# 适用于多端柔性直流输电系统的分布式直流电压控制策略

严铭1,蔡晖2,谢珍建2,张哲任1,徐政1

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院,江苏 南京 210008)

摘要:在总结多种系统级直流电压控制策略的基础上,提出了一种分布式直流电压控制策略。该控制策略由 多座换流站共同控制多端柔性直流输电系统的直流电压,达到改善系统动态响应特性的目的;通过对换流站 直流电流分配系数的控制间接调节有功功率。阐述分布式直流电压控制策略的总体结构、稳态控制策略及 故障控制策略,在PSCAD/EMTDC 仿真平台中针对主从控制、带死区的电压下垂控制、分布式直流电压控制 3种控制策略进行典型故障仿真分析。仿真结果表明,分布式直流电压控制策略在典型故障期间的直流过电 压水平较低、直流电流波动较小且过渡过程持续时间较短,动态响应特性较好。

关键词:多端柔性直流输电;模块化多电平换流器;分布式直流电压控制;直流电流分配系数;故障分析
 中图分类号:TM 721.1
 文献标志码:A
 DOI:10.16081/j.epae.202002011

## 0 引言

当前,环境污染和能源紧缺问题逐渐受到全世界的关注,化石燃料等不可再生能源的局限性越来越明显,风能、太阳能等可再生能源成为可持续发展趋势下的选择<sup>[1-3]</sup>。柔性直流输电(VSC-HVDC)系统可以灵活控制有功功率、无功功率,并且能够轻易实现潮流反转,在孤岛供电、风电等可再生能源并网等应用领域具有显著的技术优势<sup>[4-7]</sup>。模块化多电平换流器(MMC)作为对原有两电平和三电平拓扑结构的创新,具有输出电压谐波分量小、开关损耗低、易于扩展等优势<sup>[8-12]</sup>。

随着经济技术的发展和电网的大规模建设,以 及大规模分布式新能源并网送电,传统的点对点直 流输电方式已无法满足大规模电网互联的需求,因 此要求电网能够实现多电源供电以及多落点受 电<sup>[13-16]</sup>。多端柔性直流输电(VSC-MTDC)系统能够 实现不同地区的新能源与电网的互联,且输电方式 灵活、供电可靠,因此成为目前的研究热点。近年来 基于 MMC 的典型的 VSC-MTDC 工程有南澳工程<sup>[17]</sup>、 张北工程<sup>[18]</sup>、舟山工程<sup>[19]</sup>,可见 VSC-MTDC 技术逐 渐成为电力系统建设和电力网络发展的重点。

VSC-MTDC的系统级控制策略主要有主从控制 策略、电压裕度控制策略、电压下垂控制策略及其改 进控制策略。主从控制策略将多端系统中的一座换 流站作为主站,采用定直流电压控制平衡系统功率, 其余换流站作为从站采用定有功功率控制。虽然主 从控制结构简单,但是在主站功率越限或退出运行 的情况下,系统无法维持直流电压稳定。此时一般

#### 收稿日期:2019-05-10;修回日期:2019-12-06

基金项目:国家电网公司科技项目(SGJSJY00GHJS1900028) Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(SGJSJY00GHJS1900028) 由另一座定有功功率的换流站转变为主站维持直流 电压的稳定,这对站间实时精确通信提出了较高要 求<sup>[20-21]</sup>。电压裕度控制策略是对主从控制策略的改 进<sup>[22-23]</sup>,无需站间通信,但是该策略的系统动态响应 特性比主从控制慢,偏差裕度较难调节,实际工程中 一般不采用<sup>[3]</sup>。电压下垂控制策略根据直流电压测 量值调节有功功率指令值<sup>[24]</sup>,由多座换流站来共同 调节系统不平衡功率,但采用该控制策略的换流站 无法准确控制有功功率。为了结合主从控制和电压 下垂控制的优点,提高电力系统运行的可靠性,文献 [25-28]提出了带死区的电压下垂控制策略。该策 略在死区范围内实现定有功功率控制,但在故障状 态下脱离死区运行到下垂区域,仍然无法准确控制 有功功率。

本文首先阐述了主从控制和带死区的电压下垂控 制这2种策略的原理与结构,分析其存在的缺陷。 接着,提出了一种分布式直流电压控制策略,介绍其 结构特点,并分析其稳态控制策略和故障控制策略。 该策略一方面实现了直流电压的分布式控制,另一 方面可以通过对换流站直流电流分配系数的控制间 接完成对换流站有功功率的控制。最后,在PSCAD/ EMTDC 仿真平台上搭建五端柔性直流输电系统模 型,挑选典型故障类型进行仿真,对比3种控制策略 的暂态响应,说明分布式直流电压控制策略的优势。

