

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190607

张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及 协调控制策略研究

杜晓磊¹, 郭庆雷², 吴延坤², 蒲莹²

(1. 国家电网公司特高压建设部, 北京 100031; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209;

摘要: 张北柔性直流电网示范工程(简称张北工程)将建成世界上首个柔性输电直流电网。不同于以往的多端直流工程, 张北工程采用直流断路器对线路故障进行隔离。四端口字型网架结构为潮流提供迂回和备用通道, 极大地提高了工程运行的灵活性和可靠性, 形成了真正意义上的直流电网。根据张北工程各个换流站所连接交流系统的特点, 研究并提出了针对该工程的控制系统架构和协调控制的相关功能, 以及有无站间通信方式下具体的控制策略。通过闭环 RTDS 实时仿真验证了该策略的可行性和合理性。

关键词: 柔性直流电网; 控制系统架构; 协调控制; 自适应控制; 实时仿真验证

Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei Demonstration Project of MMC-HVDC Grid

DU Xiaolei¹, GUO Qinglei², WU Yankun², PU Ying²

(1. UHVDC Construction Department, State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Zhangbei Demonstration Project (namely Zhangbei Project) will be the first MMC-HVDC grid in the world. Different from previous multi-terminal HVDC projects, DC circuit breakers are adopted in this project to isolate DC line faults. Four terminal ring connection of converters can provide circuitous and standby channels for power flow. This improves the flexibility and reliability of operation of the project greatly and forms the real MMC-HVDC grid. Based on the characteristics of different AC systems connecting to each converter in the Zhangbei Project, the related functions of the control system structure and coordination control for this project are studied and proposed. Corresponding control strategies with and without inter-station communication conditions are proposed. The feasibility and rationality of the control strategy are verified by closed-loop RTDS simulation.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900905) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5202011600TV).

Key words: MMC-HVDC grid; control system structure; coordination control; adaptive control; real time simulation verification

0 引言

采用高压直流电网实现大规模清洁能源发电并网和输送具有广阔的应用前景^[1-5]。目前, 建设中的张北工程为四端柔性直流环形电网, 电压等级为

±500 kV, 包括张北和康保两座风电送端换流站、北京受端换流站以及丰宁抽水蓄能调节端换流站。张北、北京换流站容量均为 3 000 MW, 康保、丰宁换流站容量均为 1 500 MW。张北工程采用环形电网结构, 具有以下几个优点: (1) 可靠性高, 能够实现多电源供电或多落点供电; (2) 灵活性好, 可以在送端直接实现可再生能源、抽蓄等储能与负荷间的灵活能量交互, 解决大规模可再生能源的系统调

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900905); 国家电网公司科技项目资助(5202011600TV)

峰问题,使得有功不平衡量优先在直流网内处理,减小间歇性能源对受端交流电网的扰动冲击;(3)扩展性好,结合未来负荷的发展和示范工程应用效果,柔性直流电网可向承德、锡盟等风电、光伏发电基地延伸,进一步扩大可再生能源接入规模和范围,同时消纳范围可进一步延伸至唐山、天津等负荷中心^[6-8]。

张北工程采用“半桥式子模块+直流断路器”的技术路线,直流侧架空线路连接如图1所示。文献[9]研究张北工程抽蓄电站和经多端柔性直流电网接入的大规模新能源间的协调互补优化控制方案;文献[10]研究张北直流电网工程新能源与抽蓄电站配置方案运行经济性;文献[11]研究张北直流电网故障电流特性及抑制方法;文献[12]研究张北直流电网关键技术与设备。关于多换流器的协调控制功能,文献[5]提出多端直流协调控制思路;文献[13-14]分别研究下垂控制对直流电网动态电压稳定性的影响和自适应下垂控制适用于海上风电并网的多端柔性直流系统。目前,对直流电网的研究主要集中在仿真建模、控制策略、设备研制等方面,缺少对实际工程的控制系统框架研究^[8-9,13,15]。

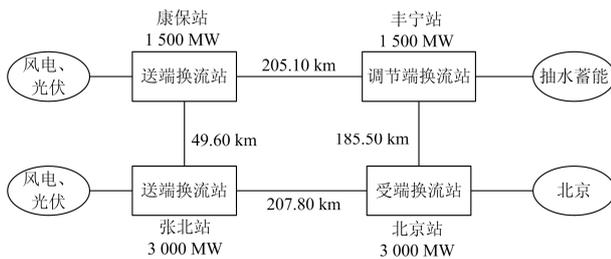


图1 张北工程四端柔性直流电网结构图

Fig. 1 Zhangbei four-terminal flexible DC grid

本文以张北工程为依托,分析各换流站的特点,深入研究柔性控制系统框架和有无通信情况下具体的控制策略。结合直流电网协调控制和换流站自适应控制,基于实际工程控制保护系统的闭环 RTDS 实时仿真,验证了所提出控制框架和协调控制策略的有效性。

1 直流电网控制系统分层结构

相比与传统交流电网中潮流的自由流向,直流电网中换流站输送功率的大小和方向可以快速控制和调节,接入新能源的换流站,可以运行在孤岛模式下,有利于新能源的外送。直流电网的控制系统应使直流电网满足以下的要求:

1) 功率传输灵活可控,各换流站应能实现新能源孤岛接入和负荷孤岛供电;

2) 暂态扰动时,多个换流站应参与系统恢复稳定过程;

3) 各换流站运行不依赖协调控制,无通信时换流站固有的自适应控制功能保证直流电网运行在安全范围内;

4) 单一设备/元件故障不影响电网运行,或导致其他非故障设备停运;

5) 具有良好的适用性和可扩展性,后期新接入换流站不影响已投运换流站的运行,不需要更换或者改造已投运设备。

张北工程由风机、光伏、耗能装置、多电平柔性直流换流器、直流断路器等大量基于电力电子器件构成的复杂系统组成,控制系统功能复杂,相互耦合关系强,配合逻辑复杂,各系统必须精准配合才能实现系统安全稳定运行。

