

# 多端直流输电与直流电网技术

汤广福, 罗湘, 魏晓光

(国网智能电网研究院, 北京市 昌平区 102200)

## Multi-terminal HVDC and DC-grid Technology

TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang

(State Grid Smart Grid Research Institute, Changping District, Beijing 102200, China)

**ABSTRACT:** The multi-terminal high voltage direct current (HVDC) and DC grid technology based on the traditional HVDC and voltage sourced converter HVDC (VSC-HVDC) is one of the valid approaches which can resolve the problems of renewable energy integration in China. The background of the development of the DC transmission was analyzed and the two-terminal HVDC technology was overviewed in this paper. The basic concepts of the multi-terminal HVDC and DC grid were discussed. Combined the differences and relations between them, and their respective characteristics, the key technical issues to be resolved, cause of these problems and the research progress of building the DC grid in future were indicated, from which the thoughts and suggestions for the DC grid technology direction were put forward.

**KEY WORDS:** traditional high voltage direct current (HVDC); voltage sourced converter HVDC (VSC-HVDC); multi-terminal HVDC; DC grid

**摘要:** 基于常规直流及柔性直流的多端直流输电和直流电网技术是解决中国新能源并网和消纳问题的有效技术手段之一。从对直流输电发展的背景分析入手, 概述了两端直流输电技术, 深入探讨了多端直流输电和直流电网的基本概念, 结合多端直流和直流电网的区别与联系及其各自的技术特点, 指出了构建未来直流电网需要解决的关键技术问题、产生原因和国内外的研究进展, 为中国直流电网技术的研究方向提出了思考和建议。

**关键词:** 常规高压直流; 柔性直流; 多端直流输电; 直流电网

## 0 引言

随着传统能源的短缺和环境恶化问题的不断加剧, 世界各国已经认识到能源的利用与开发必须

从传统能源向绿色可再生能源等清洁能源过渡。截至 2012 年 6 月, 中国并网风电容量已达到  $52.58 \times 10^3$  GW, 成为世界第一风电大国; 同时中国光伏发电容量也将达到 4 GW。但受限于电力系统消纳能力, 大部分可再生能源未得到有效利用, 甚至出现“弃风”、“弃光”现象; 另一方面风电、太阳能等新能源发电具有间歇性、随机性特点, 属于间歇式电源。随着各种大规模可再生能源接入电网, 传统的电力装备、电网结构和运行技术等在接受超大规模可再生能源方面越来越力不从心, 为此必须采用新技术、新装备和新电网结构来满足未来能源格局的深刻变化。而基于常规直流及柔性直流的多端直流输电系统和直流电网技术是解决这一问题的有效技术手段之一<sup>[1-4]</sup>。

当前国外对多端直流输电及直流电网技术的研究日益深入。国际大电网会议成立了 6 个工作组, 在直流电网可行性、规划、直流换流器模型、拓扑、潮流控制、控制保护以及可靠性等方面开展研究工作。此外, 欧洲已于 2008 年提出超级智能电网 (Super Grid) 规划, 旨在充分利用可再生能源的同时, 实现国家间电力交易和可再生能源的充分利用; 并于 2010 年 4 月成立了一个包含技术研发和示范工程的合作组织——TWENTIES, 即利用创新工具和综合能源解决方案, 来实现大幅度低电压穿越的风力发电及其他可再生资源发电的电力传输, 旨在为迎接大规模风电进入欧洲电力系统而扫除障碍, 帮助欧洲实现其 20/20/20 目标, 即欧洲要在 2020 年实现: 二氧化碳排放降低 20%; 能源利用效率提高 20%; 20% 的电力消耗来自可再生能源。2011 年, 美国基于其电网大量输电设备老化、输电瓶颈涌现、大停电事故频发的背景, 提出了 2030 年电网预想 (Grid 2030), 即美国未来电网将建立由东岸

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目 (51261130471)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51261130471) .

到西岸、北到加拿大、南到墨西哥，主要采用超导技术、电力储能技术和更先进的直流输电技术的骨干网架<sup>[5-8]</sup>。

本文从对直流输电发展的背景分析入手，概述两端常规直流和柔性直流输电技术，并在此基础上深入分析多端直流输电和直流电网的基本概念，结合多端直流和直流电网的区别与联系及其各自的技术特点，论述构建未来直流电网需解决的技术瓶颈，为中国未来电网技术发展方向提出思考和建议。

## 1 输电技术的发展

### 1.1 交直流输电技术

人们对于输电技术的认识和研究始于直流。1882 年，历史上首次远距离直流输电实验获得成功；同年第一条真正意义上的直流输电线路建成，但电压只有 1.5 kV，输电效率仅为 25%。早期的直流输电存在电压变换困难、功率难以提升以及发电机不易换向、可用率低等缺点，因此逐步被交流输电所取代。1891 年，第一条交流输电线路建成，电压为 15.2 kV，输电效率已提高至 80%。随着 1895 年美国尼亚加拉复合电力系统建成，交流输电系统的主导地位被确立了。随后高压交流输电技术进入快速发展阶段，一百多年来输电电压由最初的 13.8 kV 逐步发展到 1 000 kV；交流发电机容量也从 1955 年的 300 MW 迅速提升到 1973 年的 1 300 MW。世界主要交流电压等级和首次运行时间如表 1 所示。

随着高压交流输电技术的蓬勃发展以及广域交流大电网的形成，交流输电也遇到了其固有的系统同步性、输电稳定性、输电效率相对直流系统较低等技术瓶颈问题；同时交流大电网的安全运行问题也日益突出。据不完全统计，从 1965 年至今，世界范围内发生大规模停电事故(负荷损失 $\geq 800$  万 kW)高达 25 次，仅 2012 年 7 月 30 和 31 日，印度北部

