

交直流混合配电网工程设计研究

随着分布式发电、储能和电动汽车充电桩等多元化发电设施越来越多地接入配电网，直流电源与直流负荷在配电网中的比重越来越大，采用直流配电及交直流混合配电得到更多的关注和研究，并取得了一系列研究成果。交直流配电网设计涉及电压等级选择、网架结构优化和设施配置布局。针对结构多变的交直流配电网，提出了实现不同功能的基本设计模块及参数，通过模块间的组合搭建形成拓扑结构和运行方式灵活的交直流配电网。交直流配电网模块化设计满足了多元用户的接入需求，提高工程设计效率，促进了分布式电源的接入与消纳。

金 强¹ 吴志力¹ 张红斌¹ 田济源² 姜 华² 黄 寅³ / 1. 国网经济技术研究院有限公司 2. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司 3. 国网安徽省电力公司

0 引言

当前，在全球范围内，直流电源、直流负荷、交直流换流设备和直流开关设备等技术的发展进步推动着供电方式由传统的交流配电方式向交直流混合配电方式转变。在分布式电源接入方面，光伏、燃料电池和储能设备等直流电源可以通过直流系统并网。用户负荷接入方面，电动汽车、LED灯和数据中心等逐渐增多，直流供电需求不断提升。同时直流供电技术不断进步，并在某些领域取得了优势，与传统的交流配电形成了互补，成为了国内外研究的热点^[1-5]。美国早在2007年就提出了直流配电的相关方案，德国也建设了交直流混合配电网示范工程^[7-9]。近年来，随着电力电子技术的不断成熟，直流配电的

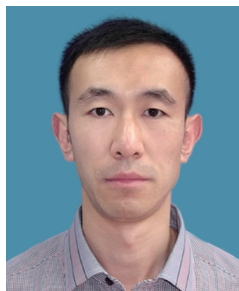
核心元件换流器的造价、损耗的降低，耐压值、过电流量的提高，直流断路器开断能力的提升，使得直流配电技术在公共中低压配电网中的应用再次受到人们的关注。

在直流配电网规划理论方面，国内学者针对直流电压等级序列^[6]、直流配电网拓扑结构、直流供电距离、直流负荷距^[12]和典型应用场景等方面已开展了一系列研究，形成了直流电压序列、交直流电压匹配原则和典型网架结构等方面的成果^[10-13]。在工程实践方面，依托张家口阿里巴巴数据中心交直流供电工程，开展了交直流配电网的工程应用探索^[11]。

由于交直流配电网结构多样、运行方式多变，其变配电设施均与传统的交流配电网存在差异，加之用户的多元化需求，目前在工程设计过程中尚无统一的设计原则与设计方法。本文以用户需求为基础，分析了交直流配电网主要设计要素，依据模块化设计理念，提出基于标准参数与功能的设计模块，并通过模块间的组合，构建应用于不同场景、实现不同功能的交直流配电网，以方便分布式电源、多元化负荷的接入，促进配电网的运行灵活性与供电可靠性。

1 设计目标与内容

交直流混合配电网的工程设计包括电压等级选取、网架结构设计和交直流配电设施设计等主要环节。工程设计应以需求为导向，结合配电网侧电源及负荷发展情况开展，并对运行情况进行分



金 强 / 高级工程师

关键词/Keywords

交直流混合配电网 ·
网架结构 ·
模块化设计 ·
功能模块 ·
组合方案 ·

国家电网公司科技项目 (SGAH0000KJJS201600091),
国家自然科学基金 (51777105)。

析。目前，交直流配电网主要应用于直流负荷集中区配电、工业园区直流配电、城市负荷中心直流改造、集结可再生能源发电的直流配电和交流配电网分区互联等典型场景。

1.1 电压等级选取

根据负荷需求、供电距离及电源接入容量等因素对系统电压进行初步选择。由于相同条件下直流输电比同电压等级交流输电在传输容量、传输距离方面具有明显优势，因此在选取直流配电电压时，通常不超过所对应的交流电压。通过技术比较，交直流电压的对应关系如表1所示。

表1 交流配电与直流配电比较

交流电压 等级/kV	直流电压 等级/kV	直流传输容量优势 (以交流为基准)	直流传输距离优势 (以交流为基准)
110	±100	1.1	3.3
35	±35	1.2	3.6
10	±10	1.04	5.2
0.4	±0.75	1.2	3.1

