

# 直流配电网网络架构与关键技术

马钊<sup>1</sup>, 焦在滨<sup>2</sup>, 李蕊<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192;

2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

## Network Structures and Key Technologies of DC Distribution Systems

MA Zhao<sup>1</sup>, JIAO Zaibin<sup>2</sup>, LI Rui<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** On basis of deep analysis in development trend of technologies about DC distribution system, this paper summarizes main application occasions of DC distribution technology, presents typical structures of DC distribution networks and possible patterns of grid integration, and clarifies key technologies of DC distribution system from aspects of planning, operation and control, and fault isolation. Moreover, it should be attached high importance of stimulation of technological breakthroughs in new semiconductor material technology, information science, operation pattern of DC distribution system and so on to rapid advancement of DC distribution technologies. Finally, this paper proposes several suggestions and prospects on development of DC distribution systems in China.

**KEY WORDS:** DC distribution systems; network structure; integration method; planning and operation; protection and control; power electronics

**摘要:** 在分析直流配电技术发展趋势的基础上,凝练了直流配电技术的主要应用场景,介绍了直流配电网的典型网架结构及可能的接入方式,并从规划技术、运行控制技术、故障处理技术对直流配电网发展的关键技术进行了阐述,同时指出应该高度重视新型半导体材料、信息技术以及运行模式等突破对直流配电技术发展的推动作用,并对我国直流配电网的发展提出了几点建议和展望。

**关键词:** 直流配电网;网络架构;接入方式;规划运行;保护与控制;电力电子

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1558

## 0 引言

随着国民经济水平的高速发展,尤其是大中城市的配电网层面,用电负荷快速增长,城市交流配电网的供电能力受走廊紧张等多方面因素的制约提升困难,不堪重负;用户侧分布式电源和柔性负

荷“即插即用”的需求与日俱增;同时终端用户负荷直流化趋势明显,且其对电能质量和供电可靠性要求越来越高<sup>[1]</sup>。但是,近年来电力电子技术的飞速发展,为电力系统带来了新的解决方案,从输电层面,交直流混合输电已成为我国的主要输电形态,以电压源型变流器为基础的多端柔性直流输电及直流电网技术也已在技术上取得了长足的进步并逐步在我国电网中得到应用<sup>[2]</sup>。在此背景下,直流配电技术凭借其突出的供电能力、较强的可控性和与负荷良好的兼容性,正成为国内外研究的热点<sup>[3-4]</sup>。

国外对直流配电网架构及关键技术研究开始于2004年,其雏形是由日本学者提出的基于直流微网的分布式发电系统<sup>[5]</sup>。美国弗吉尼亚理工大学提出了四级分层交直流混合配电网<sup>[6]</sup>、美国北卡罗来纳大学提出了用于接纳和管理新能源的FREEDM(The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management)交直流混合配电网<sup>[7]</sup>、英国、瑞士和意大利等欧洲学者提出了与FREEDM结构与功能类似的UNIFLEX-PM(Universal and Flexible Power Management)系统<sup>[8]</sup>。实际上,以上直流配电系统的电压等级均低于1.5 kV,其主要目的并不是向用户供电,而是从用电和终端供电的角度更好地接纳和管理可再生能源发电,发挥能源路由器的作用,并未很好地考虑配电系统特点对网络架构的具体要求。

我国学者从配电网的特征出发,对直流配电网的结构形式和电压等级序列进行了较为深入的研究工作,提出了直流配电网的基本拓扑结构<sup>[2,9-10]</sup>,包括放射状、两端供电、环状以及网状<sup>[10]</sup>等,这些结构形式与交流配电网具有很强的兼容性,且考虑

了配电系统供电可靠性的要求,有效地推动了直流配电网技术的发展。但是,目前国内对于直流配电网网络架构的研究在如何充分发挥直流配电技术可控性强的优势,如何有效规避直流开断技术不成熟等方面尚缺乏深入系统的考虑,值得进一步研究。

德国亚琛大学在其校园内建设的 10 kV 双极结构直流研究网络是真正意义上的中压直流配电系统<sup>[11-12]</sup>,其电压等级序列为 10 kV-5 kV-1 kV,包括海上风电汇集、中压直流环网及低压配电向用户供电等部分,采用点对点接线和环状接线 2 种拓扑结构,该配电网网络架构和运行经验对于我国直流配电网的建设具有重要的借鉴意义。

直流配电系统网络架构与电压等级和应用场景均密切相关。CIGRE 国际大电网会议 SC6.31《直流配电可行性研究》工作组给出的中压直流配电电压等级范围为 1.5 kV( $\pm 750$  V)~100 kV( $\pm 50$  kV),低于 1.5 kV( $\pm 750$  V)的低压直流配电网和高于 100 kV( $\pm 50$  kV)的多端高压直流配电网络均有自己的特点,且已有较为成熟的研究与应用<sup>[5-8,13]</sup>。直流配电技术的应用场景<sup>[14]</sup>主要包括:电动汽车、地铁牵引负荷及舰船大功率直流电机或变频电机直接供电;光伏、风电等可再生能源以及储能装置,特别是大规模海上风电场的电能汇集;数据中心等对电能质量要求较高的直流负荷供电;交流配电增容受限的城市中心地区负荷供电;海底、岛礁以及海上作业平台等孤立大容量负荷的供电等。

本文针对直流配电系统的形态、关键技术及其发展趋势进行探讨,重点讨论直流配电系统的网络架构,并从接入要求、故障隔离、运行稳定性等方面阐述直流配电网的关键技术,并对其发展提出建议,以期能够对我国中压直流配电网的发展有所裨益。

## 1 直流配电系统的典型拓扑及接线形式

### 1.1 直流配电系统的典型拓扑

如前所述,直流配电系统的网络架构和典型拓扑与电压等级及应用场景密切相关。对于为终端用户供电的低压直流配电网而言,其供电距离近,电压等级低,一般可采用典型的直流母线式的拓扑结构,如图 1 所示。