连续发生 2 次重大停电，使得约 6 亿人受灾。因此，交流输电系统是否是未来电能输送的唯一技术解决途径这样一个问题再次被提出。

### 1.2 高压直流输电技术

在交流输电技术日益成熟的同时，HVDC 技术也随着大功率电力电子器件、高压换流技术的发展而发展，克服了早期直流技术瓶颈问题，20 世纪 50 年代，高压大容量的可控汞弧整流器的研制成功标志着 HVDC 技术重新回到历史舞台。HVDC 技术是指由整流站将送端交流电能转换为直流电能，通过直流线路将直流功率输送到逆变站，再通过逆变站将直流电能转化交流电能送到受端交流系统的直流输电技术。主要经历了 3 个重要发展阶段。

#### 1) 汞弧阀换流阶段。

1928 年具有栅极控制能力的汞弧阀研制成功，1954 年世界上第一个采用汞弧阀直流输电工程在瑞典投入运行。但由于汞弧阀制造技术复杂、价格昂贵、故障率高、可靠性低、维护不便，因此逐渐被晶闸管换流技术所取代。

#### 2) 晶闸管换流阶段。

1956 年美国贝尔实验室发明晶闸管，次年美国通用开发出第一只晶闸管，并于 1958 年实现商业化。1972 年，世界首个采用晶闸管阀的直流输电工程加拿大伊尔河背靠背直流输电系统建成，并开始蓬勃发展，随着电压和容量等级的不断提高，这种输电技术在长距离大容量输电方面发挥越来越重要的作用。

#### 3) 可关断器件换流阶段。

1990 年由加拿大 McGill 大学提出了电压源换流器高压直流输电(voltage sourced converter HVDC, VSC-HVDC)技术，并由 ABB 公司于 1997 年在赫尔斯扬完成了首条商业化运行的 VSC-HVDC 工程。可关断器件换流的技术特点决定了其更适合应用于分布式发电并网、孤岛供电等领域。

如表 2 所示，与交流输电相比，HVDC 技术具有无稳定性问题、输电效率高、调节快速可靠、节省输电走廊等优势。由于换流站设备造价昂贵，通常当输电距离大于 800 km 时具有技术经济性优势<sup>[9-11]</sup>，而目前由于缺少高压直流断路器和 DC/DC 变压器等因素，限制了多端直流输电及直流电网技术的发展。

无论从经济性还是技术性角度，特高压电网(1 000 kV 交流和 $\pm 800$  kV 常规直流)都是解决中国长距离大容量电能输送的最佳方式之一。

表 1 世界主要交流电压等级和首次运行时间

Tab. 1 Major AC voltage levels in the world and the first running time

序号	电压等级/kV	投运时间/年度	投运国家
1	110	1908	美国
2	220	1923	美国
3	330	1952	前苏联
4	345	1954	美国
5	400	1956	前苏联
6	500	1964	美国
7	750	1967	前苏联
8	1000	2008	中国

表2 交流输电技术与 HVDC 技术的对比

Tab. 2 Contrast of AC and DC transmission technology

比较项目	交流输电技术	HVDC 技术
无功功率	存在	不存在
稳定性	较低	高
同步问题	存在	不存在
输送距离限制	有限	理论上无限
分布式电源接纳	不适合	适合
系统阻抗	大	小
故障电流上升率	较小	很大
大型储能设备	较多	很少
电压变换难易程度	容易	困难
切断故障电流难易程度	容易	困难

然而,在大规模新能源并网方面,由于新能源发电的间歇性,交流电网无法直接完成新能源的接纳,因此“强交强直”的特高压骨干电网结合区域性直流电网形成的互联电网将成为中国未来电网架构的基本形态。

## 2 两端直流输电技术

### 2.1 常规直流输电技术

基于线换相换流器(line commutated converter, LCC)的 HVDC 的研究始于 20 世纪 50 年代,到 80 年代时 HVDC 的研究达到了一个高潮,关键技术逐渐成熟,应用于工程实践的 HVDC 项目电压等级不断提高。

由于晶闸管只具备触发开通功能,LCC 系统传输的有功功率是通过调节触发角来控制的。大量的无功功率消耗在电力发送端的整流器以及电力接收端的逆变器上。这就需要在交流侧配置滤波器和电容器来补偿无功。特别在暂态条件下,无功功率的变化范围非常大。当潮流反转时,HVDC 系统的极性需要反转。如果线路使用电缆,电缆电容在极性反转条件下的充放电问题将不可忽视。

LCC-HVDC 技术目前已经相当成熟,已经投运的锦屏至苏南直流工程的最大容量为  $7.2 \times 10^3$  MW ( $\pm 800$  kV/4.5 kA),更高电压等级的 1 100 kV HVDC 系统正在研制中。

### 2.2 柔性直流输电技术

随着功率半导体器件技术的进步、大功率绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)的出现及脉宽调制技术(pulse width modulation, PWM)和多电平控制技术的发展,自换相的电压源换流器(voltage source converter, VSC)技术的 HVDC 近十年得到了迅猛发展。

与 LCC-HVDC 技术相比,VSC-HVDC 技术具有无功有功可独立控制、无需滤波及无功补偿设备、可向无源负荷供电、潮流翻转时电压极性不改变等优势,如表 3 所示。因此 VSC 更适合于构建多端直流输电及直流电网。目前,VSC-HVDC 一个终端的损耗约为 1.6%,其中换流阀的损耗占其中的 70%,现阶段已投运的 VSC-HVDC 工程最大容量为  $\pm 200$  kV/400 MW,而  $\pm 320$  kV/1 000 MW 的工程正处于建设阶段。目前,提升该技术输送容量的主要制约因素为交联聚乙烯电缆的电压等级限制。由于 VSC 换流阀的双向导电性,当直流侧发生故障时,短路电流交流部分可由交流断路器切断;但直流线路和直流侧支撑电容放电的短路电流将很难被阻断。为此两端 VSC-HVDC 系统通常使用电缆连接。

