

多端柔性直流输电的发展现状及研究展望

吴 博¹, 李慧敏¹, 别 睿¹, 邱慧敏¹, 秦立斌¹, 钱 峰²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北武汉 430072; 2. 广东省电力调度中心, 广东广州 510000)

Current Development and Research Prospect of VSC-MTDC

WU Bo¹, LI Huimin¹, BIE Rui¹, QIU Huimin¹, QIN Libin¹, QIAN Feng²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Electric Power Dispatching Control Center, Guangdong Power Grid, Guangzhou 510000, China)

摘 要: 随着能源战略结构的不断调整和完善, 多端柔性直流输电逐渐成为解决新能源并网的重要技术手段。文中针对多端柔性直流输电技术及其国内外工程实例进行了详细介绍。结合可再生能源并网以及海岛供电等需求, 对 VSC-MTDC 在风光电等新能源接入、孤立海岛和钻井平台的供电、大电网的非同步联网以及大型城市供电等领域的应用前景进行了展望。并从拓扑结构、控制保护策略、数学模型与仿真分析、运行特性等理论方面分析了 VSC-MTDC 的研究现状, 提出了各方面进一步研究的建议。

关键词: 多端柔性直流输电; 拓扑结构; 控制策略; 仿真建模; 运行特性

Abstract: With the development and improvement of energy strategies, VSC-MTDC has become an important technology to address issues in renewable power integration. In this paper, VSC-MTDC technology and corresponding application cases are presented in details. Based on analysis of demands in renewable power integration and island power supply, the application prospects of VSC-MTDC, such as renewable power integration, power supply of island and drilling platform, nonsynchronous connecting of bulk grid, and power supply and distribution of large city, are provided. The research progress of VSC-MTDC is analyzed in terms of topology, control strategy, mathematic model and simulation analysis as well as operation characteristic, and proposals are further proposed respectively.

Keywords: VSC-MTDC; topology; control strategy; modeling and simulation; operation characteristic

0 引 言

随着电力电子器件和控制技术的发展, 采用 IGBT 等全控型电力电子器件的柔性直流输电技术受到越来越多的关注, 柔性直流输电(HVDC based

on voltage source converter, VSC-HVDC)是其中典型的代表。与传统的换相高压直流输电(line-commutated converter high voltage DC, LCC-HVDC)相比, VSC-HVDC 是一种先进的输配电解决方案, 既可以实现有功功率和无功功率的独立、快速控制, 又能向无源网络系统供电。在潮流反转时, 直流电流方向反转而直流电压极性保持不变, 容易构成多端柔性直流输电(VSC-MTDC, multi-terminal HVDC based on voltage source converter)系统。由于柔性直流输电系统具有良好的特性, 此技术可广泛用于交流电网同步和非同步互联、风电等清洁能源的接入、向孤立无源负荷供电(如海岛以及海上钻井平台)、电力交易、构筑大都市直配电网以及改善电能质量等场合, 具有广阔的应用前景。

1 VSC-MTDC 概述及工程实例

1.1 VSC-MTDC 概述

多端直流输电(MTDC)工程是指由 3 个或者 3 个以上的换流站及其直流输电线路组成的高压直流输电系统。MTDC 受到了电力行业极大的重视。按照其使用换流器技术来分, 它可以分为以下 3 大类型: ①传统的基于晶闸管相控换流技术的传统多端直流输电(LCC-MTDC); ②基于电压源型换流技术的多端柔性直流输电系统(VSC-MTDC); ③既有电压源型换流器又有晶闸管相控换流器的混合型多端直流输电系统。由于 LCC 换流器技术相对成熟, 目前大多数运行的多端直流输电系统属于 LCC-MTDC, 如意大利—科西嘉—撒丁岛的三端直流输电工程和魁北克—新英格兰的五端直流输电工程^[1]。混合型多端直流输电系统鲜有存在, 目前

已知的有美国的 GBX 工程, 该工程两端为 LCC 换流站而中间落点为 VSC 换流站^[2]。

多端柔性直流输电系统(VSC-MTDC)是指在一直流网架下, 含有两个以上 VSC 换流站的柔性直流输电系统, 其最为显著的特点为能够实现多电源供电以及多落点受电^[3]。VSC-MTDC 是采用电压源型换流器的直流输电技术, 该技术以可关断器件和脉冲宽度调制技术为基础。与传统的多端直流输电相比, VSC-MTDC 具有电压源型换流器的技术优势, 可以在较大范围内对系统的有功和无功功率分别进行独立控制, 快速对交直流电压和频率进行调节, 因此更加灵活可靠。VSC-MTDC 示意图如图 1 所示。