## 1 VSC-MTDC的系统级控制策略

## 1.1 主从控制策略

主从控制策略是将一座换流站作为主站来控制 整个VSC-MTDC的直流电压,其余换流站作为从站 按照各自的功率要求进行控制<sup>[1]</sup>。对于基于MMC 的VSC-MTDC,主站采用定直流电压控制,从站采用 定有功功率控制。在忽略直流网络电阻的情况下, 主从控制策略原理框图见附录A中图A1。图中,P 为有功功率;u<sub>de</sub>为直流电压;P<sup>\*</sup><sub>dei</sub>(i=1,2,…,N)为受 端换流站在稳态运行点的有功功率;P<sup>\*</sup><sub>dej</sub>(j=N+1, N+2,…,N+M)为送端换流站在稳态运行点的有功 功率;U<sup>\*</sup><sub>de</sub>为系统稳态运行点的直流电压;虚线框表 示每座换流站有功功率与直流电压的运行范围;水 平线表示采用定直流电压控制;铅垂线表示采用定 有功功率控制;实心圆点表示当前换流站的运行点。

#### 1.2 带死区的电压下垂控制策略

带死区的电压下垂控制策略应用于有功功率可 调的换流站节点上,规定换流站向直流网络输送的 有功功率为正。在忽略直流网络电阻的情况下,其 原理框图如附录A中图A2所示。图中,每一条折线 表示一座换流站; $U_{demax}$ 、 $U_{demin}$ 分别为电压死区的直流 电压上限、下限; $P_1^* - P_4^*$ 为电压死区对应的功率指 令值; $\theta$ 为下垂区域与水平线的夹角;k为下垂区域 的斜率。

在实际情况下,各座换流站的U<sub>demax</sub>和U<sub>demin</sub>通常 是有微小差别的,每座换流站的U<sub>demax</sub>和U<sub>demin</sub>需要分 别整定。对于每座换流站,U<sub>demax</sub>和U<sub>demin</sub>分别为在 VSC-MTDC正常运行时,考虑所有运行方式下稳态 直流电压的最大值和最小值。

在电压死区范围内,换流站采用定有功功率控制,当直流电压测量值大于  $U_{demax}$ 或者小于  $U_{demin}$ 时,进入下垂控制区域,通过改变有功功率的指令值调节直流电压。对于受端换流站,若  $u_{de}>U_{demax}$ ,则有功功率指令值下降,换流站吸收更多的直流功率缓解 直流电压上升趋势;若  $u_{de}<U_{demin}$ ,则有功功率指令值 上升,换流站吸收更少的直流功率缓解直流电压下降 趋势。对于送端换流站,若  $u_{de}>U_{demax}$ ,则有功功率指 令值下降,换流站送出更少的直流功率缓解直流电压下降 运上升趋势;若  $u_{de}<U_{demin}$ ,则有功功率指令值上升,换流站送出更少的直流功率缓解直流电

根据以上控制逻辑设计的控制器实现框图见附录 A 中图 A3。图中,  $\Delta P_{de}^*$  为有功功率指令值修正量;  $P_{de0}^*$  为有功功率的初始指令值;  $P_{de}^*$  为最终的有功功率指令值, 输出给换流器。

由于实际中选取的下垂区域斜率k很小,使得 有功功率指令值在较大范围内变化时直流电压变化 相对较小,因此带死区的电压下垂控制策略能在一 定程度上稳定直流网络的电压。

#### 1.3 上述2种控制策略的局限性

对于主从控制,由于只有一座换流站作为主站 控制系统的直流电压,通常选取 VSC-MTDC 中容量 最大的换流站作为主站。当所有换流站容量相差不 大或从站容量之和远大于主站时,很可能造成主站 功率调节能力不够,导致系统动态响应特性较差。

对于带死区的电压下垂控制,当换流站运行到 电压下垂区域之后,相当于以定直流电压状态运行, 换流站的有功功率只能通过下垂曲线和直流网络结 构共同决定。

综上所述,2种控制策略在实际使用中均存在 一定的缺陷,需要研究一种新的系统级控制策略。

## 2 分布式直流电压控制策略

本文提出了一种适用于VSC-MTDC的分布式直 流电压控制策略。相比于带死区的电压下垂控制策 略,该策略通过设定直流电流分配系数,间接调节有 功功率,而带死区的下垂控制策略在运行方式改变 时将会运行于下垂区域,无法主动控制换流站的有 功功率。相比于主从控制策略,该策略通过增大定 直流电压换流站的数量,提高定直流电压换流站的 总容量,从而达到改善系统动态响应特性的目的。

