

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

张 民¹, 石 岩¹, 孙 哲²

(1. 国网直流工程建设有限公司, 北京市 东城区 100005;

2. 华北电力大学 工商管理学院, 北京市 昌平区 102206)

Influence of Blocking and Deblocking Strategies of Single 12-Pulse Converter Group for UHVDC Power Transmission on Reactive Power Impact to AC Power Grid

ZHANG Min¹, SHI Yan¹, SUN Zhe²

(1. State Grid DC Project Construction Company Limited, Dongcheng District, Beijing 100005, China; 2. School of Business and Administration, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Based on gradual progress of $\pm 800\text{kV}$ UHVDC project from Xiangjiaba to Shanghai, the blocking and deblocking strategy of single 12-pulse converter group of this project are researched and the reactive power impact on UHVAC power grid caused by two different blocking and deblocking strategies is researched. Simulation results by EMTDC confirm that the two strategies can perform normal blocking and deblocking of single 12-pulse converter group, but different strategy causes different reactive power impact on UHVAC power grid. The strategy, in which the DC current is hold in the level of 4000A during the blocking and deblocking process, causes stronger impact on UHVAC power grid; and the other one, in which firstly the current reference is decreased, then the blocking and deblocking of single 12-pulse converter group is performed, finally the current reference is restored, causes lower reactive power impact on UHVAC power grid.

KEY WORDS: UHVDC power transmission; single 12-pulse converter group; deblocking and blocking strategy; reactive power impact

摘要: 随着向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程的逐渐开展,研究了 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流系统单 12 脉动阀组的投退策略,并比较了采取 2 种不同的策略投退单 12 脉动阀组时对交流系统的无功冲击。EMTDC 仿真分析结果证实了这 2 种策略均能完成单 12 脉动阀组的正常投退,但不同的策略对交流系统的无功冲击不同,单 12 脉动阀组投退过程中直流电流保持 4000A 不变的策略对交流系统的无功冲击较高,另外一种先降低电流指令、投退单 12 脉动阀组,再恢复电流指令的策略对交流系统的无功冲击较低。

关键词: 特高压直流输电; 单 12 脉动阀组; 投退策略; 无

功冲击

0 引言

随着电力输送规模的加大以及输送距离的逐渐加长,现有的 $\pm 500\text{kV}$ 级直流输电将无法满足要求,客观上需要采用更高一级的直流输电电压等级。根据对西南水电外送输电规划方案的研究成果并结合国外的相关研究结论, $\pm 800\text{kV}$ 直流输电在技术上是可行的,比较适合中国的实际情况^[1-8]。

在常规高压直流输电系统的正常控制方式中,整流侧根据直流功率的要求计算出直流电流指令,根据电流测量值与电流定值的偏差通过比例积分环节得到触发角来控制直流电流,同时换流变分接头作为慢速调节控制触发角在其参考值 $\pm 2.5^\circ$ 的范围内。逆变侧采用定熄弧角控制、定直流电压控制等相结合的方法与整流侧控制共同组成高压直流输电系统的基本闭环控制^[9-10]。

$\pm 800\text{kV}$ 直流输电采用 2 个 12 脉动换流器相串联的接线方式,这种接线方式使其运行方式更加多样化。对于单极而言,既可单个 12 脉动换流器独立运行,也可以 2 个 12 脉动换流器串联运行,单个 12 脉动换流器独立运行时,与常规直流没有区别;2 个 12 脉动换流器串联运行时,对应每个 12 脉动换流器都有与其对应的 12 脉动换流器控制单元,可对每个 12 脉动换流单元进行独立的控制。在这种控制方式下,整流侧采用定功率/定电流控制

时, 上下 2 个 12 脉动换流器的控制器在不进行通信或相互协调的情况下, 由于测量偏差、设备制造偏差等因素的影响, 2 个控制器会形成竞争, 并最终导致 2 个 12 脉动换流器的触发角相互偏离^[11-14]。因此, 在双 12 脉动换流器串联运行时需采取措施来避免整流侧上下 12 脉动换流器触发角的偏离。

本文根据特高压直流系统的主回路结构, 针对单个 12 脉动换流器投退时的控制策略进行了详细的研究, 并分析投退过程中直流系统对交流系统的无功冲击情况。

1 单 12 脉动换流器投入策略

投入单 12 脉动换流器的关键问题是将其并联的高速旁路开关的电流转移到该 12 脉动换流器中并在高速旁路开关安全断开后能协调控制上、下 12 脉动换流器, 同时还要尽量减小投入过程中对交流系统的无功冲击。

