

两种可适用于分层接入的特高压直流输电控制系统

李 越¹, 刘崇茹¹, 赵云灏¹, 拾 杨²

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209)

Two Types of UHVDC Control System Suitable for Hierarchical Connection to AC Power Grid

LI Yue¹, LIU Chongru¹, ZHAO Yunhao¹, SHI Yang²

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

摘 要: 直流的分层接入方式将特高压直流输电线路接入不同电压等级电网, 作为一种新的网络结构, 其控制系统需要重新设计。本文结合传统的特高压直流输电控制系统详细分析了分层接入方式下特高压直流系统的控制系统, 并介绍了工程中广泛使用的两种技术路线, 据此设计了两种不同的特高压直流输电分层接入方式下的控制系统。基于 PSCAD\ EMTDC 的仿真平台, 本文针对两种控制系统建立了详细的仿真模型, 并分析了控制系统之间的差异。研究发现分层接入方式下逆变侧的控制系统较常规特高压直流输电控制系统有一定差异, 本文设计的控制系统均可以满足分层接入的方式下, 直流输电控制系统对于控制的要求。

关键词: 特高压直流输电; 分层接入方式; 控制系统

Abstract: As a new type of power grid mode, hierarchical connection mode makes UHVDC (Ultra High Voltage Direct Current) links connect to different voltage-level AC power system, and its control system is needed to be redesigned. Combining with the control system in traditional UHVDC system, the control system of UHVDC in the forms of hierarchical connection is analyzed, two kinds of technical ways are introduced, and two different control system of UHVDC with hierarchical connection are designed. Based on PSCAD\ EMTDC simulation platform, detail simulation model is built as to two kinds of control systems, and the differences between control systems are analyzed. The results show that the control system at the inverter side under hierarchical connection mode is greatly different to traditional UHVDC control system. The control system designed in this paper can meet the controlling requirement of UHVDC system under hierarchical connection mode.

Keywords: ultra high voltage direct current(UHVDC); hi-

erarchical connection mode; control system

0 引 言

随着越来越多的直流输电线路落成, 我国在直流输电的工程应用方面积累了大量经验, 并在新的技术领域上进一步探索。根据国家电网规划, 将新建内蒙古锡林浩特—江苏泰州特高压直流输电工程, 受端分层接入 500kV, 1 000kV 的交流电网^[1], 新型网络结构的控制系统需要进行更深一步的研究。目前主流的直流输电控制系统可分为定熄弧角控制技术路线与定直流电压控制技术路线^[2]。两种控制系统均在我国直流输电工程中大量使用, 工程实际经验表明两种控制系统均具有良好的控制响应特性, 且在故障下具有良好的抵御换相失败的能力^[3-5]。本文对两种直流输电控制策略的实现过程进行了详细的介绍。并参考这两种控制策略, 对分层接入方式下特高压直流输电的控制系统进行了分析对比。

1 特高直流输电系统控制结构

1.1 特高直流输电系统控制分层结构

±800kV 特高压直流输电系统的电气主接线形式与传统±500kV 直流输电不同, 采用两个 12 脉动换流器相串联的联结方式。而特高压直流输电对控制系统有更高的要求, 不同的 12 脉动换流器的控制系统既要保持相对独立, 又要完成它们之间的协调配合, 还要使特高压直流输电系统满足运行灵活性的要求^[6-8]。

1.2 特高压分层接入方式下的控制结构

特高压分层接入方式下,直流受端分别接入1000kV与500kV交流电网,送端接入500kV交流电网。其额定直流电压为 ± 800 kV,额定容量10000MW。分层接入方式下每个换流站都含有双极,每极由2个串联的12脉动换流器组成,每个12脉动换流器两端的直流电压为400kV。

由于分层接入方式下电气主接线形式与常规特高压直流输电系统主接线形式类似,其直流控制系统可以借鉴常规特高压直流输电控制系统的设计方案^[9]。但分层接入方式下受端的换流器接入不同电网,并各自采用不同的换流变压器,因此逆变侧容易受到来自不同电网的干扰,为实现不同受端换流器的独立控制,部分上层控制的功能将放到下层控制。此外为保证换流器的平衡运行,换流器之间需装设协调控制装置。

