

· 专论与综述 ·

低压直流供电技术研究综述

吴盛军¹, 王益鑫², 李强¹, 费骏韬¹, 韩华春¹, 吕振华¹

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103

2. 盐城工学院, 江苏 盐城 224051)

摘要:随着电力电子技术的发展,直流供电技术呈现出技术和经济优势,在能源变革背景下具有很好的发展前景。本文首先对低压直流供电的发展情况和电压等级序列等进行了论述,随后总结分析了直流配电网协调控制、配网保护和电能质量控制等关键技术以及关键设备的研制情况,最后整理了国内外直流供电技术与工程应用情况,其中苏州工业园区主动配电网应用示范区是城市能源变革的重要探索。

关键词:直流供电; 直流配电网; 直流微电网; 供电电压等级

中图分类号: TM72

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)04-0001-08

0 引言

由于直流输电技术水平的限制,直流输配电比交流方式更难实现,现今的电力系统仍以交流输电为主。近年来,随着电力电子技术的发展,直流输配电面临的技术问题得到了逐步解决,直流系统的技术优势也已呈现。相比于交流系统,直流系统可以显著提高输配电运行水平,使输配电更简单、高效,并且降低了输配电成本^[1-2]。

在高电压等级侧,世界各地已经建设了100多套高压直流输电系统,其中长距离输电和近海输电工程占很大比例。高压直流输电系统具有更高的效率、更低的成本和更好的环境适应性。高压直流输电线路一般比同等容量的高压交流线路更细,且高压直流允许通过地下电缆进行远距离输电,减少了对环境的影响。

在低电压等级侧,直流配电为现代电力系统提供了一种提高用电效率、电能质量和可靠性的可行解决方案。目前直流配电的优势已在一些独立的电力系统中体现,如通信基站、数据中心、航空航天和海洋供电等系统,对这些独立电力系统来说,供电可靠性、用电效率和用电成本尤为重要。

在电力用户侧,光伏发电、储能电池和现代电力电子负载等直流终端大量接入,使得直流供电系统比交流系统更具优势。大部分可再生能源发电系统为直流电源,如光伏电池和燃料电池。虽然风力发电机是交流电机,但其需要经过交-直-交变换才能通过交流并网,而通过直流并网可以避免双变换,使风电系统并网更加方便和高效。电视、LED

灯、电话、电脑等现代电力电子负载内部都是直流负载,未来电动汽车的普及将会增加直流供电需求,促进直流供电发展^[3]。

可见,直流供电技术的发展,主要受直流技术优势的内在驱动,以及分布式能源和直流负荷发展的外在促进。本文首先介绍直流供电技术发展现状,然后分析直流供电的关键技术和设备研制情况,最后整理了直流供电的工程研究与应用情况。

1 直流供电技术现状

1.1 低压直流技术发展情况

19世纪80年代,安迪生电力照明公司利用“巨汉号”直流发电机给上千只白炽灯供电,形成了直流供电技术的雏形。受当时的技术水平限制,直流供电系统电压等级低,供电容量小,输送距离短,未能广泛应用。

20世纪中后期,随着电力电子功率器件的发展和应用,电力负载呈现多样性,同时计算机和通信设备对电源的安全和稳定性要求不断提高,极大地推动了直流配电技术的发展。到20世纪末,低压直流配电已成功应用于数据通信中心、航空、舰船和城市轨道交通等对供电质量要求较高的领域^[4]。

2000年后,能源危机和环境污染等问题凸显,可再生能源和节能环保受到世界各国的普遍关注。可再生能源多为直流电源,大部分节能设备是直流负载。直流电源和负载的增多促进了低压直流配电网的研究和应用,美国等西方发达国家纷纷开展了相关研究,提出了各自的直流配电网概念和发展目标。

2010年,美国弗吉尼亚理工大学 CPES (Center of Power Electronics Systems) 提出 SBN (sustainable

收稿日期:2018-03-21;修回日期:2018-04-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903300)

building and nanogrids)系统,该系统有 DC 380 V 和 DC 48 V 2 个电压等级。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^[5],英国、瑞士和意大利等国学者提出了类似功能的 UNIFLEX-PM(universal and flexible power management)系统^[6]。