以单极为例, 上、下 12 脉动换流器 C1 和 C2 有各自的换流器控制单元, 极控制将电流指令或触发角送给换流器控制。如图 1 所示(图中 I_{DNC} 为极中性母线电流; I_{DNCLV} 、 I_{DNCHV} 分别为低压和高压 12 脉动桥低压电流互感器 TA 电流; I_{DPLV} 、 I_{DPHV} 分别为低压和高压 12 脉动桥高压 TA 的电流), 假设低压 12 脉动换流器 C2 已在稳态运行, 即将投入高压 12 脉动换流器 C1, 在这种情况下, BK21、BK20、BK12 处于闭合状态, 其余开关处于打开状态, 在投入 C1 以前, 需要闭合 BK10、BK11、BPK10, 打开 BK12。

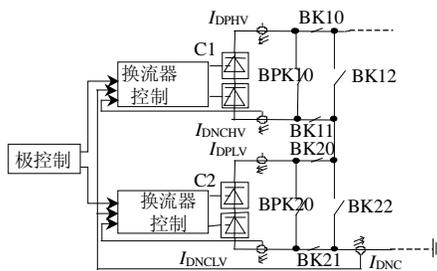


图 1 单极结构图
Fig. 1 Monopole diagram

在解锁 C1 时, 先将 I_{DNC} 与 I_{DNCHV} 的电流差值作为 C1 换流器电流控制器的输入量, C1 电流控制器将 BPK 10 开关上的电流转移到 C1 换流器中, 流过 BPK 10 中的电流仅为纹波电流, 此时可拉开高速旁路开关 BPK 10, 旁路开关打开后, 将电流测量值和电流参考值的差作为 C1 换流器电流控制器的输入量。逆变侧采用同样的方法拉开高速旁

路开关。整流侧和逆变侧相应的阀组投入后, 逆变侧控制电压, 电压上升的速率可以预先设定, 由整流侧控制电流或功率。

C1 投入以后, 由于整流侧 C1 和 C2 都控制电流, 随着电压的升高, 整流侧 C1 和 C2 的触发角都将降低来控制直流电流, 由于在同一个串联回路中不可能有 2 个电流控制器同时起作用, 如果不对 C1 和 C2 的触发角角度进行协调, 极端情况下会导致其中一个换流器的触发角运行在 5° , 另一个换流器的触发角运行在较大的角度, 因此必须对 C1 和 C2 的触发角进行平衡, 平衡的方法是采取两者角度跟随或电压平衡的方法, 本文采取电压平衡的方法, 其原理如图 2 所示。图 2 中: $I_{D-RESP1}$ 和 $I_{D-RESP2}$ 分别为上、下桥的电流测量值; $I_{ORD-LIM}$ 为电流指令; U_{DELTA} 为上、下桥的电压差; T_1 为比例积分调节器的积分时间常数; a_1 、 a_2 分别为高压和低压 12 脉动换流器的触发角; I_{DIFF1} 、 I_{DIFF2} 分别为上桥和下桥的电流测量值与电流指令的差值。

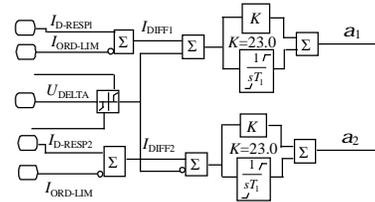


图 2 电压平衡原理

Fig. 2 Principle diagram of voltage balance

在稳态过程中, 电压平衡的主要功能是补偿上下桥电流测量值的误差, 因此加入电压平衡环节后依然能够保证直流电流控制的精度。在 C1 刚解锁时, C1 和 C2 的电压偏差最大, 随着直流电压的逐渐升高, 电压差逐渐减小。为在投入 C1 后避免上、下桥角度差别过大, 也为了使刚投入的换流器角度与另一个换流器角度快速达到一致, 同时在稳态过程中补偿电流测量值的偏差, 电压平衡环节的调节幅度是电压差的函数, 可以动态调节, 偏差大时调节增益大, 偏差小时调节增益小。

通常情况下, 直流换流器的控制首先考虑有功功率控制, 在特高压直流中, 由于换流站无功功率消耗也很大, 因此需要考虑投入单 12 脉动换流器时的无功消耗。整流侧单 12 脉动换流器的无功需求按式(1)计算, 逆变侧的无功需求计算只需将式(8)中的 a 用 g 代替即可

$$Q_{conv} = 2I_d U_{di0} \frac{2m + \sin 2a - \sin 2(a+m)}{4[\cos a - \cos(a+m)]} \quad (1)$$

