

国内外直流配电网技术发展研究综述

章晋龙¹, 史述青², 杨海森³, 李志铿³

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广州 510000; 2. 广州市执信中学, 广州 510600;
3. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 由于交流配电网的电压跌落、电网谐波、电压不稳定等问题, 直流配电网成为近年的研究热点。相较于交流配电网而言, 直流配电网铺设线路成本较低, 在输电过程中线路电能损耗有所减少, 拥有较大的供电容量以及可靠性, 同时较为环保。能够有效解决电能质量问题、易于分布式电源、储能电池接入等特点, 得到了供电企业和研究学者的广泛重视。对直流配电网的拓扑结构、优势和特点、关键技术环节等领域进行了全面的阐述, 对直流配电网在中国的发展进行了总结和展望。

关键词: 直流配电网; 智能电网; 分布式电源; 控制和保护; 拓扑结构

中图分类号: TM76 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8676(2016)S1-0093-06

Overview of Development of DC Power Distribution Network

ZHANG Jinlong¹, SHI Shuqing², YANG Haisen³, LI Zhikeng³

(1. Research Center of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510000 China; 2. Zhixin High School, Guangzhou 510600, China; 3. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The frequency of voltage drop, power grid harmonics, and voltage instability and so on in AC power distribution network is gradually increasing. The domestic and foreign research scholars now turn to the new field of DC power distribution network. Compared with AC power distribution network, DC power distribution network has the advantages of low cost, low transmission loss, high power supply capacity, high reliability, environmental protection, high power quality, easier for distributed power and energy storage to access and other characteristics. In this paper, the topology, advantages and characteristics, key technology of DC distribution network are described, and the development of intelligent DC power distribution network in China is summarized and prospected.

Key words: DC power distribution network; smart grid; distributed power; control and protection; topological structure

随着分布式能源并网的推广和普及和用户终端供电电能质量的要求越来越严格, 传统的交流配电网逐渐显示出其在接纳新能源能力和电能质量问题上的不足^[1-13]。近年来, 电力电子器件的发展有了长足的进步, 换流装置的不断完善加速了直流配电网相关技术的研究, 同交流配电网相比, 直流配电网供电容量更大, 输电过程中电能损耗减小, 电能质量更高, 分布式电源的接入更加容易, 并且更加环保, 使得其和交流配电网相比越来越得到国内外学者的广泛关注。美国较早的进入到直流配电网

的研究领域。2007年, 美国弗吉尼亚理工大学 CPES 中心、北卡罗来纳大学等研究机构就提出了 SBI 研究计划阐述了直流配电系统结构^[1-3]。大阪大学等提出了含双电极的直流配电系统结构并得到应用^[4-6]。欧洲的意大利、英国、瑞士等国家也开展了侧重于新型功率变换技术用以接入未来大量的分布式电源的研究工作^[7-9]。在韩国, 中国台湾等地同样展开了关于直流配电网的研究^[10-11]。

长久以来, 我国的配电网建设普遍落后于输电网建设, 由于配电网建设和城市发展不同步导致了与地区负荷发展不平衡的配电网结构^[12]。配电网规划的薄弱导致了电压跌落、电网谐波、电压不稳定等电能质量问题越来越突出。与此同时, 芯片制造、航空航天等高新技术产业的发展对电能质量

的要求日益增高, 直流配电网凭借其控制方式较为先进、易于接入储能系统、电压稳定、电网谐波含量较少等特点, 改善了电能质量的不足, 成为解决上述问题的新的突破口。

能源危机的爆发和社会环保意识的普及, 让人们人们对分布式能源发电有了新的认识。分布式能源发电符合电力系统负荷就地平衡的基本原则。同时有着良好的经济性和环保优势, 为配电网扩展出了新的发电功能。如光伏、燃气轮机、储能电池等分布式能源本身或容易变为直流电, 接入直流配电网有其独特优势。风机由于其不确定性强虽然本身为交流电, 在发电过程中也必须整流为直流电使用。这些分布式能源经过 DC-DC 双向换流器接入直流配电网即可使用, 相较于交流配电网可以省去 DC-AC 环节, 可以降低成本, 减少损耗^[13]。