假设 VSC-MTDC 有 N 座受端换流站(编号 1— N)和 M 座送端换流站(编号 N+1—N+M)。下面阐述 其总体结构、稳态控制策略以及故障控制策略。

## 2.1 总体结构

所有受端换流站均采用分布式直流电压控制策略进行控制,该控制策略的基本原理框图如图1所示。图中,N为换流站总数,*i*=1,2,…,N;*I*<sub>dei</sub>为直流电流测量值;*K*<sub>i</sub>为电流分配系数(稳态控制下取*K*<sub>refi</sub>,故障控制下取*K*<sub>fi</sub>);*I*<sub>dcrefi</sub>为直流电流指令值;Δ*U*<sub>dcrefi</sub>为 直流电压指令值修正量;*U*<sub>dc0i</sub>为直流电压都始指令 值;*U*<sub>dcrefi</sub>为最终输出给MMC的直流电压指令值。





#### 2.2 稳态控制策略

对于第*i*座换流站,对所有受端换流站的直流电 流测量值求和,并乘以电流分配系数作为该换流站 的直流电流指令值;再将直流电流测量值与直流电 流指令值作差,通过比例积分控制器输出直流电压 指令值修正量,与直流电压的初始指令值相加,作为 最终的直流电压指令值,输出给MMC。

系统在稳态情况下的有功功率可以通过式(1) 进行估算。

$$P_{i} = K_{i} \sum_{j=N+1}^{N+M} P_{\text{ref}j}$$
(1)

其中,P<sub>i</sub>为第*i*座受端换流站的有功功率;P<sub>refi</sub>为第*j* 座送端换流站的有功功率指令值。则第*i*座受端换 流站的有功功率测量值近似等于电流分配系数乘以 送端站有功功率指令值之和。

在稳态控制情况下,调整电流分配系数,从而调节直流电流指令值,实现定直流电流控制。通过PI 控制器输出 $\Delta U_{deref}$ ,由于 $\Delta U_{deref}$ 很小,能够间接实现

定直流电压控制。每一组电流分配系数代表了一种 稳定状态,因此改变直流电流分配系数,能够实现不 同稳态控制的切换。

该控制策略通过选取*K*,间接实现对该换流站 的定有功功率控制,而该控制器本身又输出直流电 压指令值,实现换流站的定直流电压控制。因此,分 布式直流电压控制策略既能实现定直流电压控制, 又能间接实现定有功功率控制。

## 2.3 故障控制策略

2.3.1 电流分配系数

故障控制下的电流分配系数计算框图如图 2 所示。



#### 图2 故障控制下的电流分配系数计算模块

Fig.2 Current distribution coefficient calculation module under fault control

故障控制下电流分配系数的作用为:在系统过 电压时增大非故障受端换流站的电流分配系数,吸 收更多的直流功率,从而降低过电压水平,并且系统 能更快地恢复到稳态;在系统欠电压时减小非故障 受端换流站的电流分配系数,减少直流功率的吸收, 从而防止直流电压过低。

当直流电压指令值*U*<sub>deref</sub>大于直流电压指令值上限动作电压*U*<sub>H</sub>时,电流分配系数取为:

$$K_{\rm fti} = \begin{cases} (1 - K_{\rm refi})(U_{\rm dci} - U_{\rm L1})/G_{\rm ap1} + K_{\rm refi} \\ U_{\rm L1} < U_{\rm dci} < U_{\rm H1} \\ 1 & U_{\rm dci} \ge U_{\rm H1} \end{cases}$$
(2)

其中, $U_{\text{HI}}$ 为过电压时直流电压测量值上限动作电 压; $U_{\text{LI}}$ 为过电压时直流电压测量值下限动作电压;  $G_{\text{anl}}=U_{\text{HI}}-U_{\text{LI}}$ 为过电压时动作区间大小。

当换流站故障导致系统直流电压上升时,根据 图1可得直流电压指令值 $U_{derefi}$ 上升,当满足 $U_{derefi}>U_{H}$ 时,由式(2)可得 $K_{fi}>K_{refi}$ 。非故障受端换流站的电流分配系数增大,能够吸收更多的有功功率,从而降低直流过电压水平。

当直流电压指令值*U*<sub>derefi</sub>小于等于直流电压指令 值下限动作电压*U*<sub>1</sub>时,电流分配系数为:

$$K_{\rm fit} = \begin{cases} K_{\rm refi} - K_{\rm refi} \left( U_{\rm dci} - U_{\rm L2} \right) / G_{\rm ap2} & U_{\rm L2} < U_{\rm dci} < U_{\rm H2} \\ 0 & U_{\rm dci} \le U_{\rm L2} \end{cases}$$
(3)

其中, $U_{H2}$ 为欠电压时直流电压测量值上限动作电压; $U_{L2}$ 为欠电压时直流电压测量值下限动作电压; $G_{m2}=U_{H2}-U_{L2}$ 为欠电压时动作区间大小。

