

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181120

## 楼宇直流配电系统关键技术研究综述

姚钢<sup>1</sup>, 茆中栋<sup>1</sup>, 殷志柱<sup>2</sup>, 周荔丹<sup>3</sup>, 李东东<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海电气集团中央研究院, 上海 200070;  
3. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 随着新能源和电力电子装置的大量应用, 楼宇直流配电系统相比于传统交流系统具有技术与经济上的优势。首先对国内外楼宇直流配电领域的相关新技术和发展现状进行了梳理。然后从技术角度对楼宇直流配电系统的拓扑结构、负载与电源、电压等级与经济性、优化管理系统以及对应的保护技术等方面进行了分析归纳总结。最后从楼宇直流配电系统的发展方向以及与能源互联网的配合进行了展望。

**关键词:** 楼宇直流配电系统; 负载与电源; 电压等级; 优化管理系统; 能源互联网

### Key technologies of building DC power distribution system: an overview

YAO Gang<sup>1</sup>, MAO Zhongdong<sup>1</sup>, YIN Zhizhu<sup>2</sup>, ZHOU Lidan<sup>3</sup>, LI Dongdong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;  
2. Central Academe, Shanghai Electric Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China; 3. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** With the extensive application of new energy and a large number of power electronic devices, the Building DC (BDC) power distribution system has technical and economic advantages over the traditional AC system. In this paper, firstly, the latest research and development of BDC power distribution system is summarized. Secondly, the topology structure, power and load, voltage level and economy, optimal management system, the corresponding protection technology and other aspects are described and analyzed. Finally, the development direction of BDC power distribution system and the cooperation with the energy internet are prospected.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61374155) and Natural Science Foundation of Shanghai (No. 18ZR1418400).

**Key words:** building DC (BDC) power distribution system; load and power; voltage level; optimal management system; energy internet

## 0 引言

目前向楼宇提供电能的一般为交流系统<sup>[1]</sup>。近年来, 电源和负载的组成都有了明显的变化, 从电源端来看, 光伏和风电等新能源在发电领域所占的比重在逐年提高, 2012年至2017年这5年, 光伏和风电的发电装机容量年平均增长率分别为149%和28%<sup>[2]</sup>, 而新能源发电接入传统电网, 至少经过DC-AC转换或者AC-DC-AC变换, 既增加了技术难度, 也影响了整个配电系统的可靠性<sup>[3]</sup>; 在负载

侧, 大量的民用低压设备开始随着电力电子技术的发展而开始使用整流装置, 将交流电变换为直流电使用, 比如LED灯、电动汽车(EV)等<sup>[4]</sup>。美国的建筑能耗占比已经达到39%<sup>[5]</sup>, 中国也占有相当比例。部分楼宇的直流负载占比达到90%<sup>[6]</sup>, 同时“绿色建筑”进入高速发展阶段<sup>[7]</sup>, 节省投资、降低能耗、提高电力系统可靠性和灵活性成为了电力工业发展方向<sup>[8]</sup>, 鉴于上述原因, 国内外的学者们开始研究楼宇直流(building DC, BDC)配电系统的可行性。

直流配电系统在有分布式能源接入和含有大量敏感性负载类的楼宇中具有诸多的优势<sup>[3, 8-11]</sup>:

1) 没有无功和相位同步的问题, 直流母线电压是衡量系统内有功平衡的唯一标准。

基金项目: 国家自然科学基金科学基金项目资助(61374155); 上海市自然科学基金项目资助(18ZR1418400)

2) 直流系统结构简单,省去了许多电能变换环节,降低了转换损耗,同时也更利于光伏电池、直流负载等设备的接入,提高供电可靠性。

3) DC-DC 换流器多为高频开关过程,因此装置功率密度远远大于工频变压器,设备体积更小,文献[12]提出的直接耦合式直流变压器拓扑,在阶梯波准两电平调制策略控制下可以实现在多种变比情况下效率均达到 99%以上。

直流配电技术一直存在于船舶、航空以及数据中心等领域,比如 1 000 V、20 MW 级的直流船舶电力系统<sup>[13]</sup>;主母线 DC 270 V 并且兼顾 DC 28 V 和 AC 115 V 多电压等级的航空高压直流供电系统<sup>[14]</sup>以及中压 DC $\pm 10$  kV、低压 DC 750 V 与 DC 240 V 并存的数据中心直流配电系统<sup>[15]</sup>,直流配电系统在上述领域的成功应用给了研究人员在楼宇直流配电系统设计和实施方面十分有价值的经验。国内外学者在楼宇直流配电系统领域也提出不少新的思路,比如光伏楼宇一体化 (Building Integrated PV, BIPV)<sup>[1]</sup>、采用风力涡轮和家用燃料电池的楼宇发电系统<sup>[16]</sup>以及家庭住宅“Smart Gateway Grid (SGG)”系统<sup>[17]</sup>,文献[9]也提出了基于功率硬件在环的楼宇直流系统的实验平台计划和相关技术要求。同时国内外在直流微电网领域已有不少获得认可的案例,早在 1997 年,荷兰能源研究中心(ECN)就系统地提出了在住宅中采用直流供电技术的实施方案<sup>[18]</sup>,电压等级为 DC 300 V;2006 年,日本大阪大学提出双极性 $\pm 170$  V 电压等级的系统结构<sup>[19]</sup>;美国弗吉尼亚理工大学 CPES 中心于 2007 年提出了“Sustainable Building Initiative (SBI)”研究计划,并且在 2010 年将 SBI 升级为 SBN,主要为未来家庭和楼宇提供电力<sup>[20]</sup>,采用的单极 DC 380 V 与单极 DC 48 V 双电压等级供电形式;美国北卡罗来纳大学则在 2011 年提出了“The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM)”系统结构,采用的是兼容 DC 400 V 和 AC 120 V 即插即用系统<sup>[21]</sup>;2007 年,罗马尼亚的布加勒斯特理工大学提出了一种带有交替供电电源的直流配电系统结构<sup>[22]</sup>,引入 DC 750 V 的冗余式母线结构,该系统将常规的风光发电与沼气等生物能发电结合起来;2014 年,厦门大学成功建设了中国第一个直流配电系统楼宇,其中光伏总量为 150 kW,母线电压为国际上主流的 DC 380 V<sup>[23]</sup>。

目前学者们的研究和实践广泛集中于楼宇直流配电系统的拓扑结构、负载与电源分析、电压等级的确定、经济性分析、供电能力、能量管理系统、

配电系统保护技术等方面。本文将对上述方面的最新成果进行全面的分析和总结,最后从楼宇交直流系统以及与能源互联网的接入等方面给出了展望。

## 1 楼宇直流配电系统拓扑结构

### 1.1 楼宇直流配电系统典型拓扑结构

楼宇直流配电系统通常处于低压配电网的末端,紧靠小型分布式能源和负载<sup>[16]</sup>。

直流配电系统的基本拓扑结构主要有放射状、环状和两端型 3 种<sup>[24]</sup>,如图 1 所示。放射状结构简单、成本低、保护配合容易,但可靠性相对较低;环状和两端型结构可靠性高、供电范围广、电源接入灵活,但投资较大且故障保护控制也相对复杂。出于成本控制和处于供配电系统末端的考虑,本文建议楼宇配电系统采用放射状拓扑结构。

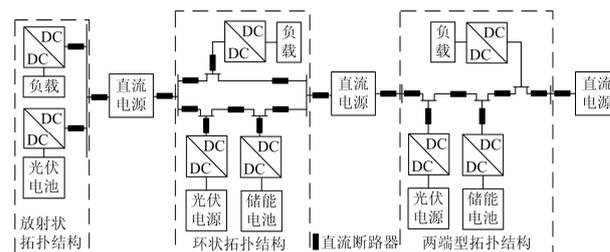


图 1 楼宇直流配电系统 3 种基本拓扑结构

Fig. 1 Three basic topological structures in BDC distribution system

除了楼宇直流配电系统常规采用的单极性模式外,还有双极性配电模式<sup>[19]</sup>。在实际应用中,Intel 等公司的数据中心已经采用此模式来提高供电可靠性<sup>[25]</sup>,双极性结构在高压直流输电领域已经被广泛接受并应用于实际工程,也说明了该模式的可靠性,楼宇双极性配电系统如图 2 所示。