为了更安全地控制直流电网的电压和提高柔性直流电网可靠性,张北工程整体控制系统架构主要分为三个层次:远方调度层、直流电网协调控制层和换流站控制层,如图2所示。

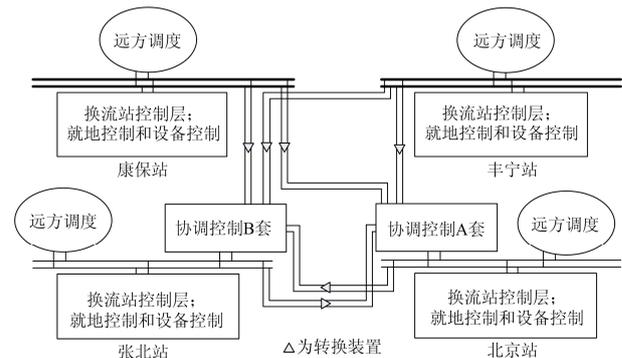


图2 张北柔性直流电网控制架构示意图

Fig. 2 Control structure diagram of Zhangbei DC grid

1.1 远方调度层

远方调度中心经由电力数据网或专线通道,通过站内的远动工作站对换流站的所有设备实施远方控制。

1.2 直流电网协调控制层

鉴于张北工程本阶段换流站较少、运行方式受限、直流电网特性较弱,考虑增加设置直流电网协调控制层,通过对电网的运行状态进行计算,调节各换流站的控制模式和指令,实现直流电网潮流和系统电压的优化控制^[9,13,15]。

如图2所示,在北京换流站和张北换流站均设置协调控制设备,北京站为主用系统,张北站为备用系统。电网协调控制系统与各换流站的通信采用双冗余形式连接。由于直流电网协调控制需要站间

通信提供信息,若站间通信失去后,直流电网协调控制功能不再起作用,各换流站仅通过换流器自适应控制维持电网的稳定运行^[16-19],如图3所示。

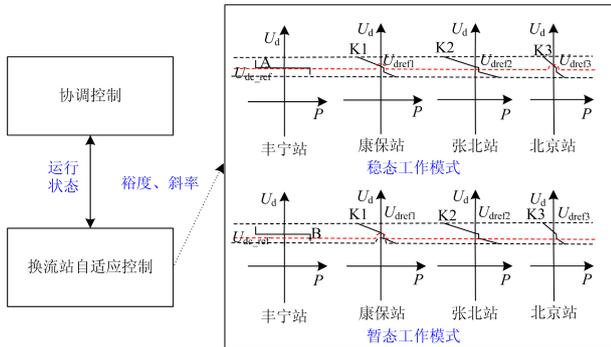


图3 协调控制和换流站自适应控制的拓扑关系

Fig. 3 Topological relationship between coordination control and adaptive control

1.3 换流站控制层

与常规直流工程相似,换流站控制层包括:运行人员控制系统、交直流站控系统、直流极控系统。

运行人员控制系统是换流站正常运行时运行人员的人机界面和站监控数据收集系统的重要组成部分。

交直流站控系统需要具备的功能主要包括控制和监视功能、数据采集功能、顺序控制和联锁、事件的生成和上送、交流站用电源系统控制及监视等。

极控系统的主要作用是根据当前运行情况,通过对调制波形的调节,以实现系统要求的有功和无功类控制目标。此外,极控系统还具有根据交直流系统运行工况进行变压器抽头调节、对换流阀解锁/闭锁顺序的控制、保证系统的平稳启停以及为提高系统性能而进行的附加控制等^[20]。

柔性直流电网在某些故障后,需通过直流断路器快速切除和隔离故障、分组投入交流耗能装置,并由安控系统配合分片切除新能源机组,维持直流电网稳定运行^[11-12]。柔性直流电网与交流耗能装置、安控系统的接口均在极控系统,由极控实现信息和指令交互。

2 直流电网换流站分类及控制方式

2.1 换流站分类

根据张北工程中各换流站的功能定位,将换流站分为孤岛电源换流站、调压换流站、重点负荷换流站。

孤岛电源站指换流站交流侧接孤岛电源的站,例如接入孤岛风电的张北和康保换流站。这些孤岛电源没有稳定的交流电压支撑,需换流站逆变成

交流电压源。因此换流站控制方式应采用电压-频率(V-F)控制。

调压换流站为联网换流站,例如丰宁换流站。直流电网中在同一时刻只允许有一个调压换流站,在电网电压出现小扰动时,调压换流站根据直流电压的变化自动调节其功率的大小,快速抑制电压波动,使直流电网实现能量平衡,快速恢复稳定运行。

重点负荷站为联网换流站,例如北京换流站。一般由换流站所连接交流系统的重要程度决定,由调度指定换流站为重点负荷站,重点负荷站有功类控制目标采用定有功功率控制模式,不随直流电压的波动调节换流站的输出功率,保证重点负荷接收到的功率稳定,保证供电可靠性。

2.2 换流站的控制方式

张北换流站和康保换流站可联网运行,也可孤岛接入大规模风电场。北京换流站为主要的功率受端,丰宁换流站为调节端。因此,在联网方式下,张北和康保换流站控制模式为定有功功率和定无功功率;在孤岛方式下,为定交流电压、定交流频率。丰宁换流站控制方式为定直流电压和定无功功率;北京换流站为定有功功率和定无功功率。各方式下控制模式如表1、表2所示。

表1 联网方式下张北柔性直流电网稳态控制模式

Table 1 Steady control strategy of DC grid in network mode

换流站	联网方式下控制指令	
	有功功率类	无功功率类
张北换流站	定有功功率	定无功功率
康保换流站	定有功功率	定无功功率
丰宁换流站	定直流电压	定无功功率
北京换流站	定有功功率	定无功功率