通过国外的研究资料可以看出^[1-13], 就输送容量, 供电质量, 控制方式这三个方面来看, 直流配电网比交流配电网性能更优。在输电过程中的线路损耗以及运行成本降低, 同时在大电网和分布式电源之间进行协调, 使得分布式能源可以得到充分利用。本文首先对直流配电网的拓扑结构进行了较为详尽的阐述, 分析了直流配电网的特点和优势和直流配电网的关键技术环节, 最后对直流配电网在中国的发展进行了总结和展望。

1 直流配电网的拓扑结构

直流配电网的拓扑结构分为环状, 放射状和网状。放射状配电网虽然有一次性投资小, 继保整定简单, 对故障的识别和保护对应的控制配合较为容易的优点, 但由于其为开式网络, 故可靠性较低。环状以及网状的配电网属于闭式网络, 供电可靠性虽然较高, 但由于其网络结构较为复杂, 造成其继保配合复杂, 对故障的识别和保护对应的控制配合较为困难, 一次投资也相对较高。因此选择直流配电网的电压等级以及拓扑结构时应该根据实际的工程需要进行选择^[12]。

1.1 交直流混合配电网结构

当前我国配电系统中交流配电系统仍占主导地位, 如果将现有的交流配电网拆除并用直流配电网取代, 其经济性有待考证^[14]。故可行的配电方案将现有的交流配电网和直流配电网相结合, 并逐步向纯直流配电网方向发展, 如图 1 所示。

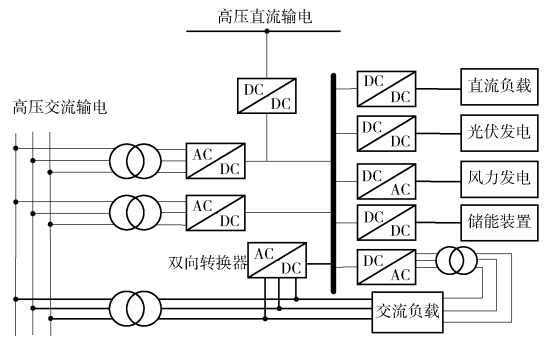


图 1 交直流混合配电网

Fig. 1 AC/DC hybrid power distribution network

1.2 纯直流配电网结构

随着直流配电网在整个配电网所占比例的增加, 配电网将逐步向纯直流配电方向发展。直流配电网通过换流站与交流输电电网相连接, 其主要设备有换流站, 直流电缆, 直流变压器, 直流断路器及为交流负载供电所提供的逆变器^[15]。

图 2 所示的放射状网络中交流和直流电源通过 VSC 和 DC-DC 变换器产生直流电连接到中压直流母线, 再经过 DC-DC 换流器, DC-AC 适配器给直流和交流负载提供电能。这种接线方式同另两种接线方式相比其继电保护的整定以及控制策略的实现都相对简单, 但由于为单端供电, 其供电可靠性较差^[12]。图 3 所示的环形供电系统中, 分布式电源、负载、储能装置、直流低压配电网等根据情况均匀分布, 当环网中任意一点发生故障, 继保装置迅速定位并让故障点与其他部分隔离, 保证负荷的持续供电^[16]。但是由于环网的潮流方向有两种可能, 这使得故障的识别以及控制策略的制定变得困难。图 4 表示的网状系统由多个环网组成, 潮流更加复杂, 难以控制, 这种结构目前仍处于研究阶段^[17]。

