

卢其威,高彦,刘静,等.构建煤矿直流配电网的关键技术及可行性分析[J].煤炭学报,2015,40(10):2496-2502.doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.0236  
Lu Qiwei ,Gao Yan ,Liu Jing ,et al.Key technologies and feasibility analysis of coal mine DC power distribution network [J].Journal of China Coal Society ,2015 ,40( 10) : 2496-2502.doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0236

# 构建煤矿直流配电网的关键技术及可行性分析

卢其威 高彦 刘静 刘扬 王彦文 王聪

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083)

**摘要:**直流配电与交流配电相比具有节能、建造及运行成本低、线路损耗小且易于扩展容量等诸多优点,已成为电力电子和电力系统领域的研究热点。但是绝大多数研究集中在基于微网的低压直流配电系统,论文结合煤矿供电网络和用电设备特点,初步提出了煤矿直流配电网拓扑和针对中高压直流输出的固态变压器拓扑,总结分析了构建煤矿直流配电网涉及的关键技术,并对煤矿实施直流配电网可行性进行了分析和展望。

**关键词:**煤矿;直流配电;固态变压器;拓扑

**中图分类号:**TD611

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-9993(2015)10-2496-07

## Key technologies and feasibility analysis of coal mine DC power distribution network

LU Qi-wei ,GAO Yan ,LIU Jing ,LIU Yang ,WANG Yan-wen ,WANG Cong

(School of Mechanical Electronic and Information Engineering ,China University of Mining and Technology(Beijing) ,Beijing 100083 ,China)

**Abstract:** Compared to AC power distribution ,DC power distribution has the advantages of energy saving ,low cost in construction and operation ,low line loss ,ease capacity expansion and so on ,which has become a hot research subject in the field of power electronics and power system.However ,most of studies focus on the low voltage DC power distribution system based on micro-grid.Combined with the coal mine power network and electrical equipment characteristics ,the coal mine DC distribution network topology and solid state transformer structure for high voltage output were proposed in this paper.In addition ,the key technology to build mine DC distribution network was summarized and analyzed ,and the feasibility of implementing a DC power distribution network in coal mine was analyzed and overviewed.

**Key words:** coal mine; DC power distribution; solid state transformer; topology

我国目前有1.1万多座煤矿,绝大多数有自己的专用变电站(10 kV、35 kV或110 kV),容量一般在几兆到几十兆伏安之间,煤矿供电系统采用的是中性点经消弧线圈接地的交流供电网络,是一个相对独立的供电系统<sup>[1]</sup>。随着我国安全高效现代化矿井建设,煤矿电网规模不断扩大,控制越来越难,越级跳闸现象时有发生,而且电压波动范围大,严重影响煤矿的

安全生产。以高电压大功率变频器和开关电源为代表的电力电子设备在煤矿井下应用也越来越多,由此导致对电网的谐波污染和电磁干扰问题不断加大<sup>[2]</sup>,煤矿交流电网的进一步发展面临着新的挑战。相比于交流配网结构,由于煤矿井下绝大多数负载为电机和照明类负载,如果采用直流供电可具有如下优点。①可以减少整流环节,提高电网整体运行效率;

② 运行过程不存在相位同步和频率稳定问题; ③ 没有无功功率的流动, 电能质量更高; ④ 不必增加无功补偿设备(如静止无功发生器, Static Var Generator-SVG), 电力电子变换设备减少, 可靠性提高; ⑤ 供电线路由 3 条减少为两条, 降低了线路成本。计算表明, 当交流供电按照功率因数 0.945 供电时, 在相同的导线截面、电流密度、绝缘水平下两根直流电缆传送的功率与 3 根交流电缆相等<sup>[3]</sup>。在直流配电下, 两个电网的连接不需要考虑频率相位等因素, 容易实现均流, 更易扩大配电系统容量。文献[4-6]还总结了直流配电的其他一系列优点。

因此针对煤矿的供电网络, 综合考虑电压等级、负载特性、使用环境等特点开展构建煤矿直流配网的研究具有重要的理论价值和应用前景。本文初步提出煤矿直流配电网拓扑和中高压直流输出的电力电子变压器结构, 并对煤矿直流配电网涉及的关键技术和可行性进行了分析总结。

