

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.004

多端柔性直流控制保护系统架构和策略

董云龙, 胡兆庆, 田杰, 李海英
(南京南瑞继保电气有限公司, 南京, 211102)

摘要: 对多端柔性直流输电控制保护系统的三层分布式结构进行阐述, 针对多端协调控制功能, 提出直流控制系统设计为三层结构, 分别为: 站间协调控制层、极控制层和换流器控制层, 其中在站间协调控制层采用多端主控制器来实现各换流站控制器间的协调, 保证直流多端电网失去直流电压控制站后, 继续维持直流电网电压在额定值附近。对多端柔性直流输电控制保护系统中组网方式进行归纳总结基础上, 提出基于站间快速通讯的多站协调控制和基于上层控制的多站协调控制, 这种方式对于多端柔性直流输电系统站间协调控制是有效的。

关键词: 多端柔性直流输电; 协调控制; 通讯组网; 控制策略

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)02-0021-06

Frame of Control Protection System and Control Strategy Implement in Multi-terminal VSC-HVDC System

DONG Yunlong, HU Zhaoqing, TIAN Jie, LI Haiying
(NARI-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: The three-level hierarchical design of multi-terminal VSC HVDC transmission control and the protection system are presented in this paper, focus on coordinated control function of multi-terminal VSC HVDC, a kind of three-level configuration of control system including coordinated control level, polar control level, and converter control level is designed in this paper, coordinated control function is implemented in multi-terminal master control machine, which ensure the rated DC voltage of network when losing the DC voltage control station of multi-terminal VSC-HVDC, communication network style among different converter stations in of multi-terminal VSC-HVDC, communication network style among different converter stations in multi-terminal VSC-HVDC is presented, based on the communication network style, a kind of coordinated control base on converter to converter high speed communication as well as top level control for the multi-terminal VSC HVDC system is demonstrated in this paper, and this is proved an available control frame for multi-terminal VSC HVDC.

Key words: multi-terminal VSC HVDC; coordinated control; communication network; control strategy

柔性直流输电技术是当今电力电子技术应用的制高点^[1], 它是一种新型的直流输电技术^[2], 其特点是采用基于全控型器件的电压源型换流器进行直流输电^[3-6]。多端柔性直流输电系统采用多个柔性直流换流站构成多端直流网络, 实现多个电源和负荷的直流连接, 增强了供电可靠性和运行灵活性, 但直流网络的多换流站协调控制是多端直流网络控

制的难点。另一方面, 多换流站协调控制是和换流站的通讯组网方式息息相关, 一旦失去部分通讯网络, 如果采取的控制策略不合适就无法保证直流网络继续运行。

本文在对多端柔性直流输电控制保护系统的三层分布式结构进行阐述, 针对多端协调控制功能, 提出直流控制系统设计为三层结构, 分别为: 站间协调控制层、极控制层和换流器控制层, 其中在站间协调控制层采用多端主控制器来实现各换流站控制器间的协调。换流站控制器间的协调主要是多换流站的直流电压协调控制, 在现有的文献中提出的多端柔性直流输电系统级直流电压协调控制策略可以划分为单站直流电压控制和多站直流控制两种类

收稿日期: 2015-01-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050101)

作者简介: 董云龙(1977), 男, 安徽安庆人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 柔性直流输电及柔性交流输电技术。Email: dongyl@nrec.com。

型,策略的具体形式取决于当前直流网络结构和通讯架构,对于简单直流网络,采用单站直流电压控制方式足够,区别在于直流电压控制站失去后检测和处理方案,站间通讯好条件下采用主从方式直接切换功率控制为直流电压控制,维持网络直流电压,丧失通讯后则采用直流电压偏差控制策略,在检测到直流电压的较大偏移后转入定直流电压运行模式;多站直流电压控制是在同一时刻,多个站维持直流网络电压运行,即使失去当前直流电压控制主站,剩余站切换为新的直流电压控制主站,这种方式可以在多站采用直流电压下垂控制策略,或者直流电压下垂控制和定直流电压控制结合的方式。这种多站直流控制类型虽然不完全依赖各站之间高速通讯网络,但从长期运行角度来看,需要上层协调控制主机协调各站运行。