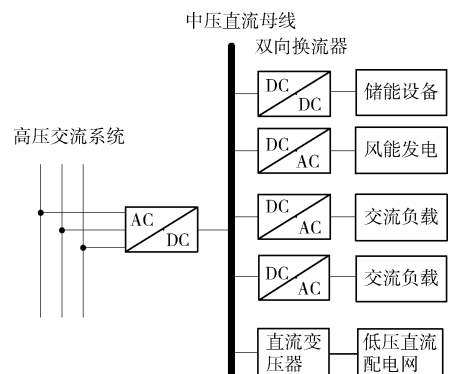


图 2 放射状直流配电网

Fig. 2 Radial DC power distribution network

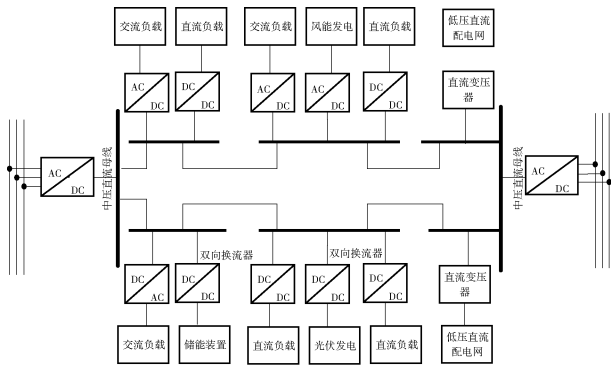


图 3 环状直流配电网

Fig. 3 Ring DC power distribution network

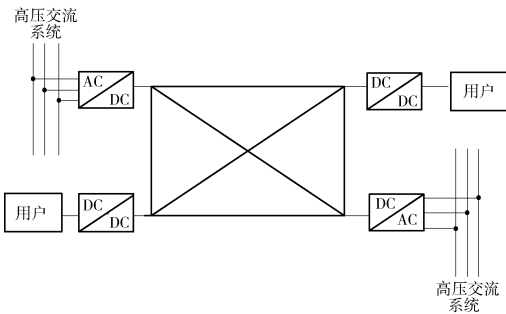


图 4 网状直流配电网

Fig. 4 Mesh DC power distribution network

为了实现直流入户, 低压直流配电网要从中压直流配电网的直流降压变压器获取电能再将电能分配给用户。图 5 为放射状低压直流配电网, 其中涉及多级直流配电系统, 需要保证电能质量、供电可靠性、经济性等要求^[12]。

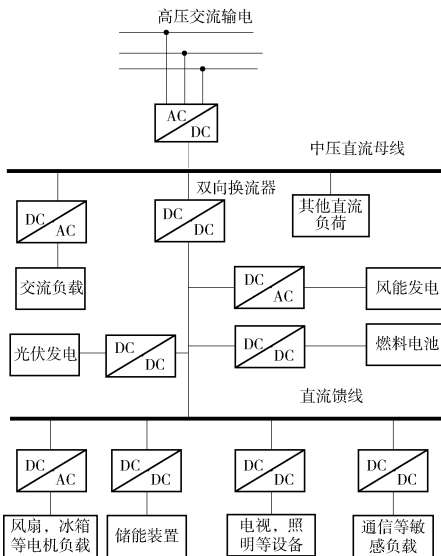


图 5 放射状低压直流配电网

Fig. 5 Radial DC power distribution network of low voltage

2 直流配电网的特点和优势

随着各行业对电能质量的要求越来越高, 以及电力系统中出现了越来越多的重要负荷、敏感负荷、动态负荷, 这对配电网的供电水平和能力提出了更高的要求。传统的交流配电网由于其容易发生电压跌落、电网谐波、电压不稳定等现象, 加之供电损耗大、供电走廊紧张等原因, 直流配电网得到了越来越多研究者的关注。直流配电网铺设线路成本较低, 在输电过程中线路电能损耗有所减少, 拥有较大的供电容量以及可靠性, 同时较为环保。能够有效解决电能质量问题、易于分布式电源、储能电池接入等一系列特点和优势。

2.1 提高供电容量

经济社会的不断发展导致社会用电量不断增加, 部分地区配电线路负载率已经达到或接近临界水平, 威胁配电系统的安全稳定运行。随着经济发展水平进入一定阶段, 土地的使用效率越来越高, 部分地区配网变电站和线路走廊选址出现困难, 要求配电网向集约化方向发展。相较交流配电网, 直流配电网在同等条件下可有效增加供电容量。文献^[12]显示, 在相同的走廊宽度和线路建设费用的条件下, 直流线路可以传输交流线路 1.5 倍的功率。

2.2 减小线路损耗

在交流配电网中, 交流电缆产生的有功损耗和交流系统产生的无功损耗很大, 交流系统加设无功补偿系统需要增加投资, 经济性较差。直流配电系统只有正负两条输电线路, 相对交流系统的三条输电线路在输送同等功率的条件下可降低 50% 线损^[11]。如果直流输电系统为双极, 则电流线路电流下降至原电流的 1/2, 线路损耗为原损耗的 1/4, 相较于交流的线路损耗大大降低。

传统的交流变压器传输功率能够达到 98%^[12]。基于电压源换流器(VSC)的直流配电网由于采取了 IGBT 管和脉冲调制技术(PWM)在逆变和整流时能量传输效率偏低。然而随着电力电子技术的不断发展, 直流配电网的传输效率仍有着很大的发展空间。

