适用于工业园区的柔性直流配电网系统研究

随着社会进步和经济发展，传统交流配电网系统的不足越来越明显，而直流配电网系统与传统交流配电网相比更具经济和技术优势，成为解决当今传统交流配电网供电能力不足以及分布式微电网运行效率低等问题的有效措施。总结了直流配电网的国内外研究现状，分析了柔性直流配电网的优势，探究柔性直流配电网的可靠性条件与技术要求；另外，基于工业园负荷用电状况，从电压等级序列和双极拓扑结构两方面提出适用于工业园区的可靠直流配电网系统，研究成果可为城市周边工业园区规划建设柔性直流配电系统提供参考。

肖 猛 严居斌 汪小明/成都城电电力工程设计有限公司
危 伟/三峡大学电气与新能源学院

肖 猛/高级工程师

关键词/Keywords
直流配电网·
电压等级·
网络结构·

0 引言

随着经济的发展，能源危机及环境污染等问题越来越突出，使用化石能源所带来的全球气候变暖、雾霾等环境恶化对人们的生活产生了巨大的影响。基于可再生能源发电的分布式电源成为缓解能源问题的有效措施，然而我国“重发不重输”的政策使得现有交流配电存在着诸多问题，无法调节分布式电源并网时对传统电网的冲击；另外，伴随着城市周边工业园区对供电电能质量和系统可靠性的要求越来越高，目前传统10 kV城市交流配电网无法满足城市周边工业园区的需求，其面临着供电能力不足、扩建走廊困难、电能质量问题较多以及负荷用电需求多样化等问题，这些问题对城市周边工业园区未来配电网系统的可靠运行提出新的挑战[1-2]。若全部采用20 kV交流配电网进行改造，涉及到线路和设备等成本投资大，交流配电网系统中的电压瞬时跌落、电网谐波等固有问题不能得到解决；另外，分布电源的大量接入，直流负荷以及含有直流环节的负荷日益增多，电网运行环境更为复杂。国内外最新研究文献提出采用柔性直流配电网系统来解决上述问题[3-6]。与传统交流配电网相比，柔性直流配电网系统具有改善供电质量、提高供电容量、快速调解系统中的有功功率与无功功率以及有效协调分布式电源接入电网系统等优点，使得柔性直流配电网成为解决城市及周边工业园区配电网系统发展问题的新途径[7-8]。

本文总结柔性直流配电网的国内外研究现状，分析柔性直流配电网的优势，探究柔性直流配电网的可靠性条件与技术要求；根据文献[9-13]结合实际工业园区中分布式电源接入状况、负荷容量密度分布规律以及未来园区发展前景等实际情况，从经济性及可行性出发，并结合现有电网结构等方面，提出适合工业园区未来发展的柔性直流配电网的拓扑结构及电压等级，研究成果可为城市周边工业园区规划建设柔性直流配电系统提供参考。

1 直流配电网国内外研究现状

相比于交流配电网，直流配电网因其经济性、稳定性和可靠性等优势而具有巨大发展前景。目前，一些电力强国已经纷纷开展了直流配电网方面的研究，提出了各自的直流配电网概念标准及发展目标。

美国弗吉利亚理工大学相对较早开始对直流配电网的研究。其在2007年

提出了适合未来住宅和楼宇供电的“Sustainable Building Initiative（SBI）”研究计划，随着进一步研究，在SBI的基础上，弗吉利亚大学于2010年提出了Sustainable Building Nanogrids（SBN），其典型结构如图1所示。整个系统直流母线具有两个电压等级，即DC 380 V和DC 48 V，分别给不同的负荷供电。其中DC 380 V为工业负荷供电，它通过AC－DC整流器及功率因数校正电路实现与交流大电网并网运行。DC 48 V母线主要为计算机、手机等重要负荷供电，其通过DC－DC换流器与DC 380 V直流母线连接。