母线直接馈出式适用于智能家居或智能楼宇等供电范围不大,直流负荷相对集中的场景,能够实现用户分布式电源和储能装置的即插即用,能够实现配电系统能量的智能管理。此外,其结构简单,与传统的 400 V 交流配电系统具有良好的兼容性。

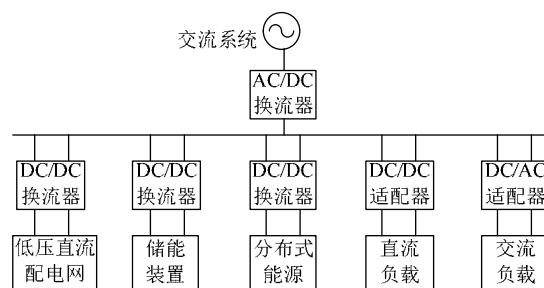


图 1 母线馈出型结构

Fig. 1 Structure of feeders connected to the bus

但其为单端电源辐射状供电网络,不适用于对于供电可靠性要求苛刻的终端用户。

对于服务大规模数据中心 IT 设备的直流配电系统,可靠性是其架构设计必须考虑的问题。可借鉴目前较为成熟的舰船直流配电系统的架构,按照高冗余性的原则,采用如图 2 所示的双电源并联供电的拓扑结构。

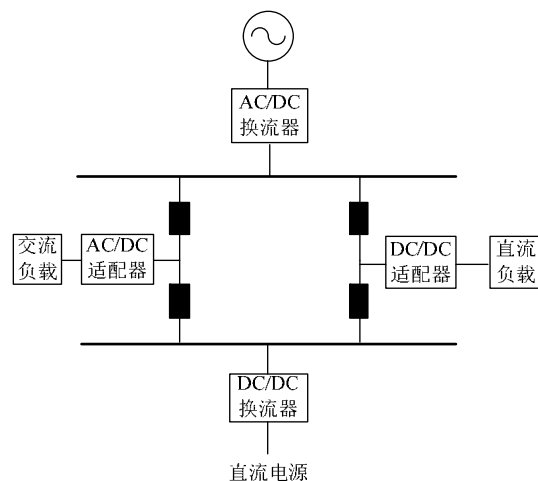


图 2 双电源并联结构

Fig. 2 Structure of two parallel-connected sources

双电源并联供电的直流配电网需冗余配置双电源、双直流母线,并需在母线上考虑配置不间断电源/储能装置和电能质量控制装置,以满足负荷对可靠性和电能质量的要求,其可靠性高,但造价较为昂贵,可以作为定制电力系统的一部分向特殊用户提供高质量电能。

电压等级在 1.5 kV 以上的直流配电系统属于中压配电,在进行网络架构设计的时候除了考虑供电可靠性和电能质量之外,尚需考虑配电线路的空间分布性以及故障隔离的范围等因素。我国部分城市的地铁牵引供电网络是典型的中压直流配电网,其特殊性仅在于用电负荷为地铁机车。图 3 为某城市地铁的直流牵引网络,其结构可以作为 1.5 kV,  $\pm 10$  kV 和  $\pm 20$  kV 电压等级配电网的典型结构。

地铁直流牵引网结构与传统交流系统的“手拉手”结构类似,中压直流配电网是典型的有源配电

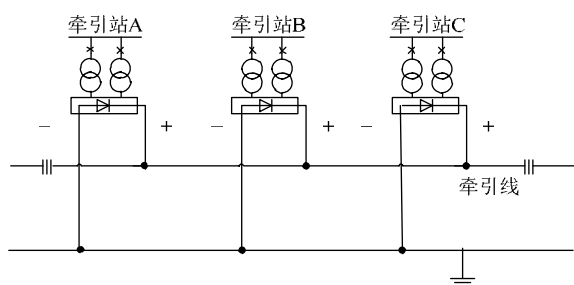


图3 地铁配电网典型结构

Fig. 3 Typical structure in metro distribution network

网，其中包含中小规模的分布式电源电站、储能装置等电源，这些电源与负荷并联于配电网主馈线上，形成多电源并联的供电结构。

值得一提的是，交流“手拉手”配电系统往往采用“开环”运行的方式来限制短路电流和无功环流。对于地铁直流牵引供电系统，由于变流器控制器具有“限幅”环节，能够有效地限制短路时向故障点注入的故障电流，且直流系统中没有无功环流的问题，其可以采用“合环”运行的方式，但需要考虑可靠性及故障处理等实际问题。

直流中压“手拉手”配电系统和直流中压辐射状配电系统可以看做是地铁直流牵引供电系统的特殊形式。当系统中仅有两个电源时，即为“手拉手”系统；当系统中仅有一个电源时，可以等效为辐射状配电网络。需要指出的是，在中压直流配电层面，不推荐采用辐射状网络，其原因在于建设中压直流配电网络的目的主要是提升供电能力和供电可靠性，辐射状网络在供电可靠性方面存在欠缺，仅在海底、岛礁和海上平台供电领域，可能存在需要辐射状网络供电的情况。

“手拉手”配电网络和辐射状网络架构如图4和图5所示。

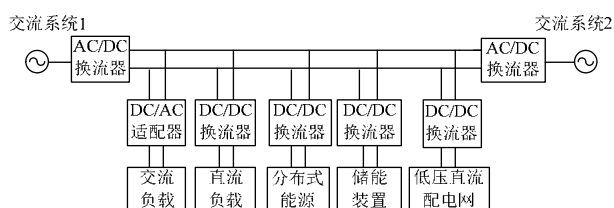


图4 手拉手结构

Fig. 4 Hand-in-hand structure

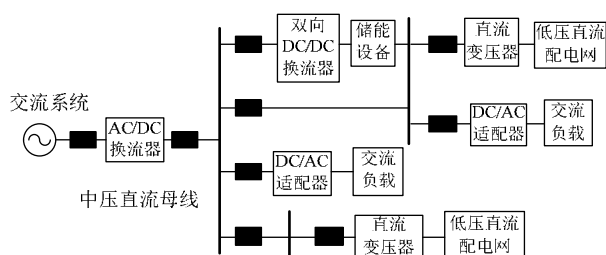


图5 辐射状结构

Fig. 5 Radial structure

直流配电网电压序列中的 $\pm 50$  kV,  $\pm 100$  kV 电压等级网络的主要功能不再是直接向终端用户提供电能，而是起到电能配送和联络的作用，灵活性和可靠性是该电压等级直流配电网面临的主要问题。

