

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.08.018

直流配电网研究现状与展望

江道灼, 郑欢

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 相较交流配电网, 直流配电网具有供电容量大、线路损耗小、电能质量好、无需无功补偿, 以及适于各类电源和负载接入等优点。较为详细地论述了直流配电(相对交流配电)的特点、优势及其网络的整体概念, 提出了直流配电网的拓扑结构, 总结了直流配电网在规划设计、调度控制、继电保护及关键设备等方面的研究情况, 最后指出了直流配电网优化调度、故障诊断与定位、直流断路器 etc 等尚需深入研究的问题。

关键词: 直流配电; 调度控制; 故障诊断与定位; 直流断路器

0 引言

随着新能源、新材料、信息技术和电力电子技术的长足发展和广泛应用, 用户对用电需求、电能质量及供电可靠性等要求不断提高, 现有交流配电网将面临分布式新能源(电源)接入、负荷和用电需求多样化、潮流均衡协调控制复杂化, 以及电能供应稳定性、高效性、经济性等方面的巨大挑战。风电、光伏发电、燃料电池, 以及电动汽车动力电池、超级电容器等各种储能装置基本上都是直流电(或采用直流电技术), 必须通过 DC/AC 换流器才能并入交流配电网; 众多办公与家用电器设备采用直流供电实际上更为方便、节能; 越来越多的工业负荷采用变频技术以提高电能利用效率。

另外, 国内数十年来由于城市规划与电力系统规划工作的相互分离, 形成了与负荷发展要求不相适应的配电网结构, 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, 传统的配电网结构与配(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、支持分布式电源接入, 以及用户与电网双向互动等诸多要求。

国外研究资料表明, 基于直流的配电网在输送容量、可控性及提高供电质量等方面具有比交流更好的性能^[1-7], 可以有效提高电能质量、减少电力电子换流器的使用、降低电能损耗和运行成本、协调大电网与分布式电源之间的矛盾, 充分发挥分布式能源的价值和效益。本文首先对直流配电网的特点、优势及其网络的整体概念进行了较为详细地综述,

提出了直流配电网的拓扑结构。然后, 总结了目前直流配电网在规划设计、调度控制、继电保护及关键设备等方面的研究情况。最后, 指出了直流配电网优化调度、故障诊断与定位、直流断路器等尚需深入研究的问题。

1 直流配电网特点与优势

目前采用的交流配电网最大的优势在于电压变换十分容易, 在线路保护方面, 交流系统亦比直流系统成熟得多^[1]。但是, 随着城市规模的迅速增长和信息技术的高速发展, 电网中的敏感负荷、重要负荷及非线性负荷越来越多, 交流配电网将面临线路损耗大、供电走廊紧张, 以及电压瞬时跌落、电压波动、电网谐波、三相不平衡现象加剧等一系列电能质量问题, 迫切需要改变现有的配电网结构和配(供)电方式。近年来, 部分学者对交直流混合配电系统进行了相关研究, 证实了交直流混合配电系统是由交流配电方式向直流配电方式逐渐过渡的一种可行的途径^[1]。如果采用直流配(供)电方式, 则可将各类电源产生的电能转换为直流电直接供给各类设备及家用电器使用。相关文献表明, 直流配电网具有提高供电容量、减小线路损耗、改善用户侧电能质量、隔离交直流故障, 以及可再生能源灵活、便捷接入等一系列优点^[1-7]。

1.1 直流配电的供电容量(供电半径)

随着城市的发展, 用电负荷发展很快, 需要配电网网络输送更大的容量; 另一方面, 在城市发展的同时, 土地日益升值, 征用新的配电线路走廊代价高, 需要在有限的配电线路走廊上输送更大的容量。设现有配电线路额定线电压为 V_{AC} , 额定线电流为 I_{AC} , 功率因数 $\cos \varphi = 0.9$, 则其所能传输的额定功