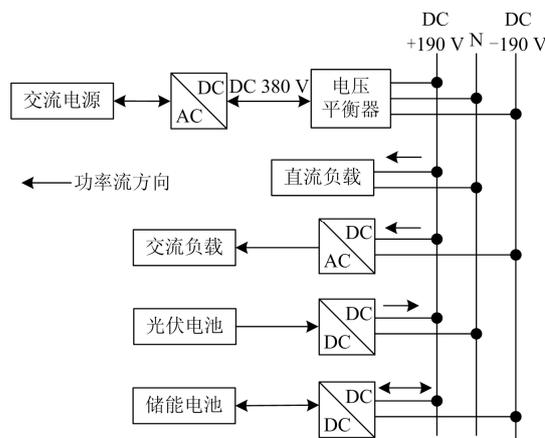


图 2 楼宇双极性配电系统图

Fig. 2 Building bipolar distribution system diagram

由于住宅需要分户计量且存在使用交流电源的可能性,这使得住宅楼宇配电系统区别于一般楼宇配电系统,需要单独考虑。解决方法如下:1)主母线为直流母线,需要交流时通过逆变器将其换为交流电,分布式电源直接接入主母线,但DC-AC和DC-DC变流器则分别在不同的住户中,以满足不同的需求;2)采用交直流混合供电模式,按照负荷的不同需求来配备独立的电源<sup>[17,26]</sup>。

### 1.2 楼宇直流配电母线的构成形式

直流母线构成形式一般分为4种,其种类以及对应的特点如表1所示<sup>[26-27]</sup>。

表1 直流母线结构特点分析

Table 1 Characteristics analysis of DC bus structure

结构类型	优点	缺点
单母线结构	结构简单,易与现有系统兼容	灵活性差
双极性结构	可靠性高,双电压等级供电	拓扑结构复杂,投资大
冗余式结构	电能质量高,可靠性高	电压等级单一
分层母线结构	超低直流电压,安全性好	需要增设直流变压器

在对可靠性要求比较高的楼宇中,主母线结构可采用双极性结构,根据中线的出线形式不同,有两种常见的配电方式<sup>[25]</sup>,如图3所示。

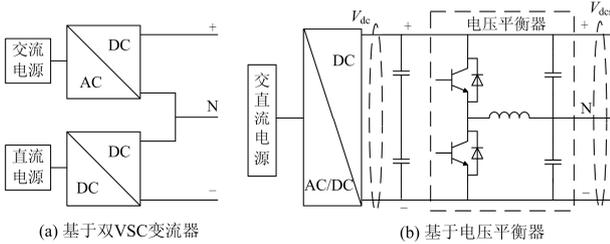


图3 双极性三线制母线结构

Fig. 3 Bipolar three wire bus structure

图3(a)所采用的是2个电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)输入并联输出串联的级联方式,虽然共用一极直流母线,实际上内部为两个独立回路,可靠性高,但需要两套全功率电力电子装置,成本较高,一般应用于高压大功率场所。图3(b)则采用基于电压平衡器双极性三线制的母线结构(图2也采用此方式),单极性直流通过电压平衡器实现双极性配电,电压平衡器不受直流系统运行模式的限制,能够灵活地接入直流侧输出端口;同时直流母线电压( $V_{dc}$ )的控制和正/负极电压( $V_{dcs}$ )的控制完全解耦,成本低、控制灵活。

关于拓扑结构的选取,本文建议采用基于电压平衡器的双极性母线结构,能够在控制成本的基础上达到系统高可靠性的要求。

## 2 楼宇直流配电系统的负载与电源分析

文献[16]提出楼宇直流配电系统是由负载和楼

宇中的分布式电源组成的直流供配电体系。在直流系统中,传统负载分为普通负载和柔性负载,后者可通过与配电系统的能量互动来缓解供需侧压力。

### 2.1 普通负载分析

#### 2.1.1 普通负载兼容性分析

为了验证普通直流负载能够在楼宇直流配电系统中正常工作,首先就要对其兼容性进行验证;同时为了对负荷特性有充分的认识 and 了解,就必须建立负载的稳态和暂态数学模型。

文献[28]论证了大部分家用电器可以在直流条件下正常工作,并绘制了部分电器在直流供电情况下的电气结构示意图。普通负载可以依据结构及工作原理被分为3类,具体兼容性如表2所示,其中感应电动机如果通过变频器来实现调速功能,也可以并入直流配电系统。

表2 负载分类及兼容性分析

Table 2 Load classification and compatibility analysis

负载类型	典型负荷	直流兼容性	
阻性负载	发热负载 光源负载	兼容 兼容	
旋转电机负载	感应电动机 交直流两用电动机	传统洗衣机 吸尘器	不兼容 兼容
电力电子子负载	开关电源负载 电子整流器	DC/DC变换器 荧光灯	兼容 兼容

#### 2.1.2 普通负载稳态与暂态模型分析

依据IEEE Sta.399<sup>[29]</sup>,负载可以用与电压相关的恒电阻模型系数 $A_{CR}$ 、恒电流模型系数 $A_{CC}$ 以及恒功率模型系数 $A_{CP}$ 来表示,则功率 $P$ 的表达式为

$$P(U) = A_{CR}U^2 + A_{CC}U + A_{CP} \quad (1)$$

文献[30]针对63种直流负荷进行研究,提出了一系列简化实用的负荷暂稳态数学模型,同时说明了通过实验来测定负荷参数的必要性,其中稳态模型如表3所示。

表3 负载稳态模型

Table 3 Load steady state model

负载类型	稳态模型	参数来源	
阻性负载	发热负载 光源负载	$R = R_0$ $R = R_1 I + R_0$	$R_0$ : 额定功率计算 $R_1$ : 测定
旋转电机负载	交直流两用电动机	$I = Y_0 U + I_0$	$Y_0, I_0$ : 测定
电力电子子负载	开关电源负载 电子整流器	$R = U^2 / P_0$ $R = U / I_0$	$P_0$ : 测定 $I_0$ : 测定

发热负载的暂态模型与稳态模型一致,光源负载的暂态模型可表达为

$$\hat{R}[k+1] = \hat{R}[k] + \frac{\Delta t}{\tau} (R[k+1] - \hat{R}[k]) \quad (2)$$

式中:  $\Delta t$  为仿真的时间步长;  $\tau$  为时间常数;  $R[k]$  为第  $k$  步的稳态电阻值。时间常数通过式(3)来预测。

$$\hat{\tau} = 0.0151 \ln P_{\text{rated}} - 0.0112 \quad (3)$$

式中,  $P_{\text{rated}}$  为额定功率。

交直流两用电机电磁平衡方程与机械平衡方程分别如式(4)和式(5)所示<sup>[30]</sup>, 但由于持续时间不同, 目前尚无数学模型可同时描述上述两种暂态过程。

$$u = e_a + R_{\text{eq}} i_a + L_{\text{eq}} \frac{di_a}{dt} \quad (4)$$

$$\begin{cases} J_{\text{eq}} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_m \\ T_e = K_m i_a^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $u$ 、 $e_a$ 、 $R_{\text{eq}}$ 、 $L_{\text{eq}}$ 、 $i_a$  分别为定子电压、反电动势、等效电阻、等效电感、定子电流;  $J_{\text{eq}}$ 、 $\omega_r$ 、 $T_e$ 、 $T_m$ 、 $K_m$  分别为转动惯量、角速度、电磁转矩、机械转矩、电机相关常数。

开关电源式负载的暂态模型可用图 4 表示,  $RLC$  参数可通过测量得到。电子整流器的暂态响应随控制回路不同而变化, 因此尚无准确的数学模型。

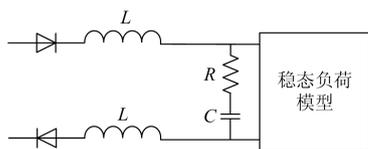


图 4 开关电源式负载暂态模型

Fig. 4 Transient model of switch mode power supply load

## 2.2 柔性负载分析

柔性负载可细分为可中断负载和不可中断负载, 可中断负载是指负荷可以依据实际情况自行控制间歇式启停, 例如: EV、空调; 不可中断负载为一旦启动之后必须直到满足工作时长要求才能结束的负荷, 例如: 洗衣机<sup>[31]</sup>。由于电加热器等非关键负载的宽电压范围特性, 电力弹簧可与之串联组成智能负载来保证关键负载的电压稳定<sup>[32]</sup>。本文针对储能系统和电梯进行分析。

