

直流配电网研究现状与发展

孙鹏飞, 贺春光, 邵 华, 刘雪飞, 安佳坤

(国网河北省电力公司经济技术研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 随着电力电子技术的进步, 相比交流配电网, 直流配电网在很多领域取得了技术和经济优势, 具有广阔的发展前景。介绍了直流配电网的发展、拓扑结构以及优势等, 总结了直流配电网研究中的电压选取、控制技术、保护与故障分析等关键问题和相关研究现状, 对比概括了交、直流配电系统的可靠性与经济性, 并对直流配电网的发展进行了展望。

关键词: 配电网; 直流配电网; 分布式电源; 控制; 电力设备; 保护; 故障分析; 可靠性; 经济性

中图分类号: TM 721

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.010

0 引言

近年来, 随着经济发展和社会进步, 电力负荷迅速增加, 用电需求以及对电能质量的要求不断增加。首先, 电力电子技术快速发展, 越来越多的光伏发电、风力发电以及电动汽车等分布式能源接入电网, 以及众多基于直流供电的家用电器的普及和工业变频技术的应用, 交流配电网面临着分布式新能源接入、负荷多样化, 以及网架结构庞杂、电能供应稳定性、高效性等方面的巨大挑战。与此同时, 由于国内城市规划与电力系统规划工作的长时间分离, 配电网结构与负荷发展不相适应, 使配电网的规划、发展及供电质量越来越不适应城市发展的需求。总之, 传统的配电网及供电方式已越来越不能满足快速发展的经济社会对其提出的更加环保、更加安全可靠、更加优质经济等诸多要求^[1-2]。

国外研究表明, 相对于交流配电网, 直流配电网在输送容量、系统可控性以及供电质量方面具有更加优越的性能, 可以有效降低电力电子变换器的使用频率, 提高供电质量, 充分协调分布式电源、多样性负荷与电网之间的矛盾, 发挥分布式能源的价值^[3-5]。本文首先对直流配电网的发展、网络结构、特点与优势进行详细的综述, 然后总结了目前直流配电网在电压选取、运行控制、保护以及关键设备等方面面临的挑战, 最后分析了直流配电网的可靠性与经济性运行的研究情况。

1 直流配电网的驱动力

1.1 直流供电技术的发展

在电力系统输配体系刚产生时, 直流作为最主要的电能传输方式首先得到了应用, 但由于当时的技术水平有限, 直流系统由于电压变换困难、传输容量小等原因被交流系统逐步取代。

20 世纪以来, 功率半导体器件的迅猛发展带动了电力电子技术的革新, 直流供电技术的优势逐步回归, 率先在数据通信中心、舰船供电以及电动汽车等特殊领域得到了应用与发展^[6-7]。

1.2 分布式电源发展的推动

20 世纪 70 年代以来, 能源短缺和环境污染问题越发严重, 分布式能源系统由于其灵活性和便于可再生能源应用等特点, 得到了广泛的关注。同时, 由于分布式电源的接入, 配电网由单纯的负荷变为有源网。

常见的分布式电源主要有光伏电池、风力发电机、燃料电池和储能等, 这些电源产生的电能为直流电或可经过简单变换后变为直流电, 因此分布式电源并入直流配电网将可以节省大量的换流环节。例如: 光伏发电产生的是直流电, 需要经过 DC/DC 和 DC/AC 2 级变换方可并入交流配电网, 如若并入直流配电网仅需 1 级 DC/DC 变换即可。表 1 列举了常见分布式电源并网所需要的换流环节。

表 1 分布式电源并网换流环节

Table 1 Conversion types of grid connection for distributed generations

分布式电源	并入交流配电网	并入直流配电网
光伏发电	DC/DC, DC/AC	DC/DC
风力发电	AC/DC, DC/AC	AC/DC
燃料电池	DC/DC, DC/AC	DC/DC
储能	DC/DC, DC/AC	DC/DC

1.3 多样性负荷发展的推动

随着电力电子技术的发展, 用电方式发生了显著变化, 如变频技术在空调、洗衣机、冰箱等产品中获得普遍应用, 在交流配电网中, 以上用电负荷需要经过 AC/DC、DC/AC 2 级变换, 而直流配电网中仅需要 DC/AC 变换即可实现变频。

除此之外, 大量智能化用电设备本质上都是基于直流电源供电的, 在交流配电网中, 需要额外增加 1 级 AC/DC 变换方可使用; 对于直流配电网而言, 不

需要转换即可供电,从而降低了中间损耗,节约成本。表 2 列举了常见负荷所需要的换流环节。

表 2 多样性负荷所需电能变换环节
Table 2 Conversion types of various loads

多样性负荷	交流配电网供电	直流配电网供电
空调	AC/DC、DC/AC	DC/AC
LED 照明	AC/DC	无
电动汽车	AC/DC	无
数码产品	AC/DC、DC/DC	DC/DC

1.4 配电网升级改造的需求

日趋成熟的城市发展建设对供电系统的电源建设和线路走廊的制约逐渐增多,而随着城镇化建设的大力推进,日益增加的城市规模和人口对配电网的供电容量和范围提出了更为严格的要求,有限的供电走廊限制了现有配电网的扩建与拓展,而越来越长的供电线路将会给配电网的安全可靠供电带来新的挑战。