直流电压下垂控制策略利用各换流站直流电流(功率)和直流电压的斜率特性,在多个具备直流电压控制能力的换流站间按照各站出口直流电压分配功率大小,一旦失去其中一个按照斜率特性运行换流站,直流全网潮流重新分配后,剩余按照斜率特性运行换流站再按照当前出口直流电压产生新的电流指令,维持剩余站运行^[9-10]。

本文将结合换流站间组网方式以及多端柔性直流输电系统控制保护系统具体架构进行多端换流站间协调控制策略实现。提出基于上层控制的多站协调控制方式,针对该方式失去上层通讯后后备控制策略切换方式,保证运行可靠性。

1 多端柔性直流输电系统控制保护系统

多端柔直电网控制保护系统架构采用三层分布式结构,分为:系统监视与控制层、控制保护层、现场 I/O 层,如图 1 所示。

1) 系统监视与控制层

系统监视与控制层又分为远方调度中心通信层、集控中心层和站内运行人员控制系统。其中,远方调度中心通信层是将多端直流换流站运行参数和换流站控制保护系统的信息通过专用通道送至调度中心,或者接收调度中心下发相关指令,集控中心采用 LAN 网延伸方式,实现多个换流站站设备远程监视和控制,运行人员控制层就设置在多端换流站每个站的站内,实现站内设备运行控制和监视。

2) 控制保护设备层

控制保护设备层实现整个多端柔性直流输电系统的控制和保护功能。其中直流控制和保护系统包含了多端站间协调控制、极控制、换流站控制和换流器控制功能。采用独立的站间协调控制主机实现多端换流器间的协调工作,极控制,换流器控制则集成在一个主机里,保护则采用独立的保护主机,另外,控制保护层设备还包括交流站控系统 ACC、站用电控制设备 SPC、就地控制设备 LOC、站间通讯设备 TCOM 以及联接变压器保护设备 CTP(三取二配置)等。

3) 现场 I/O 层

现场 I/O 层设备主要由分布式输入输出单元以及测量单元构成。主要功能是与交直流一次设备,站用电设备和阀冷系统以及其它辅助系统接口,控制一次开关刀闸设备以及相关遥信遥测量收集,以及实现遥控命令出口和就地连锁控制,阀控系统虽然与阀塔设备接口,也被归为 I/O 层设备范畴,实现直流控制保护系统与换流阀的接口。

整个换流站的控制及保护系统都采用冗余设计,或者保护采用三取二设计。不会因为单套系统或者单重故障导致整个系统停运。

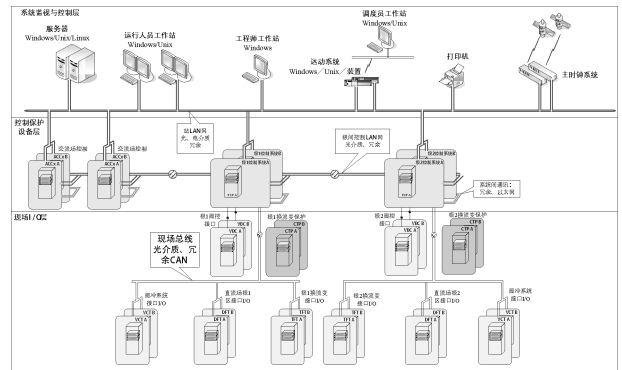


图 1 多端柔直电网三层分布式结构

Fig. 1 Three-level Distributed Configuration of Multi-terminal VSC HVDC Network

1.1 多端直流协调控制功能

结合柔性直流电网多换流站协调控制的功能要求,采用独立的站间协调控制主机实现多端换流器间的协调工作,控制功能尽量放在较低的层次,避免上层控制故障对下层控制的影响,提高系统的整体性能。综合上述功能需求,将直流控制系统设计为三层结构,分别为:站间协调控制层、极控制层和换流器控制层,以一个四端柔直控制系统为例,如图 2 所示。

