

# 云广特高压直流工程换流变分接头切换控制研究

张志朝<sup>1</sup>, 刘涛<sup>2</sup>, 宋述波<sup>1</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510663; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 总结归纳了云广特高压直流工程中换流变分接头切换控制模式分为定角度控制模式、定 Udio 控制模式和阀组跟随控制模式三种, 逐一深入分析了上述三种控制模式具体的控制方法和实现过程。针对云广系统在试运行期间出现的极 2 不能正常解锁的故障, 通过计算分析得出是由于换流变分接头控制问题导致的, 指出云广系统实际运行中当前的分接头切换控制模式存在会使换流变充电时的励磁涌流过大的问题, 这需要在后续的调试中进一步讨论解决。

**关键词:** 特高压直流工程; 换流变; 分接头切换; 控制模式; 试运行

## Research on switching control of converter transformer tap changer in Yun-Guang UHVDC project

ZHANG Zhi-chao<sup>1</sup>, LIU Tao<sup>2</sup>, SONG Shu-bo<sup>1</sup>

(1. GZ Bureau, EHV Power Transmission Company, CSG, Guangzhou 510663, China;  
2. XJ Electric Co. Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The paper summarizes three switching control modes for tap changer of converter transformer in Yun-Guang UHVDC power transmission system, which includes constant firing angle control mode, constant Udio control mode and valve group following control mode. Then the control method and the control process for the three control modes above mentioned are analyzed one by one. The fault that pole 2 can't be deblocked during Yun-Guang UHVDC system trial operation results from tap changer switching control. At last, it points out that current control mode of converter transformer tap changer in Yun-Guang UHVDC system can result in an over inrush current when the converter transformer is energized, which should be discussed further in the subsequent testing.

**Key words:** UHVDC project; converter transformer; tap changer switching; control mode; trial operation

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0205-04

## 0 引言

云广工程每极采用双 12 脉动阀组串联结构<sup>[1-2]</sup>, 如图 1 所示, 每个阀组均具有六种运行状态, 分别为接地 (Earth)、停运 (Stop)、备用 (Standby)、闭锁 (Block)、解锁 (Deblock) 和空载升压 (Open Line Test)。阀组状态不同, 对应的换流变分接头切换控制模式也不尽相同, 特别是在第一个阀组已经解锁的情况下, 对如何控制调整同极第二个阀组的换流变分接头提出了新的要求。

本文首先归纳总结了云广特高压直流工程换流变分接头切换控制模式, 接着对各种控制模式的原理和实现方法进行了深入研究, 全面阐述了在不同控制模式下换流变分接头的控制过程, 并通过计算, 详细分析了云广特高压直流系统试运行期间, 由于换流变分接头控制问题导致的极 2 低端阀组不能正常解锁的原因, 最后, 就目前云广工程中换流变分接头

切换控制存在的问题提出了改进建议, 对云广工程的软件设计和现场运行调试具有一定的指导作用。

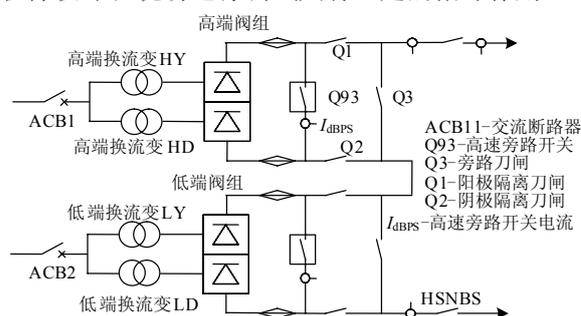


图 1 云广工程双 12 脉动阀组串联结构示意图

Fig.1 Diagram of the dual 12-pulse converters in one pole used in Yunguang project

## 1 云广工程换流变分接头切换控制模式

云广特高压工程的换流变分接头切换控制模

式可归结为三种：定角度控制模式、定  $U_{dio}$ （换流变阀侧电压）控制模式和阀组跟随控制模式。下面就三种控制模式的原理及实现过程进行详细分析。

### 1.1 定角度控制模式

定角度控制模式是云广直流系统正常运行时换流变分接头常用的控制模式，其在整流侧和逆变侧的实现方法和控制目的均不同。

整流侧选择

$\Delta = \min(I_{dc,ref} - I_{dc,act}, U_{dc,ref} - U_{dc,act})$  作为控制量，其中： $I_{dc,ref}$  为直流电流参考值； $I_{dc,act}$  为直流电流实际值； $U_{dc,ref}$  为直流电压参考值； $U_{dc,act}$  为直流电压实际值；控制量  $\Delta$  经比例-积分控制器计算出的触发角  $a$  作为分接头调节的控制依据，当  $a$  小于  $12.5^\circ$  时，发出降低分接头档位命令，当  $a$  大于  $17.5^\circ$  时，发出提升分接头档位命令。