图6所示的环型配电网络是海上风电等可再生能源汇集送出的典型结构，其可作为中高压直流配电网络的典型架构形式。

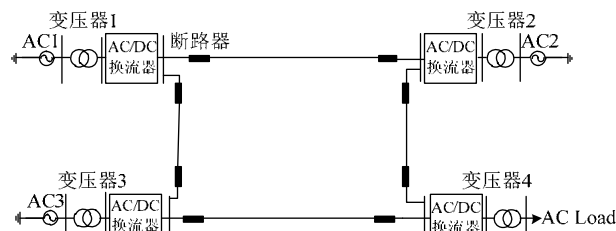


图6 环型结构

Fig. 6 Annular structure

环型配电网络的可靠性较高，适合有多个主电源点的中高压主干配电网络架，其发挥的作用与交流配电系统的110 kV网络相同，一般作为直流配电系统多层次环状结构的骨干层。

对于海底、岛礁以及海上平台等负荷集中区域的供电，也可以采用如图7所示的配电网络架构形式，称之为中心负荷型结构<sup>[15]</sup>。

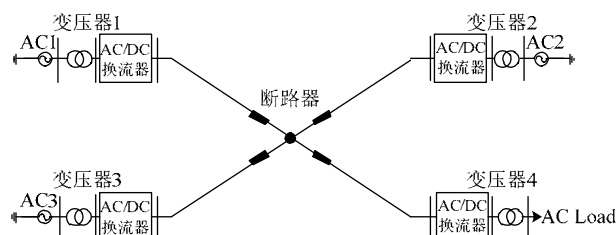


图7 中心负荷型结构

Fig. 7 Central load structure

中心负荷型直流配电网结构具有较高的可靠性，适合于重要孤立负荷的供电，在中心负荷母线上可以接入应急电源、储能装置等，保证供电的可靠性。同时，中心负荷型直流配电网结构也适用于城市负荷中心及工业园区集中负荷的供电。

配电网络的结构与其应用场景和运行电压等级密切相关，但也不是一成不变的，在进行配电网的规划设计时，可根据负荷对供电的需求等实际情况对网络结构形式进行选择。此外，由于现代直流配电网需使用电力电子器件构建的变流器，其建设费用较高，在交流系统中有所应用的“花瓣型”结构等复杂网络结构在设计应用时应慎重进行技术经济分析。

## 1.2 直流配电系统换流器接线形式

基于现代电力电子技术的能量变换技术是直流配电网的核心关键技术。虽然城市地铁中目前仍



采用传统的二极管或晶闸管整流电路<sup>[16]</sup>,但是在舰船电力系统<sup>[17]</sup>及多端直流输电网络<sup>[18]</sup>中,以 IGBT 为代表的全控器件已广泛应用。

直流输电中广泛应用的电力电子变流器可分为开关型变流器和可控电压源型变流器(VSC)。VSC 型换流器因其灵活的控制特性被广泛应用于柔性直流输电系统中,目前已知的直流配电系统中,均采用 VSC 型<sup>[19]</sup>换流器实现电能的变换。两电平、三电平拓扑结构的 VSC 型换流器存在谐波含量大、开关频率高及损耗大等缺点,制约了其中高压配电系统中的广泛应用。模块化多电平 VSC 型换流器(MMC)结构<sup>[20]</sup>具有波形质量高,损耗相对较低、对 IGBT 器件电压等级要求低、易实现冗余结构从而提高可靠性等一系列的优点,已经在多端直流输电配电系统中得到了广泛的应用。

对于 MMC 换流器而言,子模块是其基本的构成单元,目前广泛应用的子模块为半桥子模块,如图 8 所示。半桥子模块所需器件少,经济性较好,其主要的弊端在于直流侧发生故障时,其并联二极管的续流为直流故障电流提供了通路,从而导致即使 IGBT 关断,直流侧故障也不能随之被有效隔离,必须通过直流断路器实现故障隔离。

具有阻断特性的 MMC 换流器子模块拓扑结构是目前国内外研究的热点,包括全桥子模块、钳位型双子模块、混合型双子模块、二极管箝位型子模块、箝位电路型双子模块等。具有阻断特性的 MMC 换流器子模块目前并未得到广泛的应用,其主要原因在于所采用的 IGBT 器件的数量远高于半桥型子模块,经济性较差。

此外,现有柔性直流输电工程中 MMC 子模块电容的体积占子模块体积的 50%以上,质量占子模块质量的 80%以上,为子模块中体积和质量最大的器件<sup>[21]</sup>,如何有效地减少电容子模块电容的体积也是制约其在直流配电领域广泛应用的瓶颈之一。

直流配电系统换流器的接线形式可分为单极结构和双极结构,单极结构又可分为对称的单极结构(又称为“伪双极”结构)和非对称的单极结构,具体的接线形式如图 8 所示。

如图 8 所示,非对称单极结构需要利用大地或者专门架设回流线构成闭合电路,其在电力系统中应用并不广泛。但是在地铁直流牵引供电系统中,因为可以采用钢轨作为回流线而广泛应用。双极结构在故障工况下正、负极换流器可单独运行,可靠性高,但其需要分别建设正、负极换流器而使得工程造价高,在配电领域仅考虑应用于对可靠性要求

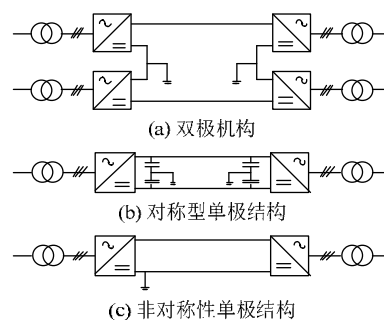


图 8 直流配电系统换流器的接线形式

Fig. 8 Connection types of DC distribution converters

较高的场合。对称的单极结构(“伪双极”结构)与单极结构在本质上是相同的,不同之处仅在于接地点位置的不同,其换流器和设备绝缘投资均较少,比较适合于大多数直流配电应用场景,但其发生故障时无法保证单极运行,可靠性较真双极结构差,限制了其在高供电可靠性需求场景下的应用。