式中： Q_{conv} 为换流器无功需求； I_d 为直流电流； U_{d0} 为 6 脉动桥空载直流电压； m, a, g 分别为换相叠弧角、触发角和熄弧角。具有不同控制策略的特高压直流换流器的 P-Q 曲线如图 3 所示，其中假设换流变压器抽头和交流系统电压恒定，通过该图可以理解换流器可能控制的有功和无功功率的区域。图 3 中曲线(a)表示恒直流电压控制和最小触发角控制，曲线(b)表示最小熄弧角控制，曲线(c)表示恒直流电流控制，曲线(d)表示恒无功功率控制，曲线(e)表示恒有功功率控制，曲线(f)表示最小直流电流，曲线(g)表示最大触发角控制，曲线(h)表示 0.5 pu 有功功率时触发角暂态变化曲线。

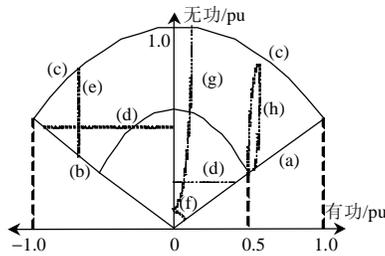


图 3 不同控制策略时特高压直流换流器的 P-Q 曲线
Fig. 3 The P-Q curve of UHVDC converter under different control strategy

在投入另一个换流器的过程中，运行人员选择极功率控制或定电流控制时会有不同的策略，既可在定电流控制时保持直流电流不变，功率的上升通过调节直流电压来实现；也可在极功率控制时共同调节直流电压和直流电流来实现。这 2 种策略都可用于单 12 脉动换流器投入过程中的直流系统控制。

(1) 策略一。投入另一个换流器时，保持直流电流 4 000 A 不变，直流功率的上升通过投入另一个 12 脉动换流器后逐渐升高直流电压来实现，采用该策略时整流侧和逆变侧的直流电压-直流电流 U_d-I_d 曲线和 P-Q 曲线如图 4 和图 5 所示。在投入另一个单 12 脉动换流器前直流系统的运行工况为：整流侧直流电压 400 kV，直流电流 4 000 A，整流侧触发角 15° ，逆变侧熄弧角 17° 。

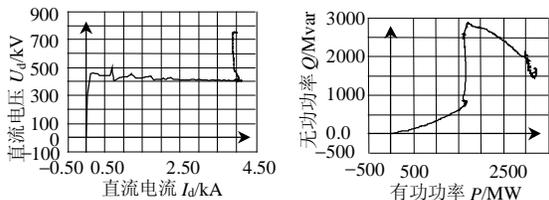


图 4 整流侧投入单 12 脉动换流器时 U_d-I_d 和 P-Q 曲线(策略一)
Fig. 4 Waveforms of U_d-I_d , P-Q when deblock the other 12-pulse converter at rectifier side under strategy No.1

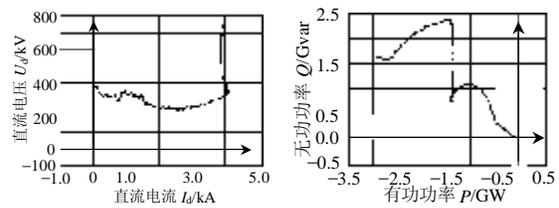


图 5 逆变侧投入单 12 脉动换流器时 U_d-I_d 和 P-Q 曲线(策略一)
Fig. 5 Waveforms of U_d-I_d , P-Q when deblock the other 12-pulse converter at inverter side under strategy No.1

对于整流侧而言，投入另一个 12 脉动换流器 C1 后，C1 换流单元控制器控制高速旁路开关的电流平稳转移到该换流器中，随着逆变侧控制的直流电压的升高，直流功率逐渐升高，在该过程中，直流电流基本保持不变。整流侧上、下 12 脉动换流器的触发角在整流侧和逆变侧分接头的调节作用下逐渐调节到 $15^\circ \pm 25^\circ$ 的范围内。

