148

# 基于双 12 脉动阀组共同控制的特高压单阀组投退策略

黎东祥1,王渝红1,丁理杰2,李兴源1,戴寒光1,宿国良1

(1. 四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065;2. 四川电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘要:借助 PSCAD/EMTDC 程序研究了特高压直流输电系统双 12 脉动阀组共同控制方式下的单阀组投入 和退出策略,分析了阀组触发角、触发脉冲、旁路开关、旁通对和在线调整控制器相关参数之间的顺序控制、 时序配合。仿真结果表明:在双 12 脉动阀组共同控制方式下,单阀组投入宜采用小触发角解锁方式,解除触 发角限制后串入限速模块和限幅模块可以改善投入过程中的直流运行参数动态响应特性;单阀组退出时,触 发角按一定速率调整到 90°,并投旁通对可加速退出过程。实例仿真表明所提控制策略能够满足特高压直流 单阀组投退的要求。

关键词:特高压输电;直流输电;共同控制;12脉动阀组;控制 中图分类号:TM 721.1 文献标识码:A DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.025

# 0 引言

高压直流输电在远距离大容量输电和电力系统 联网方面具有很明显的优点,对解决我国的电力资 源和电力负荷分布不平衡有很大的优势,尤其是特高 压直流输电近年来得到了广泛的应用和发展<sup>[1-4]</sup>。

特高压直流输电工程普遍采用每极 2 个 12 脉 动换流器串联的主接线方式<sup>[5]</sup>。在这种主接线方式 中,一次设备的每个阀组增设了旁路断路器和隔离 开关。当一个阀组出现故障时,只需将其旁路合上, 其他阀组仍可正常运行。两端换流站既可按照每极 双阀组接线方式运行,又可形成两端每极单阀组或 两极不同组合的运行方式。因此,在特高压直流工 程中,单阀组的自动投/退控制成为重要的控制环节 之一。单阀组的投退控制策略目标是在投退过程中 保证系统安全、扰动小、响应特性良好<sup>[6]</sup>。

特高直流输电工程采用的控制方式主要有双 12 脉动阀组共同控制方式和双 12 脉动阀组分别控 制方式 2 种。从控制系统分层结构上看,2 种控制方 式的主要区别是同一极的 2 个阀组采用一组换流器 控制还是分别设置换流器控制。2 种控制方式有其 各自的优缺点,在实际工程中都有应用。

实现单阀组投退的关键在于阀组和与其并联的 旁路开关之间的协调控制。目前采用的单阀组投入 方式主要有零功率解锁和小触发角解锁<sup>[6,8,11]</sup>。在单 阀组的退出过程中,通过控制阀组增大触发角α或 熄弧角γ,即可降低其端电压,需要注意的是两端换 流站间的阀组在退出过程中的配合。 文献[6-11]提出的单阀组投退策略都是针对双 12 脉动阀组分别控制方式提出的。本文在仿真研究 的基础上提出了一种针对双 12 脉动阀组共同控制 方式的单阀组投退策略。仿真结果表明,本文提出的 单阀组投退策略安全、投退迅速,对系统造成的扰动 小,具有一定的实际应用价值。

#### 1 双 12 脉动阀组共同控制方式

#### 1.1 控制系统分层结构

控制系统的分层因各个直流系统的不同而有所 差异。现代直流输电控制系统一般设有6个层次等 级:系统控制级、双极控制级、极控制级、换流器控制 级、换流阀控制级和单独控制级<sup>[12-13]</sup>。

双 12 脉动阀组共同控制方式的分层结构如图 1 所示。从控制系统分层结构上看,同一极的 2 个阀 组采用同一组换流器控制的控制信号,即每极的 2 个 12 脉动阀组配置同一个换流器控制单元,而双 12 脉动阀组分别控制方式以每个 12 脉动阀组为基 本单元进行单独配置。



图 1 双 12 脉动阀组共同控制方式的分层结构 Fig.1 Hierarchical structure of joint control of dual 12-pulse converter groups

双 12 脉动阀组共同控制方式可减少控制设备 投资,确保 2 个 12 脉动阀组控制信号的一致性,从 操作和人员培训上考虑,该控制方式和常规超高压 直流有更好的通用性。而双 12 脉动阀组分别控制