当换流站故障导致系统直流电压下降时,根据 图1可得直流电压指令值U<sub>derefi</sub>下降。当满足U<sub>derefi</sub>≤ U<sub>L</sub>时,根据式(3)可推导出K<sub>fti</sub><K<sub>refi</sub>。非故障受端换 流站的电流分配系数减小,能够减少吸收的有功功 率,从而防止直流电压过低。

当直流电压指令值满足 U<sub>L</sub><U<sub>derefi</sub><U<sub>H</sub>时,电流分 配系数为:

$$K_{\rm fti} = K_{\rm refi} \tag{4}$$

此时说明直流电压在合理范围内,*K*<sub>ti</sub>取稳态电流分配系数参考值*K*<sub>ref</sub>即可,不需要进行修正。 2.3.2 附加的下垂控制策略

此外,为了进一步减小故障后直流电压的波动, 送端换流站在定有功功率、定无功功率控制的基础 上,增加下垂控制的附加控制策略,其控制特性如附 录A中图A4所示。

2.3.3 故障响应特性分析

下面针对故障发生后可能存在的暂态过程进行 控制响应的分析。

当受端换流站发生交流故障时,故障站注入交流系统的有功功率降低,在送端的有功功率发生变化之前,直流网络中多余的能量会导致 $U_{dei}$ 上升。故障期间,故障站直流电流会下降,导致非故障受端换流站的 $I_{dei}$ 上升,其与 $I_{derefi}$ 的差值为正,则通过PI环节输出的 $\Delta U_{derefi}$ 为正,使得 $U_{derefi}$ 增大。当 $U_{derefi}$ 》 $U_{H}$ 时, $K_{fi}$ > $K_{ref}$ ,即非故障受端换流站的电流分配系数增大,能够吸收更多的直流功率,从而降低直流过电压水平。同时,当直流电压超过电压上限 $U_{demaxi}$ 后,送端换流站将会运行到图A4中的AB段下垂区域,使得送端有功功率指令值下降,送出的有功功率减少,进一步降低直流过电压水平。

当送端换流站发生交流故障时,故障站注入直流系统的有功功率降低,在受端的有功功率发生变化之前,直流网络中缺失的能量会导致直流电压下降。故障期间,故障站直流电流会上升,导致非故障受端换流站的直流电流下降,与直流电流指令值差值为负,通过PI环节输出的ΔU<sub>derefi</sub>为负,使得直流电压指令值减小。当U<sub>derefi</sub>冬U<sub>L</sub>时,K<sub>fit</sub><K<sub>refi</sub>,即非故障受端换流站的电流分配系数减小,能够减少吸收的直流功率,从而提高直流电压水平。同时,当直流电压超过电压下限时,非故障的送端换流站将会运行到图A4中的CD段下垂区域,使得非故障送端有功功率指令值上升,送出的有功功率增加,从而进一步抬高直流电压水平。

由此可见,在故障控制的情况下,受端的电流分 配系数控制策略和送端的下垂控制策略能够在交流 故障发生后,减小直流电压的上升或下降幅度,具有 良好的动态响应特性。

## 3 仿真分析

#### 3.1 仿真系统

将本文提出的分布式直流电压控制策略与主 从控制策略、带死区的电压下垂控制策略在附录B 中图 B1 所示的五端柔性直流输电系统中进行对比, 从而验证分布式直流电压控制策略的有效性。在3 种控制策略中,换流站1和2为送端换流站,换流站 3—5为受端换流站。送端和受端换流站均采用 MMC,且桥臂全部采用半桥子模块,每个桥臂由150 个子模块构成。换流站连接的交流侧是线电压为 220 kV、短路容量为4000 MV·A的交流系统。换 流站通过200 mH的平波电抗器连接直流输电线路, 直流输电线路采用 PSCAD / EMTDC 自带的频率相 关相域模型。具体参数见附录 B中表 B1。

对于主从控制策略和带死区的电压下垂控制策 略,换流站1、4、5均采用定有功功率、定无功功率控 制策略;换流站2采用定有功功率、无功功率控制策 略并且保持输出不变,代表不可调功率节点;换流站 3采用定直流电压、定无功功率控制策略。

对于分布式直流电压控制策略,换流站1采用 定有功功率、定无功功率控制策略,且增加下垂控制 附加策略;换流站2采用定有功功率、无功功率控制 策略并且保持输出不变,代表不可调功率节点;换流 站3—5采用定直流电压和定无功功率控制策略,且 增加直流电流分配系数控制策略。