对于逆变侧而言，新投入的换流器控制单元的电流控制器控制高速旁路开关的电流平稳转移到换流器中后，逆变侧电压调节器按设定的电压上升速率升高直流电压，直到逆变侧熄弧角调节到 17° 左右。由于新投入 12 脉动换流器后，逆变侧换向压降较未投入该 12 脉动换流器时有所增加，不调节分接头时，整流侧直流电压不能达到 800 kV，随着两侧分接头的逐渐调节，整流侧直流电压调节到 800 kV。从图 4 和图 5 的 U_d-I_d 曲线可以看出：这种在投入另一个换流器的过程中保持直流电流不变的策略可以保证电压、电流及功率均保持平稳变化，没有大的扰动。从图 4 和图 5 的 P-Q 曲线还可以看出，在投入另一换流器后，由于直流电压上升速率的要求，换流器持续大角度运行，换流器消耗大量的无功功率，这必然会造成系统电压的降低，需要快速投入交流滤波器，单极情况下单 12 脉动换流器额定运行状态时大约需要 800 Mvar 无功功率，投入另一 12 脉动换流器时需要 2 300 Mvar 的无功功率，送端和受端滤波器分组容量分别按 220 Mvar 和 260 Mvar 考虑，需要连续投入 4~5 组交流滤波器，随着触发角的降低以及换流变分接头的调节，换流器需要的无功逐渐降低，最终达到 1 700 Mvar，这时又需要切除 2~3 组交流滤波器，这样在整个过程中就会出现交流滤波器先投后切的情况。此外，由于交流滤波器的投入也需要一定的时间间隔，在滤波器不能及时投入的时段，就需要交流系统长时间提供大量的无功功率，可能会超过送端和受端交流系统可以允许提供的无功功率容量，对交流系统会有较大影响。采用该策略时，有

功率和无功率沿着图 3 中(h)-(c)的路径变化。从图 4 和图 5 中 P-Q 变化曲线也可看出，投入单 12 脉动换流器时有功和无功率的变化趋势与图 3 的理论分析相一致。因此，在投入另一个 12 脉动换流器的过程中保持直流电流不变的策略需要着重考虑交流系统的无功支撑能力。

(2) 策略二。投入另一个换流器时，保持直流功率按设定速率上升，随着直流电压的快速上升，直流电流下降，随后直流电流按设定的直流功率上升速率换算成直流电流上升速率后逐渐升高。该策略下整流侧和逆变侧的仿真结果如图 6~9 所示。在投入另一个单 12 脉动换流器前直流系统运行工况为：整流侧直流电压 400kV，直流电流 4000A，整流侧触发角 15°，逆变侧熄弧角 17°。

采用该策略时直流电压的上升时间约为 200~300 ms。策略二对交流系统的无功冲击持续时间比策略一小，从图 6 和图 8 可以看出，除在电压升高约 200 ms 的时间里对无功需求较大，200 ms 以后无功需求约 1 250Mvar，在投入另一 12 脉动换流器前预先投入 1~2 组交流滤波器便可满足要求。

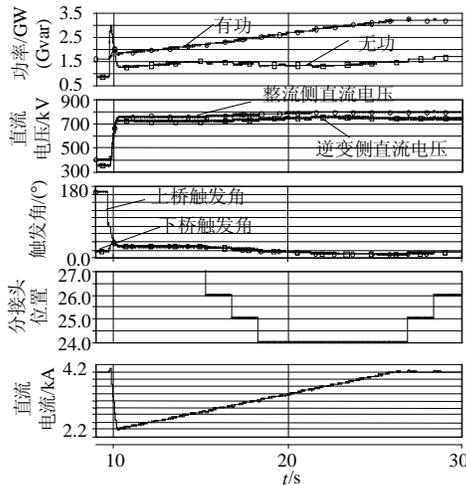


图 6 整流侧投入单 12 脉动换流器时波形
Fig. 6 Waveforms of rectifier when deblock the other 12-pulse converter

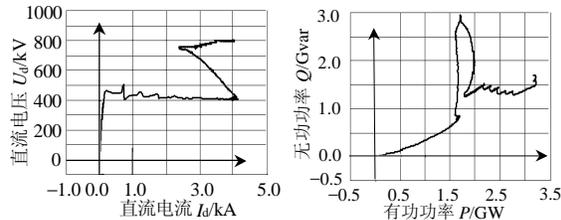


图 7 整流侧投入单 12 脉动换流器时 U_d-I_d 和 P-Q 曲线(策略二)
Fig. 7 Waveforms of U_d-I_d and P-Q when deblock the other 12-pulse converter at rectifier side under strategy No.2

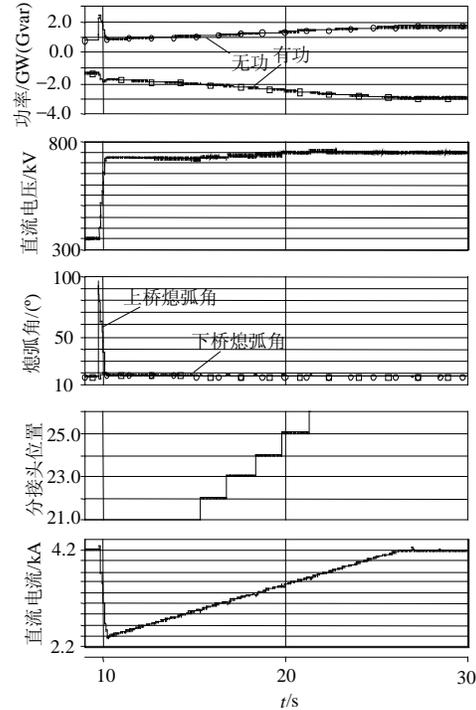


图 8 逆变侧投入单 12 脉动换流器时波形
Fig. 8 Waveforms of inverter when deblock the other 12-pulse converter