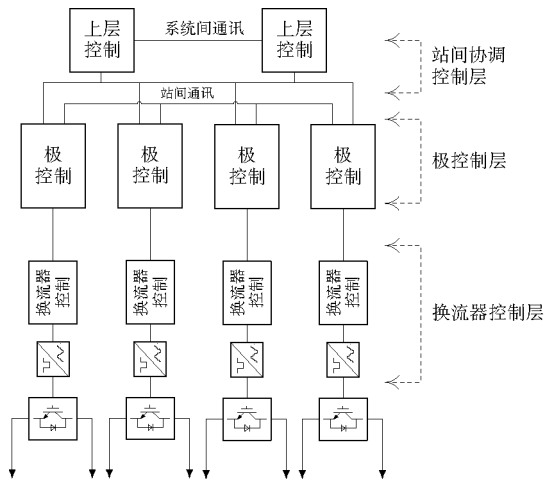


图2 多端直流控制系统架构

Fig. 2 Control System Structure of Multi-terminal VSC-HVDC Network

站间协调控制可以对四站进行总的协调,减少系统运行过程中投退换流阀的扰动,降低站间通讯的负载率,当站间通讯失去时,通过设置在极控制层的不依赖于通讯的协调控制策略实现换流站的运行。为适应柔直电网运行方式复杂多变的需求,推荐在源端和受端各配置一套站间协调控制 SCC 设备,采用主备方式实现多换流站间协调控制。

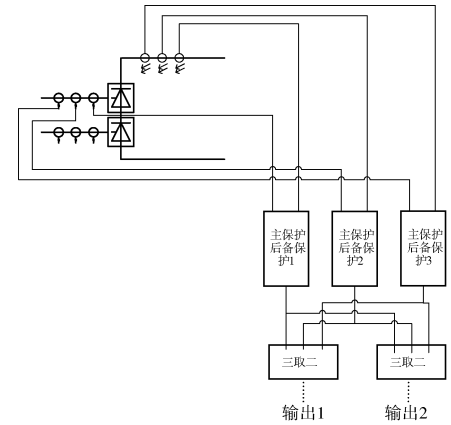
多端直流系统包含有多个换流站,为避免各站单独控制影响整个直流网络运行,所以需要采用多端协调控制功能,改变各站运行特性,实现整个直流系统的稳定运行。所以增加了多端主控制器,通过多端主控制器将电压,电流或者功率指令传送给各个换流站的双极/极控制器,形成多端输电系统的分级协调控制策略。

1.2 多端柔直电网保护系统

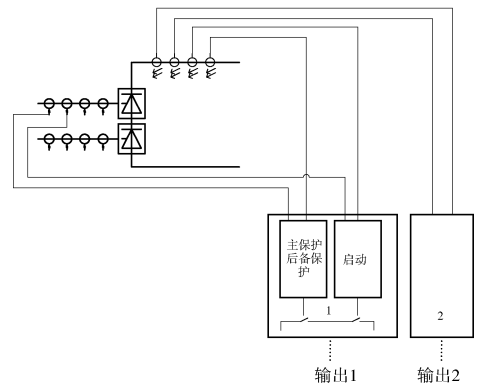
为了提高可靠性,保护装置一般冗余配置来提高可靠性,根据实际的运行经验,目前较为广泛采用的保护配置方式是三取二配置和完全双重化配置两种,两种保护配置方式的示意图见图3。

如图3(a)所示,三重保护与三取二装置构成一个整体,三套保护中有两套保护动作才能出口,保证可靠性和安全性。一套保护退出,剩余保护变成二取一逻辑。如图3(b)所示,在双重化的基础上,完全双重化配置方式的每一套保护采用“启动+保护”的出口逻辑,两套保护同时运行,任意一套动作可出口,保证安全性。两种保护配置方式均具有较为广泛应用,其中三取二方式在直流工程中应用较