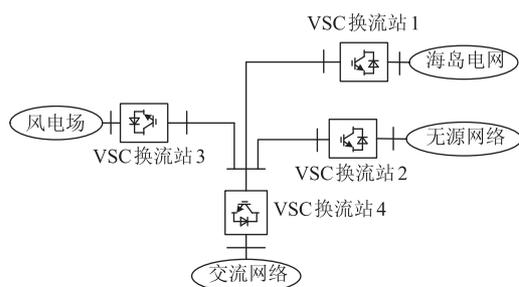


图 1 VSC-MTDC 示意图

1.2 工程实例

全球投运的柔性直流输电工程大多为点对点的两端系统, 鲜有多端柔性直流输电工程投入商业运行。两端直流输电系统无法实现对多个电源点的接入或者多个负荷点的同时供电, 多端系统可以将多个海上风电场、孤立海岛等与负荷中心连接起来, 构成直流网络。为满足可再生资源并网以及海岛供电等需求, 全世界很多国家已有 VSC-MTDC 的建设。迄今为止, 中国已有两项多端直流工程, 即南方电网公司南澳风电场三端直流输电工程和国家电网公司浙江舟山五端柔性直流输电工程。南澳多端柔性直流输电工程, 采用模块化多电平(MMC)技术, 直流电压等级为 $\pm 160\text{kV}$, 传输容量 200MW。南澳岛上的青澳换流站与金牛换流站是送端换流站, 而汕头塑城换流站是受端换流站, 如图 2 所示。目前该工程已经完成三端投产^[4-6]。

舟山五端直流输电工程在定海、岱山、衢山、洋山、泗礁 5 座岛屿上分别建设一座 VSC 换流站, 通过 4 条直流输电线路构成五端柔性直流输电系统。该系统与各岛屿之间的交流系统互为备用, 当

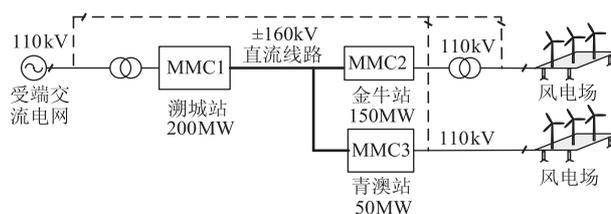


图 2 南澳多端柔性直流输电工程示意图

直流系统中任一端换流站退出运行时, 可通过交流线路保证岛上供电可靠性^[7]。该工程采用并联放射型网络拓扑结构, 如图 3 所示。其中任一端换流站退出运行时系统仍能不间断安全运行, 具备任一端换流站退出运行时仍稳定运行的能力, 可靠性较高^[2]。目前该工程已完成海缆敷设施工, 预计 2014 年底可以投入运行。

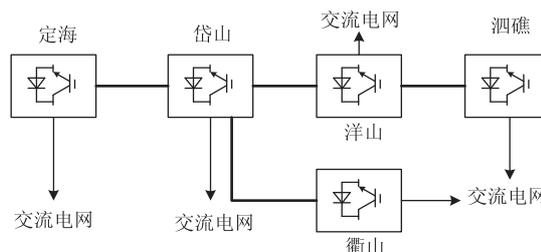


图 3 舟山五端直流输电工程示意图

北美 Tres Amigas 超导体输电项目计划在新墨西哥州的 Clovis 地区建设一座超级电力中转站, 是目前在建最大的三端柔性直流输电工程, 用来连接美国东部互联电网、西部互联电网和德克萨斯电网 3 个大电网, 如图 4 所示。在此之前, 三大电网虽有直联络线, 但正常运行下相互交换功率几乎为零, 建成后可以实现这三大电网真正意义上的系统互联。除此之外, 工程选址周围有很多新能源, 因此将对新能源的充分利用和 3 个互联系统之间的合

