

直流配电系统示范工程现状与展望

姜淞瀚, 彭克, 徐丙垠, 张新慧, 刘盈杞
(山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:直流配电系统可以更高效、可靠地接纳分布式发电系统、储能单元、电动汽车及其他直流用电负荷,是实现碳达峰、碳中和目标的有效途径之一。总结国内外直流配电系统示范工程的现状,分析国内外示范工程的实践经验。工程案例表明,政策支持是直流配电系统快速发展的重要基础,关键技术和设备的研发是实现直流配电系统大范围推广的关键因素,直流配电系统的发展和推广有利于能源的高效利用与可再生能源的大规模消纳。结合我国目前直流配电系统的发展现状,给出我国未来直流配电系统发展的建议。

关键词:直流配电系统;分布式发电;可再生能源;示范工程

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105039

0 引言

在电力系统发展初期,直流电作为最主要的输电方式最先得到了应用,但受限于当时的科技水平,直流电存在诸多问题,例如不易变压、传输距离有限、不能形成大电网等,这导致直流系统发展缓慢,逐渐被交流系统所代替。

随着电力系统规模的不断扩大,交流系统的缺点也日益突出,例如线路损耗大、潮流控制困难、无法实现异步互联、存在功角平衡等问题。自2003年美加大停电以来,世界范围内发生了多起大范围停电事故,这是由于负荷中心电源支撑弱,无功电压支撑能力不足,导致事故范围扩大,最终引起电压崩溃,造成大面积停电。总结事故经验教训,其本质是现有配电系统与城市发展规模不匹配,负荷增长对配电系统的安全运行提出了严峻挑战。现代城市供电走廊紧张,土地价格居高不下,扩大配电系统规模的成本太高。现代城市负荷的迅速增加、电力电子设备的广泛应用和供电容量的增加会导致系统的短路电流增大,使系统运行存在安全隐患。此外,数据中心等负荷对供电可靠性和电能质量的要求越来越高,交流配电系统面临严峻挑战。

随着经济发展和环境进步,能源危机和环境污染问题受到世界各国的普遍关注。分布式发电和储能技术是缓解能源枯竭和环境污染问题最有效的手段之一,光伏、风机、燃料电池等常见的分布式发电方式,通常都是直流电或经整流后变为直流电,采用逆变器并入交流电网会在系统内产生谐波,降低系统效率,影响系统的安全运行和继电保护装置的正确动作^[1]。

随着电力电子技术的不断发展,负荷侧整体结构也发生巨大变化。在接入交流配电系统时,电动汽车、电脑、手机等负荷需要装设AC/DC装置进行供电,空调、冰箱、洗衣机等家用变频设备和储能系统ESS(Energy Storage System)也需经过AC/DC/AC装置才能实现变频以及保证供电质量和供电可靠性。用户的用电方式日益变化,电动汽车和数据中心等直流负荷的出现、电力电子设备的使用以及冲击性负荷的增长,导致交流配电系统存在大量的谐波污染,这与用户对电能质量要求日益提高的矛盾与日俱增^[2]。

相较于传统的交流配电系统,直流配电系统具有诸多优势:直流配电系统的供电容量更大,并可以通过接入ESS等提高系统的供电可靠性和故障穿越能力;直流配电系统对分布式发电装置、ESS和直流负荷等直流设备具有良好的接纳能力,且损耗更低,电磁干扰问题比较小;直流配电系统无需考虑相角和频率,可以实现异步系统互联,分布式电源并网无需经过DC/AC变换,一方面可提高电能变换效率以及减少设备损耗,另一方面可简化电器的内部电路以及降低故障率和设备成本。目前,国内外对直流高压输电系统的研究较为深入,在异步系统互联、无源系统供电等方面有诸多成功案例。直流配电技术在数据中心、舰船系统、铁路牵引、电信系统等领域已有部分应用。实际应用案例表明,直流配电系统可以有效提高电能质量,减少损耗和设备成本,能够更好地接纳分布式电源以及降低电力电子设备给系统带来的冲击,保证电网的安全运行。为此,本文对国内外直流配电系统的示范工程进行总结分析,以期为我国直流配电系统的发展提供思路。

1 国外示范工程介绍

近年来,美国、德国、丹麦、日韩等国家都逐渐开展直流配电系统的相关研究,从电压等级、应用场

收稿日期:2021-02-25;修回日期:2021-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807112)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51807112)

景、控制架构和继电保护方案等方面进行理论研究和示范验证。国外相关示范工程大多集中在直流建筑、海岛微电网、数据中心等,电压等级较低且容量较小。在配电网、微电网的基础上进一步细化,相关学者提出“纳米网”、“智能配电网分布式智能电网 DGI(Distributed Grid Intelligence)”等概念,并根据工程需要研发了直流配电系统的关键设备,例如 DC/DC 变换器、能量管理设备、ESS、故障管理装置等。具体如表 1 所示。

表 1 国外示范工程介绍

Table 1 Introduction of foreign demonstration projects

工程名称	年份	电压等级	供电容量	工程特色
美国可持续建筑工程	2007	380 V、40 V	33.5 kW	三相交错双向变换器、微电网、纳米网
美国未来可再生能源传输管理工程	2011	12 kV	1 MW	即插即用接口、智能配电网、智能能量管理、智能故障管理
德国亚琛工业大学 City of Tomorrow 工程	2011	±5 kV	15.5 MW	环网、城市配电网
丹麦博恩霍尔姆岛工程	2019	60 kV、10 kV、0.4 kV	200 kW	可重构电池、海岛微电网
日本电报电话株式会社仙台工程	2008	0.4 kV	4 MW	配电装置
韩国巨次岛工程	2017	750 V	3 MW	海岛微电网

1.1 美国可持续建筑工程

美国弗吉尼亚理工大学的电力电子系统中心 CPES (Center for Power Electronics Systems) 在 2007 年提出基于直流配电的可持续建筑方案 SBI (Sustainable Building Initiative) 研究计划。该计划采用分层式母线结构,直流配电系统设有 2 个电压等级:380 V 直流母线用于驱动空调、烘干机、电热炉等大功率负荷,48 V 直流母线则通过 DC/DC 变换器与 380 V 直流母线连接,主要为电视、电脑、LED 灯等小功率负荷供电,提高了供电的安全性^[3]。

随着研究的深入,CPES 在 2010 年将 SBI 工程拓展为 SBN(Sustainable Building and Nanogrids) 计划,在家居用电的基础上提出交直流混合供电网络,将光伏发电、风力发电、ESS、电动汽车等接入 380 V 直流母线,以实现能量管理和零排放,可以形成独立的微电网运行,具有较强的故障穿越能力,具体结构如图 1 所示,图中箭头表示潮流方向。

SBN 工程采用两级脉冲宽度调制(PWM)变换器作为能量控制中心 ECC(Energy Control Center)对直流系统进行控制,这可以显著减少直流链路电容和电压纹波,实现短路保护、直流母线电压快速调节以及软启动能力,并具有直流侧高频漏电流消除

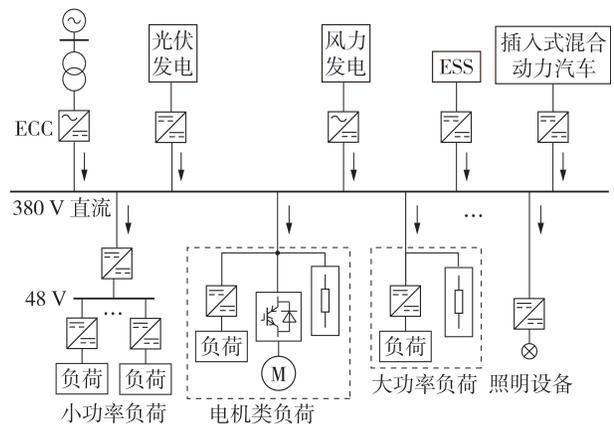


图1 SBN结构图

Fig.1 Structural diagram of SBN

功能。此外,为减少 ESS 充放电产生的开关损耗,CEPS 设计了三相交错双向 DC/DC 变换器,相比双开关 DC/DC 变换器,其可以减少开关通断和二极管反向恢复带来的损耗,损耗约降低 22.5%,并且具有较高的开关频率以及较低的输入、输出电流纹波,极大简化了滤波器的设计。针对三相交错变流器在轻负荷下效率低的问题,采用电流断续模式 DCM (Discontinuous Current Mode) 运行,与电路恒流模式 CCM (Constant Current Mode) 运行相比,DCM 可以显著降低关断损耗和导通损耗,有助于提高效率。

由于 SBN 工程提出较早,换流器、直流变压器等设备的相对不成熟,且受限于当时的配电网架构采用分层单母线结构,供电可靠性较差。但在 SBN 工程中,相关学者在配电网、微电网的基础上提出“纳米网”等概念,将直流配电系统细化、直流负荷模块化,有利于保护分区和即插即用功能的实现,对直流配电系统的控制研究和拓展有重要意义,而且这种模块化的分类方式被后续的许多工程借鉴。

1.2 美国未来可再生能源传输管理工程

2011 年,美国北卡大学站在对舰船直流配电系统进行分析与研究的基础上,提出未来可再生能源传输管理 FREEDM (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management) 系统,采用 12 kV 交流作为系统母线,实现交直流配电和即插即用功能,其系统结构图见附录中图 A1^[4],图中实线表示系统之间的电气连接,虚线表示通信网络,箭头表示信息流。