2.3 提高电能质量

柔性直流配电网基于电压源换流器(VSC), 独立控制有功和无功, 可以提供足够的无功补偿起到

交流配电网中 STATCOM 的作用。仿真显示^[18]：柔性直流系统在交流侧电压瞬间跌落 30% 的情况下也不会发生换向失败，从而起到稳定交流侧电压稳定的作用，提高为重要负荷、敏感负荷等供电的可靠性。

当前中国社会正处于转型期，高科技产业比例不断增加，芯片制造、航空航天等行业对电能质量的要求越来越高。传统工业负荷如电焊机、锅炉等重载负荷瞬接入电网将产生电压闪变，电网谐波等问题。直流配电网易于储能电池接入，可以根据负荷需求进行广泛配置，从而改善上述电能质量问题。

2.4 易于分布式能源接入

未来的智能配电网将尽最大限度的消纳光伏、风电等形式的分布式能源。尽管分布式电源优点突出，但存在单机接入的成本较高，难以控制，容量小等问题。所以，在面对大电网时，将分布式电源看作一个不可控源，对其采取限制，隔离的方式，但这种方式造成了分布式能源不能得到最高效的利用。

为了解决上述问题，使分布式能源得到更加有效的利用，分布式电源并入大电网时大多采取微电网的形式，因此直流微电网是直流配电网的主要运行方式。直流微电网不需要跟踪电压的相位和频率这一特性使其可控性和可靠性得到提高，易于接入分布式电源和负载。

2.5 其他特点和优势

直流配电网除了有上述特点和优势之外，还有线路成本低、具有环保优势、增强故障穿越能力、提高供电可靠性、减少 AC/DC 换流器模块等优势。

3 直流配电网的关键技术环节

3.1 直流配电网网架结构和电压等级选择

直流配电网与交流配电网相比，由于输送电能形式的不同，其网架结构必然产生改变，作为对其安全稳定运行的保证，直流配电网在规划时要考虑上级电源的输送能力水平、消纳微网分布式能源水平、用户供电可靠性、配电网调度和控制、经济性和安全性等因素。

从电压等级选择的角度看，直流配电网同样包含多个电压等级的配电网。电压等级的选取决定了供电范围和供电能力、电气绝缘和与保护设备的配

合、系统的经济性和可靠性等因素。文献[19]认为适应 400 V 交流电压等级，应选取 500 V 作为直流电压等级。文献[20]认为考虑储能系统的电池数量的条件下选取 380 V 作为理想的电压等级是合适的。文献[21]中介绍了美国电力研究协会 (EPRI) 提出了一个典型的 380 V 直流配电系统，该系统相较于文献提出的交流配电系统的效率值提高了 7%。文献[22]中提出了含有分布式电源，电压等级为 500-550 kV 的直流配电系统，证明了在该电压等级下可以有效提高系统可靠性。

综合国内外文献来看，相关领域学者并没有对直流电压等级的选择问题持有定论，仍需要进一步探索和论证。

3.2 直流配电网的控制技术

直流配电网的控制技术从各序列电压等级的角度可以分为多源协调控制、电力电子变换器的基本控制、多端多电压等级配电网的运行控制三类^[13]。

直流配电网需要和各种分布式电源、用户负荷和储能系统连接，电力电子变换器在其中起了重要作用，各变换器通过控制单元功率，电压，电流来确保系统的稳定运作。在柔性直流配电网系统中，电力电子控制由级联 MMC 单元实现。MMC 单元基于高频全控器件，在一个公频周期中多次对开关加以开通和关断信号可以在交流侧产生恰当的交流电压波形。电力电子器件的控制方式由调制方式决定。在工程应用中一般采取基于脉宽调制 (PWM) 方法的调制技术使其接近正弦波。

在直流配电网中，电能可以来自更高电压等级的电网或者来自于接入直流配电网的分布式电源和储能系统，如何协调控制各电能来源在直流配电网中的作用成为了多源协调控制的重要内容。直流微电网工作时，可能出现分布式电源的输出功率发生突变，大负荷的投切，并网与孤岛的状态转换的情况，会造成直流母线电压的降落或闪变，影响设备的运行甚至造成继电保护系统的误动作，直至整个微电网系统的崩溃^[23]。针对这种现象，可以通过超级电容，超导储能和飞轮储能等快速充放电装置对系统的电能装置进行管理^[23-26]。