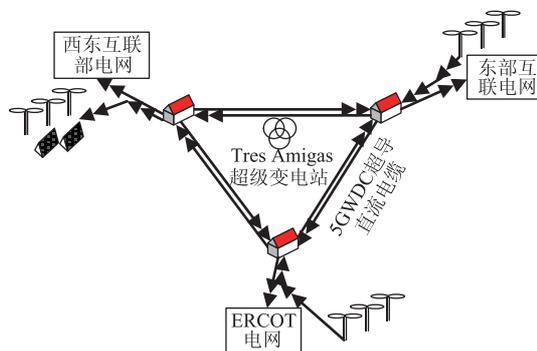


图 4 北美 Tres Amigas 超导体输电项目

理调配发挥重要作用。该工程设计的最大输电容量为 5GW, 直流电压等级为 345kV, 换流站拟采用电压源转换技术, 预计 2016 年投入运行^[8-9]。

除此之外, 还有瑞典—挪威的 South-West Scheme 三端柔性直流输电工程。该工程柔性直流

计划的输电总量为 1 440MW, 但是为保证运行可靠, 该工程采用两条独立的线路, 每条传输容量为 720MW, 直流电压等级为 ± 300 kV, 每条高压直流线路配置一个对称的单级^[10]。计划建设的多端柔性直流输电工程如表 1 所示^[2]。

表 1 全球已(拟)建设的 VSC-MTDC 输电工程

序号	工程名称	功率/MW	电压/kV	端数	用途
1	中国南澳柔性直流输电工程	200	± 160	3	风电并网
2	中国舟山多端柔性直流输电重大科技示范工程	400	± 200	5	海岛供电
3	北美 Tres Amigas 超导体输电工程	750	± 345	3	大系统互联
4	瑞典—挪威 South-West Scheme	720 \times 2	± 300	3	大容量送电

2 VSC-MTDC 的应用前景

多端柔性直流输电继承了两端柔性直流输电相应的优点, 即占地面积小、无功消耗少、谐波含量低、无换相失败问题以及无功和有功解耦控制方便等, 因此应用前景光明。灵活可控的多端柔性直流输电为新能源并网技术和重要负荷供电等众多有待解决的问题提供了新的思路^[11]。具体表现在以下几个方面^[12-15]:

2.1 风电、光电等新能源并网

太阳能和风能都是间歇性能源, 且一般远离负荷中心, 在长距离大容量电力输送方面, 相比于交流输电直流输电更具有经济性, 因此多端柔性直流输电是必不可少甚至是唯一解决此类问题的技术手段。另外柔性直流输电既能提高风电机组抵御电网故障扰动的能力, 减少风电机组的停运率; 又能提高风电机组对风速的适应能力, 能够在更大风速范围内保持发电运行, 南澳多端柔性直流输电提高了海上风电利用率 5%~10%^[6]。随着越来越多的多端柔性直流输电工程的成功运行, VSC-MTDC 将成为地区电网消纳新能源的重要技术手段。

2.2 孤立海岛以及钻井平台的供电

海岛供电是多年来影响海岛经济发展和人民生活水平提高的主要问题之一。长久以来, 一些有常住人口的海岛由于远离大陆, 海岛上的小型供电系统无法与大陆大电网并网, 海岛居民无法享用大电网的低价电源。另外海岛及海上钻井平台负荷较小, 波动较大, 燃料及资源利用不合理, 因

此海岛电价过高, 电力供应可靠性较低, 而 VSC-MTDC 可以解决这些问题, 让海岛居民享受低价电。

2.3 大电网的非同步联网

不同频率的电网限制了两个区域之间的电力交易, VSC-MTDC 通过换流技术将不同频率的交流电都转化为直流, 可以作为系统间联络线, 用于实现不同步或不同频率的两个交流系统的互联; 此外由于 VSC-MTDC 能对自身电流进行快速控制, 因此可用来限制互联系统的短路容量。虽然目前 VSC-MTDC 在容量上还有一定的限制, 但是随着其技术的发展, 未来跨国以及跨区域不同频率电网互联会变得越来越普遍。

2.4 大型城市供配电

由于特大城市对环境和占地极为关注, 电厂从市中心转移和从外地输入大量电力的趋势不可逆转。VSC-MTDC 应用于城市中心供电的优越性在于: 可以快速控制有功功率和无功功率, 解决电压闪变问题, 改善供电的电能质量, 防止敏感设备因电能质量问题造成的经济损失; 多端柔性直流输电可采用地埋式直流电缆, 不会影响市容; 又由于 VSC-MTDC 一般采用双极电缆布置, 电缆磁场几乎降到零, 对电磁环境的影响较小, 因此可满足城市中心负荷的需求和环保节能的要求。VSC-MTDC 的各种应用如图 5 所示。