FREEDM 系统包含 3 个关键技术^[5]。

(1) 即插即用接口。系统含 1 个 400 V 直流和 1 个 120 V 交流总线接口,可以实现含分布式发电和 ESS 交直流系统的并网。

(2) 智能能量管理 IEM (Intelligent Energy Management) 装置。系统的 12 kV 母线通过 3 个 IEM 装置分别连接 69 kV 外部电网、120 V 交流系统和 400 V 直流系统,在电压转换和交直流变换的基础上实现

能量控制,并具有局部电源管理功能,例如低压交流和直流电压的调节、电网侧电压暂降穿越、负荷侧故障电流限制等。

(3)标准操作系统 DGI。该系统嵌入 IEM 设备中,利用通信网络协调系统管理与其他能源路由器。其控制系统结构见附录中图 A2。

此外, FREEDM 系统安装了智能故障管理 IFM (Intelligent Fault Management) 设备以隔离电路中的潜在故障,从而提高用户侧的故障恢复能力和电能质量。

FREEDM 系统的环状供电结构具有自身独特的优势:在保证系统供电可靠性的前提下具有良好的拓展能力,并且由于 IEM 和 IFM 设备的存在,用户侧的负荷变动对直流配电网的影响大幅降低,满足了“即插即用”的需求。此外, FREEDM 系统采用基于智能电网设备的 DGI 系统,在维持系统稳定性的前提下考虑市场状况和用户需求,实现实时电价和能量管理。FREEDM 系统的提出代表了一种新理念:可以在原有设备的基础上通过有效的能源管理措施实现分布式发电的广泛接入和环境保护。

1.3 德国亚琛工业大学 City of Tomorrow 工程

德国亚琛工业大学提出 City of Tomorrow 城市供电方案,并在亚琛工业大学内建造了 ± 5 kV 直流配电示范工程,城市配电系统采用中压直流环网供电,通过大功率 AC/DC 换流器和 DC/DC 变换器进行电能转换与传输^[6]。

中压直流配电系统由外部 20 kV 交流变电站供电,经 AC/DC 变换后为亚琛工业大学新校区的几个大功率试验台提供电能,总功率为 15.5 MW。该直流配电系统采用电缆双极环网方式供电,如图 2 所示,每台试验装置通过 DC/DC 变换器或 DC/AC 换流器连接到直流母线上。其中,双向 AC/DC 换流器 A 连接直流配电系统和外部交流系统,在正常工作时以整流方式为直流配电系统供电,必要时反转潮流方向,以逆变模式运行作为外部交流系统供电。该直流配电系统采用主从控制策略,换流器 A 作为主控制单元,换流器 C、D、E 分别控制各自负荷的电压和频率。DC/DC 变换器 B 作为 ESS 的控制单元,

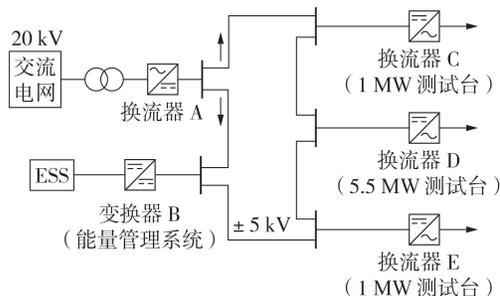


图2 City of Tomorrow 结构图

Fig.2 Structural diagram of City of Tomorrow

负责蓄电池组的充放电控制功能。

作为城市直流配电网的示范工程, City of Tomorrow 并未考虑新能源并网问题,系统的能量供应仅有外部交流电网和 ESS,由于未接入分布式发电装置,在外部交流电网发生故障时, ESS 很难维持需要的持续供电,故障穿越能力较差。但该示范工程为城市直流配电系统的实际应用提供了经验,同时也为未来大功率 DC/DC 变换器、直流断路器、高温超导电缆技术等设备的测试提供了试验场地。

1.4 丹麦博恩霍尔姆岛工程

作为欧盟《欧洲岛屿清洁能源倡议》和丹麦能源岛项目的一部分,博恩霍尔姆岛旨在促进部署创新解决方案,实现欧盟岛屿脱碳。博恩霍尔姆岛的供电系统由传统能源和可再生能源发电组成,交流系统分为 60、10、0.4 kV 这 3 个电压等级^[7]。0.62 kV 直流电网的拓扑结构如附录中图 A3 所示,该直流系统内部分别通过专用母线连接 60 kW 的光伏系统、192 kW·h 的电池储能系统 BESS (Battery Energy Storage System)、2 kW 的风力涡轮机和 50 kW 的电动汽车快速充电器,并通过一个三相 30 kW 的直流变换器与外部 400 V 交流电网进行电能交换。

该直流配电系统的关键部件是一种可重构的电池组。在可重构电池中,可以根据所选择的电池特性、发电单元和负荷特性实时重新排列电池拓扑结构,保持电池组之间的平衡。根据电池组的组合方式不同,可以获得不同的电压、电流和功率水平,以确保适当的电流密度。因此,每个 BESS 可与配电系统中的任一发电机组或电动汽车并联,节省了 DC/DC 变换器,降低了能量损失、投资成本和故障风险^[8]。

分布式发电在丹麦电力系统中占有较高比例,博恩霍尔姆岛工程的建设和运维作为欧盟岛屿脱碳计划的一部分,提供了良好的示范工程,且该工程在电动汽车侧采用 V2G (Vehicle to Grid) 技术,用于调节分布式发电的输出电能。BESS 可通过不同数量的蓄电池组串联输出不同等级的直流电压,省略了不同电压等级互联时的直流变压器设备,但由于目前蓄电池组占地范围大且造价较高,实际上并未减少系统的占地面积,不利于家用或商业推广,且 BESS 的投切对开关的要求较高,增加了系统成本。在 V2G 技术、BESS、分布式发电的支撑下,通过外部电网的调节,博恩霍尔姆岛已实现了岛屿脱碳,为直流系统运行方式和岛屿脱碳提供了宝贵经验。

1.5 日本电报电话株式会社仙台工程

日本电报电话株式会社 (NTT) 受新能源与工业技术开发组织 (NEDO) 委托,在日本仙台市启动了日本首个直流配电系统的示范工程^[9]。该工程采用两极三线制母线结构,如图 3 所示,交流侧电压为

400 V, 直流侧母线电压为 430 V, ESS 和光伏电池通过 DC / DC 变换器与直流母线相连, 再经过 DC / DC 变换器连接 300 V 直流母线, 可直接向数据中心的高压直流输电 (HVDC) 服务器供电。负荷单元电压等级为 48 V, 由 300 V 直流母线通过 5 kW DC / DC 变换器供电。

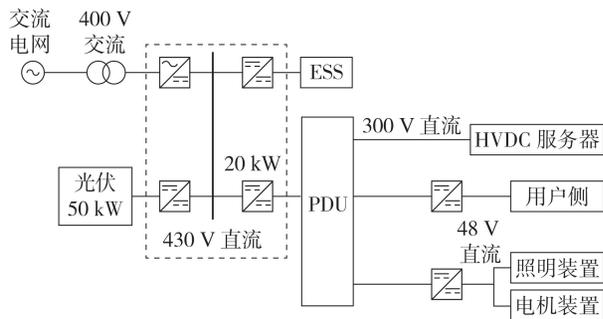


图3 NTT仙台直流配电系统结构图

Fig.3 Structural diagram of NTT Sendai DC distribution system

为提高直流配电系统的效率, NTT公司开发了一个400 V整流器, 具有良好的功率因数校正、高频隔离和输出稳压等功能, 并在低负荷因数中实现了超过95%的效率^[10]。同时, 为提高电能质量, 该示范工程将电压补偿器VC (Voltage Compensator) 和电池充电器与整流器配合使用。如果负荷对运行电压要求较高, 400 V直流母线可在不停运的情况下, 采用VC进行系统配置, 提高供电质量。另外, 仙台直流系统在300 V直流系统安装了带有保险丝和塑壳开关的配电装置PDU (Power Distribution Unit), 其结构见附录中图A4。该PDU的特点是安装有电容器组和联合断路器, 能防止系统中的电压振荡, 隔离不同的电力系统, 有效提高系统的供电可靠性, 防止故障范围扩大。此外, 380 V直流供电系统主要采用高阻中点接地系统。该接地系统的优点是将人体内的接地故障电流限制在无害的范围内, 保障了人身安全, 消除了单次接地故障时产生闪弧的危险。

仙台工程的PDU主要用于不同负荷之间的故障隔离, 相比于全线安装直流断路器, PDU的提出和使用降低了系统成本和占地面积。由于光伏发电和ESS的存在, 仙台直流系统对负荷的电力分配可以在互联状态和孤岛运行状态之间无缝接续。作为应对IT设备普及带来的供电形式多样性以及消费者对电能质量不同要求的解决方案, 仙台直流配电示范工程通过引入分布式发电和ESS替代商用电源, 具有效率高、可靠性高、易于控制、对保护继电器要求低等优点, 缓解了大量负荷并网对电能质量和系统控制带来的不利影响, 降低了高电能质量负荷的运行成本。2011年, 在外部交流电网由于地震停电三天的情况下, 该示范工程仍持续供电, 为极端情况