收稿日期: 2011-11-24; 修回日期: 2012-02-07。

率 $P_{AC} = \sqrt{3} V_{AC} I_{AC} \cos \varphi$; 如果采用双极直流配电, 且设额定直流电压、电流分别为 V_{DC} 和 I_{DC} , 则所传输的额定功率 $P_{DC} = 2V_{DC} I_{DC}$ 。因此, 在导线截面、电流密度与绝缘水平相当的情况下, $V_{DC} = \sqrt{2} V_{AC} / \sqrt{3}$, $I_{DC} = I_{AC}$, 则

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{2V_{DC} I_{DC}}{\sqrt{3} V_{AC} I_{AC} \cos \varphi} = \frac{2\sqrt{2} V_{AC} I_{AC}}{2.7 V_{AC} I_{AC}} = 1.05 \quad (1)$$

式(1)表明, 双极直流线路的传输功率与三相交流线路(功率因数为 0.9)大致相等, 即在线路建造费用及占用走廊宽度相同时, 直流线路的传输功率约为交流线路的 1.5 倍, 亦即采用直流配电能够有效提高供电容量或供电半径。

1.2 直流配电网的电能质量

目前国内许多企业都面临产业调整和转型, 高新产业比例日益扩大, 对电能质量要求逐渐提高。对于半导体芯片生产行业, 电压波动、闪络冲击及谐波增量均可能对产品质量造成较大影响; 汽车、建材、电线电缆制造行业存在大量的冲击负荷, 当冲击性负载(电焊机、冶炼炉等)接入交流配电网时, 将对交流配电网造成电压骤降等电能质量问题^[5]。而对于直流配电网, 实现分布式储能的技术难度与交流配电网比较相对较低, 一旦储能电池突破技术瓶颈, 就可根据需要方便地在直流配电网中进行广泛配置, 从而有效解决电压闪变等电能质量问题。

此外, 柔性直流配电网中的换流器不需要交流侧提供无功功率, 在灵活地发出或吸收无功功率的同时, 还可起到静止无功补偿器(STATCOM)的作用, 动态补偿交流母线和用户负载的无功功率, 并稳定交流母线和用户侧交流电压^[6]。

1.3 直流配电网的线路损耗

考虑交流电缆金属护套涡流造成的有功损耗和交流系统的无功损耗, 当直流系统线电压为交流系统的 2 倍时, 直流配电网的线损仅为交流网络的 15%~50%^[7]。虽然交流系统可通过无功补偿等措施来降低线损, 但这将大大增加系统的建设成本和复杂性。

1.4 直流配电网的能量传输效率

传统的交流变压器效率可达 98%, 亦即交流配电网在进行电压变换时的电能损耗很小。直流配电网所采用的电压源型换流器(VSC)和直流变压器, 一般采用基于绝缘栅双极晶体管(IGBT)的脉宽调制(PWM)技术, 因此通态损耗和开关损耗较大, 其效率约为 85%~95%^[8], 亦即换流器和直流变压器的电能转换效率低于交流变压器。但是, 直流配电网的线损远低于交流配电网, 因此需要从总体传输

效率上对交、直流配电网作进一步的比较研究和论证。

文献[4]和文献[8-9]分别从不同角度对直流配电网的能量传输效率进行了研究, 证明目前交直流混合配电网和直流配电网的总体效率与交流配电网相差不大, 但随着电力电子技术与器件的发展, 其换流器的通态损耗与开关损耗不断降低, 直流配电网的总体效率仍存在上升的空间。

1.5 直流配电网的供电可靠性

相对交流配电网而言, 直流配电网更便于超级电容、蓄电池等储能装置的接入, 从而提高其供电可靠性与故障穿越能力。

信息中心和通信中心多为服务器、存储设备等敏感负载, 对供电可靠性要求极高。文献[10]基于美国数据中心的典型拓扑结构, 分别对其在交流与直流配电网下的可靠性进行了研究, 给出了直流配电网的可靠性指标与储能装置的数量、使用年限及使用时间之间的关系图表, 证明了相对交流配电网而言, 采用直流配电具有更高的供电可靠性和故障发生时保持正常运行的能力。

1.6 节能降耗及直流配电到户的可行性

目前许多家用电器设备实际上都是基于直流电工作的, 在交流供电情况下需要配置相应的 AC/DC 换流器(或电路模块)。如果采用直流配电网直接配电到户, 则可省去这些换流器, 从而降低该部分的电能损耗, 达到节能降耗与降低设备成本等目的。