多,完全双重化方式在交流保护中应用较多。



(a) 三取二配置



(b) 完全双重化配置

图3 保护配置方式

Fig. 3 Protection Configuration of Multi-terminal VSC-HVDC Network

2 多端换流站间通讯组网方案

根据多端柔性直流系统网络特点,有以下几种站间通道组网方式。

2.1 站间点对点通讯方式

每个站都与其余站相互通讯,外部光纤可以采用复用方式,这种方式特点是通讯光缆铺设与各站物理连接无关,每个站均具备和其他站通讯条件,在多端直流系统中,在每个站都具备直流电压控制能力情况下,并且存在单站退出网络运行以及下一步又接入运行工况下,这种方式是必要的,这种方式中每一个站都可以将接收到的其他站控制模式以及功率指令信息通过站间通讯送往其他站,所以本站仅剩一个站有通讯联系情况下,也不影响获取失去通讯的其它站的运行信息,缺点是站数量增多时,点对点通讯通道数量增加,实际是不经济的。

2.2 基于网络结构的手拉手通讯方式

站间通讯通道沿着直流线路配置, 互联的两站之间均配置站间通讯, 采用相邻两站点对点通讯方式, 一个辐射状五端直流网络的站间通讯通道方案如图4所示, 其中站间通讯系统支持2M/64K等多种连接方式。这种连接方式特点是通讯通道是跟随电缆走, 在有物理连接的站间建立了通讯通道。一种特殊情况是首尾相连形成环网方式, 站间通讯实际也呈环状。

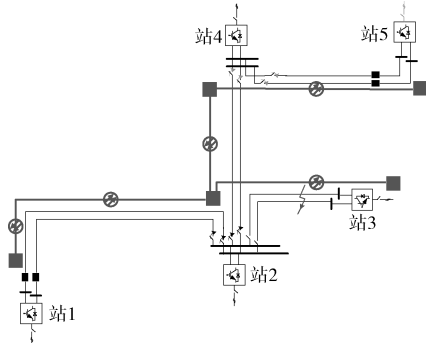


图4 基于网络结构的手拉手通讯方式

Fig. 4 Hand in Hand Communication Style Among Converters

以上方式优点是减少了站内通道复杂性, 所有通讯网络跟随线缆走, 与上述站间点对点通讯方式相比, 如果直流网络为辐射状, 一旦和其中一个站失去通讯联系后就没有其它渠道获知该站的任何信息, 减少复杂性的同时也减少了通讯可靠性。但对于环状网络, 每个站实际至少同两个站有通讯联系, 在失去一个站后还可以从另外一个站获取信息。

2.3 基于上层协调的通讯架构

所有的站都与上层协调控制主机相连, 当站的数量增多时, 通讯网络相对简化, 一种可选方式是设置冗余上层控制主机; 并将部分重要协调控制功能嵌入下层控制系统中, 失去上层控制主机后, 维持系统基本运行通讯架构示意图见图5。缺点是上层控制主机全部故障情况下, 多端网络运行受限制。

3 多端换流站间协调控制策略

多端换流站间协调控制策略实施与通讯组网方案相关, 可以分为如下几种^[11]:

1) 基于无站间通讯多站协调控制策略

无站间通讯框架多站协调控制架构中换流器多采用多点直流电压偏差控制方式, 可以实现无站间通讯条件下的换流站控制模式自动接管, 直流电压

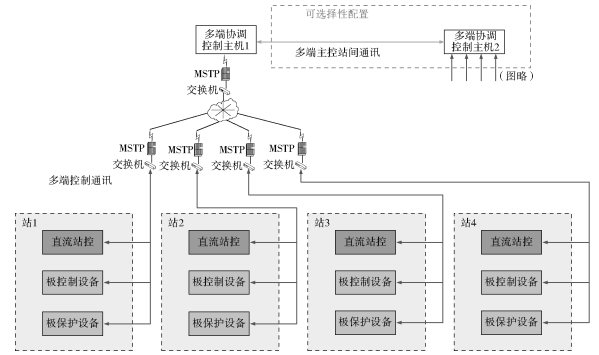


图5 基于上层协调的通讯架构

Fig. 5 Top Coordinated Communication Style Among Converters

偏差控制策略不依赖通信网路, 可实现直流电压控制站故障闭锁后在剩余站进行直流电压控制任务的重新分配, 如图6所示, 基于直流电压偏差检测控制的多点电压控制方式的基本思想是: 当维持直流电压的换流器退出运行, 它所引起的直流电压变化将使得另一个换流器接替它的工作, 转为直流电压控制并维持VSC-MTDC系统的稳定。通过设定不同的偏差可以实现多点电压控制。

