

不同直流电流转移方案下特高压直流分层系统输出交互特性研究

周振凯¹, 付蓉¹, 宋少群², 黄文英², 陈峰², 覃杰³

(1. 南京邮电大学自动化学院, 江苏 南京 210003; 2. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350000; 3. 北京华电博瑞电力自动化工程技术有限公司, 北京 102600)

摘要: 由于特高压直流分层系统在逆变侧高低端换流器控制的相对独立, 在实际的运行过程中会发生控制方式切换, 需要研究不同策略下交直流的相互影响特性, 选择合适的直流电流转移方案。首先基于直流控制系统及分层接入系统的模型, 分析了在不同直流控制权转移方案下特高压分层直流的Ud-Id特性曲线。然后, 基于直流分层接入模型分析了不同的转移方案对受端各层换流母线电压及输出功率的影响。研究表明: 不同直流电流转移方案下直流的功率输出影响差异较小, 但受端各层换流母线电压的变化差别较大。最后, 在提升直流功率时, 根据各层交流系统状态给出合适的电流控制转移方案。

关键词: 特高压; 直流输电; 分层接入; 控制方式; 运行特性

Study on the output interaction characteristics of UHVDC layered system under different DC current transfer schemes

ZHOU Zhenkai¹, FU Rong¹, SONG Shaoqun², HUANG Wenying², CHEN Feng², QIN jie³

(1. Automation college of Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350000, China; 3 Beijing Huadian Borui Power Automation Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: Due to the relative independence of the converter control in the high and low end of the inverter side of the UHVDC hierarchical system, in the actual operation process, the control mode will be switched. It is necessary to study the interaction characteristics of AC and DC under different strategies and select the appropriate DC current transfer scheme. The model of DC control system and layered access system is proposed firstly. The Ud-Id characteristic curve of UHV stratified DC under different DC control transfer schemes is analyzed. And then based on the DC hierarchical access model, the influence of different transfer schemes on the voltage and output power of each layer of converter bus at the receiving end is analyzed. The results show that the influence of DC power output on different DC current transfer schemes is small. However, the voltage variation of each layer of converter bus at the receiving end is quite different. Finally, when the DC power is increased, the appropriate current control transfer scheme is given according to the state of each layer of AC system.

Key words: UHV; HVDC; transmission layered access; control mode; operational characteristics

0 引言

远距离特高压直流送电, 因其具有输送

容量大、送电距离长、线路损耗低和占用土地少的特点, 所以在解决我国新疆、西藏电的输送问题中起着重要作用^[1-3]。由此极大地

国家自然科学基金重点资助项目(61633016)

促进了我国特高压交直流技术的发展^[4-7]。由于直流输电容量的增加和直流落点越来越密集,会使得现有的直流接入方式不利于交流系统的疏散。为此,文献[8]提出采用分层方式接入交流电网,相比于传统的1 000 kV单层接入方式,分层接入的投资更为节省。

目前对直流分层接入技术的研究主要集中在设备的研制、控制系统的设计和交直流系统运行特性的分析上。文献[9]依托两地特高压直流工程的受端换流站,分析了阀组机械结构,论证了分层技术在装置层面的可行性。在直流控制系统设计方面,文献[10-11]根据分层直流在受端会连接到两个不同电压等级交流电网的特点,提出需要在逆变侧高低端阀组间配置电压测量装置,从而方便受端阀组的独立控制。文献[12]在此基础上设计了逆变侧各换流器的附加功率-电压控制器,并提出最优功率比。在系统运行特性方面,文献[13]以实际接入工程为研究对象,完善了分层接入时短路比的定义,为直流的规划提供了指导。

分层直流在拓扑结构上相当于多端直流,其控制方式和运行特性较传统的单层接入有所区别。最明显的是,直流运行过程中电流控制权的转移出现了多种可能。本文基于直流系统的准稳态模型,得出送受端电压变化时各种可能的运行方式会受电流控制方式影响的结论;研究了直流实际输送功率与送受端交流系统电压的关系。

1 特高压直流分层接入方式下直流系统数学模型

1.1 接线方式

本文所述的接线方式与传统的直流接入方式在设备配置上并无大的不同,都是由换流器、换流变压器、直流线路和滤波设备构成^[14]。区别在于:受端换流站由连接到一条换流母线变成了连接到两个不同交流系统的换流母线,具体如图1所示。图1中,逆变侧