3 多端柔性直流输电研究展望

尽管 VSC-MTDC 具有广阔的应用前景, 但目前工作主要侧重于多端柔性直流输电的控制保护策略的研究和校核, 在其拓扑结构设计方法、多

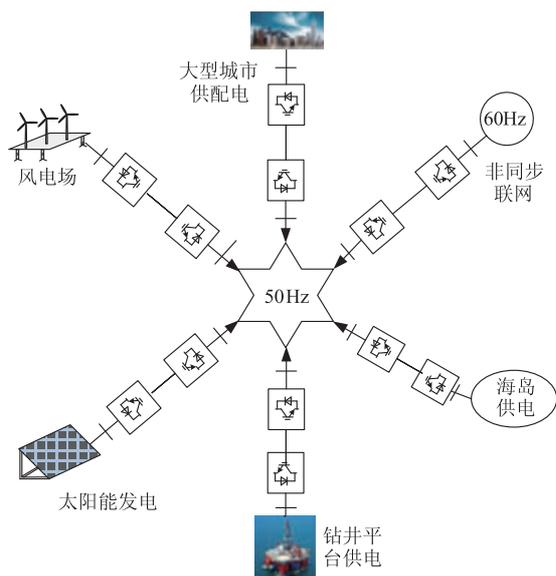


图5 VSC-MTDC的各种应用

个换流站之间的协调控制与最优控制、VSC-MTDC的电磁暂态仿真和机电暂态仿真以及特殊条件下的换流器控制策略等方面还有很多问题有待解决。

3.1 VSC-MTDC 拓扑结构设计

与传统的多端直流输电系统类似，VSC-MTDC也可以采用串联和并联等拓扑结构。并联式结构中，所有换流站直流电压相同；而串联式结构中，各个换流站的直流电流相同。表2从有功损耗、调节范围、故障恢复能力、系统绝缘配合、扩建灵活性、经济性等各方面，综合对比了并联型和串联型拓扑结构^[1]。

表2 并联式与串联式拓扑结构对比

项目	并联	串联
有功损耗	较小	较大
调节范围	较大	较小
故障恢复能力	较快	较慢
系统绝缘配合	比较容易	比较复杂
扩建灵活性	灵活	复杂
经济性	较高	较低

目前学术界对VSC-MTDC的拓扑结构设计鲜有涉及，但是VSC-MTDC系统的拓扑结构直接关系到控制策略的可靠性和实用性。文献[16]针对大型风电场并网的多端柔性直流输电系统拓扑

结构问题进行了详细的讨论，综合经济性和技术性两方面的分析，对比了星型、环型以及星环结合等拓扑结构的优缺点，认为大型风电基地选择星型-中心环型拓扑结构最具有可行性，见表3。文献[17]指出在评价拓扑结构时必须要考虑稳态损耗和故障电流两个方面的影响。文献[18]综合分析了并联型和串联型多端直流系统结构的特点，认为并联型多端直流输电结构更具有优势。总之，在进行多端柔性直流输电的拓扑结构设计时，需要结合大电网的实际情况，分析不同拓扑结构下多端直流输电网络的运行可靠性和经济性，得出最合适的换流站布局和接线方式。

表3 各种多端直流拓扑结构比较

拓扑结构	通信需求	灵活性	冗余性	总结
环型拓扑	是	好	好	灵活性好,某些电路承担着全部系统电源
星型拓扑	否	较差	有冗余	电流额定值等于所连换流站的值,但在中心节点存在薄弱点
星型-中心环型拓扑	否	好		有前两者的优点,但缺点也存在
风电场侧环型拓扑	是	好	好	点对点拓扑结构部分出现故障时,可以隔离该部分故障电路,而无需切除整个环形电路的系统功率
交流侧环型拓扑	是	较差	有冗余	

3.2 VSC-MTDC 的控制保护策略

相比于两端直流输电系统，多端柔性直流输电需要考虑多个换流站控制系统间的配合问题，因此控制系统更加复杂。VSC-MTDC控制保护可分为系统级控制、换流站级控制和换流阀级控制3大类。系统级控制策略主要从调度要求与直流系统稳定运行角度，确定多端系统的整体控制策略与各换流站的控制目标^[19]。与两端柔性直流输电控制不同，VSC-MTDC需要协调配合并集中控制多个换流站，因此其相应的系统级控制也要复杂