表3 LCC 技术与 VSC 技术的对比

Tab. 3 Contrast of LCC and VSC technology

比较项目	LCC 技术	VSC 技术
基本元件	晶闸管	IGBT
谐波分量	较强的低次谐波分量	较弱的高次谐波分量
无功/有功	消耗大量无功功率	完全独立控制
损耗/%	0.7	1.6
最高容量	7 200 MW(800 kV,4.5 kA)	>400~800 MW(320 kV)
与交流电网的连接方式	换流变压器	串联电抗器与变压器
潮流反转	电压极性反转	电流极性反转
直流侧故障控制	通过调整触发角控制	失控
直流侧电感	大	小
直流侧电容	小(使用电缆时较大)	大
短路电流上升率	小,可控	大

进入 21 世纪,VSC-HVDC 技术随着新能源并网需求进入了快速发展阶段,各种新型拓扑结构、调制方式不断涌现<sup>[12-14]</sup>;发展目标是使换流站总损耗小于 1%,输送容量大于 1 500 MW,具有限制和切断直流侧故障电流的能力。

### 2.3 混合直流输电技术

混合直流输电技术(hybrid HVDC)是常规直流输电和柔性直流输电的结合,即输电线路的一端是 LCC,另一端是 VSC。该技术不但可以保留柔性直流输电技术的绝大部分优势,而且可以优化工程造价。

混合型高压直流输电对于海上电网相连来说具有很大优势。紧凑的电压源型换流器适用于海上平台并且可与电气孤岛相连。电流源型换流器端可以放置于对换流站体积要求不高的陆上,而且可接入陆上强电网。由于电压源型换流器电压极性固

定，电流源型换流器电流流向固定，因此功率潮流不能直接反转。潮流反转时系统需要停运，并且一端的电压极性需要改变。现在一些电压源型换流器的拓扑结构可以直接改变电压极性，从而实现潮流反转<sup>[15-16]</sup>。为了避免潮流反转，混合线路在规划的时候可以只考虑单向功率潮流。

3 多端直流输电技术

多端直流输电(multi-terminal HVDC)是直流电网发展的初级阶段，是由 3 个以上换流站，通过串联、并联或混联方式连接起来的输电系统，能够实现多电源供电和多落点受电。图 1(a)—(d)分别是串联、混联、放射式并联和环网式并联的拓扑结构。

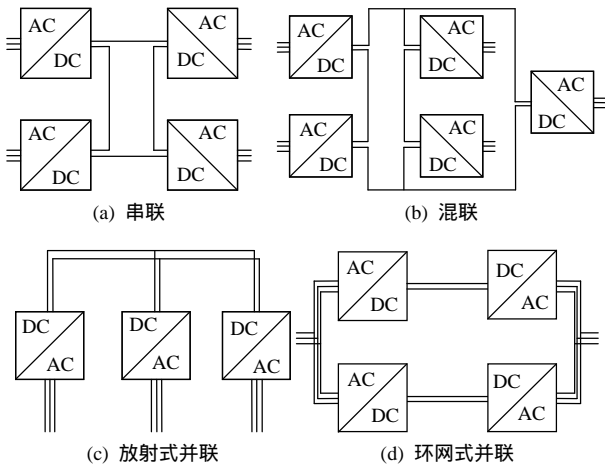


图 1 多端直流输电的连接方式示意图

Fig. 1 Connection diagram of multi-terminal HVDC

并联式的换流站之间以同等级直流电压运行，功率分配通过改变各换流站的电流来实现；串联式的换流站之间以同等级直流电流运行，功率分配通过改变直流电压来实现；既有并联又有串联的混合式则增加了多端直流接线方式的灵活性。与串联式相比，并联式具有更小的线路损耗，更大的调节范围，更易实现的绝缘配合，更灵活的扩建方式以及突出的经济性，因此目前已运行的多端直流输电工程，均采用并联式接线方式。

多端直流输电的基本原理在上世纪 60 年代中期就被提出，但迄今仅有 5 个真正意义上的多端常规直流输电工程，如表 4 所示<sup>[17]</sup>。其中前 3 项工程均已按多端直流方式运行；而加拿大的纳尔逊河以及美国的太平洋联络线直流输电工程也具有了 4 端直流输电系统的特性。

由于多端直流系统的控制保护技术复杂、高压直流断路器制造困难以及潮流翻转需要改变电压极性等因素，导致目前投运的常规直流输电工程中

表 4 在运多端直流输电工程概况

Tab. 4 General situation of operating MTDC transmission projects in the world

序号	多端直流输电工程	投运时间/年度	端数	运行电压/kV	额定功率/MW
1	意大利—科西嘉—撒丁岛	1987	3	200	200
2	加拿大魁北克—新英格兰	1992	5	±500	2 250
3	日本新信浓	2000	3	10.6	153
4	加拿大纳尔逊河	1985	4	±500	3 800
5	美国太平洋联络线	1989	4	±500	3 100

绝大多数为两端直流输电系统。

由于 VSC-HVDC 技术具有潮流翻转时不改变电压极性的特点，因此更适用于构成多端直流系统。随着可关断器件、直流电缆制造水平的不断提高，VSC-HVDC 将在高压大容量电能输送方面成为多端直流输电及直流电网中最主要的输电方式。表 5 为在建多端柔性直流输电工程概况。

表 5 在建多端柔性直流输电工程概况

Tab. 5 General situation of operating MT VSC-HVDC transmission projects in the world

序号	多端直流输电工程	投运时间/年度	端数	运行电压/kV	额定功率/MW
1	Super Station(美国)	2015	3	±345	750
2	South-West Southern(瑞典—挪威)	2016	3	±300	2×700
3	南澳风电场(中国)	2014	4	±160	200
4	舟山(中国)	2014	5	±200	1 000