国内,浙江大学承担的“863”项目“基于柔性直流的智能配电关键技术研究与应用”中,在直流配电网的基本框架、电源接口、换流器配置和经济性等方面开展了研究。国家电网公司也开展了直流供电技术研究,江苏省电科院已成立了交直流混联、风光储一体化的新能源及智能配网协调控制实验室,开展分布式新能源并网及交直流混联电网等方向的研究。以深圳供电局为主要单位成立的城市电网先进技术研究中心于 2012 年开始建设柔性直流配电技术实验室,开展柔性直流配电关键技术研究^[7-9]。

1.2 直流电压等级及供电标准

直流供电的电压等级及序列关系到电网安全性、经济性、负荷适应性等关键问题,对电网的未来发展有重要影响。通信、交通、船舶和航空等特殊行业直流负荷较小,对供电可靠性要求高,且有电能存储的需求,因此较早地采用了直流供电系统,其中通信、船舶业采用的电压等级较多。各行业直流电压等级如图 1 所示。通信行业采用 48 V, 240 V, 270 V, 336 V, 350 V, 380 V 电压等级,其中 240 V 为我国通信行业的标准电压等级;城市轨道交通采用 750 V, 1500 V, 3000 V 电压等级;大型船舶采用 750 V, 1500 V, 3000 V 等电压等级^[10];国外对信息数据中心建议采用 260~400 V 范围的电压供电;美国和日本提出采用 380 V 作为未来楼宇直流供电系统电压等级^[11]。

低压直流电压等级不是一个简单的选择,目前配电系统中使用不同的直流电压等级是因为当时缺乏相关标准,供电方案采用的电压等级基于行业设计标准制定。例如,汽车行业最初采用 12 V 直流供电,现在多用 24~48 V 直流供电以提高用电效率。数据中心由于耗电量较大,提高电压等级可减少配电损耗,通常采用 380~400 V 电压等级。

一些特殊行业的电压等级根据行业及负荷的特点制定,未能实现直流供电电压的规范化。随着 GB/T 35727—2017 中低压直流配电电压导则的颁布和实施,低压直流供电电压等级将逐步规范。该标准规范了中低压直流配电的电压等级、电压偏差

及相应的技术要求,将为直流配电产业带来可观的经济效益。其中,低压直流配电电压优选值为 1500 V, 750 V 和 220 V, 备选值为 1000 V, 600 V, 440 V, 400 V, 336 V, 240 V 和 110 V, 1500 V 及以下电压等级电压偏差为标称值的-20%~+5%。

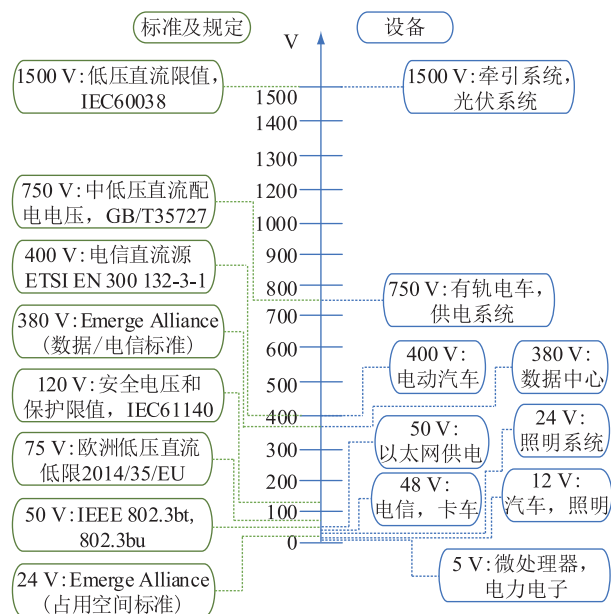


图 1 各行业直流电压等级

Fig.1 Various types of DC voltage levels

不同行业中低压直流供电电压等级序列如表 1 所示。

表 1 中低压直流供电系统电压等级序列

Tab.1 Medium and low voltage DC power supply system voltage level V

IEC 标准	电力 行业	通信 行业	城市轨道 交通	舰船 供电	航空 供电	楼宇 供电
48	110	48	600	750	270	380
110	220	240	750	1500		
125		270	1500	3000		
220		300	3000	6000		
250		320		12 000		
440		336		18 000		
600		350		24 000		
750		380		30 000		
1500		400				