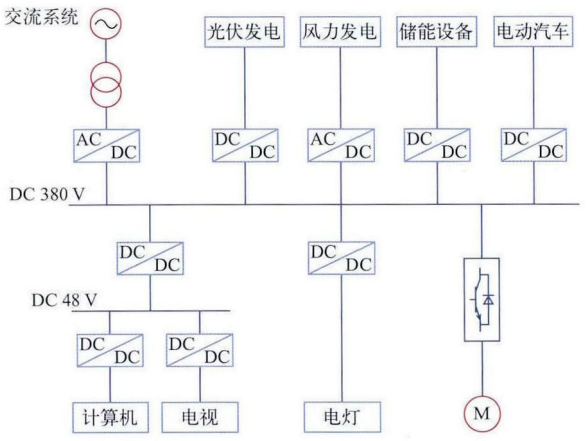

图1 CPES中心提出的直流配电系统结构

日本坂田大学在东京大学直流微电网的基础上，于2006年提出了一种双极结构的直流微电网系统，其拓扑结构如图2所示。

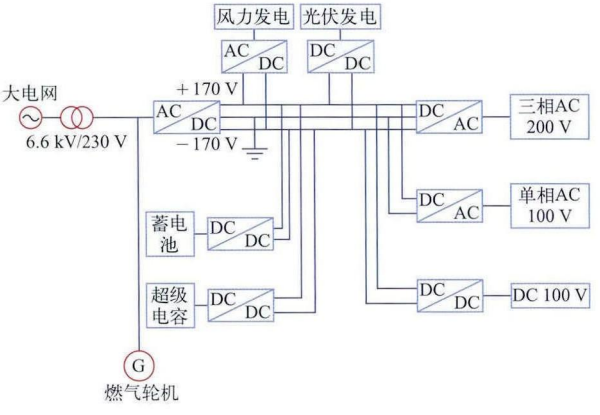

图2 双电极直流配电系统结构

该系统分为供电电源和负荷供电两个模块。其中供电电源模块由光伏电源、燃料电池、超级电容、发电机及大电网组成，它依靠前端AC－DC换流器将大电网6.6 kV的高压交流电变换为220 V的直流电，并通过不同规格的DC－DC变换器将燃料电池、超级电容等储能设备连入±170 V的双极直流母线上。在负荷供电模块上，利用DC－DC、DC－AC换流器将±170 V电压转化成各种等级的电压来给负荷供电。

2009年后，国内对直流配电网的多个方面展开研究，在直流配电网的拓扑结构、电压等级选择等各个方面都取得重大突破。

文献[6]对直流配电网的系统结构、控制方法以及保护技术等关键技术和相关研究现状进行阐述，并提出直流配电网的系统结构组成成分，给出直流配电网中高低压配电母线的连接方式，即工频变换和高频变换方式。其中高频变换方式相比工频变换方式具有明显的优势，是未来发展的热门。

浙江大学学者江道灼结合我国配电网的特点，在文献[8]中针对直流配电网的拓扑结构提出三种类型，即放射型、环状型和两端供电型。放射型具有结构简单、控制容易、建造成本较低、易于实现且故障保护容易的优点，但当其系统母线出现故障时，整个系统都会瘫痪，系统稳定性最低。环状型结构较为复杂，当系统出现故障时，切除故障部分后系统仍能正常运行，此时运行与放射型相似。两端供电型一般采用“手拉手”的方式，此结构稳定性介于上述两种结构之间，但其具有构建价格昂贵、控制困难以及配合复杂的缺点。

2 直流配电网可行性研究

2.1 交流配电网存在的问题

我国配电网主要是以交流配电网为主，交流配电网因其结构简单和技术成熟在今后一段时间内依旧是主要的配电形式，但随着经济和电力电子技术的发展，在今后会逐步被直流配电网所取代，交流配电网会遇到如下问题。

（1）分布式电源的接入

分布式电源的接入，需要大量的并网换流

器，经济性较差，且大部分分布式电源会对配电网的稳定性产生影响，加大分布式电源并网难度。

（2）用户对供电可靠性和电能质量的要求越来越高

一方面城市发展规模不断变大，导致负荷数量不断增加，用电量变大，线路出现故障变多；另一方面，信息技术高速发展且重要负荷、敏感负荷和非线性负荷不断增加，重要负荷对电能质量要求很高，但大量非线性负荷会对配电网的电能质量造成很大影响。

（3）配电网结构不合理

我国“重发不重输”的政策，导致电网建设严重滞后，现有配电网已经无法满足负荷的快速增长需求，而在土地资源紧张的情况下已经无法再建新的输电走廊，因此电力供需之间的矛盾越来越突出，在某些地区甚至会出现拉闸停电现象。

（4）直流负荷快速增长

随着经济的发展，人民生活水平的提高，家庭用电方式的转变，越来越多的直流电器进入家庭，大部分直流电器使用时需要经过AC－DC换流器进行整流，将交流变为直流，这将大大增加费用。

2.2 直流配电网的优势

与交流配电网相比，直流配电网具有如下优势。

（1）直流配电网更适合分布式电源接入

现阶段，风力发电站和光伏发电站大规模分布在偏远地区，发出的电能集中向外输送，这样不利于分布式电源的充分利用，因风力发电波动而切机运行也会造成电能浪费。采用直流配电网一方面可以减少变换器的使用，节约了建设成本，且提高了系统的稳定性；另一方面可以将电站里的各个子系统利用直流方式集合起来，只需要控制各子系统的电压幅值，而无须调节相位和频率，直流集合控制更加简单可靠。