此外，美国正在规划建设一项多端混合直流输电工程——GBX 多端直流工程，如图 2 所示。

工程输送距离为 750 km，总容量为 3 500 MW，电压等级为±600 kV；两端 LCC 换流站，中间落点为 ±345 kV VSC 换流站；工程旨在将美国西南电力联营的可再生能源传输至中西部区域电力市场和

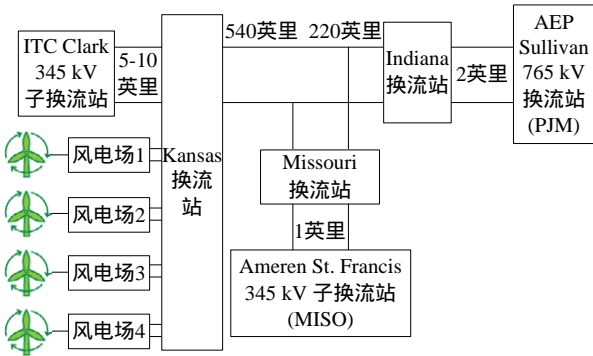


图 2 GBX 混合多端直流拓扑示意图

Fig. 2 Topology diagram of GBX hybrid HVDC

PJM 公司的电力市场。

## 4 直流电网技术及其挑战

### 4.1 直流电网概念

多端直流系统今后发展的可能的拓扑结构如图 3(a)所示,这是多端高压直流输电系统的最简单实现形式,从交流系统引出多个换流站,通过多组点对点直流连接不同的交流系统,多端直流没有网格,没有冗余;由于它不能提供冗余,所以很难被称为网络。当拓扑中任何一个换流站或线路发生故障,则整条线路及连接在这条线路的两侧换流站将全部退出运行,可靠性较低。

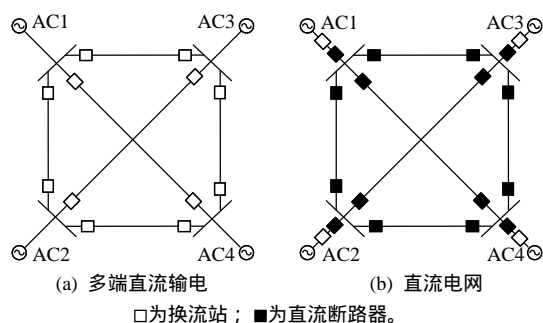


图3 多端直流输电的拓扑结构图

Fig. 3 Structure diagram of multi-terminal HVDC

如果将直流传输线在直流侧互连接起来,形成“一点对多点”和“多点对一点”的形式,即可组成真正的直流电网,如图 3(b)所示,每个交流系统通过一个换流站与直流电网连接,换流站之间有多条直流线路通过直流断路器连接,当发生故障时,可通过断路器进行选择切除线路或换流站。真正的直流电网具有如下特点:1) 换流站的数量可以大大减少,只需要在每个与交流电网连接点设置一处,这不仅能显著降低建设成本,而且能够降低整体的传输损耗;2) 每个换流站可以单独地传输(发送或接收)功率,并且可以在不影响其他换流站传送状态的情况下将自己的传输状态由发送/接收变为接收/发送;3) 拥有更多的冗余,即使一条线路停运,依然可以利用其他线路保证送电可靠。

直流电网将是一个具有先进的能源管理系统的智能、稳定的交直流混合广域传输网络,在这个网络中不同的客户端、现有的输电网络、微电网和不同的电源都可以得到有效地管理、优化、监控、控制和对任何电力问题进行及时的响应。它能够整合多个电源,并以最小的损耗和最大的效率在数千 km 的范围内对电能进行传输和分配<sup>[18]</sup>。

### 4.2 直流电网发展的 3 个阶段

直流电网是在点对点直流输电和多端直流输电基础上发展起来的,用图 4 所示的 3 个示意图详细解释直流电网的发展阶段<sup>[19]</sup>。

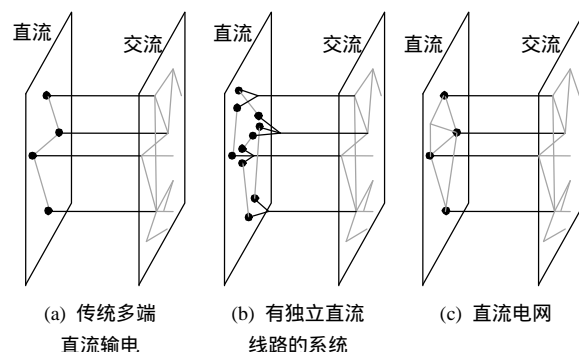


图4 直流电网发展阶段示意图

Fig. 4 Diagram of DC grid's stage of development

第 1 阶段如图 4(a)所示,是一个简单的多端系统,可以描述为带若干分支的直流母线。作为最简单的多端直流输电系统,其本身没有网格结构和冗余,并不是一个真正意义上的“电网”,因为该阶段拓扑里没有冗余。这种拓扑结构通常是作为交流的备用,或连接 2 个非同步的交流系统。

第 2 阶段的拓扑结构如图 4(b)所示,已经初步具备直流输电网络雏形,其中所有的母线均为交流母线,传统的输电线路为连接在 2 个换流站之间的直流线路所取代。在此拓扑中,所有的直流线路完全可控。可能包含了 VSC 和 LCC 两种输电方式,不同直流线路可能工作在不同的电压等级下,需要更加复杂的潮流控制来维持频率稳定。该阶段最主要的问题是大量的换流站。正常的大电网,按照惯例支路的数量一般是节点数量的 1.5 倍,这就要求换流站数量为  $2 \times 1.5 \times$  直流节点。若使用第 3 种拓扑结构,则换流站数量与直流节点数相同。这一点很重要,因为换流站在直流电网中是最昂贵的、最灵敏的、损耗最多的部件。