## 1 国内外发展现状分析

自 21 世纪初开始, 分布式能源逐渐受到重视, 受其推动国内外针对直流配电网相关的研究逐渐增多。2004 年日本东京工业大学率先提出了包括光伏和风力发电的直流微电网的直流配电系统概念, 并提出了抑制直流配电线路各单元之间环流的控制方法, 研制了 10 kW 直流配电系统样机<sup>[7]</sup>。同年欧洲意大利米兰理工大学提出了基于分布式电源的直流配电系统结构并进行了系统的仿真研究<sup>[8]</sup>。2007 年美国弗吉尼亚理工大学电力电子系统工程研究中心(Center for Power Electronics Systems-CEPS)开始探索住宅和楼宇的直流配电相关技术, 随着研究不断深入, 2010 年提出了家庭和楼宇的直流配电解决方案, 包括 DC380 V 和 DC48 V 两个电压等级, 并对未来直流配电体系进行了展望, 同样将风力发电、光伏发电和电池储能并入直流母线。采用具有功率因数校正功能、双向能量流动、通讯、综合保护等多项功能的智能电力电子变换器与电网连接, 并称之为电力路由器<sup>[9]</sup>。上述 3 个研究项目均将分布式发电单元并入直流母线, 由直流母线为用电设备供电, 直流母线与公共电网通过电力电子变换器连接。2011 年美国北卡罗莱纳州立大学黄勤教授提出了未来电力配电体系结构并对其应用于能源互联网做了深入探讨<sup>[10]</sup>, 同样将可再生电能纳入直流母线, 通过固态变压器(Solid State Transformer-SST, 也称电力电子变压器)连接大电网与可再生电能, 构建未来可再生电能管理与分配体系(FREEDM Systems-the Future Renewable

Electric Energy Delivery and Management), 该研究后续不断对其中的关键设备固态变压器的相关技术等进行研究探索<sup>[11-15]</sup>。

除上述有代表性的研究机构和研究成果外, 韩国和中国台湾相继建立了直流微电网供电系统样机研究基于微网的低压直流配电相关技术<sup>[16-17]</sup>。瑞士-瑞典的跨国公司 ABB 建立了高压直流电网仿真中心, 用于研究未来直流电网运行的解决方案。近几年我国清华大学、华北电力大学、华中科技大学、浙江大学等研究机构逐步开展了关于直流配电网的相关研究<sup>[4-6, 18-19]</sup>。同时我国也启动了“863”计划项目“基于柔性直流的智能配电关键技术研究与应用”。

近几年国内外针对直流配电相关研究<sup>[4-32]</sup>, 具有如下特点或趋势: ①基本上都侧重于研究基于直流微网的低压直流配电, 针对家庭楼宇用电为主; 6 kV 及以上的直流配电研究鲜见相关报道; ②随着电力电子器件及其控制技术的快速发展, 现代电力电子技术与电网的融合越来越紧密, 正在推动电网的变电、输电、配电、用电等环节以直流电替代交流电的趋势。而以光伏、风力发电为代表的分布式发电系统以直流电接入电网已成为重要发展方向; ③固态变压器作为连接直流母线和大电网的关键设备, 具有双向能量流动、功率因数为 1 等诸多优点已成为研究直流配电网的重要研究内容之一; ④双向 DC-DC 变换器同样已成为构建直流配电网的关键设备之一; ⑤具体示范工程项目还很少, 直流配电网的运行与控制、保护技术、故障诊断、相关电力电子设备的运行控制、直流配电网的稳定性等方面的研究还有很大的发展空间。

## 2 煤矿直流配电网设计

现有的煤矿供电系统具有如下特点: 供电可靠性要求更高; 电压等级多, 用电端包括交流 36 V, 127 V, 660 V, 1140 V, 3.3 kV, 6 kV, 10 kV 等 7 个电压等级<sup>[33]</sup>, 每个矿井井下需要增设多个变电所, 满足不同的电压和功率输出需求。随着煤矿生产能力的不断提高, 生产设备单机功率和电压都在不断增大, 6 kV 和 10 kV 已直接用于通风、排水、运输、提升设备等。频繁启停设备多(如提升机、采煤机、掘进机等负载), 负载类型较为集中, 大部分为电机类负载(如通风机、提升机、掘进机、采煤机、水泵、带式输送机等), 少量照明负载和监控通信设备。如果煤矿实施直流供电, 必须针对更多电压等级和 6 kV 以上的直流配电系统开展研究。

