

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2015.04.012

多端直流输电技术专利分析

王喆

(国家知识产权局专利局 北京 100088)

摘要: 本文先简要介绍了多端直流输电技术以及国内外的发展现状,之后从专利的角度出发,分析了我国多端直流输电的专利申请数量、主要研发机构、技术研发重点等情况,最后给出发展我国多端直流输电的几点建议。

关键词: 多端直流输电,发展现状,专利分析

中图分类号: TM72

Patent Analysis of Multi-Terminal DC Transmission Technology

WANG Zhe

(Patent Office of the State Intellectual Property office, Beijing 100088, China)

Abstract: Firstly, this paper briefly introduces the multi-terminal DC transmission technology and domestic and foreign development status. Then it analyzes the patent application number, main research and development institutions, key points of technology research and development and so on from the point of view of patents. Finally, some suggestions are given for the development of the multi-terminal DC transmission technology.

Keywords: Multi-terminal DC transmission,current status,patent analysis

作者简介: 王喆(1978-),硕士,副调研员,研究方向:智能电网、继电保护、输配电, E-mail: wangzhe@sipo.gov.cn

1 引言

目前,直流输电技术已成为我国远距离、大容量输电及区域联网的重要方式,但已有的直流输电工程大都为传统的两端直流输电工程,仅能实现点对点的直流功率传送。而当多个交流系统之间需要采用直流技术互联或者多个能源基地向多个负荷中心供电时,就必须建设多条直流输电线路,这将极大提高投资成本和运行费用。多端直流(multi-terminal direct current, MTDC)输电技术作为直流输电技术未来重要的发展方向,能够实现多电源供电以及多落点受电,并且随着新能源技术和电力电子技术的发展,在大容量海上风电送出、太阳能电站接入以及分布式发电和城市供电方面,采用多端直流输电技术传输电能也是较为理想的方式。因此,随着两端直流输电技术的日臻完善,在两端直流输电系统上发展而来的多端直流输电系统受到了越来越多的关注^[1,2],多个国家开始积极探讨和研究多端直流输电技术的应用,如中国、印度以及新西兰。可以预见,多端直流输电技术必将在今后的电力传输中发挥重要作用。

为了准确了解我国多端直流输电目前的技术发展、研发重点以及专利布局等情况,本文对多端直流输电在我国的专利情况进行了分析和探讨,希望能为今后发展我国多端直流输电技术提供一些技术参考和发展建议。

2 国内外多端直流输电的发展现状

多端直流输电系统是由3个或3个以上的换流站及其连接换流站之间的高压直流线路所组成。它与交流系统有3个或3个以上的连接端口,能够实现多个电源区域向多个负荷中心供电,比采用多个两端直流输电系统更加经济。多端直流输

电系统中的换流器既可以作为整流站运行,也可以作为逆变站运行,运行方式更加灵活,能够充分发挥直流输电的经济性和灵活性^[3-7]。

根据换流阀技术的不同,多端直流输电系统可以分为基于晶闸管的传统多端高压直流(LCC-MTDC, line commuted converter based multi-terminal direct current)输电系统、基于IGBT的电压源多端高压直流(VSC-MTDC, voltage source converter based multi-terminal direct current)输电系统以及LCC与VSC混合的新型多端直流输电系统。根据拓扑结构的不同,多端直流输电系统可以分为并联型多端直流输电系统、串联型多端直流输电系统、级联型多端直流输电系统和混联型多端直流输电系统。多端直流输电系统的主要应用场合为:1)将大容量的电能由多个能源基地远距离送到多个负荷中心;2)要求禁止使用架空线路走廊的工业或城市中心;3)直流输电线路中间某部位需要分支接入电源或负荷;4)多个非同步交流电网之间利用输电技术互联。

我国能源资源与生产力呈逆向分布,大型电源基地远离负荷中心,为了能够将部分优质电源在受端负荷中心进行优化配置,以及加强电网间的互联,在我国“西电东送,全国联网”战略下,可灵活分配电力流的多端直流输电在我国必然具有广阔的应用前景。研究表明,在“十二五”末或“十三五”期间,在金沙江二期水电、呼盟火电基地建设工程,甚至在更远景规划中的西藏水电送出工程中都有多端直流输电技术的应用需求。