2 直流配电网的网络架构

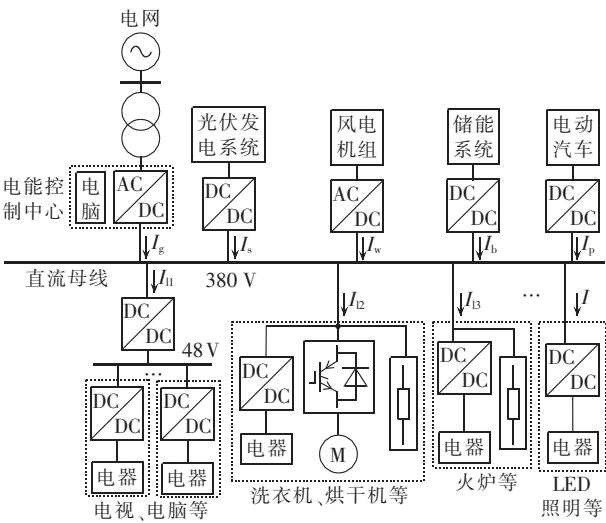
2.1 现有直流配电系统

目前,一些国家针对直流配电网已经开展了相关研究,提出了直流配电网的概念以及对应的拓扑结构和应用前景。
美国弗吉尼亚理工大学针对未来住宅和楼宇,提出了 SBN(Sustainable Building and Nanogrids)直流配电系统^[8],系统结构如图 1(a)所示,其结构包含 DC 380 V 和 DC 48 V 2 个直流电压等级,给不同的负载进行供电,随后发展为交直流分层连接的混合配电系统结构。

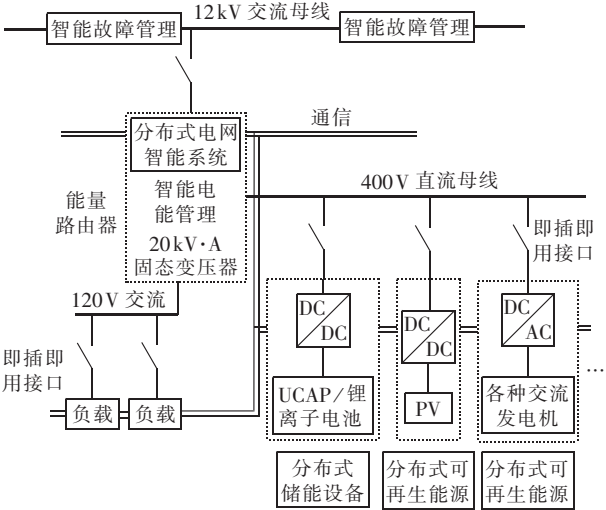
美国北卡罗来纳州立大学以舰船配电系统为例,讨论了直流配电在工业系统中的应用,提出了“the Future Renewable Electric Energy Delivery and Management(FREEDM)”系统结构^[9],如图 1(b)所示,包含 DC 400 V 和 AC 120 V 2 条母线即插即用接口,连接 12 kV 交流中压配电母线,通过能量路由器进行电能智能管理,其直流配电主要对分布式电源、储能和直流负载进行集成。

另外,日本及欧洲一些国家针对直流配电网也提出了相应的研究思路和拓扑结构^[10-11]。除此之外,在通信配电、舰船配电和地铁电力牵引等领域也有了直流配电系统的投入使用^[12]。下面针对几个典型结构方案进行介绍。

图 2 为通信直流配电系统结构图^[13],通信供电系统从交流配电网取电,经过电力电子整流变换为二级直流配电系统,分别对不同负载进行供电。图 3 为船舶直流配电系统结构^[14],上、下 2 条直流母线均由交流低压母线与蓄电池组供电,任何一条直流母



(a) SBN 直流配电系统



(b) FREEDM 配电系统结构

图 1 美国直流配电网结构研究示例
Fig.1 Examples of DC distribution network structure in USA

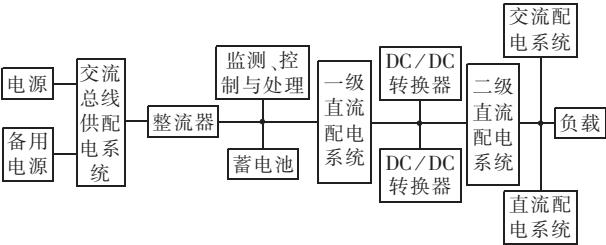


图 2 通信直流配电系统结构示意图
Fig.2 Structure of communication DC distribution system

线故障不能给予供电时,负荷可迅速切换由另一条直流母线供电,实现不间断供电。

地铁电力牵引与航天动力系统也有类似的直流配电系统应用,不再赘述。

2.2 直流配电网拓扑结构

与交流配电网类似,直流配电网从架构层次上也是多级配电网互联的网络,如可分为高压直流配

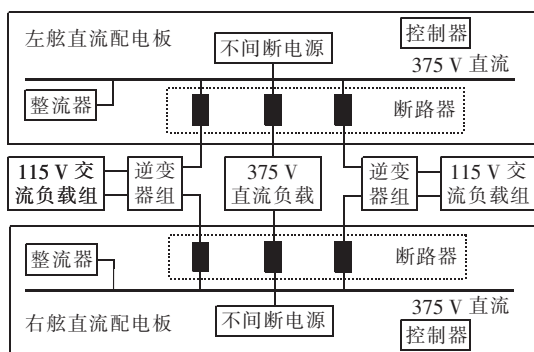


图 3 船舶直流配电系统结构图

Fig.3 Structure of ship DC distribution system

电网、中压直流配电网、低压直流配电网等。各级配电网面向用户的电压等级不同,其功能不尽相同,各级电网相互配合与补充。因此,直流配电网的拓扑结构也可分为多级直流母线的互联拓扑和单级母线的拓扑结构。不同的拓扑结构具有不同的供电可靠性、成本及控制复杂程度。在实际设计应用时,需要根据具体场合选择合适的拓扑结构。

2.2.1 多级母线互联

随着高压直流输电的发展,高压配电母线可以是交流,也可以是直流。随着电力电子技术的日趋成熟,高、低压配电母线间的连接,既可以采用工频变换方式,也可以采用高频变换的方式。当高压配电母线为交流母线时,首先采用工频变压器实现电压变换和电气隔离,然后采用电力电子变换器将交流变为直流;也可以直接通过高降压的电力电子变换器直接将交流变为直流,从而实现高、低压母线之间的电压匹配和功率变换。2 种变换方式见图 4^[15]。