注：对比条件为输电线路采用相同的材质、导线截面积、架设方式和温度。

在交直流系统设计中宜充分发挥直流优势，规划建设直流线路及直流配电设施代替相应电压等级交流线路设施，或者对原有交流配电网进行改造，变为交直流混合系统，以达到提升传输能力、降低投资和灵活运行的目标。

1.2 网架结构设计

交直流配电网网架设计主要针对直流系统网架部分，根据用户对供电可靠性的要求差异，通常在可靠性要求较高的场合采取环网结构，其他场合采取辐射式（放射式）结构或链式结构。

辐射式结构是配电网中最基本的拓扑结构，每个负荷只能通过一条路径从电源处获得电能。辐射式网络的结构简单，设备设施数量少，投资少，对控制保护的要求低，运行操作简便，但是供电可靠性不高，线路或设备故障将导致下游负荷供电中断，或分布式电源发电无法送出。

对于电源来自两个交流变电站的负荷区，可采用链式结构供电，通过直流（换流站及直流线路）形成系统互联，配电系统含交直流母线及配

出线路，为交直流负荷、分布式电源和储能等提供接入条件。系统中任一负荷都有两路电源为其供电，若某条线路发生故障，则所供负荷可经由另一线路供电，可靠性较高。

环状交直流配电网是以直流线路或交直流线路混合形成环网的结构。传统交流配电网中，通常采用环状设计，解环运行，以避免双电源供电时电压幅值差、相角差引起的有功、无功环流，以及引起的短路容量增大等问题。由于直流配电网不须考虑系统同步，可以长期闭环运行，通过电压控制即可实现潮流调节。对于环网负荷，任一负荷都有两条供电通道，因此，环状交直流配电网供电可靠性同样较高。

1.3 交直流配电设施设计

交直流配电设施是实现负对负荷供电、分布式电源并网和储能设备接入的关键。交直流混合配电网存在交流和直流两种电能形式，在交直流系统之间需要配置转换设施，通过具有一定通流容量的变换器，实现配电系统交流部分与直流部分功率的双向流通。在电力传输与配送线路中，也存在交流与直流两种线路形式。因此交直流系统中主要设施包含电能形式转换设施、配送设施，如换流站、线路等。交直流配电设施设计需要根据用户需求和设备参数选择合理的接线形式和设备组合方案。

2 基本模块与参数

交直流配电系统结构多变，为了实现工程设计的规范性与高效性，并与交流配电网设施有效衔接，借鉴示范工程的设计经验与方法，对交直流配电系统主要设施按照功能与结构划分为基本功能模块，确定不同功能模块的组成结构、外部接口、主要参数和设计要素，在工程设计时根据实际情况通过不同种类、数量的模块组合拼接完成系统整体设计。与传统的交流配电网相比，交直流配电网中的典型模块包括以下几类。

2.1 AC/DC换流模块

在通过直流线路进行功率传输或连接两个交

流系统时，需要在交直流系统间设置换流模块，实现交直流电压的变换。换流模块以AC/DC换流器为核心设备，具有电能形式转换和定量控制功率流动的功能。换流模块是交直流系统潮流控制和直流系统电压控制的重要设施，在交直流系统互联、分布式电源接入、储能系统接入和交直流负荷接入等情况下，需要采用该模块进行电能形式变换，在多端交直流系统中也是环网（或链状网架）中的主要节点。

该模块包含AC/DC换流器、控制保护系统、交流侧母线、断路器、直流侧母线及直流断路器等。

2.2 直流（DC/DC）变换模块

直流配电系统一般由不同电压等级的配电设施构成，直流负荷、储能装置和分布式电源等根据容量分层接入时，在不同的直流电压等级设备之间所设置的基本设施为直流变换模块，实现直流电压的变换，其功能类似交流变压器。该模块以DC/DC变压器为核心设备，主要完成直流电压变换的功能，同时对穿过的潮流及两侧直流电压进行控制，一般包含DC/DC变压器、高压直流侧设备、低压直流侧设备及控制保护系统等。

