

新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述

袁志昌¹, 郭佩乾¹, 刘国伟², 赵宇明², 史梓男³

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;

2. 深圳供电局有限公司, 深圳 518020; 3. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610200)

摘要: 柔性直流输电技术由于在新能源并网领域的显著优势而成为适合新能源接入电网的电力传输方式, 控制与保护系统是新能源通过柔性直流输电系统接入电网安全稳定运行的核心要素。目前关于新能源经柔性直流接入电网的控制与保护还缺乏较为系统的总结与归纳, 为此, 论文对新能源通过柔性直流输电系统并网的交直流系统协调控制策略、保护区域划分和故障快速清除方案进行综述。首先, 基于国内外已投运和在建的典型新能源经柔性直流输电并网工程, 对新能源直流并网的系统结构与运行方式等特点进行概述。同时, 基于现有学术研究, 分析并梳理了国内外在新能源经柔性直流并网的控制方法及保护策略方面的进展。最后, 回顾工程应用与学术研究, 结合目前中国新能源接入电网的发展趋势, 探讨了多端互联网架结构下系统控制方式以及未来发展趋势, 并对大规模高渗透率新能源经柔性直流并网下的控制保护技术发展方向进行了展望。

关键词: 新能源并网; 电压源型换流器; 直流输电系统; 控制与保护; 柔性直流

Review on Control and Protection for Renewable Energy Integration Through VSC-HVDC

YUAN Zhichang¹, GUO Peiqian¹, LIU Guowei², ZHAO Yuming², SHI Zinan³

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Shenzhen Power Supply Corporation, Shenzhen 518020, China;

3. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610200, China)

Abstract: Possessing specific advantages, VSC-HVDC transmission technology becomes a suitable approach for renewable energy integration, and the control and protection system is the key element for the efficient, stable and secure operation of large-scale renewables integration. However, the systematic summary of the control and protection for renewable integration is not widely available in the literature. We reviewed the coordinated control strategy and fault protection scheme of renewable energy integration through VSC-HVDC. Firstly, according to the typical renewable energy integration projects, we summarized the system structure, operation mode, and respective characteristics of renewables integration system. At the same time, we analyzed the existing control and protection system through domestic & foreign projects, and discussed the control strategy trend for multi-terminal framework of power system. Finally, considering the current development trend of renewable energy integration and reviewing the existing project and research, we proposed the future roadmap of control and protection technology towards high renewables integration based on VSC-HVDC.

Key words: renewable energy integration; voltage sourced converter; direct current transmission system; control and protection; VSC-HVDC

0 引言

随着新能源发电技术的快速发展及国家对新能源发电政策的扶持和各地地方政府的积极推进, 新能源发电成为未来电力系统的重要发电形式。我国新能源资源基地主要分布在东部沿海以及西部内陆等较偏远地区, 目前, 电力通常经过高压直流或交

流进行传输。然而, 随着输送距离的不断延伸, 采用交流形式输送新能源存在着建设投资大、建设难度高、电感和电容充电功率太大、传输容量限制、无功补偿以及传送电能质量和电压质量等问题; 采用传统直流则存在换相失败以及需要交流系统进行支撑等问题, 且新能源本身的随机性和波动性特征将难以适应。因此, 随着新能源并网容量的不断增加, 未来电力网络应具备消纳大规模可再生能源发电的能力, 并且输电系统应能够有效地隔离新能源

基金资助项目: 中国南方电网公司重点科技项目(090000KK52180116)。
Project supported by the Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Corporation (090000KK52180116).

发电对交流电网造成的不利影响。

柔性直流输电技术不受距离限制, 能向无源负荷供电, 具有有功功率和无功功率独立控制, 响应迅速且无需无功补偿, 在远距离传输时投资比交流传输方式小等诸多显著技术优势, 因此成为新能源接入电网的理想传输方式^[1]。

然而, 新能源经柔性直流技术向交流系统供电时会解耦新能源和交流电网的频率联系, 对电网频率变化体现无阻尼特性, 当新能源产生波动时, 其频率稳定性很低, 接入电网会导致直流系统和交流系统的不稳定运行。因此, 柔性直流输电系统需要利用具有良好动态性能的控制方法来提高新能源并网的稳定性和可靠性。从保护层面上讲, 由于新能源经柔性直流输电技术接入电网的系统架构、工作模式、系统设备复杂程度及故障发展特性均与交流系统完全不同, 且任何一部分发生故障都会影响到整个直流系统的运行和设备的安全, 因此传统的交流保护方案并不能完全适用于柔性直流输电系统。

综上, 考虑国内新能源发电行业的快速发展以及新能源接入电网时所面临的挑战与存在的问题, 有必要对新能源经柔性直流输电系统接入电网的控制与保护进行更深入的研究, 从而保证新能源高效接入电网。本文首先对柔性直流输电技术的技术特点以及在新能源方面应用的优势进行了分析。其次, 对国内外已投运和在建的典型新能源经柔性直流输电并网工程的应用进行了概括, 结合工程应用与学术研究, 综述了国内外在新能源经柔性直流并网的控制方法及保护策略方面的研究进展。最后, 考虑目前我国新能源接入电网的发展趋势, 对未来新能源经柔性直流输电系统并网时的网络架构、协调控制方式以及故障清除和恢复方面进行了展望, 旨在为该领域的研究和应用提供参考。

1 柔性直流输电技术的特点及适用场合

基于电压源换流器的直流输电技术(VSC-HVDC)的概念最早由加拿大 McGill 大学的 Boon-Teck Ooi 等人在 1990 年提出^[2-3]。其中, 柔性换流器作为 VSC-HVDC 的核心设备, 通常采用双向可控电子器件绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)。

通过换流器的控制技术, 电压源换流器等效为幅值和相位都可控的电压源, 可以迅速在 PQ 的 4 个象限内实现有功功率 P 和无功功率 Q 的独立控

制; 同时, 由于柔性直流输电的换流器具有能够自主换相, 可工作在无源逆变方式以及能向无源网络进行供电的特点, 因此采用柔性直流输电技术可向孤岛和孤立的远距离负荷供电等; 其次, 柔性换流器即电压源换流器(voltage source converter, VSC)不存在传统直流的无功补偿问题, 无需配套大量的无功补偿设备和滤波器件, 从而大大减小了换流站的占地面积, 适合构成多端直流系统^[4]。这些显著特点使得柔性直流技术成为当下的研究热点, 同时也成为最具发展潜质的电力传输方式。

随着新能源对电力行业影响逐渐显著以及新能源发电成本的持续下降, 风电、光伏等新能源发电逐渐走向规模化。然而, 新能源接入电网采用传统特高压交流外送方式时, 由于新能源基地当地负荷就地消纳能力有限及接入电网短路容量不足等问题, 因此频频出现“弃风、弃光”的现象, 引起装机容量与外送、系统消纳能力之间的矛盾。此外, 当受端电网架构薄弱、短路容量小、电压支撑能力不足时, 新能源功率的随机波动性会造成电网无功的失衡, 特别是导致母线电压出现较大的波动, 使系统出现严重的电能质量问题, 进而影响系统的稳定运行。

基于电压源换流器的柔性直流输电技术具有功率快速调节的特性, 可以有效平抑新能源并网带来的功率波动, 从而消除新能源对电网产生的不利影响; 此外, 电压源换流器独有的自换相特性可实现无源逆变方式下为远距离或孤岛地区的新能源提供启动支撑, 从而极大地提高了输电的灵活性; 同时, 由于无需考虑无功补偿问题和模块化的结构体系等特点, 采用柔性直流输电技术可显著减少建设投资。

综上所述, 采用柔性直流输电技术能够很好地解决新能源间歇性出力的问题, 从而高效地将新能源接入电网, 提高电网对新能源的消纳能力, 实现广域上的新能源优化建设。因此, 柔性直流输电技术成为比较好的新能源接入电网电力传输方式^[5]。

2 新能源经柔性直流并入电网工程概况

国内外已有多个工程采用柔性直流输电技术将新能源接入电网, 其中包括海上风电场经柔性直流接入电网、陆地风电场经柔性直流接入电网、陆地与海上风电场混合接入以及多种可再生能源经直流输电系统接入电网等工程。

这些工程的陆续建设和投运为今后新能源经柔性直流方式接入电网的拓扑结构、运行方式、控制策略、保护配置和故障恢复等方面提供了坚实的技术支持和运行经验。

2.1 新能源经柔性直流并网工程

目前各国都充分认识到柔性直流输电系统在可再生能源建设中的重要作用, 新能源柔直并网工程逐渐增多, 典型的新能源经柔性直流并网工程概况如表 1 所示。

其中, 德国 Borwin1 是世界上第一个将海上风电经柔性直流输电技术接入电网的工程, 该工程的投入运行在海上风电场经柔性直流系统接入电网研究领域具有突破性意义, 为之后德国海上风电场并网的超级工程提供了充分的理论及工程指导依据。我国的上海南汇直流输电工程、广东南澳三端直流工程及浙江舟山五端柔性直流工程的建设则为风电接入、交直流混联并列运行切换控制与多端柔性直流输电系统的协调控制提供了坚实的基础与运行经验。张北四端柔性直流环网作为目前首个柔性直流环网工程, 该工程的建设不仅对新能源机组孤岛接入、高压直流断路器的研发、耗能装置的应用起到了一定的推进作用, 同时也为采用对称双极接线工程的系统控制切换、故障分析与保护、多电力电子间的协调方式以及新能源故障穿越等方面的研究奠定了扎实的工程基础, 对后续该类型工程的建设起到了一定的示范作用。

2.2 新能源经柔性直流并网工程特点与差异

随着新能源接入交流电网容量的不断增大, 新能源经柔性直流并入电网的拓扑结构由点对点拓扑结构发展为多端互联。各工程系统拓扑结构、运行方式及故障特性各不相同, 控制策略的选择与故障保护的要求也有所差异。