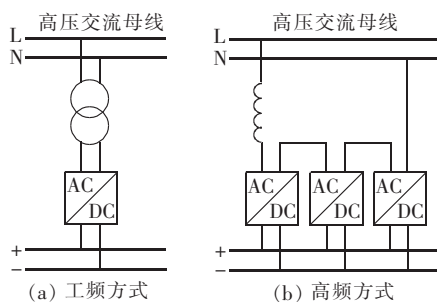


图 4 高压交流母线与低压直流母线的连接方式

Fig.4 Connection between HV AC bus and LV DC bus

当高压配电母线为直流母线时,可以通过电力电子变换器实现电能的交直流变换,通过工频变压器实现电压匹配和电压隔离;或者直接采用高频隔离的直流变流技术来实现高低压直流配电母线的功率变换。2 种变换方式如图 5 所示^[15]。

在工频变换方式中,工频变压器占地较大、质量笨重、损耗较大并且噪音很大,在一定程度上影响了功率密度和效率的提升,而高频变换方式体积小、效

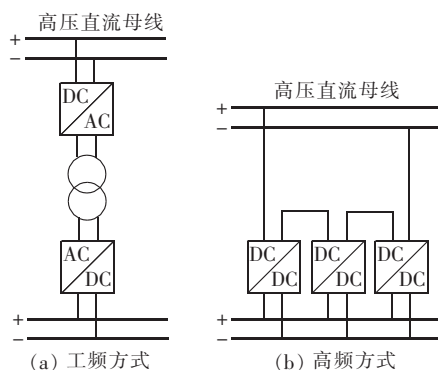


图 5 高压直流母线与低压直流母线的连接

Fig.5 Connection between HV DC bus and LV DC bus

率高,基于高频隔离的智能功率变换技术已经成为国内外学者的研究热点,在下一代的电压和功率变换方案中具有有良好的应用前景^[16]。

2.2.2 单级母线拓扑结构

与交流配电网相同,直流配电网的单级母线基本拓扑结构可以分为放射状、两端供电和环状^[5],如图 6 所示。不同结构具有不同的供电可靠性、成本及控制复杂程度。在实际设计时,需要根据具体的应用场合,选择合适的网络形式。

除此之外,部分学者提到了网状结构^[17],如图 7 所示,它是由 2 个或 2 个以上环网通过输配电线路互联的网络结构。在各个直流环形母线上,可以方便地接入各种电源和负荷,不同环形母线之间可以实现功率输送或双向功率交换,其控制复杂性更高,目前这种结构仍在研究中。

在放射状拓扑结构中,电能沿着唯一的路径向低压直流配电网或负载进行供电,或者与分布式电源进行电能转换。由于其结构简单,对控制保护的要求低,运行操作简便,故障识别及保护控制配合等相对容易。但是,当配电网中高一级的直流母线出现故障时,整个配电网都要停止工作,容易引起大面积停电事故,可靠性较低。

两端供电拓扑结构中,直流母线从输电侧获得电能,传递给负载,与分布式电源等双向流通。当一侧电源发生故障时,另一侧电源有足够的供电能力时,可以通过联络开关,将负荷投切至另一侧电源进行转供,不会造成整片区域的停电事故,供电可靠性提高。同时能够较快地对故障定位,缩短了故障抢修时间,减少了停电损失。

环状配电结构具有更高的供电可靠性,当环线中任意一点出现故障时,保护装置迅速动作,进行故障定位与隔离,其余配电部分按照两端供电结构进行运行,不用切断负荷,相比两端供电结构,省去了联络开关动作。环状配电结构对保护装置的配置要求很高,但由于供电可靠性高,恢复供电时间较短,逐渐成为配电网发展的趋势。