下不间断供电和高电能质量供电提供了丰富的经验, 可作为家用直流微电网系统进行推广。

1.6 韩国巨次岛工程

巨次岛直流配电系统示范工程由韩国电力合作公司(KEPCO)设计建造, 该工程旨在通过一个独立的直流配电网系统证明直流供电的优势, 并建立商业化模式^[11]。图4为巨次岛直流电网的拓扑结构, 其中分布式资源包括光伏、风机和ESS, 功率转换设备包括连接分布式发电的DC / DC变换器、连接负荷的DC / DC变换器、连接交流系统的AC / DC换流器。负荷分为AC / DC混合负荷、DC家庭、DC路灯和DC V2G负荷。在直流配电系统中, 用于风力和光伏发电的变流器和电池充电器都并联到一条750 V直流线路上, 由变流器控制进行功率控制, 并通过双极线向用户供电。

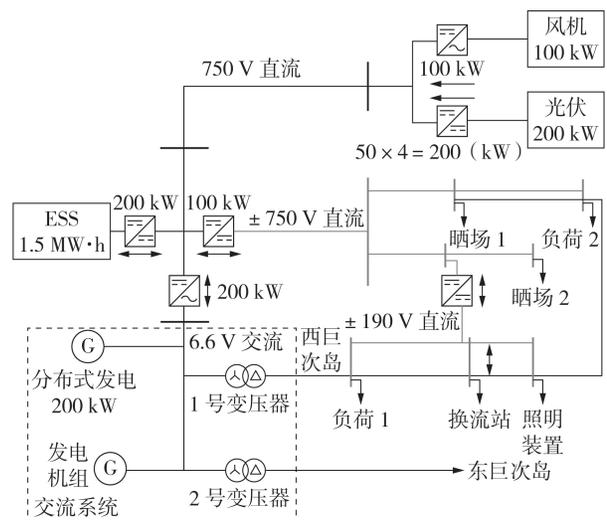


图4 巨次岛直流配电系统示范工程

Fig.4 Demonstration project of Geocha Island DC distribution system

直流配电系统可由操作员根据ESS的状态进行管理, ESS从分布式发电中吸收电能, 当发生过充时, 运营商可以通过设置ESS的最大荷电状态SOC (State Of Charge) 来限制分布式发电的输出功率。如果ESS的SOC不足, 则通过调整柴油发电机的输出功率给ESS充电。为实现整个系统的优化运行, KEPCO开发并采用了集中式的能源管理系统EMS (Energy Management System) 对直流配电系统的运行进行优化。

不同于丹麦博恩霍尔姆岛工程, 韩国巨次岛工程由于未与外部电网连接, 需要实现岛内能量自给, 因此在分布式发电的基础上, 采用柴油发电机来保障能量供给。由于工程内部含有交流系统, 需要考虑对交流电压和频率的控制, 而且没有外部电网的支撑, 系统对ESS的SOC控制和管理变得尤为重要, 为此KEPCO开发出一套具有推广意义的能量管理

系统,通过ESS的SOC来控制柴油发电机组的输出功率以满足供电和经济性要求。韩国巨次岛工程提高了该岛的能源效率,易于实现可再生能源互联,并且该工程中开发的直流优化运行系统,有助于实现直流配电系统的商业化运行。该工程虽然未能实现岛屿脱碳,但对孤岛系统的运行具有深远意义。

1.7 国外示范工程特点与差异

目前国外的示范工程主要集中在直流建筑、数据中心、海岛供电等低压、小范围等特定供电场景,均配备有ESS对系统进行调节,但系统结构各不相同,供电可靠性等方面有所差异。

在关键设备方面,各示范工程的特色大多集中在能量管理装置、直流变压器、断路器等方面。SBN工程采用两级PWM变换器作为能量控制中心对直流系统进行控制,可有效平抑电压波动,并具有短路保护功能,消除直流侧高频漏电流;为减少ESS充放电产生的开关损耗而设计的三相交错双向DC/DC变换器,在降低损耗的同时简化了系统结构。为使FREEDM系统实现“即插即用”功能,在其中设计安装了IEM装置,在电压转换和交直流变换的同时实现了能量控制以及局部电源管理功能;在故障管理方面安装了IFM以隔离电路中的潜在故障,提高用户侧的故障恢复能力和电能质量。博恩霍尔姆岛工程的关键部件是以一种可重构的电池组代替直流变压器,通过电池组的不同组合方式,可以获得不同的电压、电流和功率水平,以满足不同负荷需求。为提高系统效率,日本仙台工程开发了400 V整流器,并将PDU用于不同负荷之间的故障隔离,无需全线安装直流断路器,降低了系统成本和占地面积。

在供电可靠性方面,各示范工程均通过安装ESS提高故障穿越能力,且大多引入分布式发电以保证在外部电网故障时维持系统供电。从系统结构上而言,SBN工程、博恩霍尔姆岛工程、日本仙台工程、巨次岛工程均采用辐射形结构,在母线故障情况下会极大影响供电情况。FREEDM工程、City of Tomorrow工程则采用环状供电,供电可靠性相对更高,但City of Tomorrow工程仅由外部交流电网和ESS提供电能,未安装分布式发电装置,在外部交流电网发生故障时,受限于ESS的容量因而很难维持长时间的持续供电。相比较而言,2011年,在外部交流电网由于地震停电三天的情况下,日本仙台示范工程仍维持系统供电,证明了分布式发电的引入可以更加有效地提高系统供电可靠性。

在分布式发电和ESS方面,除City of Tomorrow工程外,其他示范工程均考虑了分布式发电并网问题,其中SBN工程、日本仙台工程、韩国巨次岛工程将分布式发电和ESS经DC/DC变换器后直接接入直流母线,由于博恩霍尔姆岛工程安装有一种新型

的BESS,分布式发电先通过各自的母线向BESS充电,再经过BESS放电以满足负荷需要。FREEDM系统中不仅为12 kV交流母线安装大规模ESS来维持母线电压稳定,而且为分布式发电和ESS的接入提供了多种接口,可通过400 V直流系统或120 V系统并入交流母线,实现了“即插即用”功能。

2 国内示范工程介绍

自2008年开始,国内相关单位逐步对直流配电网展开研究。2016年发布的《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》,将直流输配电技术作为现代电网建设的重要发展方向。“十四五”中涉及新能源消纳和配电网智能化的需求也对直流配电系统的发展提出了更高要求。国内对直流配电系统的研究起步较晚,在“863计划”和国家重点研发计划项目的推动下才逐渐开展,目前针对直流配电系统的研究仍处于理论研究和示范验证阶段,国内相关的直流配电示范工程也大多是基于实际需要,为解决目前电网存在的诸多问题而建设的。例如,为解决工业园区供电可靠性和高电能质量要求等问题所建设的深圳宝龙工业城示范工程和苏州工业园示范工程、为探索能源互联网和能源转型问题所建设的珠海唐家湾示范工程和杭州江东新城示范工程、为解决新能源就近消纳问题所建设的贵州大学示范工程等,上述工程中根据实际需要开发了一系列直流配电系统的关键设备,并在示范工程中得到工程验证。具体如表2所示。

表2 国内示范工程介绍

Table 2 Introduction of domestic demonstration projects

工程名称	年份	电压等级	供电容量	工程特色
深圳宝龙工业城示范工程	2017	±10 kV	20 MW	全固态混合式直流断路器、15 kV / 200 kW 直流变压器样机
珠海唐家湾示范工程	2017	±10 kV、±375 V、±110 V	40 MW	三端直流断路器
贵州大学示范工程	2018	±10 kV	4 MW	五端、城市配电网、分层分布式控制构架
苏州工业园示范工程	2020	±10 kV、750 V、375 V	20 MW	非对称主站换流阀
杭州江东新城示范工程	2018	±10 kV	30 MW	无变压器结构、阻尼模块

2.1 深圳宝龙工业城示范工程

深圳电网是全国供电负荷密度最大的特大型城市电网。近年来随着宝龙工业城的建设和发展,园区负荷出现敏感负荷增多、分布式发电和ESS丰富、直流负荷增加等特点,适合作为直流配电系统示范工程的建设落点。

在综合考虑宝龙工业城的地理位置和不同供电

需求的背景下,该示范工程将负荷分为4类,采用双电源“手拉手”的网络拓扑结构,如附录中图A5所示。直流配电系统通过两端的110 kV碧岭换流站和110 kV丹荷换流站作为主电源,采用电压源型换流器VSC(Voltage Source Converter)从2座变电站的10 kV母线侧接收电能,满足直流配电系统供电负荷的用电需求。为提高与直流配电系统相联的交流配电网的电能质量,两端交流系统与中压直流配电母线之间均通过全控型VSC相连^[12]。

该示范工程通过使用不同的设备模块,在满足不同负荷用电要求的基础上,保证了供电可靠性,解决了分布式发电的就地消纳问题,并且降低了系统成本。其中直流变压器采用多重化结构输入串联输出并联ISOP(Input-Series Output-Parallel),即在高压端采用串联方式以提高电压等级,在低压端采用并联方式以提高功率等级。每个直流变压器均采用相同结构的双主动全桥DAB(Dual Active Bridge)结构,具备双侧定直流电压控制和功率双向传输功能,可通过近端储能站控制2个交流源的相移来调节功率流动的大小和方向。