在系统控制方面, 南汇示范工程与南澳柔性直流输电工程是将原有交流线路与直流线路并列运行。南汇示范工程中的书柔换流站与南澳三端柔性直流输电工程中的塑城换流站作为主站, 采用的是定直流电压控制来维持系统直流电压的恒定, 而其他换流站则根据不同接入方式与运行方式, 采用定交流电压控制(U/f)或定功率控制方式运行(P/Q)^[7,9]。舟山多端柔性直流输电工程采用直流电压裕度控制方式, 当定海换流站失去维持直流电压的控制功能时, 系统会通过检测直流电压偏差来进行控制权转移, 进而维持系统的正常运行, 但控制权转移时常

表 1 新能源经柔性直流并网工程概况

Table 1 Overall of the renewables integration projects through

VSC-HVDC					
工程名称	电压等级 /kV	容量 /MW	主接线	系统拓扑	投运时间
德国 Borwin1 ^[6]	±150	400	对称单极	点对点	2010 年
上海南汇 ^[7-8]	±30	18	对称单极	交直流混合	2011 年
广东南澳 ^[9]	±160	200	对称单极	三端星型	2013 年
浙江舟山 ^[10-12]	±200	1 000	对称单极	五端辐射状	2014 年
张北 ^[13-14]	±500	3 000	对称双极	四端环状	在建

伴随着暂态波动^[11]。张北四端柔性直流电网则采用主从控制与下垂控制相结合的站间协调控制方式, 正常工作状态下丰宁换流站作为主站, 负责调节柔性直流电网的直流电压参考值, 北京端换流站作为备用电压站, 正常运行时处于定功率(P/Q)控制; 送端张北、康保换流站则采用定电压(U/f)控制方式, 用于新能源的孤岛接入^[13-14]。

在故障保护方面, 多端柔性直流系统, 如南澳柔性直流输电系统、舟山直流输电系统以及张北柔性直流输电电网, 为避免故障时造成系统停运等状况, 均配置了直流断路器以及配套开关装置进行故障清除^[12]。同时, 南方电网等相关研究机构目前正合力研发适用于南澳柔性直流系统的超导限流器, 以进一步抑制故障电流的大小与上升速率。另外, 新能源通过柔性直流输电系统向陆地电网进行功率传输时, 功率输出方式为直进直出式且具有延迟特性。因此, 包括 Borwin1 以及国内正在建设的张北柔性直流示范工程均考虑采用耗能装置对故障下新能源的输出功率进行限制, 以解决功率不平衡引起的电压升高导致的系统失稳情况, 后文将进行详细描述。

3 新能源经柔性直流并网的控制研究和应用现状

新能源经柔性直流方式并入电网包含新能源侧换流站的控制以及电网侧换流站的控制两大部分, 不同运行方式下系统控制方式和切换策略也有所不同。新能源经柔性直流接入电网时, 新能源场和交流电网会互相解耦, 当新能源自身波动性时, 不合理的控制策略会影响交流系统的电压和频率稳定。因此, 需要对具备良好动态性能的控制策略进行研究, 以提高新能源并网的稳定性。

3.1 新能源经柔性直流输电接入电网的稳态控制架构

新能源经柔性直流输电技术并网系统的稳态控制是根据上层系统调度信号产生适合的脉冲, 从而实现对换流阀的开关控制, 进而获得所期望的电压、电流、功率等运行指标。系统控制架构按照功能优先级从高至低分为系统级协调控制、换流站级站间控制、换流器级控制和换流阀级控制, 见图 1。

3.2 装置级控制

3.2.1 换流阀级控制

1) 调制方式

如第 1 章所述, 现代换流器采用可全控的 IGBT 作为换流阀主要控制器件。随着模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)子模块数目的逐渐增多, 其在高电压等级中的应用也不断增加。常规多电平换流器的各种调制策略同样适用于 MMC 换流器, 如载波调制^[15]、空间矢量调制^[16]及谐波脉宽调制^[17]等。目前, 工程上较为常用的调制策略主要包括载波移相调制(carrier phase-shift modulation, CPSM)方法和最近电平逼近方法(nearest level modulation, NLM)^[18]。

载波移相法通过参考波与一组三角载波的比较得到脉冲控制信号。其中, 载波移相可采用 2 种方式分配脉冲: 一种方式是将所有载波比较结果相互叠加得到参考电平, 使相应桥臂的开关状态和等于对应的电平, 再通过直流电压平衡控制环节给各变流单元分配脉冲; 另一种方式是事先将每个三角载波与变流单元对应, 然后将参考波与三角载波比较后的结果分配给这个变流单元。对于载波移相的研究已经比较成熟, 文献[1,19-20]对其进行了详细介绍, 这里不再赘述。

最近电平逼近法则类似于利用一个离散的台阶波形来逼近连续的正弦波形, 当电平数目(N)足够大时, 两者可以有足够的逼近度, 因此其开关频率相较于 CPSM 而言比较低, 谐波也较少, 且波形质量高。文献[21]提出一种优化的 NLM 调制方式, 通过降低调制过程中的计算量来增加电压控制的响应速度。文献[22]针对大规模新能源及弱交流系统接入问题, 考虑到传统 NLM 控制交流侧稳定性较差, 提出了考虑电容电压实际值的控制策略, 其输出的交流电压在系统扰动时具有较好的稳定性。

2) 电容电压均衡控制

目前, 低电平换流器, 如三电平换流器, 电容

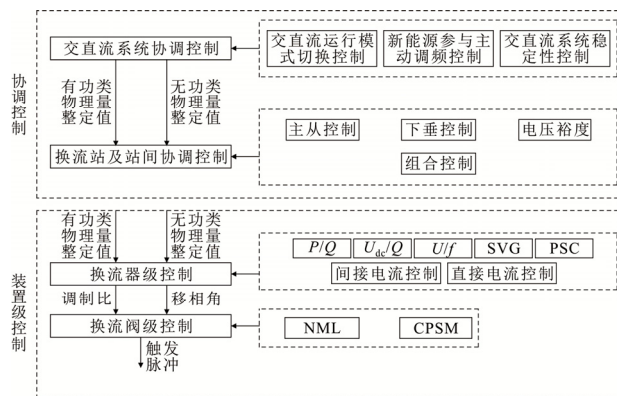


图 1 新能源经柔性直流输电系统接入电网的控制架构

Fig.1 Control structure of renewables integration through VSC-HVDC

电压均衡控制方法相对较为成熟。文献[23-24]采用零序电压注入方法来保证直流侧中点电压的平衡, 并提出控制模型的解析计算方法。

对于多电平换流器 MMC 子模块电容电压均衡控制, 目前主要存在 2 种解决思路: 一是将换流器的调制部分与子模块电容电压平衡控制部分分开, 采用电容电压排序方式^[25-26]; 二是子模块稳压控制策略将叠加到子模块调制策略中^[19,27]。文献[28]通过解析二倍频换流和电容电压间的动态关系, 提出一种全工况实现电容电压控制的方法, 以保证将电容电压波动峰值限制在设定的范围内, 并减小二倍频环流注入对换流器安全裕度的影响。

3.2.2 换流器级控制

换流器级控制对电压稳定和潮流控制等功能的实现起至关重要的作用, 是新能源经柔性直流输电系统接入电网的核心。典型控制方式包括间接电流控制策略以及直接电流控制策略。直接电流控制(电机控制领域为矢量控制)在现代电力电子技术应用中具有快速电流反馈和高品质电流响应等优点, 目前占据主导地位^[1]。

连接有源网络的控制器模型通过有功功率和无功功率指令(P/Q)或直流电压和无功功率指令值(U_{dc}/Q)与实际数值进行偏差控制调节, 并对输出电流信号与实际输出信号的偏差进行调节控制, 最终输出所需要的电压指令给调制模块。新能源机组通过柔性直流接入电网时, 由于新能源侧等同于无源电网, 因此, 连接新能源侧换流器的控制需要为新能源并网提供幅值和相角稳定的交流电压进行支撑, 其控制外环主要采用定频率和定交流电压(U/f)控制^[29]。文献[22,30-31]对无源下孤岛控制的外环控

制逻辑以及内环电流控制逻辑进行了详细描述。

当换流器连接网络的系统短路比较小时, 采用直接电流控制由于解耦特性被破坏且锁相环(phase-locked loop, PLL)性能恶化而很难维持系统在额定功率下的稳定运行^[32]。为解决直接电流控制在弱交流系统下所遇到的问题, 文献[33]提出一种功率同步控制(power synchronization control, PSC), 使换流器模拟发电机外特性进行交流电压频率与相位的自主调制。其次, 国内外学者提出采用虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)的方式来模拟同步发电机的特性^[34], 使并网换流器具备发电机所具有的转子惯性, 从而有效提高控制系统的稳定性^[35-36]。功率同步控制 PSC 和虚拟同步电机控制 VSG 可认为是间接电流控制和直接电流控制的结合, 具有限制故障电流的能力。

目前, 天津、浙江等电力公司已将虚拟同步发电机应用在配网或微网的建设中, 张北虚拟同步发电机示范工程的建设则为虚拟同步发电机在大电网中的应用、技术路线以及实现方式进行工程上的探索^[37]。

3.3 换流站及站间协调控制

新能源经柔性直流方式并入电网一般采用双变换器型网架结构, 由新能源侧换流站的控制与电网侧换流站的控制两大部分组成, 每一部分换流站的控制方式以及运行特性也各不相同。

3.3.1 新能源侧换流站控制

新能源侧换流站的控制目标是新能源接入电网提供一个稳定的交流电压和频率, 以保证其功率输送的控制效果。因此, 采用单极主接线系统的工程, 如 Borwin1、南汇柔性直流示范工程, 新能源并网侧换流站直接采用定 U/f 控制。