收稿日期:2013-04-25;修回日期:2014-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51037003);四川省电力 公司科技项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51037003) and the Technology Project of Sichuan Electric Power Corporation

方式虽然设置较冗余,增加了控制设备投资,且2个 阀组可能出现控制信号不平衡的问题,但是2个阀 组的换流器控制可以互为备用,提高了可靠性<sup>[14-16]</sup>。 通过查阅文献和与工程人员沟通,笔者了解到2种控 制方式在实际工程中都有应用。本文采用的是双12 脉动阀组共同控制方式。

#### 1.2 稳态运行控制策略

双 12 脉动阀组共同控制方式和双 12 脉动阀组 分别控制方式的稳态运行控制策略基本相同。整流 侧设置有定电流控制和α限制控制,最小α整定为 5°左右。逆变侧设置有定电压控制,定熄弧角控制和 定电流控制,定电流整定值相比整流侧定电流整定 值小1个电流裕度<sup>[17]</sup>。稳态运行情况下,整流站采用 定电流控制,逆变站采用定电压控制。整流侧维持直 流电流,逆变侧维持直流电压。逆变侧考虑了对线路 上电压降的补偿,以保持整流侧出口处直流电压为 额定值,整流侧通过与逆变侧配合达到直流线路上 的定功率传输。

从控制系统的分层结构图可以看出,2种控制 方式为达到控制目的所需要的直流参数有所不同。 双12脉动阀组共同控制方式只需测量直流线路出 口处的直流电压和直流电流;而双12脉动阀组分别 控制方式的每个换流器控制需单独配置直流系统电 压、电流测量点,以获得高压侧阀组的控制电压、控 制电流以及低压侧阀组的控制电压、控制电流。

#### 2 单阀组的投入策略

#### 2.1 投入方式选择

单 12 脉动阀组的投入方式主要有零功率解锁 和小触发角解锁 2 种。

2.1.1 零功率解锁方式

零功率解锁的过程为:阀组 90° 解锁后,减小触 发角直至已投入阀组正常工作的直流电流和投入阀 组零功率运行的直流电流相等或接近,然后旁路开 关动作。零功率解锁策略的优点是转换平稳,对系 统冲击小,对高速旁路开关的要求较低;缺点是启动 顺序控制逻辑比较复杂,用时长,对系统的无功支撑 要求很高<sup>[9-10]</sup>。

## 2.1.2 小触发角解锁方式

小触发角解锁的过程为:旁路开关的操作机构 预先执行分闸操作(机械操作时间约为 60 ms,熄弧 时间约为 40 ms);然后阀组以某一固定的小于 90°的 触发角解锁,解锁的角度应使该阀组瞬时产生很大 的电流,即与正常运行阀组的直流电流基本相等,使 其旁路开关中的电流在瞬间由原值变为 0;分闸成功 后则阀组成功投入,可正常运行。

小触发角解锁策略的优点是快速,对交流系统

的无功冲击小,没有投入交流滤波器的特殊要求,控制逻辑比较简单;缺点是短时的直流功率波动较大, 对交流系统的输送功率存在短时扰动,对高速旁路 断路器要求高,需要高速旁路断路器和阀触发脉冲 信号密切配合<sup>[18]</sup>。

鉴于零功率解锁方式的启动顺序控制逻辑较复杂、时间长,在双12脉动阀组共同控制方式下的实现会相对复杂,且考虑到减小对无功支撑的要求,本 文选用小触发角解锁方式。

#### 2.2 小触发角解锁的关键点

小触发角解锁的2个主要关键点是解锁触发角的大小,以及旁路开关的分闸指令和阀组的解锁指 令的时序配合。

对于小触发角解锁方式,触发角的确定原则是 使旁路开关电流能迅速出现过零点。触发角过大则 可能导致过零点出现得不迅速;触发角过小则会使 阀组及旁路开关遭受很大冲击,如果旁路开关在电 流过零点未断开后果将更为严重。旁路开关断开 后,直流回路串入了新的阀组,新的阀组相当于一个 电压源,该电压源的串入必然使得原有阀组损失相 应大小的直流电压。阀组允许的最小直流电压约 为 0.7 p.u.,因此所串入的阀组的直流电压上限值为 0.3 p.u.,由此可计算最小触发角的大小<sup>[6]</sup>。