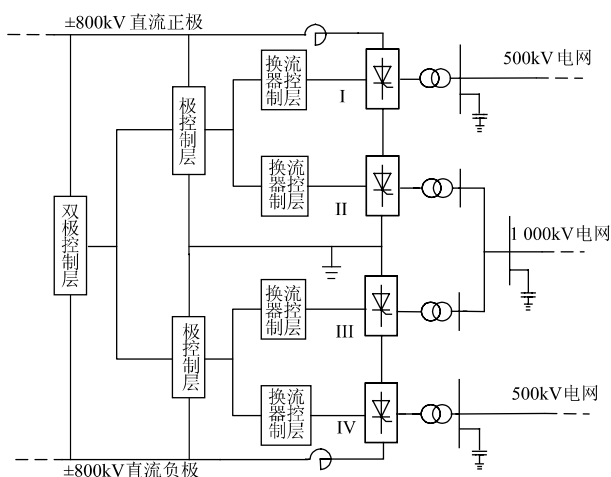


图1 特高压直流分层接入方式控制系统分层结构

2 分层接入方式的控制思路

2.1 两种主流控制方式及其应用

主流的直流输电控制系统分定熄弧角控制与定电压控制。不同技术路线的控制系统在换流器控制层中采用了不同的设计思路,其中定电压控制常采用闭环型的控制系统,通过采集一次系统相关电气量(电压测量值、电流测量值、熄弧角测量值),与参考值进行比较,通过闭环控制产生换流器的触发指令。它充分发挥了反馈的重要作用,排除了难以预料或不确定的因素,使校正行动更准确。

已经投产的天广、贵广等长距离直流工程采用定直流电压控制,常规运行方式下,逆变侧换流器

采用定电压控制策略,并与变压器分接头相互配合将逆变侧的熄弧角控制在 $15^{\circ}\sim 19^{\circ}$ 范围内,若熄弧角超出范围则调整分接头档位。

已投产的三广、三常、三沪等直流工程的控制系统采用定熄弧角控制^[2],该控制策略的逆变侧采用预测型定熄弧角控制,变压器分接头调节 U_{d0} 从而使换流器电压控制在设定值附近。预测型技术路线的控制系统,通过对一次系统相关电气量进行计算得到期望的控制指令值。目前,已投运的向上、锦苏、哈郑和溪浙4个特高压直流工程,触发指令统一由极层控制层发出,实现硬同步。但在分层接入方式下,由于接入不同电网的换流器相对独立,需将极控制中的直流电流,直流电压及熄弧角控制下放到阀组层,才能满足控制系统的控制要求^[10]。

2.2 分层接入方式下的双极控制层与极控制层

2.2.1 双极层功能

双极层主要接收运行人员的指令,控制全站传输的直流功率,并且对两极进行协调控制,产生极控制层所需要的极功率/电流参考值^[11]。与传统的UHVDC不同,采用分层接入方式后,双极层还需增加与两个交流电网相关的1000kV侧500kV侧双极控制功能,并且1000kV侧与500kV侧的稳控装置能分开响应^[10]。双极控制层的具体功能有:交流场开关连锁控制;直流场开关连锁控制;功率运行模式选择;功率定值相关计算;电流平衡控制;稳定控制功能;无功功率控制;换流变分接头协调控制;大地/金属运行方式转换;极隔离等。

2.2.2 极控制层功能

极控制层接收双极控制层的极电流/功率指令,完成与极相关的控制功能,产生换流器层控制所需要的直流电压、直流电流、熄弧角控制参考值^[11]。主要功能有:电流指令计算;过负荷限制;稳定控制;电流裕度补偿(CMC);站间通讯;换流变分接头控制;直流线路故障重启;空载加压试验启/停顺序控制;极解锁/闭锁控制;低压限流功能(VDCOL);保护性监视功能等;电压协调控制器等。