串联的两个换流器高端连接到了500 kV层交流系统,低端与1 000 kV层系统相连。

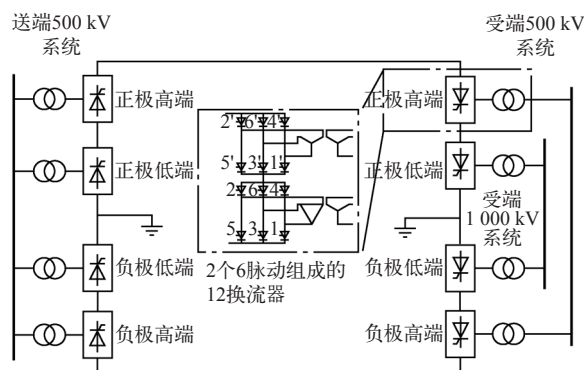


图1 特高直流分层接入方式接线

Fig. 1 Diagram of UHVDC hierarchical connection mode

1.2 换流器的模型

把换流器当作一个输入输出单元,得到其模型如图2所示。

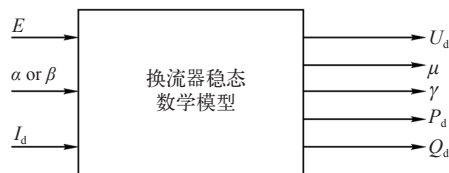


图2 换流器的输入输出关系

Fig. 2 Input and output of a converter

图2中, 3个输入变量为: ①折算至换流器侧的换流母线电压 E (kV); ②触发滞后角 $\alpha(^{\circ})$ 或触发超前角 $\beta(^{\circ})$; ③直流线路上的电流 I_d (kA)。5个输出变量分别为: ①直流电压 U_d (kV); ②换相角 $\mu(^{\circ})$; ③熄弧角 $\gamma(^{\circ})$; ④与交流系统交换的有功功率 P_d (MW, 注入交流系统为正); ⑤与交流系统交换的无功功率 Q_d (MW, 注入交流系统为正)。

规划中的直流输电工程将采用图1的受端分层接入方式。根据图2, 直流系统与交流系统的交互关系可以用图3来描述。

关于交直流混合系统潮流计算及暂态稳定计算, 换流器普遍采用的平均值模型由以下代数方程决定

$$E_{acr} = n_r U_{acr} \quad (1)$$

$$U_{dr} = N_r \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{acr} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_{cr} I_d \right) \quad (2)$$

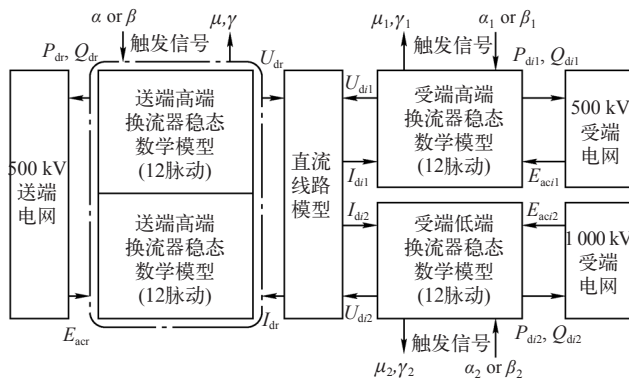


图3 特高压直流分层接入方式下各换流器的约束关系

Fig. 3 Constraint relation of converters under UHVDC

hierarchical connection mode

$$E_{aci1} = n_{i1} U_{aci1} \quad (3)$$

$$U_{d1} = N_{i1} \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{aci1} \cos \gamma_1 - \frac{3}{\pi} X_{ci1} I_d \right) \quad (4)$$

$$E_{aci2} = n_{i2} U_{aci2} \quad (5)$$

$$U_{d2} = N_{i2} \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{aci2} \cos \gamma_2 - \frac{3}{\pi} X_{ci2} I_d \right) \quad (6)$$

$$P_{dr} = U_{dr} I_d \quad (7)$$

式中, U_{dr} 为整流侧直流电压; U_{d1} 、 U_{d2} 为逆变侧高端逆变器、低端逆变器的直流电压; N_r 为整流站换流器6脉动换流阀的个数; N_{i1} 、 N_{i2} 分别为逆变站高端换流器6脉动换流阀的个数; E_{acr} 为整流侧换流母线电压; E_{aci1} 、 E_{aci2} 分别为逆变侧高端换流母线电压; U_{aci1} 、 U_{aci2} 分别为受端500 kV系统和1 000 kV系统电压; n_{i1} 、 n_{i2} 分别为高端换流变压器电压比; γ_1 、 γ_2 分别为高端逆变器的熄弧角; X_{ci1} 、 X_{ci2} 分别为高端换流器换流变压器漏抗; I_d 为直流线路电流。

1.3 直流系统控制及线路模型

直流的控制系统是按层来控制的, 通常可分为三层: 第一层为主控制(或双极控制), 是调度中心用来控制直流输送的功率(P_{set}); 第二层为极控制, 接收主控制的电流控制指令(I_{set})生成阀组角度指令(α_{ord}); 第三层为阀组控制。

高低端两个逆变器的独立控制使得逆变侧极控制层的性能需要下放到阀组控制层, 即由各逆变阀组分别接收主控制的电流信号

形成角度信号, 再产生各自的触发信号。分层接入方式下直流控制系统如图4所示。图4中, I_{dcs} 为主控制极计算得出的电流期望值; I_{ord} 为经电压限流判断后的电流给定值; U_{d1} 和 U_{d2} 分别为高低端两个逆变器的直流电压。

采用上述所设计的控制层次, 正常工况时, 整流侧控制直流电流, 逆变侧高低端逆变器经过定电压或者是定熄弧角的方式控制各自电压, 此时定电流控制器不会被选中。一旦整流侧不能控制直流线路电流, 则直流电流的控制权需要向逆变侧转移, 由逆变侧实现对直流线路电流的控制。因为两者的相对独立性, 直流电流控制权从整流侧向逆变侧转移时, 是先转移到高端逆变器或低端逆变器还是由高低端逆变器来共同控制, 这是需要考虑的。图4给出的控制框图是直流电流控制权先向高端逆变器转移的方案, 对于其具体实现以及其他的电流控制权转移方案, 在下文将有详述。