表2 孤岛方式下张北柔性直流电网稳态控制模式

Table 2 Steady control strategy of DC grid in island mode

换流站	孤岛方式下控制指令	
	有功功率类	无功功率类
张北换流站	定交流频率	定交流电压
康保换流站	定交流频率	定交流电压
丰宁换流站	定直流电压	定无功功率
北京换流站	定有功功率	定无功功率

3 直流电网协调控制和自适应控制

3.1 直流电网协调控制功能

相比于换流器的毫秒级自适应控制,直流电网协调控制属于慢速控制,类似于直流电网调度功能,在直流电网重启、电网结构发生变化时优化系统运行。当稳态运行、电压电流处于正常运行范围时,站间协调控制不起作用。

张北工程的协调控制层主要具备以下功能。

(1) 换流站电压控制权转移

协调控制层根据网络拓扑结构和并网的换流站具体情况, 按照一定的策略转移换流站的控制权。即根据直流电网的运行方式(包括环网、开环、解列等)和换流站的运行方式(孤岛、联网)调整各站的控制模式, 当前定电压站失去时, 站间协调控制按照定直流电压站的优先级排序选择其他换流站作为定电压站。

(2) 电网电压范围控制

协调控制层可以控制直流电网稳定运行时任一点直流电压不超过要求的电网运行电压范围。即对采用定直流电压控制的换流站, 确定其直流电压指令, 以控制直流电网的电压运行范围。

(3) 相关的顺控联锁功能

通过协调控制层, 各换流站可以检测出对站的状态, 从而设置相关的顺控联锁功能, 以提高系统运行可靠性。例如: 整个直流电网在解锁过程中, 必须有且只有一个换流站处于直流电压控制模式, 如果不满足此条件, 换流站不满足解锁条件, 无法解锁; 当某条直流线路到达电流限值时, 在顺控联锁中闭锁功率提升的功能, 无法输入功率提升的指令, 从而提高运行可靠性。

(4) 直流线路过负荷控制

对采用定有功功率控制或孤岛运行的换流站, 还配置了线路电流过负荷限制功能, 通过调节功率指令(孤岛状态下通过安控系统配合调节功率), 限制线路电流在不超过线路和直流断路器等设备的最大稳定运行能力。

3.2 换流器自适应控制功能

在直流电网中, 系统的稳定性主要指直流电压的稳定, 换流站自适应控制功能是在定功率换流站的直流电压超过正常范围后, 通过调节换流站的有功功率使直流电网电压重新恢复到正常范围内。自适应控制不依赖站间通信。目前, 常用的自适应控制有直流电压偏差控制、直流电压斜率控制、直流电压偏差斜率控制^[21-25]等。

直流电压偏差控制采用的是多点直流电压控制的策略, 其基本思想是选择某一换流站主控直流电压, 并自动平衡系统的有功^[26-30]; 其他换流站主控功率, 但也设置直流电压控制器, 其直流电压指令值依次增加一个偏差带, 这样可以确保任何情况下整个系统的直流电压都可控, 并且只被一个换流站控制。如图 4 所示, 正常运行时丰宁站控制直流电压在 A 点, 若直流电网内电压下降至 B, 则丰宁站切换成定功率控制, 张北站控制直流电压。偏差控

制策略的缺点是当直流电网内电网波动时, 会频繁切换定直流电压站。

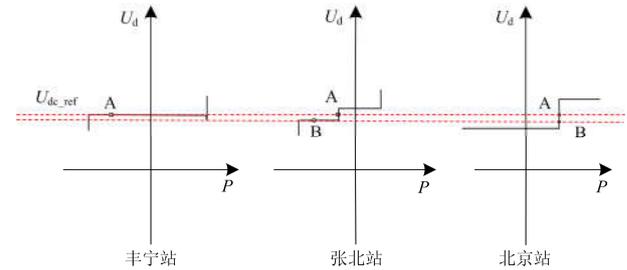


图 4 直流电网电压偏差控制原理图

Fig. 4 DC voltage deviation control scheme of DC grid

直流电压斜率控制的思路来源于交流系统中的调频控制器。在直流输电系统中, 换流站可以根据其所测得的直流电压的数值时刻调整其直流功率的设定值, 以满足直流输电网络对直流功率的需求, 而这种调整方式可以采用一条直流电压与功率的关系曲线来表示, 换流站 U-P 曲线如图 5 所示。该策略在实现对换流站输入交流功率控制的同时, 也实现了直流网络传输功率的平衡, 属于开环控制, 因此对各个换流站控制器参数非常敏感。

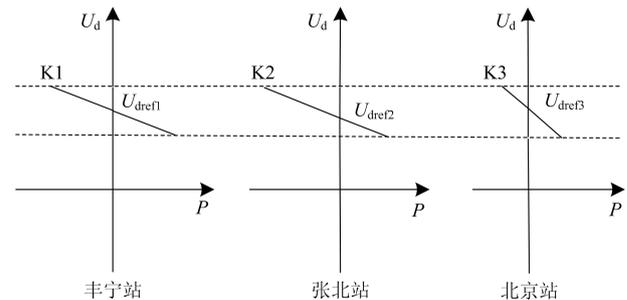


图 5 直流电网电压斜率控制原理图

Fig. 5 DC voltage slope control scheme of DC grid

综合两种控制器的优点, 张北工程提出了具有直流电压偏差斜率控制功能的自适应策略。运行时, 电压主控站控制直流电压在预先设定好的电压参考值。通过给其他换流站设置合适的指令偏差, 使其他换流站在稳态工况时不参与电压调节。当直流电压变化超过一定死区后, 其他换流站按照设定好的斜率参与电压控制。其控制原理如图 6 所示, 定义进直流电网功率为正, 北京站为受端, 张北站和康保站为送端。以丰宁换流站主控直流电压为例, 在暂态过程中, 当丰宁换流站直流功率越限或故障时, 丰宁换流站直流功率被限制, 失去了稳定控制直流电压的能力, 直流电压无法被控制在参考值, 系统直流电压波动。当电压变化超过换流站死区范围时, 其他换流站进入斜率控制, 从定直流功率控制模式转变为电压斜率控制模式, 通过调节有功功率以使