直流配电网的总体结构主要有环状直流配电网、

放射状直流配电网、两端配电直流配电网 3 种<sup>[5]</sup>。放射状直流配电网供电可靠性较低,因此并不适合煤矿这样供电可靠性要求较高的场合。当前针对低压直流配电研究侧重于以分布式能源接入直流电网,但是由于分布式发电的间歇性特点,如果应用于煤矿电网,不利于对系统进行优化设计,因为即使存在并入煤矿直流电网的分布式电源,系统的其他组成依然需要按照最恶劣情况(即所有分布式电源均停止发电)进行设计,增加系统复杂性,降低了煤矿供电的可靠性。

综合上述分析,提出图 1 所示的煤矿直流配电网

络拓扑。图 1 中两路交流输入经变压器降压为 6 kV 后,供给整流器 1 和整流器 2,两个整流器输出侧并联,均以单位功率因数运行,输出 7.5 kV 直流供给变频器为中高压电机供电(如提升机、水泵等负载)。图 1 中还包括 4.5 kV、1.5 kV、1 kV、200 V、48 V 等其他 5 个直流电压等级,与原有的交流系统相比,将交流 10 kV 和 6 kV 电压等级合并为直流 7.5 kV。其他直流电压等级分别对应交流 3.3 kV、1 140 V、660 V、127 V 和 36 V。图 1 的储能单元用于补偿由于负载突然启停导致的直流电压跌落或闪变,降低整流单元的负担。

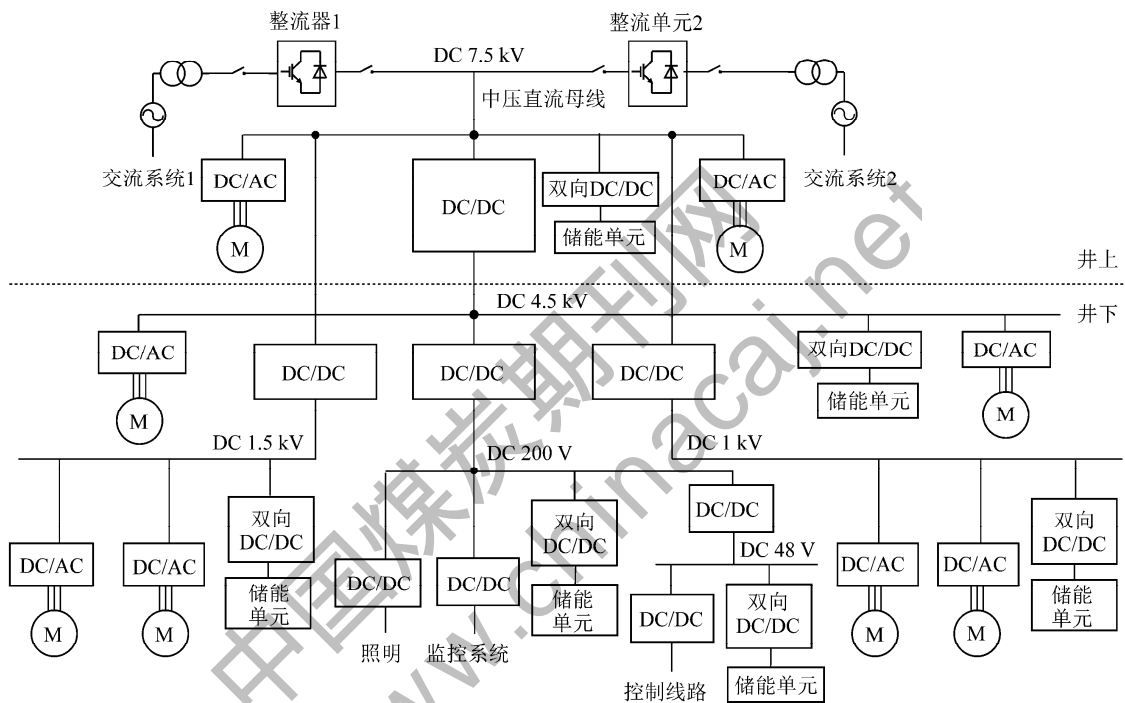


图 1 煤矿直流配电网网络拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of DC distribution network for mine