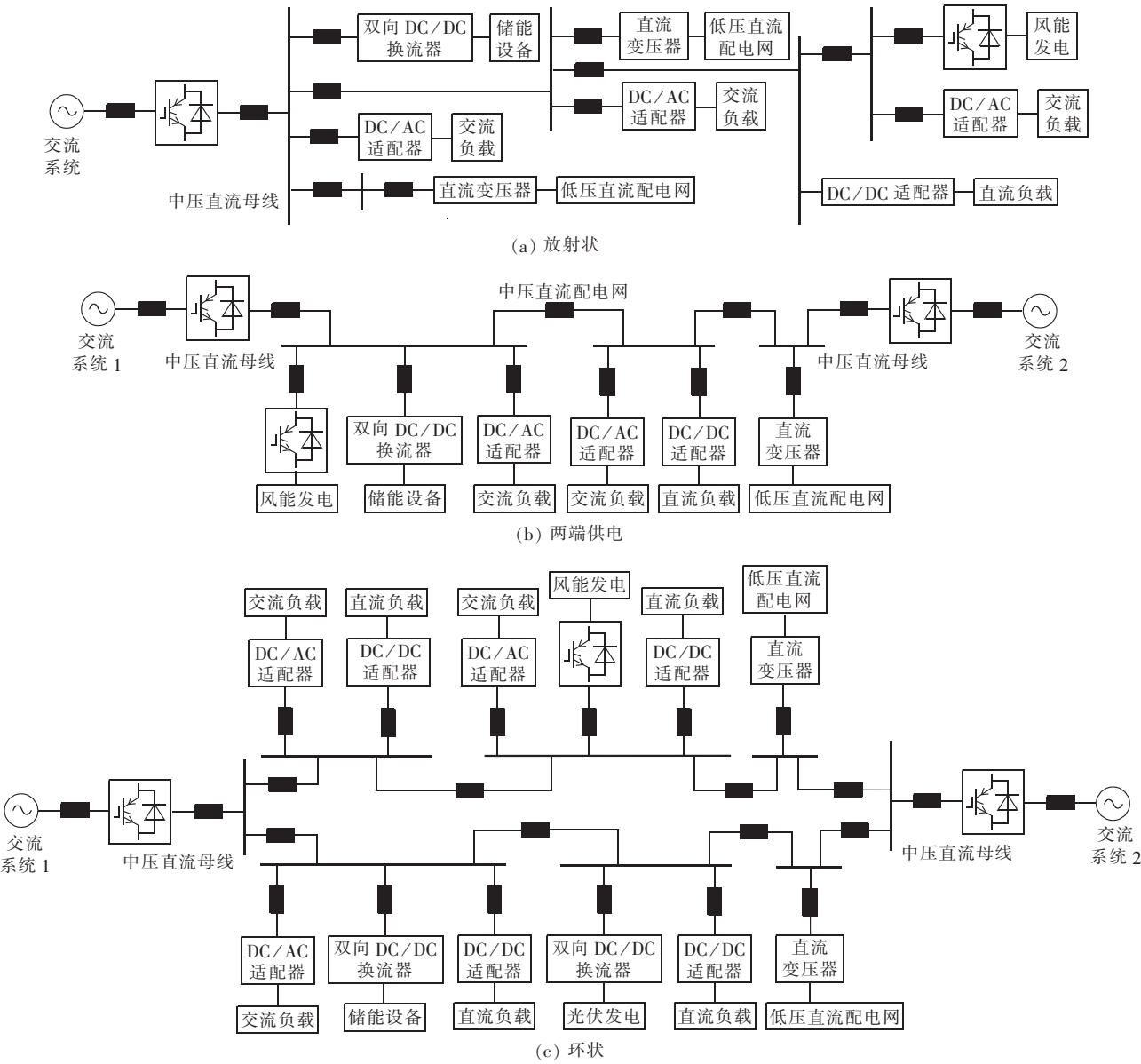


图 6 直流配电网的基本拓扑结构

Fig.6 Basic topology of DC distribution network

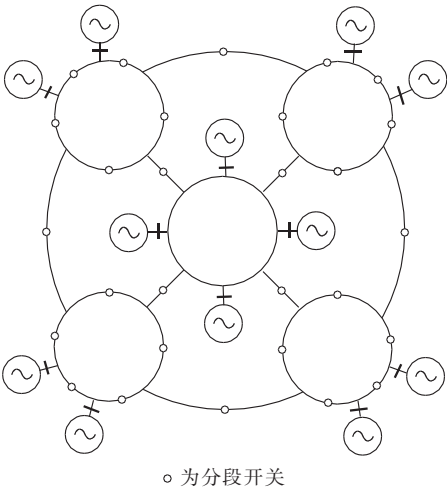


图 7 网状结构直流配电网

Fig.7 Mesh structure of DC distribution network

网状结构本质上是多个环形结构互联,具有极高的供电可靠性和更好的电压分布,降低了线路负载率,然而其结构的复杂性极大地增加了故障保护的难度,特别是在大量分布式能源接入的情况下。

3 直流配电网的特点与优势

3.1 传输容量大

在同样的线路建造费用或走廊空间的情况下,直流输电的容量是交流输电的 1.5 倍^[5]。同时,直流导线截面电流密度处处相同,不存在交流输电的集肤效应,导线截面利用充分,降低了线路损耗,提高了传输效率。

3.2 电能质量好

在交流配电网中,电能质量问题将会对半导体

芯片制造等高新行业的产品质量造成严重的影响,特别是冲击性负荷接入时造成的电压骤降等问题。在直流配电网中,随着分布式储能装置的接入,直流电网将会更加稳定,有效地解决电压闪变等问题。同时,直流配电网中的变流器还能起到静止无功补偿器的作用,补偿无功功率,稳定交流侧电压。

3.3 系统稳定性好

直流配电网不存在交流电网的频率稳定和无功功率的问题,同时线路中没有电抗的存在,直流配电网中电力电子装置具有故障隔离的能力,分布式储能的接入,也提高了配电网的故障穿越能力。相对于交流系统,直流系统在稳定性方面更有优势。

3.4 便于分布式能源接入

大量的风能、太阳能、储能等分布式可再生能源将会通过配电网并网发电,采用直流配电网,可再生分布式能源以及储能设备的接入得到简化。同时,电动汽车、服务器等基于直流供电的多样性负荷也便于从直流配电网取电,从而省略了接口变流器,提高了效率。

4 直流配电网的关键技术

4.1 电压等级选取

迄今为止,直流配电网的电压等级尚未确定。直流配电网的电压选择需要综合考虑网络的供电半径、设备的电气绝缘和保护、系统的设计难度与经济性指标。同时,电压等级的确定还涉及系统规划、设备生产和系统运行等诸多方面,科学合理的直流电压等级序列既要满足当前的需求,也要符合未来直流配电网的发展要求,这对于推广直流配电网具有深远的意义。目前,文献[18-19]主要针对低压直流配电网的电压等级进行讨论,其主要电压等级与应用对象如表 3 所示。文献[20]综合考虑了未来电网用户负荷密度、分布式电源接入和直流输配电技术发展等实际情况,提出了多级直流配电网相互配合的电压序列建议,其中高压配电电压为 $\pm 320\text{kV}$ 与 $\pm 150\text{kV}$,中压配电电压为 $\pm 30\text{kV}$ 与 $\pm 10\text{kV}$,低压配电电压为 $\pm 750\text{V}$ 、 $400\pm 200\text{V}$ 与 48V ,分别针对不同的负荷需求,并通过算例进行经济性评估。

表 3 低压直流配电网电压等级与应用对象
Table 3 Voltage levels and applications of LV DC distribution network

应用领域	电压等级/V	应用对象
家用直流系统	380	大型家电
	40	小型家电
数据中心供电系统	400	服务器
通信行业	240	通信系统

4.2 运行与控制

根据前文直流配电网拓扑结构的分析,直流配

电网存在多层级的直流母线、分布式电源和多样性负载,不同的直流母线之间、分布式电源与母线之间、多样性负载与母线之间都要通过电力电子变换器进行能量互动,在直流配电网不同的工作模式下,各个变换器的工作状态也不尽相同。为了保证直流配电网的正常运行,直流配电网的控制技术十分关键。参照交流系统中一级控制、二级控制和三级控制的三级架构层次以及直流微电网的控制架构,结合直流配电网底层复杂、上层简化的自身特点,从控制目标、协调机制与响应时间考虑,直流配电网的控制可以分为系统级、微网级和单元级 3 个层次,分别针对配电网调度层次、直流母线层次和电力电子变换器层次的能量转换进行控制^[21-22]。各个控制层次的控制目标、协调机制与时间尺度如表 4 所示。图 8 为直流微电网典型三层次的控制系统框图。