直流电网的正常电压范围之内。

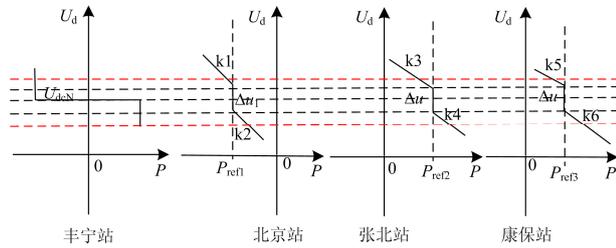


图6 直流电网电压斜率偏差控制

Fig. 6 DC grid voltage slope and deviation control

以图6为例,直流电网电压正常运行在横坐标轴上方第二条线和第四条线之间。上限线为电压升高限制,例如丰宁换流站故障退出或北京换流站负极紧急功率转带到正极。假设由于某种原因导致直流电压越过上方红线位置,当直流电压越过上限后,根据预先设定的斜率偏差曲线,北京换流站自动从直流电网增加输出功率,张北和康保换流站自动向直流电网减少输入功率,从而使丰宁站在其功率能力范围内可以控制直流电网的电压至正常范围(500~527 kV)内。下限线表示电压降低限制,例如张北或康保换流站故障退出。假设由于某种原因导致直流电压越过下方红线位置,当直流电压越过下限后,根据预先设定的斜率偏差曲线,北京换流站自动从直流电网减少输出功率,张北和康保换流站自动向直流电网增加输入功率,从而使丰宁站在其功率能力范围内可以控制直流电网至正常范围内。

基于上述对协调控制和换流站自适应控制的功能,根据运行工况,本文梳理了不同类型换流站在有站间通信和无站间通信情况下的投入/退出操作步骤,如表3所示。

4 仿真实验

基于张北工程实际参数,在RTDS仿真平台上搭建直流电网主回路,与工程现场配置相同的控制保护装置相连,构成闭环实时仿真系统。以不同控制方式的换流器投入、计划退出和故障退出为例,验证协调控制和自适应控制配合的策略。

4.1 有站间通信时联网定功率换流器投入

初始工况为直流电网全接线运行,张北换流站正极750 MW向直流电网送电,北京换流站正极满功率1500 MW从直流电网受电,丰宁换流站定直流电压运行。康保换流站的波形如图7所示,图中从上至下依次为直流电压、直流电流、有功功率、无功功率、有效状态/解锁/直流电压控制/直流母线快速开关位置状态。当投入康保换流站正极换流器

时,康保换流站先按定直流电压方式解锁,然后转为定功率控制模式,同时发合直流母线快速开关命令,整个过程比较稳定,直流电流存在约20 A波动且快速消失,其他换流站无波动。

表3 不同类型换流站投入/退出

Table 3 Connecting and disconnecting of different converter stations

	有站间通信	无站间通信
定电压站启动投入	带直流线路以定电压模式解锁,电网电压升至500 kV。	带直流线路以定电压模式解锁,电网电压升至500 kV。
定电压站计划退出	调节定功率站有功功率,将定电压站功率调节至零,退出定电压站,另一换流站自动切换为定电压模式。	调节定功率站有功功率,将定电压站功率调节至零,退出定电压站,另一换流站按计划手动切换为定电压模式。
定电压站故障退出	各换流站自适应控制调节功率,直流电压运行在允许范围内,另一换流站自动切换为定电压模式。	各换流站自适应控制调节功率,直流电压运行在允许范围内。直流电网内无定电压站,需调度重新指定新的定电压站。
定功率站投入	以定电压方式解锁,将控制模式切换为定功率控制模式的同时投入换流站。	以定电压方式解锁,将控制模式切换为定功率控制模式的同时投入换流站。
定功率站计划退出	将预退出站有功功率调节至零,闭锁后退出。	将预退出站有功功率调节至零,闭锁后退出。
定功率站故障退出	直流电压增大或降低,各换流站自适应控制调节功率,直流电压运行在允许范围内,协调控制下达调节直流电压指令至更合理范围。	直流电压增大或降低,各换流站自适应控制调节功率,直流电压运行在允许范围内。