国际标准方面,多个国际组织开展了直流电网相关研究工作,中国在低压直流标准制定方面起着重要作用。国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)成立了研究小组 TC-57,研究未来直流电网的管理和信息交换问题。自 2010 以来,国际大电网组织(International Council on Large Electric Systems, CIGRE)先后成立了十余个与柔性直流、直流电网相关的工作组,2015 年 7 月

中国电科院主导成立了 SC6.31“直流配电可行性研究”专题小组以研究和推广中压直流配电网技术,来自 13 个国家的专家参与到 SC6.31 直流配电的研究工作中^[6]。2017 年 1 月 IEC 设立了低压直流供电委员会(SyCLVDC),研究低压直流的应用场景、可行性和安全性等内容,同年 10 月低压直流配电网工作组(IEC TC8 WG9)成立,由江苏电科院主导召集,开展低压直流配网的标准化工作。

2 直流供电关键技术

2.1 直流配电网协调控制技术

直流配电网控制按系统级别可分为单元级、微网级和配网级^[12]。总得来说,目前电力电子变换器的单元级和直流微电网层面研究较多,配网层面的研究较少,需要在前两者基础上研究相关的直流配网控制理论和技术,以支撑直流配电网发展。

2.1.1 单元级控制

在直流配电网中,单元级控制主要是电力电子变换器的控制。根据微电网和配电网运行要求,各变换器对电压、电流和功率进行控制,以保证各单元及系统正常工作。目前,关于分布式电源及负载到低压配电母线间接口电路的研究较多,包括 AC/DC 变换器和 DC/DC 变换器,高低压配电母线之间接口电路的控制相对复杂。在现代柔性直流配电网领域中,基于高频隔离和链式变流技术的功率变换系统是研究热点。

2.1.2 微网级控制

直流配电网中微网级控制,主要可以分为母线电压控制和电能质量管理两类。

(1) 母线电压控制。直流微电网中,分布式电源和负载均通过变流器与直流母线并联,为了抑制环流并维持直流母线电压的稳定,需要对各并联变流器进行均流控制,常见的并联均流控制有集中控制、主从控制和无主从控制。

(2) 电能质量管理。直流微电网运行过程中可能出现分布式电源出力波动或负荷的瞬时接入、切除等瞬态事件,引起直流母线电压的闪变,影响正常供电,甚至引起保护控制系统误动作,导致整个直流微电网崩溃。为了保证系统中的功率支撑,常用超级电容、飞轮储能或超导储能等功率型储能器件对电能质量进行管理。为了保证系统中能量供需平衡,需要对系统中的分布式电源、储能及负荷进行优化配置和管理。

2.1.3 配网级控制

大量的直流微电网接入直流配电网后,合理的

直流配电网调度方案是保证配电系统运行稳定性、可靠性和经济性的关键,应综合微电网的运行控制、负荷需求和大电网交互情况进行分析。配网级控制研究包括分布式电源发电预测与负荷预测技术,基于直流的多端、多电压等级配电网运行控制技术,直流配电网经济优化调度方法以及直流配电网双向潮流最优控制技术等^[13-15]。

2.2 直流配电网保护技术

由于接入了多元化的分布式电源、负荷、储能,直流配电系统存在多种不同的运行状态。同时,直流配电网在电气特性及测量方式等根本性技术上跟交流配电网完全不同,没有低成本、可商业应用的大容量直流断路器,相关直流保护技术和装备既缺乏标准,也缺少运行经验。因此,直流配电系统保护配置面临诸多挑战。

2.2.1 直流配电系统故障类型

直流配电网中存在大量电力电子装置,且靠近用户终端,故障复杂多样,直流配电网除了存在短路、接地故障和绝缘下降不正常运行情况外,还存在交直流混接、直流环网等故障^[16],如表 2 所示。

表 2 中低压直流配电系统故障类型

Tab.2 Medium and low voltage DC distribution system fault type

故障类型	故障特点
短路故障	故障电流上升迅速,影响范围大,不存在过零点,直流断路器技术不成熟
接地故障	单个馈线支路接地故障会传播到母线及其他馈线支路,没有故障电流;在一极接地的情况下,另一极再接地会引起短路,有故障电流
绝缘下降	不及时处理,会发展为接地故障
直流环网	形成环流、异常放电或者对地电压异常,造成短路或接地故障
交直流混线	引起直流系统电压异常或接地故障

直流配电系统中出现直流环网故障将导致系统间形成环流、异常放电等现象,甚至造成短路或接地故障,若故障发生在不同的电压等级直流系统之间,环流和异常放电电流更大,后果将更为严重。