阀组两端的直流电压为:

$$U_{\rm d} = U_{\rm d0} \cos \alpha - R_{\rm c} I_{\rm d} \tag{1}$$

其中,U<sub>a0</sub>为空载直流电压;R<sub>e</sub>为等值换相电阻。当 串入阀组的直流电压为 0.3 p.u. 时,则有:

$$U_{\rm d}^{\prime}=0.3(U_{\rm d0}\cos\alpha_{\rm N}-R_{\rm c}I_{\rm d}) \tag{2}$$

其中, $\alpha_N$ 为正常运行下的触发角, $\alpha_N$ =15°~20°。

令  $U_d = U'_d$ ,整理可得:

$$\cos \alpha = 0.3 \cos \alpha_{\rm N} + \frac{0.7 R_{\rm c} I_{\rm d}}{U_{\rm d0}}$$
(3)

令  $R_{c} = R_{c*} \frac{U_{d0N}}{I_{dN}}, U_{d0} = U_{d0N}$ (其中,  $U_{d0N}$  为额定空载

直流电压;*I*<sub>ax</sub>为额定直流电流;*R*<sub>c\*</sub>通常取为 0.06~ 0.09),可得:

$$\cos \alpha = 0.3 \cos \alpha_{\rm N} + 0.7 R_{\rm cs} \frac{I_{\rm d}}{I_{\rm av}}$$
(4)

如取  $\alpha_{\rm N} = 15^{\circ} R_{\rm cs} = 0.08 I_{\rm d} = (0.1 \sim 1) I_{\rm dN}$ ,可得最小触 发角  $\alpha_{\rm min} = 69.77^{\circ} \sim 72.82^{\circ}$ 。

因此,采用小触发角解锁方式投入阀组,其解锁 触发角 α 不应小于 70°。

确定解锁触发角后,小触发角解锁中控制的另一关键点是:为了使旁路开关可在其电流过零点处 被断弧,旁路开关的分闸指令和阀组的解锁指令在 时序上需配合得当。如果配合不当,旁路开关将重 合,此时投入阀组将在出口短路的情况下流过大电 流。过早解锁或保持触发角时间过长,都会引起直流电流的扰动。本文通过查阅相关文献和大量的仿 真分析,最后确定的时序为:发出断开高速旁路开关 的命令后 60 ms 发出释放触发脉冲信号,并将触发 角限制在 70°,维持时间为 8 ms。

#### 2.3 投入控制模块

由于双 12 脉动阀组共同控制方式的特殊性,高 压侧阀组和低压侧阀组所得到的触发角相同。如果 解除触发角限制转为定电流/定电压控制后,新投入 阀组的触发角  $\alpha$  或熄弧角  $\gamma$  将瞬时变成正常运行阀 组的值。但此时直流电压/直流电流还未达到全压 运行状态下的额定值,在控制器作用下触发角  $\alpha$  或 熄弧角  $\gamma$  将有一个大幅度振荡趋稳的过程。仿真结 果说明这种情况对系统的冲击较大,危害系统安全 运行。

本文通过大量仿真研究提出当投入阀组解除触 发角限制后,同时串入限速模块和限幅模块,限制触 发角变化幅值和速率。整流侧和逆变侧相应的控制 框图分别如图 2、3 所示。



Fig.2 Block diagram of deblocking control at rectifier side



#### 图 3 逆变侧投入控制框图

Fig.3 Block diagram of deblocking control at inverter side

在双 12 脉动阀组共同控制方式下的单阀组投 入过程中,逆变侧的定电压控制器还需要进行电压 整定值的切换,如图 4 所示。切换后定电压控制器的 电压整定值将变成全压运行状况下的电压整定值。







# 2.4 单阀组投入控制时序

单阀组的投入过程简图如图 5 所示。以整流侧 高压侧阀组为例,主要示意了阀组和投入过程中需 要的高速旁路开关动作。 $V_1$ 为高压侧阀组, $V_2$ 为低 压侧阀组, $C_1$ 和  $C_2$ 为高速旁路开关。