直流网络系统由平波电抗器、直流滤波器和传输线路组成。对于探讨交直流系统的机电暂态过程来说, 考虑到直流控制系统的动态调节进程迅速, 同时也为了简化分析, 假设直流送端和受端的电压关系满足

$$U_{dr} = U_{d1} + U_{d2} + R_d I_d \quad (8)$$

式中, R_d 为直流线路电阻。

2 不同控制策略下直流输送功率特性分析

送受端换流母线电压变化时, 分层直流的整流器和逆变器的控制方式会发生切换。即当整流侧的换流器触发角达到最小约束, 且不能控制直流线路电流时, 直流电流的控制权会向逆变侧转移。从上文可知, 直流电流转移可以有以下三种方案。

(1) 方案1: 高端逆变器优先

当整流站达到其最小触发角约束后, 电流控制权会先转移至高端逆变器; 如果高端逆变器也到达了其控制极限, 则直流电流控制权继续转移到低端逆变器。

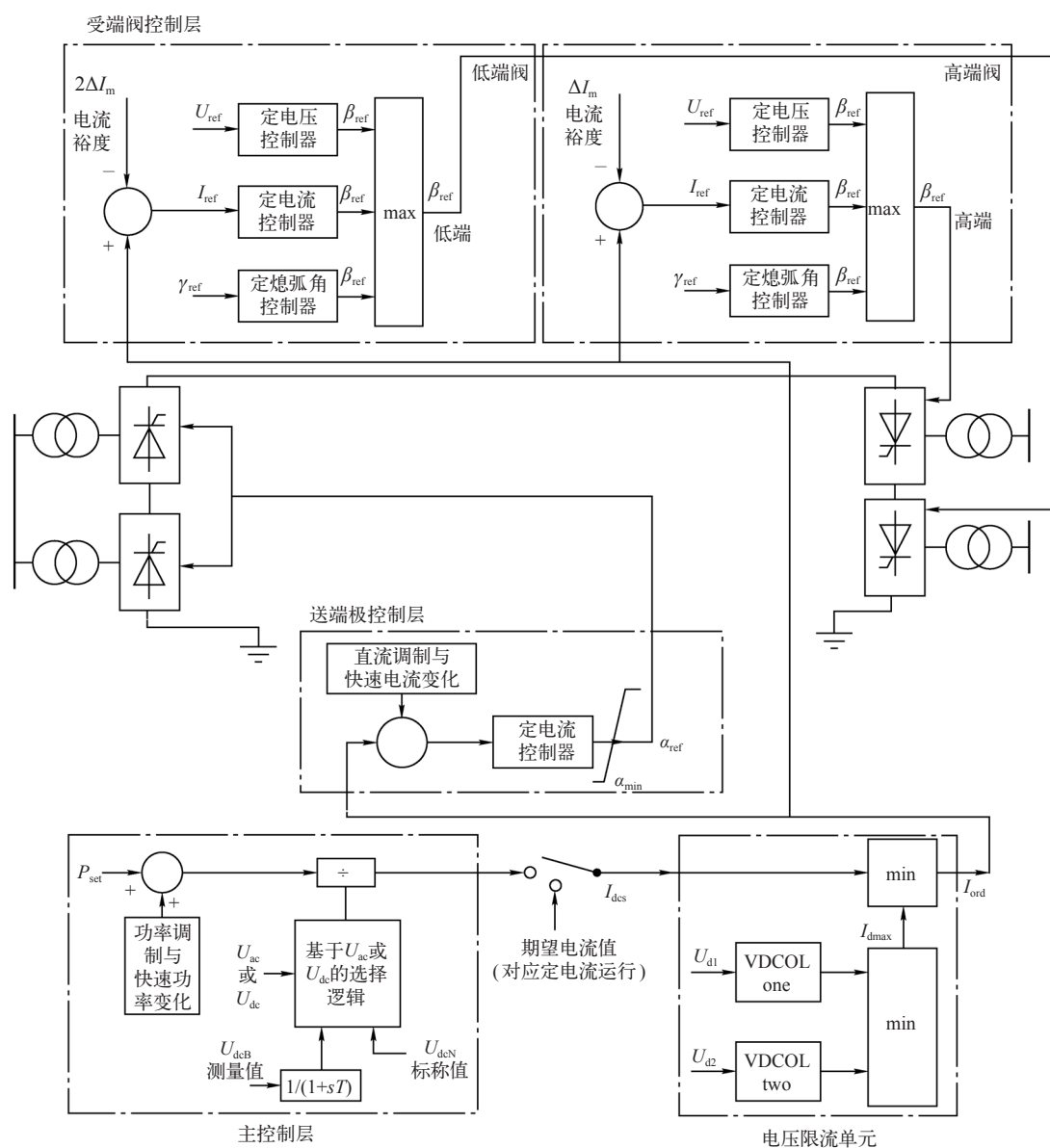


图4 分层接入方式下直流控制系统

Fig. 4 DC control system under UHVDC hierarchical connection mode

具体控制框图如图5所示,其中高端逆变器的电流给定为 $I_d - \Delta I_d$,低端逆变器的电流给定与高端的相差一个 ΔI_d ,为 $I_d - 2\Delta I_d$ 。

一般用 $V-I$ 曲线的方法分析直流的准稳态特性^[15]。该转移方案下直流系统有如下几种可能的运行方式, $V-I$ 曲线如图6所示。

方式1:整流侧定电流-高端逆变器定熄弧角-低端逆变器定熄弧角方式。当受端交流电压相对较高时,整流站可以通过调整触发角 α ,使直流线路电流跟随电流的给定值

I_{d0} ,运行点见图6中的A。此时 $I_d = I_{d0}$,整流侧的直流电压由逆变侧来决定,即

$$U_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} (N_{i1} E_{aci1} \cos \gamma_{1min} + N_{i2} E_{aci2} \cos \gamma_{2min}) - \left(\frac{3}{\pi} N_{i1} X_{ci1} + \frac{3}{\pi} N_{i2} X_{ci2} - R_d \right) I_d \quad (9)$$