需要指出的是,直流配电系统换流器的接线形式除了考虑其拓扑及连接方式之外,直流侧和交流侧的接地方式也会对绝缘投资和系统的可靠性产生较大的影响,在规划设计阶段需要考虑<sup>[22]</sup>。

## 2 直流配电系统的典型网络架构

直流配电系统的网络架构应遵循电力系统规划与建设的基本原则,在典型应用场景下,充分考虑负荷、电动汽车及储能装置的特点,实现多电压等级交直流配电网的灵活配置和协调发展。基于对直流配电网拓扑及换流器接线形式的梳理与讨论,本节针对不同应用场景,给出 2 种中压直流配电系统的典型网络结构形式,其中,多层次环状网络如图 9 所示,给出了不同电压等级直流配电网之间可能的连接关系及典型的应用场景,可以作为多电压等级直流配电网络的通用结构形式;中心负荷型网络如图 10 所示,其适用于对孤立重负荷地区的供电,特别适合对重要岛礁、海上工作平台的供电,也可以作为对供电可靠性有较高要求的深海海底电力系统直流供电的网络架构,此外,对于离岸海上风电场的直流汇集送出系统,中心负荷型网络也具有比较大的优势。

多层次环状配电网络包含多个不同电压等级的直流配电系统,可采用类似于交流配电网的分层结构,即在中高压直流配电层采用 $\pm 100$  kV 环网结构,便于灵活改变供电结构,提供供电的灵活性、经济型和可靠性;在中压直流配电层面采用 $\pm 20$  kV 或 $\pm 10$  kV 环网或辐射状网络结构,充分考虑负荷需求、投资等多方面因素,充分利用直流配电供电能力强、可控性高的优势,实现对传统交流配电网增

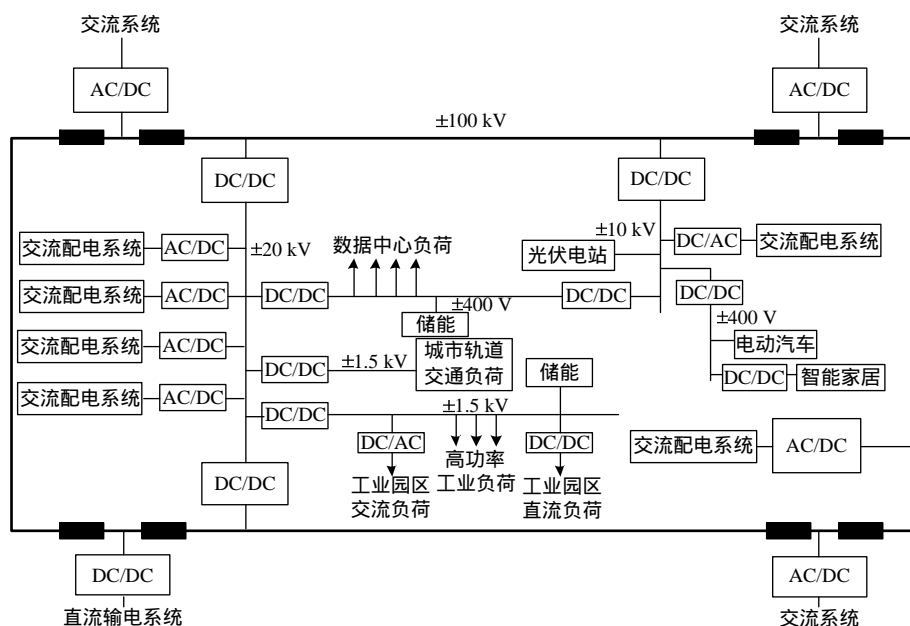


图9 多层次环状网络

Fig. 9 Multi-level annular network

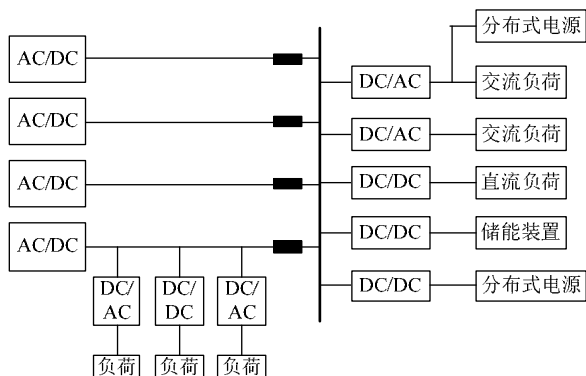


图10 中心负荷型网络

Fig. 10 Central load network

容改造困难的负荷中心的供电；在 $\pm 1.5\text{ kV}$ 的工业负荷或城市轨道交通直流配电应用中，多采用辐射状网络或者地铁配电的多电源并联结构，其电能可直接引接于中高压直流环网，也可以来源于中压直流配电网络，工业园区的交直流负荷可直接引接于 $\pm 1.5\text{ kV}$ 配电网络；对于 $\pm 400\text{ V}$ 及以下的配电系统，其可直接接入不同电压等级的中高压直流配电系统中，且可采用多路电源供电以保证供电可靠性和电能质量。

需要指出是，在进行直流配电网络架构设计的时候应特别注意技术经济分析，根据用电负荷特性合理选择电压等级，减少电压变换过程，节约换流器投资，充分利用直流配电技术的优势，实现直流配电网的安全经济运行。

中心负荷型网络架构本质上是多电源高可靠性供电系统，其适用于具有明确的负荷中心，负荷重且对供电的可靠性要求较高的场景。中心负荷型

网络可包含多个直流电压等级，各电源可通过 $\pm 100\text{ kV}$ 或 $\pm 20\text{ kV}$ 或 $\pm 10\text{ kV}$ 电压等级的配电线路向负荷中心供电，交直流负荷则通过DC/DC或者DC/AC换流器连接于负荷中心母线上。为保证负荷供电的可靠性，负荷中心母线上可配置储能装置，也可在负荷中心的配电系统中配置分布式发电装置。对于向海上作业平台、重要岛礁供电的直流配电系统，一般其配电线路直接连接于中心负荷母线，无其他负荷通过配电线路获取电能。对于向特殊保供负荷或海底电力设施供电的直流配电系统，沿途负荷可通过直流配电线路获取电能。