2.1 已运行的多端直流输电工程

目前,世界上已经投入运行的直流输电工程大部分是基于LCC的两端直流输电系统,已有的多端直流输电工程并不多。目前已运行的多端直流输电工程可具体参见(表1)。

表1 目前已运行的多端直流输电工程

序号	名称	投运时间 (年)	端数	运行电压 (kV)	额定功率 (MW)	备注
1	意大利—科西嘉—撒丁岛	1987	3	±200	200	常规多端
2	魁北克—新英格兰	1992	5	±500	2250	常规多端
3	日本新信浓	2000	3	10.6	153	常规多端
4	加拿大纳尔逊河	1985	4	±500	3800	常规多端
5	美国太平洋联络线	1989	4	±500	3100	常规多端
6	南澳	2013	4	±160	200	柔性多端
7	舟山	2014	5	±200	1000	柔性多端

2.1.1 国外已运行的多端直流输电工程

国外的多端直流输电工程主要有：意大利—科西嘉—撒丁岛3端、魁北克—新英格兰5端（目前为3端运行）、日本的新信浓背靠背3端直流系统3项多端直流输电工程，具有4端直流输电系统的特性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。

意大利—科西嘉—撒丁岛3端直流输电工程为1987年投入运行的并联型3端直流输电系统，该直流输电线路是由三段架空线路和两段海底电缆所组成，为世界上第一个正式运行的3端直流输电工程。

加拿大魁北克—新英格兰3端直流系统主要是将魁北克北部梯级水电站的廉价电力送往美国东北部的新的英格兰电网以及魁北克南部的负荷中心，是目前世界上已运行的规模最大的多端直流输电工程。

日本的新信浓背靠背3端直流系统是世界上第一个背靠背多端直流工程，实现了日本东西部不同频率电网的互联。

加拿大的纳尔逊河直流输电工程是世界上最后一个采用汞弧阀器件换流器的直流输电工程，其采用两个双极运行，为4端直流输电的运行取得了大量宝贵的经验。

美国的太平洋联络线直流输电工程是建立在太平洋沿岸的大容量、超高压、远距离的多端直流输电工程，并且为世界上第一个超高压交直流并联运行输电系统。

2.1.2 国内已运行的多端直流输电工程

我国国内也有2个多端直流输电工程已投入运行，分别为南澳柔性4端直流示范工程和舟山柔性5端直流输电工程。

南澳柔性多端直流输电示范工程是2013年底由南方电网公司建成的世界上首个柔性多端直流工程，是我国高压直流柔性输电工程自主化示范项目，其对远距离大容量输电、大规模间歇性清洁能源接入、多直流馈入、海上或偏远地区孤岛系统供电、构建直流输电网络等提供了安全高效的解决方案，并解决了风电接入中的难题，提高了风电利用率，使我国掌握了多端柔性直流输电成套设备设计、试验、调试和运行全系列的核心技术。南澳柔性多端直流输电工程首次实现多端柔性直流的整体技术集成，解决了三端采用不同技术路线的设备融合，并建成世界首套3端柔性直流输电系统实时仿真平台，实现实际控制保护装置在线闭环仿真测试。南澳柔性多端直流输电工程联合了国内柔性直流输电领域的3家顶级制造企业——荣信电力电子股份公司、南京南瑞继

保电气有限公司和西安西电电力电容器有限责任公司，解决了不同技术路线的换流阀与控制保护的接口难题，并研制了符合工程技术要求的换流阀产品。

舟山柔性 5 端直流输电工程是 2014 年 6 月投入运行的国家电网公司重大科技示范工程，其将舟山本岛、岱山岛、衢山岛、洋山岛和泗礁岛这 5 个岛屿的电力系统通过海底直流电缆互连，同时也是世界上端数最多、同级电压中容量最大、运行最复杂的海岛型供电网络。该工程的建设和运行不仅为舟山群岛新区提供强有力的电力保障，对加快海岛智能电网建设、解决风电等新能源并网、加强联网意义深远，同时也为柔性直流输电的大规模推广起到很好的示范作用，符合“高效、安全、清洁”的智能电网发展理念。

2.2 正在建设的多端直流输电工程

除上述已投运的多端直流输电工程外，印度的 NEA800 3 端直流输电工程、美国的 Tres Amigas Superstation 柔性 3 端直流工程、瑞典—挪威的 South West Link 柔性 3 端工程目前正在建设中，具体参见（表 2）。