### 2.2.1 储能系统

随着分布式新能源的渗透率不断增加, 功率波动对配电系统以及整个电网的影响也在扩大, 为了平滑功率波动和弥补孤岛运行模式可能出现的电能缺额, 储能系统是必不可少的。储能装置一般分为 6 类, 具体类别和特性对比如表 4 所示<sup>[33-34]</sup>。

本文从经济性及稳定性出发, 提出适用于楼宇建筑配电系统的储能装置类型为电化学能、电磁能、化学能 3 种。具体设计时可选用电化学储能电池,

或者多种储能方式相互配合使用, 实现优势互补。例如文献[34]提出的储氢燃料电池与超级电容器组成的混合储能方式, 既能够提高运行效率, 又可以稳定母线电压, 优化电能质量。

表 4 储能装置特性分析

Table 4 Analysis of energy storage devices

能量类型	代表种类	特性
机械能	飞轮储能	额定功率大、反应慢
电化学能	铅酸电池	技术成熟、寿命长
电磁能	超导储能	价格较高、循环效率高
热化学能	光伏燃料电池	额定功率大、价格昂贵
化学能	储氢燃料电池	环保绿色、能量密度大
热能	高温储能电池	能量密度大、效率低

在楼宇配电系统中, 电动汽车除了是负载外, 也可作为移动储能装置和电力数据终端<sup>[35]</sup>。为了实现电动汽车的“即插即用”功能, 近些年, 电动汽车向电网反向馈电(vehicle to grid, V2G)技术成为研究热点。文献[36]指出家用电动车每天约有九成以上的时间处于闲置状态, 超过 80% 的车辆在用电高峰时段处于待用状态, 适合作为 V2G 电源。电动汽车接入配电网的策略如下: 当分布式电源发出的电能超过负载需求时, 将多余电能汇入电动汽车进行充电, 当电动汽车充满电之后, 则将多余电能输送给电网; 当发电不足时, 电动汽车反馈电池存储的电能来保证直流负荷的持续供电, 提高了孤岛运行时系统的可靠性<sup>[37]</sup>。

### 2.2.2 电梯

电梯在楼宇配电系统中既是负载又是电源, 其能耗占比为 3%~7%<sup>[38]</sup>。电梯的四象限运行如图 5(a)所示, 向上或向下运行均含 3 个工作状态<sup>[1,38]</sup>如下。

1) 电动状态特征: 工作在第一或第三象限, 转速( $n_{\text{el}}$ )和转矩( $T_{\text{el}}$ )方向一致, 势能增加, 消耗电量。实际工况为: 空车下行或满载上行。

2) 减速发电制动状态特征: 工作在第二或第四象限, 转速与电磁转矩方向可能一致, 也可能相反(发电)。实际工况为: 半载或在接近半载的状态下运行。

3) 运行回馈发电状态特征: 工作在第二或第四象限, 转速与电磁转矩方向恒为相反, 稳定发电状态。实际工况为: 空车上行或满载下行。

在电梯的四象限运行过程中, 二、四象限各有一个稳态发电状态。本文依据文献[38]提出的 AC-DC-AC 通用型电梯能量回收系统, 改造出适用于楼宇直流系统的电梯能量回馈系统, 如图 5(b)所示, 在运行回馈制动模式时, 电容电压升高, 超过设定电压, 向直流母线回馈电能。节能率与电梯负

载率相关, 负载率越低, 节能率越高, 负载率为 1% 时, 节能率可以达到 49.1%<sup>[38]</sup>。

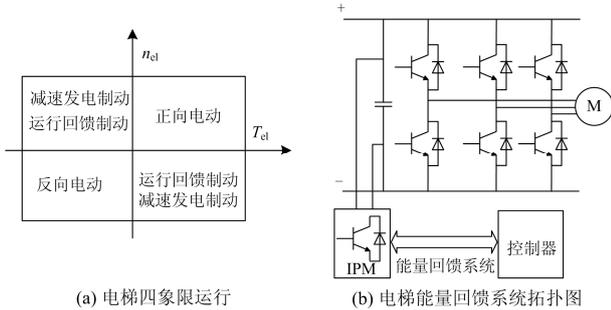


图 5 电梯能量回馈

Fig. 5 Energy feedback of elevator

由于电梯发电具有短时、频繁运行的特性, 会导致一般的蓄能装置充放电频率过高, 从而影响使用寿命, 需要配备快速充放电装置。

### 2.3 电源分析

目前, 应用广泛且技术较成熟的分布式发电技术, 主要有太阳能发电、冷热电三联供、风能发电、燃料电池、水力发电等。但出于成本和场地约束考虑, 燃料电池和水力发电并不适用于楼宇配电系统, 而“光伏楼宇一体化(BIPV)”技术是将光伏电池与楼宇外露面结合, 通过安装 Buck-Boost 等调压装置来实现当前光照条件下的最大功率点跟踪(MPPT)<sup>[39]</sup>。文献[40-43]针对光伏在弱光环境的接入、优化 MPPT 算法以及组件老化的故障检测问题均有了详尽分析。本文将针对冷热电三联供、风能发电在楼宇直流配电系统中的应用进行分析。

#### 2.3.1 冷热电三联供

冷热电三联供(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)系统是一种将供热、制冷及发电有机结合在一起的总系统, 文献[44]提出 CCHP 系统可以将总体能源利用率提高到 70%, 一般适用于有大量且固定冷负荷的建筑, 如图 6 所示。

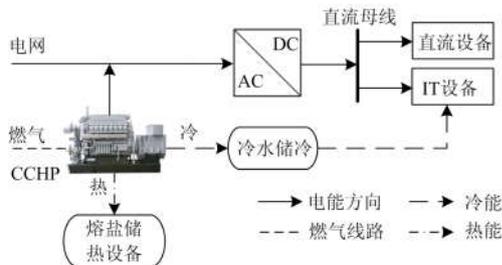


图 6 冷热电三联供在楼宇直流配电系统的应用

Fig. 6 Application of CCHP in BDC distribution system

#### 2.3.2 风能发电

传统的大型风电场通常建设在负荷水平较低的

区域, 跨区域交易市场不够成熟, 导致风电消纳问题突出, 弃风现象比较严重<sup>[45]</sup>。近年来随着小型风电机技术的日益成熟, 鼓励风电分布式开发的政策不断推出, 使得风电可以直接接入到楼宇中。

风机一般分为直驱型分机和双馈型风机, 为了更好地并入直流电网, 减少变换器, 风机结构可分别做如下改动:

1) 直驱型分机将网侧的 VSC 替换为 DC-DC 变流器并到直流母线<sup>[39]</sup>, 则可以省去 DC-AC 变流器以及相关的控制系统。

2) 双馈型风机通过网侧换流器和机侧换流器之间的直流母线引出线路将电能输送至配电网<sup>[45]</sup>, 但会增加网侧变流器的装机容量, 失去双馈风机变流器额定功率小的优势。

本文建议采用永磁直驱式风力发电机作为楼宇配电系统的风电来源。

## 3 楼宇直流配电系统的节能分析

### 3.1 传输功率与电能损耗

1) 在导线截面、绝缘水平相当的情况下, 直流系统比交流系统配电容量大。下面以直流双极系统和三相交流配电系统为例, 有

$$\frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{2U_{dc}I_{dc}}{\sqrt{3}U_{ac}I_{ac}\cos\varphi} = 1.28 \quad (6)$$

式中:  $P_{dc}$  和  $P_{ac}$  分别为直流双极系统和三相交流系统输送功率;  $U_{dc}$ 、 $I_{dc}$ 、 $U_{ac}$ 、 $I_{ac}$  分别为直流线电压、线电流以及交流线电压、线电流, 其中,  $U_{dc}=U_{ac}$ ,  $I_{dc}=I_{ac}$ ; 功率因数  $\cos\varphi$  取 0.9, 则表明在导线条件相同的情况, 直流双极配电系统的传输功率比交流配电系统多 28%。考虑到直流配电系统无涡流损耗和集肤效应, 以及直流地下电缆不受对地电容的影响, 直流双极系统的实际输电容量可以更大<sup>[46]</sup>。

2) 电能损耗一般由导线传输损耗和转换损耗构成, 交直流配电系统电能损耗对比及原因如表 5 所示。楼宇采用直流配电系统可以降低损耗, 且随着电压等级的提高, 其传输损耗会进一步降低<sup>[47]</sup>。文献[48]提出在智能 LED 配电系统中, 如果仅考虑