2.3 分层方式下采用定电压控制的换流器控制层

分层接入方式下换流器控制层接收来自极控制层的参考值,完成对12脉冲换流器的独立控制。控制器主要包括直流电压闭环控制器、直流电流闭环控制器、熄弧角闭环控制器等。控制器产生的触发

角并将其送到阀控接口单元^[12]。其中整流侧设置电压控制器与电流控制器，两套控制器共用一套 PI 调节器，并通过逻辑选择环节选择与其相适应的 PI 控制器参数。整流侧与逆变侧中不同逻辑的控制器间配合过程相似，图 2 为控制系统实现过程图。逆变侧还需增设最小熄弧角控制器以限制熄弧角^[13]，并且除电流控制器的电流定值需要保证一定的阈值外，为保证控制逻辑切换过程中直流系统有稳定的运行点，还需配置电流偏差控制(CEC)。该模块通常在电流偏差量大于 2% 时投入，偏差量达到 6% 时达到输出最大值。而对于整流侧的电压控制器也常设有 $U_{dcref} = 1.3U_{dcN}$ 的阈值，使整流侧在常规运行状态下选择电流控制器。

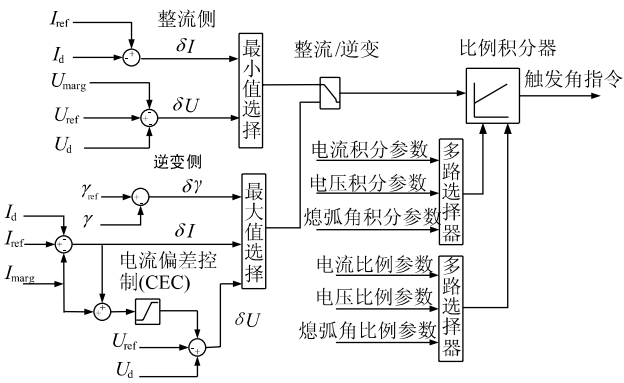


图 2 定直流电压控制换流器控制层

2.4 分层接入下采用定熄弧角控制的换流器控制层

熄弧角控制系统中配有起定熄弧角控制作用的最大触发角控制器(AMAX)。该控制器在常规的直流系统中常配置在极控制层，根据换流母线的电压与直流电流计算出换流器需要的触发角。直流分层接入后，由于受端分别接入不同电压等级的交流电网，熄弧角控制需要设置在换流器控制层中实现相对换流器的独立控制。换流器控制层中还包括电压调节器(VCAREG-Voltage Regulator)与电流控制器(CCA)。两者的本质为比例积分控制器，根据输入的偏差量进行调节。逆变侧的电压调节器主要用于降压运行方式，起到控制直流电压的作用。若直流电压快速上升，也可以配合变压器分接头对直流电压加以限制。电流控制放大器是最基本的输出单元，其输出为换流器的触发角指令值。三类控制器以限幅的方式相互联系，完成不同控制器之间的相互配合。详细的配合过程如图 3 所示。

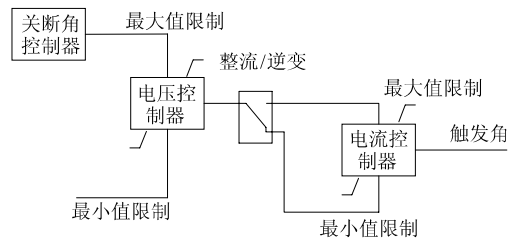


图 3 定熄弧角控制换流器控制层

3 不同控制中换相失败的应对策略

换相失败作为影响直流系统可靠运行的主要问题，两类控制系统设计了不同的措施加以应对。如果系统发生已经换相失败，不同技术路线的控制系统均能在故障后快速恢复。两者具有相似之处的同时也存在差异。

3.1 两种控制系统中的相同点

3.1.1 低压限流环节(VDCOL)

两种技术路线的低压限流装置的作用与原理基本相同，当故障状态下限制电流指令值，起到限制换流器无功消耗的目的。有利于故障状态下直流系统快速恢复^[14-15]。故障后，电流指令值受到限制迅速下降。定熄弧角控制中 AMAX 控制器中的补偿项变化输出的熄弧角指令值发生变化。而对于定电压路线，则作用于其中的电流控制器的电流给定值，影响其输出量。