第 3 阶段拓扑结构如图 4(c)所示,此时的拓扑是一个独立的网络,与阶段 2 相比,并不是每条直流线路的两端都有换流站,只是通过换流站将直流电网与交流电网融合在一起。在独立的直流电网中,各条直流线路可以自由连接,可以互相作为冗余使用,而不是仅仅作为异步交流电网的连接设备。此外,阶段 3 可以大大减少换流站的数量,经济意义重大。所以作为真正的直流电网,图 4(c)的拓扑是未来的发展趋势。

### 4.3 直流电网技术的挑战

虽然目前点对点直流输电技术及工程均已相

对成熟,但构建未来直流电网面临许多挑战,本文认为还需重点从以下几个方面进行突破。

### 1) 直流电网仿真技术。

直流电网的仿真同样包括离线仿真技术和实时仿真技术 2 种。离线仿真技术是在计算机上为直流电网建立数学模型,通过数学方法求解,以进行仿真研究。对直流电网进行离线仿真,首先要建立电网的数学模型,由于直流电网与交流电网在拓扑结构、运行原理上存在本质的区别,因此用于直流电网仿真的数学模型必须重新建立。此外,直流电网中的惯性环节较少,因此直流电网的响应时间常数较之交流电网要小至少 2 个数量级,系统仿真主要为电磁暂态仿真,仿真步长较小,对资源要求较高。目前的离线仿真系统无法满足直流电网仿真的需求。

全数字实时仿真是国际上仿真研究的发展趋势<sup>[18]</sup>,但由于直流电网拓扑结构相对复杂,其潮流分布与协调控制也更加复杂,对直流电网进行系统仿真,特别是直流换相特性和控制保护系统的准确模拟,对仿真技术的节点要求较高;因此,对于包含 IGBT、晶闸管等大功率电力电子器件在内的直流电网进行快速电磁暂态过程的模拟,目前的数字仿真的精度无法满足直流电网系统仿真的要求。为此,无论是对于直流电网的离线仿真还是实时仿真,都需要在提高仿真平台资源的基础上,重新研究适用于直流电网的仿真建模方法。

### 2) 直流电网控制技术。

正如电网频率是交流系统中有功功率平衡的重要指标一样,直流网络中的功率平衡指标便是直流电压<sup>[20]</sup>。当直流网络功率过剩时,直流电压便会升高;反之,直流电压便会下降。如图 5 所示,对于直流电网, C 和 T 代表 VSC 中的电容器和开关器件, L 是电网中的负载,  $U_{DC}$  是换流器电压。  $P_1$ 、 $P_2$  是换流器的输入和输出功率,同样如果二者不平

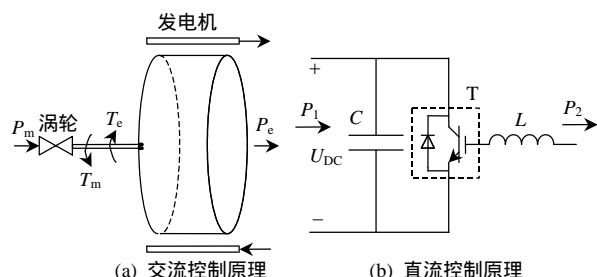


图 5 交直流电网控制特性对比示意图

Fig. 5 Comparison diagram of AC and DC power grid control features

衡,  $P_1 > P_2$ , 则  $U_{DC}$  升高;  $P_1 < P_2$ , 则  $U_{DC}$  降低。

在直流电网中,控制整个网络的直流电压保持稳定是系统正常运行的前提。随着直流电网控制对象的改变,其运行控制方法与传统交流系统存在本质的差别;同时,如前所述,由于直流电网的响应时间常数较之交流电网要小至少 2 个数量级,这对直流电网的控制系统将是个极其严酷的挑战。

### 3) 直流电网保护技术。

由于直流电网对于保护系统的响应时间要求很高,因此传统的交流系统保护,如过电流保护、距离保护和差动保护等,均不适宜直接应用于直流电网。例如,过电流保护是当电流超过一定的临界值时执行相应保护动作(如令断路器跳闸)的一种措施保护,它简单而没有选择性。由于与交流系统相比,直流电网中复杂的阻抗测量具有根本不同的特性,尤其是故障电阻的影响;因此传统的距离保护不再适合作直流电网的故障保护。对于差动保护,如果直流母线附近发生故障,那么该线路另一侧的故障在一定的延迟之后才会被测量到(在更长的线路上可能需要几 ms),远远无法满足直流电网快速保护的需求。因此需要根据直流电网运行特性,研究新型的适用于直流电网的保护原理和保护方法。

另外,在直流电网保护策略方面,电网规模、换流器拓扑结构以及断路器的配置等,都会对协调保护策略产生影响,可以采用如图 6 所示方法对直流电网中的换流器和直流母线进行选择保护。

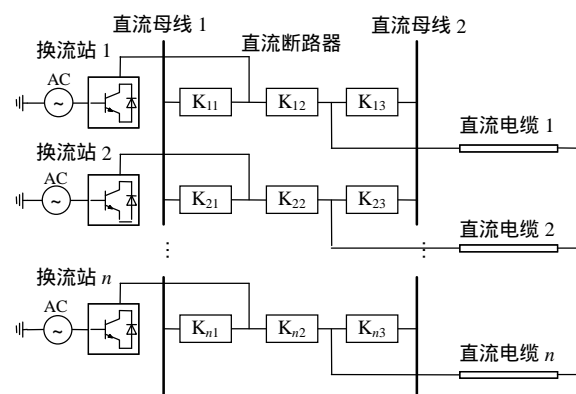


图 6 一种可以进行选择性保护的电网拓扑图

Fig. 6 Topology diagram of a selective protection grid

图中:  $K_{11}$ 、 $K_{12}$ — $K_{n3}$  是直流断路器,角标第 1 个数字代表断路器回路所属换流站的编号,第 2 个数字代表断路器的位置,1 代表临近直流母线 1,3 代表临近直流母线 2,2 代表位于二者中间。