但直流电压偏差控制策略缺点是电压偏差值的选取困难。尤其站数量增多, 多个定直流电压后备站对应了多个后备优先级, 增加了各后备站控制器的设计复杂度; 换流站工作状态切换延时较长。适用于3~4端直流系统, 不需要站间通讯场合。

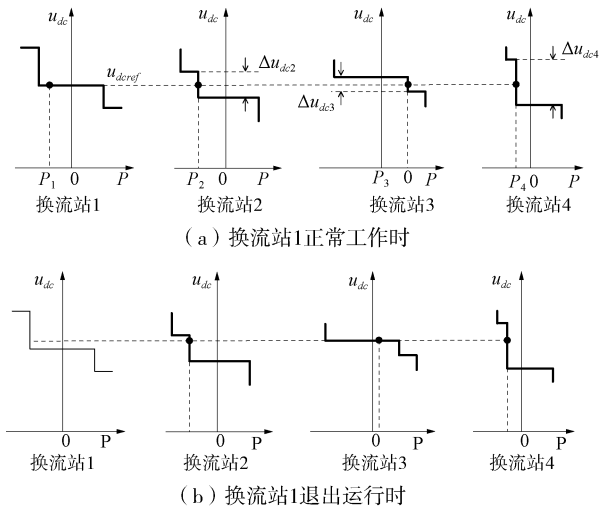


图6 基于直流电压偏差控制示意图

Fig. 6 Diagram of DC Voltage Control Based on DC Voltage Bias

另外一种不依赖通讯的控制方式是下垂控制方式, 如图7所示, 直流电压下垂控制是指, 换流器的出口电压和直流电流的关系符合一定的斜率的线

性关系。直流电压下垂控制策略运用直流电压斜率控制器, 按照各站容量和允许偏离额定直流电压运行范围, 设定每个站电流—直流电压 ($I_d \sim U_d$) 特性曲线, 将稳定直流电压的任务分配到每一个直流电压控制站, 以实现系统运行工况变化后功率的重新分配, 这种下垂控制模式是综合功率控制和直流电压控制器特点, 实现多站直流电压控制功能。

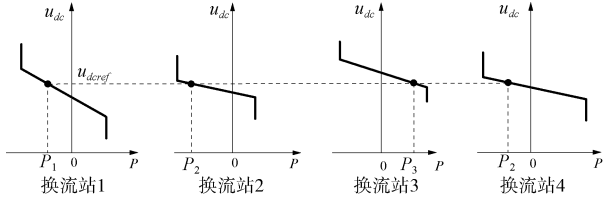


图 7 基于直流电压下垂控制示意图

Fig. 7 Diagram of DC Voltage Control Based on DC Voltage Droop

直流电压下垂控制中, 采用如下控制策略, 分别在直流电压控制站以及功率控制站加入功率控制环节以及直流电压控制环节, 使得换流器出口直流电压和直流功率/电流符合给定斜率关系, 通过设定合适的固定参数 K_p 和 K_u , 这种方式也可以称作自适应控制策略, 自适应控制策略每个换流器负责自己的功率目标, 没有换流器负责系统的电压, 同时, 与交流系统的发电机出力和负荷自动调节类似, 采用自适应控制的换流器不能准确定义功率的传输点, 只能设定 $V_{dc} \sim I_{dc}$ 特性曲线, 每个换流器自适应调整出口直流电压和电流, 整个系统潮流变化不大情况下, 这种方式是合适的, 对于潮流和直流电压变化较大网络, 这种方式不适合。