3.3 直流配电网的安全保护技术

直流配电系统的保护装置包含隔离装置，断路器，继电器以及测量装置^[27]。如图 6 所示，根据

直流配电网的拓扑结构对直流配电网进行分区保护, 可将其分为换流器保护, 负荷侧保护, 直流网络保护以及交流电源保护, 在配置保护时应针对各个区域发生故障的不同可能进行配置。交流电源保护包括其换流器直流和交流侧区内和区外故障。另外换流器的工作方式也影响着保护的配置。换流器保护中一个或多个开关器件故障时, 保护只发出警告, 但当损坏的数量到达一定值时需要保护立即隔离故障。直流网络发生故障时, 分为极间故障和接地故障。发生极间故障时保护应立即动作, 发生接地故障时不同接地方式的保护动作判据不同但均需要立即跳闸。负荷侧保护中无源负荷故障时应立即切除故障, 分布式电源或储能装置故障时应根据实际情况发出警告或切除^[27]。

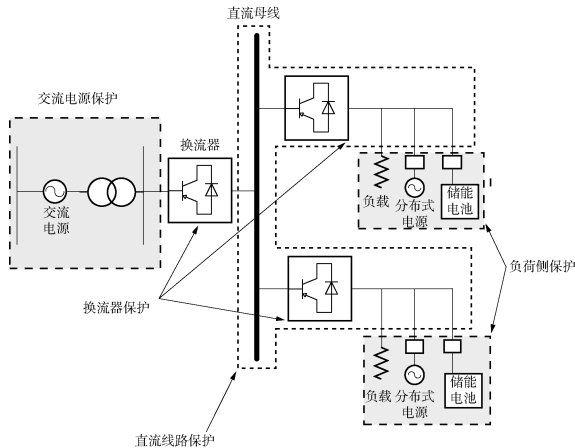


图 6 直流配电网分区保护示意图

Fig. 6 Schematic diagram of relay protection of DC power distribution network

3.4 直流配电网的关键设备研制

直流断路器在直流系统的控制和保护中起到重要作用, 在故障发生时其作为开断电流的装置可以有效缩小故障的影响范围。由于不存在自然过零点, 加之直流系统中的感性元件储藏的巨大能量, 使得直流断路器的设计和制造成为了难题^[13]。直流断路器根据断路器中关键开断元件的不同可分为机械式、全固态式、机械开关与固态开关相结合的混合式三种, 其中固态断路器由于其分断速度快, 可靠性高, 寿命长等优点被学术界广泛关注^[28]。2005年, 美国 CPES 采用 ETO 作为开关器件对 2.5 KV/ 1.5 KA 的直流固态断路器进行研究^[13]。

为了克服直流电流没有自然过零点难以熄弧的

问题, 常使用如图 7 所示的“人工电流零点”法来解决这一问题^[22]。目前 400 kV 以下的直流断路器已经应用于市场, 但中高压断路器在工程应用方面仍有待发展。

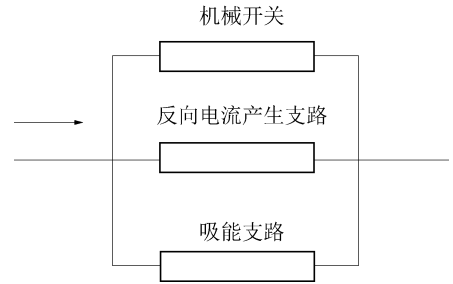


图 7 人工电流零点原理

Fig. 7 Principle of artificial current zero

直流配电网中针对不同场合和需求需要大量的直流换流器以满足使用需求。基于 MMC 级联模块的电压源换流器在当前情况下还存在均压问题, 在电压等级达到一定临界水平时, MMC 模块会因为其承受了过大电压而引起击穿等电压问题, 威胁系统安全运行。随着电力电子技术的持续发展, 这些问题会逐渐得以解决。

此外, 直流配电网还存在着交流开关、插头无法满足使用要求、直流电缆和直流变压器的设计制造等问题。

4 结论

直流配电网由于其技术环节上的诸多优势, 在配电网安全问题运行、提高电能质量、接入新能源能力上具有重要意义, 是智能配电网发展的一项重要技术手段。目前中国的直流配电网规划项目还较少, 为了解决 10 kV 交流配电网存在的问题, 有关部门提出了 10 kV 交直流配电网的配电方案^[29]。直流配电网还存在着直流断路器等直流设备设计和制造等难题, 还需要不断在技术环节上完善和补充。如果能解决好相关技术环节上的不足, 直流配电网的发展会整合城市分布式能源, 使电网更加智能和安全, 为用户提供稳定、高效的现代智能直流配电网。