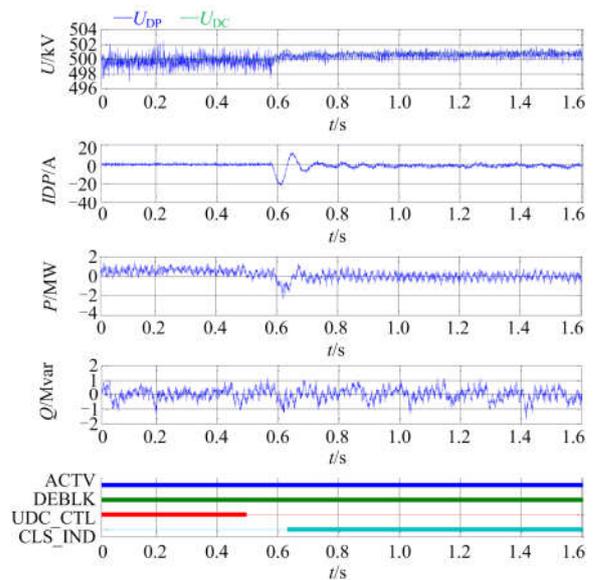


图7 康保换流站投入运行波形图

Fig. 7 Waveforms of Kangbao station connecting to DC grid

4.2 有站间通信时定电压换流器计划退出

初始工况为正极直流线路回字形环网运行, 如图 8 所示, 张北换流站正极 1 500 MW 向直流电网送电, 康保换流站正极 750 MW 向直流电网送电, 北京换流站正极满功率 1 500 MW 从直流电网受电, 丰宁站定直流电压。将丰宁换流站计划退出。首先通过调度中心调节定功率站的有功功率, 将定电压站功率调节至零, 然后闭锁定电压站。定电压站闭锁后, 协调控制系统自动指定北京换流站为定电压控制站。图中从上至下依次是四个换流站的直流电压(蓝色为北京换流站, 绿色为张北换流站, 红色为康保换流站, 紫色为丰宁换流站)、四个换流站的直流功率、丰宁换流站解锁信号、北京换流站定直流电压控制模式。从图 9 中可以看出定电压换流站可以依靠协调控制系统进行平稳的退出, 对直流电网冲击较小。

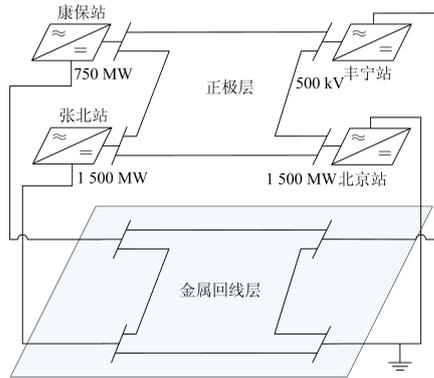


图 8 正极直流线路回字形环网运行

Fig. 8 Four terminal ring connection of positive pole

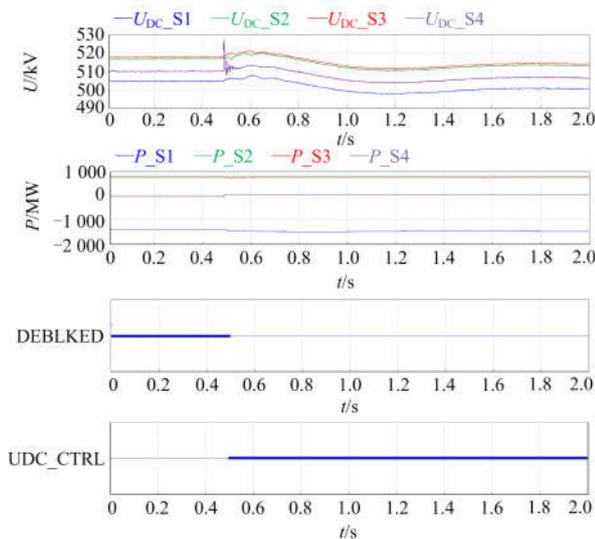


图 9 定电压换流站退出运行的波形

Fig. 9 Waveforms of constant voltage converter station disconnecting to DC grid

4.3 有站间通信时定功率换流器故障退出

初始工况为直流电网全接线运行, 北京站双极有功功率-2 000 MW, 张北站和康保站均为联网模式, 张北站双极有功功率 1 500 MW, 康保站站双极有功功率 1 500 MW, 丰宁站定直流电压。北京站极 2 发生故障闭锁退出, 极 1 立即功率转带为 1 500 MW, 由于北京站极 1 的有功功率突然增加, 导致极 1 直流电网内功率缺额, 北京站极 1 直流电压降低至 485 kV 以下, 因此北京站极 1 进入自适应控制, 如图 10 所示。北京站出现故障后, 直接受到影响的为张北站和丰宁站, 张北站极 2 直流电压超过 527 kV 一定时间后进入直流电压过负荷限制控制, 主控极转移到极 1, 因此极 1 功率增加, 如图 11 所示。丰宁站极 1 控制直流电压, 故障瞬间后由于北京站极 1 功率转带, 因此丰宁站极 1 对应的有功功率降低, 如图 12 所示。当丰宁站极 1 的直流电压持续低于 500 kV 一定时间, 协调控制起作用, 下达提升直流电压指令, 将直流电压提升到 500 kV 以上, 如图 13 所示。