2.3 直流配电模块

当采用直流母线对直流负荷进行大规模集中供电时，需要多支路出线分类分区供电，各支路之间需要并联以降低馈出线故障的影响范围，此时需要直流配电模块。直流配电模块以直流母线和直流出线断路器为主要设备，具有直流电能汇集分配的功能。

在对直流负荷区配电、分布式电源集中接入直流系统和直流形式储能设施接入等场景中，均需要以直流配电模块作为其接入的设施单元。

2.4 直流线路模块

以中压直流进行多端系统互联、形成环网或对远距离负荷中心供电时，需采用直流线路进行功率传输，直流线路模块成为直流电能传输的基本功能模块。与传统的交流线路相比，直流线路可以采取多种设计及运行方式，线路设计包括单回路、双回路和多回路等，运行方式可采用双极

运行、单极运行和单极大地回路运行等方式，更加灵活。

为了充分利用线路走廊或原有线路杆塔，可以采用交直流同杆架设方式，或直流多回路架设方式。直流线路按照线路敷设类型可以分为直流架空线路和直流电缆线路。

2.5 模块参数

在确定基本模块功能的基础上，需要确定模块的参数与接口，以实现模块的标准化，保证模块组合的适应性。通过与传统交流系统的比较，依据系统运行与设备性能的匹配关系，将模块参数系列化扩展，达到满足需求、灵活组合和交直流交互便捷的目的。模块参数参考值如表2所示。

表2 基本设计模块参数序列参考值

模块分类	交流电压/kV	直流电压/kV	传输功率/MW
AC/DC换流模块1	0.38	±0.75	0.3, 0.6, 1
AC/DC换流模块2	10	±10	4, 6, 10
AC/DC换流模块3	35	±35	20, 30
AC/DC换流模块4	110	±100	60, 100
DC/DC变换模块1		±100/±35	20, 30
DC/DC变换模块2		±100/±10	6, 10
DC/DC变换模块3		±10/±0.75	1, 2
直流配电模块1		±100	100
直流配电模块2		±35	30
直流配电模块3		±10	10
直流配电模块4		±0.75	2
直流线路模块1		±100	100
直流线路模块2		±35	30
直流线路模块3		±10	10

在交直流系统设计中，可以根据应用场景和用户需求，选择合适的模块进行组合。为了运行安全，在确定基本模块参数时，需要依据系统运行工况，通过潮流等相关计算的结果对模块组合方案进行校验，保证各设备负载率和系统安全裕度。

3 模块组合策略

要实现不同功能、不同规模的交直流配电设施设计，并构成交直流混合配电系统，需要将不同类型的基本模块依据既定的设计目标进行拼接组合，通过模块功能与参数的集成，实现负荷供

电、分布式电源接入和系统互联等功能。

近年来,随着科学技术的迅速发展,在配用电领域,工商业及民用负荷种类不断增多,除了传统的交流负荷,直流负荷的种类与比重也逐渐增大。目前,直流负荷主要有电动汽车直流充电站、数据中心服务器、LED照明设施、变频家用电器、变频工业电动机、轨道交通和通信电源等。同时分布式电源、储能技术的发展也带来了不同电能形式设备的接入,如光伏发电、燃料电池和储能装置可以通过直流形式并网,直驱式风力发电通过整流也可以直流并网。

基于交直流配电网模块化设计思想,结合交直流系统的典型应用场景,采用模块组合方式构建适用于不同设计功能的交直流配电系统,以下分析几种结构的模块组合与配置。

3.1 简单辐射式系统

简单辐射式系统结构如图1所示。系统电源来自交流变电站,采用独立的交流配电和直流配电分别给交流和直流负荷供电。直流母线接入光伏、储能等,无须经过电源转换环节,通过电压控制潮流分布,利于直流负荷直接并网。但是整体为两个“单辐射”网架,可靠性不高,在上级电源失电的情况下,无备用电源供电,仅能够通过局部微电网为负荷供电。