带死区的电压下垂控制中,电压基准值均取为 直流电压基准值 500 kV。换流站 1、4、5 的电压死 区上限和下限分别为 $U_{demax1}$  = 1.009 6 p.u. 和 $U_{demin1}$  = 0.996 p.u.、 $U_{demax4}$  = 1.007 6 p.u. 和 $U_{demin4}$  = 0.992 p.u.、 $U_{demax5}$  = 1.008 8 p.u. 和 $U_{demin5}$  = 0.99 p.u.。分布式直流 电压控制中,换流站 1 的电压死区上、下限分别为 1.03、0.95 p.u.,换流站 3—5 的直流电压指令值上、下 限动作电压分别为 1.02、0.98 p.u.,过电压时直流电 压测量值上、下限动作电压分别为 1.03、1.01 p.u.,欠 电压时直流电压测量值上、下限动作电压分别为

初始状态下,各个策略下的直流功率调整到相同的水平。每座换流站的直流功率测量值分别为600、750、440、300、600 MW,线路损耗约为10 MW。

#### 3.2 稳态特性分析

初始状态下,换流站1、2的直流功率指令值分 别为600、750 MW,换流站3—5的电流分配系数分 别为 $K_3$ =0.328、 $K_4$ =0.224、 $K_5$ =0.448。当t=1.5 s时,换 流站3—5的电流分配系数分别更改为 $K_3$ =0.1、  $K_4$ =0.4、 $K_5$ =0.5。当t=2.5 s时,换流站3—5的电流分 配系数分别更改为 $K_3$ =0.3、 $K_4$ =0.3、 $K_5$ =0.4。有功功 率和直流电流波形如图3所示,直流电压波形见附录 B中图B2。

由仿真波形可知,换流站1、2有功功率始终分 别保持为600、750 MW,因此送端换流站共送出功率 1350 MW。初始状态下,换流站3—5的有功功率分



Fig.3 Steady state characteristic analysis of distributed DC voltage control strategy

别为440、300、600 MW。1.5 s后,3 座受端换流站有 功功率分别过渡到134、536、670 MW。2.5 s后,3 座 受端换流站有功功率分别过渡到402、402、536 MW。

在考虑直流线路损耗的情况下,有功功率的实际测量值与电流分配系数乘以总有功功率得到的数 值接近。同时,在电流分配系数改变的调节过程中, 直流电压波动较小且基本维持在500 kV,直流功率 和直流电流响应速度快,稳态特性良好。

#### 3.3 换流站3退出故障分析

当t=1.5 s时,换流站3与交流系统断开。对于 主从控制策略,故障发生50 ms后将定有功功率控 制的换流站4切换为定直流电压控制;对于带死区 的电压下垂控制策略,由各站电压下垂控制器自行 调节直流功率指令值;对于分布式直流电压控制策 略,故障发生后50 ms修改电流分配系数为 $K_4$ = 0.556、 $K_5$ =0.444(保证与主从控制在故障后的有功 功率几乎相等,从而使故障波形具有可比性)。3种 控制策略在换流站3退出后有功功率和直流电流的 响应特性如图4所示,直流电压波形见附录B中 图B3。

由仿真波形可知,换流站3退出后,其有功功率 迅速下降到0,直流电流立即下降并减幅振荡趋于 0,直流网络中多余的能量使得直流电压上升。

对于主从控制,定直流电压的换流站3退出以后,整个系统失去了稳定直流电压的能力,因此直流 过电压很大,达到535 kV。故障发生50 ms后,由换 流站4作为主站承担起定直流电压的作用。系统在 2.2 s时过渡到新平衡状态。

对于带死区的电压下垂控制,直流电压上升导 致换流站运行到下垂区域。换流站1减少从交流系 统吸收的有功功率;换流站4、5增加注入交流系统 的有功功率。系统最终过渡到直流电压为510 kV 的新平衡状态,但直流电流在2.4 s时仍未稳定。

对于分布式直流电压控制,直流电压上升导致 换流站1减少从交流系统吸收的有功功率;换流站



图4 换流站3退出后的故障响应特性

Fig.4 Fault response characteristics when converter Station 3 is out of service

4、5的电流分配系数上升以吸收更多的直流功率, 降低过电压水平,直流过电压约为525 kV,并且在 2.2 s时过渡到新的直流电流分配系数下的稳定 状态。

在各种控制策略作用下,系统均能过渡到新的 平衡状态。主从控制的直流过电压最大,直流电流 波动最小且过渡过程时间最短;带死区的电压下垂 控制直流过电压最小,直流电流波动最大且过渡过 程时间最长;分布式直流电压控制的直流过电压较 小,直流电流波动较小且过渡过程时间较短。

#### 3.4 换流站3交流故障分析

当*t*=1.5 s时,换流站3交流侧发生三相接地短路故障,接地电阻为0.01 Ω,故障持续时间为0.1 s。故障发生后3种控制策略的有功功率和直流电流的响应特性如图5所示,直流电压的响应特性如附录B