得多。

多端柔性直流输电系统协调控制的关键是对直流侧电压的控制。目前比较常见的系统级控制策略主要有单点直流电压协调控制策略，多点直流电压协调控制策略，直流电压斜率控制策略^[20]等。VSC-MTDC 协调控制策略的大致类型如图 6 所示^[20-23]。

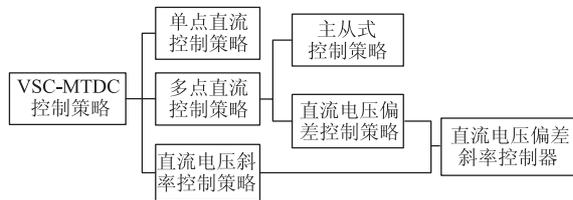


图 6 VSC-MTDC 协调控制策略

单点直流电压控制是早期研究主要采用的方法，这种控制模式中只有一个换流站负责直流线路电压的控制，而其余站负责各自电流和功率的调节以维持整个系统功率平衡^[21]。如果负责直流电压控制的换流站发生直流侧故障时，整个多端系统会失去调节电压的能力。但对于并联型 VSC-MTDC，必须要能实现直流电压的控制。多点直流电压控制法可以解决这个问题，按照换流站是否需要通信，多点直流电压控制又可分为主从式控制和直流电压偏差控制。但是主从式控制策略需要具备上层控制模块和高速通信条件，系统可靠性不高，而直流电压偏差控制是一种无站间通信的控制策略，文献 [22] 指出该方法提高了系统扰动情况下的功率调节能力，在 VSC-MTDC 协调控制中非常有效。直流电压斜率控制策略是一种新颖的控制方法。文献 [24] 对比了几种直流电压控制方法，如表 4 所示，指出把直流电压斜率控制和偏差控制结合会更加可靠。而文献 [20] 提出的直流电压偏差斜率控制器具有较好的稳态运行特性以及暂态运行特性，偏差特性控制和斜率特性控制的优点均有所体现，恰好证明了这点。

表 4 不同直流电压控制方法比较

控制方法	动态响应速度	扩展性	灵活性	通信需求
斜率控制	高	中等	低	低
比例控制	高	低	中等	中等
优先级控制	中等	中等	中等	低
偏差控制	低	高	高	中等

图 6 中所列是目前较为基本的方法，不排除其他协调控制方法。文献 [25] 提出一种将裕度控制和斜率控制相结合的控制策略，实现了 VSC-MTDC 系统的多级直流电压控制。文献 [26] 对直流斜率控制进行改进，通过引入一个公共直流参考电压，保证了 VSC-MTDC 系统可靠稳定的运行。文献 [27] 基于直流电压-有功功率调节特性提出了一种新的 VSC-MTDC 系统控制策略，当有换流站发生故障时，其他换流站完成功率的重新分配，自动实现功率的平衡；同时避免了单个换流站过载的情况，大大提高了系统运行的稳定性。而文献 [28] 基于多代理技术设计了一种 VSC-MTDC 控制系统，借助多智能体优秀的分布并行处理能力，实现了 VSC-MTDC 系统达到快速、准确控制的目的。

关于控制保护策略方面，尽管诸多学者已投入了大量的研究工作，由于 VSC-MTDC 受到自身以及外部相连的交流系统故障的干扰，加之多个换流站接入后，系统的运行方式的组合变得多样化，即保持功率平衡的方式组合是多样化的，因此如何保证多端之间在正常运行时的功率平衡与直流电压稳定，在故障扰动情况下各端的快速调整、模式切换与重新平衡仍是一大难题。

此外，在交流不对称故障、孤岛送电等特殊条件下，需要制定相应的换流器控制策略，该控制策略更为复杂，而且需要考虑与常规运行状况下的控制策略的配合，因此这方面也需要有深入的研究。