表 4 控制层次功能定义
Table 4 Function definition of control layers

控制层次	控制目标	协调机制	时间尺度/ms
系统级	调度优化	中央控制中心	>100
微网级	功率平衡	直流母线电压	10~100
单元级	电流/功率	分散控制	1~10

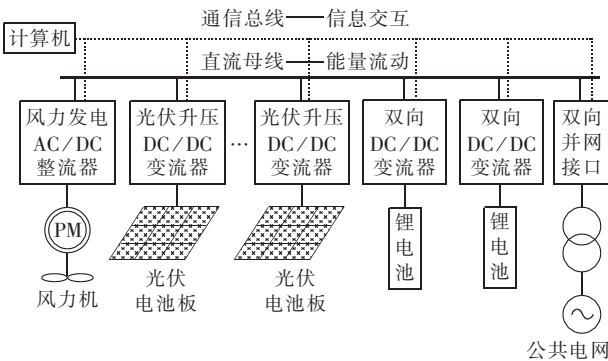


图 8 直流微电网三级控制系统框图

Fig.8 Three-layer control system of DC microgrid

(1) 系统级。

系统级控制为直流配电网总体控制,与输电网或其他交/直流配电网进行交互连接,实时交换潮流数据信息。这一过程相当复杂,包含多端多电压等级的直流配电网运行控制技术、直流配电网对大电网稳定性的影响、交直流配电系统的优化调度方法等。

目前针对直流配电网的系统级控制技术研究较少,尚未有完善的控制理论和方法,需要进行相关技术的研究,为直流配电网的稳定运行提供保障。

(2) 微网级。

直流配电网的控制主要集中在直流微电网的研究层面,由于直流配电网中,供电电源种类繁多,可控程度不同,同时配电网中的微电网部分还存在并

网运行与孤岛运行、并网/孤岛切换过渡以及黑启动等多种运行状态,因此,要求直流配电网中的各供电电源与负载进行协调控制,根据配电网的不同工作状态向各变流器分配母线控制任务,以维持母线电压稳定和系统功率的平衡。

母线电压控制的目的是通过合理的协调控制机制,有效地调整并联在直流母线上的电源、储能和负载接口变流器与直流母线之间的功率交换,确保直流母线电压在一定范围之内。常用的控制方法有集中控制、主从控制和无主从控制^[23]。

集中控制是在并联系统中设置一个集中控制单元,并联单元根据集中控制单元提供的信号来调整各自输出,以保证输出信号一致,该方法的最大问题是一旦集中控制出现故障,系统将无法运行;主从控制是在并联的系统中选取一个单元作为主控模块,其他模块按照主控模块的输出进行调整,相对于集中控制而言,可靠性有所提高;无主从控制是各模块独立地检测和控制本模块在系统中的工作状态实现模块间功率均分,分为有互联线和无互联线控制方式。有互联线控制方式中,通过一条控制互联线传递各模块的电流、功率等信息,互联线虽然能够简化控制,但容易引发干扰,降低可靠性,同时限制了并联模块的位置。无互联线控制即外特性下垂控制,模块间无信息传递,各模块利用自身的反馈信号改变输出阻抗,使外特性的斜率趋于一致,达到均流,该方法各模块完全隔离,可靠性高,但控制相对困难,动态效果较差。下垂控制最符合分布式系统的控制,成为主要的发展方向。

为了保证直流配电网中能量的工序平衡,除了保持直流母线电压稳定之外,还需要对直流配电网中的分布式电源、储能以及各类负载进行能量管理。如文献[24]提出了一种含电动汽车充电站的直流微电网运行控制逻辑,若直流微电网中分布式电源的发电总功率大于负载总需求功率时,优先向充电站蓄电池充电,当额外发电功率依旧大于蓄电池所需的功率时,直流微电网向交流系统输出功率;当分布式电源的发电总功率小于负载总需求功率时,充电站蓄电池优先放电满足负载需求,当蓄电池不足以提供负载功率时,交流系统向直流微电网输送功率,维持直流微电网的功率平衡。其控制流程见图 9。

(3) 单元级。

在直流配电网中,电力电子变换器主要包括 2 类,一是分布式电源、负载和储能等的接口变换器,根据分布式电源、负载和储能类型以及配电网不同的工作模式,各接口变换器需要对自身的电压、电流或功率进行控制,以保证各单元正常工作。目前,分布式电源、负载等到直流配电母线的接口变换器的

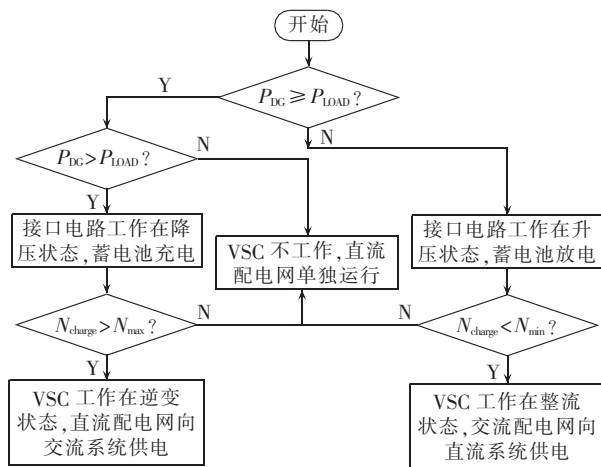


图 9 含电动汽车充电站的直流微电网运行控制逻辑

Fig.9 Flowchart of control strategy for DC microgrid with electric vehicle charging station