直流故障有其特有的电压电流特性,故障点很难查找,直流负荷对电压十分敏感,故障影响范围很广。除短路故障可以切除外,针对其他类型故障还没有完善的保护方案和系统,只有监测报警装置。

2.2.2 直流主动保护原理和组成

目前直流保护技术和装备在不同程度上实现了对直流系统的保护,但仅限于在故障发生后限制故障电流或通过保护设备将线路切除,属于被动应对,保护动作时间及切换隔离时间较长。对于电流

冲击承受能力较弱的电力电子设备和系统,以及没有明显故障电压电流特性的故障类型,相应的直流保护需要进一步研究和优化。

主动保护基于电力电子变换器的拓扑结构和控制原理,将保护动作“融于”变换器控制逻辑,基于多重保护策略,有效利用电力电子变换器的隔离单元和电力电子器件来实现直流配电系统中多种故障的自然隔离和严重故障回路的开断,防止轻微故障发展为严重故障,最大限度保障系统正常运行^[17]。

主动保护基于电力电子器件的自保护功能,还可实现过压保护、欠压保护、过流保护、过温保护等功能,无论在分布式发电侧、母线、负载侧发生上述故障时,保护均会优先动作,在微秒级时间内闭锁电力电子器件,停止功率输出,有效避免故障范围扩大。

主动保护可分为主动式短路故障保护、主动式接地故障保护、主动式绝缘下降报警、主动式直流环网保护、主动式交直流混接保护,如表3所示。

表3 主动保护的类型

Tab.3 Types of active protection system		
保护类型	实现方式	保护效果
短路故障保护	器件逻辑控制	数百微秒内关断短路电流
接地故障保护	变换器的隔离单元	主动隔离接地故障,将故障限制在故障支路,系统可正常运行
绝缘下降保护	绝缘监测	快速报警
环网保护	变换器的稳压功能	允许 I 段正- II 段正、I 段负- II 段负、I 段正负- II 段正负环网运行
交直流混接保护	变换器隔离单元	主动隔离交流电源,将交流电源限制在故障支路,系统可正常运行

2.2.3 直流配电网的保护设备

直流保护设备对防止故障范围扩大有重要意义。与交流系统不同,直流电流不存在自然过零点,因此开断直流电流相比交流要困难,增加了直流保护设备的研制难度。

目前,直流断路器的开断方法主要有增大电弧电压法、分段串接入限流电阻法、磁场控制气体放电管断流法、迭加振荡电流法、电流转移法等。基于这些方法,国内外对各容量等级的直流断路器进行了研究和测试。目前400 V以下的低压直流断路器已经工业化应用,而中高压直流断路器的研发虽取得了一些突破,但距工业化应用还有距离^[9]。另外,常用的交流型多功能接线板和插头应用于低压直流配电网时,接合与断开的瞬间会产生较大的电弧,带来安全隐患。因此,直流开关、直流插头和插

座的研发,是推动直流配电网普及应用的基础性工作^[18]。

2.3 直流配电网电能质量控制

直流配电网没有交流系统中的电压相位和频率问题,其电能质量主要指有功功率与电压平衡,典型电能质量问题有直流电压暂降与暂升、电压偏差、电压波动、直流调制谐波等^[19-20]。

(1) 直流电压暂降与暂升。直流配电网中微电源输出功率的突变、负荷的瞬间接入或脱落、微电网并网切换、交流侧系统电压中断等瞬态变化均可能引起直流馈线电压的暂降或暂升。电压暂降或暂升,不仅影响负荷设备的正常运行,还可能引起保护的误动作,导致整个直流系统的崩溃。

(2) 直流电压偏差与波动。有功不平衡是引起直流配电网电压偏差的根本原因,微电源出力、运行方式、网络结构以及负荷等发生变化都会产生不同程度的有功功率不平衡,引起配电网电压波动。以双极配电线路为例,不平衡供电会使得正负极母线与接地中性点之间的电压出现偏差。

(3) 直流调制谐波。直流配电网内多源多变换设备是多种类型的谐波源,会以不同的方式向电网注入谐波。AC/DC整流器根据桥臂数目的不同,在直流侧会产生不同频次的特征谐波。DC/DC变换器是谐波的另一主要来源,根据光伏直流输出电压、电流的谐波特性分析,其运行过程中会产生典型的低频谐波^[22]。随着电力电子变换器开关频率大幅提高,谐波发射范围向调制频率附近的高频带转移,产生相应的高频谐波。