3.3 VSC-MTDC 数学模型与仿真技术

3.3.1 数学模型

VSC-MTDC 的数学模型是对其进行仿真分析的基础，近年来很多学者在这方面做了大量的研究。一个完整的 VSC-MTDC 的数学模型应包括换流器及其控制器模型、直流电路方程和交直流耦合方程。文献 [29 - 30] 中提出了多端 VSC-HVDC 潮流计算模型。对 M 和 δ 不同组合列出 4 种运行控制方案，对每种方案给出了交直流潮流交替求解接口方程，提高了算法灵活性。但它忽略了 VSC-MTDC 内部元件动态特性，影响了模型精度，不能用于换流器详细动态特征分析。文献 [31] 在推导 VSC-MTDC 换流器及其控制器数学模型、直流电路方程以及交直流耦合方程的基础上，提出了 VSC-MTDC 的一般动态模型，并在

Matlab 上验证了模型适用于任何拓扑结构的 VSC-MTDC。文献 [32] 提出了 VSC-MTDC 的一般稳态模型, 推导了相应的潮流方程。模型可以模拟多端直流与交流混连情形, 也是通用的, 可以适合不同换流器拓扑结构的电网。

3.3.2 仿真技术

对于多端柔性直流而言, 国内外目前已有电磁暂态、机电暂态仿真方面的研究成果^[33-34], 但电磁暂态分析无法考虑柔性直流系统与大电网的交互影响, 而机电暂态仿真分析又无法完全顾及多端柔性直流系统的快速动态特性。

建立准确可靠的多端柔性直流系统电磁暂态模型和机电暂态模型是仿真研究多端柔性直流的基本要求。国内外对多端柔性直流系统电磁暂态建模和仿真理论已有较为深入的研究, 在 PSCAD/EMTDC、MATLAB 等仿真平台上建立相应的模型。受仿真规模和算法的限制, 电磁暂态仿真工具并不能很好地应用于大电网研究。目前主流的电力系统机电暂态仿真软件, 如 PSS/E、BPA、PSASP 等, 均已具备了详细仿真电力系统运行特性的可能性, 面临的主要问题是缺少仿真对象恰当的模型和参数。特别是针对多端柔性直流输电系统, 尚缺乏合适、准确的仿真计算模型, 迫切需要建立合适的仿真计算模型, 从而为电力系统的规划、建设和运行提供计算工具。

3.4 多端柔性直流运行特性分析

多端柔性直流输电系统对系统的运行特性影响, 包括 VSC-MTDC 动态特性、VSC-MTDC 对交流系统影响、交流对 VSC-MTDC 影响、VSC-MTDC 运行可靠性评估等。通过深入的仿真分析, 探索 VSC-MTDC 运行控制规律。多端柔性直流不同于常规直流, 受多站间的相互影响, 其动态特性具有其独特性。从最基础的电气外特性着手, 由浅入深, 逐步开展 VSC-MTDC 动态特性的分析, 是解决该问题的一个思路。此外, 由于已有 VSC-MTDC 工程投入运行, 可以参考 VSC-MTDC 工程的实际运行经验, 归纳、整理 VSC-MTDC 的动态特性, 并揭示其与交流电网的交互影响。

4 结束语

在实际工程经验较少的前提下, VSC-MTDC 的拓扑结构分析、VSC-MTDC 的控制保护策略、

多端直流系统与所连接的交流系统之间的最佳协调控制、多端直流系统无功功率与有功功率的联合控制等问题是多端柔性直流输电技术大量普及之前要解决的关键性问题。

建立多端柔性直流输电系统的仿真计算模型, 是深入研究和分析多端柔性直流输电系统的工作机理、特性、以及提高系统控制性能的基础和必要手段。多端柔性直流输电仿真计算理论和模型的深入研究, 将为多端柔性直流输电仿真工具的完善提供完备的理论基础和详细的方法指导。实现不同详细程度、适用于各种分析和应用目的的仿真计算功能, 将会对多端柔性直流输电系统在电力系统中的发展提供极大的促进作用。

目前, 多端柔性直流输电系统的研究大多是以简化系统为研究对象, 使用电磁暂态仿真工具研究较小网络规模的电力系统的运行方式和控制策略。但对多端直流输电并网后交直流一体化混联电网的运行方式、大电网背景下的多端柔性直流特性和交直流电网相互影响等问题鲜有深入、系统地研究。