文献[11-13]对不同用途、不同型号、不同厂家的家用电器采用直流供电时的稳态运行情况及暂态响应过程进行了实验研究, 证明多数家用电器不但可以采用直流供电, 而且运行时产生的电压和电流纹波大幅降低, 电能损耗相对交流而言亦可减少 15%以上。实际上目前很多基于直流工作的家用电器, 其输入端的 AC/DC 换流器都是为交流供电而设, 采用直流供电时完全可以省掉, 既省钱又降耗, 可见直流配电到户完全可行。

1.7 直流配电网便于分布式电源、储能装置等接入

未来的配电网应能够接纳风能、太阳能等新能源发电的大规模、分布式并网。光伏电池等发出的是一种随机波动的直流电, 需要 DC/AC 换流器, 并配置适当的储能装置和复杂的控制系统等才能实现交流并网; 风电等则是一种随机波动的交流电, 同样需要 AC/DC/AC 换流器, 并配置适当的储能装置和复杂的控制系统才能实现交流并网; 各种储能装置, 如蓄电池、超级电容器、作为分布式储能单元的电动汽车充电站等, 本身就是以直流电形式工作, 需要双向 DC/AC 换流器及复杂的控制系统才能接入

交流电网。而在直流配电网情况下,实现分布式新能源并网发电及储能等的接口设备与控制技术相对要简单得多^[1-7]。

目前国内外有关直流配电网及其工程化应用的研究均处于起步阶段,虽然部分文献对直流微电网及各类家用电器在直流配电网下的运行情况进行了研究,但多数资料仍倾向于多端直流输电技术在配电网中的应用。文献[14-15]提出了基于VSC的直流配电网环形及两端配电结构,如附录A图A1和