直流配电网电能质量控制的方法主要有:利用附加设备进行针对性治理,利用微电源参与功率平衡调节和利用电力电子接口控制算法改善配电网运行环境。利用附加设备进行电能质量治理是最为直接的电能质量控制方式,通过配置隔离变压器、有源电能质量调节器等设备提高直流配电网的电能质量。利用储能系统,包括锂电池、超级电容、飞轮储能等,进行快速的功率平衡调节,保证直流母线电压的稳定。通过变流器控制策略和微电网控制模式优化,可以提高直流配电网的抗扰动能力,在电源电压和负载大范围变化时,保证系统的稳定运行。

3 直流供电关键设备

3.1 AC/DC变流器

AC/DC变流器是直流配电网的基础设备,其控制效能直接影响直流配电网的稳定运行和直流功

率的协调分配,变流器主要分为电流源型和电压源型两种。

电流源型变流器在高压远距离直流输电中具有明显技术优势,在直流输电工程中大量应用。但在直流配电网中,由于网络端数繁多,潮流反转频繁,给电流源型换流器的应用造成极大的不便^[21-22]。

随着电力电子器件及控制技术的进步,电压源型变流器迅速发展,三相两电平、多电平是目前工程中采用较多的变流器拓扑结构。三相两电平是最为简单的电压源变流器拓扑结构,三电平变流器可将输出电压等级提高一倍,二者都采用低电平数变流器结合开关器件串联方案。典型的三相多电平面电压源变流器结构包括箝位式多电平拓扑结构、级联式多电平拓扑结构及模块化多电平拓扑结构等,随着相关控制技术的研究进展,其响应速度、开关损耗、谐波特性和电压等级等运行指标不断改善。

3.2 电力电子变压器

电力电子变压器是一种具有变压器功能的电力电子变换器,集电气隔离、电压变换、能量传递等功能于一身,可实现交直流互联和接入功能。目前电力电子变压器已是国内外研究热点,在电路拓扑、控制以及样机研制上均取得了一定成果,各机构电力电子变压器指标如表4所示^[23]。总体来看,国外大容量样机端口少,场合特殊,功能单一,最高效率在95%左右。具有多功能多端口的电力电子变压器,因其环节多、控制复杂,效率和多端口灵活调控能力有待进一步提高。

表4 电力电子变压器指标对比

研究单位	指标	应用场景
ABB	1.2 MV·A,效率约95% 单相15 kV交流/1.5 kV直流	电力机车 无低压交流端口
GE、Cree	1 MV·A,效率约97% 单相13.8 kV交流/268 V交流	舰船 无低压直流端口
EPRI	50 kV·A,效率94.4%~97.5% 单相7.2 kV交流/240 V交流	快速充电 无低压直流端口
中科院 电工所	1 MV·A,效率小于93% 三相10 kV交流/750 V直流	直流配电网 无低压交流端口

3.3 低压直流断路器

直流断路器是关系直流配电网保护和运行的关键设备,对系统灵活运行、防止故障范围扩大有重大意义。直流断路器按照开断原理可分为机械式、全固态式和混合式3种^[24]。机械式直流断路器具有可靠性高、成本低、通态损耗小等优点,但开断速度慢、可控性不强;全固态式直流断路器的

优势在于动作速度快、可控性强,但现阶段成本较高,通态损耗较大;混合式直流断路器结合机械开关良好的静态特性与电力电子器件良好的动态性能,理论上具有开断时间短、通态损耗小、无需专用冷却设备等优点,但结构复杂、技术难度大、成本最高。在低电压等级范围,3种断路器成本相差不大,比较而言,全固态断路器可靠性高、可控性好、技术难度小,成为低压直流断路器的重要研究方向。

4 直流供电工程研究与应用

随着电力电子技术的发展,直流供用电通常与电力电子变流器共同出现,由于其高可控性、可靠性及经济性,现今涉及到直流供用电的工程通常与柔性直流、能源互联网相关。

4.1 国外典型工程研究

2011年美国北卡罗来纳大学提出了FREEDM系统结构,系统包含有400 V直流母线和120 V交流母线即插即用接口,提出了智能能量管理(intelligent energy management, IEM)装置,又称为能量路由器,用于连接12 kV中压交流配电母线和DC 400 V及AC 120 V低压配电母线。在FREEDM系统中,直流配电网和交流配电网均通过IEM与大电网连接,其中直流配电网用于集成分布式电源和直流负载等直流模块^[25]。

