

世界各国海底电缆输电工程发展概述

王裕霜

(广东天广工程监理咨询有限公司, 广州 510620)

摘要: 介绍国内外电网互联海底电缆输电工程的现状,对各区跨海联网工程发展趋势,以及典型工程的海底电缆保护方式进行了归纳总结。基于海底电缆工程采用输电电压方式,提出了直流输电用于海缆工程的优点与固有缺陷,以及 VSC HVDC 应用于海缆工程的优势。

关键词: 国内外电网;海底电缆输电;跨海工程;柔性直流输电

中图分类号: TM723; TM727 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2012)04-0045-04

海底电缆输电工程在实现电网国际化、区域电网互联进程中,是跨海域联网工程建设的重要组成部分。近年来,随着国内外输变电技术的发展,在经济一体化、能源优化配置、减少环境影响等因素的推动下,跨海域输电技术、海底电缆制造技术、海底电缆工程技术不断向前发展。

海底电缆工程的建设,受地域建设条件、海洋工程条件、施工设备等条件的限制。工程建设涉及技术领域广泛,投资规模较大,施工技术复杂。工程建设期间分为两个阶段,施工前期主要有;工程设计、海缆路由选择、海缆制造及运输。工程施工期间主要有;海缆路由定位、海缆敷设、海缆保护、陆地设备安装、检测与调试、工程验收。

海底电缆输电工程的应用领域主要有:区域电网跨海域互联、向海洋孤岛及石油钻探平台供电、输送海上再生能源的发电并网。

随着国内外能源资源优化利用、提高供电可靠性、区域电量交换等趋势的影响,海底电缆工程建设,将进一步得到发展。

1 国内外海底电缆输电工程现状

1.1 欧洲地区

欧洲电网主要由欧洲大陆电网及欧洲输电联盟(UCTE)、北欧电网及北欧输电协会(NORDEL)组成。欧洲电网所覆盖的国家国土面积普遍较小,工业高度发达,用电负荷密度大,电网结构密集^[1]。因而,欧洲各国电网迫切需要实施电能结构的优化配置,以实现电源结构的互补和电量交换。

目前欧洲地区是世界上海底电缆工程建设项目发展最多、建设规模最大的区域,海缆总长度约为 10 173km,设计交换容量约为 22 430MW。

1.1.1 北欧地区

北欧电网由于发电量构成不均衡,例如:挪威总装机容量中,水电占 95.73%^[2],而丹麦则是以火电为主。为此,各国电网通过海底电缆工程联网,实现了能源优化配置、降低发电成本、减少备用容量目的,同时获得联网运行的经济效益。

北欧电网自 20 世纪 90 年代以来,各国家电网互联的海底电缆工程项目主要有:挪威至丹麦、丹麦至瑞典、丹麦至德国、芬兰至瑞典 1.2 期,瑞典至波兰、挪威至荷兰等。工程均采用直流电压 $\pm 400\text{kV}$ — $\pm 500\text{kV}$ 联网,海缆总长度约 2 140km,设计容量 5 670MW。海缆跨越的海域有:波罗的海、斯卡克拉克海峡、卡特加特海峡、波的尼亚湾和北海。

2008 年 9 月,费达(挪威)至伊姆斯劳(荷兰),直流 $\pm 450\text{kV}$ 海底电缆工程投入商业运行,该工程海缆跨越北海长度 580km,海缆路由最大水深 410m。

1.1.2 波罗的海沿岸地区

波罗的海沿岸地区电网,由北欧输电协会(NORDEL)成员国组成。发电量构成:水电 54%、核电 21.8%、火电 21.7%、风电 7.4%^[2]。各国已实现通过海底电缆输电进行电量交换。

海底电缆输电工程项目主要有:瑞典至德国、芬兰至爱沙尼亚 1 期和 2 期、丹麦本土至西兰岛、瑞典至立陶宛。工程均采用直流电压 $\pm 300\text{kV}$ —

收稿日期:2011-12-14

作者简介:王裕霜(1954—),男,山东武城人,广东天广工程监理咨询有限公司,高级工程师,工学学士,研究方向:电力建设。

±450kV联网,海缆总长度约为958km,设计容量2900MW。海缆跨越波罗的海、芬兰湾、大贝尔特海峡。

正在建设中的瑞典至立陶宛,海底电缆输电工程,设计输送容量700MW,采用直流电压±500kV联网,海缆跨越波罗的海长度为400km,工程将于2015年投入商业运行。