表 2 正在建设的多端直流输电工程

序号	名称	投运时间 (年)	端数	运行电压 (kV)	额定功率 (MW)	备注
1	印度 NEA800	2015	3	±800	6000	常规多端
2	美国 Tres Amigas Superstation	2015	3	±345	750	柔性多端
3	瑞典—挪威 South West Link	2016	3	±300	2×700	柔性多端

3.1 专利申请量

截至 2015 年 6 月 30 日，在中国专利全文文本库中，以关键词“多端 2w 直流输电”进行检索，得到已公开多端直流输电专利申请共 160 件，其中，发明专利申请 137 件，实用新型专利 23 件；已授权专利为 46 件。其申请量的逐年分布情况参

印度 NEA800 输电线路将是全球首条采用 3 座换流站的特高压直流线路。整条输电线路的电压为 800 千伏，输电容量为创记录的 8000 兆瓦。该线路在全负荷运行时输送的电力可以满足 9000 万印度人口的正常电力需求。

美国的 Tres Amigas Superstation 3 端柔性直流输电工程，用以实现东部电网、西部电网、德克萨斯州电网三个主要电网的互联。投运后，将有助于改善由风能、太阳能、地热等间歇性可再生能源发电引起的供电可靠性和电压稳定问题。

瑞典—挪威的 South West Link 3 端柔性直流输电工程，用于提高挪威奥斯陆地区电网和瑞典西海岸电网之间的电力传输能力以及传输系统的灵活性，并兼顾日益增长的风电并网需要。

3 我国多端直流输电的专利分析

下面，本文将基于多端直流输电技术在我国专利申请情况，从专利申请数量、主要研发机构、技术研发重点等方面对多端直流输电技术在我国专利布局进行分析。

见（图 1）。

由图 1 可见，我国最早由 2008 年开始有多端直流输电专利的申请，随着国内南澳和舟山 2 项多端直流输电工程的展开，相关的科研探索亦大量展开，研发势头强劲，对应科研成果转化的专利申请量呈现较快的增长趋势，经由 2010 年的 3

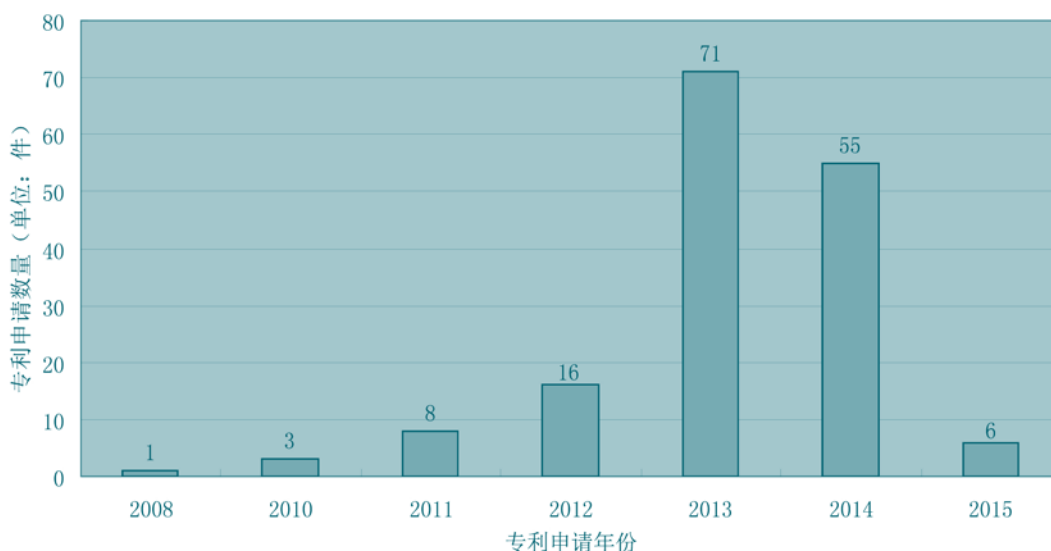


图1 我国多端直流输电专利申请量逐年分布

件、2011年的8件、2012年的16件，到2013年迅速增长为71件，南澳和舟山2项多端直流输电工程投入运行之后，2014年的专利申请量略有减少为55件，2015年为6件（由于专利申请自申请日起18个月之后才被公开，因此2014年和2015年的部分专利申请因未公开而未被统计在内）。