日本大阪大学2006年提出了一种双极直流微电网系统结构,系统通过6.6 kV配电网获取230 V交流电,经双向整流变换为±170 V直流电压。230 V交流母线上接入1台燃气轮机,直流母线上通过DC/DC变换器接入超级电容器、光伏电池等分布式电源。另外,直流母线通过单相逆变器接入单相交流负载,通过斩波电路接入直流负载。

芬兰Elenia Oy公司设计的交直流配电网典型结构见图2。该典型结构从中压交流20 kV线路上引出分支线,先通过20/0.63 kV配电变压器降压到低压交流0.63 kV,并经过整流换流器升压到低压直流900 V,再通过低压直流900 V配电线路输送给用户,在用户侧经过逆变换流器转换成低压交流500~600 V,再通过500~600/400 V低压隔离变压器输出交流400 V为终端用户供电。

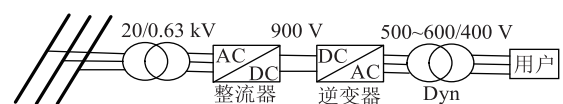


图2 芬兰交直流配电网典型结构
Fig.2 Typical structure of AC and DC distribution network in Finland

德国亚琛大学已经建成 10 kV 直流配电网实际工程,开展了中压直流环网配电系统、10 kV 中压直流配电在校园的试验性研究等 6 个直流配电研究专题。亚琛大学校园 10 kV 配电系统有 3.3 kV 交流母线和 5 kV, 1070 V 2 个电压等级直流母线,分别为交流负荷和直流负荷供电。该直流系统的供电半径约为 500 m,是采用两极结构的直流微电网系统^[6]。

4.2 国内典型工程

自 2009 年开始,国内相关单位逐步开展了直流配电网相关研究。清华大学提出了基于高频隔离和公共直流母线的电池储能电网接入系统,研究用于直流配电系统中的新一代功率变换技术。浙江大学研究了中、高压直流配电网的网络结构,提出

了放射状、环状与两端配电 3 种网络拓扑结构。

国家电网公司在直流供电技术研究的基础上,开展了苏州工业园区主动配电网应用示范区的建设,其中基于柔性直流互联的交直流混合主动配电网技术应用示范工程由 ± 20 kV 柔性直流互联系统和分布式光伏、分布式风电、微型燃气轮机、蓄电池、电动汽车充换电负荷、用户侧分布式储能、直流微电网等可控单元组成,总体架构见图 3。分布式电源通过配电房分别接入沙基诺、凤里街南、建屋产业园、建屋产业园 2 号 4 个开闭所。各开闭所 20 kV 交流母线均采用单母线三分段接线。每段母线分别通过 1 回线路接入电网, I 段、III 段母线均接有分布式电源和负荷。储能接于建屋产业园 2 号开闭所 I 段、III 段母线。