无论是环型配电网结构还是中心负荷型配电网结构都能够满足风电及太阳能光伏电站电能汇集送出的需求，但是中心负荷型配电网具有一定的优势，其主要表现在其仅需要在中心负荷母线处配置直流开断设备，大大减少了投资，具有良好的经济性。

### 3 直流配电系统的关键技术

直流配电系统目前尚没有成熟的运行经验，已建成的直流配电系统大多集中在终端用户层面，或面向地铁及舰船等特殊用户，其能够为直流配电形式的发展提供网络架构、直流供电设备及能量管理方面的运行经验。但是，在直流配电及交直流骨干配电网发展的过程中，在规划、运行、控制及故障隔离等领域均存在大量的关键技术需要研究攻关，分述如下。

#### 3.1 规划技术

目前，配电网规划主要考虑的因素<sup>[23]</sup>包括：供

电的安全性、供电的可靠性、运行及建设的经济性、供电能力以及不同电压等级电网的协调性等因素。在规划过程中需要进行接入点选择、网架结构的确定、并进行可靠性和潮流校验<sup>[24]</sup>。对于含分布式电源的配电网还需要考虑分布式电源的选址及定容,以及其对配电网电压、网损等运行参数的影响<sup>[25-26]</sup>。

按照目前技术发展的态势,直流配电网主要在某些典型应用场景下发挥其自身技术优势。在直流配电网的规划方面,应满足交流配电网规划领域所有的技术指标,并根据直流配电技术自身特点考虑电压等级、可靠性、接入选址、无功需求等技术问题。

在电压等级方面,CIGRE SC6.31 确定了中压直流配电电压等级序列为 1.5~100 kV 为中压配电网的电压范围,文献[14]据此提出了 $\pm 100$  kV, $\pm 50$  kV, $\pm 20$  kV, $\pm 10$  kV,1.5 kV,750 V,400 V,110 V 和 48 V 的直流配电电压等级序列,在配电网规划阶段可参考执行。该电压等级序列主要基于主要交流负荷(直流牵引负荷、通信类直流负载、数据中心直流负载等)的标称电压,并考虑与交流电压等级的协调等因素,在直流配电网电压等级的选择上还应考虑不同电压等级的供电能力及绝缘投资,并对其进行充分的技术经济比较。

在架构形式的选择上,交流配电网采用辐射状网络形式可限制短路电流和无功环流,同时在故障处理过程中可以降低继电保护系统的复杂程度以减少投资及维护费用。直流配电网络架构较为丰富,可根据不同应用场景,充分考虑可靠性及投资等因素进行选择。

在可靠性评估方面,中压交流配电网已有公认的可靠性指标体系和可靠性评估方法<sup>[27]</sup>,高压直流输电系统也有自己相对完善的可靠性评价体系<sup>[28-29]</sup>。在直流配电网的可靠性分析中应考虑交流配电网可靠性评估中关注的负荷点可靠性指标,即平均故障率,每次故障的平均停电持续时间以及年平均停电持续时间。电力电子变流器作为直流配电系统的主要设备,因此提出描述包括 MMC 变流器在内的直流能量变换设备可靠性的数学模型对于直流配电网的可靠性评估至关重要。在尚未有实际运行的直流配电网工程的情况下,可借鉴柔性直流双端输电工程及柔性多端电网的故障率等运行数据进行可靠性评估。但是需要指出的是,根据交流系统的运行经验,直流输、配电系统设备的故障率可能存在较为明显的差异,在直流配电系统实际运行后,应注意积累直流配电设备及电力电子元器件的运行数据,以便可靠性评估中使用。此外,直流配

网的可靠性评估与应用场景密切相关,对于 $\pm 50$  kV 和 $\pm 100$  kV 的中高压配电网,在可靠性评估中是否需要部分采用直流输电系统中的强迫停运率等指标,需要进行进一步的研究及讨论。

对于通过 AC/DC 变流器接入交流配电网或通过 DC/DC 变流器接入高压直流电网的直流配电网而言,由于电力电子变流器的负阻抗特性,可能会导致系统的稳定性恶化甚至不稳定的问题<sup>[30-31]</sup>,因此在直流配电网规划选址的过程中,应对电力电子变流器的稳定性问题即接入条件问题进行专题研究。

高压直流配电在进行换流站选择时通过短路比表征换流器的潜在稳定性问题<sup>[32-34]</sup>,其实质上反映的是交流换流母线的电压支撑能力。当直流配电网通过 AC/DC 接入交流配电网时,由于空间区域的限制,其多个逆变器接入的交流电网大多存在电气联系,是典型的多馈入直流系统,在进行稳定性分析时需要考虑交流配电系统的运行方式变化较多,且其系统阻抗可能较大,无功支撑能力也与超/特高压输电网络具有明显的差异,同时也需要考虑多换流器直流侧存在电气联系对潜在稳定性的影响。

### 3.2 运行控制技术

直流配电系统虽然骨干网络结构相对较为简单,但是由于在馈线上存在多个负荷接入点,存在多换流器之间相互耦合的问题,在运行过程中直流系统的振荡问题值得关注。初步的研究成果表明<sup>[35]</sup>,直流配电系统的稳定性与网络架构、变流器的控制策略与参数、电源及负荷的位置等因素密切相关。需要指出的是:在直流输电或柔性直流电网领域,直流系统的稳定性问题并不突出。直流微电网的网络架构相对较为简单,且各换流器接于同一母线或电气距离很短,分析多变流器之间的稳定性问题无需考虑变流器之间的电气距离。直流配电网,特别是中压直流配电网中 AC/DC,DC/AC 以及 DC/DC 变流器种类和数量均较多,且变流器之间存在一定的空间距离,无法忽略网络参数的影响,其稳定性问题具有自身的特点,是直流配电网运行控制的关键技术问题,值得深入研究。