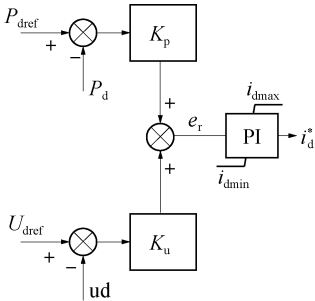


图 8 直流电压下垂控制

Fig. 8 DC Voltage Control Based on DC Voltage Droop

在图 8 中, 最终有功电流指令 PI 环节的输入量 e_r 可以表示为:

$$e_r = K_p(I_{dref} - I_{dc}) + K_u(U_{dref} - U_d)$$

式中: K_p 和 K_u 为上述控制器的比例系数; I_{dref} 和 U_{dref} 分别为外环控制器的直流电流和直流电压参考值。

这种方式特点是多个换流站同时具备直流电压控制和潮流分配能力, 具备直流电压下垂控制器的换流站能够根据直流网络中的潮流变化自适应调整有功电流指令, 缺点是无法精确控制交流侧或者直流侧功率。

2) 基于站间快速通讯的多站协调控制

采用通讯网络为上述站间点对点通讯方式或者基于网络结构的手拉手通讯方式, 这种方式不存在上层控制器, 也不存在系统级控制功能, 组成直流电网各换流站按照预定的功率控制、直流电压控制模式进行控制, 多采用主从式控制方式^[11], 如图 9 所示, 控制模式的切换依赖站间通讯, 主从控制容易实现, 整个直流电网中任何一时刻仅有一个换流站处于直流电压控制模式, 当前直流电压控制站闭锁或者由于容量限制切换为功率控制, 下一个站必须依赖站间通讯检测切换为直流电压控制站, 一旦两站之间失去通讯联系, 同时也不存在通过其他通讯支路回绕方式获取上一个直流电压控制站的闭锁或者控制模式信息, 整个直流网络会因失压存在停运风险。

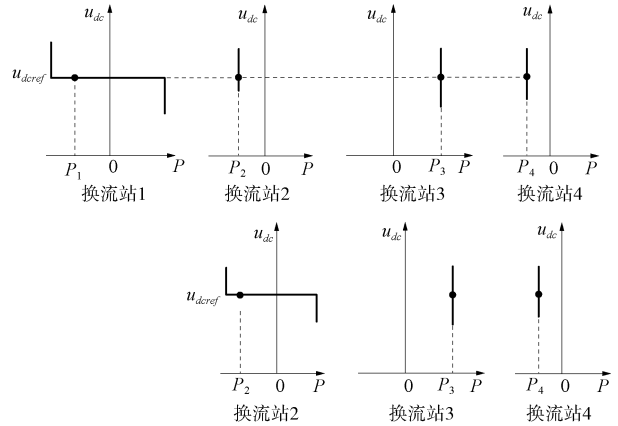


图 9 主从控制示意图

Fig. 9 Diagram of Master/Slave Control

直流电压控制站和功率控制站的控制原理如图 10 所示, 这种控制方式特点是直流电压控制和功率控制都属于无差调节, 能在直流网络中实现直流电压和功率的准确控制, 但缺点是需要高速通讯切换直流电压控制站和功率控制站。

3) 基于上层控制的多站协调控制

通讯网络采用的是上述“基于上层协调的通讯架构”, 在直流电网的协调控制系统中划分为换流器控制层和系统控制层, 换流器层实现参考电压到

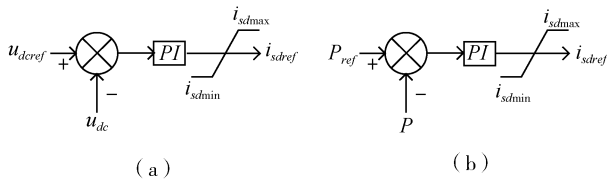


图 10 直流电压控制站和功率控制站策略示意图

Fig. 10 Diagram of DC Voltage Control and Active Power Control

触发脉冲序列的转换，系统控制中协调控制功能为整个直流网络中各换流站提供直流电压以及直流电压指令，正常运行时，各换流站运行在具有一定稳定裕度的状态，不依赖高速通讯，一旦整个网络潮流发生改变，各个换流站在协调控制作用下，通过不断调整自身特性曲线，保持整个直流网络的直流电压在额定范围内，同时保证每个换流站处于不过载状态。