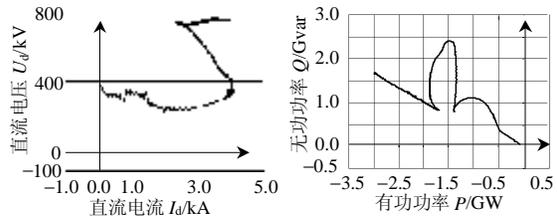


图 9 逆变侧投入单 12 脉动换流器时 U_d-I_d 、P-Q 曲线(策略二)
Fig. 9 Waveforms of U_d-I_d 、P-Q when deblock the other 12-pulse converter at inverter side under strategy No.2

然后随着直流电流的上升，无功需求随直流功率的升高逐渐增加，交流滤波器也可根据需要陆续投入，最终总无功需求约 1 685 Mvar。该策略中的有功和无功沿着图 3 中(h)-(a)的路径变化，从图 7 和图 9 中 P-Q 曲线也可以看出，投入单 12 脉动换流器时有功、无功的变化趋势与图 3 的理论分析相一致。

从直流功率的调节方式来看，策略一的直流功率增加通过直流电压的单一调节实现，策略二的直流功率增加通过直流电压、直流电流的共同调节实现；从对系统的无功冲击来看，与策略一相比，策略二缩短了换流器大角度运行的持续时间，从而有效缩短了对交流系统无功冲击的持续时间。

2 单 12 脉动阀组正常退出策略

单 12 脉动阀组正常退出的总体策略是控制待

退出阀组的电压降低到高速旁路开关允许的带电压差闭合高速旁路开关的范围后, 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, 随即允许闭锁该换流器。整流侧与逆变侧单 12 脉动阀组的退出策略略有不同。

如图 1 所示, 单 12 脉动阀组退出前, 整流侧和逆变侧 C1 和 C2 运行, BK10、BK11、BK20、BK21 闭合, 其余旁路开关/刀闸都处于打开状态。假设将要退出阀组 C1, 退出 C1 前, 逆变侧为定熄弧角控制或定电压控制, 将 C1 电压调节器的电压参考值重新设定后, 该阀组电压调节器就会按照该参考值调节本阀组的熄弧角, 不会影响另一个阀组 C2 的定熄弧角控制。在阀组 C1 出口的端电压值接近为零时, 就可闭合高速旁路开关, 同时通过电流调节器控制高速旁路开关闭合时的电流大小, 移相后直流电流自然转移到高速旁路开关上。退出 C1 前, 整流侧为定电流控制, 如果在逆变侧阀组 C1 退出过程中, 整流侧的高低电压阀组不采取任何措施, 必然造成整流侧高低电压阀组同时降低电压, 角度同时增大, 在这种情况下不能将整流侧待退出阀组的出口端电压降到零附近并安全闭合高速旁路开关。因此, 在整流侧可以保持不需要退出运行的阀组 C2 的角度不变, 仅由另一个阀组 C1 控制电流; 或者控制无需退出的阀组 C2 的电压基本不变, 由阀组 C1 控制电流。在闭合高速旁路开关时, 也要控制高速旁路开关的电流, 高速旁路开关可靠闭合后, 阀组 C1 移相将直流电流转移到高速旁路开关上, 阀组 C1 就可以闭锁, 仍运行的阀组 C2 回到电流控制。整流侧和逆变侧都退出单阀组后, 该极的控制方式与常规直流系统就没有区别了。本文中整流侧阀组 C1 退出过程中, 阀组 C1 的电流调节器在极的电流控制中起主要作用, 阀组 C2 的电流调节器中引入电压补偿环节来保持本阀组的端电压基本不变的同时对电流的变化仍有调节作用。

由于在退出阀组的过程中运行人员可能选择功率控制或电流控制。如果采用功率控制, 在退出单阀组的过程中只需要保持功率平稳下降即可, 这时可采取降电流与降电压相配合的方式, 即先降低电流, 然后降低电压同时升高电流; 如果采取电流控制, 退出单阀组时只能通过降低电压来完成。在退出单阀组的过程中, 由于需要退出的阀组端电压要降低到允许高速旁路开关闭合的范围内, 其触发