方式2:整流侧 α_{min} 限制-高端逆变器电流偏差控制-低端逆变器定熄弧角方式。当整流侧母线电压相对较低,整流站触发角达到 α_{min} 限度,且高端逆变站电流偏向控制起作用

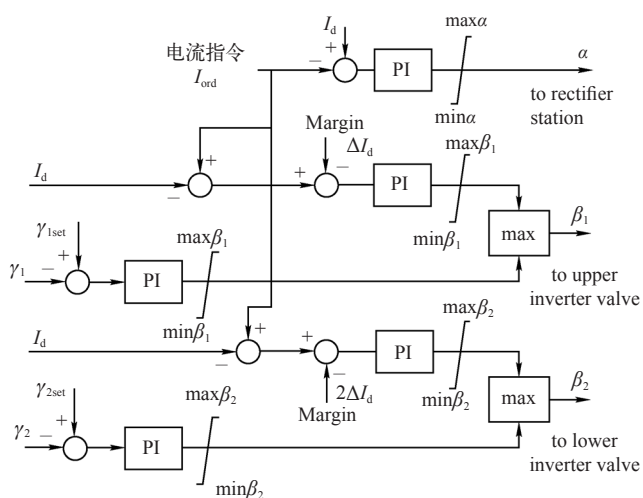


图5 高端逆变器优先方案下的控制框图

Fig. 5 Control block diagram of upper inverter

用时,运行点见图6中B点。B点由整流站 $\alpha_{\min}$ 限制和高端逆变器电流偏差控制两条曲线相交得到,此时,整流侧的直流电压满足

$$U_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} N_r E_{acr} \cos \alpha_{\min} - \frac{3}{\pi} N_r X_{cr} I_d \quad (10)$$

又因直流线路的约束,即

$$U_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} (N_{i1} E_{aci1} \cos \gamma_{1\min} + N_{i2} E_{aci2} \cos \gamma_{2\min}) - \left(\frac{3}{\pi} N_{i1} X_{ci1} + \frac{3}{\pi} N_{i2} X_{ci2} - R_d \right) I_d \quad (11)$$

同时存在电流偏差控制,即

$$\gamma_1 = \gamma_{1\min} + K_{c1} (I_{d0} - I_d) / I_{d0} \quad (12)$$

由式(10)~式(12)三个方程可以求出当前系统的直流电流 I_d ,进而可以求出直流的输送功率 P_r 。

方式3:整流侧定功率、逆变器定熄弧角方式。当整流侧母线电压进一步下降时,同时高端逆变器由电流偏差控制进入到定电流控制,运行点见图6中的C点。考虑 $\Delta I=0.1$,则 $I_d=0.9I_{d0}$ 。此时,整流侧电压 U_{dr} 同样可以通过式(10)求出,进而求得直流输送功率 P_r 。

若整流侧换流母线电压发生降落现象,高端逆变器也无法控制直流电流为给定值,则直流电流的控制权会继续向低端逆变器转移。但是此时直流系统电压已经降得很低,

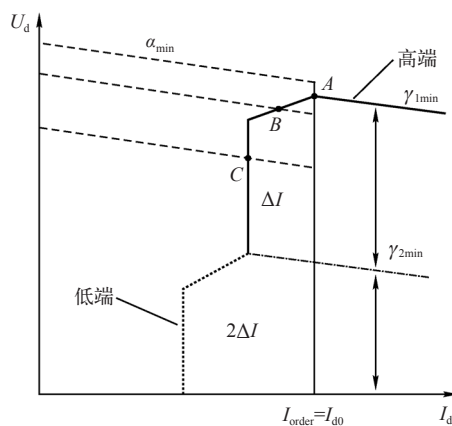


图6 高端逆变器优先方案下的特性曲线

Fig. 6 Characteristic curve of upper inverter

直流的输送功率也非常低。

对于直流分层接入系统,交直流系统的参数如下表所示。在低端逆变器所连换流母线电压固定为1.2(pu),1.0(pu)和0.8(pu)的情况下,考虑送端和高端逆变器所连换流母线电压变化时,直流系统的方式切换和功率输出如图7所示。

表 交直流系统参数

Tab. Parameters of the AC/DC system

$n_i=0.341\ 0$	$n_{i1}=0.321\ 9$	$n_{i2}=0.161\ 0$
$N_i=4$	$N_{i1}=2$	$N_{i2}=2$
$X_{cr}=3.845\ W$	$X_{ci1}=3.427\ W$	$X_{ci2}=3.427\ W$
$\alpha_{\min}=5^\circ$	$\gamma_{1\min}=18^\circ$	$\gamma_{2\min}=18^\circ$
$U_{acr,base}=525\ kV$	$U_{aci1,base}=525\ kV$	$U_{aci2,base}=1\ 050\ kV$
$U_{dN}=6.25\ kA$	$U_{di1,base}=400\ kV$	$U_{di2,base}=400\ kV$

从图7看出,直流功率送出与送受端的电压均相关,如果送端电压过低,则受端电压无论多高都不能保证直流功率的送出。送受端的电压提高均有利于直流功率送出,但是不同方式下送受端单位电压的提高得到功率提升量不一样,在方式1提升受端电压对提升功率更有效,在方式2和方式3提高送端电压对提升功率更有效。