缺点在于一旦上层控制的系统控制层失去作用，或者与换流器控制层失去通讯联系，无法保证直流网络的长期稳定运行，因此需要结合以上无通讯方式下的下垂控制策略，一旦检测失去站间通讯，不仅需要维持之前运行方式不变，而且能在直流电压控制站闭锁后，其他站能按照下垂控制方式继续维持直流网络运行，基于上层控制的多站协调控制有两种实现方式：

一种方式是采用上层控制器实时协调多站运行，上层控制器功能也可以在通讯中断后自动切换到某个换流站站内控制器实现，协调控制主机作用是通过获取整个直流网络的：(1)各换流站的容量限制数值；(2)各换流站的功率参考值信息；(3)所有换流站的实际功率；(4)所有直流线路的电流；(5)所有换流站出口直流电流信息，维持直流网络直流电压在给定范围内，以及调整每个换流站出口直流电流，以此达到调整整个直流网络潮流分布，优化网络潮流分布以减小网损，以及防止个别线路过载，实现直流系统启停，以及制定运行计划等目的。

另外一种方式是依赖各站的直流电压调整来协调直流电网的功率，上层控制起辅助调整作用，具体是通过修改下层控制器的输出特性参数，目的是调整该换流器输出功率和直流电压，从而改变整个直流网络的潮流分布。

4 结论

本文对多端柔性直流输电控制及保护系统的层

次划分设计、控制功能配置以及多端直流通讯组网形式以及相应控制策略进行了论述，提出了在站间点对点通讯方式，手拉手通讯方式下，以及基于上层协调的通讯架构三种方式下采取对应的多端控制策略，实际应用中结合站间通讯状况，切换相应的控制策略满足多端柔直直流电压和功率控制要求。

参考文献：

- [1] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述 [J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-9.
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and Application of VSC HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-9.
- [2] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and Prospects for HVDC Light [J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27(4): 77-81.
- [3] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 适用于电压源型高压直流输电的控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 39-44.
HU Zhaoqing, MAO Chengxiong, LU Jiming. A Novel Control Strategy for Voltage Sourced Converters Based HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 39-44.
- [4] 董云龙, 包海龙, 田杰, 等. 柔性直流输电控制及保护系统 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 89-92.
DONG Yunlong, BAO Hailong, TIAN Jie, et al. Control and Protection System for VSC-HVDC [J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(19): 89-92.
- [5] 梁少华, 田杰, 曹冬明, 等. 柔性直流输电系统控制保护方案 [J]. 电力系统及其自动化, 2013, 37(15): 59-65.
LIANG Shaohua, TIAN Jie, CAO Dongming, et al. A Control and Protection Scheme for VSC-HVDC System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 59-65.
- [6] 董云龙, 杨勇, 田杰, 等. 基于模块化多电平换流器的柔性直流输电动态模拟系统 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 74-78.
DONG Yunlong, YANG Yong, TIAN Jie, et al. Dynamic Simulation System for Modular Multiterminal Converter Based VSC-HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 74-78.
- [7] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 新型多端高压直流输电系统应用及其控制. 高电压技术, 2004, 30(11): 31-33.
HU Zhaoqing, MAO Chengxiong, LU Jiming. Application and Control Strategy of New Multi-terminal HVDC System [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 31-33.
- [8] 陈海荣, 徐政. 适用于 VSC-MTDC 系统的直流电压控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 28-33.
- [9] 唐庚, 徐政, 刘昇, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的新直流电压控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 125-132.
- [10] 唐庚, 徐政, 薛英林, 等. 基于模块化多电平换流器的多端柔性直流输电控制系统设计 [J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 2773-2782.
- [11] 阮思焯, 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.

(责任编辑 郑文棠)