3.1.2 换相失败预测环节(CFPRED)

换相失败预测功能在交流系统故障后启动，起到对换流器提前触发的功能。该环节由检测不对称短路故障的过零序检测，与检测对称故障的 α/β 转换检测构成^[16]。控制器的输出为两个环节中输出最大值。对于定熄弧角控制系统该环节作为 AMAX 控制器输出的一部分，而对于定电压控制系统则改变熄弧角控制器中的参考值。由于分层接入方式的特殊性，需对不同电压等级的电网分别装设换相失败预测环节，以保证系统故障时该功能的快速可靠启动。

3.1.3 最小换相裕度(AMIN)

最小换相裕度(AMIN)控制在交流系统发生故障后启动，并限制触发角最大值，避免换相失败及连续换相失败的可能性。控制环节计算允许的最小换相面积并与实际换相面积 AMIN_CALC 进行比较，若低于 AMINREF 则立即发出点火指令。

3.2 两种控制系统中的不同点

3.2.1 定电压控制系统中的最小熄弧角控制

故障发生后,直流电压降低,电压控制为提升电压将增大触发角,但减小了换相面积对换相过程不利。因此该技术路线加装最小熄弧角控制器,并当熄弧角跌落到一定程度时切换为熄弧角控制。熄弧角控制为实测型闭环控制系统,熄弧角测量值来自VBE系统的EOC信号与锁相的电压过零信号的比较。系统发生换相失败后,熄弧角控制将接管逆变侧的控制,测量值变为零,快速将触发角移动到上限以提高换相裕度,帮助故障后快速恢复。

3.2.2 定电压控制中的电流误差控制

定电压控制技术中配有电流误差控制环节,故障后逆变侧当向电流控制变侧切换时,电流误差控制启动。作为逆变站电压控制器的一部分,电流误差控制环节为控制系统特性提供一段斜率较小的直线,并有助于控制系统从电压控制向电流控制切换。

3.2.3 定熄弧角控制中的最大触发角控制

最大触发角控制器起定熄弧角控制的作用。故障后,逆变侧从熄弧角控制向电流控制方向转换,切换过程当中AMAX中补偿环节启动,为逆变侧特性曲线呈现正向斜率,有助于控制系统向电流控制方式进行切换。

4 不同控制策略控制系统仿真分析

基于PSCAD\EMTDC仿真平台,本文建立了采用两种技术路线下的仿真模型。通常直流系统的控制系统需要如下要求:

①当直流电流指令值变化量超过直流余裕时,直流系统响应时间不能大于110ms;变化量不超过电流余裕时,响应时间不能大于90ms。

②对于直流功率控制器,在交流系统暂态扰动期间使得直流系统具有恒电流控制特性。

③交流系统发生瞬时扰动导致直流系统的运行电压发生变化时,直流输送功率变化值的90%在1s之内恢复。

④直流系统运行于输送额定功率和最小功率之间的任意方式下,直流功率控制器的调节速度需满足一定要求。当功率指令值阶跃降低或阶跃增加时,90%的直流功率变化量须在150ms内达到,且其阶跃响应特性是时刻调整的。