(2) 方案2:低端逆变器优先

当整流站达到其最小触发角约束后,电

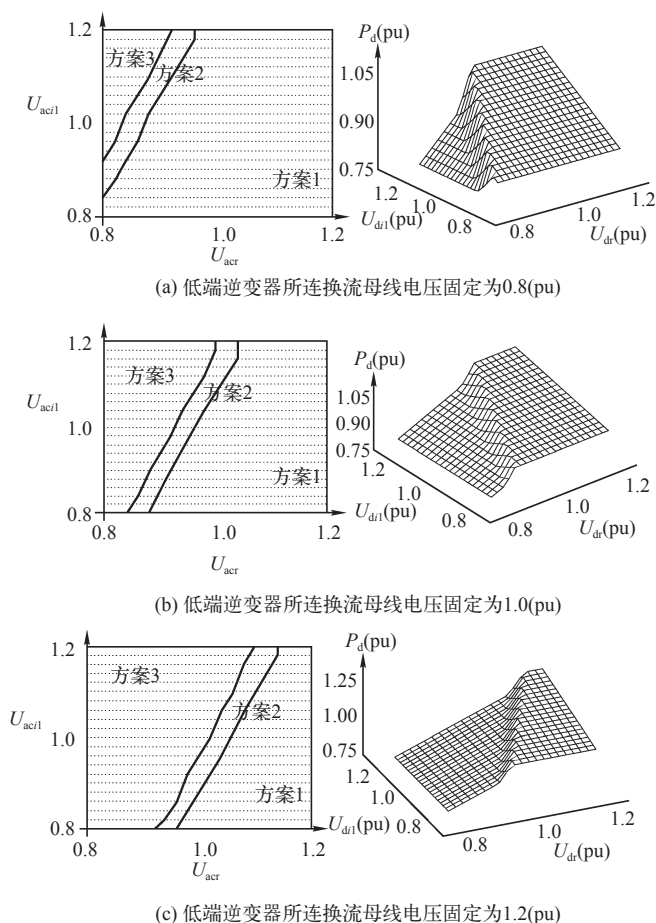


图7 方案1换流母线电压变化时直流系统的方式切换和功率送出
Fig. 7 Change of mode and power under case one considering converter-bus voltage fluctuation

流控制权先转移到低端逆变器；如果低端逆变器也到达了其控制极限，则直流控制权继续转移到高端逆变器。具体控制框图如图8所示，其中低端逆变器的电流给定与高端的相差一个 ΔI_d ，为 $I_d - 2\Delta I_d$ 。

转移方案2与方案1大致相同，只不过是优先使用低端逆变器控制直流电流，其 $V-I$ 曲线如图9所示。因为高低端逆变器在结构方面是对称的，对低端逆变器的分析会得到与方案1相同的结论，因此不再重复。

(3) 方案3：高低端逆变器共同控制

当整流站达到其最小触发角约束后，高低端逆变器可以利用定电流控制器共同承担控制电流的任务，具体控制框图如图10所示。

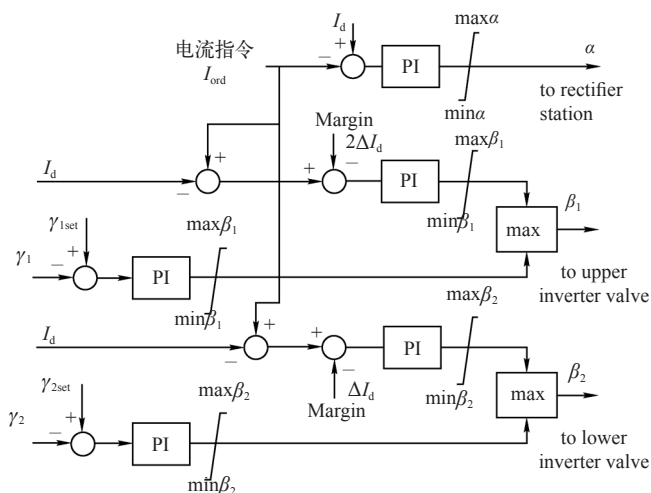


图8 低端逆变器优先方案下的控制框图

Fig. 8 Control block diagram under lower inverter

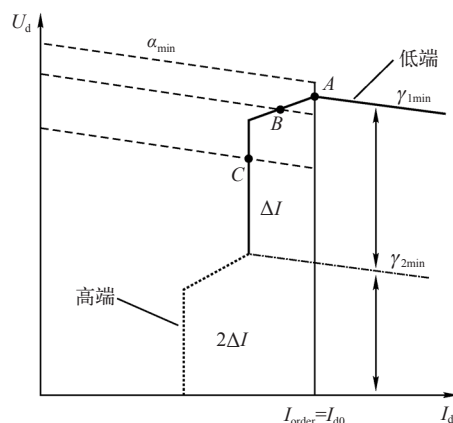


图9 低端逆变器优先方案下的特性曲线

Fig. 9 Characteristic curve under lower inverter

同样，该转移方案下有如下几种可能的运行方式， $V-I$ 曲线如图11所示。

方式1：整流侧定电流—高端逆变器定熄弧角—低端逆变器定熄弧角方式。当整流侧交流电压较高时，能够维持直流电流跟随电流整定值 I_{d0} ，运行点见图11中的A。此时 $I_d = I_{d0}$ ，整流侧的直流电压同样可以由式(9)决定，其与受端换流母线电压有关。