表 5 交直流系统电能损耗对比

Table 5 Power loss comparison of AC and DC system

损耗类型	优势方	原因
传输损耗	直流	① 直流系统没有电晕损耗;
		② 直流系统导线根数比交流系统少;
		③ 同等功率下直流系统线路电流更小;
		④ 直流系统不存在电抗, 没有无功损耗
转换损耗	直流	直流系统可以减少源荷间的转换环节

直流技术,则整个传输过程中的损耗相比于交流系统下降 14%。文献[49]提出在中型办公楼宇中,采用直流配电系统至少可以节能 11%。

### 3.2 电压等级

直流电压等级的确定一直是国内外学者在直流配电领域的研究重点,国际上还没有相关统一标准。文献[50-51]提出直流电压等级的选择应重点考虑的 3 个因素: 1) 直流配电网的供电半径,保证配电线路的带载能力; 2) 电气绝缘和保护,与目前商业化的直流开断技术良好匹配; 3) 系统成本和设计难度,即损耗能够控制且能够兼容现有的分布式电源与负载设备。目前国内外主要直流配电工程电压等级如表 6 所示。

表 6 各国直流工程电压等级

国家或地区	电压/V	设计单位	工程名称
美国 <sup>[20-21]</sup>	48/380/	CPES 中心/ 美国北卡罗	SBN/FREEDM
	400	来纳大学	
中国 <sup>[23]</sup>	380	厦门大学	厦门大学能源 学院建筑
中国台湾 <sup>[18]</sup>	360	台湾核能研究所	智慧型直流电力屋
荷兰 <sup>[18]</sup>	350	ECN	直流供电住宅

由表 6 可知,国内外现有的直流工程对电压等级的选取基本都在 300~400 V。文献[11]针对国外低压系统的直流电压等级进行了分析,在线电压为 400 V、相电压为 230 V 的现有三相交流系统下,提出 4 种直流电压等级: 326 V、230 V、120 V 及 48 V,最后从技术和经济的层面验证出 326 V 为最适合直流系统的电压等级。

针对国内的直流电压等级,文献[52]对比分析 DC 200 V、DC 380 V、DC 550 V 3 个电压等级,论证了在传输功率不大于 50 kW 的情况下 DC 380 V 线损率最低。文献[46, 53]分别从整个直流配电网电压等级序列出发,均提出了适用于楼宇直流系统的电压等级,文献[46]的观点为 400 V(±200 V)与 48 V;而文献[53]的观点则为 400 V、±110 V(220 V)和 48 V,各自优势如表 7。

文献[51]则从人体电击安全性、用电设备成本、供电半径、安全电压等级的直流开断 4 个方面出发,论证出 60 V 是最适合的楼宇超低压直流电压等级。

关于楼宇直流电压等级的选取,本文的建议是双极性±200 V 以及超低压 60 V,既能满足安全电压的要求,又能满足楼宇供电范围的要求。

表 7 直流电压等级及其对应优势

电压等级	优势
400 V(±200 V)	①与三相交流电压 AC 380 V 衔接;
	②技术比较成熟;
	③ITU(国际电信联盟)颁布了信息通信设备 400 V 直流供电接口的标准 <sup>[54]</sup> ;
	④方便电动汽车的接入。
±110 V(220 V)	①与单相交流电压 AC 220 V 衔接;
	②空调等变频负荷需要由 110 V 直流供电。
48 V	①安全电压;
	②方便光伏和 LED 接入。

### 3.3 供电能力

供电能力分为送电容量和供电距离两个方面。

对于双极性直流配电线路来说,线路首末端电压差与供电电压的比值可以表示为<sup>[46]</sup>

$$e_u = \frac{\Delta U}{U} \approx \frac{P_{dc} R_d}{2U^2} \quad (7)$$

式中:  $e_u$  为电压损耗率;  $U$ 、 $\Delta U$  分别为直流线路的供电电压和首末端电压差;  $R_d$  为等效电阻。参照交流系统的电气规范《电能质量供电电压允许偏差》,10 kV 以下供电电压允许偏差为额定电压的±7%,双极性条件下  $R_d$  为  $1 \Omega$ <sup>[46]</sup>,式(7)也可以表示为

$$P_{dc,MAX} \approx U_{dc}^2 \times 0.07 \quad (8)$$

直流配电线路压降为

$$\Delta U_{dc} = \rho J L \quad (9)$$

式中:  $\rho$  为电阻率,常用铜质导线电阻率估算取值为  $(2 \times 10^{-8}) \Omega \cdot m(50^\circ C)$ <sup>[51]</sup>;  $L$  为配电距离;  $J$  为电流密度,可通过查询文献[55]中的导体截面积和通过载流量计算获得,则式(9)可变为

$$L = \frac{\Delta U_{dc}}{\rho J} \quad (10)$$

由式(8)与式(10)可推算出对应电压等级下极限送电容量与距离,如表 8 所示。

表 8 各直流电压等级的送电容量与距离

电压/V	送电容量/kW	截面积/mm <sup>2</sup>	供电距离/m
400(±200)	11.2	70	700
		50	636
		16	214
220(±110)	3.4	10	179
		60	49
48	0.16	2.5	22.7

### 3.4 经济性

1) 投资成本与运行成本, 假设一个 10 kV 高压进线功率 10 MW 的楼宇配电系统, 如图 7 所示。

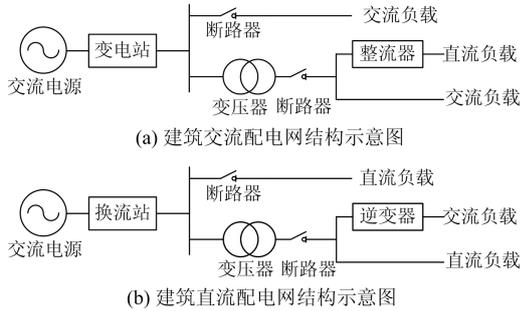


图 7 楼宇交流/直流配电结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of building AC/DC distribution system

依据图 7 中的系统构成和文献[47]对应价格数据来进行投资成本分析, 其中直流 10 kV 高压部分造价参考 DC±7.5 kV 数据, 对比结果如表 9。

表 9 楼宇交直流配电系统投资成本对比

Table 9 Investment cost comparison of building AC/DC power distribution system

项目	数目/容量	直流成本	交流成本
换流站	10 000 kW	0.1 万/kW	0.03 万/kW
变压器	1	50 万/台	15 万/台
断路器	2	45 万/台	2 万/台
电缆	4 km	100 元/m	200 元/m
变换器	若干	忽略	忽略
总计		1 180 万	399 万

楼宇配电系统总成本公式为

$$C = F + 0.1\eta n P_{av} S h \quad (11)$$

式中参数含义及取值见表 10。

表 10 总成本公式主要参数

Table 10 Main parameters of the total cost formula

参数	名称	直流参数	交流参数
$F$	投资成本	1 180 万	399 万元
$\eta$	损耗率 <sup>[47]</sup>	6.38%	11.7%
$P_{av}$	年平均负荷	10 MW	10 MW
$S$	售电电价	0.7 元/kW·h	0.7 元/kW·h
$h$	一年小时数	8 760 h	8 760 h
$n$	运行年数	待定	待定

楼宇交流配电系统总成本公式为

$$C_{ac} = 399 + 717.4n \quad (12)$$

楼宇直流配电系统总成本公式为

$$C_{dc} = 1180 + 391.2n \quad (13)$$

对比曲线如图 8 所示, 在传输容量与拓扑相同

的情况下, 直流配电网的初期投资成本高于交流配电网, 但得益于高传输效率形成的低运行成本, 使得总成本随着运行年数的增加会逐步接近并低于交流配电系统总成本。

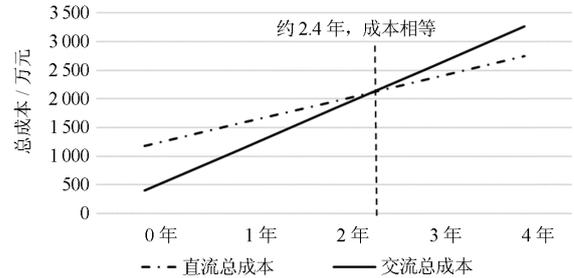


图 8 楼宇交直流系统总成本曲线图

Fig. 8 Building AC/DC system total cost curve

2) 导线改造费用, 同等电压等级下, 不论是直流单极配电系统还是双极配电系统, 其配电导线均可以由现有交流系统导线改造而成<sup>[56]</sup>。同时交直流同线馈送也为改造成本降低提供了新思路<sup>[37]</sup>。