### 3 构建煤矿直流电网的关键技术分析

#### 3.1 中高压直流输出的固态变压器技术

图 1 中,通过整流器 1 和整流器 2 获得煤矿直流配电所需的高压直流。整流器主要涉及中高压直流输出的多电平变换器或固态变压器技术。

多电平变换器主要包括钳位型、级联型和模块组合多电平变换器 3 种类型<sup>[34-38]</sup>,其中钳位型随着电平数增加,半导体器件的数量和控制难度急剧增加,限制了其在高电压下的应用<sup>[37]</sup>。级联型多电平变换器主要指级联 H 桥型多电平变换器(Cascaded H-Bridge Multilevel Converter-CHMC),CHMC 由于具有可模块化设计,便于系统扩容和冗余控制等优点。该变换器在中高压变频和 SVG 中得到了广泛应用,在 SVG 工程应用中,通过级联 CHMC 输入电压可达

35 kV,单机功率可达 100 MV·A,串联的 H 桥多达 26 个<sup>[39]</sup>。当前固态变压器的研究中,多数研究机构采用 CHMC 作为前级整流环节<sup>[31]</sup>。

模块组合多电平变换器(Modular Multilevel Converter-MMC)同样具有高度模块化、易于扩容等优点,近些年已成为电力电子领域的研究热点。并先后在美国连接皮兹堡和旧金山的高压直流输电项目和我国的上海南汇风电场柔性直流输电示范工程( $\pm 30$  kV, 20 MW)等项目中得到应用<sup>[38]</sup>。其中后者于 2011 年开始运营,是我国首条正式商用的基于 MMC 结构的高压直流输电工程<sup>[32]</sup>。中科院电工所研制的电力电子变压器整流输入端也采用 MMC 结构,输入电压为 10 kV<sup>[31]</sup>。上述两种多电平变换器结构无论在电压等级还是功率输出方面,完全能够满足煤矿电压等级和功率的需求。

基于上述分析,提出图 2(a)所示的基于 CHMC 的直流输出电力电子变压器拓扑结构。该拓扑结构三相输入,每个 H 桥输出端有高频隔离的双向 DC-DC 模块,DC-DC 模块的输出串联实现高压直流输出。受高频变压器功率限制,DC-DC 模块可通过输入并联和输出并联扩大输出功率。这样不仅解决了高压输出问题,同时进一步提高系统容量。DC-DC 模块可采用双向 LLC 或移相全桥经高频变压器隔离的 DC-DC 变换器实现,如图 2(b)、(c)所示。

出串联等组合文献[40-42]曾进行过较为系统的论述,但是当时的实验验证仅用了 3 个模块。实际工程应用中串并联的 DC-DC 模块数量远大于 3 个,需要进一步结合 DC-DC 模块不一致性进行理论分析和实验验证。当整流器 1 和整流器 2 采用基于 CHMC 的直流输出电力电子变压器拓扑结构并联运行时,还需解决两个整流器的均流问题和环流抑制问题。

### 3.2 直流电压的稳定问题

在直流配电网中,维持直流配电母线电压的稳定是直流配电系统控制上的首要任务<sup>[6]</sup>。如图 1 所示,正常运行情况下,由整流器 1 和整流器 2 供电,并控制直流母线电压的稳定,当发生大功率负荷突然启停时,直流母线不可避免下降或上升,此时储能单元经双向 DC-DC 变换器提供或吸收能量,维持电压和系统的稳定。储能单元可采用超级电容与蓄电池配合,此方案能够充分利用超级电容瞬态响应速度快,蓄电池储能量大的优点。

由于安全问题,储能单元的电压不宜过高,而直流母线电压较高,双向 DC-DC 变换器需工作在输入串联输出并联模式,如图 3 所示。单模块采用双向 LLC 变换器结构<sup>[43]</sup>。因此需要研究输入串联输出并联的双向 DC/DC 变换器运行时的理论问题。双向 DC-DC 变换器同样是当前的电力电子研究热点领域之一,一般包括输入侧电压控制模式、输出侧电压控制模式和功率控制模式<sup>[18]</sup>,当前研究的双向 DC-DC 变换器基本上以功率控制模式为主。所提的双向 DC-DC 变换器采取输入串联输出并联结构,主要工作于输入侧电压控制模式和输出侧电压控制模式两种,工作过程中涉及频繁的两种工作模式的切换,因此如何通过检测母线电压、电流等信息预测双向 DC-DC 变换器下一步的工作模式、如何与电力电子变压器之间的协调控制迅速实现两种工作模式的无缝切换、双向 DC-DC 变换器工作过程中如何维持输入侧均压和输出侧均流等问题是实现本方案的关键技术。由于直流母线存在阻抗,电力电子设备中的开关器件开通或关断时线路的电感效应,还需要研究储能单元的布点优化和容量配置问题。进一步提高电压的稳定度和直流配电系统的整体效率。