研究较多,已相对成熟,并且已经得到了工业化应用^[25]。二是高、低压母线之间的电压变换器,包括高压交流母线到低压直流母线的整流器和高压直流母线到低压直流母线的直流变压器。对于整流器而言,基于工频变换的整流器技术已相对成熟;基于多电平技术的大容量变换器及其相关控制,目前国内多个大学和研究机构也已经开展相关研究^[26]。除此之外,基于新型电力电子器件,美国北卡罗来纳州立大学利用 10kV 的 SiC 器件研制了 270kV·A 高频隔离链式变流器样机,在其 FREEDM 系统中得到了应用^[27]。对于直流变压器而言,小容量、低电压的 DC/DC 变换器技术已经成熟,但在电压和功率等级提升方面受到了诸多的限制,相应的拓扑结构和控制技术仍在深入研究之中,其中基于双主动全桥 DAB(Dual Active Bridge)的直流变压器 DCSST(DC Solid State Transformer)受到了较多的关注。采用高压侧串联提高电压等级、低压侧并联提高功率等级的方法,取得了一定成果^[28]。

4.3 关键设备

直流配电网的关键设备是直流配电网的有力支撑与保障,在现代直流配电网的建设中,需要对如下关键设备进行研究开发^[29]。

(1)直流变压器。与交流配电网类似,直流配电网需要通过电力电子设备实现直流电压的转换,而这种 DC/DC 变压器应具备如下特点。首先,直流变压器要实现高、低直流电压的转换。以现有配电网为例,典型配电变压器需要将 10 kV 转换为 380 V,降压比超过 26:1,因此直流变压器要具备高降(升)压的能力;其次,直流变压器的容量要大,常规的配电变电站能够承载上 MV·A 的功率,在直流配电网中,直流变压器同样需要具备同等的容量。此外,直流配电网中不同电压等级之间的能量传输

方向不定,直流变压器也需要具备能量双向流动的能力。

(2)大功率 AC/DC 变换器。为实现直流配电网与交流输电网相连,需要在直流配电网与交流电网接口配置 AC/DC 变换器。与直流变压器类似,AC/DC 变换器同样需要具备大容量传送能力、高电压变比、能量双向流动的能力。

(3)直流断路器。直流断路器是直流配电网发展的基础,它起着故障隔离的作用,对直流配电网的安全运行非常关键。目前,400V 以下的低压断路器已经逐步实现工业化,可以在低压直流配电网中得到应用,而中、高压直流断路器的研发也取得了一些突破。2012 年 11 月,ABB 公司将机械动力学与电力电子设备结合,宣称开发了世界上第一台高压直流断路器,能够在 5 ms 内断开 9 kA 的电流^[30]。今后,随着电力电子器件技术的进步,将会有性能更优越的直流断路器问世。

(4)直流开关接插件。在直流低压配电网中,直流电的接合与断开的瞬间会产生较大的电弧,现有的交流开关、插座接头等不能直接应用。因此,作为推动直流配电网普及的基础性工作,直流开关、直流插头和插座的研究,将会成为一个值得研究的方向。

4.4 保护与故障诊断

直流配电网的保护主要分为保护设备、保护策略与故障诊断 3 个方面。保护设备主要有熔断器、隔离开关、直流断路器和电力电子模块 PEBB (Power Electronic Building Block) 4 类,随着直流断路器技术的进步,熔断器和隔离开关已经逐步被直流断路器所取代,机械式直流断路器已经在低电压等级的直流配电工程中得到广泛应用,固态直流断路器由于分断速度快、工作频率高、无电弧、可靠性高等优点得到广泛关注^[31],混合式直流断路器通过机械开关导通电流,固态电力电子器件分断电流,兼顾机械式直流断路器良好的静态特性和固态直流断路器的动态特性。随着半导体电力电子器件的发展,固态直流断路器和混合式直流断路器将会在直流配电系统中得到普遍应用。除此之外,基于模块化的 PEBB 技术由于其灵活性与便捷性,在电力系统继电保护领域得到了拓展,并且在舰船直流配电中实现了限制短路电流、快速隔离故障的保护功能。随着技术的发展,PEBB 技术在直流配电系统中具有一定的应用前景。

在保护策略方面,可以划分为含直流断路器的保护措施与不含直流断路器的保护措施。基于直流断路器的保护是利用直流断路器直接清除故障。如文献[32]中提出的多端直流配电系统保护方案,利用直流断路器配合继电器快速检测并隔离故障;同

时使用电力电子变换器和 PEBB 设备限制、中断故障电流,进一步提高保护系统性能。不基于直流断路器的保护主要采用交流断路器和直流侧隔离开关配合,使用直流电流突变、直流功率或直流功率突变等方法检测是否发生直流故障,发生故障后跳开所有交流侧断路器断开故障电流,判断故障所在线路后跳开故障线路两端隔离开关实现故障隔离后,交流侧断路器重合实现无故障系统重新供电^[33]。

在故障诊断方面,可以借鉴多端高压柔性直流输电系统故障分析与判断方面的研究,通过建模与仿真提取出交流侧故障对直流侧系统的影响、不同故障类型下故障电流的特征等指标,依据不同故障指标进行故障分析与判断^[34]。如文献[35]在辐射状舰船直流系统中,使用小波分析从换流器开关动作固有的噪声分量中提取系统故障特征,进而进行识别与故障定位。文献[36]利用分区方法,将直流配电网分为直流线路侧、交流电网侧、交流负载侧与直流负载侧 4 个部分,通过对交、直流侧的电压、电流等本地信息进行监视,提出了一套直流配电网的保护方案,但该方案仅能对故障发生的层级进行判断,不能完成准确的故障定位。

作为直流配电网运行的关键问题之一,直流配电网的保护与故障诊断尚不成熟,需要综合考虑直流配电网接地方式、直流断路器应用、分布式能源接入以及电力电子装置的限流等问题,同时结合通信系统,构建灵活可靠的直流配电网保护系统。

5 直流配电网的可靠性与经济性

5.1 可靠性评估

相比于交流配电网,直流配电网对潮流可控,可以闭环运行,解决了交流配电网中“环网设计,开环运行”的供电方式,有利于配电网可靠性的提高,然而直流配电网中直流变压器、直流断路器以及大量的电力电子变流器的引入,增加了故障发生率,因此在可靠性方面,何种配电方式拥有更高的可靠性尚无明确定论。