目前直流系统接地方式研究的关注重点是接地方式对故障特征的影响,实际上,接地运行方式对故障隔离后健全系统恢复过程也存在直接影响<sup>[36-37]</sup>。电压源型换流器直流电容在故障工况下向故障点放电,故障隔离后,其充电过程决定了健全系统故障恢复的过程,交流侧的接地方式对该电容的充电过程具有决定性的影响,因此中压直流配电网的接地运行方式对于直流配电网供电的可靠性



和用户满意程度均有重要影响,是直流配电的关键技术问题,值得关注。

### 3.3 故障隔离技术

直流系统故障隔离技术是制约直流电网发展的关键技术问题,其包含故障检测与识别和直流开断 2 方面的问题。

直流配电网发生故障以后,故障电流快速上升,将严重危及系统中的相关电气设备,为了保证系统的安全可靠运行,必须快速切除故障。同时考虑直流电容向故障点放电后需要比较长的充电时间,多端柔性直流系统一般允许的故障隔离时间仅仅为几 ms(目前一般的要求是小于等于 3 ms),这一时间既包含继电保护的動作时间,也包含直流断路器的動作时间,考虑工程实际情况,一般情况对继电保护系统正确识别故障的时间要求为 1 ms 左右。在此情况下,单就继电保护而言,目前成功应用于交流和高压直流输电系统的保护原理在应用于多端直流系统时都面临巨大的挑战,一方面在于无论是电流/电压保护,还是电流/电压变化率保护,其都需要数据窗对电气量或电气量变化量的幅值进行甄别,实际应用中,在存在暂态过程的情况下,1 ms 的数据无法保证可靠识别电气量或电气量变化量的幅值。另一方面,基于多端数据的保护原理高度依赖于可靠的通信系统,其在保护原理构建的过程中必然考虑通信延时,一旦通信延时侵占了大量的保护動作时间,其实际应用必然受到制约。

此外,就继电保护配置而言,传统配电网中主保护+后备保护,且在很多场景下依赖后备保护的配置方案也不适用于直流配电网。一方面,远后备保护的動作时间必然超过设备动热稳定极限的要求,且较长的故障持续时间也会使得直流电容放电殆尽不利于故障隔离后健全系统的恢复。另一方面,直流故障电流无过零点,继电保护较长的動作时间也会给直流开断带来较大的困难,甚至可能造成开断失败,影响设备及系统的安全。

对于故障隔离技术而言,目前的 2 种方案分别是直流断路器方案和阻断型变流器方案,直流断路器方案中也包含限流器与直流断路器混合使用的折中方案。

在直流配用电领域,当变流器直流母线的馈出线大于 1 条时,阻断型变流器无论是应用于直流配电网与交流系统的接入点,还是应用于用户负荷接入点均不具备优势:阻断型变流器的動作必然造成交、直流系统或者配电系统与负荷的隔离,从而失去了向健全网络和负荷供电的能力。虽然在应用中

可以通过快速恢复策略等措施部分弥补这一不足,但是可以预见其应用仍然存在瓶颈。

直流断路器技术是目前直流输电领域的研究热点<sup>[38-39]</sup>,采用直流断路器进行故障隔离是直流配电网理想的故障处理方案。直流断路器技术有 3 种技术路线,包括:机械式直流断路器技术、固态直流断路器技术和混合式直流断路器技术。目前的直流断路器技术在应用于直流配电领域存在诸多困难,其主要原因在于其造价过于昂贵,体积庞大,而直流配电系统电源和负荷接入点多,在经济上不允许大量采用直流断路器实现故障隔离。此外,无论是采用人工过零技术,还是固态开断技术,其开断的暂态过程均可能与直流配电网的其他电力电子设备产生耦合,影响直流配电网的稳定运行。西安交通大学目前已经研制出 10 kV 直流断路器原理样机<sup>[40-41]</sup>,提出了基于磁感应耦合转移的新型直流开断方案,解决了直流开断中电流快速转移、电压快速建立、能量快速耗散等系列关键技术难题,在中压配电网直流开断技术方面进行了有益的尝试。

多端直流系统,无论是直流电网或直流配电网,故障识别与隔离均面临着巨大的挑战。对于直流配电网而言,故障隔离技术是制约其进一步发展的关键技术因素,迫切需要跳出传统技术条框的限制,在超高速故障识别与经济可靠故障开断等方面展开技术攻关,突破关键技术,解决直流配电系统故障隔离的难题,促进直流配电网的发展。

### 3.4 其他可能的关键技术

除此之外,就配电领域而言,以下技术可能带来直流配电技术的突破性发展。

#### 1) 半导体材料与新型电力电子器件技术。

以宽禁带材料为代表的半导体材料与新型电力电子器件技术的发展,有望支撑直流配电网中变流器的性能突破,从而解决传统变流器在体积、耐压、耐高温等方面的局限,实现高密度、小型化、长寿命、高效率的能量变化,突破电力电子变流器性能对直流配电网发展的限制。

#### 2) 直流配电网运行模式研究。

与交流配电网相比较,直流配电网的投资高、运营维护压力大,并不适于在常规交流配电领域推广应用。研究并提出满足用户差异化电能质量及供电可靠性的直流配电网运行模型,研究并提出直流配电网与用户侧储能及电动汽车协调发展的模型,探索直流配电网的盈利模式,是推动直流配电网技术发展的关键。

#### 3) 直流配电网智能运行技术。

信息技术、传感技术、数据技术与人工智能技术在电力系统中早已得到较为广泛的应用。随着我国配电技术的发展,配电领域已具备通过传感技术与数据技术实现智能运行的条件并已有初步的探索。在直流配电领域,其设备与运行模式均具有自身的特点,充分利用传感技术、数据技术与人工智能技术实现直流配电设备,及直流配电网络的优化运行,实现设备的全寿命周期管理,并与交流配电网的运行数据充分融合,实现交直流配电网的协调优化运行,对于直流配电网的发展至关重要。