Fig.5 Deblocking process of converter group

at high voltage side

单阀组的投入详细过程如下。

a. 直流系统初始运行工况见图 5(a)。在收到投入阀组命令后,整流侧先于逆变侧解锁。整流侧极 控系统在收到解锁命令后,立即发出分高速旁路开 关的命令,经 60 ms 延时后发出释放触发脉冲信号,并 将触发角限制在 70°,维持时间为 8 ms,见图 5(b)。

b. 旁路开关成功断开,整流侧上、下2个阀组的电流接续,如图5(c)所示。解除触发角限制后即进入定电流控制状态,同时串入限速模块(如图3所示),限制触发角变化速率。整流侧经过255 ms延时,退出限速模块,正常运行的电流控制器开始作用。

**c.** 逆变侧在整流侧发出分高速旁路开关的命令 10 ms 后向系统发出分高速旁路开关的命令。逆变 侧经 60 ms 延时后发出释放触发脉冲信号,并将触 发角限制在 70°,维持时间为 8 ms,过程同整流侧。

d. 旁路开关成功断开,逆变侧上、下2个阀组的 电流成功接续。在解除触发角限制后进入定电压控 制状态,同时串入限速模块和限幅模块(如图3所示), 该阀组由整流运行状态转入逆变运行状态。逆变侧 经过245 ms 延时,退出限速模块和限幅模块,同时 切换定电压控制器的电压整定值(如图4所示),全压 运行状态下的电压控制器开始作用。

由以上控制时序可得单阀组投入的控制逻辑, 如图6所示。

#### 2.5 单阀组投入仿真结果

为了减小对系统的冲击,阀组投入应该在较小 传输功率下。仿真以单极高压侧阀组的投入为例。 在高压侧阀组投入前,直流系统的运行状态为:单极 的低压侧阀组处于运行状态,直流电压为400kV,直 流电流为1000A,直流功率为400MW。当阀组投入 成功后,单极4个阀组都处于运行状态,直流电压为



图 6 单阀组投入控制逻辑



800 kV,直流电流为 500 A,直流功率为 400 MW,直流 系统采用定功率控制模式。

图 7 为双 12 脉动阀组共同控制方式下高压侧 阀组投入时整流侧和逆变侧仿真波形,可以看出:投 入过程的调整时间比较短,约 0.6 s 系统已进入稳定 运行状态;投入过程中,有功功率和无功功率均发生 波动,且最大波动都达到正常运行值的 2.5 倍左右, 但是功率波动的持续时间很短;直流电压和直流电 流经过投入初期允许范围内的波动,逐渐达到全压 运行状态下的稳定值;整流侧高压侧阀组和低压侧 阀组的触发角 α 在开始投入后的 0.1 s 左右就达到



Fig.7 Simulative waveforms of HV-side converter group deblocking

一致,上、下两阀组达到平衡运行状态,然后触发角 逐渐调整至 22°,再通过调整换流变压器抽头的位置 可以达到 15°;逆变侧高压侧阀组的熄弧角γ从投入 时的 110°逐渐减小到与低压侧阀组的熄弧角一致, 低压侧阀组的熄弧角波动很小,稳定在 22°。

# 3 单阀组的退出策略

# 3.1 退出方式选择

单 12 脉动阀组正常退出的策略是:控制待退出 阀组的触发角 α 或熄弧角 γ 按一定速率增大,使其 电压降低到高速旁路开关允许的合闸条件后闭合高 速旁路开关,同时控制闭合高速旁路开关时流过它 的电流,避免开关闭合瞬间的大电流对开关触头造 成的损害。阀组移相后电流自然转移到旁路开关通 路上,随即允许闭锁该阀组<sup>[11]</sup>。

为了减少阀组在大角度的长时间运行对系统造成的影响,可以通过投旁通对的策略来配合阀组的 退出。将两侧要退出的阀组触发角 α 或熄弧角 γ 按 一定速率往大角度方向移动,使直流电压下降,然后 投入旁通对,使阀组两端的直流电压快速接近 0<sup>[19]</sup>。