⑤如果系统有需要,直流系统在整流或逆变侧的

交流系统故障后,其输送功率自故障切除瞬间起,恢复至故障前功率的90%时,不得超过140ms和120ms。

按照本文方法建立的仿真模型对如上指标进行了仿真测试,仿真结果表明两种直流控制系统模型均能满足上述指标要求,因而证明了两种控制系统配置的有效性和合理性。

4.1 不同控制策略的控制方式配合过程

为对比不同技术路线的控制方式切换过程及其响应情况,本文对比了1000kV侧换流母线电压缓慢跌落过程当中控制系统的响应过程,由于电压过程较为缓慢控制系统有足够的调整时间,所以均不会发生换相失败。由图4~图6分析可知,分层接入方式下500kV侧与1000kV侧的响应具有一定差异。图中实线为1000kV逆变侧定直流电压控制系统。图中a-b段为定电压控制。控制器减小熄弧角以保持直流电压不变。b-c-d-e-f-b逆变侧均为熄弧角控制,触发超前角进一步提升以保持逆变侧的熄弧角在期望值附近波动。其中曲线c-d, e-f段逆变侧低压限流环节启动。其中曲线d-e段整流侧低压限流环节启动,整流侧增大触发角限制直流电流。图中虚线为1000kV逆变侧定熄弧角控制系统。其中g-h段为定熄弧角控制,1000kV侧增大触发超前角保持熄弧角恒定,此阶段由于整流侧逆变侧低压限流环节均未启动,整流侧控制直流电流并维持故障前值不变。h-i, j-k段逆变侧低压限流环节启动,AMAX控制器中输入的直流电流参考值发生变化,熄弧角呈现减小趋势。i-j段整流侧低压限流环节启动,直流电流受到限制有所下降,此时逆变侧熄弧角控制中补偿项($I_0 - I_{dN}$)减小,熄弧角下降幅度减小。由图5可以看出。不同控制策

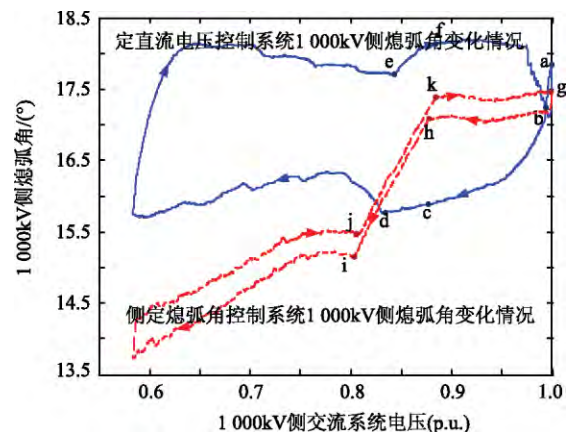


图4 1000kV侧熄弧角随换流母线电压变化情况

略下的 1 000kV 侧的触发超前角均增大，但由于控制器的调整目标不同，因此不同控制系统具有不同的调整效果。

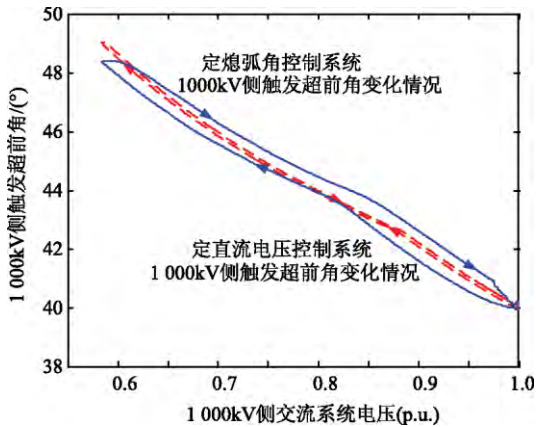


图 5 1 000kV 侧触发角随换流母线电压变化情况

图 6 为 500kV 侧熄弧角的变化情况。图中实线为 500kV 逆变侧采用定直流电压控制的结果。由于换流母线电压波动较小，逆变侧整个过程均采用定电压控制。曲线 b-c 段整流侧低压限流环节启动，直流电流受到限制导致逆变侧换流器消耗无功有所减小，换流母线电压轻微上升，逆变侧熄弧角上调控制电压保持恒定。虚线为 500kV 逆变侧采用定熄弧角控制控制系统。d-e 段整流侧控制直流电流保持故障前恒定，e-f 段逆变侧低压限流环节动作，逆变侧熄弧角控制指令值变化熄弧角略有下降。f-g 段整流侧低压限流环节启动，直流电流受整流侧控制呈现下降趋势，AMAX 控制器补偿量增大，熄弧角下降幅度有所减少。