角/熄弧角会比较大, 因而需要的无功比较多, 需要投交流滤波器或由系统提供无功, 在退出的时刻, 由于阀组闭锁, 又会产生大量的剩余无功并导致换流母线电压暂态升高以及滤波器的快速切除。因此本文对这 2 种情况都进行了研究, 以便比较出哪一种策略可以尽量减小对系统的冲击。

(1) 策略一。退出单阀组时保持直流电流不变, 待退出阀组 C1 的电压下降速率可以设定。换流器所需要的无功功率超出交流滤波器最大提供能力的部分由系统提供。该策略下整流侧和逆变侧的仿真波形如图 10~13 所示。

由图 10~13 可以看出, 采用该策略时电压平稳下降, 整个过程中电流保持不变, 在该过程中, 随

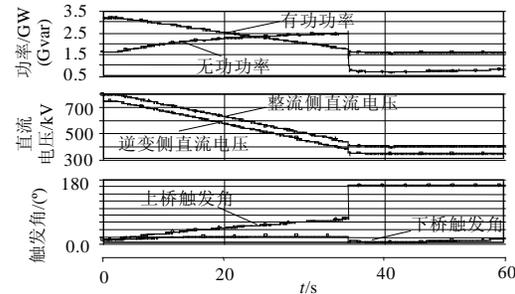


图 10 整流侧退出单 12 脉动换流器时波形(策略一)
Fig. 10 Waveforms of rectifier when block one 12-pulse converter under strategy No.1

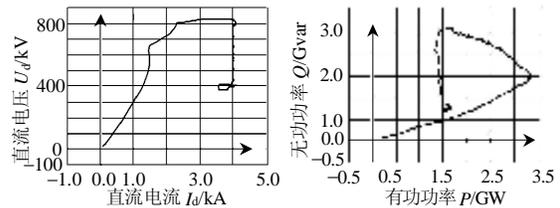


图 11 整流侧退出单 12 脉动换流器时 $U_d-I_d, P-Q$ 曲线(策略一)
Fig. 11 Waveforms of $U_d-I_d, P-Q$ when block one 12-pulse converter at rectifier side under strategy No.1

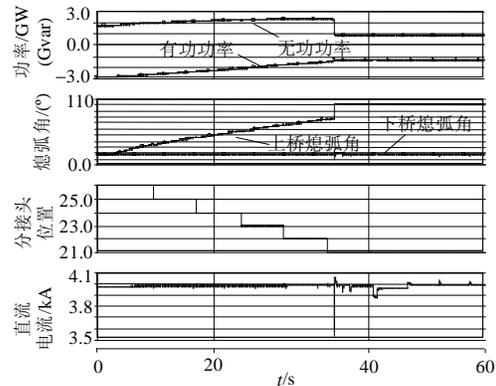


图 12 逆变侧退出单 12 脉动换流器时波形(策略一)
Fig. 12 Waveforms of inverter when block one 12-pulse converter under strategy No.1

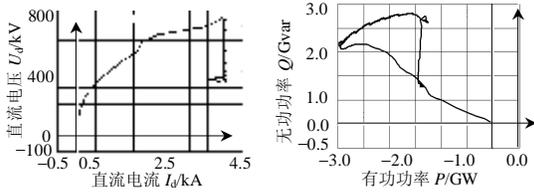


图 13 逆变侧退出单 12 脉动换流器时 $U_d-I_d, P-Q$ 曲线(策略一)
 Fig. 13 Waveforms of $U_d-I_d, P-Q$ when block one 12-pulse at inverter side under strategy No.1

随着整流侧和逆变侧退出阀组的电压降低，角度逐渐增大，换流器需要的无功功率增加。考虑到此时如果双极运行，则整流侧和逆变侧所有滤波器均应已投入运行(整流侧交流滤波器小组容量取 220Mvar，双极共 14 组，逆变侧交流滤波器小组容量取 260 Mvar，双极共 15 组)，换流器额外需要的无功功率需要完全由系统提供，导致受端换流母线电压从 515 kV 下降，低于 500 kV 以下持续时间 12 s，换流母线最低电压 493 kV。送端换流母线电压从 530kV 下降到 504kV，换流母线电压降低使交流滤波器提供的无功相应减小。在换流器退出后，由于站内无功功率的大量结余，送端换流母线电压暂态升高至 565kV，逆变侧换流母线电压升高至 525kV，交流滤波器可采用快速切除的方法，每秒切除 1 组。从高速旁路开关的电流波形可以看出，在闭合高速旁路开关时，流过开关的电流得到控制，阀组移相后，电流转移到旁路开关上。该策略中的有功和无功沿着图 3 中(c)-(h)的路径变化，从图 11 和图 13 的 P-Q 曲线可以看出，退出单 12 脉动换流器时的有功和无功的变化趋势与图 3 的理论分析相一致。