1.1.3 欧洲大陆地区

欧洲大陆电网及欧洲输电联盟(VCTE),包括24个国家和地区的29个电网运营商,供电人口约5亿。各成员国交换电量约3041亿 $\text{kw} \cdot \text{h}^{[3]}$ 。

欧洲大陆电网的海底电缆输电工程,主要由VCTE成员国之间跨海联网,并跨越北海与北欧电网互联。其中主要海底电缆工程项目有:英法连线通过8回直流电压±270kV互联、英国至荷兰、爱尔兰至英国、挪威至德国。

挪威至夏萨克森(德国)海底电缆输电工程,已完成可行性研究和设计,进入工程实质性的海缆制造阶段,工程将于2015年投入运行。挪威至斯比尔特(德国)海底电缆输电工程,采用高压直流输电技术(HVDC)联网,计划将于2017年投入运行。这两项工程设计容量均为1400MW。海缆均跨越北海600km,海缆路由最大水深410m。

1.1.4 地中海沿岸地区

欧洲大陆地中海沿岸地区,海底电缆输电工程建设项目有:意大利至法国、意大利至希腊、意大利本土至撒丁岛、西班牙本土至马略卡岛的电网互联。工程均采用直流电压±250kV—±500kV联网,设计输送容量2100MW。海缆跨越伊特鲁利亚海、亚得里亚海、巴利阿里海峡。

意大利本土至撒丁岛,为2回直流电压±500kV,采用背靠背型式互联,输送容量1000MW。海缆跨越伊特鲁利亚海,长度为420km,海缆路由最大水深1600m。

1.1.5 欧洲与北非地区

欧洲与北非电网,海缆工程建设项目有:西班牙至摩洛哥1期和2期、埃及至约旦1期、西班牙至阿尔及利亚、意大利至阿尔及利亚、意大利至突尼斯电网互联。其中:西班牙至阿尔及利亚联网工程,采用直流电压±400kV联网,其他工程均采用交流电压400kV—500kV联网。海缆跨越直布罗陀海峡、红海阿尔斯湾、地中海。

2011年投入运行的意大利至突尼斯联网工程,采用交流电压500kV,设计输送容量600MW。海缆跨越

地中海长度为200km,海缆路由最大水深670m。

1.2 海湾阿拉伯地区

海湾阿拉伯地区的电网互联,以海湾合作委员会(GCC)成员国组成。海湾合作委员会互联电网管理局(GCCIA),由7个国家电网互联。

海缆工程建设项目有:正在建设的沙特阿拉伯至埃及海底电缆输电工程1期。将于2012年投入运行,2期工程已进入实质性的海缆制造阶段,预计2015年投入运行。工程均采用直流电压±400kV—±500kV联网。设计容量1500MW。海缆跨越红海海峡。

1.3 亚洲地区

亚洲地区各国电网,由于受地理条件的限制,目前尚未形成各国之间以海底电缆输电工程互联。但是在各国本土向岛屿供电、各国电网区域互联、陆地向石油钻探平台供电,其海底电缆输电工程发展趋势较快。亚洲地区各国海底电缆工程建设项目有:日本本土北海道至本洲,韩国本土南海郡至济洲岛、菲律宾本土华特岛至吕宋岛、日本本土至四国、中国本土广东至海南、台湾陆地至澎湖列岛。

亚洲地区各国海缆工程设计输送容量为4640MW。海缆跨越津轻海峡、济洲海峡、圣贝纳迪诺海峡、纪伊海峡、琼州海峡、台湾海峡。

日本本土至四国联网工程,以4回直流电压±500kV背靠背型式联网,设计输送容量2800MW。中国广东至海南交流500kV联网工程,设计输送容量600MW。均属亚洲海底电缆输电工程首创项目。

1.4 北美地区

北美联合电网,由美国东部、西部电网和德克萨斯电网、加拿大魁北克电网组成。北美联合电网与墨西哥电网互联。美国本土东部、西部电网通过直流背靠背联网运行。美国东部电网与加拿大魁北克电网互联。