对于系统主接线采用对称双极结构的工程, 如张北柔性直流电网工程, 若双极新能源并网侧换流站单元都采用 U/f 控制, 则在系统发生扰动时, 会由于控制器控制目标相同而出现系统在不同稳定工况间反复调节的状况, 导致系统不稳定^[38]。目前, 一种简单的方式为一极换流站采用定交流电压和频率控制, 另一极换流站采用定有功功率和无功功率控制。采用这种控制方式时, 当定 U/f 控制极出现故障闭锁时, 需要将另一极转成定 U/f 控制极, 从而使得交流母线电压波动较大并且存在脱网的可能。借鉴发电机输出功率与频率关系曲线的概念,

文献[38]提出一种双极 U/f 的下垂控制, 实现了双极柔性直流系统换流站交流电压的可靠输出与双极功率自动分配, 避免了控制切换的问题。

3.3.2 交流电网侧换流站控制

电网侧换流站作为新能源经直流并入陆地电网的受端, 其主要控制目标是建立稳定的直流电压, 以满足新能源换流站的稳定接入以及功率的协调分配。目前, 常用的协调控制主要分为单点直流电压控制和多点直流电压控制^[39], 如图 2 所示。

1) 主从控制策略

主从控制(master/slave control)方式为典型的单点直流电压控制^[1], 即系统中所有与交流系统联接的换流器中, 有且仅有一个换流器用于控制系统的直流电压, 其他换流站则采用定功率控制, 其运行特性如图 3 所示。图 3 中 U_{dc} 表示直流电压, P 为有功功率, P_{ref} 及 U_{dcref} 分别为换流站的有功功率及直流电压参考值。

主从控制结构简单, 电压控制能力强, 但是其上层控制器必须包含用于定值协调的模块(依靠上层调度指令), 且要具备良好的通讯能力, 因此运行可靠性较低。文献[40-41]将传统主从控制引入到海上风电接入的系统中, 旨在实现主站控制直流电压

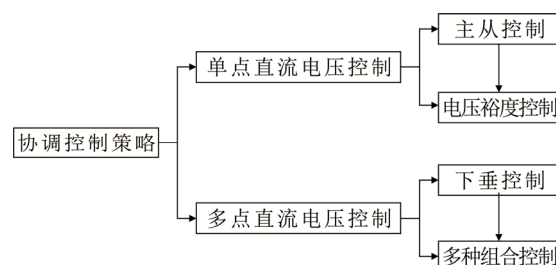


图2 协调控制策略分类

Fig.2 Classification of coordinated control strategy

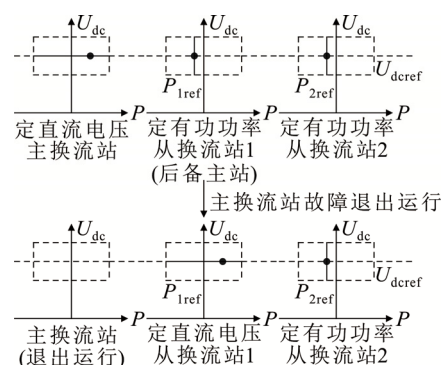


图3 主从控制模式运行特性

Fig.3 Operation characteristics of master-slave control mode

并进行其他站间的协调、系统站间及系统间功率的自由交换、有功无功解耦控制以及故障后迅速恢复正常运行的目的。

2) 电压裕度控制策略

电压裕度控制(voltage margin control)针对主从控制所存在的问题进行改进^[42], 其控制运行特性如图4所示。

电压裕度控制控制器的本质仍基于主从控制理论, 当系统出现不平衡功率时, 盈余功率仍需由主站承担, 且在控制模式的切换过程中往往伴随着振荡现象^[43]; 同时, 当系统设定的直流电压偏差过大时会引起系统失稳^[44]。文献[45-46]提出改进控制方法, 通过减少控制器退饱和过程所需的时间来缩短控制模式切换时直流母线电压不受控的暂态过程, 从而有效抑制功率不平衡。

3) 下垂控制策略

下垂控制(droop control)属于多点直流电压控制方式, 其运行特性如图5所示。电压下垂控制具有无需通信, 且当任意换流站退出运行或出现功率不平衡时, 所有换流站可同时快速进行功率调节以及模块化拓展等特点, 非常适合于新能源接入多端柔性直流系统的场合。

由于功率和直流电压的相互制约性, 电压下垂控制方式无法实现较为精确的控制, 而是较为依赖比例控制器, 且单个换流器无法实现恒定功率或恒定电流的控制要求。因此, 研究人员基于电压下垂控制曲线特性对其进行改进, 文献[47]考虑各换流站的功率裕度, 提出自适应的调节电压下垂曲线, 从而避免出现换流站过载问题。文献[48-49]将改进后的下垂控制运用到风电场参与并网的多端柔性直流输电系统中, 可在风功率波动下将电压偏差抑制在合理范围内, 从而实现多个电网换流站参与的风电功率消纳。

4) 多种组合控制策略

为提高系统运行的可靠性, 研究人员结合不同控制方式的特点, 提出采用组合策略的方式来实现多点电压协调控制^[39]。文献[40,50-51]提出直流电压斜率偏差控制策略, 以减小模式切换过程中产生的直流电压超调量 Δu , 控制策略的运行特性如图6所示, 其中 k_1-k_6 为斜率。

文献[52]引入2个电压斜率系数来修正运行曲线, 缩短了模式切换的暂态过程。文献[53]推导了换流站直流电压和输出功率之间的关系式, 给出了

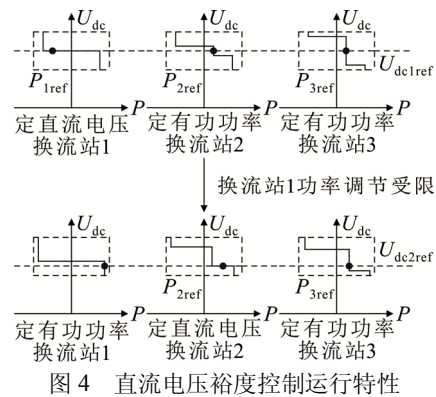


图4 直流电压裕度控制运行特性

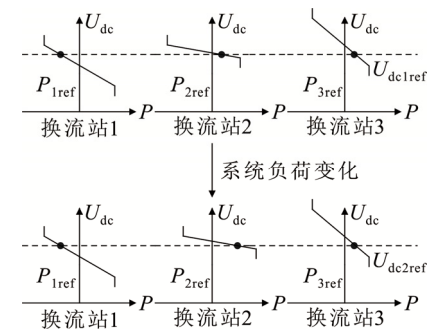


图5 下垂控制运行特性

Fig.5 Operation characteristics of droop control

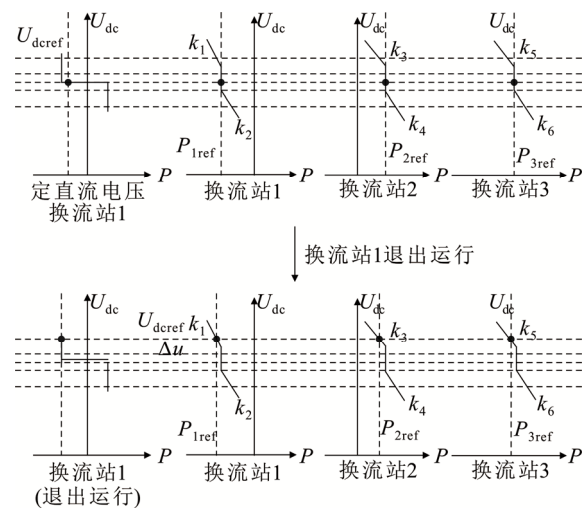


图6 直流电压斜率偏差控制运行特性

Fig.6 Operation characteristics of voltage hybrid control

下垂运行特性曲线拐点的计算方法, 确定了不同控制模式所对应的直流电压运行范围。文献[54]则提出一种(P/U/I)控制策略, 在电压环外增加功率环, 以解决换流站内复杂控制模式切换所引起的系统功率振荡等问题。

3.4 交直流系统协调控制

新能源经柔性直流并网运行时, 系统存在多种

运行模式, 每种运行工况所对应的控制方式不尽相同, 且在模式切换过程中通常存在切换冲击、故障误动作等问题。另外, 新能源经柔性直流系统接入电网会对电网的稳定性造成一定的影响, 最显著的即为惯量缺失造成的频率暂态稳定性问题及新能源与柔性直流系统间的交互影响^[55]。

2019年8月9日英国英格兰与威尔士地区发生的大面积停电事故再一次突显了新能源机组高比例涉网下系统惯量偏低、调频能力不足以及抗扰动能力弱等问题, 再次引起诸多研究人员的关注。因此, 有必要对新能源经柔性直流并网的运行与切换协调策略以及考虑交直流交互作用下系统的稳定性控制进行研究。

3.4.1 交直流并联系统协调控制

新能源电场接入柔性直流换流站根据实际运行情况的不同可分为孤岛运行模式与并网运行模式^[56], 不同运行模式下并网换流站的控制策略应合理切换, 以避免给电网造成电流冲击而影响系统的正常运行。

以上海南汇交直流混联系统为例, 当系统在并网模式和孤岛模式间转换时(包括计划内的主动转换与故障工况下的被动转换), 新能源机组的各项电气量会随之产生明显的波动。同时, 这些电气量因短时间内无法快速恢复可能会触发保护动作导致系统不正常供电。传统模式切换过程中的检测方法借鉴微网中的检测方式, 通过检测新能源侧公共连接点(point of common coupling, PCC)处电压的幅值以及相位等电气量的变化, 并将检测结果作为运行切换依据来实现模式切换^[57]。然而, 这种方式存在切换过程中电气量冲击大、易造成低压与频率的突变等缺点。