（2）直流配电网的供电可靠性高

在交流配电网中，很多设备的运行都与电压的频率和相位有关，而直流配电网中不存在频率稳定的问题，可靠性高。

（3）直流配电网的供电容量大

与交流配电网相比，双极直流电的输电功率与三相交流电的输电功率近似相等，而当输电线路建设费用和使用的走廊宽度相同时，直流线路的传输功率约为交流线路的1.04倍。

2.3 交直流配电网经济性对比

交直流配电网可以从两个方面进行经济性对比：①线路价格；②输电损耗。

在线路造价方面，交流配电网为三相四线制，而直流配电网母线一般为双极输电母线，只需要两根输电线即可，这样在很大程度上节省了输电线路建设费用。对于电压有效值相同的交直流电场，当它们施加于相同的绝缘材料时，交流线路所承受的电压峰值是直流线路的1.7倍，很大程度增加了交流线路的绝缘要求。因此，在绝缘材料投资方面，直流配电网有很大的优势。在价格方面，对低压侧负荷供电，三相交流供电电缆的价格约为200 元/m，±15 kV和±7.5 kV的双极直流输电线路电缆的价格约为100 元/m，且由前文可知直流配电网可以减少换流器等电力电子设备的使用，大大降低了建设成本。在线路损耗方面，传统交流配电网中存在有功损耗和无功损耗，虽然可以通过安装无功补偿器等设备来降低系统损耗，但这也增加了线路的建造价格和系统的复杂性；直流线路不存在趋肤效应，线路的截面积得到充分的利用。综上所述，直流配电网不仅可以节省大量的建造费用，而且线路损耗小，具有很强的经济性。

3 直流配电网的电压等级选择

文献[9]提出±750 V、400 V（±200 V）和48 V的直流配电网等级序列，本文在此基础上结合工业园的负荷特性，设计了直流配电网的拓扑结构，如图3所示。