当直流母线 1 和直流母线 2 发生故障时,可以选择性断开第 2 个角标是 1 和 3 的断路器;如果直



流电缆发生故障,则断开第2个角标是2和3的断路器;当换流站发生故障时,连接该换流站的第2个角标是1和2的断路器同时断开。在这种拓扑中,可以充分提高换流站和母线的工作效率,同时在电网中某个环节发生故障时,不影响电网其他非故障环节的正常运行。

#### 4) 直流电网广域测量及故障检测技术。

应用于交流电网的广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)是由基于全球定位系统(global positioning system, GPS)的同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)群及其通信系统组成的,可以动态地测量和计算电力系统的运行状态相量和发电机功角,同时还广泛地应用在电力系统稳态及动态分析与控制的许多领域。与之类似,直流电网大范围的统一协调控制和保护、状态估计、电压稳定性分析、故障检测和处理等方面都需要采用适用于直流系统的广域测量技术。但由于直流电网中电压和电流不存在上升沿的过零点和下降沿的过零点,因此交流电网的PMU及其算法等都无法应用在直流电网中。

同样是由于直流电网的响应时间问题,直流电网的故障检测技术需要在传统检测技术上,缩短检测时间,提高响应速度。其中部分关键设备的故障检测需要一改传统技术“故障信息采集—故障信息上报—故障信息处理—下发故障处理命令—故障处理”的步骤,采用就地故障信息处理和故障处理的功能,而这些都需要建立在快速、准确的故障检测技术的基础之上。

#### 5) 直流电网安全可靠评估技术。

为防止直流电网发生重大事故引起大面积停电造成经济损失,直流电网与交流系统同样在规划、设计和运行3个阶段面临着安全可靠评估的问题。目前交流发输电系统和LCC-HVDC本身的可靠性评估的研究相对成熟<sup>[21-22]</sup>,但对于VSC-HVDC和包含不同输电方式及直流电网关键设备在内的直流电网的可靠性评估技术尚在起步阶段。

VSC-HVDC元件多,控制系统复杂、故障耐受能力较差,在对其进行可靠性评估时,不但要重新建立评估模型和评估方法,可靠性指标同时要做较大的调整。另一方面,目前直流电网的关键设备,如直流断路器、DC/DC变压器等,尚无工业产品,设备的评估模型、评估方法及可靠性指标均需重新制定。

#### 6) 直流电网标准化。

与交流系统一样,直流电网的运行同样也需要大量的标准;同时,一旦形成网络,直流电网的运行标准与传统点对点的直流输电标准存在较大的差异,如表6所示。

表6 直流电网与点对点直流输电的标准差异

Tab. 6 Differences between the DC grid with point-to-point DC transmission standards

序号	类别	点对点	直流电网
1	功率	需要	需要
2	电压	不需要	需要
3	电流	不需要	不需要
4	交流电网短路容量	需要	需要
5	功率控制	不需要	需要
6	直流架空线/电缆故障保护时间	不需要	需要
7	直流断路器动作时间	不需要	需要
8	直流断路器开断电流	不需要	需要
9	通讯规约及信号	需要	需要

最迫切需要制定的是电压等级的标准。与交流系统一样,多标准电压等级需要定义。一旦一个电压等级选定,整个系统都按照此电压设定。

其次是能够接入直流系统中的设备标准化,包括直流断路器、DC/DC变压器等,同时还包括换流器的标准化,因为目前换流器的制造厂商很多,不同的制造商之间的换流器必须能够连接并可靠运行,同时各厂商换流器独立的控制功能不能消极地影响彼此,甚至应该以一种积极的方式联合运行。如果不同的换流器控制速度明显不同,则换流器在系统故障时的运行特性可能会对系统的运行产生严重的影响,因此换流器的独立控制级传输协议、通讯规约等必须遵照某些标准。

#### 7) 直流电网关键设备研制。

主要包括高压直流断路器、大容量DC/DC变压器和高压直流电缆等。

##### 高压直流断路器。

与直流转换开关只能开断正常运行电流不同的是,直流断路器具有故障电流的切断能力。目前常用的高压直流断路器共有3种电流开断方式,分别是基于常规开关的机械式断路器、基于纯电力电子器件的固态断路器和基于二者结合的混合式断路器。目前的机械式高压直流断路器,能够在数十ms内切断短路电流,这种故障电流的切断速度尚不能满足直流电网的要求。固态断路器可以很容易地克服开断速度的限制,但在稳态运行时会产生大量损耗。混合式断路器兼具机械断路器良好的静态特性以及固态断路器无弧快速分断的动态特性,

具有运行损耗低、分断时间短、使用寿命长、可靠性高和稳定性好等优点,但对于快速开关的制造要求很高。

除了上述直接开断短路电流的方式之外,还可以考虑增加限流器配合断路器开关电流的方式,因为对于需要熄弧的机械开关,电流越大,熄弧越困难;而对于无需熄弧的电力电子器件,关断大电流会引起器件的动态过压,电流幅值越大,过压越高。因此在回路中增加限制短路电流峰值的环节,正常运行时保持低阻态,在发生故障时电阻增加,将短路电流限制在某一较低的值,再将较低的电流开断,这就大大降低了开断电流部分的制造难度,同时可以提高开断容量。

此外在研发过程中,断路器或其独立的组成部分必须接受功能测试,而对于高压直流断路器,直接进行试验是不现实的,必须采用合成试验的方法。但另一方面,与交流断路器相比,直流断路器与系统有着强烈的相互作用,断路器的试验应力必须能够真实反映实际的功率水平。传统开关的试验方法和试验回路并不适用于直流断路器的整机型式试验,因此适用于高压直流断路器的等效试验方法和新型合成试验回路也是直流断路器研究的方向之一。