方式2：整流站 α_{min} 限制—高端逆变器电流偏差控制—低端逆变器电流偏差控制方式。当送端换流母线电压相对变低使整流站达到 α_{min} 限度，而且高低端逆变器电流偏差控制起作用时，运行点如图中B所示。此时，整

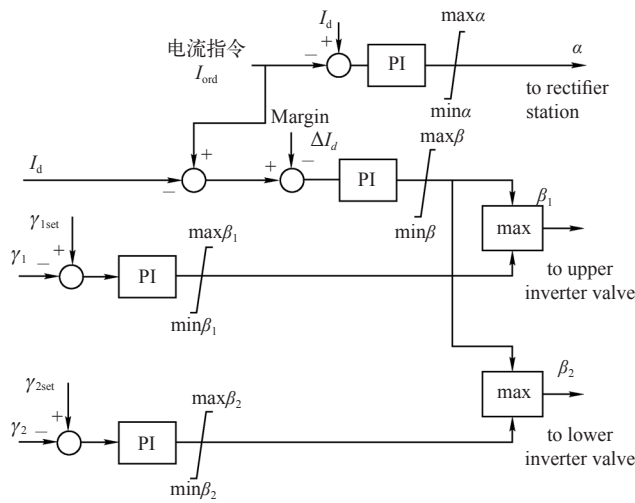


图10 高低端逆变器共同控制方案下的控制框图

Fig. 10 Control block diagram under upper and lower inverters cooperating

流侧的直流电压同样满足式(10)。

又由于

$$U_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} (N_{i1} E_{aci1} \cos \gamma_1 + N_{i2} E_{aci2} \cos \gamma_2) - \left(\frac{3}{\pi} N_{i1} X_{ci1} + \frac{3}{\pi} N_{i2} X_{ci2} - R_d \right) I_d \quad (13)$$

同时存在电流偏差控制, 即

$$\gamma_1 = \gamma_{1min} + K_{c1} (I_{d0} - I_d) / I_{d0} \quad (14)$$

$$\gamma_2 = \gamma_{2min} + K_{c2} (I_{d0} - I_d) / I_{d0} \quad (15)$$

由式(10)、式(13)、式(14)和式(15)可以求出当前系统的直流电流 I_d , 进而可以求出直流的输送功率 P_r 。

方式3: 整流站 α_{min} 限制—高端逆变站定电流—低端逆变站定电流方式。当送端换流母线电压继续降落, 而且高低端逆变器切换到定电流控制时, 运行点见图11中的C点。考虑 $\Delta I = 0.1$, 则 $I_d = 0.9 I_{d0}$ 。此时, 通过式(10)可以求得整流侧电压 U_{dr} , 进而求得直流功率 P_r 。

需要注意的是: 在方式2和方式3之间, 可能还会存在一个短的过渡过程, 即一个逆变器处在定直流电流控制方式, 另一个逆变器处在电流偏差控制方式。由于该过程比较短, 这里假设高低端逆变器可以一同进入定

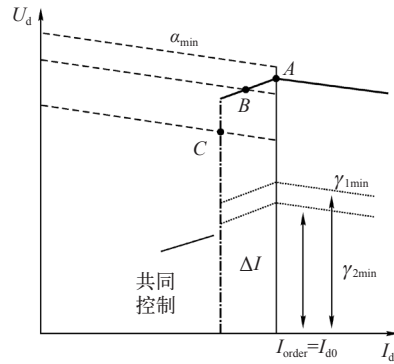


图11 高低端逆变器共同控制方案下的特性曲线

Fig. 11 Characteristic curve under upper and lower inverters cooperating

直流电流的控制方式。

同样在上表所给的系统参数下, 在低端换流器换流母线电压为1.2(pu), 1.0(pu)和0.8(pu)时的功率送出图, 如图12所示。

图12同样可以得出与图7相一致的结论, 不过图12的方式2区域有可能更大, 避免了直流系统从方式1向方式3转换时大的功率跌落。

3 交直流混联系统功率电压交互特性

在电力系统中, 直流功率能否送出还受到交流系统状态的影响, 其中交流系统的强度是最需要考考虑的。由于系统采用了准稳态模型, 所以各层的交流系统可以用恒定电动势串联固定阻抗来表征。承担控制直流线路电流任务的换流器无功消耗会增加得比较明显, 所以直流电流控制权转移策略的不同对受端各层换流母线电压的影响是不一样的。

实际工程中, 500 kV与1 000 kV系统存在耦合关系。如果耦合为正无穷, 则分层直流与传统的两端直流一样; 如果耦合为零, 则两个交流系统独立, 最能反映分层系统的特点。由于是想研究直流受端两个落点的强度与直流之间的相互影响, 同样也为了简化问题分析, 假设分层直流系统接入到两个零耦合的交流电网中, 如图13所示。由于各层交流系统的系统阻抗 Z 不一样(换算到标么值下), 两个交流系统的强度有所差别, 这里500 kV层的交流系统强度较大。在上文提及