中图B4所示。



图 5 换流站 3 交流母线发生三相金属性接地故障时的 响应特性

Fig.5 Response characteristics when AC bus of converter Station 3 under three-phase metallic grounding fault

由仿真波形可知,换流站3交流侧发生三相接 地短路故障后,换流站3的有功功率迅速下降到0, 直流电流振荡幅度下降,直流网络中多余的能量使 得直流电压上升,故障恢复后,换流站3直流功率回 升,直流电压下降,最终回到初始状态。

对于主从控制,由于换流站3作为主站控制系统 的直流电压,因此故障后过电压水平较大,当t=1.6s 时达到570kV,直流电流波动很大,故障恢复后直流 电压还会有一个较大的下降然后再回升到初始状态,换流站3的直流功率在恢复过程中可能会越限。

对于带死区的电压下垂控制,直流电压上升导 致换流站运行到下垂区域。换流站1减少从交流系 统吸收的有功功率,换流站4、5增加注入交流系统 的有功功率。由于下垂控制的存在使得直流过电压 仅为520 kV。

对于分布式直流电压控制,直流电压上升导致 换流站1减少从交流系统吸收的有功功率;换流站 4、5的电流分配系数上升以吸收更多的直流功率, 降低过电压水平,故障恢复后会有一个小幅度的直 流电压下降,最终恢复初始状态。故障期间,过电压 水平为530kV,直流电流波动较小。

在各种控制策略作用下,故障恢复后系统均能 回到初始状态。主从控制的直流过电压最大,直流 电流波动最大且过渡过程时间最长;带死区的电压 下垂控制直流过电压最小,直流功率回升较快,但直 流电流振荡幅值较大;分布式直流电压控制的直流 过电压较小,直流功率回升最快,直流电流波动最小 且过渡过程时间最短。

由上述分析可知,在发生故障时,主从控制策略 的直流过电压水平最大,直流电流波动较大且过渡 时间较长;带死区的电压下垂控制策略的过电压水 平最小;分布式直流电压控制策略的直流过电压水 平、直流电流波动水平及过渡过程持续时间都较小。

## 4 结论

本文介绍了 VSC-MTDC 常见的系统级控制策略,介绍了主从控制策略和带死区的电压下垂控制 策略的基本原理,并分别分析了它们存在的缺陷。

针对主从控制策略和带死区的电压下垂控制策 略的缺陷,本文提出了一种分布式直流电压控制策 略。相比于带死区的电压下垂控制策略,该策略通 过电流分配系数的设定,具有间接调节有功功率的 能力。相比于主从控制策略,该策略通过由多个换 流站来共同控制直流电压,从而达到改善系统动态 响应特性的目的。

时域仿真结果表明,分布式直流电压控制策略 的直流过电压水平、直流电流波动水平都较低且过 渡过程持续时间较短,具有良好的动态响应特性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004:1-13.
- [2] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004:11-19.
- [3] 徐政,肖晃庆,张哲任,等.柔性直流输电系统[M].2版.北 京:机械工业出版社,2017:1-9,190-193.
- [4] 汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电技术在全球能源互联网中的应用探讨[J].智能电网,2016,4(2):116-123.
   TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Discussion on applying the VSC-HVDC technology in global energy interconnection[J]. Smart Grid,2016,4(2):116-123.
- [5]赵文强,宣佳卓,陆翌,等.适用于常规直流改造的混合直流输 电系统主电路拓扑研究[J].电力自动化设备,2018,38(12):

186-193.

ZHAO Wenqiang, XUAN Jiazhuo, LU Yi, et al. Research on circuit topology of hybrid HVDC system suitable for refurbishing existing LCC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12):186-193.