该系统主要由换流(AC/DC)模块、直流变换(DC/DC)模块和直流配电(汇集分配)模块等组成。模块以串接方式构成直流配电支路,其

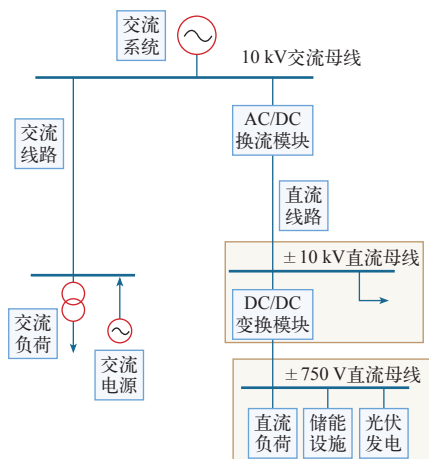


图1 简单辐射式系统结构

中直流线路可借用原有交流线路走廊资源,与交流线路同杆架设。

3.2 含有联络的辐射式系统

整体结构以辐射式为主,分别由中压交流出线 and 经换流模块的直流出线对交流和直流负荷供电。系统结构如图2所示。根据位置分布情况,在距离较近的低压交直流系统之间通过可控的换流模块构成联络,实现在低压侧的互联互通。由于低压换流模块的容量限制,其负荷转移能力较弱,非强联络,但是与传统配电系统相比,利用了直流系统(换流模块)的控制性能形成不同电压等级系统之间的功率交换,提高了系统对潮流的可控性。在一路线电源失电的情况下,通过另一路线电源进行部分负荷转供,可保证重要负荷供电可靠性。

该系统主要包含换流(AC/DC)模块、直流(DC/DC)变换模块和直流配电(汇集分配)模块。其中换流(AC/DC)模块又需要选择不同电压等级和容量的模块组,中压换流(AC/DC)模块参数选择主要满足直流负荷供电的需求,与直流线路传输容量匹配,低压(AC/DC)换流模块参数选择主要满足低压重要用户负荷的转供要求,系统整体仍然以串接方式构成。

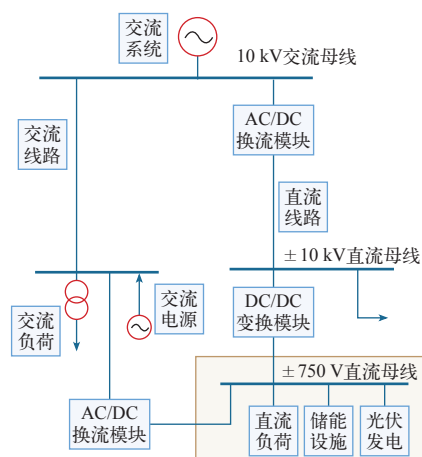


图2 含低压联络的辐射式系统结构

3.3 链式结构系统

两侧独立的交流系统通过AC/DC换流模块与直流网架构成互联链式结构,直流线路中间设置配出节点,为负荷、分布式电源和储能接入创造

便利条件。链式系统结构如图3所示。该模块配置主要应对以直流负荷为主的区域供电场景，两侧交流系统通过直流网架实现互联，当一侧交流系统发生故障时，可通过交直流系统换流控制实现负荷转供。系统中少量交流负荷可由低压侧的DC/AC换流模块供电。

该系统包含两个中压换流（AC/DC）模块和若干直流变换（DC/DC）模块、直流配电（汇集分配）模块。其中两个中压换流（AC/DC）模块需要通信以实现控制策略。中压换流（AC/DC）模块参数选择兼顾两侧交流系统互供要求和直流负荷供电的需求，并与直流线路传输容量匹配。直流变换（DC/DC）模块参数以满足配出负荷及分布式电源接入要求。