在将现行的楼宇交流系统替换为直流系统之前, 经济性是一个必须考虑的指标。总成本中高压部分占了很多的比重, 对于已经采用交流配电系统的楼宇, 如果将原有系统全部拆除再重建直流系统, 经济性难以保证。因此本文建议低压处先实施直流配电, 高压处可以随着电力电子技术的进步导致的成本降低逐渐过渡到全直流配电。

## 4 楼宇直流配电系统优化管理

楼宇直流配电系统中, 由于电源类型众多, 功率输出特性和可控程度均不一致, 且存在并网运行、孤岛运行两种稳态工作状态和多种暂态过渡状态, 因此就需要有符合自身特点的运行控制技术, 而不能简单地照搬交流配电系统的控制方式。这里分为多源多荷优化运行、母线电压控制和电能质量控制 3 个方面进行分析。

### 4.1 多源多荷优化运行

由于楼宇配电系统所涉及到的电源和负载类型比较复杂, 多源多荷优化运行问题也是直流配电系统设计中的核心问题, 一般可以分为优化目标、变量函数、约束条件、求解方式 4 个部分, 具体如图 9 所示<sup>[31, 57-58]</sup>。在多源多荷优化运行设计方面, 交流配电系统已经有比较成熟的经验, 在优化运行设计的时候具有一定的参考价值。

### 4.2 母线电压控制

楼宇直流系统的控制主要是关注母线电压的稳定<sup>[59]</sup>, 母线电压不稳定会产生环流, 造成继电保护

装置误动作或影响设备正常工作, 一般解决的方式是对并联变流器进行均流控制<sup>[26]</sup>。目前, 控制方式主要为集中控制、主从控制、外特性下垂控制、自律分散控制, 如图 10 所示。

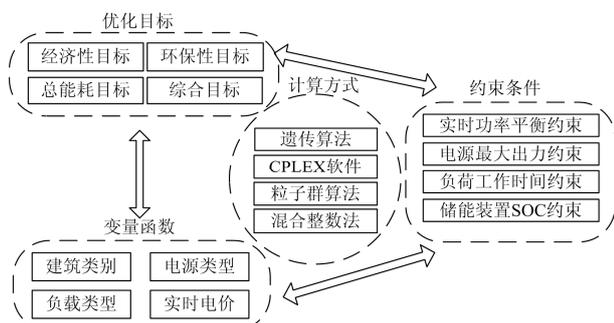


图 9 优化运行的组成部分

Fig. 9 Component part of optimal operation

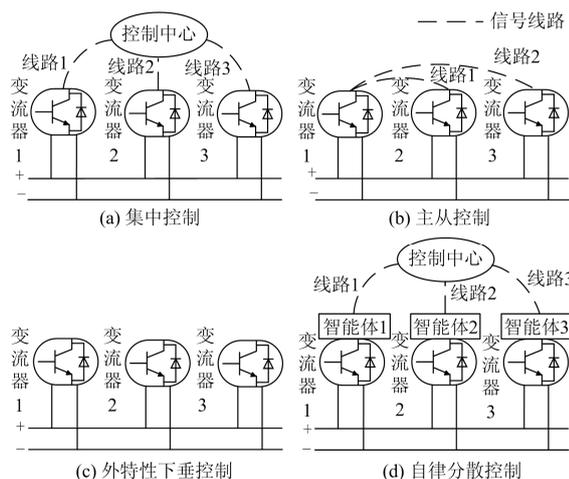


图 10 母线电压控制框图

Fig. 10 Bus voltage control block diagram

1) 集中控制是给整个系统加入一个控制中心, 各个并联单元通过通信线路来接收控制中心的信号来实现各个微源之间的功率分配, 但缺陷在于一旦集中控制出问题, 整个系统将无法正常运行, 可靠性难以得到保证。

2) 主从控制通过选择一个并联单元作为主控模块, 其余单元接收主控模块的功率分配信号来实现功率调控, 但可靠性仍然比较低。

3) 外特性下垂控制方法, 各模块独立地检测各自的本地信息, 控制相应模块的工作状态以实现微源间的功率分配, 不会因为某个故障模块的退出运行而影响整个系统的稳定。其缺点在于缺少模块间的信息传递, 在系统注入任意功率时不能及时调整各模块的功率分配时难以保证损耗率, 而且在功率变化较大的工况下, 母线电压会相应出现偏差<sup>[60]</sup>,

动态性较差, 在实际应用中还需要增加适当的控制策略进行二次调整<sup>[61]</sup>。但由于下垂控制易于实现“即插即用”的功能及高可靠性的特点, 目前为国内外学者研究的热点。

4) 自律分散控制, 是一种新型控制方法, 在每个系统单元上都设置一个智能体, 既能够和相邻智能体及上级控制中心进行信息交互实现全局优化, 又可以自主紧急处理突发情况维持系统平衡<sup>[62]</sup>, 具有较强的鲁棒性, 但目前相关深入的研究还比较少。

随着控制算法的增多, 控制系统结构的可靠性与灵活性、环流的抑制能力以及对母线电压稳定性的控制力, 将逐渐变为检验一个控制方法是否可以广泛适用的标准。

### 4.3 电能质量控制

在电能质量评估体系方面, 楼宇直流配电系统相比于交流系统, 其评价指标目前还尚未明确统一。目前也就无法准确全面地评估楼宇直流配电系统的电能质量<sup>[63]</sup>。典型的直流电能质量问题一般可分为 3 个方面, 相应的原因及危害如表 11 所示, 其中电压暂降与暂升是直流配电系统最为典型的电能质量问题<sup>[64]</sup>。

表 11 电能质量问题、原因及危害

Table 11 Power quality problems, causes and hazards

问题	原因	危害
直流电压波动	电源或负荷的大功率波动	① LED 闪烁
		② 影响设备正常工作
直流电压偏差	① 有功功率不平衡	① 增大馈线和接地导体损耗
	② 母线支路极间故障、接地故障	② 增加变流器损耗
直流调制谐波	① 脉冲负载的接入	① 影响负载正常工作
	② 变流器的存在	② 影响系统稳定性

针对上述问题的危害, 学者也提出了不同的解决方案, 主要分为 3 类。

1) 利用系统协调控制算法, 这种方法成本最低, 目前也是研究热点, 分为微电网控制方式和变流器控制方式, 例如: 文献[37]通过源荷端功率的对比来对电动汽车进行能量控制; 文献[65-66]通过直流母线电压分别对光储系统和风储系统进行能量控制, 实现功率平衡提高电能质量。

2) 微电源参与功率平衡调节, 电压波动和偏差问题本质就是有功功率不平衡。飞轮或者超级电容等储能装置具有惯性小, 充放电速度快的特性, 可以用来维持有功平衡<sup>[67-68]</sup>, 包括针对电梯回馈发电的能量回收, 可采用超级电容方式<sup>[1]</sup>。此外, 采用恒压输出模式的分布式电源也可平衡系统功率<sup>[64]</sup>。

3) 附加设备针对性治理, 是最直接改善电能质

量的方式，但会增加一定的硬件成本。可以通过采取电压平衡器的方法来实现良好的双极性母线配电，或者借鉴成熟的交流系统以及高压直流系统的滤波技术，来构成适用于配电系统的直流滤波装置，改善电能质量。

### 5 楼宇直流配电系统保护技术

直流配电保护技术作为楼宇直流配电系统的关键技术之一，与交流配电保护技术相比尚处于起步阶段，目前也没有相关规范标准<sup>[69]</sup>。文献[70]针对放射型、环型等结构的保护进行了总结，本文将从接地型式、故障保护分区与故障类型、故障隔离 3 个方面进行分析。

#### 5.1 接地型式分析

直流配电系统故障可分为极间故障和接地故障，极间故障多为短路故障，故障的检测与定位相对容易<sup>[71]</sup>，但对接地故障而言，不同的接地型式导致故障发生时表现出不同的特征<sup>[72]</sup>，同时接地故障发生的频率高于极间短路故障<sup>[73]</sup>，所以接地型式的选取至关重要。根据 IEC60364-1<sup>[74]</sup>对接地型式的定义，细分为 TT、IT、TN 3 种接地型式，如图 11 所示。TT 系统表示用电设备外露导电部分和电源侧直流母线的中性点(也可为正极、负极中的某一极)相互独立接地；IT 系统表示用电设备外露导电部分直接接地，电源侧直流母线不接地或经高阻抗接地；TN 系统表示中性点(也可为正极、负极中的某一极)直接接地，其余所有用电设备外露部分接到保护 PE 线上，并与电源母线接地点相连。