参考文献:

- [1] BOROYEVICH D, CVETKOVIC I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems: a contemplative view [C]//IEEE. 12th International Conference on Optimization of

- Electrical and Electronic Equipment. Basov, Russia: IEEE, 2010; 1369-1380.
- [2] BARAN M E, MAHAJAN N R. DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 39(6): 1596-1601.
- [3] 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.
- [4] ITO Y, ZHONG Y, AKAGI H. DC microgrid based distribution power generation system [C]// IEEE. The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference. Xi'an; IEEE, 2004; 1740-1745.
- [5] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. DC micro-grid for super high quality distribution system configuration and control of distributed generations and energy storage devices [C]//IEEE. 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. Jeju, Korea; IEEE, 2006; 1-6.
- [6] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type dc microgrid for super high quality distribution [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066-3075.
- [7] BRENNAN M, TIRONI E, UBEZIO G. Proposal of a local DC distribution network with distributed energy resources [C]. 2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power. New York, USA: IEEE, 2004; 397-402.
- [8] MAGUREANU R, ALBU M, PRIBOIANU M, et al. A DC distribution network with alternative sources [C]. Mediterranean Control Association. Mediterranean Conference on Control and Automation. Athens, Greece; Mediterranean Control Association, 2007; 1-4.
- [9] BIFARETTI S, ZANCHETTA P, WATSON A, et al. Advanced power electronic conversion and control system for universal flexible power management [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 231-243.
- [10] LEE J, HAN B. Operational characteristic analysis of DC micro-grid using detailed model of distributed generation [C]. 2010 IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition. New Orleans, USA: IEEE, 2010; 1-8.
- [11] WU T F, SUN K H, KUO C L, et al. Predictive current controlled 5-kw single-phase bidirectional inverter with wide inductance variation for DC-microgrid applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3076-3084.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] WANG D, MAO C X, LU J M, et al. Technical analysis and design concept of DC distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 4(08): 82-88.
- [15] ZHENG H, JIANG D Z, DU Y. Economic comparison of AC and DC distribution system [J]. Power System Technology, 2013, 12(12): 3368-3374.
- [16] 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.
- [17] XU T, WANG Y F, ZHANG Y, et al. Development status and application future of DC distribution network [J]. East China Electric Power, 2014, 6(06): 1069-1074.
- [18] XU Z. HVDC flexible system [M]. Beijing: China Machine Press. 2010
- [19] WANG D, LIU Y R, LIANG X, et al. DC distribution network voltage class series [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 19-25.
- [20] PRABHALA V A K, Baddipadiga B P, MEHDI F. DC distribution systems-an overview [C]. 2014 3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications; 307-312.
- [21] BECKER D J, SONNENBERG B J. 400 V DC power distribution: overcoming the challenges in proc. [C]//IEEE. IEEE International Telecommunication Energy Conf. (INTELEC). [S. l.]: IEEE, 2010; 1-10.
- [22] GROSS P, GODRICH K L. Total DC integrated data centers in proc [C]//IEEE. IEEE International Telecommunication Energy Conf. (INTELEC). [S. l.]: IEEE, 2005; 125-130.
- [23] WU W M, HE Y B, GENG P, et al. Key technologies for DC micro-grids [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-107.
- [24] MAGRO M C, MARISCOTTI A, PINCETI P. Definition of power quality indices for DC low voltage distribution network [C]//IEEE. Instrumentation and Measurement Technology Conference. Sorrento, Italy: IEEE, 2006; 1885-1888.
- [25] 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]//IEEE. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Bergamo, Italy: IEEE, 2010; 1-6.
- [26] HE J J, YUAN Z, ZHAO W T, et al. Review of DC circuit breaker technology development [J]. South Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15.
- [27] HU J J, XU X D, QIU P, et al. A review of the protection methods in DC distribution system [J]. Power System Technology, 2014, 4(4): 844-851.
- [28] XUE S M, CHEN C C, JIN Y, et al. A research review of protection technology for DC distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 7(19): 3114-3122.