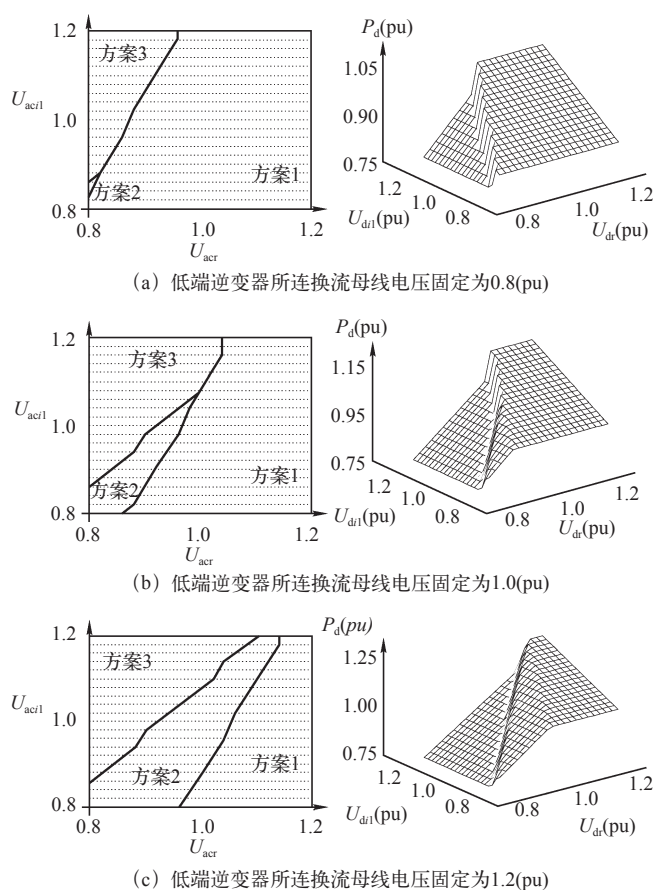


图12 方案3下换流母线电压变化时直流系统的方式切换和功率送出
Fig. 12 Change of mode and power under case three considering converter-bus voltage fluctuation

三种不同电流控制权转移方案下,增加直流线路电流给定,分析线路功率输出受各层母线电压变化影响的情况。

上述模型是在电磁暂态仿真软件PSCAD中搭建的。送端500 kV系统的短路比为3.8,短路阻抗 $7.06\ \Omega$;受端500 kV层系统短路比为6.6,短路阻抗 $7.72\ \Omega$;受端1 000 kV层系统短路比为4.4,短路阻抗 $49.35\ \Omega$ 。系统的初始状态为上述方式1;整流侧换流母线电压为518 kV,逆变侧500 kV层换流母线电压为505 kV,逆变侧1 000 kV层换流母线电压为1 042 kV。

受端逆变器不同电流控制权转移方案下,直流输送功率随直流电流的变化如图14所示。由图14中可以看出,直流功率没有随着直流电流的增加一直增大,这是因为有功输送

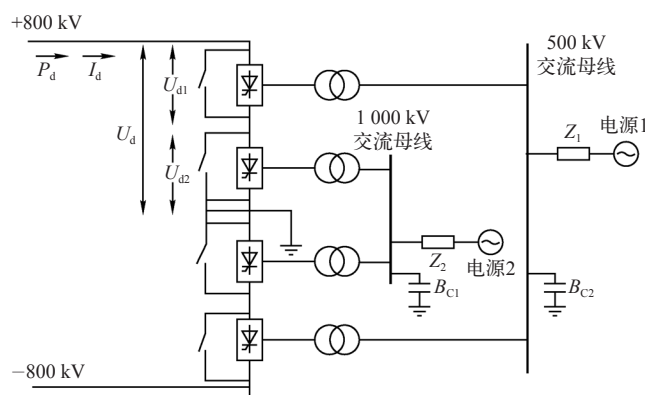


图13 分层接入方式下的交直流混连系统
Fig. 13 AC/DC hybrid system under UHVDC hierarchical connection mode

的增加会导致换流器无功吸收的增加。这使换流母线电压降低,阻碍了直流送出功率的进一步增加。不管是高端优先、低端优先还是高低端共同控制的方案,直流的最大送出功率没有太大的不同,都为1.1(pu)左右。

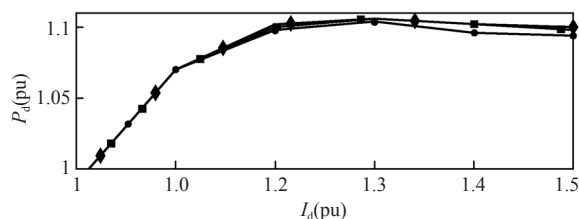


图14 直流送出功率随线路电流变化情况
Fig. 14 Variation of power with DC-line current

受端逆变器不同电流控制权转移方案下,高低端逆变器的熄弧角随直流电流给定的变化如图15所示。由图15可以看出,在直流电流给定达到1.1(pu)以上时,转移方案1的高端逆变器的熄弧角增加,进入了定电流控制方式,低端逆变器的熄弧角为最初的给定值 19° ,一直处于定熄弧角控制方式;转移方案2同方案1相似,是低端逆变器的熄弧角增加,进入了定电流控制方式,高端逆变器的熄弧角为最初的给定值 19° ,一直处于定熄弧角控制模式;转移方案3的高低端逆变器的熄弧角都有增加,一同进入了定电流控制方式。由此看出,随着直流电流给定的增加,最终都是逆变侧控制直流电流,系统进入图