北美联合电网各区域,跨海域联网工程均为国家本土区域电网的互联。其中:1984年投入运行的加拿大本土与温哥华岛,以2回交流电压525kV联网。美国本土纽黑文至长岛、美国本土塞尔维尔至莱维顿(美国海王星工程)、美国本土圣佛郎西斯至匹兹堡。正在建设中的加拿大温哥华维多利亚岛至美国安吉利斯、加拿大蒙特利尔至美国纽约,均采用电压±230kV—±550kV联网。北美联合电网海底电缆输电工程共有14个项目分别跨越佐治亚海峡、马拉斯皮纳海峡、长岛海峡、大西洋、胡安德富卡海峡、张伯伦湖与哈德逊河。设计输送容量5762MW。海缆

长度 1 718km。其中美国海王星工程采用直流电压±500kV 联网,海缆路由最大水深 2 600m。

1.5 澳洲地区

澳洲地区海底电缆输电工程,均为国家本土区域电网互联。其中;新西兰本土南岛与北岛电网互联工程、澳大利亚本土与塔斯马尼亚岛联网工程;均采用直流电压±250kV—±400kV 联网,设计输送容量 1 600MW。海缆跨越库克海峡、巴斯海峡。

新西兰本土北岛黑瓦兹至南岛班摩尔,采用柔性直流输电技术(HVDC)联网,输送容量 500MW。

2 海底电缆输电工程发展趋势及典型工程保护方式

在各区域海底电缆输电工程中,据不完全统计;以交流电压输电方式的工程有 13 个项目,其中电压等级 500kV 及以上工程有 5 个项目。资料显示;在近年来投入运行的 500kV 交流海底电缆输电工程仅 2 个项目,其他交流输电方式工程项目,均为 20 世纪 90 年代前投运工程。以直流电压输电方式的工程有 63 项,其中;高压直流输电(HVDC)8 个项目(包括正在建设和规划项目) [4]。

海底电缆输电工程项目中,挪威至荷兰海底电缆输电工程,跨海域长度 580km。美国塞尔威尔至莱维顿海底电缆敷设于最大水深 2 600m。这些目前海缆项目之最的工程,均采用直流输电方式。显示了直流海底电缆输电工程发展的优势与倾向性。

2.1 各国海缆工程主要指标

据不完全统计;各区域国家海底电缆工程指标汇总表,见表 1。

表 1 各国海底电缆工程指标汇总表

编号	区域名称	设计容量	回路数	电压型式			海缆长度(km)
				HVDC	DC	AC	
1	欧洲	22 430	60	10	41	9	10 173
1.1	北欧	5 670	15		15		2 140
1.2	波罗的海沿岸	2 900	7		7		958
1.3	欧洲大陆	6 146	16	10	6		3 538
1.4	地中海沿岸	2 100	7		7		1 482
1.5	欧洲与北非	5 300	15		6	9	2 065
2	海湾阿拉伯	1 500	3		3		约 600
3	亚洲	4 640	11		7	4	587
4	北美	5 762	14	1	11	2	1 718
5	澳洲	1 600	7	2			530

2.2 典型工程海缆保护方式

海底电缆敷设于海床后,为抵御锚害、拖网等外力的冲击破坏,同时为了防止在海流的作用下长期疲劳运动,造成海缆机械性损伤,则必须对海缆进行稳固保护工程。海底电缆工程建设中,对海缆进行保护是重要的工程建设范围之一 [5]。

目前,世界各区域电网跨海域互联工程,海底电缆保护最常见的措施有;近岸段浅水区采用水泥砂浆袋保护。渔业活动频繁水域,水深 20 米以内采用少量铁套管保护。水深 20 米以上,采用水力机械式冲埋保护。海缆悬空段采用抛石保护。

各国典型工程海缆保护方式,见表 2。

表 2 各国典型工程海缆保护方式

工程名称	海缆长度(km)	路由最大水深(m)	保护方式		
			埋深(m)	套管(m)	抛石(km)
瑞典—波兰	250	90	1—1.5		
挪威—荷兰	580	410	1.0—3.0	中间接头部分铁套管保护	无法冲埋点抛石
瑞典—德国	250	45	5.0—7.0	3 000	2.0
英法连线	46		1.5		
英国—荷兰	260	50	1.0		
意大利—希腊	160	1000	0.6—1.0		
摩洛哥—西班牙 2 期	31.3	620	1.0—3.0	中间接头部分铁套管保护	
日本纪伊	50	70	1.0—3.0		
海南联网	31	97	0.6—1.5	1000x3	20.0
美国长岛	120	160	2.0		4.0
美国海王星	105	2 600	0.6—1.0	1 000	
澳大利亚巴斯	290	75	0.5—1.0	500	5.0