目前大型跨国公司(如 ABB 和阿尔斯通等)均已开展相关的研究,预计在 2012 年年底分别完成 320 kV/2.6 kA/16 kA(电压等级/正常运行电流/最大开断电流,下同)和 120 kV/1.5 kA/7.5 kA 高压直流断路器样机的研制。

#### DC/DC 变压器。

由于目前直流电网尚无统一的电压标准,因此各种电压等级的直流线路很多,如果将这些不同电压等级的直流电路连接起来形成网络,并充分提高直流电网的运行灵活性,DC/DC 变压器是必不可少的设备。DC/DC 变压器到目前为止并没有在直流输电领域应用,但在未来的直流电网中将会有很多的应用。在理想情况下,DC/DC 变压器需要实现以下功能:变比较高、可控,变比呈阶梯型,用以连接不同电压等级的直流系统;可连接不同类型的换流器;直流系统极间功率平衡;潮流方向双向可控;低损耗、低造价、体积小;具有一定的故障电流耐受能力。

目前大容量 DC/DC 变压器的研究处于电路拓扑、仿真计算、原理样机阶段,尚无工业样机的报道;采用的变压技术主要有 2 种,分别是高频变压

器和电力电子器件变压器。ABB 公司分别基于晶闸管和 IGBT 研制了 DC/DC 变压器的原理样机,最大参数分别为 4/80 kV-5 MW(输入电压/输出电压-容量等级,下同)和 2/40 kV-3 MW。

#### 直流电缆。

高压直流电缆作为直流输电中重要的传输介质,是限制高压直流输电输送容量提升的另一个瓶颈。交流电缆绝缘层中的电场分布与介电常数成反比分配,并且介电常数受温度的影响较小,绝缘中也不会产生空间电荷;然而对于直流电缆,电场分布与材料的电阻率成正比分配,并且绝缘电阻率一般随温度呈指数变化,将在电缆的绝缘中形成空间电荷,从而影响电场分布,聚合物绝缘有大量的局部态,空间电荷效应比较严重,因此,可以减少和消除绝缘材料中的空间电荷是研制直流电缆的关键。此外对于常规直流输电而言,改变潮流方向需要改变电压极性,此时的极性叠加会使直流电缆上的电压高达 2.5 倍输送电压,极易击穿电缆。

目前工业用最高电压等级为 $\pm 320$  kV; $\pm 500$  kV 的高压电缆正在进行相关试验。可以预见,未来 5 年,绕包式和挤压式直流电缆的电压和容量等级将分别提升至 600 kV/2.4 GW 和 600 kV/2 GW;而在未来 10 年左右的时间,直流电缆的电压和容量等级将会达到 750 kV/3 GW。直流电网的市场需求将是直流电缆技术发展的原动力。

## 5 结论

1) 特高压交直流输电技术是解决中国远距离大容量电能输送问题的有效手段,但对于解决中国区域性新能源并网和消纳问题,多端直流输电和直流电网技术将是有效的技术手段。

2) 多端直流输电是直流电网发展的一个阶段,能够实现多电源供电和多落点受电。将直流传输线在直流侧互相连接起来,即可组成真正的直流电网。其具有换流站数量大大减少、换流站可以单独传输功率、可灵活切换传输状态和高可靠性的优势。

3) VSC-HVDC 存在潮流翻转时电压极性不改变的技术优势,因此随着可关断器件、直流电缆制造水平的不断提高,VSC-HVDC 将在高压大容量电能输送方面成为直流电网中最主要的输电方式。

4) 构建未来直流电网需要解决的关键技术问题包括系统仿真、控制和保护技术、快速故障检测技术、安全可靠评估方法、标准化和包括高压直流断路器及 DC/DC 变压器等在内的关键设备研



制等。

5) 直流电网关键技术与交流电网的相应技术存在一定的共同之处,但二者存在本质上的差别。这主要是由于直流电网中的惯性环节较少,其响应时间常数较之交流电网要小至少2个数量级。这些关键技术无法参照和沿用交流电网的相关技术,需重新研究。

6) 未来的10年左右将是直流电网技术和建设快速发展的阶段,最终强交强直的互联电网将成为中国电网架构的基本形态。

## 参考文献

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司促进清洁能源发展综合研究报告[R]. 北京: 国家电网公司, 2009.  
State Grid Corporation of China. Comprehensive report to promote clean energy development of State Grid Corporation of China[R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2009(in Chinese).
- [2] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.  
Wen Jialiang, Wu Rui, Peng Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12(in Chinese).
- [3] 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(in Chinese).
- [4] CIGRE B4-52 Working Group. HVDC grid feasibility study[R]. Melbourne: International Council on Large Electric Systems, 2011.
- [5] Vrana T K, Torres-Olguin R E, Liu B, et al. The North Sea Super Grid: a technical perspective[C]//IET 9th International Conference on Digital Object Identifier. Glasgow: IET, 2010: 1-5.
- [6] Dragan J, Dirk V H, Kerstin L, et al. Feasibility of DC transmission networks[C]//Innovative Smart Grid Technologies. ISGT, Manchester: IEEE, 2011: 1-8.
- [7] Henry S, Denis A M, Panciatici P. Feasibility study of off-shore HVDC grids[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis: IEEE PES, 2010: 1-5.
- [8] Feltes J W, Gemmell B D, Retzmann D. From smart grid to super grid: solutions with HVDC and FACTS for grid access of renewable energy sources[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Michigan: IEEE PES, 2011: 1-6.
- [9] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑(2008年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 221-234.  
Liu Zhenya. Album of research achievements on UHVDC (2008)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 221-234(in Chinese).
- [10] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 71-79.  
Zhao WanJun. High voltage direct current transmission engineering technologies[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 71-79(in Chinese).
- [11] 张文亮, 于永清, 李光范, 等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 1-7.  
Zhang Wenliang, Yu Yongqing, Li Guangfan. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7(in Chinese).
- [12] Ahmed N, Haider A, Van Hertem D, et al. Prospects and challenges of future HVDC SuperGrids with modular multilevel converters[C]//EPE 14th European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham: IEEE, 2011: 1-10.
- [13] Trainer D R, Critchley D R, Davidson C C, et al. A new hybrid voltage-sourced converter for HVDC power transmission[C]//CIGRE Session. Paris, France: CIGRE, 2010: 1-12.
- [14] Merlin M M C, Green T C, Mitcheson P D, et al. A new hybrid multi-level voltage-source converter with DC fault blocking capability[C]//IET 9th International Conference on Digital Object Identifier. Glasgow: IET, 2010: 1-5.
- [15] Chen Xia, Sun Haishun, Yuan Xufeng, et al. Integrating wind farm to the grid using hybrid multi-terminal HVDC technology[C]//IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. Aiken: IEEE, 2010: 1-6.
- [16] Zhao Chengyong, Sun Ying. Study on control strategies to improve the stability of multi-infeed HVDC systems applying VSC-HVDC[C]//IEEE Electrical and Computer Engineering. Ottawa: IEEE, 2006: 2253-2257.
- [17] 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. Researches on UHVDC technology[J]. Power System Technology,