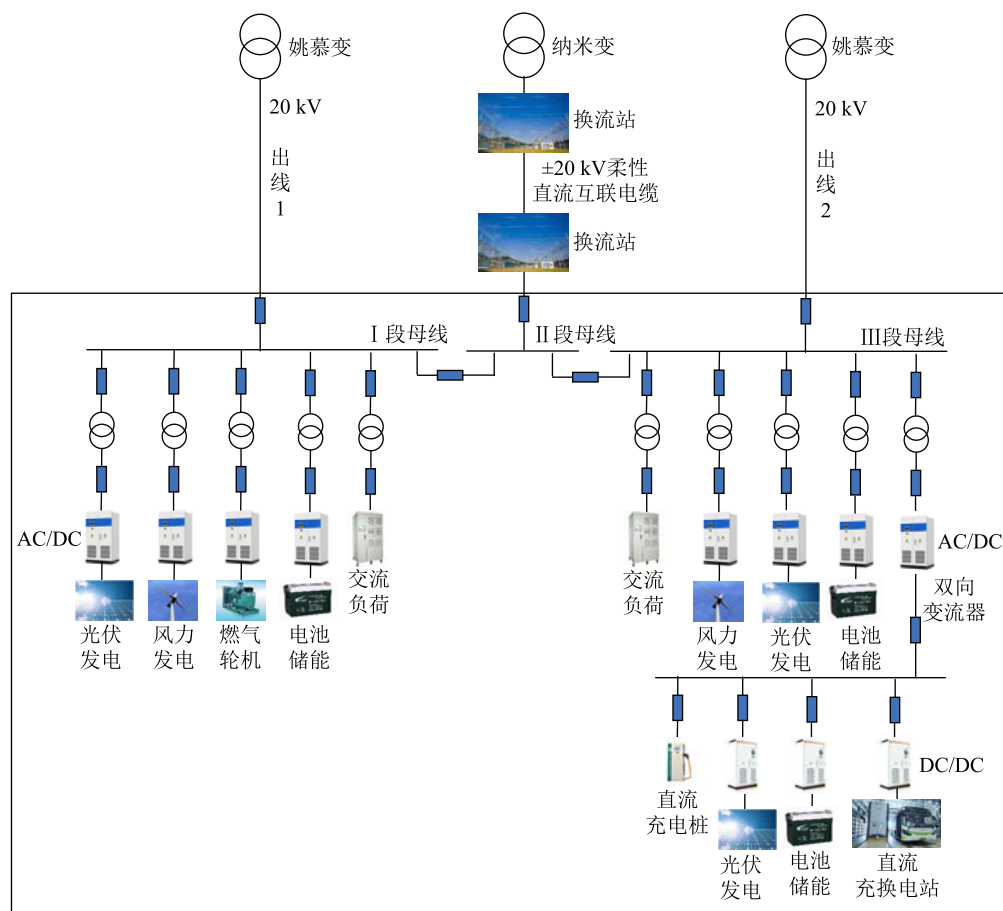


图3 苏州交直流混合主动配电网总体架构

Fig.3 AC and DC hybrid active distribution network structure in Suzhou

5 结语

直流配电网是推动智能电网建设,解决能源、环境危机的关键,利用直流配电网技术优势,可支持高渗透率分布式可再生能源消纳,提高配电系统的可靠性、稳定性和经济性,构建清洁低碳、安全高效的新型能源体系。本文介绍了直流供电技术发

展现状,直流电压等级及供电标准情况,重点分析了直流配电网协调控制、保护和电能质量控制等关键技术,以及AC/DC变流器、电力电子变压器和低压直流断路器等关键设备的研制情况,最后梳理了国内外直流供电工程研究与应用情况。