### 3.3 煤矿直流配电的保护技术

可靠的继电保护是直流配电能够得到工程化应用的基本保障。与交流系统一样,需要研究直流配电系统的保护技术。主要涉及如何准确判断故障位置和危及安全运行的异常工况,同时如何在故障情况下迅速断开故障点,防止故障范围的扩大。需针对不同接地方式故障情况下对配电系统的影响、对人身安全

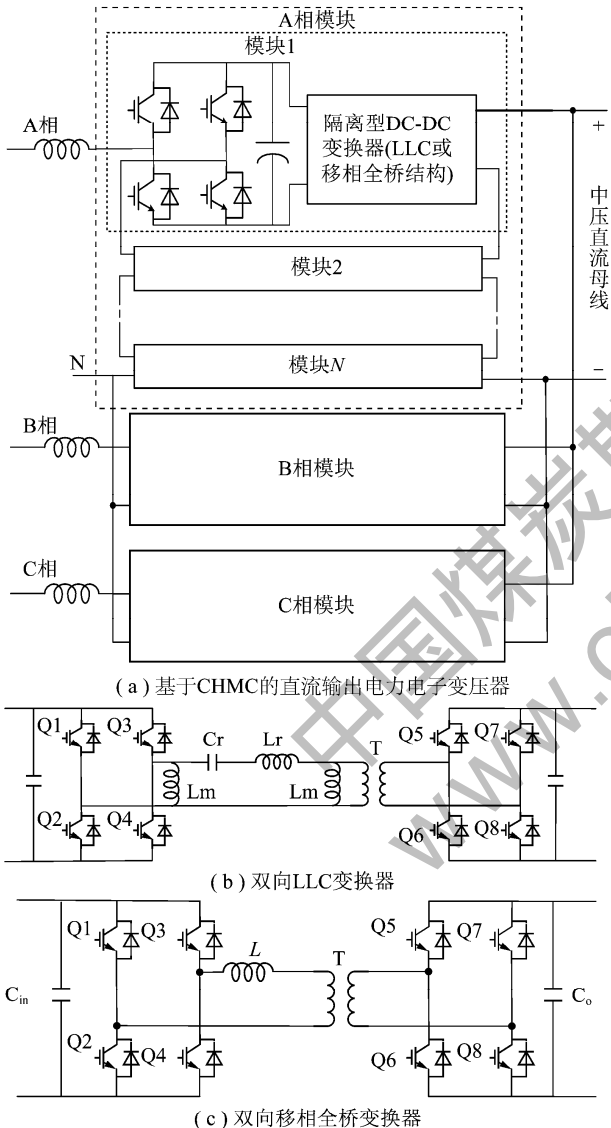


图 2 基于 CHMC 的直流输出电力电子变压器  
Fig. 2 Power electronic transformer of DC output based on CHMC

该方案需要解决的关键技术包括三相功率平衡问题、各个 DC-DC 模块的输入输出侧均压问题, A 相模块、B 相模块、C 相模块输出端均流问题。关于模块的输入输出串并联运行的均压或均流问题,包括输入串联输出并联、输入并联输出串联、输入串联输

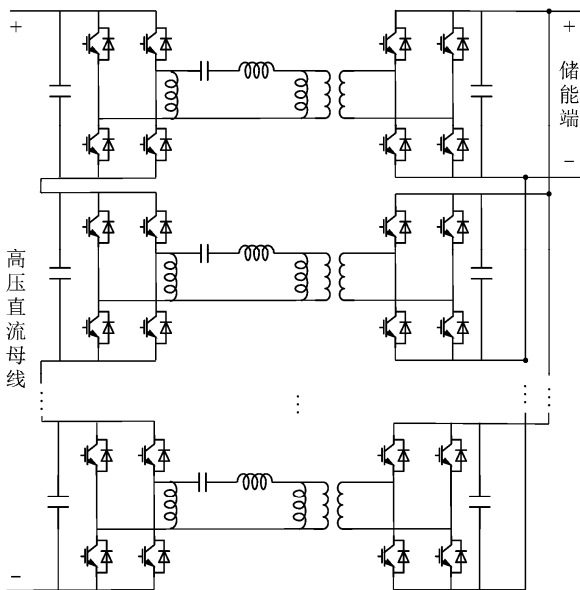


图 3 输入串联输出并联的双向 LLC 变换器  
Fig. 3 Bidirectional LLC converter of input series and output parallel