针对新能源系统在切换过程中存在的上述问题, 文献[56,58]设计了新能源并网换流站的控制策略, 实现了新能源系统在不同工作模式下换流站的合理控制, 有效减少了切换过程中电气量的波动, 保证了系统的稳定运行。对于采用交直流混合并行方式的新能源并网工程, 如舟山多端柔性直流输电工程, 采用检测频率变化量以及增加辅助性判据的方式进行在线联网转孤岛运行控制, 避免了系统误进入孤岛运行状态^[10-12]。文献[59]基于上海南汇柔性直流系统提出了新能源经交直流并联系统运行的控制策略, 在无需改变换流站控制方式的情况下, 即可实现交直流并联系统运行方式的无缝切换。

由于柔性换流站输入直流系统的功率是双向可控的, 因此在新能源电场出力阶段, 应保证新能源经直流系统向交流电网注入的功率最大; 在无新能源接入的情况下, 应保证内陆电网可通过电力系统满足本地需求, 从而实现新能源调节即交直流混联系统间接潮流控制的目的, 进而减少输电系统的损耗。文献[9]依托南澳三端柔性直流输电工程, 对风电场经直流接入系统在扰动下的无功控制以及交直流并联系统的站间功率协调消纳控制进行了研究, 介绍了系统在交直流并联运行、直流单独运行以及作为无功补偿装置情况下的详细控制方案, 通过潮流管理保证了系统的高效输电以及紧急情况下的故障穿越和快速响应能力。

3.4.2 系统功率转带控制

随着 ABB 公司承建的联接纳米比亚和赞比亚的卡普里维工程的建设, 采用对称双极主接线方式的工程逐渐增多^[60], 对称双极主回路拓扑结构见图7。该主接线方式下柔性直流输电系统具备高度灵活性, 正极和负极可整体运行, 亦可独立运行。

如图7所示, 当出现双极转为单极单独运行时, 对称双极的柔性直流输电系统可将退出极的功率全部或部分转至正常极, 而不会导致功率断续, 因此非常适合于新能源接入的情形。该功率转带过程可分为: 1) 退出极停运; 2) 正常极功率调整。

退出极停运过程与常规柔性直流输电停运过程相同, 即通过快速闭锁换流器和断开交流断路器实现系统停运^[61-62], 由于相关研究已较多, 因此本节不再重复分析。正常极功率调整(功率转带)过程本质属于短时间内的功率快速升高。从系统稳定性和设备角度考虑, 正常极功率的快速转带可有效减少系统的暂态过程并减少对设备的持续危害。根据电力标准 DL/T 5426 高压输电系统的工程设计要求, 转带功率 P_N 的 90% 应在退出极闭锁后的 80 ms 内完成, 即转带速率为 $0.9P_N/80\text{ ms}$ ^[63]。然而, 文献[64]的试验证明, 过快的转带速率可能会造成直流

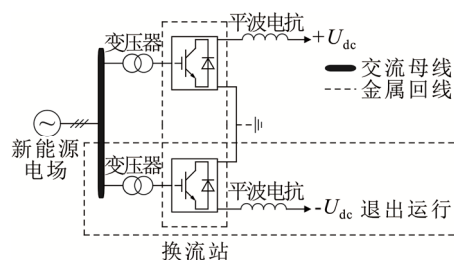


图7 对称双极双端柔性直流输电结构

Fig.7 Structure of bipolar symmetrical VSC-HVDC system

电流振荡幅值增加,从而给系统造成较大冲击。同时,由于新能源持续输出的特性和直流电抗器的限流作用,因此在功率转带的过程中,会出现功率无法快速达到设定值而造成输送能量累积在换流阀上,导致直流电压上升而触发保护动作的情况。

为保证功率转带的顺利完成,文献[64]对功率转带速率与控制方式进行了分析与研究,提出了功率转带的可行性条件、转带流程以及参数优化方法,在合理短时间内实现了功率的带转,并依托厦门柔性直流输电工程进行了验证,降低了甩负荷对交流电网稳定性的影响。

需要注意的是,针对新能源作为送端系统出现双极转单极运行的情况,如张北四端直流电网系统,考虑功率转带过程中新能源功率持续外输对相连接设备耐受能力与系统稳定性的影响,上述所提的可行性条件以及转带流程方案是否需要改进还需进一步的研究。

3.4.3 新能源主动参与调频控制

新能源通过柔性直流输电系统向陆地电网进行功率传输时,新能源功率输出方式为直进直出式,与受端交流电网互相解耦。当负荷变化时,新能源电场将无法感知电网频率的变化,从而导致较大的频率偏差;同时,随着新能源容量的增加,整个电网的等效“惯性水平”相应减少,功率变化引起的频率变化会导致系统失稳,严重时甚至会影响电力系统的安全稳定运行。

随着大规模风电机组接入电网代替传统同步机组,这部分同步机组的调频调压能力可由大规模风电场利用其控制方面的优势来实现。目前,从技术方面可将国内外柔性直流输电参与调频调压的方式概括为站间通讯、换流器控制和虚拟同步机类的控制方式等。

文献[65-66]通过通信方式将主网的变化信息传递至风场侧,并利用换流器实现了快速响应调频的需求,从而提高了系统的惯性水平。然而,这种方式稳定性欠佳,存在实现复杂以及通信成本高的问题。考虑到以上方式存在的问题,文献[67]结合传统 P/U 和 P/f 的控制特点,提出 $P/U/f$ 的双下垂控制策略;文献[68]在新能源侧与电网侧换流器上增加了响应频率变化的控制环节,实现了无需站间通讯即可使风电场参与交流系统调频的功能;文献[69]在风电机组侧换流器上采用虚拟惯性控制策略,将风电场功率转移至未干扰的交流系统中,使风电场

具备响应频率变化的能力。文献[70]基于虚拟同步机的控制方式,在受端电网频率突变的情况下实现风电场参与调频,提高了无源网络系统经柔性直流系统并网的友好性。

3.4.4 交直流系统小干扰稳定性控制

新能源接入电网系统采用模块化多电平换流器时,换流器内部存在的谐波环流、子模块电容波动等动态行为在某些状态下可能会导致系统不稳定运行^[71],新能源本身的电压和功率波动性特征等特性会加剧这一现象,甚至使互联系统出现电气振荡现象,如德国北海 BARD Offshore1 工程出现的谐波振荡,广东南澳工程出现的次同步振荡以及浙江舟山示范工程出现的高频振荡事件等。

目前,针对换流器在弱电网环境下运行存在的谐波振荡现象,文献[72]依托阻抗法分析了交直流互联系统在风电场经柔直并网控制器参数、功率传输水平等因素影响下的稳定性。文献[73]基于以上研究,提出一种增强系统稳定性的控制器参数优化方法。文献[74]提出一种基于附加电流抑制的并网侧换流站控制策略,该策略可以较好地抑制大型双馈风电场侧在并网时输出的振荡电流,从而提高系统的稳定性。

同时,文献[75]针对受端电网侧换流站的阻抗模型进行了分析,指出在电网较弱的情况下,采用呈容性的电流源控制类型换流站会与电网感性阻抗特性构成振荡回路而产生振荡现象。文献[76]则研究了锁相环(phase-locked loop, PLL)对大渗透率弱电网换流器运行稳定性的影响,文献[77]采用重塑电网侧换流器输出阻抗的方式,实现了在串补多机互联系统中的振荡抑制作用。文献[78]提出一种附加阻尼控制策略,该策略能够有效抑制直流系统的谐振电压和电流,从而改善系统的动态特性。

此外,虚拟同步发电机的控制类似于同步发电机,采用转子方程完成自同步过程能够有效避免传统控制器 PLL 带来的控制问题。文献[79]对虚拟同步发电机的控制类型进行了序阻抗特性研究。功率同步控制与惯性同步控制方法类似,可有效解决采用传统控制方式时新能源并入电网时控制性能不稳定的问题^[43],从而提高系统的稳定性。

4 新能源经柔性直流输电系统接入电网的保护研究和应用现状

新能源经柔性直流并网系统的可控设备多、控

制方式复杂、系统惯性弱且阻抗较低。当系统故障时, 网络中换流器的电容和交流系统同时向短路点放电, 故障电流发展时间仅为几毫秒到几十毫秒, 而新能源机组安控切机策略的响应时间则为一百至二百毫秒, 即动作时间远大于故障电流蔓延的时间, 因此传统保护方式已无法满足故障清除速度的要求。

新能源经柔性直流输电技术接入电力系统的故障特性与设备控制特性、电子设备运行特性和故障所在区有着密切的关系, 不同的保护对象对应不同的保护方案。以图 8 所示的对称单极主回路接线方式下新能源经柔性直流接入系统为例, 根据主要设备和不同故障类型将系统划分成新能源侧故障、换流器故障、交流故障与直流区域故障。

其中, 新能源侧出现故障一般对直流系统影响较小, 主要考虑新能源本身的故障穿越能力。当故障电压发展程度较轻时, 柔性直流换流站可为电压变化提供一定的支撑; 当电压变化较大时, 由于换流站容量有限, 因此需要通过增加辅助硬件和利用新能源机组自身控制策略进行调节的方式实现故障穿越。对于相关故障穿越, 文献[69,80-81]进行了详细的梳理与总结, 文献[82-83]则对风力发电机组以及光伏发电站的电压穿越、电压偏差与电压不平衡等保护配合关系等技术要求做出了相关规定。

对换流器区域进行控制保护设计时, 应将换流器的能力与控制系统充分结合起来^[1]。根据换流站级要求产生的控制信号进行数据处理与总结, 进而实现自我保护功能, 达到换流器故障时系统仍可完成故障穿越的目的^[4]。换流器故障保护研究较为成熟且非本节研究重点, 这里不再赘述。

新能源经直流接入电网系统, 交流区域/直流区域出现故障而启动保护方案时, 新能源机组有功功率会继续向直流电网传输; 与此同时, 切除新能源机组的时间将无法与直流电网盈余功率情况下的电

压、电流发展速度相匹配, 从而导致系统产生不平衡功率, 进一步加剧故障发展程度, 严重时甚至会导致直流电网大面积瘫痪。因此, 交流侧故障穿越与直流侧故障穿越是新能源经柔性直流接入电网故障保护的重点研究部分, 本节将围绕这两部分内容进行梳理和总结。