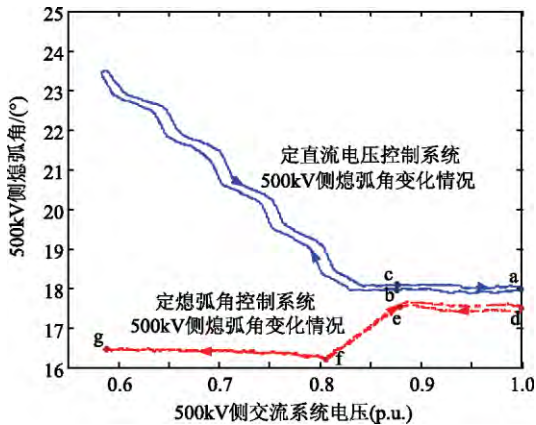


图 6 500kV 侧熄弧角随换流母线电压变化情况

4.2 系统故障分析

对两类模型分别进行交流系统故障时的仿真，

当 500kV 侧换流母线发生金属性的单相接地短路时结果如图 7，图 8 所示，故障持续时间为 0.1s。其中定熄弧角控制技术路线的仿真曲线如图 7 所示，定电压控制技术路线的仿真曲线如图 8 所示。

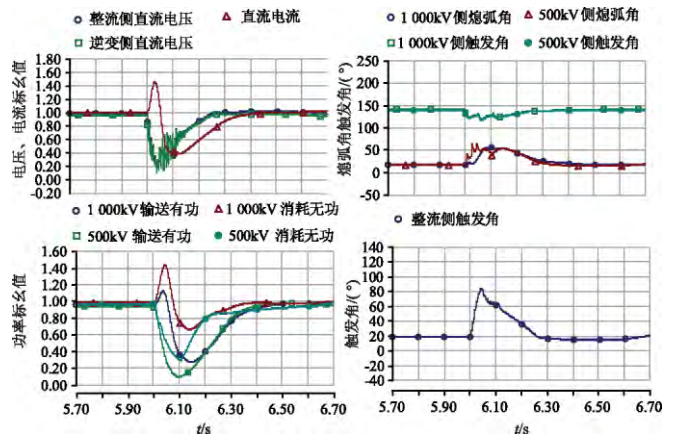


图 7 定熄弧角控制策略下发生单相接地故障仿真结果

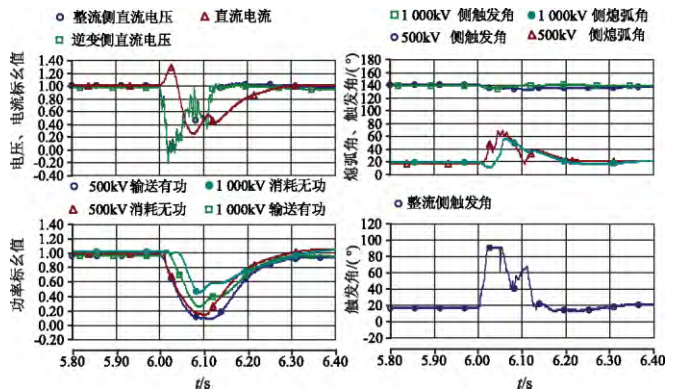


图 8 定电压控制策略情况下发生单相接地故障仿真结果

通过仿真结果的对比发现，两种控制系统在故障后具有相同的调节趋势，并且都能从故障后快速恢复。此外由于故障后直流电流的增大，导致了受端接入不同电网的换流器先后换相失败。故障发生后，两种控制策略虽然都通过提前触发的方式抵御换相失败，但由于故障较为严重，均未能成功抵御故障。故障清除后，使用两种控制的直流输电系统均能使直流功率快速恢复。

仿真图 7 采用定熄弧角的控制系统。在 6s 时，逆变侧直流电压下降，直流电流随之迅速增大导致换相重叠角快速增加，熄弧角的急速减小，发生换相失败。整流侧电流控制器迅速增大 α 以降低直流电流。故障清除后，逆变侧进入定电流控制一段时间后转为 AMAX 控制，最终恢复至故障前状态。