的影响、诊断直流漏电的方法等方面开展研究。

同交流断路器一样,直流断路器是实现继电保护的执行设备。近年来,国内外直流断路器的研制上不断取得进展。目前直流 1 500 V 以下的直流断路器已实现工业化生产,同时在电动汽车、光伏发电系统已得到应用。2012 年 ABB 公司成功研发出高压直流断路器<sup>[4]</sup>。直流断路器作为直流配电系统实现保护的关键执行设备已基本具备在煤矿直流配电系统应用水平。

### 3.4 煤矿直流配电系统的电压等级优化及其他若干问题

尽管图 1 中标出了各级直流电压等级,但是并非优化后的电压等级,电压等级的优化与煤矿设备机电设备的功率等级、供电距离(设备放置地点)等因素相关,同时应考虑目前地面现有直流电气设备(如直流断路器、电力电子开关器件耐压等级等)的电压等级。从如何提高配电系统运行效率、降低电气设备成本等角度研究煤矿井下电压等级的优化方法。

煤矿电气设备的隔爆、煤矿直流配电网的监测监控和保护接地等若干问题尽管在当前交流电网下已基本成熟,并且可为直流配电网提供借鉴。但是同样需要对此类问题进行研究并提供完善解决方案。

## 4 构建煤矿直流配电网的可行性分析

当前,由于分布式能源的不断发展以及直流配电网具有的一系列优点,国内外低压直流配电研究逐渐兴起,配电直流化已成为一种趋势或交流配电的重要补

充。煤矿供电网络既是相对独立的用电单元,同时也是大电网的一部分,因此开展构建煤矿直流配电网的研究与当前针对低压直流配电的研究相辅相成、相互支撑。

尽管煤矿直流配电与低压直流配电系统相比,电压更高,涉及的电压等级更多,存在较多的高电压大功率电气设备。但是当前电力电子器件水平、电力电子拓扑及其控制技术已能够完全能够满足我国煤矿现有的电压等级和功率实际需求,如级联式的 SVG 输入电压可达 35 kV,单机功率可达 100 MV·A。

煤矿井下电气设备基本上由各种交流电机、照明和监控设备组成,一旦改造成直流电网,井下电机需要配备变频器,从节能环保角度看,电机配备变频器也是我国大力支持的改造项目。而目前照明和监控设备供电几乎都是将交流电整流成直流电后经开关电源供电,因此几乎无需对照明和监控设备进行改造就可以直接采用直流供电。而且机车牵引、航空、通信数据中心、电动汽车配电系统都已基本实现直流化。这些实际案例对于煤矿实施直流供电具有重要的借鉴意义。

综合上述分析,煤矿当前的用电设备基本支持直流供电。直流配电网在其他领域的应用可为构建煤矿直流配电网提供借鉴,当前电力电子设备无论在电压等级还是功率容量上已达到煤矿电气设备对电压和功率的实际需求。构建煤矿直流配电网符合电力电子技术与电力系统不断融合的发展趋势,具有未来可实现的可行性。

## 5 结 语

就构建煤矿直流配电网的关键技术和可行性进行了分析,同时提出了实现煤矿直流配电供电网络拓扑和用于高压直流输出的电力电子变压器电路拓扑结构。

由于成本和电气设备厂家支撑等因素,即使与煤矿直流配电涉及的相关技术完全成熟,短期内煤矿直流配电网仍难以实现。但是随着电力电子技术与电网融合越来越紧密,煤矿配电系统可从部分直流化向全面直流化逐渐过渡或者构建煤矿交直流混合电网。煤矿直流配电与当前国内外开展的低压直流配电相比有着自身独特特性,开展构建煤矿直流配电网涉及的关键技术研究具有重要的理论价值和广阔的应用前景。