因此本文采用的单阀组退出方式为:将待退出 阀组的触发角 α 或熄弧角 γ 按一定速率调整至 90°,并通过投旁通对加速退出过程。

#### 3.2 退出控制模块

为了满足不同系统的退出要求,本文提出通过 改变触发角α或熄弧角γ变化速率的方法改变退出 时间,可以通过修改限速模块的整定值实现。退出 控制框图如图8所示。

#### 3.3 单阀组退出控制时序

单阀组的退出过程简图见图 9,详述如下。

**a.** 直流系统的初始运行工况如图 9(a)所示。直 流系统在收到退出阀组命令后,逆变侧将要退出阀 组的触发角按一定速率调整到 90°,使直流电压下



图 8 整流侧和逆变侧退出控制模块

Fig.8 Blocking control module for rectifier-side and inverter-side converter group



Fig.9 Blocking process of converter group at high voltage side

降,同时切换定电压控制器的电压整定值至半压运 行状态整定值(如图4所示)。

**b.** 延迟 10 ms 后,整流侧将要退出的阀组触发 角按一定速率调整到 90°,此后如果整流侧没有禁止 投旁通对信号,则将旁通对投入,并发出合高速旁路 开关命令,如图 9(b)所示。

**c.** 在整流侧投入旁通对 10 ms 后,并且逆变侧 退出阀组的触发角已调整到 90°,此时如果逆变侧没 有禁止投旁通对信号,则将旁通对投入,同时发出合 高速旁路开关命令,过程和整流侧相同。

**d.** 待直流电流从阀组转移到旁路开关后,直流 系统进入半压运行状态,如图 9(c)所示。整流侧和 逆变侧在旁路开关闭合后 100 ms 闭锁阀组。

由以上控制时序可得单阀组退出的控制逻辑, 如图 10 所示。

### 3.4 单阀组退出仿真结果

为了减小对系统的冲击,阀组退出应在较小传输功率下。仿真以单极高压侧阀组退出为例。在高压侧阀组退出前,直流系统的运行状态为:单极的4个阀组都处于运行状态,直流电压为800kV,直流电流为500A,直流功率为400MW。当阀组退出成功后,两侧的高压侧阀组停运被旁路,2个低压侧阀组保持运行。直流电压为400kV,直流电流为1000A,直流功率为400MW。直流系统采用定功率控制模式。

图 11 为双 12 脉动阀组共同控制方式下高压侧 阀组退出时整流侧和逆变侧仿真波形。可以看出:退 出过程的调整时间约为 0.8 s,退出时间可根据不同 系统要求进行修改;退出过程中,功率波动持续时间



图 11 高压侧阀组退出时仿真波形

Fig.11 Simulative waveforms of HV-side converter group blocking



图 10 单阀组退出控制逻辑 Fig.10 Control logic of single converter group blocking

很短,有功功率会先降到 290 MW 后逐渐恢复到 400 MW,无功功率先上升后下降,最大无功功率波 动达到正常运行值的 2.5 倍左右;直流电压和直流电 流平稳地达到半压运行状态的稳定值;整流侧低压 侧阀组的触发角α经过波动后达到稳定值 16°;逆变 侧低压侧阀组的熄弧角γ波动很小,稳定在22°。

# 4 结论

a. 在特高压直流双 12 脉动阀组共同控制的方 式下,本文提出的控制策略能够快速安全地实现单 阀组的正常在线投入/退出。

**b.** 单阀组投入时采用小触发角解锁方式,将整 流侧和逆变侧待投入阀组的触发角限制在 70°。

c.为了实现单阀组安全快速地投入,提出当投入阀组解除触发角限制后,同时串入限速模块和限幅模块,限制触发角变化幅值和速率。

**d.** 单阀组退出时整流侧和逆变侧触发角按一定 速率调整到 90°,并借助旁通对加速退出过程。

e. 单极双 12 脉动阀组共同控制方式下,单阀组 投入/退出后需要对定电压控制器的电压整定值进 行切换。

f. 本文提出的控制策略适用于特高压直流系统,可以根据不同系统进行优化调整,具有一定的实际应用价值。

# 参考文献:

- [1] AGELIDIS V G,DEMETRIADES G D,FLOURENTZOU N. Recent advances in high voltage direct current power transmission systems[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. Bombay, India: IEEE, 2006:3046-3053.
- [2] RAO H,LUO B,LI X,et al. Development of ±800 kV UHVDC transmission technology in China [C] //2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chongqing, China; IEEE, 2008; 1-7.
- [3]张文亮,于永清,李光范,等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机 工程学报,2007,27(22):1-7.
   ZHANG Wenliang,YU Yongqing,LI Guangfan, et al. Researches