图A2所示。各类交流电源经VSC将交流电整流为直流电,再逆变为交流电供负载使用,其过程均未涉及直流配电网不同电压等级的选择、相互影响及直流入户等方面的内容。

2 直流配电网拓扑结构

直流配电网的基本拓扑结构主要有环状、放射状与两端配电3种,如图1—图3所示。

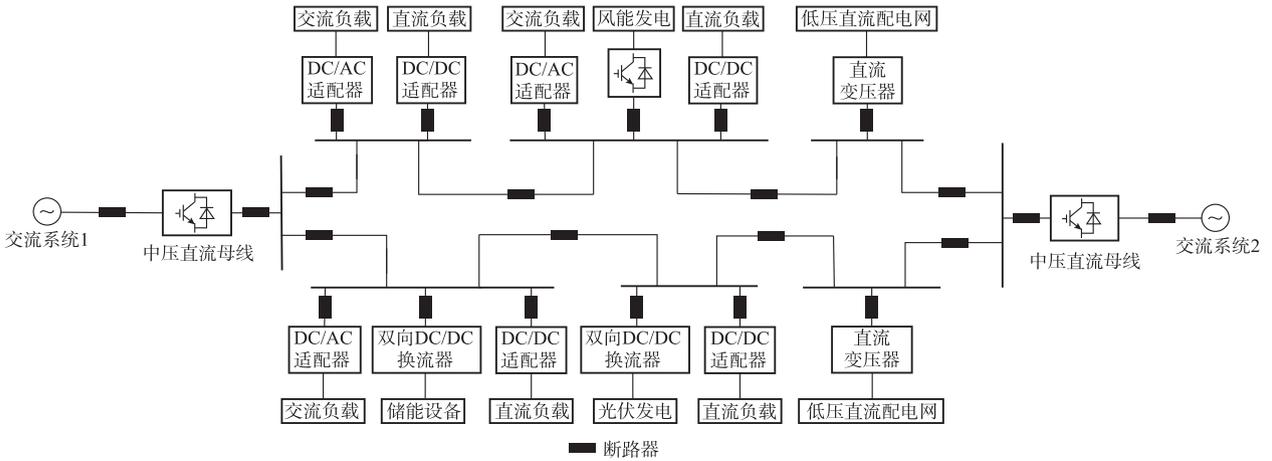


图1 环状直流配电网结构示意图

Fig. 1 Ring structure of DC distribution network

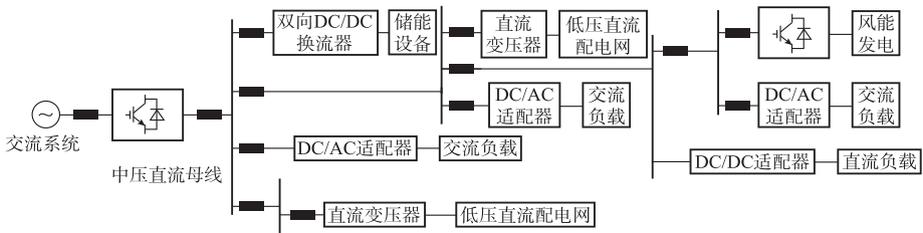


图2 放射状直流配电网结构示意图

Fig. 2 Radial structure of DC distribution network

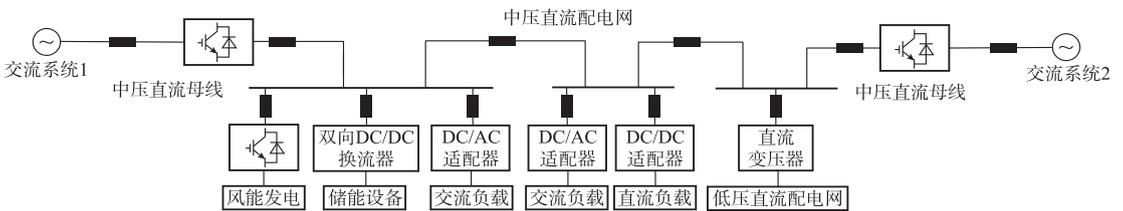


图3 两端配电直流配电网结构示意图

Fig. 3 Two-terminal structure of DC distribution network

通常来说,放射状网络供电可靠性相对较低,但故障识别及保护控制配合等相对容易;环状网络及两端配电网的供电可靠性相对较高,但故障识别及保护控制配合等也相对困难。直流配电网可以根据供电可靠性、供电范围(距离)及投资等实际工程

需要,采用不同的电压等级和拓扑结构进行设计与建设。

如图1—图3所示,交流电网、清洁能源电站、储能设备、交直流工业负载等各类电源与负载,根据自身要求经不同类型的适配器接入不同电压等级的

直流配电网。各类交、直流电源产生的电能,分别经 VSC 和 DC/DC 换流器转换成一定电压等级的直流电并通过直流配电网输送到各负载端,再经 VSC 或 DC/DC 换流器分别转换成交流或直流电为相应的交流或直流负载供电。一般来讲,与交流大电网连接的 VSC 具备能量双向流动的功能,以便实现直流配电网与交流大电网之间的电能交换与功率平衡;连接储能设备的 DC/DC 换流器涉及充、放电,同样也是双向型的。

与多端直流输电技术相比,直流配电技术更关注直流入户的实现,必然涉及多级直流配电及供电可靠性、电能质量等问题,如中压直流配电网中的部分电能,需经直流变压器等直流降压装置送到低压直流配电网(拓扑结构之一见图 4)后再供用户使用,因此其系统结构与工程实现相对而言比多端直流输电要复杂得多。