### 参考文献:

[1] 王彦文,高彦.煤矿供电技术[M].徐州:中国矿业大学出版社

- 社 2013: 19-20.
- [2] 孙继平. 煤矿用电子电子产品电磁兼容性要求 实验方法[J]. 煤炭科学技术 2013 41(6): 68-72.  
Sun Jiping. Requirements and test method of electromagnetic compatibility for electric and electronic products in coal mine[J]. Coal Science and Technology 2013 41(6): 68-72.
- [3] 浙江大学发电教研组直流输电科研组. 直流输电技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 9.
- [4] 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.
- [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] 王丹, 毛承雄, 陆继明, 等. 直流配电系统技术分析及设计构想[J]. 电力系统自动化 2013 37(8): 82-88.  
Wang Dan, Mao Chengxiong, Lu Jiming, et al. Technical analysis and design concept of DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems 2013 37(8): 82-88.
- [7] Ito Y, Zhong Y, Akagi H. DC microgrid based distribution power generation system[A]. 2004 The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference [C]. Xi'an: IEEE, 2004: 1740-1745.
- [8] Brenna M, Tironi E, Ubezio G. Proposal of a local DC distribution network with distributed energy resources[A]. 2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power [C]. New York: IEEE 2004: 397-402.
- [9] Boroyevich D, Cvetkovic I, Dong D, et al. Future electronic power distribution systems: A contemplative view[A]. 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment [C]. Basov: IEEE 2010: 1369-1380.
- [10] 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.
- [11] Shi Jianjiang, Gou Wei, Yuan Hao, et al. Research on voltage and power balance control for cascaded modular solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2011 26(4): 1154-1166.
- [12] Xu She, Huang A Q, Lukic S, et al. on integration of solid-state transformer with zonal dc microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2012 3(2): 975-985.
- [13] Xu She, Huang A Q, Wang Gangyao. 3-D space modulation with voltage balancing capability for a cascaded seven-level converter in a solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2011 26(12): 3778-3789.
- [14] Zhao Tiefu, Wang Gangyao, Zeng Jie, et al. Voltage and power balance control for a cascaded multilevel solid state transformer[A]. The 25th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [C]. Palm Springs, CA: IEEE 2010: 761-767.
- [15] Xu She, Burgos R, Wang Gangyao, et al. Review of solid state transformer in the distribution system: From components to field application[A]. The 4th Annual IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCCE) [C]. Raleigh 2012: 4077-4084.
- [16] Lee J, Han B. Operational characteristic analysis of DC micro-grid using detailed model of distributed generation[A]. 2010 IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition [C]. New Orleans: IEEE 2010: 1-8.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 马骏超, 江全元, 余鹏, 等. 直流配电网能量优化控制技术综述[J]. 电力系统自动化 2013 37(24): 89-96.  
Ma Junchao, Jiang Quanyuan, Yu Peng, et al. Survey on energy optimized control technology in DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems 2013 37(24): 89-96.
- [20] Pasi Salonen, Tero Kaipia, Pasi Nuutinen, et al. An LVDC distribution system concept[A]. Proceedings of Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics [C]. Espoo, Finland 2008: 1-7.
- [21] Tero Kaipia, Pasi Salonen, Jukka Lassila, et al. Possibilities of the low voltage DC distribution systems[A]. Proceedings of Nordic Electricity Distribution and Asset Management Conference [C]. Stockholm, Sweden 2006: 1-10.
- [22] Joon-Young Jeon, Gyu-yeong Choe, Jong-soo Kim, et al. Design guideline of DC distribution systems for home appliances: ISSUES and solution[A]. 2011 IEEE international electric Machine & Drive Conference (IEMDC) [C]. Ontario 2011: 757-662.
- [23] 施婕, 郑漳华, 艾芊. 直流微电网建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备 2010 30(2): 86-90.  
Shi Jie, Zheng Zhanghua, Ai Qian. Modeling of DC microgrid and stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment 2010, 30(2): 86-90.
- [24] Hiroaki Kakigano, Yushi Miura, Toshifumi Ise. Distribution voltage control for DC microgrids using fuzzy control and gain-scheduling technique[J]. IEEE Transaction on Power Electronics 2013, 28(5): 2246-2258.
- [25] Gilsung Byeon, Taeyoung Yoon, Seaseung Oh. Energy management strategy of the DC distribution system in buildings using the EV service model[J]. IEEE Transaction on Power Electronics 2013, 28(4): 1544-1554.
- [26] Ho-Sung Kim, Myung-Hyo Ryu, Ju-Won Baek. High-efficiency isolated bidirectional AC-DC converter for a DC distribution system[J]. IEEE Transaction on Power Electronics 2013 28(4): 1642-1654.
- [27] Gab-Su Seo, Jongbok Baek, Kyusik Choi, et al. Modeling and Analysis of DC Distribution Systems[A]. 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia [C]. The Shilla Jeju, 2011: 223-