3.2 主要研发机构

在160件多端直流输电专利申请中，大多为国内申请人提出的申请，共151件，占专利总申

请量的94%；国外申请人只有ABB技术有限公司提出的9件申请，仅占专利总申请量的6%。此外，上述申请中，99件是由网省电力公司与研究院或高校作为申请人共同提出的申请，占专利总申请量的62%，其余为单一申请人提出的申请，占专利总申请量的38%。我国多端直流输电专利的主要申请人分布可具体参见（图2）所示。

国内申请人包括高校、研究院、国网及下属公司、南网及下属公司以及其他公司。具体而言：

（1）由高校提出的申请共49件，占专利总申请量的31%，其中清华大学11件，西安交通大

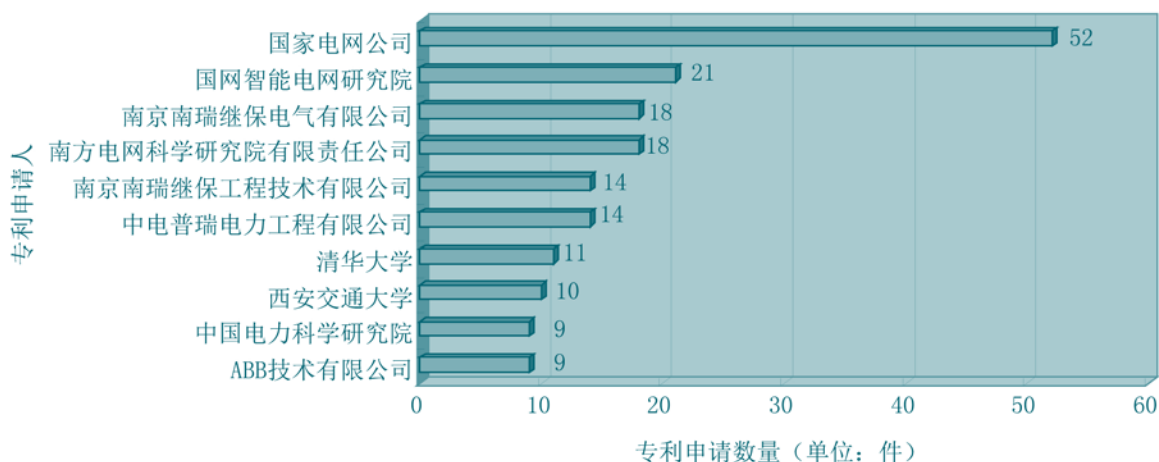


图2 我国多端直流输电专利主要申请人分布

学 10 件, 华中科技大学 6 件, 浙江大学 5 件, 其余的高校还包括沈阳工业大学、华北电力大学、上海交通大学、湖南大学、华南理工大学等。

(2) 由研究院提出的申请共 56 件, 占专利总申请量的 35%, 其中国网智能电网研究院 21 件, 中国电力科学研究院 9 件, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院 7 件, 中国科学院电工研究所 4 件, 其余的研究院还包括中国南方电网有限责任公司电网技术研究中心、国网浙江省电力科学研究院、中国南方电网有限责任公司电网技术研究中心、国网北京经济技术研究院、浙江省电力设计院、国网湖北省电力公司经济技术研究院等。

(3) 由国网及下属电力公司提出的申请共 110 件, 占专利总申请量的 69%, 其中, 国家电网公司 52 件, 南方电网科学研究院有限责任公司和南京南瑞继保电器有限公司各 18 件, 南京南瑞继保工程技术有限公司和中电普瑞电力工程有限公司各 14 件, 华北电网有限公司和国网浙江省电力公司各 8 件等。

(4) 由南网及下属电力公司提出的申请共 23 件, 占专利总申请量的 14%, 其中, 南方电网科学研究院有限责任公司 18 件。

(5) 其他公司提出的申请共 32 件, 占专利总申请量的 20%, 其中, 张家港智能电力研究院有限公司 8 件, 荣欣电力电子股份有限公司和平高集团公司各 6 件, 许继集团有限公司 5 件, 许继电气股份有限公司 4 件等。