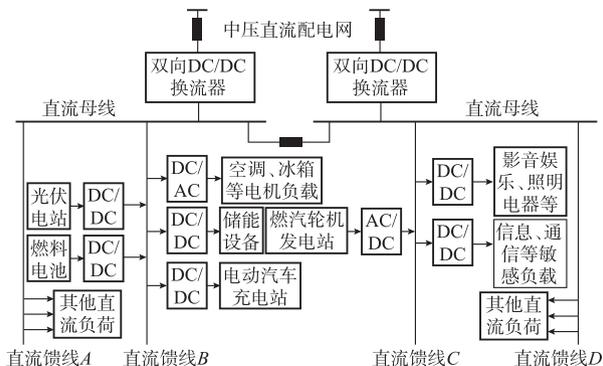


图 4 低压直流配电网结构示意图

Fig. 4 Structure of low voltage DC distribution network

3 直流配电网关键技术

目前,直流配电网的各方面技术尚不成熟,需要进一步深入研究。

3.1 直流配电网规划与设计

1) 直流配电网的接地方式

直流配电网不管采用单极(带回流线路)系统还是双极系统,都涉及其 VSC 直流侧的接地问题。若直流侧不接地,接地线的电位将在 VSC 的开关频率下不断振荡,从而引起直流配电网正负极电压的波动,因此直流侧多采用回流线路接地(单极系统)或分裂电容接地(双极系统)的方式。另外,交流侧连接变压器多采用 Yn0y 或 Ynd 接法,以避免构成零序回路^[15-16]。

2) 直流配电网电压等级的选择

将交流配电网改造为直流时,直流电缆允许电压为交流额定电压的峰值^[17],因此可选择现有中压交流配电网额定电压的峰值作为中压直流配电网的

额定电压。

在低压直流配电网中,过大的直流电压将造成严重的安全问题,因此将电压中点接地成为双极系统^[15],以接入利用线电压供电的大功率负载及利用单极对地电压供电的小功率负载(每个极所接入的负荷不完全平衡)。文献[13]选择±200 V 电压作为直流配电网电压,通过 Buck 斩波器和 Cuk 电路分别向空调和液晶显示屏(LCD)供电。文献[18]则基于欧洲现有的 230 V 交流配电网电压等级,分别采用截面积为 1.5 mm² 和 2.5 mm² 的交流导线,对 326,230,120,48 V 这 4 种可能的直流电压等级进行了研究。结果表明,随着直流配电网电压的降低,电流、压降和电能损耗迅速增高,当电压下降到 48 V 时,压降及电流均超出允许值。

然而,直流配电网电压等级的具体选择方法至今尚没有定论,需要进一步的探索和验证。

3) 直流配电网储能设备优化布点及容量配置

超级电容暂态响应速度快、安全无毒、便于测量,但供电时间短、储存能量相对较小^[19];铅蓄电池供电时间长、能量密度高,但响应速度相对较慢。在直流配电网中,组合配置适当类型、适当容量的储能设备,可以抑制直流电压闪变,大幅提高网络的运行稳定性和故障穿越能力^[5]。但是,目前直流配电网领域的研究尚未涉及储能设备的优化布点及容量配置,其相关内容还需进一步深入探索。

3.2 直流配电网的调度与控制

1) 直流配电网的调度方案

直流配电网的调度方案是电网运行的关键,应综合分布式电源与储能设备的容量,以及实际负荷曲线进行具体分析。

文献[19-20]给出了低压直流配电网中各元件的等效电路、控制策略及直流配电网的调度方案。正常运行情况下,低压直流配电网的分布式电源始终保持最大功率输出,不足或多余的电能由中压直流配电网经直流变压器提供或吸收,同时为储能设备充电;在进入孤岛运行状态时,分布式电源的输出功率需根据实际情况进行控制,并由储能设备提供或吸收系统不足或剩余的电能。

2) 直流配电网的协调控制策略

中压直流配电网与柔性多端直流输电系统采用相似的协调控制策略,即采用主从控制方式或电压下垂控制方式,设置上层控制器对直流配电网的多个换流器进行协调控制^[14,21]。

文献[22-24]给出了低压直流配电网的储能电容、蓄电池、柴油发电机、各类换流器及分布式电源在正常运行与故障情况下的控制策略。与直流输电

系统不同的是,直流配电网的双极系统接有不平衡负荷(如 4.1 节所述),因此必须在双极系统中接入电压平衡装置,以免引起直流对地电压过大的偏差^[15]。文献[25-26]提出了电压与电流平衡装置的拓扑结构及控制策略,并验证了其有效性。