文献[37]针对手拉式交直流配电网结构,利用最小割集法对比分析了现有技术条件下交、直流配电网的可靠性,研究表明,直流断路器的使用能够大幅增加直流配电网的可靠性,同时直流断路器的故障率也是影响直流配电网可靠性的最大因素。文献[12]根据现有直流配电设备的参数对直流配电网进行计算,通过与交流系统可靠性的对比分析,对电力电子器件及装置在故障率方面提出了限制要求。

综合表明,在现有的技术条件下,直流配电网的可靠性低于交流配电网,主要归结于直流断路器和电力电子装置的故障率较高,提高以上二者的可靠

性是提高直流配电网可靠性最有效的途径。随着电力电子技术的发展,直流配电网的可靠性将有可能逐步接近甚至超越交流配电网。

5.2 经济性评估

与交流配电网相比较,基于直流的配电网在输送容量、可控性以及提高供电质量等方面具有更好的性能,在面临未来直流配电网工程化应用方面,对其经济性指标进行评估分析显得越发必要。直流配电网的经济性评估主要考虑在相同的拓扑结构下,交流配电网与直流配电网的最大传输容量均可满足未来负荷的供电需求的前提下,对交、直流配电网的建设投资成本以及传输损耗等进行对比分析。建设投资成本主要包括换流站与变电站、直流电缆与交流电缆、直流断路器与交流断路器和直流变压器与交流变压器等的工程造价,传输效率主要考虑交直流换流器、交直流电缆和交直流配电网的传输损耗率等指标。

关于特高压交直流输电系统的经济性分析的相关研究已有很多^[38],但对交直流配电网的经济性分析的研究对比却很少见。配电网的传输电压与传输功率对配电网经济性具有较大的影响,有必要对二者的影响进行分析。文献^[39]在满足负荷的供电需求的前提下对 AC 10 kV、DC ± 7.5 kV 和 DC ± 15 kV 3 种电压等级的配电网的投资成本与传输损耗进行计算,进而比较了三者的经济性。研究表明,由于电力电子装置的造价较高,在线路拓扑与负载容量相同的情况下直流配电网的投资成本将高于交流配电网;直流配电网的传输损耗率明显低于交流配电网,并且直流负载的比例越大,优势越明显。3 种电压等级的配电网的建设与运行总费用对比如图 10 所示。随着运行年限的增加,直流配电网的经济性越明显。

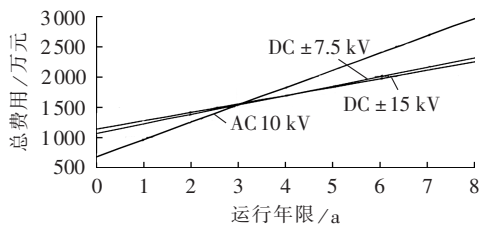


图 10 配电网建设与运行总费用曲线

Fig.10 General cost of construction and operation for different distribution networks

值得注意的是,经济性比较的结果可能随配电网线路拓扑结构与负载种类的不同而发生变化,需根据具体情况进行综合分析。到目前为止,直流配电网的相关技术研究仍在逐步深入,随着电力电子技术的发展,直流配电网的投资成本与传输损耗将会不断降低,直流配电网的市场潜力与研究价值仍是巨大的。

6 结论

本文基于直流配电网的应用前景,对直流配电网的发展、直流配电网的拓扑结构、直流配电网的优势进行了总结,介绍了直流配电网面临的关键技术,并就当前交、直流配电网的可靠性与经济性的研究情况进行了概括。目前国内外基于直流微电网的研究成果对直流配电网开展了探索与试验,但仍处于初步阶段,大量的理论及技术问题亟需解决。

a. 研究直流配电网的网络结构、电压等级选取等基本问题是推动直流配电网发展的基础;

b. 研究低成本、高效率的电能量变换与控制技术,大容量商业化的直流断路器等开关设备以及高可靠性的保护与故障诊断系统是推动直流配电网发展的关键;

c. 研究含高渗透率分布式能源的直流配电系统的多时间尺度协调控制调度方法是推动直流配电网发展的重点。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 温家良,吴锐,彭畅,等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):7-12.
WEN Jialiang,WU Rui,PENG Chang,et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(13):7-12.
- [3] XU C D,CHENG K W E. A survey of distributed power system—AC versus DC distributed power system[C]//International Conference on Power Electronics Systems and Applications. Hong Kong,China;IEEE,2011:1-12.
- [4] WANG F,PEI Y,BOROYEVICH D,et al. AC vs. DC distribution for off-shore power delivery[C]//Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Orlando,Florida,USA;IEEE,2008:2113-2118.
- [5] 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.
- [6] 徐通,王育飞,张宇,等. 直流配电网发展现状与应用前景分析[J]. 华东电力,2014,42(6):1069-1074.
XU Tong,WANG Yufei,ZHANG Yu,et al. Development status and application future of DC distribution network[J]. East China Electric Power,2014,42(6):1069-1074.
- [7] 王森,刘勇. 直流配电网及其在舰船区域配电的应用[J]. 船电技术,2014,34(11):77-80.
WANG Sen,LIU Yong. DC power distribution network and its applications to zonal power distribution of warships[J]. Marine Electric & Electronic Technology,2014,34(11):77-80.