4.1 交流区域故障穿越

在新能源经柔性直流接入电网系统时, 交流电网是其主要消纳去向。当受端系统即交流侧出现故障时, 系统功率接收能力下降, 考虑到通讯延时等情况, 若采用切除新能源机组的方式, 则响应时间要求极为严苛, 将出现无法匹配直流系统盈余功率状况下电气量的发展速度而导致直流电压快速上升的状况, 进而对整个系统的稳定性带来严重影响。目前, 实现新能源并网系统交流故障穿越的方式通常分为两类。第 1 类方式是通过建立快速通信、升频与降压等方式。

文献[84-85]通过电网侧换流站与新能源机组之间的通讯来传递故障信息, 从而对新能源机组控制器进行控制, 进而改变有功功率控制指令, 减少新能源出力。以上方案对通讯系统依赖性较高, 当通讯延迟较大或受扰动能力较差时, 将不利于功率的快速平衡调节。文献[70,86]通过研究并网点有功功率与频率间的关系, 提出故障时通过增大并网点频率以减小新能源侧功率的方法。然而, 由于新能源机组的低压穿越能力较弱, 因此可能由于对频率的过度敏感性而造成大面积脱网, 此外, 该方法也会使得新能源机组承受的机械压力有所增加^[87]。文献[88]通过改变并网点交流电压的幅值来减少新能源侧的输出功率。采用这种方法的缺点是, 可能会造成交流电网的电压剧烈波动而超过安全运行范围, 进而导致系统保护动作。

第 2 类方式是利用外加电路来快速降低新能源

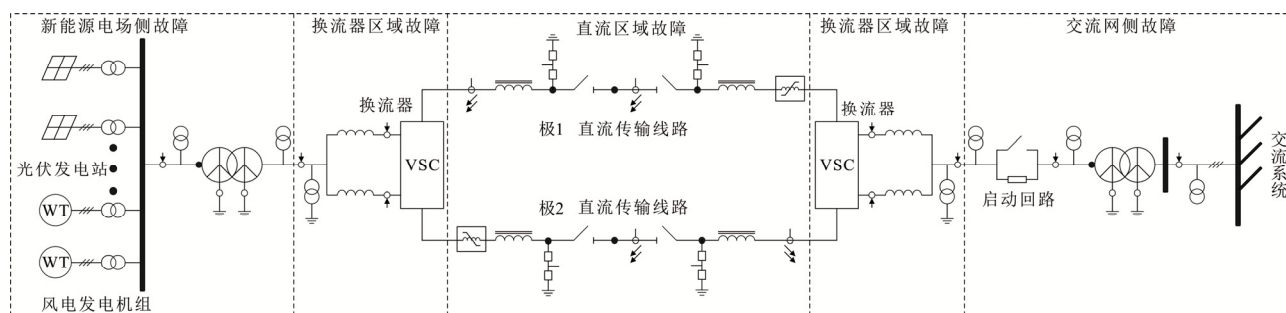


图 8 单极主回路接线方式下保护分区

Fig.8 Classification of protection area for single pole symmetrical system

馈入直流系统内的盈余功率。通过限制储存在电容内的能量有效抑制直流电压的幅值,实现柔性直流输电系统故障下的正常工作^[89]。文献[90]考虑在直流侧设置耗能电阻的方式,以热能的方式消耗直流系统内多余的能量。文献[91]参考模块化多电平换流器的子模块结构,根据需要消耗功率的大小调整投入子模块数量,以应对不同程度的故障。

已建成的 Borwin1、Dolwin1 及 Dolwin2 等柔性直流输电工程均是采用外加耗能电路的方式来实现交流侧故障穿越的。国内现阶段建设中的张北柔性直流示范工程通过在交流侧配置耗能装置,减少了新能源对直流系统馈入的能量,有效解决了直流系统在风功率输出保持不变且受端换流站容量受限情况下的功率不平衡问题^[13-14,92]。

4.2 直流区域故障穿越

传统直流保护通过闭锁换流站并跳开交流断路器实现故障清除的方式易于实现,但是交流断路器响应速度较慢,会造成系统长时间的过流,从而危害设备的安全;且故障线路停运时间较长,降低了系统的供电可靠性,不满足直流电网送出系统的 N-1 运行要求。

为实现直流故障快速清除和恢复,国内外分别开展了自清除能力换流器、直流断路器、辅助电路以及直流限流器 4 种方向的研究,如图 9 所示。

4.2.1 自清除能力换流器

自清除能力换流器结合不同子模块的优势,在有效实现故障清除的同时,可保证换流器具有良好的控制能力,因此受到国内外学者的广泛关注。文献[93]相继提出包括串联双子模块、交叉连接型子模块、混合型子模块等拓扑的故障自清除能力换流器,并对其中几类优化拓扑结构及其故障隔离和电流阻断机理进行了分析与对比。文献[94-95]采用半桥子模块和全桥子模块混合的换流器,分别提出采用改进独立极点控制方式和换流器的桥臂电压控制方式来消除故障电流。文献[96]则结合最近电平逼近理论提出半桥子模块和全桥子模块混合换流器的段间平衡控制策略,并提出了基于虚拟电阻的优化控制策略,以消除直流故障对子模块电容的影响,实现了直流故障期间子模块电压的快速稳定以及换流器无需闭锁的故障穿越。

荣信汇科依托国家重点研发计划项目“高压大容量柔性直流输电关键技术与工程示范应用”于 2017 年成功研制出混合模块化具备直流故障自

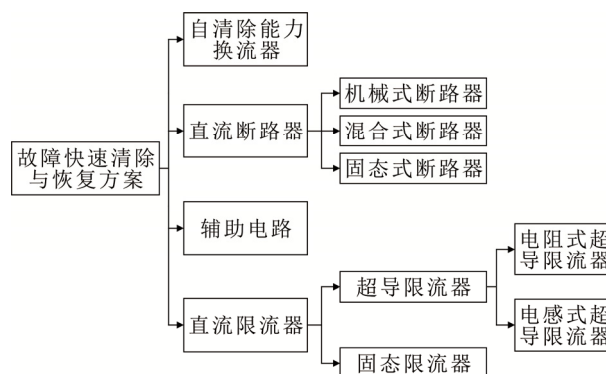


图9 直流故障清除与恢复方案

Fig.9 DC fault clearing and recovery scheme

清除和在线投退能力的换流器。该换流器的研发与应用为特高压柔性直流技术的故障自清除换流器研发做出了重大贡献。然而,采用多种开关器件组合的拓扑结构存在成本和损耗急剧升高的问题,并且增加了控制的复杂程度^[97]。

4.2.2 直流断路器

采用直流断路器(DC circuit breaker, DCCB)解决直流故障的清除与隔离,避免了电能传输中断且保证了无故障线路的持续运行,因此得到了广泛认可^[98]。目前,直流断路器从技术角度出发可分为机械式直流断路器、固态直流断路器与混合式直流断路器。其中,国内清华大学、浙江大学、西安交通大学、华中科技大学等高校以及全球互联网能源研究院、南方电网科研院、南瑞继保等电力企业先后以单独或联合的方式对混合式断路器和机械式断路器展开了深入研究,提出了具有自身特点的拓扑方案,并取得了显著的进展^[99]。

2016 年 12 月 29 日,联研院牵头联合许继集团所生产的额定电压 200 kV 的混合直流断路器已在浙江舟山的五端柔性直流输电工程中完成 168 h 试运行^[100]。随后,南方电网科研院联合华中科技大学、思源电气,研制出首台 160 kV 耦合机械式高压直流断路器,并在 2017 年底前实现直流断路器在广东南澳的柔性直流输电工程中的挂网试运行^[101]。在这之后,为配合张北±500 kV 柔性直流电网示范工程的建设,清华大学电机系联合北京电力设备厂研发出了负压耦合式高压直流断路器^[102],思源所研发的机械式直流断路器,中电普瑞、许继集团以及南瑞集团所研发的混合式直流断路器进一步推动了高压直流断路器的研究与应用,大大提高了柔性直流输电系统供电的可靠性和灵活性。

然而, 受限于单个电力电子器件的耐压和通流能力, 大容量高压直流断路器通常需要采用多个器件进行串并联结合的方式来承受高压和大电流, 从而造成研制困难且成本昂贵, 使得大量采用高压直流断路器的直流电网难以大范围推广^[103]。

4.2.3 辅助电路

考虑到目前大容量直流断路器所存的造价昂贵和开断性能研发困难等问题, 研究学者们提出了第3种应用辅助装置加速故障电流衰减以及隔离故障线路的方案。文献[104]采用配置反并联晶闸管的方式将直流故障回路与交流回路隔离开来, 以清除故障电流。文献[105]针对文献[104]所提出方法进行直流故障清除时可能存在的交流故障增加问题, 提出了换流桥臂中级联阻尼模块的方式。文献[106]提出一种混合换流器主动限流控制配合直流断路器灵活开断故障线路的方案, 以进一步降低直流电网故障对高压直流断路器容量的要求。文献[107]提出直流限流电抗器配合直流断路器实现直流系统故障快速清除的方案。然而, 限流电抗的调整会对系统的动态响应能力产生一定影响, 甚至造成系统的失稳^[108]。

4.2.4 直流故障限流器

第4种方案是采用故障限流器来抑制快速升高的故障电流, 然后配合断路器实现故障电流的清除, 并有效降低对直流断路器开断性能的要求^[109]。目前对直流限流器应用类型的研究主要包括固态限流器(solid state fault current limiter, SSFCL)^[110]以及超导限流器(superconducting fault current limiter, SFCL)^[111]这两类。文献[112]提出使用晶闸管混合直流限流器实现故障清除的方式, 在有效限制故障电流的同时可降低通态损耗。文献[113]提出一种单钳压子模块的故障限流器拓扑, 通过对限流元件的控制, 实现了限流器的可靠投入。文献[114]对直流故障限流器和直流电网的控制进行研究, 提出一种直流电网组合式故障限流装置控制策略, 有效实现了故障限流器与直流电网间的协同控制。