3.3 直流配电网的安全运行与保护

文献[27]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,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,准确的故障定位仍然是直流配电网研究的重点和难点之一,尤其在直流线路较短且中点不接地时,将对故障定位造成更大的困难。因此,需配备有效的限流装置,在故障发生时限制电流的上升速率,在安全保护装置动作前将故障电流限制在不过载的范围内。文献[28]提出了一种故障限流保护装置,通过控制固态保护开关的高速开通与关断,限制故障电流,并使非故障区域的供电不受故障影响。

作为直流配电网运行的一个关键问题,直流配电网的保护方案尚不成熟,有待继续深入研究。

3.4 直流配电网关键设备研制

直流断路器是直流配电网安全运行和保护的关键设备,对防止故障范围扩大有着重大的意义。由于直流系统不存在电流过零点,给研制高压大容量直流断路器带来了巨大困难。近年来出现的基于半导体器件的断路器,具有损耗低、动作速度快等优点,受到了市场和科研人员的广泛关注。目前,400 V 以下的低压直流断路器已经投入市场应用,而中高压直流断路器的研发虽然已经取得了较大突破,但其工程应用仍然存在困难^[29-30]。

在低压直流配电网中,对于电磁炉、暖风机等功率相对较大的负载,现有的交流开关、插头等装置无法安全快速地开断直流电流,不能直接应用于直流配电网中。因此进行直流开关、直流插头和插座的研究,是直流配电网研究的一个关键问题^[17,31]。

另外,直流配电网还必须对换流器、直流变压器及直流电缆进行优化设计和选择^[15,17,32-34]。

4 结语

配电网直接面向用户,是保证电能质量、提高运行效率、创新服务内容的关键环节。本文分析了直流配电网的实用意义和应用前景,提出了直流配电网的整体概念及拓扑结构,并对直流配电网规划设计、调度控制、继电保护与关键设备的研究情况进行了总结。目前国内外对于直流配电网的研究刚刚起步,大量理论与技术问题还有待深入研究、解决。

1)研究直流配电网多种拓扑结构与接地方式的可行性,以及电压等级、储能设备的选择与配置。

2)研究满足直流配电网电压和电流、交流大电网电压和潮流方程等约束的交直流混合配电系统及直流配电网多时段优化调度方法。

3)结合配电自动化系统,研究直流配电网故障定位方法,以及不同结构、不同运行方式下的故障诊断与保护配合。

4)中压直流配电网的直流断路器研制。中高压直流断路器的工程实用化研究,重点在于满足其商业化和大功率化的需求。

由于各种各样的原因,国内配电网的发展明显落后于输电网的发展。在这样的背景下,研究兼具可靠性、安全性、稳定性、经济性的直流配电网具有巨大的市场潜力和研究价值。目前,直流配电网及其相关技术还存在大量问题尚未解决,可借鉴已有的舰船直流电力系统、电信设备配电系统、电力机车牵引配电系统、直流输电系统和直流微电网的相关技术,以期对直流配电系统进行更广泛、更深入的探索和研究。

附录见本刊网络版(<http://aepe.sgepri.sgcc.com.cn/aepe/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] HAMMERSTROM D J. AC versus DC distribution systems—did we get it right[C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA: 1-5.
- [2] STARKE M R, OLBERT L M, OZPINECI B. AC vs. DC distribution; a loss comparison[C]// Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 21-24, 2008, Chicago, IL, USA: 1-7.
- [3] STARKE M, LI F X, TOLBERT L M, et al. AC vs. DC distribution; maximum transfer capability[C]// Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 1-6.
- [4] DASTGEER F, KALAM A. Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation [C]// Proceedings of Australasian Universities Power Engineering Conference, September 27-30, 2009, Adelaide, SA, Australia: 1-5.
- [5] MUSOLINO V, PIEGARI L, TIRONI E, et al. Simulations and field test results for potential applications of LV DC distribution network to reduce flicker effect[C]// Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power, September 26-29, 2010, Bergamo, Italy: 1-6.
- [6] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [7] WANG F, PEI Y Q, BOROEYEVICH D, et al. AC vs. DC