on UHVDC technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (22):1-7.

- [4] 周浩,钟一俊. 特高压交、直流输电的适用场合及其技术比较[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):6-12.
  ZHOU Hao,ZHONG Yijun. Applicable occasions of UHVAC/ UHVDC transmission and their technology comparisons in China
  [J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(5):6-12.
- [5] SINGH B, GAIROLA S, SINGH B N, et al. Multipulse ACDC converters for improving power quality: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1):260-281.
- [6] 马玉龙,陶瑜,周静,等. 基于实时数字仿真器的特高压直流阀组 投退特性分析[J]. 电网技术,2007,31(21):5-10.
   MA Yulong,TAO Yu,ZHOU Jing,et al. Analysis on deblocking

and blocking characteristics of UHVDC commutation units based on realtime digital simulator[J]. Power System Technology,2007, 31(21):5-10.

- [7] 李少华,刘涛,苏匀,等. ±800 kV 特高压直流输电系统解锁/闭 锁研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(6):84-87.
  LI Shaohua,LIU Tao,SU Yun,et al. Research on deblocking/ blocking operation in ±800 kV UHVDC system[J]. Power System Protection and Control,2010,38(6):84-87.
- [8] 王庆,石岩,陶瑜,等. ±800 kV 直流输电系统双 12 脉动阀组平 衡稳定运行及投退策略的仿真研究[J]. 电网技术,2007,31(17):
   1-5.

WANG Qing,SHI Yan,TAO Yu,et al. Simulation study on control strategy for balanced steady operation and block/deblock of dual 12-pulse converter groups in ±800 kV DC transmission project[J]. Power System Technology,2007,31(17):1-5.

- [9] 张尧,陈文滨,林凌雪,等. 基于 RTDS 双 12 脉动换流器解/闭锁 策略的仿真[J]. 高电压技术,2009,35(6):1260-1266.
  ZHANG Yao,CHEN Wenbin,LIN Lingxue, et al. Simulation on deblocking/blocking bipolar 12-pluse converter based on RTDS
  [J]. High Voltage Engineering,2009,35(6):1260-1266.
- [10] 张民,石岩,孙哲. 特高压直流单 12 脉动阀组的投退策略及其 对交流系统无功冲击的影响[J]. 电网技术,2007,31(15):1-7. ZHANG Min,SHI Yan,SUN Zhe. Influence of blocking and deblocking strategies of single 12-pulse converter group for uhvdc power transmission on reactive power impact to AC power grid[J]. Power System Technology,2007,31(15):1-7.
- [11] 李新年,李涛,吕鹏飞,等.向家坝至上海特高压直流输电工程 换流器的投退策略分析[J].高电压技术,2011,37(5):1232-1237.
  LI Xinnian,LI Tao,LÜ Pengfei,et al. Analysis on the strategy of converter entry/exit for Xiangjiaba to Shanghai UHVDC project[J]. High Voltage Engineering,2011,37(5):1232-1237.
- [12] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2011:94-96.
- [13] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京:科学出版社, 2012: 39-40.
- [14] 郑晓冬, 邰能灵, 杨光亮, 等. 特高压直流输电系统的建模与仿 真[M]. 电力自动化设备, 2012, 32(7):10-14.
   ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, YANG Guangliang, et al. Modeling and simulation of UHVDC system[M]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7):10-14.
- [15] 胡铭,田杰,曹冬明,等. 特高压直流输电控制系统结构配置分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(24):88-92.
  HU Ming,TIAN Jie,CAO Dongming, et al. Analysis of structure and configuration for UHVDC transmission control system[J].
  Automation of Electric Power Systems,2008,32(24):88-92.
- [16] 田杰. 高压直流控制保护系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备,2005,25(9):10-14.
   TIAN Jie. Design and realization of HVDC control and protection system[J]. Electric Power Automation Equipment,2005, 25(9):10-14.
- [17] 刘晓明,慈文斌,刘玉田.直流控制方式对受端电网电压稳定性影响[J].电力自动化设备,2011,31(4):69-73.
  LIU Xiaoming,CI Wenbin,LIU Yutian. Influence of DC system control mode on voltage stability of receiving-end power grid [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4):69-73.