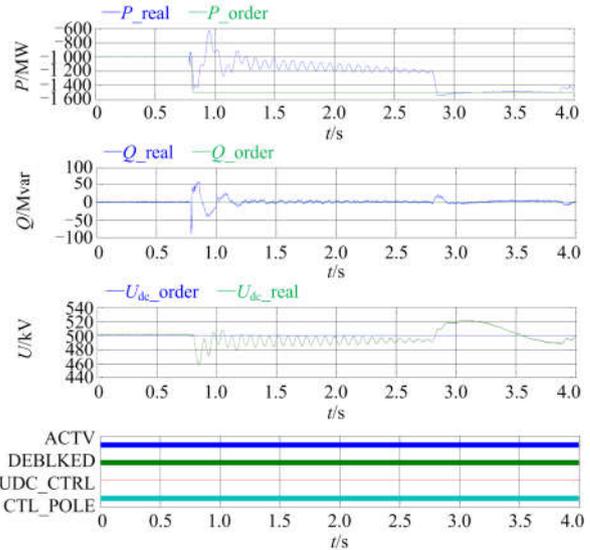


图 10 北京站极 1 功率转带波形

Fig. 10 Waveforms of power transfer of Beijing station pole 1

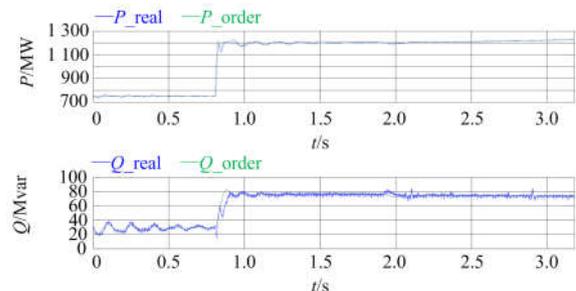


图 11 丰宁站极 1 功率转带波形

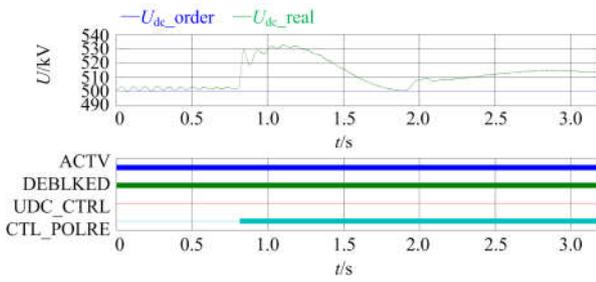


图11 张北站极 1 波形

Fig. 11 Waveforms of Zhangbei station pole 1

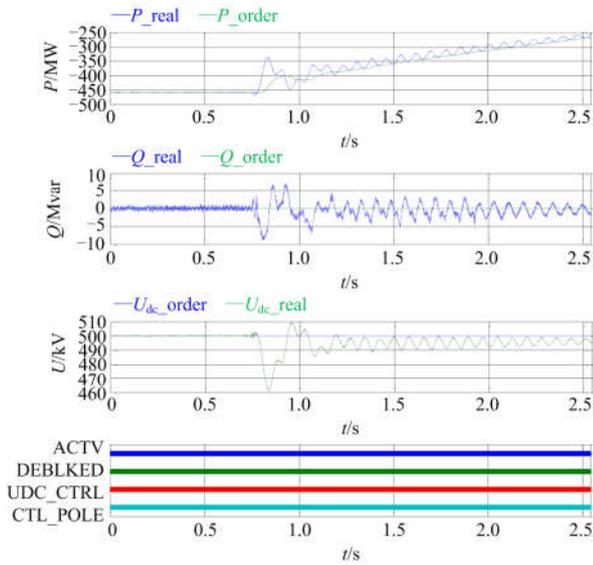


图12 北京站故障后丰宁站极 1 波形

Fig. 12 Waveforms of Fengning pole 1 after the fault

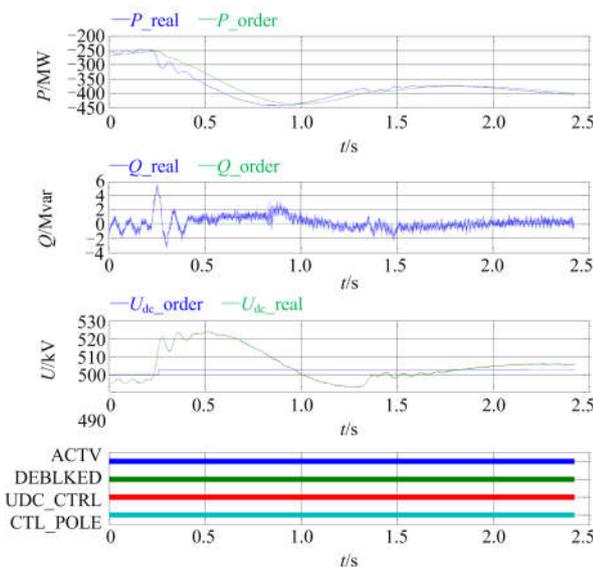


图 13 协调控制调节丰宁站极 1 直流电压波形

Fig. 13 Waveforms of Fengning pole 1 during coordinated control adjusting DC voltage

北京站极 2 故障退出后, 张北站极 2 直流电压瞬间升高至 527 kV 以上, 进入直流电压过负荷限制控制, 有功功率降低, 如图 14 所示。北京站极 2 故障瞬间, 康保站极 2 直流电压超过 535 kV, 进入自适应控制, 如图 15 所示。丰宁站极 2 定直流电压处于合理范围之内, 如图 16 所示。

通过各换流站的自适应控制和直流电网的协调控制的作用, 直流电网最终达到一个新的稳定运行点, 此时北京站极 1 有功功率-1 500 MW, 张北站极 1 有功功率 1 227 MW, 康保站极 1 有功功率 750 MW, 丰宁站极 1 定直流电压 502 kV, 对应有