目前, 南方电网广东公司依托国家重点研发计划“智能电网技术与装备”对电阻型超导直流限流器关键技术进行研究。该研发计划所提出的超导限流器在南澳柔性直流输电工程中的应用不仅极大降低了对直流断路器的开断性能以及开断容量的要求, 同时也对直流限流器在后续工程中的应用起到了重要的推进作用。

5 结论与展望

综上所述, 我国上海南汇柔性直流输电工程、广东南澳柔性直流示范工程、浙江舟山柔性直流输电示范工程和张北多端柔性直流输电网的先后建设为多端柔性直流输电工程在不同系统架构下的新能源友好接入、运行模式间的相互切换、控制模式的灵活配合以及交直流电网间的快速协调奠定了扎实基础。在保护方面, 上海南汇、广东南澳、浙江舟山以及张北新能源经柔性直流输电系统并网工程通过保护系统的多重冗余设计、模块化和分层分布方式配置, 提高了保护装置本身的可靠性。其次, 高压直流断路器在广东南澳、浙江舟山和张北柔性直流工程的应用进一步提高了故障时系统的可靠性。同时, 南澳示范工程中电阻型超导限流器的应用将大幅降低对后续工程中高压直流断路器性能的要求, 从而进一步提高多端柔性直流电网的灵活性。

随着国家政府对新能源扶持政策的持续推行及各地政府自上而下的积极响应, 我国新能源发电即将步入规模化发展阶段。与此同时, 受到新能源机群环境分布与功率受端负荷中心地理位置的影响, 新能源经柔性直流输电系统接入电网的结构从早期的单输出单输入网架发展到如今多端互联的结构, 发生了革命性的变化。

纵观柔性直流输电技术发展历程和未来的应用需求, 为了进一步提高新能源经柔性直流并网的灵活性、可靠性、可用性, 并进一步降低直流建设成本, 需要在以下若干关键技术领域开展深入研究:

1) 随着直流网络容量和电压等级的不断提高, 弱阻尼、低惯性和电力电子器件的高比例应用所带来的问题逐渐凸显。系统故障时故障电流的上升速度进一步加快, 故障后系统响应时间的要求进一步被缩短, 故障清除和隔离方案设计难度再次被提升。目前, 仅靠断路器实现故障电流快速隔离的方案不仅经济性差, 而且对直流断路器的性能要求比较苛刻。因此, 采用故障限流装置、故障自清除换流器或其他限流装置配合直流断路器进行故障清除的方案或成为之后故障清除与快速恢复的发展方向。

2) 面对新能源高比例接入、高比例电力电子设备的应用和多端互联化的电网趋势发展, 为保证新能源能够实现安全稳定和高效的并网, 系统的协调控制成为研究重点之一。多点控制方式在新能源

功率波动下的功率灵活分配以及多端互联情况下无需通讯的优势成为未来控制协调发展的方向。此外,随着新能源经多端柔性直流电网接入系统后渗透率的逐渐提升及电力电子装置的大量应用,应考虑能源波动性下交直流混合系统的协调控制和多换流器间潮流的快速控制作用,以优化直流电压与功率分配。

3) 对称双极主接线方式由于具有可大幅度提升传输容量、灵活性高且可靠性强等优点而逐渐被应用到电网工程的建设中。但是,该方案的系统中单个换流站内换流器的数目不同于单极主接线系统,因此其控制方式和站间切换有所区别。当系统换流站内单极换流器退出运行时,非退出极换流器、新能源侧换流站及其他换流站的控制策略、功率转带控制策略、切换模式时暂态过程的处理方案以及切换后系统的稳定性都是值得关注的问题。

4) 新能源渗透率的不断增高,使得交直流系统间的交互影响逐渐增强,应针对系统的稳定性和友好性开展研究,形成适用于新能源并网的稳态控制、恢复控制和不同模式下的协调控制。同时,面对新能源中风电场的大量接入使整个电网等效惯性水平减少而引起的电网调频难度提升问题,需要对风电场参与调频的协调控制以及系统在低阻尼特性下出现振荡的抑制方法进行进一步研究。

5) 面对高比例可再生能源以及高比例电力电子设备在柔性直流系统中应用的不断增加,新能源本身的不确定性、“双高”系统的不稳定性及柔性直流系统的弱阻尼特性将进一步被放大,系统故障时直流系统与交流系统间的相互影响持续增强。为保证出现故障时系统可以稳定安全的运行,必须考虑新能源机组本身的故障穿越控制与柔性换流器、高压直流断路器、直流限流器、交流断路器等其他可控保护装置之间的精准配合,以实现系统安全稳定的运行。因此,需深入研究多电力电子系统和多可控设备的精准协调配合。

参考文献 References

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2013: 179-193.
XU Zheng. VSC-HVDC[M]. 3rd ed. Beijing, China: China Machine Press, 2013: 179-193.
- [2] OOI BOON-TECK, WANG X. Boost-type PWM HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1557-1563.
- [3] OOI BOON-TECK, WANG X. Voltage angle lock loop control of the boost type PWM converter for HVDC application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 5(2): 229-235.
- [4] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [5] 王振, 赵彪, 袁志昌, 等. 柔性直流技术在能源互联网中的应用探讨[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3551-3560.
WANG Yizhen, ZHAO Biao, YUAN Zhichang, et al. Study of the application of VSC-based DC technology in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3551-3560.
- [6] ERIK KOLDBY M H. Challenges on the road to an offshore HVDC grid[C]//Nordic Wind Power Conference. Bornholm, Denmark: [s.n.], 2009: 19.
- [7] 季舒平. 上海南汇柔性直流输电示范工程关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
JI Shuping. Study on the key technology of the Shanghai Nanhui flexible HVDC demonstration project[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [8] 蒋晓娟, 姜芸, 尹毅, 等. 上海南汇风电场柔性直流输电示范工程研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1132-1139.
JIANG Xiaojuan, JIANG Yun, YIN Yi, et al. A demonstration project of flexible DC power transmission in Shanghai Nanhui wind power station[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1132-1139.
- [9] FU J, YUAN Z C, WANG Y Z, et al. Control strategy of system coordination in Nanao multi-terminal VSC-HVDC project for wind integration[C]//PES General Meeting Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [10] 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.
- [11] 凌卫家, 孙维真, 张静, 等. 舟山多端柔性直流输电示范工程典型运行方式分析[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1751-1758.
LING Weijia, SUN Weizhen, ZHANG Jing, et al. Analysis of typical operating modes of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC pilot project[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1751-1758.
- [12] 董云龙, 凌卫家, 田杰, 等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 169-175.
DONG Yunlong, LING Weijia, TIAN Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 169-175.
- [13] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3698-3707.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of Zhangbei flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3698-3707.
- [14] 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, 3666.
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, 3666.
- [15] 李笑倩, 宋强, 刘文华, 等. 采用载波移相调制的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 49-55.
LI Xiaoqian, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Capacitor voltage balancing control by using carrier phase-shift modulation of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 49-55.
- [16] 李强, 贺之渊, 汤广福, 等. 新型模块化多电平换流器空间矢量脉宽调制的通用算法[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 59-64.

- LI Qiang, HE Zhiyuan, TANG Guangfu, et al. A generalized algorithm of space-vector PWM for a new type of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 59-64.
- [17] 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): 1-8. 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): 1-8.
- [18] M ARQUARDT R, ALESNICAR A. New concept for high voltage modular multilevel converter[C]//Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen: IEEE, 2004: 1-5.
- [19] 袁志昌, 宋强, 刘文华. 载波移相 SPWM 开关频率的选取[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 37-41. YUAN Zhichang, SONG Qiang, LIU Wenhua. Selection of phase-shift SPWM switching frequency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 29(8): 37-41.
- [20] 何梨梨, 帅智康, 单佳佳. MMC 的多载波调制策略对比分析[J/OL]. 电源学报: 1-13[2019-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20171204.1223.004.html>. HE Lili, SHUAI Zhikang, SHAN Jiajia. Analysis of multi-carrier modulation strategy for modular multilevel converter[J/OL]. Journal of Power Supply: 1-13[2019-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20171204.1223.004.html>.
- [21] MESHARAM P M, BORGHATE V B. A simplified nearest level control voltage balancing method for modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 450-462.
- [22] 王铁柱, 卜广全, 王姗姗, 等. 一种提高 MMC 交流电压鲁棒性的改进调制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 797-803. WANG Tiezhu, BU Guangquan, WANG Shanshan, et al. An Improved modulation strategy for improving the robustness of MMC AC voltage[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 797-803.
- [23] 赵慧杰, 钱照明, 李骏, 等. 载波 PWM 方法三电平逆变器中点电位控制研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(3): 28-30. ZHAO Huijie, QIAN Zhaoming, LI Jun, et al. Study of neutral-point potential balancing control of three-level NPC inverter based on injected zero-sequence voltage PWM method[J]. Power Electronics, 2007, 41(3): 28-30.
- [24] 宋强, 刘文华, 严干贵, 等. 基于零序电压注入的三电平 NPC 逆变器中点电位平衡控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 57-62. SONG Qiang, LIU Wenhua, YAN Gangui, et al. A neutral-point potential balancing algorithm for three-level NPC inverters by using analytically injected zero-sequence voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 57-62.
- [25] 刘钟淇, 宋强, 刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58. LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 53-58.
- [26] SAEEDIFARD M, IRAVANI R. Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2903-2912.
- [27] 赵昕, 赵成勇, 李广凯, 等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 48-55. ZHAO Xin, ZHAO Chengyong, LI Guangkai, et al. Submodule capacitance voltage balancing of modular multilevel converter based on carrier phase shifted SPWM technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 48-55.
- [28] 孟经纬, 宋强, 孙谦浩, 等. 基于环流解析分析的 MMC 电容电压优化控制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 882-889. MENG Jingwei, SONG Qiang, SUN Qiaohao, et al. Optimization control strategy of capacitor voltage for modular multilevel converter based on mathematical analysis of circulating current[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 882-889.
- [29] 蔡旭, 施刚, 迟永宁, 等. 海上全直流型风电场的研究现状与未来发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2036-2048. CAI Xu, SHI Gang, CHI Yongning, et al. Present status and future development of offshore all-DC wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2036-2048.
- [30] 管敏渊, 徐政. 向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 255-263. GUAN Yuanmin, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 255-263.
- [31] 蔡新红, 赵成勇, 庞辉, 等. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 系统控制与保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 405-414. CAI Xinhong, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC supplying passive networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 405-414.
- [32] 江斌开, 王志新, 包龙新, 等. 连接无源网络的 VSC-HVDC 优化虚拟同步机控制及参数分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6542-6550. JIANG Binkai, WANG Zhixin, BAO Longxin, et al. An improved virtual synchronous generator control strategy parameters analysis for VSC-HVDC connected to a passive network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6542-6550.
- [33] ZHANG L, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.
- [34] 管敏渊, 王锋华, 成敬周, 等. 换流器同步机模拟控制中的小干扰稳定策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 252-258. GUAN Minyuan, WANG Fenghua, CHENG Jingzhou, et al. Small-signal stability enhancement scheme for the synchronous generator emulation control of voltage source converter[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 252-258.
- [35] AOUIINI R, MARINESCU B, KILANI K B, et al. Synchronverter-based emulation and control of HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 278-286.
- [36] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-348. ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-348.
- [37] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-359. LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-359.
- [38] 梅念, 苑宾, 李探, 等. 接入孤岛新能源电场的双极柔直流换流站控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3575-3582. MEI Nian, YUAN Bin, LI Tan, et al. Study on control strategy of bipolar VSC station connected to islanded renewable power plant[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3575-3582.
- [39] 李兴源, 曾琦, 王渝红, 等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3025-3037. LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3025-3037.
- [40] JOVICIC D. Interconnecting offshore wind farms using multi terminal VSC based HVDC[C]//Power Engineering Society General Meeting. Montreal, Canada: IEEE, 2006: 1-7.