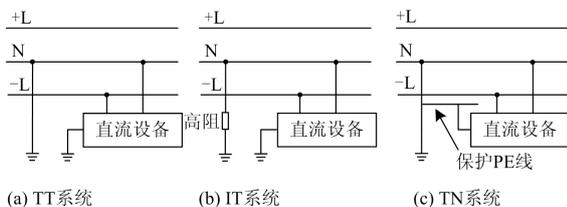


图 11 直流系统接地形式

Fig. 11 DC system grounding diagram

3 种接地形式在楼宇配电系统的应用及原因如表 12 所示，TT 系统和 TN 系统哪种更适用楼宇直流配电系统，还需要研究人员进一步的探讨研究。

文献[76]针对两电平 VSC 的直流系统，经过安全性和经济性的双重比较，提出单极性母线结构采用 VSC 端口负极接地的方案；而基于电压平衡器双极性母线结构提出了中性点经小电阻接地系统的方案，如图 12 所示。接地故障发生后，电阻  $R$  被串入故障回路中，降低了流过 IGBT 的电流，IGBT 无

须闭锁，电压仍可维持原有水平，使系统仍可正常运行，同时还可以减轻接地网腐蚀问题。接地电阻  $R$  值可选择与负荷等效电阻相近的阻值。

表 12 接地形式在楼宇中的应用及原因

Table 12 Application and reason of grounding type in building

接地形式	应用	原因
TT 系统	建议	从供电连续性、电气安全性等角度出发，最适合双极性直流系统 <sup>[73]</sup>
IT 系统	不建议	一点故障难以检测定位，易引发更严重的极间故障 <sup>[75]</sup>
TN 系统	建议	考虑了家用设备接地保护线与交流零线电位差限制 <sup>[71]</sup>

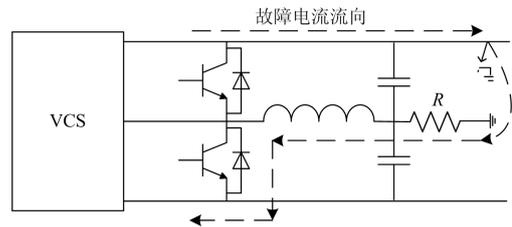


图 12 电压平衡器中点经小电阻接地系统

Fig. 12 Voltage balancer neutral point grounding system with small resistance

#### 5.2 故障保护分区与故障类型

由于楼宇直流配电系统具有电源种类多和线路的 T 接负载的特性，所以不可以直接套用高压直流输电领域的简单分区。文献[77]提出了 4 个部分的故障分区以及对应的故障类型，如表 13 所示，其中负荷侧保护，除了一般负荷之外，还包括小型分布式电源和储能装置。

表 13 故障保护分区与故障类型

Table 13 Fault protection partition and fault type

故障保护分区	故障类型
交流电源侧	交流侧断线或短路故障
变换器	阀短路、桥臂短路、变换器交直流侧短路
直流网络	接地故障、极间故障及断线故障
负荷侧	设备过载与短路

#### 5.3 故障隔离

故障隔离技术是针对故障发生时的处理方式对于保障人身设备安全尤为重要，由于技术落后、安全性差等原因，熔断丝、隔离开关等一系列装置会在未来逐渐地被淘汰<sup>[69]</sup>，目前比较主流的方案分为阻断型变流器和直流断路器<sup>[78]</sup>。

1) 阻断型变流器方案，不适用于双极性或者馈线大于 1 条的配电系统，原因是阻断型变流器的动作必然造成交直流系统或者源荷间的直接断开，从而失去了向剩余安全线路供电的能力，体现不出双

极配电系统高可靠性的优势。

2) 直流断路器方案, 由于直流系统中不存在电流过零点, 给直断路器研制也带来了技术上的困难, 也导致了该技术是目前直流输电领域的研究热点。直流断路器技术现有 4 种方案, 分别为: 全固态断路器、带机械隔离开关的混合固态断路器、混合式断路器、机械式有源或无源共振断路器。4 种方案均各有利弊, 未来直流配电系统保护技术研究方向即为研发低成本、大容量的直流断路器或者将限流装置与小容量断路器相结合的直流开关装置<sup>[77]</sup>。

针对楼宇配电终端, 日本 NTT 公司和富士通公司开发出了可支持 400 V 左右直流供电系统的电源插头, 具备灭弧、防电击以及机械式安全锁等功能, 解决了插线板的问题<sup>[70]</sup>。但浪涌保护等特殊要求, 还需进一步的研究。

## 6 楼宇直流配电系统前景展望

随着“绿色建筑”的概念越来越被人们重视以及能源结构和负载设备的不断调整, 在充分利用风光等分布式能源和电动汽车“即插即用”特性的基础上, 具有技术和经济优势的楼宇直流配电系统将成为未来能源互联网中重要的组成部分。本文提出了基于能源互联网概念的楼宇直流配电与能源综合

利用系统结构, 为楼宇连接能源互联网的建设提供了具有创新性和可行性方案, 如图 13 所示。在楼宇内部可以将风、光、储、气及设备负载在能源应用层配合起来, 将所有包括变换器在内的能源路由器的信息上传到控制层, 由信息控制中心统一调度控制, 最后将整个楼宇的状态与控制信息发送到信息层, 完成与能源互联网的结合。目前除了一些试点工程, 尤其在楼宇供电高压部分, 交流系统依旧占据了楼宇配电的主流, 因此在可预见的将来, 直至全直流供电, 楼宇交直流混合供电将能兼顾技术和经济性。

随着电力电子技术的发展, 包括换流器和断路器等在内的直流配电的成本在不断降低, 可以更好地推动楼宇直流配电系统的广泛应用。

目前我国尚无楼宇直流配电技术规范标准, 尤其是在电压等级和保护技术方面, 导致楼宇直流电气设计无规范可依, 难以在工程应用及推广, 希望国家相关行业能够尽快发布对应的规范标准。

当前, 楼宇直流配电系统的能量管理控制这方面的研究还不够深入, 尤其是如何结合柔性负载的调节能力来使得分布式的能源和储能的效率进一步提高, 以及如何完善楼宇中多源多荷协调优化运行, 这也是本文作者下一步的研究方向。

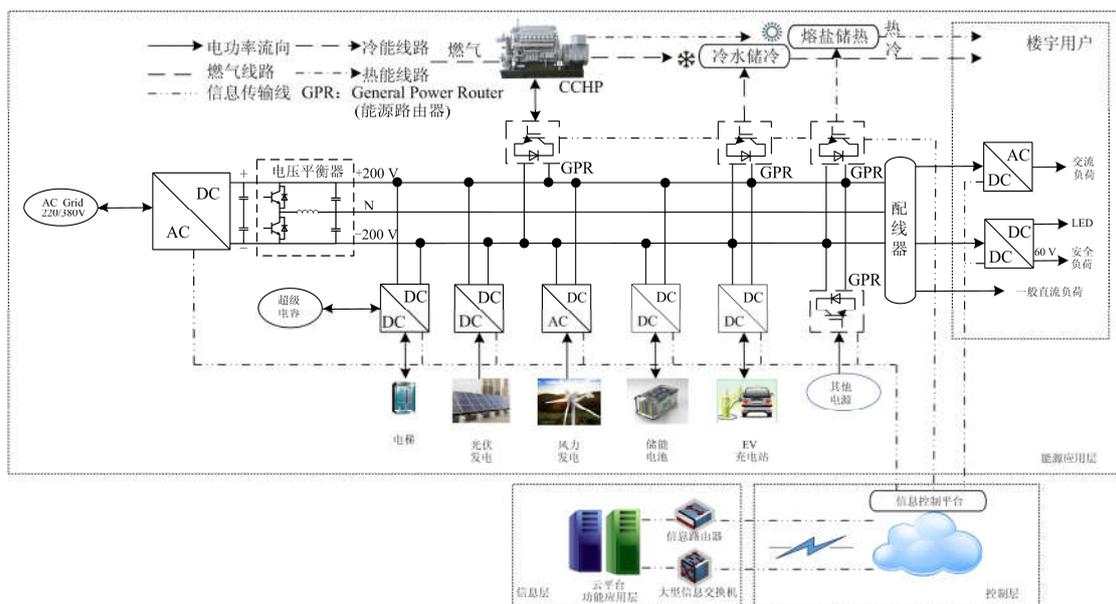


图 13 楼宇直流配电系统连接能源互联网示意图

Fig. 13 Schematic diagram of building DC power distribution system connected to energy internet