参 考 文 献

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 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(10): 8-17, 24.
- [3] 徐政. 柔性直流输电系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [4] 饶宏. 南方电网大功率电力电子技术的研究和应用 [J]. 南方电网技术, 2013(1): 1-5.
- [5] 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(15): 3-14.
- [6] 中国南方电网. 世界首个多端柔性直流输电工程建成 [EB/OL]. http://www.csg.cn/index/dbt/201312/t20131225_74863_3.html.
- [7] 吴浩, 徐重力, 张杰峰等. 舟山多端柔性直流输电技术及应用 [J]. 智能电网, 2013(2): 22-26.
- [8] Alaywan Z. The Tres Amigas Superstation: Linking renewable energy and the nation's grid (July 2010) [C] //Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. IEEE, 2010: 1-5.
- [9] Tres Amigas LLC. The Tres Amigas superstation project discussion materials [R]. 2009.

- [10] Ingemansson D, et al. The South-West scheme: A new HVAC and HVDC transmission system in Sweden [C]. AC and DC Power Transmission (ACDC 2012), 10th IET International Conference on. 2012.
- [11] 陈海荣, 徐政, 张静. 一种基于电压源型多端直流输电的供电系统 [J]. 高电压技术, 2006(9): 1-5.
- [12] 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(9): 1-6.
- [13] 张东辉, 冯晓东, 孙景强等. 柔性直流输电应用于南方电网的研究 [J]. 南方电网技术, 2011(2): 1-6.
- [14] Okba M H, et al. High voltage direct current transmission—A Review, part I [C]. Energytech, 2012 IEEE, 29-31 May 2012: 1-7.
- [15] Okba M H, et al. High voltage direct current transmission—A Review, Part II — Converter technologies [C]. Energytech, 2012 IEEE, 29-31 May 2012: 1-7.
- [16] Gomis-Bellmunt O, et al. Topologies of multi-terminal HVDC-VSC transmission for large offshore wind farms [J]. Electric Power System Research, 2011, 81(2): 271-281.
- [17] Bucher M K, Wiget R, Andersson G, et al. Multi-terminal HVDC Networks—What is the Preferred Topology? [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 406-413.
- [18] 胡永瑞. 多端直流输电系统若干问题研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [19] 马玉龙, 马为民, 陈东等. 舟山多端柔性直流工程系统方案 [J]. 电力建设, 2014(3): 1-6.
- [20] 唐庚, 徐政, 刘昇, 顾益磊等. 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(15): 125-132.
- [21] Jiang H, Ekstrom A. Multiterminal HVDC systems in urban areas of large cities [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1278-1284.
- [22] Haileselassie T M, Uhlen K. Precise control of power flow in multi-terminal VSC-HVDCs using DC voltage droop control [C] //Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE. IEEE, 2012: 1-9.
- [23] 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(19): 28-33.
- [24] Pinto R T, Rodrigues S F, Bauer P, et al. Comparison of direct voltage control methods of multi-terminal DC (MTDC) networks through modular dynamic models [C] //Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on. IEEE, 2011: 1-10.
- [25] 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.
- [26] 阎发友, 马巍巍, 朱琳等. 多端柔性直流输电系统新型直流电压控制策略 [J]. 智能电网, 2013, 1(2): 17-21.
- [27] 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.
- [28] 吴俊宏, 艾芊, 章健等. 基于多代理技术的 VSC-MTDC 控制系统 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 85-89.
- [29] 陈谦, 唐国庆, 王浔. 多端 VSC-HVDC 系统交直流潮流计算 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6): 1-6.
- [30] ZHANG Xiao-ping. Multi-Terminal Voltage-Sourced Converter-Based HVDC Models for Power Flow Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1877-1884.
- [31] Cole S, Beerten J, Belmans R. Generalized dynamic VSC MTDC model for power system stability studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1655-1662.
- [32] Beerten J, Cole S, Belmans R. Generalized steady-state VSC MTDC model for sequential AC/DC power flow algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 821-829.
- [33] Beerten J, Cole S, Belmans R. Modeling of Multi-Terminal VSC HVDC Systems With Distributed DC Voltage Control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 29(1): 34-42.
- [34] Beerten J, Belmans R. Modeling and control of multi-terminal VSC HVDC systems [J]. Energy Procedia, 2012(24): 123-130.

收稿日期: 2014-05-13

作者简介:

吴博(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制, E-mail: entrall68@126.com;

钱峰(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制等, E-mail: okmijn186@126.com.

(责任编辑: 林海文)