- distribution for off-shore power delivery[C]// Proceedings of IEEE 34th Annual Conference, November 10-13, 2008, Orlando, FL, USA; 2113-2118.
- [8] PANG H, LO E, PONG B. DC electrical distribution systems in buildings [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, November 12-14, 2006, Hong Kong, China; 115-119.
- [9] NILSSON D, SANNINO A. Efficiency analysis of low-and medium-voltage DC distribution systems[C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 10, 2004, Denver, CO, USA; 1-7.
- [10] SITHIMOLADA V, SAUER P W. Facility-level DC vs. typical AC distribution for data centers[C]// Proceedings of 2010 IEEE Region 10 Conference, November 21-24, 2010, Fukuoka, Japan; 2102-2107.
- [11] SALOMONSSON D, SANNINO A. Load modeling for steady-state and transient analysis of low-voltage DC systems[J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(5): 690-696.
- [12] TECHAKITTIROJ K, WONGPAIBOOL V. Co-existence between AC-distribution and DC-distribution; in the view of appliances [C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Computer and Electrical Engineering, December 28-30, 2009, Dubai, UAE; 421-425.
- [13] KAKIGANO H, NOMURA M, ISE T. Loss evaluation of DC distribution for residential houses compared with AC system [C]// Proceedings of International Power Electronics Conference, June 21-24, 2010, Sapporo, Japan; 480-486.
- [14] LI Gukai, LI Gengyin, ZHAO Chengyong, et al. Research on voltage source converter based DC distribution network[C]// Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, May 23-25, 2007, Harbin, China; 1927-1932.
- [15] AGUSTONI A, BORIOLI E, BRENN A M, et al. LV DC distribution network with distributed energy resources; analysis of possible structures[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Electricity Distribution, June 6-8, 2005, Turin, Italy; 1-5.
- [16] BARAN M E, MAHAJAN N R. DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2003, 39(6): 1596-1601.
- [17] SALOMONSSON D, SANNINO A. Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1620-1627.
- [18] SANNINO A, POSTIGLIONE G, BOLLEN M H J. Feasibility of a DC network for commercial facilities[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2003, 39(5): 1499-1507.
- [19] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066-3075.
- [20] BRENN A M, LAZAROIU G C, TIRONI E. High power quality and DG integrated low voltage DC distribution system [C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 18-22, 2006, Montreal, Canada; 1-6.
- [21] MAHMOODI M, GHAREHPETIAN G B, ABEDI M, et al. A suitable control strategy for source converters and a novel load-generation voltage control scheme for DC voltage determination in DC distribution systems[C]// Proceedings of the 1st International Power and Energy Conference, November 28-29, 2006, Putra Jaya, Malaysia; 363-367.
- [22] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T, et al. DC micro-grid for super high quality distribution system configuration and control of distributed generations and energy storage devices [C]// Proceedings of the 37th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 18-22, 2006, Pittsburgh, PA, USA; 1-7.
- [23] MAHMOODI M, GHAREHPETIAN G B, ABEDI M, et al. Control systems for independent operation of parallel DG units in DC distribution systems [C]// Proceedings of the 1st International Power and Energy Conference, November 28-29, 2006, Putra Jaya, Malaysia; 220-224.
- [24] PELTONIEMI P, NUUTINEN P, NIEMELÄ M, et al. Control of the single-phase customer-end inverter in a low-voltage DC distribution network[C]// Proceedings of the 34th Annual IEEE Industrial Electronics Conference, November 10-13, 2008, Orlando, FL, USA; 635-640.
- [25] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T, et al. DC voltage control of the DC micro-grid for super high quality distribution[C]// Proceedings of the 4th Power Conversion Conference, April 2-5, 2007, Nagoya, Japan; 518-525.
- [26] 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 Trans on Power Electronics, 2011, 26(3): 877-885.
- [27] BARAN M E, MAHAJAN N R. Over-current protection on voltage-source-converter-based multi-terminal DC distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 406-412.
- [28] JIN C L, DOUGAL R. Current limiting technique based protection strategy for an industrial DC distribution system [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, July 9-13, 2006, Montreal, Canada; 820-825.
- [29] SATO Y, TOBAYASHI S, TANAKA Y, et al. An investigation of SiC-SIT DC circuit breakers for higher voltage direct current distribution systems[C]// Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 12-16, 2010, Atlanta, GA, USA; 3290-3295.
- [30] 胡杰,王莉,穆建国. 直流固态断路器现状及应用前景[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 145-150.
HU Jie, WANG Li, MU Jianguo. Present status of DC solid-state circuit breaker and its potential application [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 145-150.
- [31] TECHAKITTIROJ K. Electrical plug and outlet for the DC distribution system in buildings [C]// Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems, October 14-17, 2008, Seoul, Korea; 2667-2670.
- [32] SALOMONSSON D, SANNINO A. Centralized AC/DC power conversion for electronic loads in a low-voltage DC power system [C]// Proceedings of the 37th IEEE Power