## 7 结语

本文从技术的角度分析了楼宇直流配电系统的典型拓扑、负载特性与分布式能源、电压等级与经

济性、优化管理、保护技术等关键技术, 奠定了未来楼宇直流配电系统的技术路线。同时本文探讨的内容是对国内外学者的研究成果上所作的总结和思考, 希望能为未来楼宇直流配电系统设计提供一些

思路和借鉴。此外,楼宇直流配电系统的发展,从与交流系统并存直至完全替代,还需要相当长的过程,在需要一线人员与学者的研究创新同时,国家政策法规的支持和相关市场机制的推出也是必不可少的。

### 参考文献

- [1] 丁宝, 张进, 赵亮, 等. 建筑直流配电系统研究[J]. 智能建筑电气技术, 2013, 7(6): 9-12.  
DING Bao, ZHANG Jin, ZHAO Liang, et al. Research of building DC distribution system[J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2013, 7(6): 9-12.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018: 9-15.
- [3] 雍静, 徐欣, 曾礼强, 等. 低压直流供电系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 42-52.  
YONG Jing, XU Xin, ZENG Liqiang, et al. A review of low voltage DC power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 42-52.
- [4] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.  
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [5] U.S. Environmental Protection Agency. U.S. EPA environmental technology verification program green building technologies[EB/OL]. [2006]. <https://nepis.epa.gov/Exe/tiff2png.cgi/P100EKZ5.PNG?-r+75+-g+7+D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C06THRU10%5CTIFF%5C00001425%5CP100EKZ5.TIF>.
- [6] MANUELA S, WANG B C, FABRICE L. Building-integrated microgrid: advanced local energy management for forthcoming smart power grid communication[J]. Energy and Buildings, 2013, 59: 236-243.
- [7] 秦旋, 荆磊. 绿色建筑全寿命周期风险评估与分析: 基于问卷调查的探索[J]. 土木工程学报, 2013, 46(8): 123-135.  
QIN Xuan, JING Lei. Risk ranking and assessment in the whole life cycle of green building: an empirical investigation from construction industry[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(8): 123-135.
- [8] 施婕, 艾芊. 直流微电网在现代建筑中的应用[J]. 现代建筑电气, 2010, 6(1): 47-51.  
SHI Jie, AI Qian. Application of DC micro-grid in modern building[J]. Modern Architecture Electric, 2010, 6(1): 47-51.
- [9] FANTAUZZI M, IANNUZZI D, PAGANO M, et al. A building DC microgrids planning of an experimental platform with power hardware in the loop features[C] // 4th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, November 22-25, 2015, Palermo, Italy: 1507-1512.
- [10] 刘健, 魏昊焜, 张志华, 等. 未来配电网的主要形态-基于储能的低压直流微电网[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 11-16.  
LIU Jian, WEI Haokun, ZHANG Zhihua, et al. Future architecture of power distribution network — low-voltage direct current micro-grids based on energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 11-16.
- [11] SANNINO A, POSTIGLIONE G, BOLLEN H J. Feasibility of a DC network for commercial facilities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5): 1499-1507.
- [12] 游洪程, 蔡旭. 应用于直流电网的直接耦合式直流变压器[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2516-2524.  
YOU Hongcheng, CAI Xu. Direct-coupled DC transformers applied to DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2516-2524.
- [13] 童正军. 民用船舶直流电网发展现状分析[J]. 船舶工程, 2014, 36(增刊 1): 104-106.  
TONG Zhengjun. Analysis of DC grid development status for civil shipboard[J]. Ship Engineering, 2014, 36(S1): 104-106.
- [14] 陈仲, 徐亚明, 王志辉, 等. 航空高压直流电网低频纹波的有源抑制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 151-158.  
CHEN Zhong, XU Yaming, WANG Zhihui, et al. Active inhibition of the low frequency ripple in aeronautical high voltage DC power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 151-158.
- [15] 李红军, 姜世公, 王云飞, 等. 柔性直流配电网电压等级选择与数据中心工程设计实践[J]. 电力建设, 2016, 37(5): 138-145.  
LI Hongjun, JIANG Shigong, WANG Yunfei, et al. Voltage selection of VSC-DC distribution network and project design application on data center[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5): 138-145.
- [16] 谢少军, 肖华锋, 罗运虎. 直流楼宇技术初议[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 107-113.  
XIE Shaojun, XIAO Huafeng, LUO Yunhu. On DC-building technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 107-113.

- [17] WANG D, PENG F Z. Smart gateway grid: a DG-based residential electric power supply system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2232-2239.
- [18] 张永明, 丁宝, 傅卫东, 等. 基于直流配电与直流微网的电气节能研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 389-397.  
ZHANG Yongming, DING Bao, FU Weidong, et al. Electrical energy conservation based on DC distribution and DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 389-397.
- [19] 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 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 18-22, 2006, Jeju, South Korea: 1-7.
- [20] BOROYEVICH D, CVETKOVIC I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems: a contemplative view[C] // 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, May 20-22, 2010, Brasov, Romania: 1369-1380.
- [21] 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.
- [22] MAGUREANU R, ALUB M, PRIBOIANU M, et al. A DC distribution network with alternative sources[C] // 2007 Mediterranean Conference on Control and Automation, June 27-29, 2007, Athens, Greece: 1-4.
- [23] ZHANG F Y, MENG C, YANG Y, et al. Advantages and challenges of DC microgrid for commercial building a case study from Xiamen University DC microgrid[C] // 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM), June 7-10, 2015, Atlanta, USA: 355-358.
- [24] 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.
- [25] 汪飞, 雷志方, 徐新蔚. 面向直流微电网的电压平衡器拓扑结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1604-1612.  
WANG Fei, LEI Zhifang, XU Xinwei. Research on topologies of voltage balancers applied in DC micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1604-1612.
- [26] 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.
- [27] 王振浩, 成龙. 低压直流配电系统结构分析[J]. 电力系统及其自动化, 2016, 38(5): 74-78.  
WANG Zhenhao, CHENG Long. An analysis on the structure of the low-voltage DC power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 38(5): 74-78.
- [28] RODRIGUEZ-OTERO M A, O'NEILL-CARRILLO E. Efficient home appliances for a future DC residence[C] // IEEE Energy 2030 Conference, November 17-18, 2008, Atlanta, USA: 1-6.
- [29] IEEE Standards Board. IEEE recommended practice for industrial and commercial power system analysis: IEEE Std399[S]. American: American National Standards Institute, 1998.
- [30] SALOMONSSON D, SANNINO A. Load modeling for steady-state and transient analysis of low-voltage dc systems[J]. The Institution of Engineering and Technology Electric Power Applications, 2007, 1(5): 690-696.
- [31] HUANG Y T, WANG L, GUO W A, et al. Chance constrained optimization in a home energy management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 252-260.
- [32] 程明, 王青松, 张建忠. 电力弹簧理论分析与控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2436-2444.  
CHENG Ming, WANG Qingsong, ZHANG Jianzhong. Theoretical analysis and controller design of electric springs[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2436-2444.
- [33] LUO X, WANG J H, DOONER M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. Applied Energy, 2015(137): 511-536.
- [34] 蔡国伟, 陈冲, 孔令国, 等. 风电/光伏/制氢/超级电容器并网系统建模与控制[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2982-2990.  
CAI Guowei, CHEN Chong, KONG Lingguo, et al. Modeling and control of grid-connected system of Wind/PV/Electrolyzer and SC[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2982-2990.
- [35] 王一振, 赵彪, 袁志昌, 等. 柔性直流技术在能源互联