在逆变侧，由阀组测量系统测得本阀组的每个阀片的电流截止和对应的交流线电压过零时刻，根据两者之间的时间差折算出每个阀片的熄弧角<sup>[3-4]</sup>，筛选出本阀组所有阀片的最小熄弧角  $\gamma_{min}$  后，再与本阀组上次换相时的最小熄弧角  $\gamma_{min, last}$  作比较后取较小者作为分接头调节的依据，同时考虑可控硅的去离子时间特性以及串并联回路的误差等因素，设定当熄弧角  $\gamma$  小于  $17.5^\circ$  时，降低分接头档位，大于  $21.5^\circ$  时，提升分接头档位。

换流变分接头定角度控制模式只有在阀组解锁之后才起作用。当阀组未解锁时，只能运行在定  $U_{dio}$  控制模式。

### 1.2 定 $U_{dio}$ （换流变阀侧电压）控制模式

定  $U_{dio}$  控制是通过调整换流变分接头来控制换流变阀侧电压在一定范围内。该控制模式可由阀组控制系统根据阀组状态强制选择或由运行人员在工作站设定。

云广工程中，阀组在“接地”和“停运”状态不会调整分接头，但当转为“备用”状态后，阀组控制系统将强制设定当前的换流变分接头切换控制模式为定  $U_{dio}$  控制，在该模式下，阀组控制系统将通过计算换流变阀侧电压并与参考值比较来调整分接头。由于此时阀组处于“备用”状态，换流变开关仍在分闸位置，换流变阀侧电压仍然为零，为了实现该控制功能，阀组控制系统将暂时以交流站控通过 LAN 网传送来的交流母线电压作为参考。当阀组转为“闭锁”状态，换流变充电后，阀组控制系统将直接取用本身采集的换流变网侧电压进行计算。

当换流变分接头的控制模式被选择为定  $U_{dio}$  控制时，阀组控制系统将计算  $\lambda = U_{dio, cal} - U_{dio, ref}$ ，其中： $U_{dio, cal}$  为阀侧空载电压的计算值， $U_{dio, ref}$  为阀侧空载电压的参考值。当  $\lambda > 1.1\%$  时，发出提升分接头的命令；当  $\lambda < -1.1\%$  时，发出降低分接头的命令。同时，只有当  $\lambda > -3\%$  时，分接头的位置才满足阀组解锁的要求。

由于在云广直流工程中，换流变分接头的档位调整是在阀组“备用”状态下完成的，因此  $\lambda$  的计算至关重要。

#### 1.2.1 阀侧空载电压参考值 $U_{dio, ref}$ 的选择

当阀组未解锁时，整流侧和逆变侧的换流变空载阀侧电压参考值  $U_{dref}$  取运行人员下发的额定电压参考值、降压运行参考电压、无功优化参考电压三者的最小值。当同极的任何阀组被旁路或该极进行空载升压试验（OLT）时，本极换流变空载阀侧电压参考值  $U_{ref}$  强制选取 1.0 pu。

在阀组解锁后，整流侧用于计算  $U_{dio, ref}$  的电压参考值  $U_{ref}$  将以阀组测量系统实测的  $U_{dact}$  代替，其中对于高端阀组： $U_{dact} = U_{dCH} - U_{dCM}$ ，对于低端阀组： $U_{dact} = U_{dCM} - U_{dCN}$ 。其中  $U_{dCH}$ 、 $U_{dCM}$  分别为高端阀组高、低压侧电压量； $U_{dCM}$ 、 $U_{dCN}$  为低端阀组高、低压侧电压量。

根据电压参考值  $U_{ref}$  按图 2~图 5 对应的曲线可折算出  $U_{dio, ref}$ 。

图 2 为在楚雄站，当阀组在“备用”状态，分接头控制模式被强制选择为定  $U_{dio}$  控制或阀组在“闭锁”状态同时分接头在定角度控制模式且功率方向由云南-广东时，换流变阀侧电压参考值  $U_{dio, ref}$  的计算曲线。

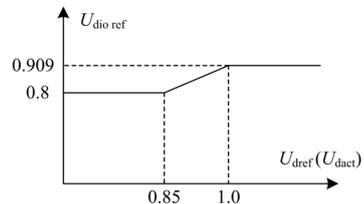


图 2 楚雄站分接头控制模式 A

Fig.2 Control mode A for tap changer at Chuxiong station

图 3 为在楚雄站，当换流变分接头控制模式由运行人员直接设定为定  $U_{dio}$  控制模式且功率方向由云南-广东时，换流变阀侧电压参考值  $U_{dio, ref}$  的计算曲线。