此外,该示范工程中采用国内外直流配电系统较少采用的双端“手拉手”的网络结构,研发了无机械开关结构、高可靠性、低成本的全固态混合式直流断路器^[13],其电流开断速度快、可靠性高,降低了对限流电抗的要求,可实现故障电流多次开断。该直流断路器由主通流支路、转移支路、吸收支路并联构成。其中主通流支路采用3个绝缘栅双极型晶体管IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)反向串联以承担系统关断电压,每个IGBT反并联1个二极管,在换流过程中,强迫电流向转移支路换流,完成快速换流过程。转移支路采用5个压接式IGBT串联,并配有剩余电流装置RCD(Residual Current Device)动态吸收电路和静态均压电路。吸收支路采用金属氧化物压敏电阻MOV(Metal Oxide Varistor)作为吸收限压元件,在关断瞬间限制电压尖峰,同时吸收残余的系统能量,完成电流的开断过程。

该示范工程有助于缓解目前深圳配电网存在的供电可靠性、电能质量需求、分布式发电就地消纳等问题,采用的多种设备模块解决方案为解决直流配电系统不同负荷供电需求降低系统成本问题提供了有效的技术方案。此外,宝龙工业城示范工程通过5种运行方式的切换有效地发挥了直流配电系统的削峰填谷和潮流调节作用。在该工程中对直流配电系统的电气主接线方案、主设备选型、控制保护系统等关键技术的深入研究,为我国中压直流配电系统的研究和工程实施提供了参考。

2.2 珠海唐家湾示范工程

为积极探索能源互联网的建设新方向,南方电

网广东电网公司自2017年开始筹建,在珠海唐家湾建设支持能源消费革命的城市-园区双级互联网+智慧能源示范工程,并于2018年12月建成投运。

珠海唐家湾示范工程是典型的多层级直流配电工程,如附录中图A6所示,该系统采用三端交流供电的拓扑结构,三端可实现实时功率支援,其中鸡山换流站1段、2段和唐家换流站的VSC出口通过 ± 10 kV直流母线互联,组成三端互联直流配电母线为低压直流系统供电,光伏装置、ESS、充电桩、直流负荷等组成 ± 375 V低压直流系统,并通过DC/AC换流器为110 V交流负荷供电, ± 375 V低压直流母线则经过直流变压器与中压直流母线相连,从而形成多级直流配用电网络^[14]。

为实现多端功率转供以及提高系统的供电可靠性,该示范工程采用星形网络拓扑结构和单极对称的主接线形式。由于在多端直流系统中通常存在多个线路交汇点,若在交汇点均安装混合式直流断路器将极大地增加系统成本。为此,在保证可以清除任一线路故障的情况下,珠海唐家湾示范工程采用三端口耦合负压型混合式直流断路器^[15],在提高系统经济性的同时可实现多路协调关断,为解决多端直流系统断路器设置问题提供了宝贵经验。

该三端口混合式直流断路器包含3个快速机械开关、2个双向电力电子开关以及2条能量吸收支路。其中,任意一条直流线路通过2个快速机械开关分别与相邻的2条直流线路相连,用于承载正常电流;任意一条直流线路与双向电力电子开关相连,用于双向承载并切断故障电流;每个双向电力电子开关均与能量吸收支路并联,用于吸收故障线路中储存的能量,限制双向电力电子开关动作时的过电压。该三端口混合式直流断路器包含3条主支路,其中支路1和2均是一个完整的耦合负压型混合式直流断路器。每个耦合负压型混合式直流断路器由3条并联支路组成,包括用于导通直流系统电流的主支路、用于短时承载并关断直流系统短路电流和建立瞬态开断电压的转移支路、用于抑制开断过电压和吸收线路及限流电抗储能的耗能支路。

该示范工程为国际首个 ± 10 kV、 ± 375 V、 ± 110 V多电压等级交直流混合配电网示范工程,也是世界最大容量的 ± 10 kV配电网柔性直流换流站,不仅可以对系统的潮流方向进行调节,还可以对母线电压进行有效的控制,实现了对系统内各节点电压的调控。工程的建成与深化应用,为不同结构换流阀和直流断路器的设计运行提供了丰富的经验,促进了中低压柔性直流设备的标准化进程,为直流配电系统规划、设计、运维、推广等方面提供了重要的参考数据,并具有重要的参考价值和示范效应,在构建柔性直流配电网技术体系、节约土地资源和能源投入

等方面具有良好的经济社会效益,为粤港澳大湾区能源互联网的发展提供了支撑。

2.3 贵州大学示范工程

2018年9月,我国首个中压五端柔性直流配电示范工程在贵州大学新校区建成投运,该示范工程作为一种多端、多电压的配电系统,涵盖了交直流微电网、分布式电源、交直流负荷等多种系统单元,并作为DGI产学研协同创新平台,用于对直流配电系统的相关研究。

贵州直流配电系统由中压直流配电系统、低压交流微电网、低压直流微电网3个子系统组成,如图5所示^[16]。其中中压直流配电系统的直流母线电压为 ± 10 kV,并通过3个模块化多电平换流器(MMC)与10 kV/10 kV隔离变压器及10 kV交流配电网相连,为低压微电网提供电能;低压交流微电网包含ESS、光热发电、风力发电、充电桩等设备,直接并联或经换流器并联在380 V交流母线上;低压直流微电网由ESS、光热发电、充电桩等直流设备组成,其直流母线电压为 ± 375 V,并可通过DC/AC换流器向380 V低压交流电网供电。ESS作为能量平衡单元用于维持微电网稳定,并可根据需要提供削峰填谷功能。低压交流配电系统和直流配电系统分别通过4号MMC和直流变压器连接在 ± 10 kV直流母线上,实现中压直流配电系统与交流微电网和直流微电网的柔性互联。MMC和直流变压器具有功率双向流动功能,可实现交直流微电网和中压直流配电系统之间的功率控制以及相互支撑。

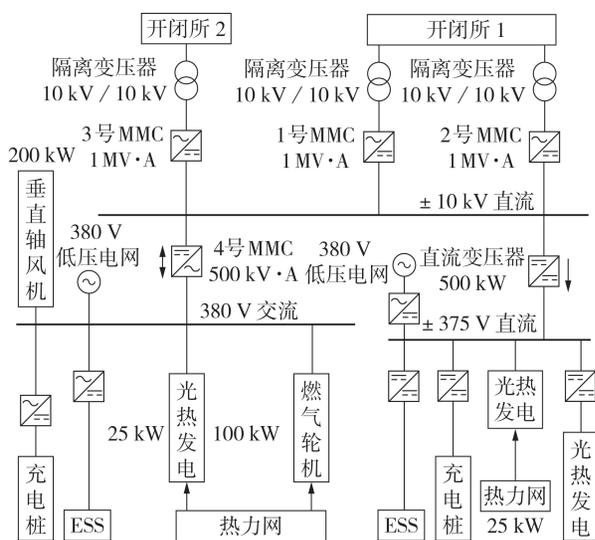


图5 贵州中压五端柔性直流配电示范工程

Fig.5 Demonstration project of Guizhou medium-voltage five-terminal flexible DC distribution system

该示范工程采用分层分布式运行控制架构,可根据交流配电网状态和各微电网子系统内平衡单元运行状态进行控制,实现各子系统就地控制和负荷“即插即用”的需要,无需通过上层控制和通信,可根

据实际运行情况自主实现直流配电系统紧急情况下的多运行模式平滑切换及各子系统快速相互支撑。

不同于工业园区直流配电网,贵州大学直流配电系统考虑了城市热力网的发电设备和大学园区的交直流负荷,并对当地高渗透率的分布式发电具有良好的接纳能力,为城市直流配电网的规划提供了示范。虽该直流配电系统也具有三端供电结构,但在 ± 10 kV母线侧未采用类似于珠海唐家湾工程的三端直流断路器设备,在一定程度上增加了系统成本。但该柔性直流配电系统示范工程作为一种交直流混合的城市直流配电网,在考虑光伏、风力等分布式发电的基础上,增加了对来自城市热力网的能量接收,并且通过多个换流器和直流变压器可实现多配电系统的功率控制和能量交换,提高了城市配电网运行的经济性和可靠性。由于系统采用开放式设计,对交直流负荷的增加和分布式电源的接入具有良好的灵活性。目前国内外对多端直流系统的相关研究较少,直流配电系统大多采用环网或辐射形供电方式,该示范工程的建成为构建未来新型DGI提供了新的思路。

2.4 苏州工业园示范工程

苏州直流配电系统示范工程作为国家重点研发计划专项,具有 ± 10 kV、750 V、375 V这3个电压等级,可满足不同用户的高可靠性和直流供电需求。该工程分为主网侧、配电侧、用户侧3个部分,其中主网侧为庞东中心站和九里中心站2座直流中心站,配电侧包括7座配电房与3座光伏升压站,工程总容量约为20 MW。

该直流配电系统示范工程含有工业负荷、商业负荷、居民负荷、充电桩、数据中心等典型直流用电场景,并在考虑当地的地理环境情况、直流负荷分布情况、分布式发电情况等因素的基础上,共设九里换流站(H_1 ,主变容量为50 MV·A)和庞东换流站(H_2 ,主变容量为50 MV·A)2座直流换流站,分别通过MMC引出2回 ± 10 kV直流母线,采用开闭所 K_1 、 K_2 单母线分段、双电源进线方式的双端环形主接线形式,满足分布式电源的接入与直流负荷的用电需求,并解决了光伏电站的就近消纳问题。其网架结构如图6所示^[17]。

苏州工业园配电系统采用双端拓扑结构,其中中压母线采用伪双极接线,低压母线采用真双极接线,在满足 $N-1$ 要求的情况下可以实现对配电网电源和负荷的调节和控制,提高配电网的供电水平和新能源消纳水平。在分析国内外换流器、直流变压器等关键设备研究成果的基础上,该示范工程中提出并采用非对称主站换流阀的设计方案^[18],即九里换流站采用基于半桥子模块HBSM(Half Bridge