(2) 策略二。退出单阀组 C1 时采取功率控制，先按设定的功率下降速率降低电流，然后快速降低电压同时升高电流，功率下降速率不变，在完成降压的同时，电流恢复到额定值。该策略的主要目的是在退出过程中避免策略一中出现的阀组 C1 大角度运行的持续时间过长，从而可有效减少系统提供大量无功功率的时间，同时避免了送受端换流母线电压降低的持续时间。为与策略一的仿真结果进行比较，采用策略二退出单阀组 C1 的仿真持续时间为 30 s，采用该策略时整流侧和逆变侧的仿真波形如图 14~17 所示。

由图 14~17 可以看出，采用策略二退出单 12 脉动阀组时功率下降平稳，换流器无功需求随电流降低而降低。在电流降低的过程中，送受端陆续切除 2 组交流滤波器，在退出 C1 时，随着直流电压的快速降低，直流电流快速上升，在 C1 退出时无功需求最大，系统将短时提供一部分无功功率，系

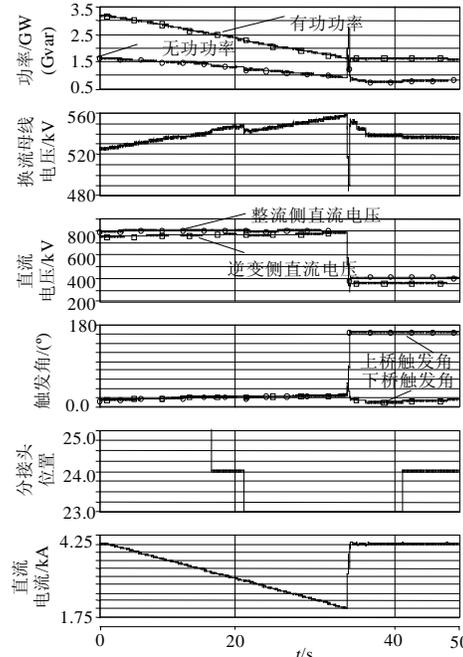


图 14 整流侧退出单 12 脉动换流器时波形(策略二)
 Fig. 14 Waveforms of rectifier when block one 12-pulse converter under strategy No.2

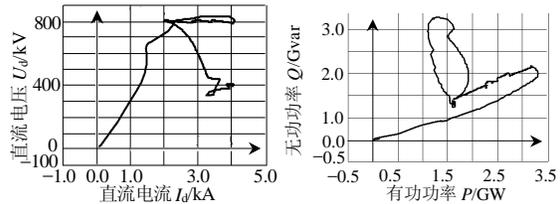


图 15 整流侧退出单 12 脉动换流器时 $U_d-I_d, P-Q$ 曲线(策略二)
 Fig. 15 Waveforms of $U_d-I_d, P-Q$ when block one 12-pulse converter at rectifier side under strategy No.2

统承受无功冲击的时间约 200~300 ms，在此期间，送端换流母线电压从 550 kV 短时下降到 484 kV，然后恢复到 535 kV，低于 500 kV 的持续时间约 160 ms；受端换流母线电压从 530 kV 短时下降到 485kV，然后恢复到 518kV，低于 490kV 的持续时间约 150 ms，远小于策略一的低压持续时间。退出单 12 脉动换流器 C1 瞬间切除一小组交流滤波器，暂态过电压在要求范围之内。高速旁路开关闭合时，流过开关的电流得到控制，直流电流平稳转移到旁路开关中。采用该策略时理论分析其有功和无功曲线沿着图 3 中(a)-(h)的路径变化，从图 15 和图 17 的 P-Q 曲线可以看出，退出单 12 脉动换流器时的有功和无功的变化趋势与图 3 的理论分析相一致。

在双极额定功率 6400MW 运行的前提下，需要退出单极的单 12 脉动换流器时，除采用策略二的方法以外，也可采取快速退出单 12 脉动换流器的同时

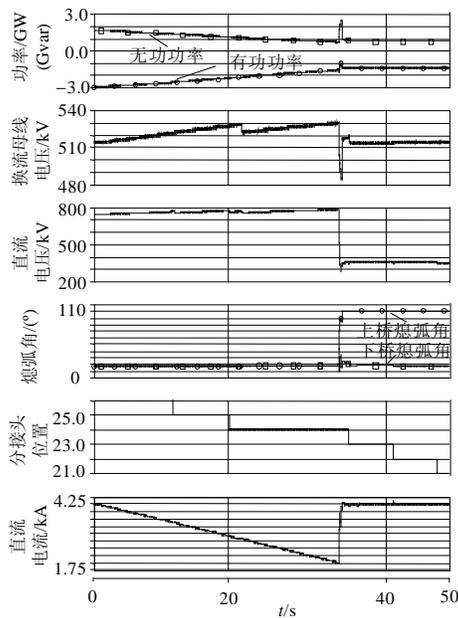


图16 逆变侧退出单12脉动换流器时波形(策略二)
Fig.16 Waveforms of inverter when block one 12-pulse converter under strategy No.2