由此可见, 在我国多端直流输电专利中, 主要研发机构还是网省电力公司、科研院校等国内申请人。借鉴国外已有的多端直流输电工程积累的运行经验, 并且结合我国的电网现状和自身特点, 作为国内南澳和舟山 2 项多端直流输电工程建设方的南网电力公司和国网电力公司联合各研究院、高校及其下属企业等, 在工程的前期规划设计和运行期间, 就多端直流输电的拓扑结构、

运行方式、关键技术等方面进行了大量的研究分析, 并且相应产生了一批我国自主研发的多端直流输电知识产权成果。

3.3 技术研发重点

虽然国内外已有多个多端直流输电工程投入使用, 并且在日常运行中积累了大量的实践经验, 但由于多端直流技术的灵活性, 其设备制造、控制保护、模型与计算等相比两端直流也相对复杂, 仍有很多关键问题尚未很好解决而有待研发^[8], 因此深入研究相关问题, 使之理论成熟继而实现工程化一直是业内学者的研究重点。

通过对多端直流输电技术专利进行国际专利分类 (IPC) 的小类进行统计分析, 发现我国多端直流输电技术的研发重点集中在国际专利分类表的 H 部和 G 部, 具体的小类分布如 (图 3) 所示, 对应的 IPC 小类含义注释可参见 (表 3)。

具体而言, 我国多端直流输电专利的技术研发重点以及申请数量主要分布如下:

(1) 控制保护技术: 控制保护技术是实现直流输电正常启动与停运、正常运行、运行参数改变与自动调节、故障处理与保护等所必不可少的组成部分, 是决定直流输电工程运行性能好坏的重要因素^[9-12]。此外, 由于多端直流控制中需协调配合、集中控制多个换流站, 因此在主控制以上的高层控制比两端直流更加复杂, 需要各站之间互相配合控制。涉及控制保护技术方面的专利共 82 件, 占专利总申请量的 51%, 主要包括多端直流输电系统的电压、电流、功率控制, 协调控制, 启停控制, 故障分析, 继电保护, 变流器控制等方面。

(2) 高压直流断路器: 在两端直流输电系统中, 正常停运和故障紧急停运均由整流站的换流阀来完成, 直流侧不需要装设直流断路器也可以灵活运行。但对于多端直流输电系统, 如果按照传统方法进行处理会导致与之相连的交流系统

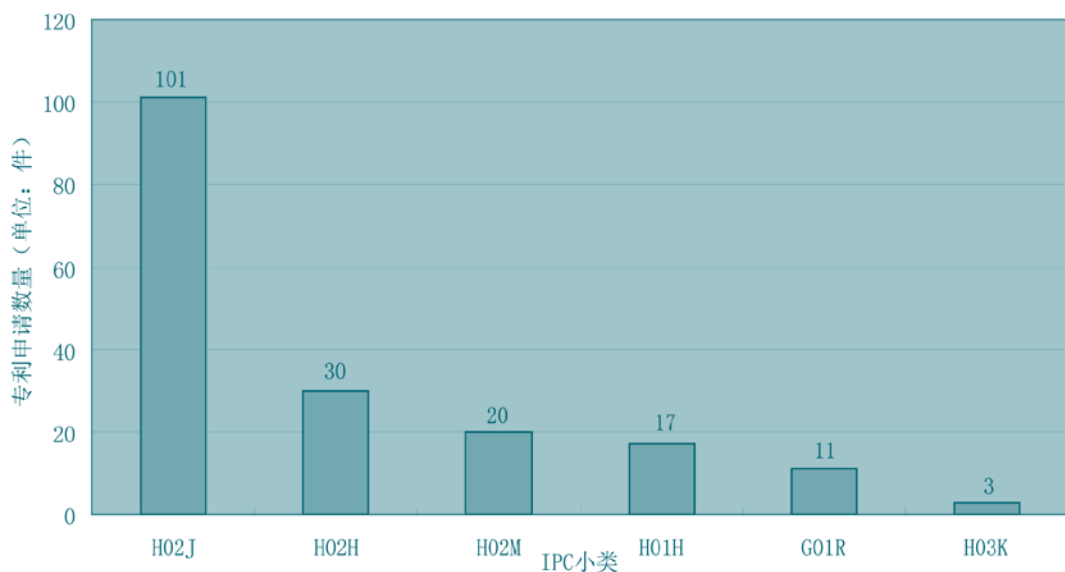


图3 我国多端直流输电专利 IPC 小类分布

表3 IPC 小类注释

序号	IPC 小类	注释
1	H02J	供电或配电的电路装置或系统; 电能存储系统
2	H02H	紧急保护电路装置
3	H02M	用于交流和交流之间、交流和直流之间、直流和直流之间的转换以及用于与电源或类似的供电系统一起使用的设备; 直流或交流输入功率至浪涌输出功率的转换; 以及他们的控制或调节
4	H01H	电开关; 继电器; 选择器; 紧急保护装置
5	G01R	测量电变量; 测量磁变量
6	H03K	脉冲技术