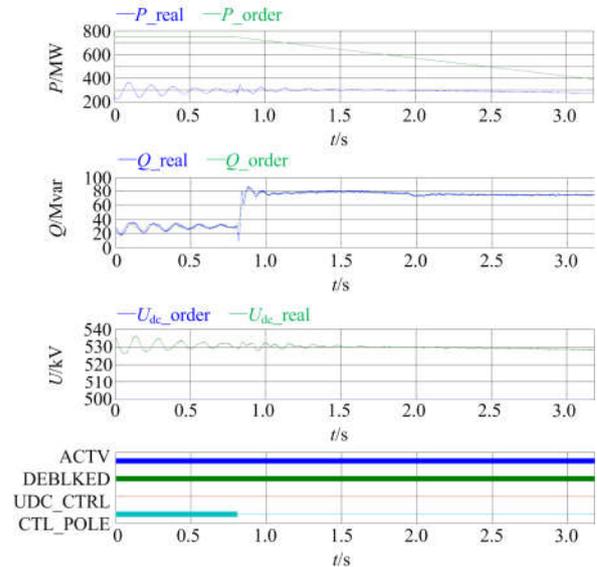


图14 张北站极 2 波形

Fig. 14 Waveforms of Zhangbei station pole 2

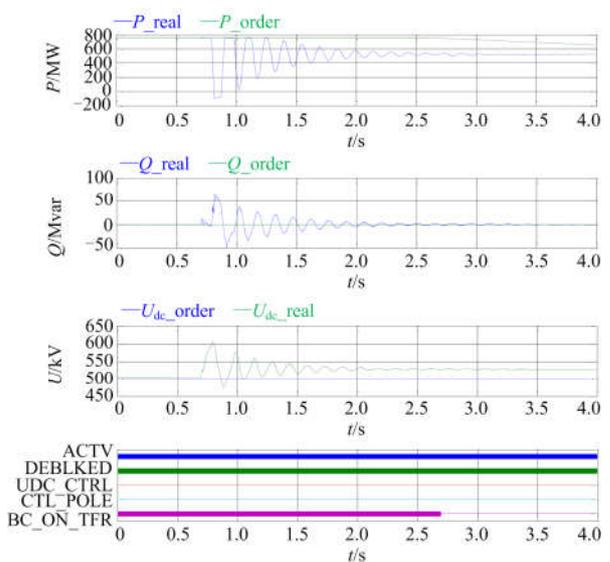


图 15 康保站极 2 波形

Fig. 15 Waveforms of Kangbao station pole 2

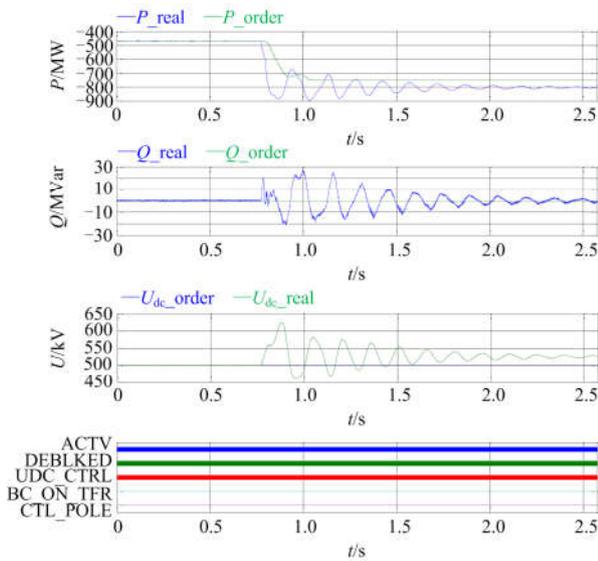


图 16 丰宁站极 2 波形

Fig. 16 Waveforms of Fengning station pole 2

功率-410 MW。张北站极 2 有功功率 273 MW，康保站极 2 有功功率 514 MW，丰宁站极 2 直流电压 500 kV，对应有功功率-770 MW。

如果由于站间通信故障而导致协调控制功能失效，本案例中极 1 的直流电压最终稳定运行在 500 kV 以下，低于额定直流电压运行，可通过运行人员手动调节定电压站的电压指令。

5 结论

张北工程是世界首个具备网络特性的直流电网示范工程，控制保护的架构、功能和策略直接决定了直流电网的运行特性和安全稳定性能。本文研究了直流电网的控制架构，提出了适用于未来直流电网的控制策略原则，以及维持直流电网安全稳定运行的协调控制策略和换流器自适应控制策略。

在有站间通信时，直流电网协调控制层通过对电网的运行状态进行计算，调节各换流站的控制模式和指令，实现直流电网潮流和系统电压的优化控制。在失去站间通信的情况下，柔性直流电网也可通过直流电压偏差斜率的控制策略，换流站行自动调节，维持直流电网稳定运行。通过实际控制保护系统的闭环实时仿真证明了提出策略的可行性和合理性，已用于张北工程控制保护系统中。

参考文献

- [1] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 1-25.
- [2] 汤广福. 2004 年国际大电网会议系列报道: 高压直流输电和电力电子技术发展现状及展望[J]. 电力系统自动

化, 2005, 29(7): 1-5.

- TANG Guangfu. A review of 2004 CIGRE on application status and perspective in HVDC and power electronics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 1-5.
- [3] 张文亮, 汤涌, 曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 1-6.
- ZHANG Wenliang, TANG Yong, ZENG Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 1-6.
- [4] 吴俊宏, 艾芊. 多端柔性直流输电系统在风电场中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 22-27.
- WU Junhong, AI Qian. Research on multi-terminal VSC-HVDC system for wind-farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 22-27.
- [5] 袁旭峰, 程时杰. 多端直流输电技术及其发展[J]. 继电器, 2006, 34(19): 61-67.
- YUAN Xufeng, CHENG Shijie. Multi-terminal HVDC transmission technology and its development[J]. Relay, 2006, 34(19): 61-67.
- [6] 陈鹏, 刘继春, 余熙, 等. 混合三端直流输电系统应用于风电场并网的研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(3): 357-362.
- CHEN Peng, LIU Jichun, YU Xi, et al. A study of wind farm connection based on hybrid three-terminal HVDC system[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(3): 357-362.
- [7] 赵清声, 王志新, 张华强. 海上风电场轻型直流输电的经济性分析[J]. 可再生能源, 2009, 27(5): 94-98.
- ZHAO Qingsheng, WANG Zhixin, ZHANG Huaqiang. Economic analysis on HVDC-light for off-shore wind farm[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(5): 94-98.
- [8] 鞠昌斌, 王环, 冯伟. 应用于柔性直流输电的光伏直流并网变流器研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(9): 1274-1280.
- JU Changbin, WANG Huan, FENG Wei, et al. Research of photovoltaic DC grid-connected converter applied in flexible DC grid[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(9): 1274-1280.
- [9] 李文锋, 张健, 卜广全, 等. 抽蓄电站和经多端柔性直流电网接入的大规模新能源间的协调互补优化控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 130-135.
- LI Wenfeng, ZHANG Jian, BU Guangquan, et al. A coordinate complementary optimization control scheme between pumped storage station and large-scale new