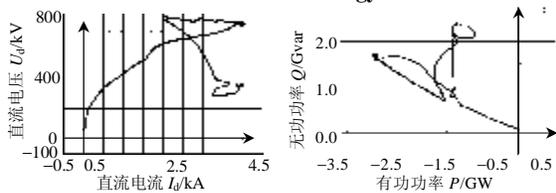


图17 逆变侧退出单12脉动换流器时 U_d-I_d ,P-Q曲线(策略二)
Fig.17 Waveforms of U_d-I_d ,P-Q when block one 12-pulse converter at rectifier side under strategy No.2

双极短时过负荷运行的方法, 同样可减小对系统无功冲击的持续时间, 缺点是该方法的功率调节速率受直流系统过负荷能力及过负荷持续时间的限制。

3 结论

本文结合特高压主接线结构, 针对单12脉动阀组的投入和退出分别提出了2种策略, 仿真分析表明, 本文所提出的策略都可平稳地完成单12脉动换流器的投入和退出; 对单12脉动换流器在投退过程中对系统的无功冲击情况也进行了分析, 结果表明无论采用哪一种策略, 在投退过程中交流系统都会受到无功冲击, 区别在于不同的策略对交流系统无功冲击的持续时间不同。越快速地完成单12脉动换流器的投退, 即换流器大角度运行的持续时间越短, 对系统的无功冲击持续时间越短。考虑到在正常投入或退出单12脉动换流器的过程中, 直流功率必须按照一定的速率平缓上升或下降, 而不是阶越式的变化, 因此建议在设计单12脉动阀组的投入或退出策略时需要结合对电流和电压的共

同调节来满足功率的平稳调节以便尽可能减小该过程中对送、受端交流系统的无功冲击。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2005年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] 常浩, 樊纪超. 特高压直流输电系统成套设计及其国产化[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 1-5.
Chang Hao, Fan Jichao. System design and its localization of UHVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 1-5(in Chinese).
- [4] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等. ± 800 kV 6400MW 特高压直流输电工程设计[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Gao Liying, et al. A preliminary exploration for design of ± 800 kV UHVDC project with transmission capacity of 6400MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8(in Chinese).
- [5] 舒印彪, 刘泽洪, 袁骏, 等. 2005年国家电网公司特高压输电论证工作总结[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1-12.
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Yuan Jun, et al. A survey on demonstration of UHV power transmission by State Grid Corporation of China in the year of 2005[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 1-12(in Chinese).
- [6] 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): 1-3.
Yuan Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3(in Chinese).
- [7] 张运洲. 对我国特高压输电规划中几个问题的探讨[J]. 电网技术, 2005, 29(19): T11-T14.
- [8] 舒印彪. 中国直流输电的现状 & 展望[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1-2, 20.
Shu Yinbiao. Present status and prospect of HVDC transmission in China[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 1-2, 20(in Chinese).
- [9] 浙江大学直流输电电研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- [10] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [11] 马为民. ± 800 kV 特高压直流系统换流器控制[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 71-74.
Ma Weimin. Converter control in ± 800 kV DC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 71-74(in Chinese).
- [12] 陶瑜, 马为民. 特高压直流输电系统的控制特性[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 1-4.
Tao Yu, Ma Weimin. Control characteristics of UHVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 1-4(in Chinese).
- [13] 石岩, 韩伟, 张民, 等. 特高压直流输电工程控制保护系统的初步方案[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 11-15.
Shi Yan, Han Wei, Zhang Min, et al. A preliminary scheme for control and protection system of UHVDC project[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 11-15(in Chinese).
- [14] 李峰, 李兴源. 特高压直流输电相关问题的综述[J]. 四川电力技术, 2006, 29(6): 13-19.

收稿日期: 2007-04-18.

作者简介:

张民(1974—), 男, 硕士, 工程师, 从事直流输电系统控制保护、电力系统分析与控制等方面工作, E-mail: min-zhang@sgcc.com.cn;

石岩(1963—), 男, 高级工程师, 从事高压直流输电工程咨询、成套设计和电力系统实时仿真研究工作, E-mail: yanshi@sgcc.com.cn.

(责任编辑 马晓华)