3 海底电缆输电方式的选择及倾向性

在海底电缆输电工程发展建设中,近 10 年来,随着直流输电技术的进步,选择直流电压输电方式,以实现跨海域电网互联,已逐步被各国电力建设认同。直流电压输电在跨海域电网互联工程建设中,具有明确的优势和固有的缺陷。因此,在海缆工程建设前期应做出明确的可行性分析与技术经济比较。

3.1 海底电缆直流输电工程的优势与缺陷

基于海底电缆输电工程建设,在海洋工程施工中的难度。在各国区域电网互联跨海域工程建设中,以

尽可能减少海洋施工作业量,已形成海缆工程建设的基本共识。

3.1.1 海缆直流输电方式的优势

- 1) 减少海缆工程施工量 1/3,海缆路由占用海底空间少 1/2。
- 2) 以海水做接地极回路时,节省陆地接地极投资。
- 3) 可实现隔离海域两端系统故障,避免互联电网大面积停电。
- 4) 海缆输送容量大、损耗小,海水散热快,海缆绝缘热老化损坏程度降低。

3.1.2 海缆直流输电方式固有的缺陷

- 1) 海域两端换流设备投资大,电能损耗大。
- 2) 换流站需 40%—60%无功补偿容量。
- 3) 产生谐波电流,对海底通讯设备干扰。
- 4) 单极运行时,对海底设备产生电腐蚀。

3.2 海底电缆柔性直流输电技术的应用

随着电力电子器件控制技术的突破,直流换流站 IGBT、IGCT 等原件构成电压源型换流技术、可控关断器件和脉宽调制技术(PWM)的应用。以及瞬间实现有功和无功的控制,并可向无源网络供电等柔性直流输电的优势。同时,柔性直流输电技术应用于海底电缆输电工程,克服了传统直流输电工程固有的缺陷^[6]。使得在海底电缆输电工程项目中,具备了更为广泛的应用空间和优选条件。

基于海底电缆工程,一般跨海域互联相对距离较短。从我国跨海域输电工程地域条件和必要性考虑;预计在中、短期不会出现大规模、长距离跨国电网互联的海底电缆工程建设。但是,从海洋可再生能源开

发利用的发电并网、风电分布式发电并网、向近海孤岛供电、内海异步交流电源并网、对石油钻探平台供电、海南联网 2 期工程等项目发展建设上^[6],柔性直流输电技术应用于海底电缆输电工程将会得到进一步发展。

4 结语

在世界各区域实现电网互联建设中,海底电缆输电工程跨海域联网建设的实施,使得各国在电网互联中获得能源优化配置、提高供电可靠性,减少备用容量等方面的经济效益。以直流输电技术实现跨海域电网互联,已成为世界各国海底电缆输电工程建设的主流。

随着柔性直流输电技术的发展,在进一步克服了传统直流输电所固有的缺陷同时,使得应用于海底电缆输电工程建设,在海洋可生能源开发利用以及发展智能电网技术,以实现资源大范围优势互补,具备了更为广泛的空间和优势条件。

参考文献

[1] 宋卫东. 世界跨国互联网现状与发展趋势[J]. 电力技术经济,2009 21(5): 62—64.

[2] NORDEL. Norde lAnnualreport 007[R]. Oslo. 2008; 45—49.

[3] VCTE. Vcte Annual report 2007[R]. Oslo 2007;28—43.

[4] 王裕霜. 世界各国区域电网互联海底电缆工程现状及发展趋势调研报告[R]. 海缆项目部, 2011;16—17.

[5] 王裕霜. 500kV 海底电缆浅滩套管保护工程实践与思考[J]. 南方电网技术,2011,5(2):21—24.

[6] 张东辉,冯晓东,等. 柔性直流输电应用于南方电网的研究[J]. 南方电网技术,2011,5(2):2—6.

Overview of the Development of Submarine Cable Projects of the World

WANG Yu-shuang

(Guangdong Tianguang Project Supervision and Consultation Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: The article introduces the present situation of the power grid connection of submarine cable projects home and abroad. It summarizes the development trends of cross ocean power grid connection projects in difference regions and sums up the protection method of typical submarine cable projects. Based on the way of power transmission of submarine cable project, it points out the advantages and shortcomings of the direct current applied in submarine cable projects, and the strong point that VSC HVDC used in the submarine cable projects.

Key words: power grid connection home and abroad; power transmission of submarine cable project; cross ocean project; VSC-HVDC