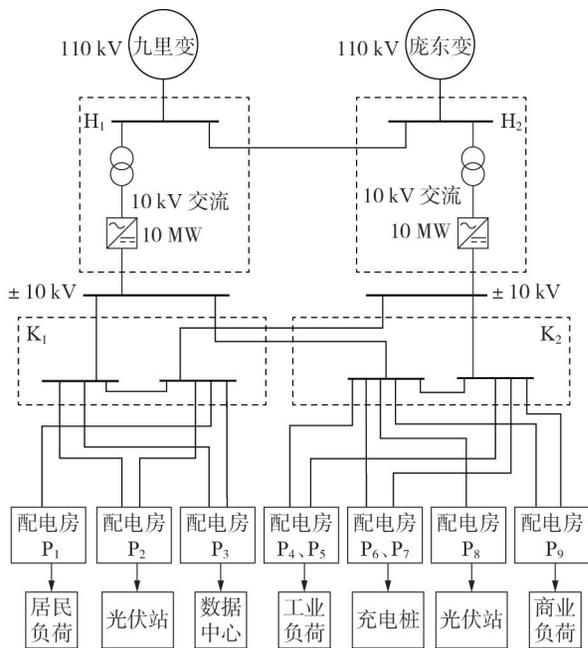


图6 苏州直流配电工程结构示意图

Fig.6 Structural diagram of Suzhou DC distribution project

SubModule)拓扑结构,庞东换流站则采用全桥子模块FBSM(Full Bridge SubModule)与HBSM构成的混合型模块化多电平换流器HMMC(Hybrid MMC)拓扑结构,通过FBSM的故障自清除能力可有效缩短换流站的供电恢复时间,在保证负荷供电可靠性的情况下,避免了双HMMC带来的高昂成本。此外,采用双端环形的网架结构具有良好的拓展性,可以根据需要拓展为多端环形,保证沿途负荷的双电源供电。由于直流配电系统的网络构架较为复杂,且含有不同形式的电源、负荷等单元,因此苏州工业园配电系统的运行方式较多,且模式转换比较复杂,其日常运行方式可分为单端供电、双端环网供电、双端隔离运行3种,故障情况下又分为闭锁型限流和直流穿越运行2种故障处理方式。

相较于深圳宝龙工业城示范工程,苏州直流配电系统虽然也采用双端供电模式,但由于中低压系统分别采用伪双极和真双极接线方式,换流站采用的非对称主站换流阀的设计方案,在降低建设成本的情况下,提高了系统的供电可靠性,为双端直流配电系统提供了一种新思路。

在该示范工程的推动下,苏州市以光伏为代表的分布式清洁能源发展迅速,2019年全市光伏发电装机容量增长25%,光伏发电量增长30.9%。苏州示范工程多项自主创新核心技术持续保持国际领先,目前已成为全球相关领域的典范和标杆工程,具有广泛的国际影响力。

2.5 杭州江东新城示范工程

“十四五”期间,随着“数智杭州·宜居天堂”蓝图

落地,新能源汽车充电、5G通信、大数据中心等新基建持续升温,预计“两新一重”新基建用电需求将占杭州“十四五”负荷增长的65%。针对这一特征,国网杭州供电公司投资350亿元,持续推动清洁低碳高效能源服务,为此,杭州江东新城建立了智能柔性直流配电网示范工程。该示范工程将配电网从传统的辐射形结构转变成多端互联系统,使系统可以快速隔离故障并恢复供电,提高了杭州电网的供电可靠性^[19]。

杭州江东新城智能柔性直流配电网工程额定电压为 ± 10 kV,总换流容量为30 MW,拓扑结构如图7所示。系统采用2台10 kV AC/ ± 10 kV DC的HMMC和1台10 kV AC/ ± 10 kV DC的全桥型模块化多电平换流器FMMC(Full-bridge MMC)将2座10 kV交流换流站和1座20 kV交流换流站与 ± 10 kV直流母线相连,3台MMC均未使用变压器^[20],大幅减少了工程的占地面积。 ± 10 kV直流母线配备一套 ± 10 kV混合型直流断路器,并通过ISOP结构的直流变压器将直流电压转换为 ± 375 V为负荷供电。由于系统未安装变压器设备,当直流侧发生单极接地故障时,交流侧会产生较大的直流偏置电流,导致交流断路器不能正常开启。为此在HMMC中采用阻尼模块DSM(Damping SubModule)抑制直流偏置电流使其达到过零点,实现交流断路器的可靠分断,确保在任一电源故障情况下负荷的有效供电。

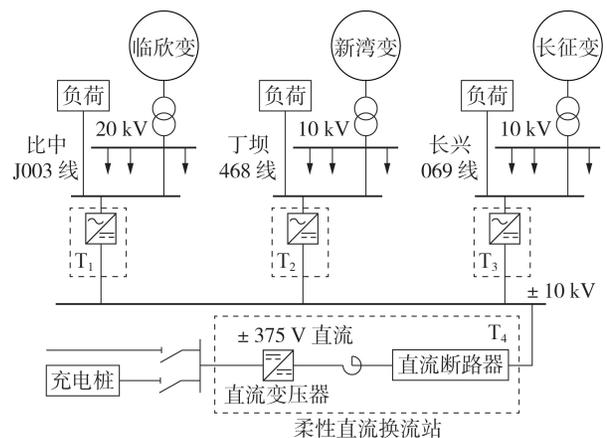


图7 杭州智能柔性直流配电网

Fig.7 Smart flexible DC distribution network of Hangzhou

该示范工程采用的智能配电柔性多形状开关是国内相关设备研制的一大突破。该设备的投运增加了系统功率连续可控状态,预防倒闸操纵引起的供电中断等问题,还能减缓电压骤降、三相不平衡等故障,促进馈线负荷分拨的均衡化与电能质量提升。

该示范工程的安全稳定运行验证了无变压器设备的直流配电系统的可行性、DSM对交流断路器可靠分断的有效性,FMMC结构的换流器可用于连接2个不同电压等级的交直流系统,推动了直流配电系

统的发展和應用。將不同供電區域通過直流配電系統互聯,在提高供電可靠性的基礎上,還可以控制系統潮流、接納分布式發電,有力支撐了杭州大東亞配電網的可靠、優良、安全運行,加快了浙江省建設風光儲能、滿足客戶多元需求的新一代電力系統進程,保障了清潔能源消納,強化了新能源并網管理,有效推進了《杭州市能源發展“十三五”規劃》提出的清潔能源占比達到60%以上目標的實現。

2.6 國內示范工程特點與差異

與國外示范工程不同,國內各示范工程主要為解決城市發展和分布式發電問題提出新思路,集中在工業園區等區域性的直流配電系統。

在關鍵設備方面,與國外示范工程相似,國內各示范工程的關鍵設備大多集中在直流變壓器、斷路器等裝置。深圳寶龍工業城示范工程中研製了15 kV / 200 kW 直流變壓器樣機,具備雙側定直流電壓控制和功率雙向傳輸功能;全固態混合式直流斷路器無機械開關結構、可靠性高,降低了对限流電抗的要求,可實現故障電流多次開斷。珠海唐家灣示范工程針對星形網絡拓撲結構的特點,采用三端口耦合負壓型混合式直流斷路器和集成門極換流晶閘管IGCT(Integrated Gate-Commutated Thyristor)技術,在提高系統經濟性的同時可實現多路協調關斷。蘇州工業園示范工程中提出并采用非對稱主站換流閥的設計方案,通過FBSM的故障自清除能力縮短換流站的供電恢復時間,在保證負荷供電可靠性的情況下,避免了雙HMMC帶來的高昂成本。杭州江東新城示范工程系統采用2台HMMC和1台FMMC將2座10 kV交流換流站和1座20 kV交流換流站與±10 kV直流母線相連,3台MMC均未使用變壓器,減少了工程的佔地面積;智能配電柔性多形狀開關增加了系統功率連續可控狀態,能預防倒閘操縱引起的供電中斷等問題。

在供電可靠性方面,深圳寶龍工業城示范工程采用雙電源“手拉手”的網絡拓撲結構,從兩端的換流站接收電能,供電可靠性相對較高。珠海唐家灣示范工程采用星形三端交流供電的網絡拓撲結構和單極對稱的主接線形式,可通過±10 kV中壓直流母線實現實時功率支援,低壓直流母線則經過直流變壓器與中壓直流母線相連,從而形成多級直流配電網絡,供電可靠性較高。貴州大學示范工程作為國內首個五端柔性直流配電系統,類似於珠海唐家灣示范工程,3座變電站交流母線經過MMC和隔離變壓器連接到±10 kV中壓直流母線上,再通過換流裝置向低壓交流微電網和低壓直流微電網供電。蘇州工業園示范工程采用開閉所單母線分段、雙電源進線方式的雙端環形主接線形式,中壓母線采用偽雙極接線,低壓母線采用真雙極接線。杭州江東

新城示范工程采用三端供電系統,通過MMC裝置將2座10 kV交流換流站和1座20 kV交流換流站與±10 kV直流母線相連,再通過柔性直流換流站為直流負荷供電。

在分布式發電和ESS方面,國內各示范工程均是基於實際需要,旨在解決負荷變化和分布式發電就近消納等問題,大多考慮了分布式發電和ESS等問題。深圳、珠海、貴州示范工程均是將分布式發電和ESS先并入低壓交流微電網中,再經過雙向變換器并入中壓母線;蘇州示范工程沒有安裝ESS,光伏電站的電能經配電房直接并入中壓直流母線;杭州示范工程則沒有考慮分布式發電和ESS。