仿真图 8 采用定电压控制系统。故障发生后, 控制系统将由定电压控制快速切换至定熄弧角控制, 进而使整流与逆变侧控制器的调节趋势与图 7 相仿。图中 6s 时, 逆变侧触发超前角增大, 整流侧低压限流环节的启动, 增大触发角。此时由于输送功率的减少, 换流器所消耗的无功功率也相应下降。故障清除后, 逆变侧的控制将依次从定电流控制过渡至定熄弧角控制, 最终到输送功率接近稳定后切换至定电压控制。

5 结 论

本文对直流输电中已有的两种控制方式进行了总结, 并利用 PSCAD \ EMTDC 的仿真软件, 建立了以分层接入的特高压直流输电工程为背景的仿真模型, 对控制系统进行了仿真验证。两种控制系统的设计思路相似, 但实现过程具有一定的区别, 结论如下:

① 常规控制方式的不同将影响适应两种控制系统的主回路参数。为维持恒定的电压, 定电压控制在常规运行方式下, 熄弧角相对较大。从而需要更大容量的换流变压器以及额外的无功补偿装置, 但其熄弧角可以在一定范围内波动, 具有一定的灵活性。

② 两者的实现过程有差异, 定熄弧角控制是一种开环控制系统, 不同控制逻辑间的配合过程通常以限制相应输出限值的方式实现。而定电压控制是一种实测型的闭环控制系统, 不同控制逻辑间的配合过程通常以判断输入控制器偏差量大小确定。

③ 两种控制系统均能满足分层接入方式中对直流控制系统的各项要求, 仿真验证了在交流系统发生故障的情况下, 两类控制系统具有一致的调节趋势。

④ 分层接入的直流控制系统需完成对接入不同交流系统的换流器的相对独立控制, 因而需要将部分属于极控制层中的控制逻辑下放至换流器控制层中。

参 考 文 献

- [1] 刘振亚, 秦晓辉, 赵良, 等. 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.
- [2] 刘宝宏, 殷威扬, 石岩, 等. 背靠背换流器控制策略的比较与分析 [J]. 电网技术, 2010, 34(2): 109-114.
- [3] 陈仕龙, 束洪春, 甄颖. 云广特高压直流输电负极运行换相失败及控制研究 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 128-133.
- [4] 丁钊, 韩伟强. 天广直流输电系统双极运行情况总结 [J]. 电网技术, 2003, 27(9): 49-54.
- [5] 马为民. $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流系统换流器控制 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 71-74.
- [6] 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.
- [7] 刘泽洪, 高理迎, 余军. $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电技术研究 [J]. 电力建设, 2010, 28(10): 17-23.
- [8] 陈潜, 张尧, 钟庆, 等. $\pm 800\text{kV}$ 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): 27-32.
- [9] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [10] 周君文, 刘涛, 李少华. 云广特高压工程控制系统功能分布研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 70-75.
- [11] 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, 35(10): 2409-2416.
- [12] 陶瑜, 马为民, 马玉龙, 等. 特高压直流输电系统的控制特性 [J]. 电网技术, 2006, 30(22): 1-4.
- [13] 朱韬析, 王超. 天广直流输电系统的基本控制策略 [J]. 电网技术, 2007, 31(21): 22-26.
- [14] 张海凤, 朱韬析. 整流侧交流系统故障对高压直流输电系统的影响 [J]. 继电器, 2007, 35(15): 24-27.
- [15] 刘可真, 束洪春, 孙士云, 等. $\pm 800\text{kV}$ 云广特高压直流控制方式的动态特性分析 [J]. 高电压技术, 2010(1): 190-195.
- [16] 王海军, 黄义隆, 周全. 高压直流输电换相失败响应策略与预测控制技术路线分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 124-131.

收稿日期: 2016-12-19

作者简介:

李 越(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交直流混合系统稳定与控制控制, E-mail: ly5289@163.com;

刘崇茹(1977—), 女, 博士, 教授, 研究方向为交直流混合系统分析、仿真、运行与控制, E-mail: chongru.liu@ncepu.edu.cn;

赵云灏(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为交直流混合系统稳定与控制, E-mail: yunzhao@126.com;

拾 杨(1988—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统, E-mail: kimsheep@163.com.

(责任编辑: 林海文)