- [41] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 新型多端高压直流传输系统应用及其控制[J]. 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.
- [42] NAKAJIMA T, IROKAWA S. A control system for HVDC transmission by voltage sourced converters[C]//Conference Proceedings 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Edmonton, Canada: IEEE, 1999, 2: 1113-1119.
- [43] 杨仁炘, 施刚, 蔡旭, 等. 风电场柔性直流并网控制保护技术现状与展望[J]. 南方电网技术, 2019, 13(3): 48-57.
YANG Renxin, SHI Gang, CAI Xu, et al. Present situation and prospect of the control and protection technology for flexible DC integration of wind farm[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(3): 48-57.
- [44] 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.
- [45] 李梅航, 刘喜梅, 陈朋. 适用于多端柔性直流输电系统的快速电压裕度控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3045-3051.
LI Meihang, LIU Ximei, CHEN Peng. Fast voltage margin control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3045-3051.
- [46] LIANG J, JING T J, GOMIS-BELLMUWT O, et al. Operation and control of multi-terminal HVDC transmission for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2596-2604.
- [47] 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.
- [48] 阎发友, 汤广福, 贺之渊, 等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 397-404.
YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-MTDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 397-404.
- [49] 张海波, 袁志昌, 赵宇明, 等. VSC-MTDC 系统变截距直流电压下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 60-64.
ZHANG Haibo, YUAN Zhichang, ZHAO Yuming, et al. Variable intercept DC-voltage droop control for VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 60-64.
- [50] 熊凌飞, 韩民晓. 基于组合方式的多端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1586-1592.
XIONG Lingfei, HAN Minxiao. A novel combined control strategy for VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1586-1592.
- [51] 吴金龙, 刘欣和, 王先为, 等. 多端柔性直流输电系统直流电压混合控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1593-1599.
WU Jinlong, LIU Xinhe, WANG Xianwei, et al. Research of DC voltage hybrid control strategy for VSC-MTDC system[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1593-1599.
- [52] 孙黎霞, 陈宇, 宋洪刚, 等. 适用于 VSC-MTDC 的改进直流电压下垂控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1037-1043.
SUN Lixia, CHEN Yu, SONG Honggang, et al. Improved voltage droop control strategy for VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1037-1043.
- [53] 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.
- [54] 季一润, 袁志昌, 赵剑锋, 等. 一种适用于柔性直流配电网的电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 335-341.
JI Yirun, YUAN Zhichang, ZHAO Jianfeng, et al. A suitable voltage control strategy for DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 335-341.
- [55] 李文津, 汤广福, 贺之渊. DFIG 风电场经模块化多电平柔性直流并网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 20-26.
LI Wenjin, TANG Guangfu, HE Zhiyuan. Control strategies of DFIG-based wind farm grid integration using modular multilevel VSC-HVDC technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 20-26.
- [56] 徐晓宁, 周雪松. 微网脱/并网运行模式平滑切换控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2754-2760.
XU Xiaoning, ZHOU Xuesong. Control strategy for smooth transfer between grid-connected and island operation for micro grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2754-2760.
- [57] MAHAT P, CHEN Z, BAK-JENSEN B. Review of islanding detection methods for distributed generation[C]//China Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China: IEEE, 2008: 2743-2748.
- [58] CHEN D L, HU Y, WANG X R, et al. Control strategy of VSC-HVDC inverter supplying power to the isolated grid with induction motor[C]//2017 China International Electrical and Energy Conference. Beijing, China: IEEE, 2017: 497-503.
- [59] 吕敬, 施刚, 蔡旭, 等. 大型风电场经 VSC-HVDC 交直流并联系统并网的运行控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 639-646.
LÜ Jing, SHI Gang, CAI Xu, et al. Control strategies of large wind farms integration through AC/DC parallel transmission system based on VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 639-646.
- [60] MAGG T G, MANCHEN M, KRIGE E, et al. Caprivi link HVDC interconnector: comparison between energized system testing and real-time simulator testing[C]//CIGRE Session. [S.l.]: [s.n.], 2012: 26-31.
- [61] 周月宾, 江道灼, 郭捷, 等. 模块化多电平换流器型直流输电系统的启停控制[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 204-209.
ZHOU Yuebin, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. Start/stop control of modular multilevel converter based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 204-209.
- [62] ZHANG Z R, XU Z, XU F, et al. Shut-down control with energy feedback and energy dissipation for MMC-HVDC systems[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2016, 26(4): 864-883.
- [63] ± 800 kV 高压直流输电系统成套设计规程: DL/T 5426—2009[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
System design standard for ± 800 kV HVDC system: DL/T 5426—2009[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2009.
- [64] 李超, 胡文旺, 唐志军, 等. 对称双极柔性直流输电系统功率转带控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2173-2180.
LI Chao, HU Wenwang, TANG Zhijun, et al. Control strategy of power transfer in bipolar HVDC flexible transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2173-2180.
- [65] LI Y J, XU Z, OSTERGARRD J, et al. Coordinated control strategies for offshore wind farm integration via VSC-HVDC for system frequency support[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 843-856.
- [66] LI Y J, ZHANG Z R, YANG Y, et al. Coordinated control of wind farm and VSC-HVDC system using capacitor energy and kinetic energy to improve inertia level of power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014(59): 79-92.