3 我國直流配電系統發展建議

縱觀全球範圍內直流配電系統的發展,對比國內外的示范工程,可以得出以下結論。

(1)可再生能源發電是解決化石能源危機和環境污染問題的有效方式。直流配電系統可以減少可再生能源發電接入電網的換流環節,進而降低接入成本,促進可再生能源發電的發展,加快能源轉型。

(2)相較於交流配電系統,直流配電系統具有供電半徑大、線路造價低、供電可靠性高等優點,可以解決經濟快速發展造成的城市配電網線路走廊緊張、供電容量不足、諧波干擾等問題。

(3)直流負荷和ESS可直接接入直流配電系統,在改善電能質量的同時提高直流配電系統的可擴展性,便于日後的城鎮發展規劃。

通過與國外示范工程的比較,可以發現我國在以下幾個方面仍然存在著差距。

(1)標準不完善。自2008年開始,國內相關單位對直流配電網展開了研究。但我國直流配電系統仍處於起步階段,相關的標準和規範還未完善^[21],以家用直流電器為例,其相關標準僅局限於斷路器和插頭,而未涉及其餘設備。在低壓直流系統中僅對IT系統的直流系統有相關標準。而國際方面,2007年IEC在SG1下設置了SEG4對低壓直流系統進行評估,2017年IEC TC8為響應SEG4低壓直流發展報告和工作需要,成立了WG9工作組,推進直流配電系統標準化進程。目前,對於0~120 V超低壓直流已標準化,對於120~1 500 V低壓直流有待標準化。此外,英國、德國、法國等歐洲國家的直流系統發展較早,對於1 500 V以下直流配電系統的相關標準已較為完善。

(2)用電設備少。就用戶側而言,很多家用電器本質上是由直流系統供電,接入交流電網時需經過變換器,會產生附加損耗。由於國外對家用直流微電網和“能源屋”等環保措施的大力推廣,直流冰箱、直流空調等直流家電發展迅速,技術相對成熟,目前

已基本形成完整的产业链和营销模式,可根据用户的不同需求提供定制服务。而目前国内对直流配电系统的推广尚未对用电侧进行考虑,缺乏对用户用电习惯、用电需求等方面的考虑;另一方面国内家用直流电器发展缓慢,产品类型少且存在诸多问题,常规采购渠道很难购买到所需的直流电器,不利于直流配电系统的推广。

(3)应用范围小。自20世纪电力电子技术快速发展,国外对于直流系统的发展和应用极为关注,在原有舰船配电系统、城轨铁路交通供电系统、发电厂二次设备等特种直流系统的基础上,开展直流配电系统的相关试验,尤其是随着联合国气候变化框架公约的签署,以“直流数据中心”、“能源屋”、“零碳建筑”为代表的直流配电建筑得到广泛推广,目前已经拥有完善的设备、工程等,并得到商业化应用。而目前国内对直流配电系统的研究还处于试验探索阶段,在国内电力系统中,直流配电技术主要应用于变电站一次设备的操作以及二次设备和通信设备的安保电源。虽然有部分用电大用户采用直流供电系统,例如电信部门、互联网公司的通信机房供电系统以及船舶和轨道交通供电系统等,但仍局限于以直流微电网、海岛、楼宇配电、工业园区等为主的小范围应用。这些专有配电系统电压相对较低、规模和配电容量较小、供电对象单一,且对分布式电源和储能的汇集能力不足,不适合日常应用场景和商业化推广^[22]。

(4)技术问题多。由于国外对直流系统的研究起步较早,加之环境保护问题的迫切需求,美国、欧盟国家、日韩等大力推进直流系统的相关研究,在此基础上加速了以ABB、西门子、松下等电力设备企业对直流设备的开发和研制,目前相关设备已经得到商业化推广。另外,在环境保护问题备受关注的背景下,以可再生能源发电、零排放为特点的直流配电网在国外也得到发展和推广。而目前国内对于直流配电网的研究仍处于起步阶段,在考虑我国国情的情况下,直流配电系统的规划设计、调度运行、经济分析等问题有待深入研究,配电系统的一次设备、保护装置等关键设备还存在造价高、设计不合理等问题,未能达到商业化要求。另外,对于公共配电网和直流微电网的研究还局限于示范工程,商业化实践几乎还是空白,许多研究成果没有得到检验。

总结以上国内外相关示范工程的经验,我国直流配电系统的发展可以得到以下启示。

(1)加快相关标准制定。2016年7月中国电力科学研究院获批筹建直流配电系统标准化技术委员会,并于2017年发布《中低压直流配电电压导则》,迈出了直流配电系统标准化的第一步。目前在直流配电系统方面,IEC、ISO等国际标

准还处在起步阶段,中国电力企业联合会、中国电力科学研究院等相关部门和组织可参考IEC SEG4关于低压直流系统的相关报告和英国、德国、法国等欧洲国家的相关标准,加快直流电压、直流设备、接口等重要问题的标准制定,重点关注相关产业的发展情况,确保标准适用性。借助CIGRE、IEC、IEEE等国际标准化平台,参与国际相关标准的起草和修订,积极推动国家标准国际化。

(2)推进智能电网建设。从美国及欧盟国家的示范工程和商业化产品可以看出,无论是直流配电系统的建设,还是分布式发电的推广,都需要强大的ICT技术支持。现代信息通信技术与电网深度融合不仅需要软开关、固态变压器、有源滤波器新型智能装置的推广应用,还需要在二次系统广泛应用信息通信、大数据分析等先进技术。为此,应加快实现直流配电网的可测、可观、可控,推动以故障自愈为方向的配电网自动化建设;应加强智能电表和智能终端的推广、智能台区和智能配电站的建设,提升直流配电网装备水平和智能化水平,提高信息和通信水平,实现配电系统一次系统与二次设备的深度集成。

(3)完善电力市场机制。欧盟的EcoGrid项目^[23]为我国的电力市场机制改革提供了丰富的经验。直流配电系统的推广需要发挥直流系统对新能源设备和电动汽车的良好接纳能力,在对新能源设备、交通工具等实行补贴政策的基础上,大力支持分布式发电和光电建筑、屋顶太阳能等技术推广应用。在电价方面制定直流电补贴政策及计量标准、分布式发电并网补贴、多种销售电价等,健全市场机制和政策体系,保障清洁能源安全高效利用。

(4)加大政策推广力度。根据欧美等国直流配电系统的发展可知,政府发挥作用和积极履行责任以及相关政策法规的出台,将更好地指导直流配电系统的发展。一方面,为直流配电系统提供资金支持,设立专项基金和研究经费,激励企业、研究机构、高校等积极参与直流配电系统的研究;另一方面,鼓励和支持分布式发电、电动汽车等相关产业的发展,从需求侧拉动直流配电系统的发展。此外,直流配电系统的发展离不开良好的市场环境,可对直流家电企业、直流设备企业、分布式发电企业等给予一定税收优惠政策,可给予分布式发电企业适当补偿等。确立发展直流配电系统和分布式发电的目标,推动电源结构和布局优化,构建多元化清洁能源供应体系。加大对新能源的开发和利用,需要一个对分布式发电有较好接纳性的电网,直流配电系统是加快电网向能源互联网转型升级、打造清洁能源优化配置平台的良好途径。推广分布式发电和直流配电系统有利于最大限度地开发利用新能源,提升系统调

节能力。

(5)加强核心技术研发。直流配电设备、用电设备的研发对直流配电系统的发展有着至关重要的作用。以直流冰箱、直流空调、直流照明设备等为代表的直流家电和以屋顶太阳能为代表的家用分布式发电装置在国内发展缓慢,可在目前引进消化模式的基础上向自主研发转型,促进直流家电业的形成发展,实现商业化推广。农村电网和农村建筑为屋顶太阳能、低碳建筑、家用直流系统等提供了广阔的发展空间,但目前国内相关技术大多停留在试验和示范层面,较为分散且缺乏试验和资金支持^[24]。应整合研究资源成立相关研究中心,开展对直流输配电多电压等级协同控制等关键技术、大容量高效率的直流变压器等电能变换装置的重点攻关,形成系统的研究体系和人才梯队,并引导企业参与科研,加快科研成果向产品转化,推进直流配电系统关键技术装备创新,提升系统的安全和效率水平。

a. 仿真平台开发。直流配电系统的规划设计和安全稳定运行都需要经过仿真软件的仿真验证,但直流配电系统的数学建模和仿真方法不同于交流系统和高压直流输电,潮流计算、电磁暂态和机电暂态等模型需要重新建立和工程验证,仿真方法也需根据需求重新考虑。直流系统的响应时间常数比交流系统小得多,且含有大量的动态元件,对仿真速度和精度提出了更高要求。在直流配电仿真技术方面,应在参考交流系统和高压直流相关技术的基础上,针对直流配电系统的潮流计算、电磁暂态和机电暂态等关键问题,提出基本设计思路和解决方法,对目前存在的开关算法不精确、仿真计算效率较低等问题进行优化完善。应针对直流配电系统的关键设备建模问题进行研究分析,根据需要开发具有广泛适用性的仿真平台。