受到较大冲击,甚至会带来系统失稳的风险。因此有必要像交流系统一样在多端直流系统上安装高压直流断路器,以切断故障电流并使故障部分退出运行,并且不需停运整个多端直流输电系统。由于直流电流无自然过零点,需强迫过零,同时要综合考虑燃弧时间以及抑制直流断路器上产生的过电压,开断直流电流相比交流电流要困难很多,高压直流断路器是多端直流输电系统发展和应用的瓶颈,直流断路器要解决的核心问题是关断没有零点的电流。涉及高压直流断路器的专利申请为40件,占专利总申请量的25%,主要包括断路器的结构及控制方法。

(3) 系统拓扑结构设计: 多端直流输电系

统具有并联型、串联型、级联型和混联型等多种拓扑结构,不同的拓扑结构对应不同的应用场合、运行控制特性以及各自的优缺点,因此,如何根据实际情况和需求,合理设计系统拓扑结构以更好发挥其优势一直是业内关注的重点^[13]。涉及系统拓扑结构设计的专利申请为21件,占专利总申请量的13%。

(4) 仿真实验分析: 与两端直流系统的仿真试验分析类似,多端直流系统仿真试验分析中也面临着直流模型的准确性问题,特别是直流换相特性和控制保护系统的准确模拟。涉及仿真实验分析的专利申请为21件,占专利总申请量的6%。

综上所述,我国多端直流输电专利的技术研

发重点主要集中在控制保护技术和高压直流断路器,这是多端直流输电的核心技术,业内专家学者对此做了大量的研究和分析。此外,系统拓扑结构设计和仿真实验分析等方面也占有专利总申请量的19%,也是多端直流输电领域普遍关注的内容。

4 发展多端直流输电的几点建议

我国能源分布的特点决定了多端直流输电在我国具有广阔的应用前景。随着国内2项多端直流输电工程的开展,政府有关部门,网省电力公司以及电力领域的专家学者们已做了大量的准备工作和科研工作,有利促进了多端直流输电技术的发展以及工程项目的顺利运行,为多端直流输电技术在我国的发展奠定了良好的基础。与此同时,通过对我国多端直流输电专利数据的分析可知,目前我国多端直流输电技术仍处于发展上升阶段,前景十分乐观。结合目前的发展现状,给出以下几点建议:

参考文献

- [1] 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.
- [2] 袁旭峰,程时杰.多端直流输电技术及其发展[J].继电器,2006,34(19):61-67,70.
- [3] 张欢,刘天琪,李兴源,等.新型多端直流输电技术研究[J].四川电力技术,2007,30(6):1-5.
- [4] 赵晚君,谢国恩,曾南超等.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [5] 李兴源.高压直流输电系统的运行和控制[M].北京:科学技术出版社,1998.
- [6] 文劲宇,陈霞,姚美齐,等.适用于海上风电并网的混合多端直流输电技术研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(2):55-61.
- [7] 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,2013,33(10):8-17.
- [8] 屠卿瑞,徐政.多端直流系统关键技术概述[J].华东电力,2009,37(2):267-271.
- [9] 阮思烨,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.
- [10] 王伟,石新春,付超,等.海上多端直流输电系统协调控制研究[J].电网技术,2014,38(1):8-15.
- [11] 王俊生,吴林平,郑玉平.多端高压直流输电系统保护动作策略[J].电力系统自动化,2012,36(10):101-106.
- [12] 顾益磊,唐庚,黄晓明,等.含多端柔性直流输电系统的交直流电网动态特性分析[J].电力系统自动化,2013,37(15):27-34.
- [13] 张万辞.多端轻型高压直流输电模型应用[J].云南电力技术,2011,39(2):96-99.