- [6] 王曦,李兴源,魏巍,等. 柔性直流和常规直流互联输电系统协 调控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):102-108.
   WANG Xi,LI Xingyuan,WEI Wei, et al. Coordinated control strategy for interconnected transmission system of VSC-HVDC and LCC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(12):102-108.
- [7] 曾令康,李大虎,姚伟,等.适用于背靠背柔性直流输电的双环 附加频率控制[J].电力自动化设备,2018,38(12):113-120,127.
   ZENG Lingkang,LI Dahu,YAO Wei,et al. Comprehensive assessment of criticality for transmission line considering invulnerability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38 (12):113-120,127.
- [8] PRIETO-ARAUJO E, BIANCHI F, JUNYENT-FERRE A, et al. Methodology for droop control dynamic analysis of multiterminal VSC-HVDC grids for offshore windfarms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4):2576-2485.
- [9] FLOURENTZOU N,AGELIDIS V G,DEMETRIADES G D. VSCbased HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3):592-602.
- [10] JING L, XU C, MOLINAS M. Optimal design of controller parameters for improving the stability of MMC-HVDC for wind farm integration[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 6(1):40-53.
- [11] 辛业春,王威儒,李国庆,等. 基于桥臂电流直接控制的模块化 多电平换流器控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(10): 115-120.
  XIN Yechun, WANG Weiru, LI Guoqing, et al. Control strategy of modular multilevel converter based on arm current direct control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10):115-120.
- [12] AKAGI H. Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3119-3130.
- [13] 郭春义,赵成勇,彭茂兰,等.一种具有直流故障穿越能力的混合直流输电系统[J].中国电机工程学报,2015,35(17):4345-4352.
  GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, PENG Maolan, et al. A hybrid HVDC system with DC fault ride-through capability[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(17):4345-4352.
- [14] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
   TANG Guangfu,LUO Xiang,WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(10):8-17.
- [15] GNANARATHNA U N, GOLE A M. Efficient modeling of MMC (Modular Multilevel Converters) HVDC on electromagnetic transient simulation programs [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1):316-324.
- [16] 陈树勇,徐林岩,孙栩,等. 基于多端柔性直流输电的风电并网 控制研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(增刊):32-38.
  CHEN Shuyong, XU Linyan, SUN Xu, et al. The control of wind power integration based on multi-terminal high voltage DC transmission with voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(Supplement):32-38.
- [17] 张祖安,黎小林,陈名,等.应用于南澳多端柔性直流工程中的 高压直流断路器关键技术参数研究[J].电网技术,2017,41 (8):2417-2422.

ZHANG Zu'an, LI Xiaolin, CHEN Ming, et al. Research on critical technical parameters of HVDC circuit breakers applied in Nan'ao multi-terminal VSC-HVDC project[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2417-2422.

[18] 李英彪,卜广全,王姗姗,等.张北柔直电网工程直流线路短路 过程中直流过电压分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (12):3391-3399.

140

LI Yingbiao, BU Guangquan, WANG Shanshan, et al. Analysis of DC overvoltage caused by DC short-circuit fault in Zhangbei VSC-based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12):3391-3399.

- [19] 李亚男,蒋维勇,余世峰,等. 舟山多端柔性直流输电工程系统 设计[J]. 高电压技术,2014,40(8):2490-2496. LI Yanan, JIANG Weiyong, YU Shifeng, et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496.
- [20] BELLMUNT O G, LIANG J, EKANAYAKE J, et al. Topologies of multiterminal HVDC-VSC transmission for large offshore wind farms[J]. Electric Power System Research, 2011, 81 (2):271-281.
- [21] VRANA T K, BEERTEN J, BELMANS R, et al. A classification of DC node voltage control methods for HVDC grids [J]. Electric Power Systems Research, 2013, 103(8):137-144.
- [22] LU W X, OOI B T. DC overvoltage control during loss of converter in multiterminal voltage-source converter-based HVDC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 915-920.
- [23] DIERCKXSENS C, SRIVASTAVA K, REZA M, et al. A distributed DC voltage control method for VSC MTDC systems [J]. Electric Power Systems Research, 2012, 82(1):54-58.
- [24] 唐庚,徐政,刘昇,等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直 流电压控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):125-131. TANG Geng, XU Zheng, LIU Sheng, et al. A novel DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15):125-131.
- [25] 解大,陈爱康,喻松涛,等. 基于下垂控制的柔性直流配电网综 合调度指标和调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (10):2828-2840

XIE Da, CHEN Aikang, YU Songtao, et al. Research on synthetic scheduling index and scheduling strategy of multiport flexible DC distribution network with droop-control [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2828-2840.

[26] 任敬国,李可军,张春辉,等. 基于直流电压-有功功率特性的 VSC-MTDC协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(11): 8-15.

REN Jingguo, LI Kejun, ZHANG Chunhui, et al. A coordinated control strategy for VSC-MTDC system based on DC voltage-active power characteristic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11):8-15.

- [27] 阮思烨,李国杰,孙元章. 多端电压源型直流输电系统的控制 策略[J]. 电力系统自动化,2009,33(12):57-60. RUAN Siye, LI Guojie, SUN Yuanzhang. A control strategy for multi-infeed VSC-HVDC systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 57-60.
- [28] 陈继开,董飞飞,王振浩,等.适用于功率波动的多端柔性直流 系统改进下垂控制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3708-3717.

CHEN Jikai, DONG Feifei, WANG Zhenhao, et al. Research on improved droop control method of multi-terminal MMC-HVDC system suitable for power fluctuation[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3708-3717.

