流变主开关无合闸电阻。如果采用带合闸电阻的非标产品, 励磁涌流很快衰减, 对运行极的影响将会被限制在允许范围内。

4 换流阀误触发问题及抗干扰措施

嵊泗换流阀光电触发系统与 500 kV 葛上 HVDC 工程类似。阀底柜 VBE 将来自阀控柜宽 120° 的一次触发脉冲前沿经编码板转化为双窄开脉冲, 经光纤送到每个晶闸管的高电位 TE 板, 产生 12 μ s 宽度门极强触发脉冲。在对应于 120° 宽脉冲后沿的单窄关脉冲未到达前, TE 板一直具有补发脉冲功能, 在此期间, 若因电流振荡导致晶闸管电流中断, 当正向电压大于门坎电压后, 又可立即补发脉冲。为了防止换流站内的强电磁干扰, 除用光纤传输一次触发脉冲, 避免传输途径中的干扰外, VBE 机房良好屏蔽, 柜壳良好接地, 防止电磁场干扰。机箱及工作地与大地隔离, 避免站内接地网上经常可能出现的地电位干扰。VBE 工作电路各个部位均保证与地电位可靠隔离, 这一点非常重要。系统调试前期, Z 站极 2 阀组频繁丢脉冲, 就是因为地电位干扰, 使触发器翻转, 封闭 VBE 发射板出口所致。在采取上述措施的基础上, 由于随着调试的进展, N 站极 1 出现误触发, 又在 VBE 出口发光二极管前串接稳压管阻隔干扰脉冲发出, 并在 VBE 入口及电源入口均采取抗干扰措施。但此后试验中, N 站极 1 误触发仍多次出现, 且集中表现为阀 3(V_3)在阀 6(V_6)触发换相振荡时误导通。典型示波图见图 5 的 I_c (极 1 阀侧 C 相电流), 图中 V_2, V_5 表示阀 2, 阀 5 导通电流, V_{6-3} BPP 表示位于同一相的 $V_6 \sim V_3$ 同时导通形成旁通对, 使直流反电势丢失, 直流短路激发线路自振, 产生叠加于直流过电流上的约 55 Hz 交流分量, 见图 5 的 I_{CT2} 。BPP 持续时间约 120°, 至 V_2 触发 V_6 向 V_2 换向成功, V_2, V_3 导通, 恢复正常导通顺序 (V_{2-3} 表示 V_2 及 V_3 导通区, 下同), 直流过电流被 (下转第 11 页)

5.2 机械设计

开关设备应按标准设计和安装。此外,正确的机械设计可以降低电弧故障引起的损坏。

(1)联锁:有效的联锁可以防止误操作,防止人员进入带电间隔。联锁非常重要,原因有:①操作次数很少,因而操作人员操作经验有限;②配电房内的开关柜种类多,操作方式不同;③操作往往是在电网发生故障时进行,操作人员必须快速处理。但这时操作人员压力大、紧张,且操作环境差,如光线暗、深夜、雨天等。

(2)绝缘和隔室:母排绝缘和各种高压隔室是防止电弧故障发生的非常有效的方法。这些技术大大减少了与带电部件意外接触的机会,也限制了引起电弧故障的可能性。所以,要尽可能将导体全部绝缘、覆盖,特别是母线系统和开关小室,那里常常由于污染而引起故障。此外,所有高压隔室应采用高度完整的密封,以避免在故障期间灼热气体的扩散。

(3)设备隔离:因为高压设备通常一直带电,所以确保人员安全的有效方法是隔离。措施是:用栅栏(对户外设备)或将门锁好(对户内设备),只有操作人员才能进入。

(4)远方操作:采用远方控制,达到操作人员与高压设备隔离的目的。

(5)采用导向装置:将灼热气体引至安全区。

(6)压力释放装置:释放装置应具有足够的强度,不会受到意外损坏或变形,动作可靠,可自由、灵活地开启。

(7)气体冷却装置:使气体迅速冷却。

6 结论

对于体积不大的小室,标准算法是一种经济、

高效的方法,计算结果也较为准确;新标准算法是建立在标准算法基础上的,但包括一个改进的气体模型,它考虑了离子化的气体混合物;CFD 算法可计算压力波,还考虑了物理现象,如气流、改进的气体模型,以及研究对象的精确几何数据,该计算方法能给出三维空间计算结果,也是一种最精确的计算方法,其缺点是计算耗时长。

在开关柜设计中,应用上述计算结果,通过采取一些有效措施,可有效避免内部电弧故障的发生,或减少其危害程度。

参考文献:

- [1] M Wactor, etc. Strategies for Mitigation the Effects of Internal Arcing Faults in Medium-voltage Metal-enclosed Switchgear [J]. IEEE, 2001, 9(1): 323-328.
- [2] G Friberg, G J Pietsch, M Schumacher. On the Description of Pressure Rise in the Surroundings of High Current Arcs in Metal-enclosed Compartments with Pressure Relief[A]. The 11th International Conference on Gas Discharges and Their Applications[C]. Tokyo, 1995.
- [3] M Desbororough, D W Klaus, etc. Internal Faults in Distribution Switchgear-modeling Implementation and Testing of New Switchgear Design[A]. CIGRE[C]. 1997.
- [4] B S Massey. Mechanics of Fluids (the 4th ed.)(M]. Van Nostrand Reinhold, 1979.
- [5] G Friberg, G J Pietsch. Calculation of Pressure Rise due to Arcing Faults[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1999, 14(2): 365-370.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

作者简介:蔡彬(1964-),男,高级工程师,博士生,从事开关柜内部电弧故障研究等。

(上接第3页)电流调节器拉回。在此期间,55 Hz 交流电流分量超过 300 A,使 50 Hz 分量 1 段保护启动,如果该保护出口动作延时为原设定值 20 ms,则会多次导致 Z 侧移相急停机动作。为了有可能进一步查找误触发原因,将该保护延时增大到 50 ms,避免了阀误触发引起系统急停机,保持稳定运行后,再经多方测试发现,VBE 柜内光纤外皮接地不良,有轻微局部放电。阀换相振荡时,局部放电最强,产生的干扰最大,同相阀间距离最近,最为敏感,所以集中表现为, V₃ 在 V₆ 开通振荡时误触发。当清除这一不易查明的缺陷后,运行几个月,均未再出现类似问题。

5 结语

嵊泗直流工程容量虽小,但弱受端及动负荷为直

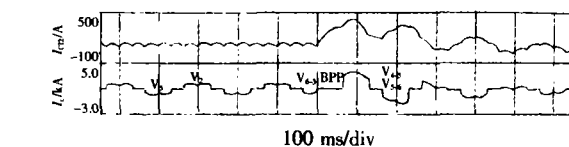


图5 2002-04-02,极1N站 V₃ 在 V₆ 触发时
误导通时的 C 相阀侧电流及直流过电流

流难题,系统动态性能及控制保护对策与常规大直流工程差别很大,双极直流接线及运行方式切换的复杂性又是国内初次尝试,这些困难在系统调试过程中都充分表现出来。上述技术问题仅为其中一部分,调频精度及稳定性等深层次问题还有待进一步研究。

作者简介:尚金城(1938-),男,高级工程师,长期从事流国产化工,嵊泗直流工程主要技术负责人。