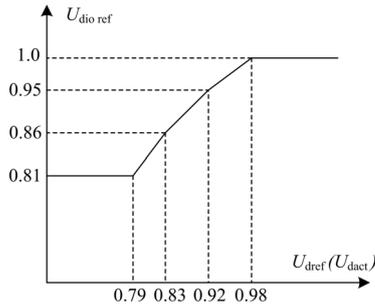


图3 楚雄站分接头控制模式 B

Fig.3 Control mode B for tap changer at Chuxiong station

图4为在穗东站,当阀组状态转为“备用”状态后,换流变分接头切换控制模式被强制设定为定 $U_{dio}$ 控制或阀组转为“闭锁”状态同时换流变分接头控制模式为定角度控制,且功率方向由云南-广东时,换流变阀侧电压参考值 $U_{dio,ref}$ 的计算曲线。

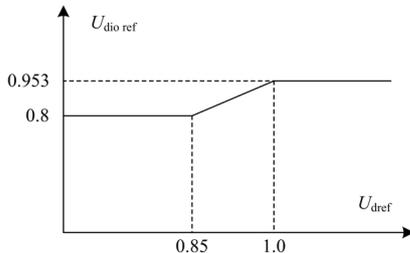


图4 穗东站分接头控制模式 A

Fig.4 Control mode A for tap changer at Suidong station

其中: $ACVolMea$ 为当阀组在“备用”状态时,取交流站控传送的交流母线电压,当阀组转闭锁状态后,取阀组测量系统测得的换流变网侧交流电压; $TC1P1Pos$ 为换流变分接头档位的实际位置; $K$ 为每档分接头的步长,楚雄站取1.25,穗东站取1.22; $I_{ac}$ 为流过换流变的实际交流电流; $X_{transf}$ 为换流变的等效电抗。

### 1.3 阀组跟随控制模式

直流系统正常运行时,由于逆变侧一般进行电压控制,因此,两个阀组的电压基本能够保持平衡。但在整流侧,一般是控制直流电流,两个阀组需要采取措施进行电压平衡控制,这对换流变分接头控制提出了新的要求。

阀组分接头跟随控制功能是单极双阀组串联结构特有的,该功能只在整流侧有效。当同极另一

图5为在穗东站,当换流变分接头切换控制模式由运行人员在工作站直接设定为定 $U_{dio}$ 控制,且功率方向由云南-广东时,换流变阀侧电压参考值 $U_{dio,ref}$ 的计算曲线。

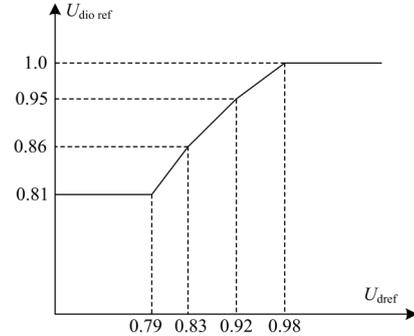


图5 穗东站分接头控制模式 B

Fig.5 Control mode B for tap changer at Suidong station

### 1.2.2 阀侧空载电压计算值 $U_{dio,cal}$ 的计算

云广工程中,楚雄站的换流变档位为-6~18共25档,每档调压1.25%,穗东站换流变档位为-8~16共25档,每档调压1.22%。换流变阀侧电压根据网侧电压与实际档位的比值,再减去换流变本身等效电抗的损耗计算可得。因此,楚雄站和穗东站计算换流变阀侧电压 $U_{dio,cal}$ 应分别按式(1)和式(2)进行:

$$\text{楚雄站: } U_{dio,cal} = \frac{ACVolMea}{(100\% - 6 \times 1.25\% - 1.25\%) + \frac{TC1P1Pos \cdot K}{100}} - I_{ac} \cdot X_{transf} \quad (1)$$

$$\text{穗东站: } U_{dio,cal} = \frac{ACVolMea}{(100\% - 8 \times 1.22\% - 1.22\%) + \frac{TC1P1Pos \cdot K}{100}} - I_{ac} \cdot X_{transf} \quad (2)$$

个阀组已经处于解锁状态并且本阀组在闭锁状态时,本阀组换流变分接头的定角度和定 $U_{dio}$ 控制模式将不再起作用,而是通过与解锁阀组比较换流变分接头的档位高低来调整本阀组换流变的分接头。当本阀组分接头档位较高时,发出降低本阀组换流变分接头的命令,相对较低时,发出提升分接头的命令,只有本阀组换流变的分接头档位不高于已解锁阀组的换流变档位4档时才具备解锁条件。

## 2 故障分析

2009年07月24日01:37,整流侧(楚雄换流站)检修工作结束后,在逆变侧(穗东换流站)操作极2低端阀组解锁(极2高端阀组旁路刀闸Q3在合位)时,发现此阀组无解锁允许位。根据许继公司和德国Siemens公司的软件设计规范,阀组的解

锁允许位必须同时具备以下条件:

(1) 阀组控制系统在自动模式;(2) 无阀组 ESOF 及 BLOCK 请求;(3) 阀组保护无禁止解锁命令;(4) 阀组在闭锁状态;(5) 交流同步电压检测OK;(6) 分接头位置 OK。运行人员逐条检查后, 确认条件(1)~(5)均满足要求。

查看故障录波发现: 2009年07月24日01:37, 极2低端换流变分接头档位为20档, 交流电压为525 kV (1.0 p.u.), 交流电流  $I_{ac} = 0$  A。因此, 根据式(2) 可以计算出此时换流变阀侧电压的计算值:

$$U_{dio,cal} = 1 / (0.8902 + 20 \times 1.22\%) \approx 0.88168 \quad (3)$$

同时, 由于极2高端阀组被旁路, 根据上述分析可知, 送入极2低端组控的电压参考值  $U_{dref} = 1.0$ , 因此根据图4可以计算出换流变阀侧电压参考值为:

$$U_{dio,ref} = 0.953 \quad (4)$$

所以:  $\lambda = \text{式(3)} - \text{式(4)} \approx 0.88168 - 0.953 \approx -7.13\% < -3\%$  不满足条件(6), 故极2低端阀组无解锁允许位。

01:48, 逆变侧(穗东换流站)将极2低端阀组操作至“备用”状态后, 分接头控制方式强制切换为定  $U_{dio}$  控制, 极2低端换流变分接头开始下调至14档后稳定, 极2低端阀组再次转为闭锁状态后顺利解锁。

当换流变分接头调至14档后, 可以计算出当时的换流变阀侧电压计算值变为:

$$U_{dio,cal} = 1 / (0.8902 + 14 \times 1.22\%) \approx 0.9425 \quad (5)$$

因此,  $\lambda = \text{式(5)} - \text{式(4)} \approx 0.9425 - 0.953 \approx -1.049\% > -3\%$  满足条件(6), 极2低端阀组能够正常解锁。

### 3 云广直流工程换流变分接头切换控制逻辑的不足及改进建议

从上述讨论及问题分析中, 我们可以看出云广工程换流变分接头的切换控制逻辑能够满足单阀组运行需求。但在云广直流系统调试及单阀组试运行阶段, 仍发现了一些问题:

(1) 换流变分接头档位不满足阀组解锁要求时, 并无信号上送至工作站提醒运行人员, 为查找阀组不能解锁的原因造成障碍, 应在后续的软件设计中加以改进。

(2) 阀组在“备用”状态下控制系统根据交流电压的大小将分接头调整到4档附近, 未将分接头调至最高档就对换流变进行充电会导致换流变励磁涌流过高, 可能会对变压器本体造成不良影响, 是

否应将换流变充电的初始档位设置为最高档需要在单极双阀组调试期间进一步考究。

(3) 从单阀组试运行的结果看来, 换流变分接头档位作为阀组解锁的条件之一, 在一定程度上制约了阀组解锁, 该条件是否合理需要进一步考究。

### 4 结语

通过对换流变分接头切换控制功能的讨论以及对云广工程试运行期间由于分接头控制问题导致极2低端阀组不能解锁的原因进行计算和分析, 可以得出如下结论: (1) 同极串联的两个阀组中, 一个阀组的换流变分接头控制模式受另一个阀组状态的影响。(2) 换流变充电时其分接头未调整至最高档导致换流变的励磁涌流过大, 长期运行可能对换流变本体造成不良影响, 是否需要在换流变充电前将分接头档位调至最高档有待考究。(3) 从试运行的情况看, 云广工程的换流变分接开关控制策略能够满足单阀组运行的要求, 但涉及同极双阀组控制的部分功能需要在单极双阀组调试期间进一步讨论完善。

### 参考文献

[1] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29 (14).  
YUAN Qing-yun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29 (14).

[2] 陈潜, 张尧, 钟庆, 等.  $\pm 800$  kV特高压直流输电系统运行方式的仿真研究[J]. 继电器, 2007, 35 (16).  
CHEN Qian, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Simulation of  $\pm 800$  kV UHVDC system under different operation modes[J]. Relay, 2007, 35 (16).

[3] 浙江大学直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.  
Zhejiang University DC transmission research group. HVDC transmission[M]. Beijing: China Water Power Press, 1985.

[4] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
ZHAO Wan-jun. HVDC transmission engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

收稿日期: 2009-11-09; 修回日期: 2009-12-23

作者简介:

张志朝 (1980-), 男, 工程师, 硕士研究生, 从事特高压直流输电系统研究及运行维护工作; E-mail: epzczhang@126.com

刘涛 (1978-), 男, 工程师, 本科, 主要从事高压直流输电系统研究和软件设计工作;

宋述波 (1977-), 男, 工程师, 硕士研究生, 从事特高压直流输电系统的管理、运行维护工作。