目前直流供电的研究仍处于试验探索阶段,直流供电标准规范正在加紧制定,还存在大量问题尚

未解决,供电技术研究集中在直流微电网层面,关键设备性能还不能满足应用需求,缺少实际工程应用。随着能源变革的发展和技术研究的深入,直流供电将凭借强大的技术和经济优势快速发展,对未来的能源结构产生巨大影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 刘 东,张 弘,王建春. 主动配电网技术研究现状综述[J]. 电力工程技术,2017,36(4):2-7,20.
LIU Dong,ZHANG Hong,WANG Jianchun. Review on the state of the art of active distribution network technology research[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(4):2-7,20.
- [4] 段大明,郭 阳,任 俊,等. 含分布式电源的低压直流配电网研究综述[J]. 东北电力大学学报,2015,35(6):1-7.
DUAN Shuangming,GUO Yang,REN Jun,et al. Review of DG integrated low voltage DC distribution network[J]. Journal of Northeast Electric Power University,2015,35(6):1-7.
- [5] ALEX H,MARIESA L C,GERALD T H,et al. The future renewable electric energy delivery and management system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE,2011,99(1):133-148.
- [6] 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):3391-3403,3358.
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):3391-3403,3358.
- [7] 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.
- [8] LAGO J,HELDWEIN M L. Operation and control-oriented modeling of a power converter for current balancing and stability improvement of DC active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(3):877-885.
- [9] 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.
- [10] 孔 力,裴 玮,叶 华,等. 交直流混合配电系统形态、控制与稳定性研究[J]. 电工电能新技术,2017,36(9):1-10.
KONG Li,PEI Wei,YE Hua,et al. Review of pattern, control and stability for hybrid AC/DC distribution power systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2017,36(9):1-10.
- [11] 王 丹,柳依然,梁 翔,等. 直流配电网电压等级序列研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):19-25.
WANG Dan,LIU Yiran,LIANG Xiang,et al. DC distribution network voltage class series[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):19-25.
- [12] 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.
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.
- [13] 裴 玮,杜 妍,李洪涛,等. 应对微网群大规模接入的互联和互动新方案及关键技术[J]. 高电压技术,2015,41(10):3193-3203.
PEI Wei,DU Yan,LI Hongtao,et al. Novel solution and key technology of interconnection and interaction for large scale microgrid cluster integration[J]. High Voltage Engineering,2015,41(10):3193-3203.
- [14] 张刘冬,丁 昊,袁晓冬,等. 考虑价格需求响应的主动配电网动态经济调度[J]. 电力工程技术,2017,36(4):31-35,42.
ZHANG Liudong,DING Hao,YUAN Xiaodong,et al. Active and reactive power coordinated economic dispatch of three-phase active distribution networks with consideration of price-based demand response[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(4):31-35,42.
- [15] 黄素娟,张晓青,孙保华,等. 主动配电网协调控制系统设计及应用[J]. 电力工程技术,2017,36(4):25-30.
HUANG Sujuan,ZHANG Xiaoqing,SUN Baohua,et al. Design and application of coordinated control system in active distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(4):25-30.
- [16] YU Bingwei,WANG Li,CHEN Wenbo. Analysis of ground fault in DC system and exploration to the countermeasures[C] // The 6th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection,Nanjing,China,2015.
- [17] 吴 鸣,刘海涛,陈文波,等. 中低压直流配电系统的主动保护研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(4):891-899.
WU Ming,LIU Haitao,CHEN Wenbo,et al. Research on active protection for MV/LV DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(4):891-899.
- [18] 马 钊,焦在滨,李 蕊. 直流配电网网络架构与关键技术[J]. 电网技术,2017,41(10):3348-3357.
MA Zhao,JIAO Zaibin,LI Rui. Network structures and key technologies of DC distribution systems[J]. Power System Technology,2017,41(10):3348-3357.
- [19] 陈鹏伟,肖湘宁,陶 顺. 直流微网电能质量问题探讨[J].

- 电力系统自动化,2016,40(10):148-158.
- CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, TAO Shun. Discussion on power quality problems for DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(10):148-158.
- [20] GALLO D, LANDI C, LUISO M. AC and DC power quality of photovoltaic system [C] // Instrumentation and Measurement Technology Conference,2012: 576-581.
- [21] 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.
- [22] 杨刚,杨奇逊,张涛,等. 微网中双向DC-AC变流器的性能优化控制[J]. 电工技术学报,2016,31(7):81-91.
- YANG Gang, YANG Qixun, ZHANG Tao, et al. Improvement control of dual-direction DC-AC converters for microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(7):81-91.
- [23] 陈磊,欧家祥,张秋雁,等. 电力电子变压器研究综述[J]. 电网与清洁能源,2015,31(12):36-42.
- CHEN Lei, OU Jiayang, ZHANG Qiuyan, et al. A review of studies on power electronic transformers[J]. Power System and Clean Energy,2015,31(12):36-42.
- [24] 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 in low-voltage DC distribution system[J]. Southern Power System Technology,2016,10(4):50-56.
- [25] HUANG A H, 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.

作者简介:



吴盛军

吴盛军(1988—),男,博士,研究方向为新能源发电及储能应用与主动配电网(E-mail:wsj333@163.com);

王益鑫(1999—),男,本科,研究方向为新能源发电及主动配电网;

李强(1981—),男,博士,高级工程师,研究方向为新能源发电及主动配电网。

Review of Low Voltage DC Power Supply Technology

WU Shengjun¹, WANG Yixin², LI Qiang¹, FEI Juntao¹, HAN Huachun¹, LYU Zhenhua¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: With the development of power electronics technology, the DC power distribution network presents its obvious advantage in technology and economic and has good prospects in the background of an energy revolution. First, the development of low-voltage DC power supply and voltage levels were discussed. Then, it summarizes and analyzes the key technologies of DC distribution network coordination control technology, protection technology and power quality control, as well as the development of key equipment. At last, the project research and application of DC power supply engineering in the world are summarized. The construction of active distribution network in Suzhou industrial park is an important exploration of urban energy transformation.

Key words: DC power supply; DC distribution grid; DC microgrid; supply voltage level

(编辑 胡昊明)