- 227.
- [28] Du Yi ,Jiang Daozhuo ,Yin Rui ,et al. Modeling and simulation of dc distribution network based on distributed energy [A]. 2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement ,Sensor Network and Automation ( IMSNA) [C]. Toronto 2013: 990-994.
- [29] Hamed Mohsenian-Rad ,Ali Davoudi. Towards building an optimal demand response framework for DC distribution networks [J]. IEEE Transaction on Smart Grid 2014 5( 5) : 2626-2634.
- [30] Myung-Hyo Ryu ,Ho-Sung Kim ,Jong-Hyun Kim ,et al. Test bed implementation of 380V DC distribution system using isolated bidirectional power converters [A]. the 5th Energy Conversion Congress and Exposition ( ECCE) [C]. Colorful Denver 2013: 2948-2954.
- [31] 李子欣 ,王 平 ,楚遵方 ,等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究 [J]. 电网技术 2013 37( 9) : 2592-2601.
- Li Zixin ,Wang Ping ,Chu Qiufang ,et al. Research on medium- and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer [J]. Power System Technology 2013 37( 9) : 2592-2601.
- [32] 赵 岩 ,郑斌毅 ,贺之渊. 南汇柔性直流输电示范工程的控制方式和运行性能 [J]. 南方电网技术 2012 6( 6) : 6-10.
- Zhao Yan ,Zheng Yibin ,He Zhiyuan. The control mode and operating performance of Nanhui VSC-HVDC demonstration project [J]. Southern Power System Technology 2012 6( 6) : 6-10.
- [33] 顾永辉 ,范廷瓚. 煤矿电工手册第三分册( 下) [M]. 北京: 煤炭工业出版社 ,1995.
- [34] Yuan Xiao ,Stemmler H ,Barbi I. Self-balancing of the clamping-capacitor-voltages in the multilevel capacitor-clamping-inverter under sub-harmonic PWM modulation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2001 16( 2) : 256-263.
- [35] Rodriguez J ,Bernet S ,Wu Bin ,et al. Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2007 54( 6) : 2930-2945.
- [36] Maharjan L ,Inoue S ,Akagi H. A transformerless energy storage system based on a cascade multilevel PWM converter with star configuration [J]. IEEE Transactions on Industry Applications ,2008 , 44( 5) : 1621-1630.
- [37] Rodriguez J ,Lai Jihsheng ,Peng F Z. Multilevel inverters: a survey of topologies ,controls ,and applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2002 49( 4) : 724-738.
- [38] 杨晓峰 ,林智钦 ,郑琼林 ,等. 模块组合多电平变换器的研究综述 [J]. 中国电机工程学报 2013 33( 6) : 1-14.
- Yang Xiaofeng ,Lin Zhiqin ,Zheng Qionglin ,et al. A review of modular multilevel converters [J]. Proceedings of the CSEE ,2013 , 33( 6) : 1-14.
- [39] 欧阳旭东 ,彭 程 ,胡广振 ,等. 高压大容量静止同步补偿器功率开关器件选用分析 [J]. 电力系统自动化 2013 37( 2) : 113-118.
- Ouyang Xudong ,Peng Cheng ,Hu Guangzhen ,et al. Power device characterization and selection of high voltage and high power STATCOM [J]. Automation of Electric Power Systems ,2013 , 37( 2) : 113-118.
- [40] Chen Wu ,Zhuang Kai ,Ruan Xinbo. A input-series-and output-parallel-connected inverter system for high-input-voltage applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2009 24( 9) : 2127-2137.
- [41] Ruan Xinbo ,Chen Wu ,Cheng Lulu ,et al. Control strategy for input-series-output-parallel converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2009 56( 4) : 1174-1185.
- [42] Chen Wu ,Ruan Xinbo ,Yan Hong ,et al. DC/DC conversion systems consisting of multiple converter modules: Stability ,control and experimental verifications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2009 24( 6) : 1463-1474.
- [43] Jiang Tianyang ,Zhang Junming ,Wu Xinke ,et al. A bidirectional LLC resonant converter with automatic forward and backward mode transition [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2015 30( 2) : 757-770.