b. 规划系统研发。直流配电系统尚处在工程示范阶段,对于系统的规划和可靠性评估还未形成完整的体系与标准,国内对各示范工程的规划设计和评估大多基于工程实际和理论研究,不利于大规模推广应用。对于直流配电系统的拓扑结构、接线方式等理论研究相对完善,但对于电压等级的选择、关键设备的选型定容、系统的控制策略、保护配置等仍缺乏系统性的规划方法和评估手段。直流配电系统的发展逐渐转向两端甚至多端供电,并且由于分布式发电和ESS的接入,系统的潮流分布和暂态分析更为复杂,因此对可靠性的评估提出了新的要求。对于直流配电系统的评估模型和方法需要重新完善,部分可靠性指标要进行较大调整,需要建立新能源、直流变压器、变流器等关键设备的可靠性模型,研发直流配电系统规划系统用以指导工程实际。

c. 关键设备研制。通过上述国内外各示范工程可以看出,关键设备的研发和应用对直流配电系统

的发展尤为重要,主要包括直流变压器、换流器、直流断路器、直流传感器、直流用电设备等。以直流变压器为例,相比AC/DC变换器,其发展相对缓慢,目前直流变压器的研究主要分为谐振式LCC拓扑、带隔离变压器的DAB串联电路、有源双向半桥电路(DHB)3种主电路拓扑。中低压大容量的直流变压器仍处于样机阶段,严重制约了中低压直流配电系统的发展和推广^[25]。针对目前中低压直流变压器存在的诸多问题,一方面应研制大容量、低损耗、高效率、具有故障穿越功能的直流变压器,另一方面由于目前直流配电系统的建设大多面向分布式发电的接纳问题,研制开发具有隔离功能的新能源专用直流变压器可增强分布式发电的并网能力,提高直流配电系统的可靠性。另外,由于DAB拓扑结构的直流变压器具有双向功率流动能力以及极易扩展等优点,在中低压直流配电系统得到广泛研究利用,但ISOP结构对变压器的均压、均流提出了更高要求,通常需要额外的辅助电路,这导致造价高、损耗大等问题,因此如何有效实现ISOP结构直流变压器的均压、均流也是未来的研究方向。

d. 协调控制技术研究。直流配电系统通常具有多个电压等级,且一般包含多个低压交直流微电网、分布式发电、负荷等,这使系统的控制架构变得极为复杂。直流配电系统的协调控制对于系统的安全稳定运行具有重要意义^[26]。随着VSC电压和容量的提高,多个换流器之间的相互作用对系统的影响尤为显著。现有直流配电系统控制策略大多未考虑换流器之间的交互影响,导致控制精度低、响应速度慢、控制效果差、运行经济性不高等问题。因此需要在现有控制策略的基础上考虑两端、多端直流配电系统控制器的影响,实现系统的多端协调控制和电压稳定。另外,在完善直流配电系统分层控制理论和方法的基础上,对各层之间的控制策略进行优化,以实现系统的潮流优化、平衡工况控制等,建立系统级的综合调控体系。

e. 直流保护技术探索。不同于交流系统,直流配电系统的阻尼小,故障发展更快,范围更大,因此对保护的速动性、选择性、可靠性要求更高^[27]。一般而言,直流系统需要在几毫秒内实现故障的快速定位、隔离及保护动作,以防止系统崩溃。基于现有直流配电系统的研究和需求,除了研制高性能的直流断路器等关键设备外,应开展系统的快速故障检测和网络化多点通信、一二次设备融合、系统级与设备级协同保护优化方案等研究,发展故障广域检测与快速定位技术、故障电流的快速抑制技术等。

4 结论

直流配电系统在实现分布式电源并网方面具

有很大优势,是未来节约能源和防止全球变暖最有前景的技术之一。“十四五”中指出,我国要在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和,关键是发展新能源发电技术逐步替代化石能源。直流配电系统的发展和推广对于实现我国能源的绿色发展、循环发展和可持续发展具有重要意义。本文介绍了目前国内外部分直流配电系统的示范工程,各示范工程的实践表明直流配电系统是解决能源消耗和环境污染问题的有效途径。但目前国内的直流配电系统发展缓慢,且大多处于工程示范阶段,主要用于分布式发电的就近消纳和敏感负荷供电等,应用范围小,局限性大,未能实现商业化和大规模推广。此外,直流配电技术的研究和装置研制还有很长的路程,需不断借鉴国外经验开展相关试验与示范工程,探索适合我国国情的直流配电系统管理与发展模式。在世界各国对节能减排和能源综合利用需求日益增长的背景下,直流配电网将以其技术和经济优势而拥有广阔的发展前景,也将给生活与生产方式带来巨大的改变。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 宋强,赵彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):9-19,5.
SONG Qiang,ZHAO Biao,LIU Wenhua,et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(25):9-19,5.
- [2] 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.
- [3] CVETKOVIC I,DONG D,ZHANG W,et al. A testbed for experimental validation of a low-voltage DC nanogrid for buildings [C]//2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference(EPE/PEMC). Novi Sad,Serbia:IEEE,2012:LS7c.5-1-LS7c.5-8.
- [4] 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.
- [5] HEYDT G T. Future renewable electrical energy delivery and management systems:energy reliability assessment of FREEDM systems [C]//IEEE PES General Meeting. Minneapolis,MN, USA:IEEE,2010:1-4.
- [6] MURA F,DE DONCKER R W. Design aspects of a Medium-Voltage Direct Current (MVDC) grid for a university campus [C]//8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. Jeju,Korea:IEEE,2011:2359-2366.
- [7] CHA S T,WU Q W,ØSTERGAARD J. A generic Danish distribution grid model for smart grid technology testing [C]//2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). Berlin,Germany:IEEE,2012:1-6.
- [8] Nerve Smart Systems ApS. Nerve switch technology [EB/OL]. [2021-01-12]. <https://nervesmartsystems.com>.
- [9] HIROSE K. DC power demonstrations in Japan [C]//8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. Jeju, Korea:IEEE,2011:242-247.
- [10] MATSUMOTO A,FUKUI A,TAKEDA T,et al. Development of 400-Vdc output rectifier for 400-Vdc power distribution system in telecom sites and data centers [C]//32nd International Telecommunications Energy Conference(INTELEC). Orlando,FL,USA:IEEE,2010:1-6.
- [11] CHO J,KIM H,CHO Y,et al. Demonstration of a DC microgrid with central operation strategies on an island [C]//2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM). Matsue,Japan:IEEE,2019:1-5.
- [12] 刘国伟,赵宇明,袁志昌,等. 深圳柔性直流配电示范工程技术方案研究[J]. 南方电网技术,2016,10(4):1-7.
LIU Guowei,ZHAO Yuming,YUAN Zhichang,et al. Study on demonstration project technical scheme of VSC-DC distribution system in Shenzhen[J]. Southern Power System Technology,2016,10(4):1-7.
- [13] 朱童,余占清,曾嵘,等. 全固态直流断路器在低压直流配电系统中的应用[J]. 南方电网技术,2016,10(4):50-56.
ZHU Tong,YU Zhanqing,ZENG Rong,et al. Application of all-solid-state circuit breaker to low-voltage DC distribution system[J]. Southern Power System Technology,2016,10(4):50-56.
- [14] 曾嵘,赵宇明,赵彪,等. 直流配用电关键技术研究与应用展望 [J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6790-6801.
ZENG Rong,ZHAO Yuming,ZHAO Biao,et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology [J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(23):6790-6801.
- [15] 屈鲁,余占清,陈政宇,等. 三端口混合式直流断路器的工程应用[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):141-146,154.
QU Lu,YU Zhanqing,CHEN Zhengyu,et al. Engineering application of three-terminal hybrid DC circuit breaker [J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(23):141-146,154.
- [16] 班国邦,徐玉韬. 国内首个五端柔性直流配电示范工程进入试运行(之二) [J]. 电力大数据,2018,21(10):93.
- [17] 苏麟,朱鹏飞,闫安心,等. 苏州中压直流配电网工程设计方案及仿真验证 [J]. 中国电力,2021,54(1):78-88.
SU Lin,ZHU Pengfei,YAN Anxin,et al. Design scheme and simulation verification of Suzhou medium voltage DC distribution project [J]. Electric Power,2021,54(1):78-88.
- [18] 黄强,陈亮,袁晓冬,等. 多端直流配电系统工程仿真分析及示范应用 [J]. 供用电,2018,35(6):24-32,82.
HUANG Qiang,CHEN Liang,YUAN Xiaodong,et al. Multi-terminal DC distribution system engineering simulation analysis and demonstration application [J]. Distribution & Utilization,2018,35(6):24-32,82.
- [19] 国家电网有限公司. 全国首个智能柔性直流配电网示范工程在杭州投运 [EB/OL]. [2021-01-13]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c9534332/content.html>.
- [20] 黄莹,郝思鹏,宋刚,等. 含三端口电力电子变压器的交直流混合微网分层优化 [J]. 电力自动化设备,2020,40(3):37-43.
HUANG Kun,HAO Sipeng,SONG Gang,et al. Layered optimization of AC/DC hybrid microgrid with three-port power electronic transformer [J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(3):37-43.
- [21] 张刚. 促进我国智能电网发展的政府责任分析 [D]. 北京:财政部财政科学研究所,2011.
ZHANG Gang. Analysis of government responsibility for promoting the development of smart grid in China [D]. Beijing: Institute of Fiscal Science,Ministry of Finance,2011.
- [22] 赵彪,赵宇明,王一振,等. 基于柔性中压直流配电的能源互联

- 网系统[J]. 中国电机工程学报,2015,35(19):4843-4851.
ZHAO Biao,ZHAO Yuming,WANG Yizhen, et al. Energy internet based on flexible medium-voltage DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(19):4843-4851.
- [23] LIU J N,LI Z X,YANG D C,et al. Introduction of EcoGrid and its enlightenment to China[C]//2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Xi'an,China: IEEE,2016:1-6.
- [24] 张祖平. 直流配电技术的发展前景[J]. 供用电,2015(2):52-53.
- [25] 王启同,张兆云,孙祺,等. 直流变压器研究综述[J]. 湖北电力,2020,44(6):18-26.
WANG Qitong,ZHANG Zhaoyun,SUN Ti,et al. A research review of DC transformer[J]. Hubei Electric Power,2020,44(6):18-26.
- [26] 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.
- [27] 胡竟竞,徐习东,裘鹏,等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电网技术,2014,38(4):844-852.
HU Jingjing,XU Xidong,QIU Peng,et al. A review of the

protection methods in DC distribution system[J]. Power System Technology,2014,38(4):844-852.