3.1 直流配电网拓扑结构介绍

此结构采用的是双极性母线的供电方式，且

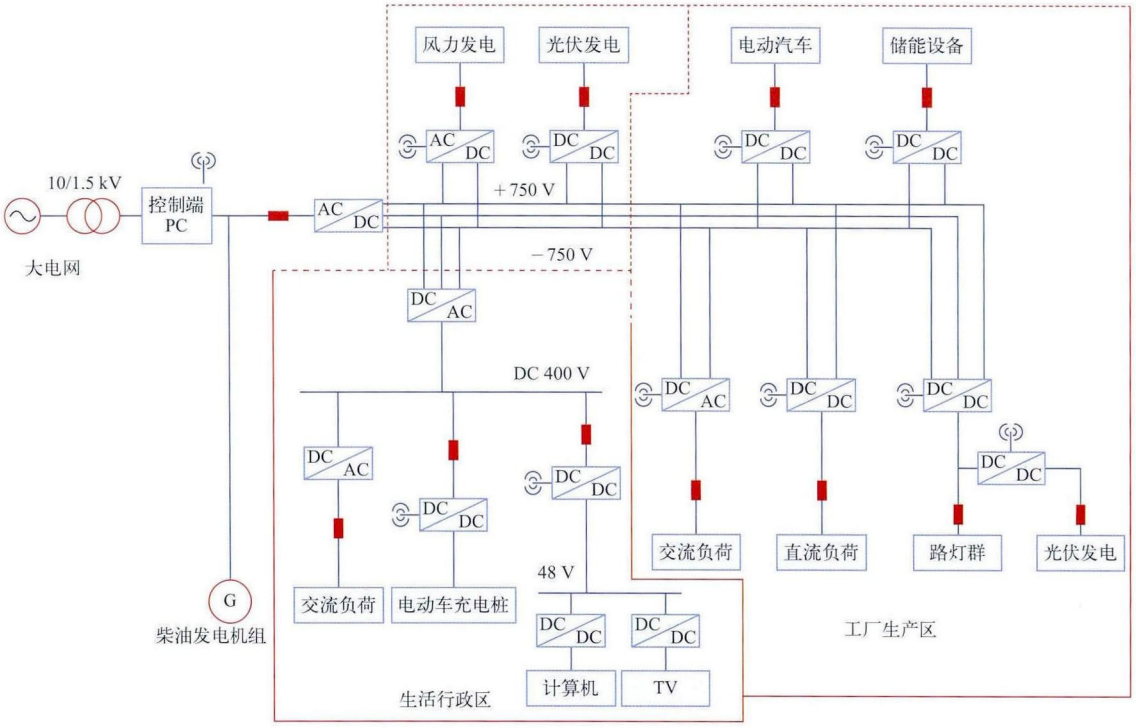

图3 工业园直流配电网拓扑结构

分为工业生产区、生活行政区和分布式电源区三个区域。此结构通过10 kV/1.5 kV的变压器和AC－DC换流器与大电网相连，获得±750 V的双极直流电压。分布式电源和储能单位通过AC－DC或DC－DC换流器与直流母线相连，当分布式电源不能满足负荷的需求时，控制端PC发出信号，使直流配电网并网运行；当分布式电源能满足需求时，直流配电网处于孤岛运行模式。

生活行政区通过DC－DC换流器从±750 V电压母线上获得400 V直流电压，为直流或交流负荷供电。在生活行政区设有电动车充电桩，因为电动车的充电电压基本上与400 V相近，可以很好地为电动车充电。在生活行政区同时设有48 V的超低压直流电压母线，为计算机等通信设备供电。

工业生产区通常负荷大多数电压较高且40%～60%负荷为直流负荷，通过DC－DC或DC－AC换流器直接连在±750 V直流配电网上。整个工业园的路灯数量也很多，因此本文将其通过DC－DC换流连在±750 V直流配电网上。当分布式电源发电容量较多时，直流储能设备进行储能，否则储能设备可作为电源为负荷供电。

本工业园分布式电源选择风力发电电源和光伏发电电源，风力和光伏属于可再生的清洁能源范畴，可以从源头上解决电动汽车所带来的污染问题。

3.2 电压等级选择

实际工程采用的是放射型拓扑结构，此结构的电压等级有±750 V、400 V和48 V。

（1）低压配电网±750 V、400 V

此电压等级母线主要是为城市轨道交通及企业大型负荷供电，也为分布式电源提供了即插即用接口。±750 V电压通过改变接线方式可以得到直流1 500 V的电压，可以通过DC－AC换流器与大电网连接，±750 V成为微网与大电网经济运行的核心电压等级。

400 V是目前国际上常用的电压等级，也是各常规直流负荷可以直接使用的电压等级，文献[14]给出电动汽车接入的电压等级与400 V接近，方便即插即用；此电压等级也可以通过DC－AC变换为220 V交流电源，更方便用户利用分布电

源。直流400 V也可以由±200 V的电压改变接线方式得到。

（2）超低压电压等级48 V

48 V电压是家用或商用能效利用率较高电压等级，此类负荷区具有供电距离短、安全性高和负荷小的特点，绝大部分家用电器的负荷电压要求为48 V，如计算机、电视机等常用的电子产品及传真等通信设备，此电压等级也可以为企业数据中心供电，与400 V电压一起完成生活和行政区的供电。

4 结束语

本文总结了直流配电网的现状和研究程度，讨论直流配电网的可行性及经济性，通过指出直流配电网的优点及交流配电网现今所存在的问题，得出直流配电网具有很好的应用前景。基于实际情况给出了电压等级为±750 V、400 V和48 V，提出工业园区的直流母线的拓扑结构。最后，根据实际工程的交直流负荷容量将工业园区划分为三个区域，分别设定工业生产区和生活行政区的电压等级和母线结构。

参考文献

[1] 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 (12)：3368-3374.

[2] 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 (9)：2582-2589.

[3] 周逢权，黄伟．直流配电网系统关键技术探讨 [J]．电力系统保护与控制，2014 (22)：62-67.

[4] 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 (8)：82-88.

[5] 马钊，安婷，尚宇炜．国内外配电前沿技术动态及发展 [J]．中国电机工程学报，2016 (6)：1552-1567.

[6] 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 (25)：9-19.

[7] 沈鑫，曹敏．分布式发电接入主动配电网的全局优化与研究 [J]．电气工程学报，2015，10 (6)：67-70.

[8] 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 (8)：98-104.

[9] 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 (9)：19-25.

[10] 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 (10)：35-41.

[11] 李建国，赵彪，宋强，等．直流配电网中高频链直流变压器的电压平衡控制策略研究 [J]．中国电机工程学报，2016 (2)：327-334.

[12] 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 (13)：3391-3403.

[13] 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 (25)：4295-4303.

[14] 刘权．电动汽车充换电站直流微网的控制策略研究 [D]．北京：华北电力大学，2014.

（收稿日期：2017－02－12）EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告