Electronics Specialists Conference, June 18-22, 2006, Jeju, Korea: 3155-3161.

- [33] FURUSE M, FUCHINO S, HIGUCHI N, et al. Feasibility study of low-voltage DC superconducting distribution system [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1759-1762.
- [34] HAYASHI Y, YAMASAKI M. Optimal design of a high density back-end converter for 400 V DC distribution system [C]// Proceedings of the 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, September 6-8, 2010, Ohrid,

Macedonia: 40-45.

江道灼(1960—),男,教授,主要研究方向:交直流电力系统运行与控制技术、电力电子及柔性交流输电应用技术、电力系统现场智能测控技术及配电网自动化技术。E-mail: dzjiang@zju.edu.cn

郑欢(1988—),女,通信作者,博士研究生,主要研究方向:直流配电网及电力电子在电力系统中的应用。E-mail: huanzheng@zju.edu.cn

Research Status and Developing Prospect of DC Distribution Network

JIANG Daozhuo, ZHENG Huan

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In contrast to the AC distribution network, the DC distribution network has higher power supply capability, lower line losses, better power quality, freedom from reactive compensation, and is suitable for all kinds of power supply (including renewable energy power) and load access, etc. This paper deals with the DC distribution (relative to the AC distribution) characteristics, its advantages and overall concept in detail; puts forward its network topology structure; and summarizes the network planning design, dispatching control, relay protection, key equipment, and other aspects of the research. Finally, it is pointed out that the DC distribution network optimization dispatching, fault diagnosis and location, DC breaker, etc, are problems for further study.

Key words: DC distribution; dispatching control; fault diagnosis and location; DC breaker

附录 A

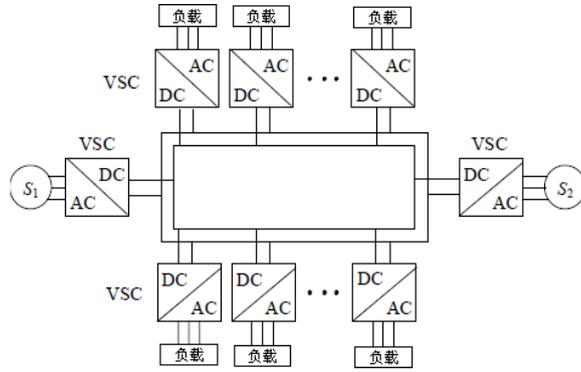


图 A1 直流配电网环形配电结构

Fig.A1 Ring structure of DC distribution network

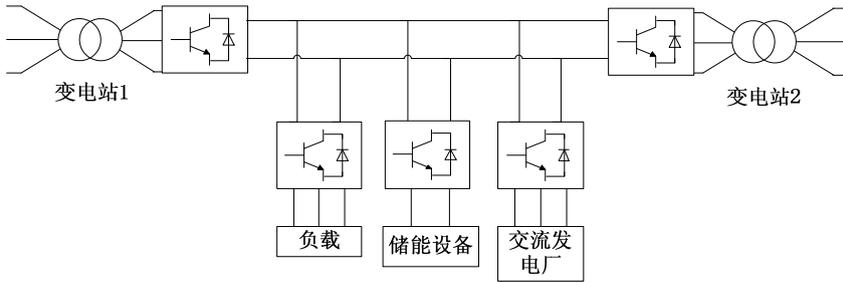


图 A2 直流配电网两端配电结构

Fig.A2 Two-terminal structure of DC distribution network