- renewable integrated through VSC-MTDC[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(23): 130-135.
- [10] 李湃, 王伟胜, 刘纯, 等. 张北柔性直流电网工程新能源与抽蓄电站配置方案运行经济性评估[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(24): 7206-7214
LI Pai, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Economic assessment of Zhangbei VSC-based DC grid planning scheme with integration of renewable energy and pumped-hydro storage power station[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(24): 7206-7214.
- [11] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔性直流电网故障电流特性及抑制方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(18): 5438-5446.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Research on the fault current characteristic and suppression strategy of Zhangbei Project[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(18): 5438-5446.
- [12] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500 kV 直流电网关键技术与设备研究[J]. *高电压技术*, 2018, 44(7): 2097-2106.
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC Grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(7): 2097-2106.
- [13] 吴蒙, 贺之渊, 阎发友, 等. 下垂控制对直流电网动态电压稳定性的影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(10): 8-15.
WU Meng, HE Zhiyuan, YAN Fayou, et al. Influence of droop control on the dynamic voltage stability of DC grid analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(10): 8-15.
- [14] 徐进, 金逸, 胡从川, 等. 适用于海上风电并网的多端柔性直流系统自适应下垂控制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(4): 78-85.
XU Jin, JIN Yi, HU Congchuan, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal VSC-HVDC system for offshore wind farms integration[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(4): 78-85.
- [15] 李国庆, 龙超, 陈洪涛. 计及直流电网线路损耗的直流潮流控制器安装位置选择[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(16): 43-49.
LI Guoqing, LONG Chao, CHEN Hongtao. Installation position selection of DC power flow controller considering the line-loss of DC grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(16): 43-49.
- [16] 李扶中, 周敏, 贺艳芝, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统接入与换流站设计方案[J]. *南方电网技术*, 2015, 9(1): 58-62.
LI Fuzhong, ZHOU Min, HE Yanzhi, et al. Design scheme of system access and converter station of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. *Southern Power System Technology*, 2015, 9(1): 58-62.
- [17] 吴方劫, 马玉龙, 梅念, 等. 舟山多端柔性直流输电工程主接线方案设计[J]. *电网技术*, 2014, 38(10): 2651-2657.
WU Fangjie, MA Yulong, MEI Nian, et al. Design of main connection scheme for Zhoushan flexible multi-terminal HVDC transmission project[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(10): 2651-2657.
- [18] 高强, 林焯, 黄立超, 等. 舟山多端柔性直流输电工程综述[J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(2): 33-38.
GAO Qiang, LIN Ye, HUANG Lichao, et al. An overview of Zhoushan VSC-MTDC transmission project[J]. *Power System and Clean Energy*, 2015, 31(2): 33-38.
- [19] 杨柳, 黎小林, 许树楷, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统集成设计方案[J]. *南方电网技术*, 2015, 9(1): 63-67
YANG Liu, LI Xiaolin, XU Shukai, et al. The integrated system design scheme of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. *Southern Power System Technology*, 2015, 9(1): 63-67.
- [20] 丁冠军, 汤广福, 丁明, 等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(36): 1-6.
DING Guanjun, TANG Guangfu, DING Ming, et al. Topology mechanism and modulation scheme of a new multilevel voltage source converter modular[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(36): 1-6.
- [21] 管敏渊, 徐政, 屠卿瑞, 等. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(2): 48-52.
GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(2): 48-52.
- [22] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(19): 64-68.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter in HVDC transmission[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(19): 64-68.
- [23] 赵岩, 胡学浩, 汤广福, 等. 模块化多电平变流器 HVDC 输电系统控制策略[J]. *中国电机工程学报*,

- 2011, 31(25): 35-42.
ZHAO Yan, HU Xuehao, TANG Guangfu, et al. Control strategy of modular multilevel converters based HVDC transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 35-42.
- [24] 管敏渊, 徐政. MMC 型 VSC-HVDC 系统电容电压的优化平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 9-14.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Optimized capacitor voltage balancing control for modular multilevel converter based VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 9-14.
- [25] 刘钟淇, 宋强, 刘文华. 新型模块化多电平变流器的控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(10): 5-8.
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. Research on control of the novel modular multilevel converters[J]. Power Electronics, 2009, 43(10): 5-8.
- [26] XU Yan, LIU Jingyan, FU Yuan. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(27): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.
- [27] 朱益华, 郭琦, 李威, 等. 含柔性直流输电系统的电网安全稳定特性和控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 20-26.
ZHU Yihua, GUO Qi, LI Wei, et al. Research on security and stability characteristics and control strategy of power grid with VSC-HVDC[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 20-26.
- [28] 吉攀攀, 董朝阳, 刘静一, 等. 适用于柔性直流输电换流阀子模块的便携式自动测试仪设计[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(8):42-47.
- JI Panpan, DONG Chaoyang, LIU Jingyi, et al. Design of portable automatic tester for flexible DC transmission converter valve sub-module[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(8): 42-47.
- [29] 徐雨哲, 徐政, 张哲任, 等. 基于LCC和混合型MMC的混合直流输电系统控制策略[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 13-25.
XU Yuzhe, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. Control strategy for hybrid HVDC transmission system based on LCC and hybrid MMC[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 13-25.
- [30] 游广增, 李玲芳, 朱欣春, 等. 云南电网对乌东德多端直流适应性分析[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 32-38.
YOU Guangzeng, LI Lingfang, ZHU Xinchun, et al. Analysis on adaptability of Yunnan Power Grid to Wudongde multi-terminal DC[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 32-38.

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-08-17

作者简介:

杜晓磊(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电技术; E-mail: duxiaolei810815@163.com

郭庆雷(1988—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为高压直流输电技术控制保护; E-mail: guoqinglei@chinasperi.sgcc.com.cn

吴延坤(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电技术控制保护。E-mail: wuyankun@chinasperi.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)