7或者图12所示的方式3区域。在方式3区域中,直流功率的送出量基本取决于送端系统电压,这能解释图14不同方案下,直流功率输出大体相同的现象。

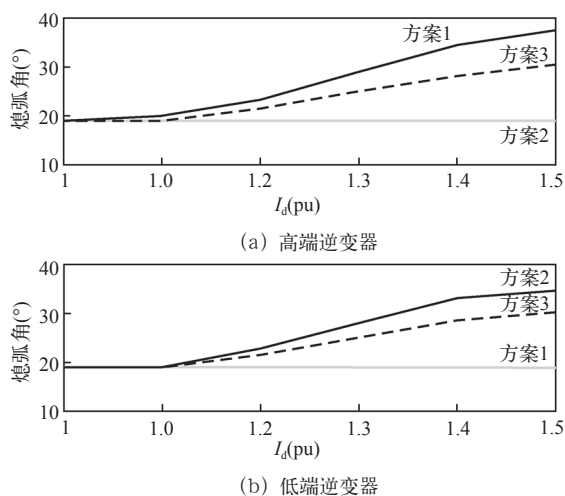


图15 熄弧角随电流变化

Fig. 15 Variation of extinction angle with DC-line current

不同电流控制权转移方案下,高低端逆变器的熄弧角变化和受端各层换流母线电压变动都不一样。较大的熄弧角会影响所在层换流母线电压。图16为各层换流母线电压随电流变动的情况。当优先使用低端逆变器控制直流电流时,低端逆变器会向所连系统吸收大量无功,由于1 000 kV层交流系统相对较弱,其换流母线电压跌落会比较明显,图中可以看出已跌落至0.9(pu)以下;当优先使用高端逆变器控制直流电流时,由于500 kV层系统相对较强,其换流母线电压跌落没前者明显;当使用高低端逆变器共同控制直流电流时,数据更加清晰。所以,在进行直流功率提升时,需要根据各层交流系统强弱选择合适的电流控制权转移方案。通常,较强的交流系统所连的逆变器应该优先承担控制直流电流的职能。

4 结束语

1) 分析了特高压直流分层系统直流输出功率与受端电压、送端电压交互影响的特性。

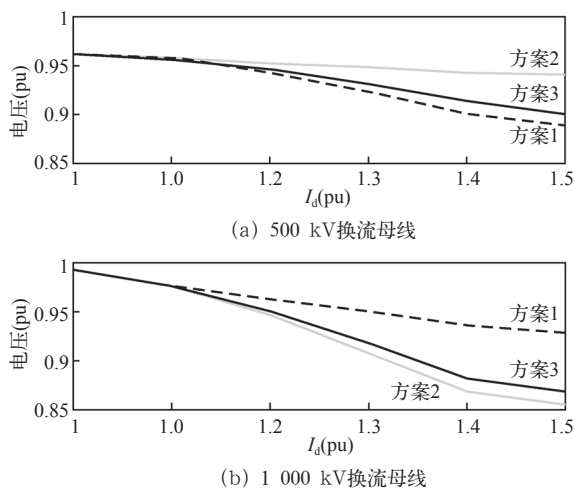


图16 换流母线电压随直流线路电流变化

Fig. 16 Variation of converter-bus voltage with DC-line current

2) 提出了特高压直流分层系统逆变侧高低端逆变器独立控制时,高端逆变器优先、低端逆变器优先以及高低端逆变器共同控制三种直流控制权的转移方案。

3) 通过分析不同转移方案的输出功率,提出在直流功率提升时,需要根据交流系统状态选择合适的电流控制转移方案,建议两层中较强的交流系统所连的逆变器优先控制直流电流,以合理分配潮流,提高受端系统电压支撑水平。

参考文献

- [1] 刘振亚,舒印彪,张文亮,等. 直流输电系统电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 1-8.
- [2] 付蓉,周振凯,汤奕,等. 特高压直流分层接入方式下换流母线电压的稳定性[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4103-4111.
- [3] 王旌,韩民晓,姚蜀军,等. 特高压直流输电分极接入运行特性分析[J]. 电力建设, 2016, 37(10): 54-60.
- [4] 郭小江,马世英,申洪,等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 107-115.

- [5] 赵腾, 张焰, 叶冠豪, 等. 多回特高压直流分层馈入模式下交直流混联系统的稳态特性分析[J]. 电力自动化设备, 2016(8): 157-164.
- [6] 付蓉, 孙勇, 万秋兰, 等. 一种新的基于分组动态规划法的交易模型[J]. 高电压技术, 2005(10): 73-76.
- [7] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风, 光, 火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [8] 刘振亚, 秦晓辉, 赵良, 等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 1-7.
- [9] 杨媛, 杜晓磊, 付颖, 等. 特高压直流工程受端分层接入交流电网方式下阀厅概念设计[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2224-2234.
- [10] 李少华, 王秀丽, 张望, 等. 特高压直流分层接入交流电网方式下直流控制系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2409-2416.
- [11] 吴彦维, 李晔, 陈大鹏, 等. 10 000 MW特高压直流工程受端分层接入交流电网方式下直流控制系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 108-113.
- [12] 郭龙, 刘崇茹, 负飞龙, 等. $\pm 1\ 100\text{ kV}$ 直流系统分层接入方式下的功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2015(11): 24-30.
- [13] 汤奕, 陈斌, 皮景创, 等. 特高压直流分层接入方式下受端交流系统接纳能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1790-1800.
- [14] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [15] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [16] 张志朝, 刘茂涛, 徐攀腾, 等. 基于PSCAD/EMTDC仿真平台的 $\pm 800\text{ kV}$ 特高压直流输电工程建模及仿真[J]. 电气应用, 2013, 32(增刊2): 536-541.



周振凯

作者简介

周振凯 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为直流输电。

付蓉 (1974—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源发电与智能电网安全稳定分析。

(收稿日期: 2018—10—23) **EA**