#### 4 直流配电系统发展的几点建议

直流配电技术在供电能力、电能质量、可控性以及对新能源和柔性负荷的兼容性等方面均表现出突出的优势,因而引起了国内外专家、产品制造商以及终端用户的广泛关注,国际大电网会议成立了CIGRE SC 6.31工作组研究直流配电的可行性,美国、欧洲及日本均提出了相应的系统架构或建设了研究网络,直流配电技术正处于探索及试点期,技术高速发展,潜力巨大。

对于我国直流配电网的发展,提出以下几点建议,供大家参考。

1) 就技术发展阶段而言,直流配电技术目前处于论证和快速发展阶段,虽然其中某些设备关键技术和运行经验来源于柔性高压直流输电技术,但直流配电领域技术具有直流发电原理、新型直流控制保护方法、多电力电子设备并联等大量自己独特的特点,同时,还需要兼顾交流配电网需要遵循的安全、稳定、经济等原则,现阶段宜集中精力展开基础性研究工作及关键技术示范。

2) 就技术发展趋势和电网发展特征而言,在现阶段,直流配电技术暂不会取代交流配电技术,可在高可靠性及高电能质量要求供电、海岛及海上平台配电、工业园区供电以及在特殊区域增容改造等场合中发挥直流配电的优势,试点应用,交、直流配电网各自发挥优势协调发展是配电网发展的趋势。

3) 直流配电网是电力电子变流技术与配电技术结合的产物,其在协调规划、优化运行、控制保护等方面均有特殊性,涉及电力电子、电气设备制造、电力系统运行等多个领域,具有典型的学科内交叉融合的特征,建议探索合作的长效机制,通力合作,推动直流配电技术的发展。

4) 跳出传统交流技术惯性的限制,在直流配电网的运行模式,拓扑结构、协调控制,故障识别

与隔离策略等方面,充分认识直流配电网的特点,探索适用于直流配电网的运行及控制技术,大胆提出新技术,尝试新方法,并在示范工程中适度接纳新技术,建立适用于直流配电网的技术体系。

5) 开展标准工作,对于影响直流配电网发展和示范的电压等级序列,典型应用场景,拓扑与网络架构等方面的技术,尽快成立专家组或标准工作委员会,充分发挥专家的智力优势,在关键问题上尽快达成共识,形成行业标准,指导直流配电网在典型应用场景的应用。

6) 积极开展国际合作和交流,由中国倡导并推动的CIGRE SC 6.31在直流配电网可行性方面已取得重要的进展,建议相关研究人员积极参与国际学术组织的技术委员会或具体工作组,发挥我国在直流配电网领域的领先地位,借助国际资源,共同推动直流配电网技术的发展。

#### 5 结论

论文在对目前直流配电网相关技术趋势进行分析的基础上,讨论了直流配电可能的网络架构,给出了一种典型的多层次环状供电网络的概念设计,分析了直流配电网发展中必须解决的关键技术问题,并从技术、标准与国际合作等方面对我国直流配电网的发展提出了建议。

1) 直流配电网络结构的确定应充分考虑应用场景、电压等级以及用户需求等多方面的因素。对低压配用电网络,可选择母线馈出型或双电源供电结构形式;对于中压配电网络,手拉手或放射状网络是典型的结构形式;对于中高压配电网络,多端环网或中心负荷型网络形式均可满足对可靠性的要求。

2) 作为多端直流输电技术在配电领域的应用,直流配电网除需满足配电领域的所有技术需求之外,还需结合直流供配电技术中对接入条件、接地方式、换流器稳定性控制、故障识别与故障隔离等关键技术进行深入的研究。

3) 从技术发展趋势看,直流配电技术在供电能力、可控性和可靠性等方面具有优势,在大规模海上风电、用户定制电力系统以及终端负荷供电等方面均表现出竞争力和广阔的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 江道灼,郑欢.直流配电网研究现状与展望[J].电力系统自动化,2012,36(8):98-104.  
Jiang Daozhuo, Zheng Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power