- [67] FERNANDO D B, JOSE L D. Coordinated frequency control using MT-HVDC grids with wind power plants[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(1): 213-220.
- [68] 杨金刚, 袁志昌, 李顺昕, 等. 经柔性直流输电并网的大型风电场频率控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(6): 109-114.
YANG Jingang, YUAN Zhichang, LI Shunxin, et al. Frequency control strategy for large-scale wind farm grid-connection through VSC-HVDC[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(6): 109-114.
- [69] ADEUYI O D, CHEAH-MANE M, LIANG J, et al. Fast frequency response from offshore multi-terminal VSC-HVDC schemes[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(6): 2442-2452.
- [70] 郎燕生, 杨东冀, 杨晓楠, 等. 多风电场柔直并网调频的组合控制策略[J/OL]. *电网技术*: 2019[2019-12-24]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2696>.
LANG Yansheng, YANG Dongji, YANG Xiaonan, et al. Combined control strategy for frequency regulation of multi-wind farms connected to multi-terminal flexible DC[J/OL]. *Power System Technology*, 2019[2019-12-24]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2696>.
- [71] WANG X F, BLAABJERG F, WU W M. Modeling and analysis of harmonic stability in an AC power electronics-based power system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(12): 6421-6432.
- [72] 吕敬, 蔡旭, 张占奎, 等. 海上风电场经 MMC-HVDC 并网的阻抗建模及稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(14): 3771-3780.
LÜ Jing, CAI Xu, ZHANG Zhankui, et al. Impedance modelling and stability analysis of MMC-based HVDC for offshore wind farms[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(14): 3771-3780.
- [73] 吕敬, 蔡旭. 提高风场柔直并网系统稳定性的控制器参数优化设计[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(2): 431-443.
LÜ Jing, CAI Xu. Controller parameters optimization design for enhancing the stability of wind farm with VSC-HVDC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(2): 431-443.
- [74] 吕敬, 董鹏, 施刚, 等. 大型双馈风电场经 MMC-HVDC 并网的次同步振荡及其抑制[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(19): 4852-4860.
LÜ Jing, DONG Peng, SHI Gang, et al. Subsynchronous oscillation and its mitigation of MMC-based HVDC with large doubly-fed induction generator-based wind farm integration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(19): 4852-4860.
- [75] 桑顺, 高宁, 蔡旭, 等. 电池储能变换器弱电网运行控制与稳定性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 54-64.
SANG Shun, GAO Ning, CAI Xu, et al. Operation control and stability study of converters for battery energy storage under weak grid conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(1): 54-64.
- [76] 李云丰, 汤广福, 贺之渊, 等. MMC 型直流输电系统阻尼控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(20): 5492-5503, 5725.
LI Yunfeng, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Damping control strategy research for MMC based HVDC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(20): 5492-5503, 5725.
- [77] DONG D, WEN B, BOROEYEVICH D, et al. Analysis of phase-locked loop low-frequency stability in three-phase grid-connected power converters considering impedance interactions[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(1): 310-321.
- [78] ALAWASA K M, MOHAMED Y A. A simple approach to damp SSR in series-compensated systems via reshaping the output admittance of a nearby VSC-based system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(5): 2673-2682.
- [79] 伍文华, 陈燕东, 周乐明, 等. 虚拟同步发电机接入弱电网的序阻抗建模与稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(6): 1560-1571.
WU Wenhua, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Sequence impedance modeling and stability analysis for virtual synchronous generator connected to the weak grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(6): 1560-1571.
- [80] 孙丽玲, 王艳娟. 双馈风力发电机高压穿越暂态全过程分析及控制策略性能评估[J]. *高压技术*, 2019, 45(2): 593-599.
SUN Liling, WANG Yanjuan. Analysis and performance reevaluation for transient whole process of improved control strategy for doubly-fed induction generator crossed by high voltage ride through[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(2): 593-599.
- [81] 王岩, 魏林君, 高峰, 等. 光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(14): 70-78.
WANG Yan, WEI Linjun, GAO Feng, et al. Coordinated control strategy between large-scale photovoltaic power station and VSC-HVDC for low voltage ride-through operation[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(14): 70-78.
- [82] 中国国家标准化管理委员会. 风力发电机组故障电压穿越能力测试规程规定: GB/T 36995—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. Standardization Administration of the Peoples Republic of China. Wind turbines-test procedure of voltage fault ride through capability: GB/T 36995—2018[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2018.
- [83] 中国国家标准化管理委员会. 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. Standardization Administration of the Peoples Republic of China. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2012[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2012.
- [84] 刘天琪, 陶艳, 李保宏. 风电场经 MMC-MTDC 系统并网的几个关键问题[J]. *电网技术*, 2017, 41(10): 3251-3260.
LIU Tianqi, TAO Yan, LI Baohong. Critical problems of wind farm integration via MMC-MTDC system[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10): 3251-3260.
- [85] RAMTHARAN G, ARULAMPALAM A, EKANAYAKE J B, et al. Fault ride through of fully rated converter wind turbines with AC and DC transmission[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2009, 3(4): 426-438.
- [86] LIU Y, WANG X, CHEN Z. Cooperative control of VSC-HVDC connected offshore wind farm with low-voltage ride-through capability[C] // *International Conference on Power System Technology*. Auckland, New Zealand: IEEE, 2012: 1-6.
- [87] 厉璇, 宋强, 刘文华, 等. 风电场柔性直流输电的故障穿越方法对风电机组的影响[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(11): 31-36.
LI Xuan, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Impact of fault ride-through methods on wind power generators in a VSC-HVDC system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(11): 31-36.
- [88] ADEUYI O D, CHEAH-MANE M, LIANG J, et al. Preventing DC over-voltage in multi-terminal HVDC transmission[J]. *CSEE Journal of Power & Energy Systems*, 2015, 1(1): 86-94.
- [89] VRIONIS T D, KOUTIVA X I, VOVOV N A, et al. Control of an HVDC link connecting a wind farm to the grid for fault ride through enhancement[J]. *IEEE Transactions on Power Systems* 2007, 22(4): 2039-2047.
- [90] 王国英, 贾一凡, 邓娜, 等. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越方案[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(2): 146-154.
WANG Guoying, JIA Yifan, DENG Na, et al. Grid side fault ride through solution for offshore wind connection with VSC-HVDC[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(2): 146-154.
- [91] 李琦, 宋强, 刘文华, 等. 基于柔性直流输电的风电场并网故障穿越协调控制策略[J]. *电网技术*, 2014, 38(7): 1739-1745.
LI Qi, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A coordinated control strategy for fault ride-through of wind farm integration based on VSC-HVDC[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(7): 1739-1745.
- [92] 郭贤珊, 梅念, 李探, 等. 张北柔性直流电网盈余功率问题的

- 机理分析及控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 157-164.
GUO Xianshan, MEI Nian, LI Tan, et al. Study on solution for power surplus in Zhangbei VSC-based DC grid mechanism analysis and control method[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 157-164.
- [93] MARQARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia. Jeju, Korea: IEEE, 2011: 1425-1431.
- [94] XIANG W, LIN W X, XU L, et al. Enhanced independent pole control of hybrid MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 33(2): 861-872.
- [95] HU J B, XU K C, LIN L, et al. Analysis and enhanced control of hybrid-MMC-based HVDC systems during asymmetrical DC voltage faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1394-1403.
- [96] 孔 明, 汤广福, 贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5343-5351.
KONG Ming, TANG Guangfu, HE Zhiyuan. A DC fault ride-through strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5343-5351.
- [97] 蔡 静, 董新洲. 高压直流输电线路故障清除及恢复策略研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 181-190.
CAI Jing, DONG Xinzhou. Overview on research of fault clearing and recovery strategy for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 181-190.
- [98] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [99] 何俊佳. 高压直流断路器关键技术研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2353-2361.
HE Junjia. Research on key technologies of high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2353-2361.
- [100] 裴 鹏, 黄晓明, 王 一, 等. 高压直流断路器在舟山柔直工程中的应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 403-408.
QIU Peng, HUANG Xiaoming, WANG Yi, et al. Application of high voltage DC circuit breaker in Zhoushan VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 403-408.
- [101] 魏晓光, 杨兵建, 汤广福. 高压直流断路器技术发展与实践[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3180-3188.
WEI Xiaoguang, YANG Bingjian, TANG Guangfu. Technical development and engineering applications of HVDC Circuit breaker[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3180-3188.
- [102] 张翔宇, 余占清, 黄瑜琰, 等. 500 kV 耦合负压换流型混合式直流断路器原理与研制[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 413-422.
ZHANG Xiangyu, YU Zhanqing, HUANG Yulong, et al. Principle and development of 500 kV hybrid DC circuit breaker based on coupled negative voltage commutation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 413-422.
- [103] 黄 强, 邹贵彬, 高 磊, 等. 基于 HB-MMC 的直流电网直流线路保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2830-2840.
HUANG Qiang, ZOU Guibin, GAO Lei, et al. Review on DC transmission line protection technologies of HB-MMC based DC grids[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2830-2840.
- [104] ANUPAMA S, HARINATH-EDDY K, CHANDRAKANTH S. A fuzzy logic controlled based protection scheme for HVDC converters against decide faults with current suppression capability[J]. International Journal of Electrical Engineering, 2016, 9(3): 233-247.
- [105] 马 焕, 姚为正, 吴金龙, 等. 含桥臂阻尼的 MMC-HVDC 直流双极短路故障机理分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2099-2106.
MA Huan, YAO Weizheng, WU Jinlong, et al. Analysis of DC pole-to-pole short circuit fault behavior in MMC-HVDC transmission systems with bridge arm damper[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2099-2106.
- [106] 周 猛, 向 往, 左文平, 等. 柔性直流电网主动限流开断直流故障研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 2019[2019-12-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20190606.1702.006.html>.
ZHOU Meng, XIANG Wang, ZUO Wenping, et al. Research on DC fault isolation of MMC based DC grid using the active current-limiting approach[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 2019[2019-12-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20190606.1702.006.html>.
- [107] WANG Y Z, YUAN Z C, FU J, et al. A feasible coordination protection strategy for MMC-MTDC systems under DC faults[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 90: 103-111.
- [108] 郭贤珊, 李 探, 李高望, 等. 张北柔性直流电网换流阀故障穿越策略与保护定值优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 196-205.
GUO Xianshan, LI Tan, LI Gaowang, et al. Fault ride-through strategy and protection setting optimization of converter valve for zhangbei VSC-HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 196-205.
- [109] HE J W, LI B, LI Y. Analysis of the fault current limiting requirement and design of the bridge-type FCL in the multi-terminal DC grid[J]. IET Power Electronics, 2018, 11(6): 968-976.
- [110] XIA D, QIU Q Q, ZHANG Z F, et al. Magnetic field and characteristic analysis of the superconducting fault current limiter for DC applications[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 1-5.
- [111] 韩乃峥, 贾秀芳, 赵西贝, 等. 一种新型混合式直流故障限流器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1647-1658, 1861.
HAN Naizheng, JIA Xiufang, ZHAO Xibei, et al. A novel hybrid DC fault current limiter topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1647-1658, 1861.
- [112] 官二勇, 董新洲, 王 豪. 直流电网组合式故障限流装置及其运行策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3222-3231.
GUAN Eryong, DONG Xinzhou, WANG Hao. Study of combined fault current limiting equipment and operation strategy for DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3222-3231.
- [113] 赵西贝, 宋冰倩, 许建中, 等. 适用于直流电网的自旁路型故障限流器研究[J]. 中国电机工程学报: 2019, 39(19): 5724-5731, 5900.
ZHAO Xibei, SONG Bingqian, XU Jianzhong, et al. Research on fault current limiter suitable for DC grid with self-bypassing capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5724-5731, 5900.
- [114] SONG M, MA T, SHENG C, et al. The parameter design and system simulation of 160 kV/1 kA resistive-type superconducting DC fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 1-6.



YUAN Zhichang

Ph.D.

Associate professor



GUO Peiqian

Corresponding author

袁志昌

1980—, 男, 博士, 副研究员

主要从事柔性交直流输电技术方面的研究工作

E-mail: yuanzc@mail.tsinghua.edu.cn

郭佩乾(通信作者)

1991—, 男, 硕士

主要从事柔性交直流输电技术方面的研究工作

E-mail: guopeiqian@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期 2019-12-30 修回日期 2020-03-15 编辑 何秋萍