- 2010, 34(9): 1-6(in Chinese) .
- [18] Dastidar, Ghosh A, Quinn H. Vision 2020+: Strategies for integrating smart renewable power parks with super grid[C]//IET Renewable Power Generation. Edinburgh: IET, 2011: 1-6 .
- [19] Asplund G, Jacobson B, Berggren B, et al. Technical limitations towards a supergrid: a European prospective [C]//IEEE International Energy Conference and Exhibition. Manama: IEEE, 2010: 302-309 .
- [20] Asplund G, Jacobson B, Berggren B, et al. Continental overlay HVDC grid[C]//CIGRE Session. Paris, France: CIGRE, 2010: 1-9 .
- [21] 丁明, 张瑞华. 发输电组合系统可靠性评估的蒙特卡罗模拟[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 9-12 .  
Ding Ming, Zhang Ruihua. Monte-Carlo simulation of reliability evaluation for composite generation and transmission system[J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 9-12(in Chinese) .
- [22] 丁明, 李生虎, 吴红斌. 电力系统概率充分性和概率稳定性的综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 20-25 .  
Ding Ming, Li Shenghu, Wu Hongbin. Integrated evaluation of powersystem adequacy and stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 20-25(in Chinese) .
- 
- 
- 汤广福
- 收稿日期：2012-12-03。
- 作者简介：
- 汤广福(1966), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为灵活交流输电、高压直流输电、柔性直流输电和直流电网等技术领域的研究和开发等, gftang@sgri.sgcc.com.cn。
- (责任编辑 刘浩芳)

## Multi-terminal HVDC and DC Grid Technology

TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang

(State Grid Smart Grid Research Institute)

**KEY WORDS:** traditional high voltage direct current (HVDC); voltage sourced converter HVDC (VSC-HVDC); multi-terminal HVDC; DC grid

The multi-terminal high voltage direct current (HVDC) transmission and DC grid based on line commutated converter HVDC (LCC-HVDC) and voltage sourced converter HVDC (VSC-HVDC) technologies are considered as two effective means to resolve the problems with renewable energy integration in China.

Modern HVDC technology has overcome the bottleneck of early DC transmission and gone through three stages: mercury arc valve, thyristor valve and self-turn-off devices. Compared with AC transmission, HVDC technology has some advantages such as no power-angle stability issue, high transmission efficiency, quick and reliable adjustment, less requirement of right-of-way. LCC-HVDC is suitable for long-distance and high-capacity power transmission, while VSC-HVDC is preferred for renewable energy integration and power supply for islands. Besides, VSC-HVDC technology is proper for constructing a multi-terminal HVDC system owing to the fact that it can achieve power reversal without changing voltage polarity. Compared with multi-terminal DC systems, DC grid has such advantages as fewer converter stations, more flexible transmission adjustment, and higher reliability.

Multi-terminal DC transmission is currently in the initial stage of DC grid evolution, in which more than three converter stations are connected in series, parallel or hybrid mode and can achieve the multiple power supply. A “one-point-to-multi-point” and “multi-point-to-one-point” system will be developed by interconnecting transmission lines on the DC side, thus constituting an actual DC grid, as shown in Fig. 1 (b). Each AC system is connected to the DC grid via a converter station; converter stations are interconnected

via DC lines serially connected with circuit breakers. In the event of a fault, the lines or converter stations can be disconnected selectively by circuit breakers to prevent the cascading faults.

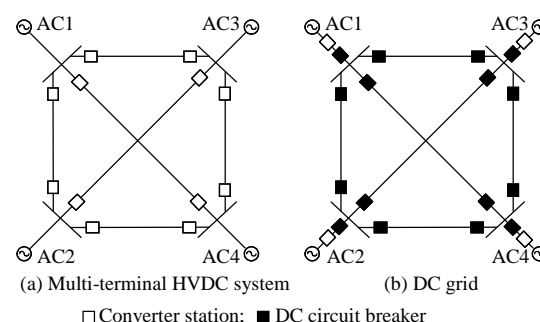


Fig. 1 Multi-terminal HVDC topology

To overcome the challenges in constructing a DC grid, many supporting technologies are needed, such as simulation technology, control technology, protection technology, wide area measurement, fault detection technology, reliability assessment techniques, DC grid standardization, and key equipment development like high voltage circuit breakers, DC/DC converters. Though there are some similarities between DC grid technology and AC grid technology, the two technologies are different in essence. DC grid has fewer inertial elements and shorter response time compared with AC grid by at least two orders of magnitude, and therefore related technologies in the AC grid cannot be used directly and need to be re-examined.

The next decade will see a rapid development of DC grid technology and construction, which will eventually help shape the backbone of China's power grid featured by strong AC and strong DC hybrid interconnection.