- [8] BOROYEVICH D, CVETKOVIC I, DONG D, et al. Future electro-nic power distribution systems: a contemplative view[C]// International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Basov, Russia: IEEE, 2010: 1369-1380.
- [9] 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.
- [10] ITO Y, ZHONG Q Y, AKAGI H. DC microgrid based distribution power generation system[C]// International Power Electronics and Motion Control Conference. Xi'an, China: IEEE, 2004: 1740-1745.
- [11] BRENNAN M, TIRONI E, UBEZIO G. Proposal of a local DC distribution network with distributed energy resources[C]// International Conference on Harmonics and Quality of Power. New York, USA: IEEE, 2004: 397-402.
- [12] 李可. 直流配电网拓扑结构与可靠性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
LI Ke. Study on topology and reliability in DC distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [13] YAMASHITA T, MUROYAMA S, FURUBO S, et al. 270 V DC system—a highly efficient and reliable power supply system for both telecom and datacom systems[C]// International Telecommunication Energy Conference. Copenhagen, Kongeriget Danmark: IEEE, 1999: 1-3.
- [14] MOMOH J A, KADDAH S S, SALAWU W. Security assessment of DC zonal naval-ship power system[C]// Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Halifax, United Kingdom: IEEE, 2001: 206-212.
- [15] 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.
- [16] INOUE S, AKAGI H. A bidirectional isolated DC-DC converter as a core circuit of the next-generation medium-voltage power conversion system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 535-542.
- [17] 肖立业, 林良真, 徐铭铭, 等. 未来电网——多层次直流环形电网与“云电力”[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(4): 64-69.
XIAO Liye, LIN Liangzhen, XU Mingming, et al. Future power grid—multiple-level DC loop grid and “cloud powering”[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2011, 30(4): 64-69.
- [18] SANNINO A, POSTIGLIONE G, BOLLEN M H J. Feasibility of a DC network for commercial facilities[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2014, 61(4): 1669-1678.
- [19] 蔡瀛森. 直流配电电压等级影响因素与评价指标研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
CAI Yingmiao. Research on influencing factors and evaluation indexes of DC distribution voltage grade[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [20] 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.
- [21] 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): 139-145.
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): 139-145.
- [22] 李武华, 顾云杰, 王宇翔, 等. 新能源直流微网的控制架构与层次划分[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 156-163.
LI Wuhua, GU Yunjie, WANG Yuxiang, et al. Control architecture and hierarchy division for renewable energy DC micro grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 156-163.
- [23] 崔福博, 郭剑波, 荆平, 等. 直流配电技术综述[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 556-564.
CUI Fubo, GUO Jianbo, JING Ping, et al. A review of DC power distribution technology[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 556-564.
- [24] 朱克平, 江道灼, 胡鹏飞. 含电动汽车充电站的新型直流配电网研究[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 35-41.
ZHU Keping, JIANG Daozhuo, HU Pengfei. Study on a new type of DC distribution network containing electric vehicle charge station[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 35-41.
- [25] LI W, GU Y, LUO H, et al. Topology review and derivation methodology of single-phase transformerless photovoltaic inverters for leakage current suppression[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4537-4551.
- [26] 徐帅, 张建忠. 多电平电压源型逆变器的容错技术综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 39-50.
XU Shuai, ZHANG Jianzhong. Overview of fault-tolerant techniques for multilevel voltage source inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 39-50.
- [27] YANG L, ZHAO T, WANG J, et al. Design and analysis of a 270kW five-level DC/DC converter for solid state transformer using 10kV SiC power devices[C]// IEEE Power Electronics Specialists Conference. Orlando, Florida, USA: IEEE, 2007: 245-251.
- [28] 赵彪, 宋强, 刘文华, 等. 用于柔性直流配电的高频链直流固态变压器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4295-4303.
ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. High-frequency-link DC solid state transformers for flexible DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4295-4303.
- [29] 何湘宁, 宗升, 吴建德, 等. 配电网电力电子装备的互联与网络化技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5162-5170.
HE Xiangning, ZONG Sheng, WU Jiande, et al. Technologies of power electronic equipment interconnecting and networking in distribution grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5162-5170.
- [30] MAGNUS C, ANDERS B, JÜRGEN H, et al. The hybrid HVDC breaker—an innovation break through enabling reliable HVDC grids[R]. Vasteras, Sweden: ABB group, 2012.
- [31] 薛士敏, 陈超超, 金毅, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3114-3122.
XUE Shimin, CHEN Chaochao, JIN Yi, et al. A research review of protection technology for DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3114-3122.
- [32] MONTI A, COLCIAGO M, CONTI P, et al. Integrated simulation

- of communication, protection, and power in MVDC systems[C]//IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Baltimore, Maryland, USA:IEEE, 2009:353-359.
- [33] TANG L, OOI B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3):1877-1884.
- [34] 胡竞竞, 徐习东, 裴鹏, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2014, 38(4):844-851.
- 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):844-851.
- [35] PAN Y, SILVEIRA P M, STEURER M, et al. A fault location approach for high-impedance grounded DC shipboard power distribution systems[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, USA:IEEE, 2008:1-6.
- [36] BARAN M E, MAHAJAN N R. Overcurrent protection on voltage-source-converter-based multiterminal DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1):406-412.
- [37] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9):2582-2589.
- ZENG Jiasi, XU Xidong, ZHAO Yuming. Reliability comparison of AC and DC distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(9):2582-2589.
- [38] 梁涵卿, 郭雄, 梁旭明. 特高压交流和高压直流输电系统运行损耗及经济性分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(3):630-635.
- LIANG Hanqing, WU Xiong, LIANG Xuming. Operation losses and economic evaluation of UHVAC and HVDC transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3):630-635.
- [39] 郑欢, 江道灼, 杜翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术, 2013, 37(12):3368-3374.
- ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12):3368-3374.

作者简介:



孙鹏飞

孙鹏飞(1990—),男,河北石家庄人,助理工程师,硕士,主要研究方向为新能源接入与配电网规划技术(E-mail:sunpengfei8526@126.com);

贺春光(1979—),男,河北石家庄人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电网规划及电网分析计算(E-mail:35379459@qq.com);

邵华(1976—),男,河北石家庄人,高级工程师,主要研究方向为电力系统规划设计(E-mail:hbedhoop@sina.com)。

Research status and development of DC distribution network

SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, LIU Xuefei, AN Jiakun

(State Grid Hebei Economic Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: With the advancement of power electronic technology, compared to AC distribution network, DC distribution network has achieved the technical and economic advantages in many areas. The development, topology and advantages of DC distribution network are introduced. The key technologies, such as voltage selection, control, protection and fault analysis, etc., and the related research status are summarized. The reliability and economy are compared between AC and DC distribution networks. The development of DC distribution network is prospected.

Key words: distribution network; DC distribution network; distributed power generation; control; electric equipment; electric power system protection; failure analysis; reliability; economy