#### 作者简介:



铭

严 铭(1995-),男,浙江绍兴人,博 士研究生,主要研究方向为柔性直流输电技 术(E-mail:yanming@zju.edu.cn);

蔡 晖(1984—),男,江苏盐城人,高 级工程师,博士,主要研究方向为电力系统 规划技术(E-mail:caihui300@hotmail.com); 谢珍建(1980-),男,重庆人,研究员级

高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统 规划技术(E-mail:zhenjianxie@163.com);

张哲任(1988-),男,浙江杭州人,博士,主要从事柔性 直流输电领域的工作和研究(E-mail:zhangzheren@zju.edu.cn);

徐 政(1962-),男,浙江海宁人,教授,博士研究生导 师,通信作者,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析、 直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量等(E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn).

(编辑 王欣竹)

## Distributed DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems

YAN Ming<sup>1</sup>, CAI Hui<sup>2</sup>, XIE Zhenjian<sup>2</sup>, ZHANG Zheren<sup>1</sup>, XU Zheng<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Economic Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: Based on summarizing various system-level DC (Direct Current) voltage control strategies, a distributed DC voltage control strategy is proposed. The DC voltage of VSC-MTDC (Voltage Source Converter based Multi-Terminal Direct Current) system is controlled by multiple converter stations in this strategy, and the dynamic response characteristic is improved. Also, the active power is adjusted by controlling DC distribution coefficient of the converter station indirectly. The overall control structure, steady-state control and fault control of the distributed DC voltage control strategy are described. Typical fault simulation analysis is carried out for three control strategies including master-slave control, dead-band voltage droop control and distributed DC voltage control based on PSCAD / EMTDC. The simulative results show that the distributed DC voltage control strategy has smaller DC overvoltage level, smaller DC current fluctuation and less transition duration during typical faults, and the dynamic response characteristics are better.

Key words: VSC-MTDC; modular multilevel converter; distributed DC voltage control; DC current distribution coefficient; failure analysis

 $U_{\rm dc}$ 

 $U_{\rm dc}$ 

Р

 $hu_{dc}$  $hu_{dc}$  $hu_{dc}$  $hu_{dc}$  $\uparrow u_{\rm dc}$  $P_{dc2}$  $P_{dc(N+1)}$  $P_{dc(N+M)}$  $P_{dcN}$ 送端换流站1 ••• 送端换流站M 受端换流站2 ••• 受端换流站N 受端换流站1 (a) 正常运行模式  $hu_{\rm dc}$  $hu_{\rm dc}$  $hu_{dc}$  $\uparrow u_{\rm dc}$ ►P ►P  $P_{\mathrm{dc}(N+1)}$  $P_{dc(N+M)}$  $P_{dcN}$ 送端换流站1 ••• 送端换流站M 受端换流站2 ••• 受端换流站N (b) 主站故障退出后从站运行模式切换 图A1 主从控制策略原理框图 Fig.A1 Master-slave DC voltage control strategy  $u_{\rm dc}$  $\theta$ - U<sub>dcmax</sub>  $U_{\text{dcmin}}$  $k = \tan \theta$ 受端 送端  $P_{2}^{*}$  $P_{1}^{*}$  $P_3$  $P_4$ 图A2 带死区的电压下垂控制策略原理框图 Fig.A2 Dead-band voltage droop control strategy  $u_{\rm dc}$ 若 $u_{dc} > U_{dcmax}$ , 则  $\Delta P^* = (U_{dcmax} - u_{dc}) / k$ 





Fig.A3 Block diagram of the dead-band voltage droop control strategy



图A4 送端换流站下垂控制特性

Fig.A4 Droop control characteristics in sending converter station

## 附录 B

	表B1	仿真系统参数
Table B1	Parame	eters of simulation system

类别	参数名称	参数值
	交流母线电压/kV	220
甘木矣粉	交流电网短路容量/MV A	4 000
举半参数	额定直流电压/kV	500
	平波电抗器/mH	200
	变压器额定容量/MV A	750
亦匡嬰会粉	绕组类型	$Y_0/\triangle$
又压砧参奴	换流变压器变比	220/255
	换流变压器漏抗(标幺值)	0.15
	MMC 额定容量/MV A	750
MMC	桥臂半桥子模块个数	150
WINC 参数	子模块电容/mF	6
	桥臂电感/mH	63.33
	单位长度正序电阻/Ω·km <sup>-1</sup>	0.009 735
直流线路参数	单位长度正序电感/mH km <sup>-1</sup>	0.848 9
1	单位长度正序电容/μF·km <sup>-1</sup>	0.013 67



Fig.B1 Five-terminal DC transmission system



Fig.B2 Steady state characteristic analysis of distributed DC voltage control



Fig.B3 Disconnection response characteristics at converter station 3



Fig.B4 Three-phase metallic ground fault response characteristics of AC bus at converter station 3