- Systems, 2012, 36(8): 98-104(in Chinese).
- [2] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.  
Zhou Xiaoxin, Lu Zongxiang, Liu Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008(in Chinese).
  - [3] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.  
Ma Zhao, Zhou Xiaoxin, Shang Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298(in Chinese).
  - [4] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3014-3022.  
Ma Zhao, Zhou Xiaoxin, Shang Yuwei, et al. Exploring the concept, key technologies and development model of energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022(in Chinese).
  - [5] Youichi I, Yang Zhongqing, Hirofumi A. DC micro-grid based distribution power generation system[C]//4th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC Xi'an, China: 1740-1745.
  - [6] Boroyevich D, Cvetkovic I, Dong Dong, et al. Future Electronic Power Distribution Systems – A contemplative view[C]//12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2010, Brasov, Romania: 1369-1380.
  - [7] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management(FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
  - [8] Iov F, Blaabjerg F, Clare J, et al. UNIFLEX-PM—a key-enabling technology for future European electricity networks[J]. EPE Journal, 2009, 19(4): 6-16.
  - [9] 杜翼, 江道灼, 尹瑞, 等. 直流配电网拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 139-144.  
Du Yi, Jiang Daozhuo, Yin Rui, et al. Topological structure and control strategy of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 139-144(in Chinese).
  - [10] 孙鹏飞, 贺春光, 邵华, 等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 64-73.  
Sun Pengfei, He Chunguang, Shao Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 64-73(in Chinese).
  - [11] Stieneker M, Butz J, Rabiee S, et al. Medium-voltage DC research grid aachen[C]//Proceedings of Die Energiewende-Blueprints for the New Energy Age, International ETG Congress, Bonn, Germany, 2015: 1-7.
  - [12] De Doncker, Rik W. Design aspects of a medium-voltage direct current(MVDC)grid for a university campus[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Power Electronic and ECE Asia, Jeju, Korea, 2001: 2359-2366.
  - [13] 杨柳, 黎小林, 许树楷, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统集成设计方案[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 63-67.  
Yang Liu, Li Xiaolin, Xu Shukai, et al. The integrated system design scheme of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 63-67(in Chinese).
  - [14] 盛万兴, 李蕊, 李跃, 等. 直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3391-3403.  
Sheng Wanxing, Li Rui, Li Yue, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3391-3403 (in Chinese).
  - [15] Kontos E. Control and protection of VSC-based multi-terminal DC network[D]. Delft University of Technology, 2013.
  - [16] 周捷, 宋云翔, 徐劲松, 等. 直流牵引供电系统的微机保护测控探讨[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 57-60.  
Zhou Jie, Song Yunxiang, Xu Jinsong, et al. Discussion on measurement and control of computer based protective relaying for DC traction power supply system[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 57-60(in Chinese).
  - [17] 马伟明. 电力电子在舰船电力系统中的典型应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 1-7.  
Ma Weiming. Typical applications of power electronic in naval ship power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 1-7(in Chinese).
  - [18] 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(in Chinese).
  - [19] Flourentzou N, Agelidis V G, Demetriades G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
  - [20] Rohner S, Bernet S, Hiller M, et al. Modulation, loss, and semiconductor requirements of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2633-2642.
  - [21] 黄迪. 一种新型模块化多电平换流器子模块拓扑与控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
  - [22] 徐政. 柔性直流输电系统(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
  - [23] 肖峻, 崔艳妍, 王建民, 等. 配电网规划的综合评价指标体系与方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 36-40.  
Xiao Jun, Cui Yanyan, Wang Jianmin, et al. A hierarchical performance assessment method on the distribution network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 36-40(in Chinese).
  - [24] 孔涛, 程浩忠, 李钢, 等. 配电网规划研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 92-99.  
Kong Tao, Cheng Haozhong, Li Gang, et al. Review of power distribution network planning[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 92-99(in Chinese).
  - [25] 麻秀范, 崔焕君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.  
Ma Xiufan, Cui Huanjun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181(in Chinese).
  - [26] 盛四清, 刘梦. 主动配电系统中分布式电源和储能系统协调规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(2): 71-76.  
Sheng Siqing, Liu Meng. Coordination planning of distributed generation and energy storage system in active distribution system[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2017, 29(2): 71-76(in Chinese).
  - [27] 赵华, 王主丁, 谢开贵, 等. 中压配电网可靠性评估方法的比较研究[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3295-3302.  
Zhao Hua, Wang Zhuding, Xie Kaigui, et al. Comparative study on reliability assessment methods for medium voltage distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3295-3302(in Chinese).
  - [28] 曾庆禹. 特高压交直流输电系统可靠性分析[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2681-2688.  
Zeng Qingyu. Analysis on reliability of UHVAC and UHVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2681-2688(in Chinese).

- [29] 段满银, 张国华. 国内外直流输电系统可靠性指标对比分析[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2390-2395.  
Duan Manyin, Zhang Guohua. Contrastive analysis on reliability indices of HVDC power transmission systems home and abroad[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2390-2395(in Chinese).
- [30] 刘增, 刘进军. 带变流器负载的三相交流电源系统稳定性判据的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 143-148.  
Liu Zeng, Liu Jinjun. Stability criterion for three-phase AC power systems with converter load[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 143-148(in Chinese).
- [31] Rahimi A, Emadi A. An analytic investigation of DC/DC power electronic converters with constant power loads in vehicular power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 68(6): 2689-2702.
- [32] 辛焕海, 董伟, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.  
Xin Huanhai, Dong Wei, Yuan Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027(in Chinese).
- [33] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1-8.  
Lin Weifang, Tang Yong, Bu Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 1-8(in Chinese).
- [34] 郭小江, 郭剑波, 马世英, 等. 基于多馈入短路比的多直流落点选择方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 36-42.  
Guo Xiaojiang, Guo Jianbo, Ma Shiyong, et al. A method for multi DC terminal location selection based on multi-infeed short circuit ratio[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 36-42(in Chinese).
- [35] Grattapanche Q. Stability study of a DC distribution network[D]. 西安: 西安交通大学, 2017.
- [36] 杨杰, 郑健超, 汤广福, 等. 电压源换相高压直流输电系统接地方式设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 14-19.  
Yang Jie, Zheng Jianchao, Tang Guangfu, et al. Grounding design analysis of VSC-HVDC system[J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 30(19): 14-19(in Chinese).
- [37] 吴峻, 武迪, 朱金大, 等. 多端柔性直流配电网接地方式设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2551-2560.  
Wu Jun, Wu Di, Zhu Jinda, et al. Grounding method design of multi-terminal flexible DC distribution[J]. Proceeding of the CSEE, 2017, 37(9): 2551-2560(in Chinese).
- [38] 马钊. 直流断路器的研发现状及展望[J]. 智能电网, 2013, 1(1): 12-16.  
Ma Zhao. R&D status and prospects of HVDC circuit breakers[J]. Smart Grid, 2013, 1(1): 12-16(in Chinese).
- [39] 史宗谦, 贾申利. 高压直流断路器研究综述[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 1-9.  
Shi Zongqian, Jia Shenli. Research on high-voltage direct current circuit breaker :a review[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 1-9(in Chinese).
- [40] Wu Yifei, Rong Mingzhe, Wu Yi, et al. Investigation of DC hybrid circuit breaker based on high-speed switch and arc generator[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(2): 860.
- [41] Wu Yifei, Wu Yi, Rong Mingzhe, et al. Research on a novel two-stage direct current hybrid circuit breaker[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(8): 1333.



马钊

收稿日期: 2017-07-04.

作者简介:

马钊(1957), 男, 博士, 国家“千人计划”特聘专家, 英国特许注册电气工程师(CEng)、国际工程与技术学会会员(FIET), CIGRE 中国及亚太地区 SC6(配电与分布式发电)专委会主任, 研究方向为配电网规划与资产管理、智能配电技术与电器、能源互联网等, E-mail: mazhao@epri.sgcc.com.cn;

焦在滨(1976), 男, 副教授, 研究方向为智能电网、电力系统继电保护、直流配电网等;

李蕊(1978), 女, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统运行分析及新能源接入。

(责任编辑 王晔)