- 网中的应用探讨[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3551-3560.
- WANG Yizhen, ZHAO Biao, YUAN Zhichang, et al. Study of the application of VSC-based DC technology in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3551-3560.
- [36] 包广清, 徐欣, 王晓兰, 等. 电动汽车与风电机组协同的微电网调度策略[J]. 控制工程, 2016, 23(9): 1387-1393.
- BAO Guangqing, XU Xin, WANG Xiaolan, et al. Dispatch strategy of micro-grids based on coordination between the electric vehicle and wind power[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(9): 1387-1393.
- [37] 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.
- [38] 丁宝, 乔久鹏. 基于能量回馈与最小励磁电流的电梯节能研究[J]. 建筑电气, 2007, 26(5): 3-6.
- DING Bao, QIAO Jiupeng. Research on energy-saving of elevator running based upon energy feedback and vector space minimum excitation current[J]. Building Electricity, 2007, 26(5): 3-6.
- [39] 张宏俊, 吴越文, 陈卓, 等. 交直流配电网接纳分布式电源的实时仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 79-85.
- ZHANG Hongjun, WU Yuewen, CHEN Zhuo, et al. Real-time simulation of AC and DC distribution network to receive distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 79-85.
- [40] 周笛青, 吴春华, 李智华. 局部阴影下光伏组件建模及输出特性研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(11): 2098-2105.
- ZHOU Diqing, WU Chunhua, LI Zhihua. Simulation and experimental study of the photovoltaic model under partial shading[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(11): 2098-2105.
- [41] SHANG Liqun, ZHU weiwei, LI Pengwei, et al. Maximum power point tracking of PV system under partial shading conditions through flower pollination algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 400-406. DOI: 10.1186/s41601-018-0111-3.
- [42] 吴春华, 徐坤, 黄建明, 等. 一种基于非反相 Buck-Boost 变换器光伏分布式 MPPT 的研究[J]. 电工电新技术, 2011, 30(4): 84-88.
- WU Chunhua, XU Kun, HUANG Jianming, et al. Research on photovoltaic distributed maximum power point tracking based on non-inverting buck-boost converter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2011, 30(4): 84-88.
- [43] 吴春华, 徐文新, 李智华, 等. 光伏系统直流电弧故障检测方法及其抗干扰研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3546-3555.
- WU Chunhua, XU Wenxin, LI Zhihua, et al. Study on detection method and its anti-interference of DC arc fault for photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3546-3555.
- [44] 周晓倩, 余志文, 艾芊, 等. 含冷热电联供的微网优化调度策略综述[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 26-33.
- ZHOU Xiaolian, YU Zhiwen, AI Qian, et al. Review of optimal dispatch strategy of microgrid with CCHP system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 26-33.
- [45] 尹忠东, 王超. 分布式风电接入交直流混合配电网的研究[J]. 电力建设, 2016, 37(5): 63-68.
- YIN Zhongdong, WANG Chao. AC/DC hybrid distribution network with distributed wind farm[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5): 63-68.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] KOH L H, PAING S N, ONG H C, et al. DC renewable connected building grid for intelligent LED lighting system[C] // 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), June 19-21, 2017, Edinburgh, UK: 970-974.
- [49] GERBER L D, VOSSOS V, FENG W, et al. A simulation based comparison of AC and DC power distribution networks in buildings[C] // 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM), June 27-29, 2017, Nuremberg, Germany: 588-595.
- [50] 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.
- [51] 陈红坤, 何贵雄, 石晶, 等. 楼宇交直流混合供电模式下直流电压等级的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5840-5851.
- CHEN Hongkun, HE Guixiong, SHI Jing, et al. Research on DC voltage level of hybrid AC/DC building power supply system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5840-5851.
- [52] 田龙刚. 直流微电网电压等级的选择及其稳定控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 21-26.
- TIAN Longgang. Research on the voltage level selection and its stability control strategy of DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 21-26.
- [53] 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, 36(13): 3391-3403.
- SHENG Wanxing, LI Rui, LI Yue, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3391-3403.
- [54] 刘希禹. 电信和数据中心高压直流供电系统发展目标[J]. 邮电设计技术, 2014, 22(11): 80-87.
- LIU Xiyu. Development target of high voltage power feeding system for telecom and data center[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2014, 22(11): 80-87.
- [55] 全国建筑物电气装置标准化技术委员会. 建筑物电气装置 第5部分: 电气设备的选择和安装 第523节: 布线系统载流量: GB/T 16895. 15—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [56] BORIOLI E, BRENNAN M, FARANDA R, et al. A comparison between electrical capabilities of the cables used in LV AC and DC power lines[C] // 2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, September 12-15, 2004, Lake Placid, NY, USA: 408-413.
- [57] VARDAKAS S J, ZORBA N, VERIKOUKIS V C. A survey on demand response programs in smart grids: pricing methods and optimization algorithms[J]. IEEE Communication on Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 152-178.
- [58] YANG J J, LIU J, FANG Z L. Electricity scheduling strategy for home energy management system with renewable energy and battery storage: a case study[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(6): 639-648.
- [59] 支娜, 张辉, 肖曦, 等. 分布式控制的直流微电网系统级稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 368-378.
- ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi, et al. System-level stability analysis of DC microgrid with distributed control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 368-378.
- [60] 韩民晓, 许冬, 万磊. 基于一致性算法的混合多端直流自律分散控制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 130-136.
- HAN Minxiao, XU Dong, WAN Lei. Consensus algorithm based decentralized autonomous control of hybrid multi-terminal direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 130-136.
- [61] 郑永伟, 陈民铀, 李闯, 等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 6-12.
- ZHENG Yongwei, CHEN Minyou, LI Chuang, et al. A microgrid control strategy based on adaptive drooping coefficient adjustment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 6-12.
- [62] 高扬, 艾芊, 郝然, 等. 交直流混合电网的多智能体自律分散控制[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1158-1164.
- GAO Yang, AI Qian, HAO Ran, et al. Autonomous decentralized control of multi-agent system for AC/DC hybrid grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1158-1164.
- [63] 姚钢, 纪飞鹏, 殷志柱, 等. 直流配电电能质量研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 163-170.
- YAO Gang, JI Feipeng, YIN Zhizhu, et al. Review on the research of DC power distribution power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 163-170.
- [64] 陈鹏伟, 肖湘宁, 陶顺. 直流微网电能质量问题探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 148-158.
- CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, TAO Shun. Discussion on power quality problems for DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 148-158.
- [65] 刘家赢, 韩肖清, 王磊, 等. 直流微电网运行控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2356-2362.
- LIU Jiaying, HAN Xiaoqing, WANG Lei, et al. Operation and control strategy of DC microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2356-2362.

[66] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 16-24.  
WANG Yi, ZHANG Lirong, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind Turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 16-24.

[67] JI F, WANG G B, FU L J, et al. Applying flywheel energy storage system to integrated power system for power quality and stability enhancement[C] // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), August 20-23, 2011, Beijing, China: 1-5.

[68] FARHADI M, MOHAMMED O A. Real-time operation and harmonic analysis of isolated and non-isolated hybrid DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2900-2909.

[69] 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.

[70] 李露露, 雍静, 梁仕斌, 等. 民用低压直流供电系统保护综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 133-143.  
LI Lulu, YONG Jing, LIANG Shibin, et al. A review of civil low voltage DC distribution system protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 133-143.

[71] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-113.  
WU Weimin, HE Yuanbin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-113.

[72] SALOMONSSON D, SODER L, SANNINO A. Protection of low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1045-1053.

[73] 李露露, 雍静, 曾礼强, 等. 低压直流双极供电系统的接地型式研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2210-2218.  
LI Lulu, YONG Jing, ZENG Liqiang, et al. Researches on grounding types of low-voltage DC bipolar distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2210-2218.

[74] IEC. Low-voltage electrical installations part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definition: IEC 60364-1[S]. Geneva: IEC, 2005.

[75] MUSTAFA F, OSAMA A M. Protection of multi-terminal and distributed DC system: design challenges and techniques[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 715-727.

[76] 薛士敏, 齐金龙, 刘冲, 等. 直流微网接地方式及新型保护原理[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 48-55.  
XUE Shimin, QI Jinlong, LIU Chong, et al. A research of grounding mode and new protection principle for DC microgrids[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 48-55.

[77] 胡竟竟, 徐习东, 裘鹏, 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.

[78] 马钊, 焦在滨, 李蕊. 直流配电网架构与关键技术[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3348-3357.  
MA Zhao, JIAO Zaibin, LI Rui. Network structures and key technologies of DC distribution systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3348-3357.

收稿日期: 2018-08-31; 修回日期: 2019-01-08

作者简介:

姚 钢(1977—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: yaogangth@sjth.edu.cn

茹中栋(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为楼宇直流配电系统的能量控制策略。

(编辑 周金梅)