作者简介:



姜淞瀚

姜淞瀚(1997—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向为交直流系统的交互作用(**E-mail**:JSH970725@163.com);

彭克(1983—),男,山东淄博人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为交直流配电系统与综合能源系统等(**E-mail**:pengke@sdut.edu.cn);

徐丙垠(1961—),男,山东滕州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为智能配电网与配电自动化(**E-mail**:xuby@vip.163.com);

张新慧(1971—),女,山东莱阳人,教授,博士,主要研究方向为智能配电网自愈及自动化技术(**E-mail**:zhxh626@126.com);

刘盈杞(1997—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向为直流微电网小扰动(**E-mail**:liuyingqi146@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Current situation and prospect of demonstration projects of DC distribution system

JIANG Songhan,PENG Ke,XU Bingyin,ZHANG Xinhui,LIU Yingqi

(College of Electrical and Electronic Engineering,Shandong University of Technology,Zibo 255000,China)

Abstract:DC distributed system can more efficiently and reliably accept distributed power generation systems, energy storage units,electric vehicles and other DC power consumption loads,and it is one of the effective ways to achieve carbon peak and carbon neutral goals. The current situation of demonstration projects of DC distribution system at home and abroad is summarized,and the practical experiences of demonstration projects at home and abroad are analyzed. Project cases show that policy support is an important foundation for rapid development of DC distribution system,and the research of key technologies and equipment is the key factor to realize large-scale promotion of DC distribution system,and the development and promotion of DC distribution system are conducive to high-efficient utilization of energy and large-scale consumption of renewable energy. The suggestions for future development of DC distribution system in China are given by combining with the current development situation of DC distribution system.

Key words:DC distribution system;distributed power generation;renewable energy;demonstration project

附录:

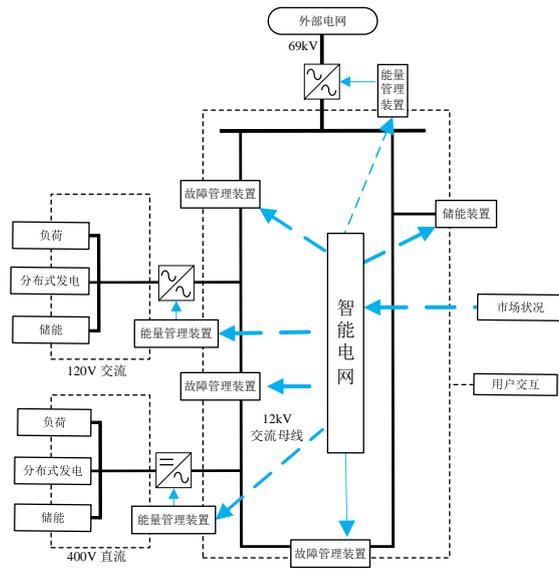


图 A1 FREEEDM 结构图

Fig.A1 Structural diagram of FREEEDM

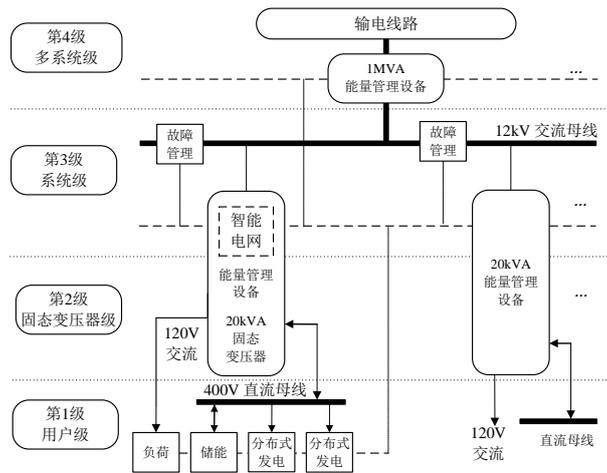


图 A2 FREEEDM 控制结构

Fig.A2 FREEEDM control structure

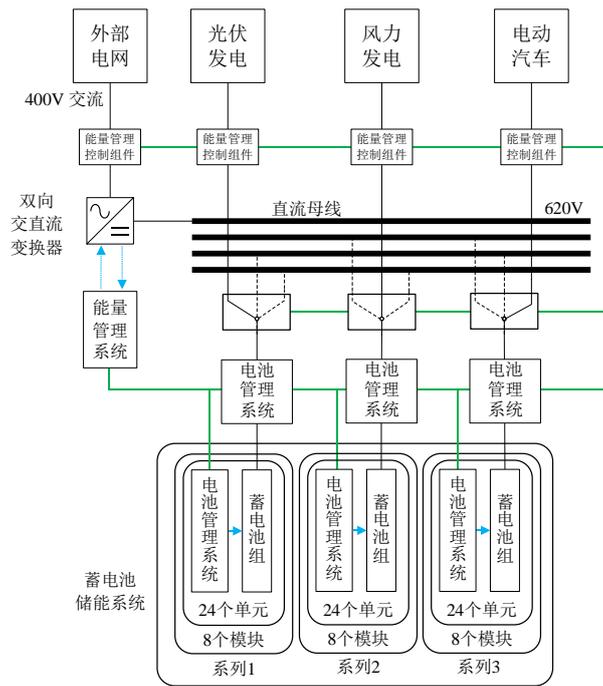


图 A3 博恩霍尔姆岛电力系统结构图

Fig.A3 Structural diagram of Bornholm Island power system

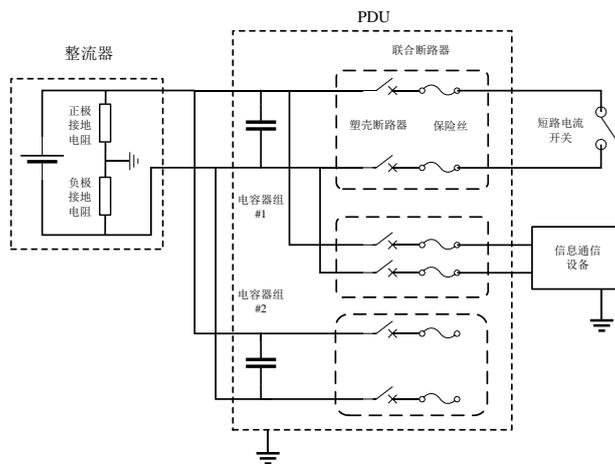


图 A4 仙台直流系统的 PDU 配置

Fig.A4 Configuration of PDU for Sendai DC system

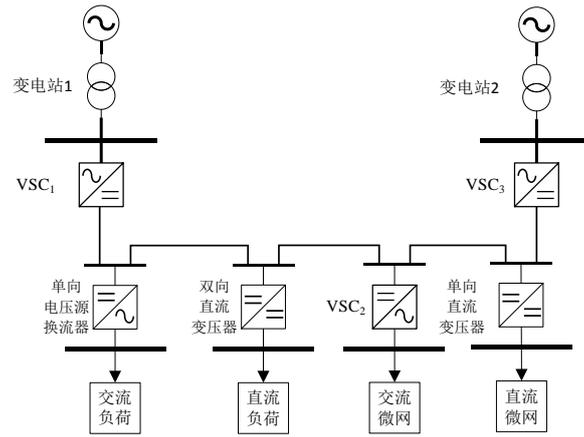


图 A5 深圳宝龙工业城示范工程

Fig.A5 Demonstration project of Shenzhen Baolong Industrial City

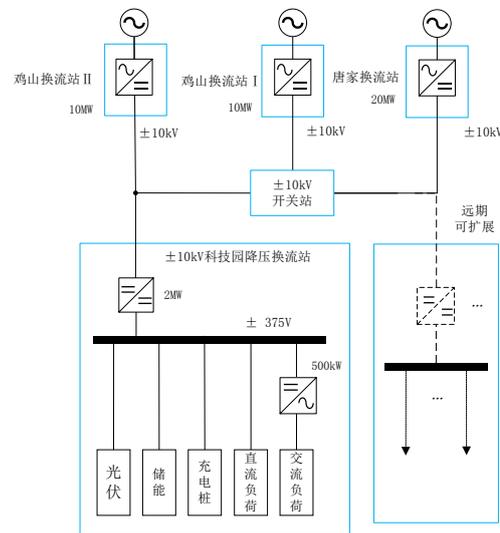


图 A6 珠海唐家湾示范工程

Fig.A6 Demonstration project of Zhuhai Tangjiawan