[18] 李岩,黄立滨,洪潮,等. ±800 kV 直流输电系统双 12 脉动阀组 投退策略分析[J].南方电网技术,2010,4(2):21-25.

LI Yan,HUANG Libin,HONG Chao,et al. Analysis on the strategy of block/deblock dual 12-pulse valve groups in ±800 kV DC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2010,4(2):21-25.

[19] 张尧,房宣合,胡烈良,等.特高压直流输电系统阀组投退策略[J].高电压技术,2010,36(8):1858-1864.

ZHANG Yao, FANG Xuanhe, HU Lieliang, et al. Blocking and deblocking strategies of valve group for UHVDC power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8):1858-1864.

作者简介:



黎东祥(1989-),男,福建上杭人,硕士 研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控 制、高压直流输电(E-mail:ldxfjsh@163.com); 王渝红(1971-),女,重庆人,教授,博士, 通讯作者,主要研究方向为电力系统稳定与 控制、高压直流输电(E-mail:yuhongwang@ scu.edu.com)。

# Blocking and deblocking strategy of single UHVDC converter group under joint control mode of dual 12-pulse converter groups

LI Dongxiang<sup>1</sup>, WANG Yuhong<sup>1</sup>, DING Lijie<sup>2</sup>, LI Xingyuan<sup>1</sup>, DAI Hanguang<sup>1</sup>, SU Guoliang<sup>1</sup>

 $(1.\ School\ of\ Electrical\ Engineering\ and\ Information, Sichuan\ University, Chengdu\ 610065, China;$ 

2. Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China)

**Abstract**: The blocking and deblocking strategy of single converter group under the joint control mode of dual 12-pulse converter groups is studied with PSCAD/EMTDC for UHVDC power transmission system. The sequential control and timing coordination of firing angle, ignition pulse, bypass switch, bypass pair and online controller parameter adjustment are analyzed. Simulative results show that, the deblocking of single converter group should adopt small firing angle under the joint control mode of dual 12-pulse converter groups and the rate limiter and value limiter should be added in series after the firing angle limiter is disabled to improve the dynamic performance of DC operating parameters during the deblocking; while during its blocking, the firing angle should be adjusted to 90° at a certain rate and the bypass pair should be put into operation to speed up the blocking process. Case studies show that the proposed strategy meets the requirements of UHVDC single converter group blocking and deblocking operations.

Key words: UHV power transmission; DC power transmission; joint control; 12-pulse converter groups; control

(上接第 147 页 continued from page 147)

# Fault location based on wavelet energy spectrum and neural network for ±800 kV UHVDC transmission line

LIU Kezhen<sup>1,2</sup>, SHU Hongchun<sup>1,2</sup>, YU Jilai<sup>1</sup>, TIAN Xincui<sup>2</sup>, LUO Xiao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: The inherent frequency of fault traveling wave is mathematically associated with fault distance and its transient energy containing rich information about fault distance is concentrated around this frequency. Because of its fitting capability for non-linear function, an ANN(Artificial Neural Network) model of HVDC line is built to locate its faults. Based on the equidistant characteristic of wavelet transform, the transient energy spectrum of line voltage modulus at one end is extracted in seven scales, which are used as the samples to train and test the ANN model. The proposed method takes the inherent frequency band, instead of point, to extract fault information, which is easier and more reliable. Results of digital test show faults at any line position and with any transition resistance can be accurately located.

Key words: UHV power transmission; DC power transmission; inherent natural frequency; physical boundary; wavelet energy spectrum; artificial neural network; electric fault location