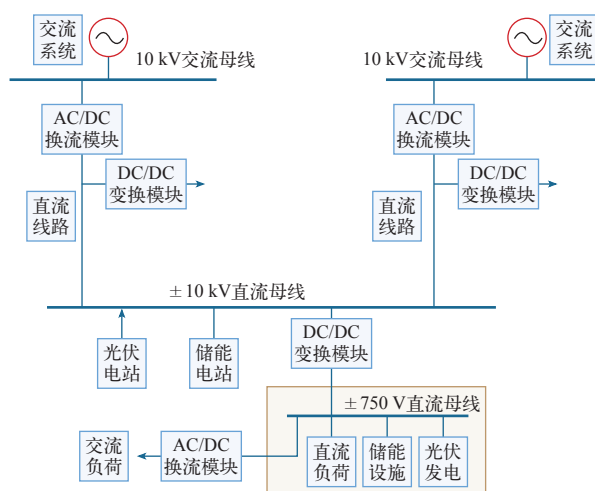


图3 链式系统结构

3.4 环网结构

交直流配电系统由两个交流变电站供电，两变电站原无联络，现通过AC/DC换流模块及直流线路构成联络。环网系统结构如图4所示。一侧换流模块配出直流线路为远方直流负荷点供电；另一侧通过交流配出线路送至负荷点，在负荷点处通过换流模块接入10 kV直流母线。系统整体为含有交直流线路的环网结构，满足交直流负荷及电源、储能的接入，其中负荷点处交直流配电站房可合建，配电站房出线可同时带交流和直流负荷。集中负荷处为交直流双电源供电，可靠性高。

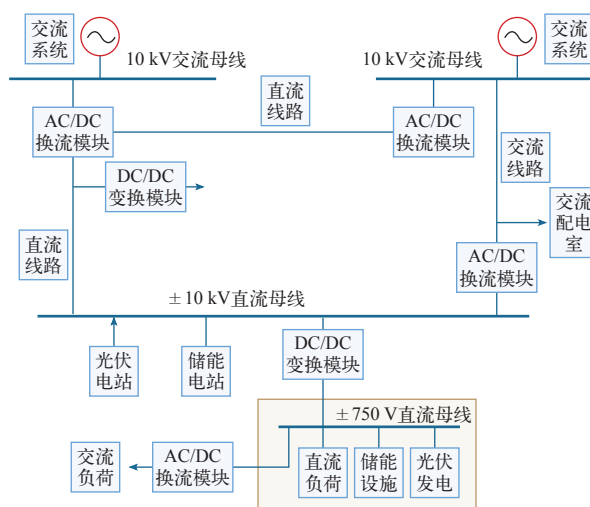


图4 环网系统结构

4 工程案例

某产业园区含有高技术产业和相关民用及公共设施，同时有光伏发电和储能设施接入，各类负荷的性质和容量如表3所示。负荷地理分布状况为产业区负荷集中且距离电源点较远，约7 km，电动汽车充电站分布分散，民用负荷集中且距离电源较近。

表3 园区用户及负荷分类统计

用户类型	负荷分类	负荷大小/MW
电动汽车充电站	直流负荷	1.8
	交流负荷	2
民用负荷	直流负荷	0.5
	交流负荷	0.6
轨道交通	直流负荷	2
	交流负荷	0.6
数据中心	直流负荷	1.6
	交流负荷	0.6
制冷中心	直流负荷	1.8
	交流负荷	0.8
产业区	直流负荷	8
	交流负荷	2
公共设施	直流负荷	1.4
	交流负荷	0.6
光伏发电	直流电源	2.5
储能电池	直流电源	2

园区内电力负荷共23.6 MW，其中直流负荷17.6 MW，交流负荷6 MW。考虑直流负荷在总负荷中占比较大、产业区直流负荷分布集中的特点，同时园区负荷点与电源距离较远，线路传

输功率总量较大，且园区有分布式能源、储能接入，故选择用直流线路向负荷集中区供电。为了满足区域内负荷供电及新能源、储能和电动汽车充电站接入的需求，在园区内设置AC 10 kV，AC 380 V，DC ± 10 kV，DC ± 750 V，四个电压等级。

园区电源来自两个110 kV变电站，如按照传统交流配电方式，需要两回35 kV线路或四回10 kV线路对负荷中心供电。现构建交直流配电网，对直流负荷集中的产业区负荷采用直流供电，电源仍然来自两个110 kV变电站。在变电站10 kV线路出口处建设AC/DC换流站，通过两回 ± 10 kV线路对

工业直流负荷供电。AC/DC换流站直流侧可馈出对轨道交通负荷及电动汽车充电负荷就近供电，两个交流变电站出线可建设交流配电站对以交流负荷为主的民用负荷供电。系统整体形成链式结构，在满足对各类负荷供电的同时，满足两侧交流系统互联的要求。10 kV AC/DC换流站容量按10 MW配置，直流线路容量按照10 MW选择导线，两条线路满足故障转供要求。将2.5 MW分布式光伏，2 MW储能接入直流负荷区，提高负荷集中区电源充裕度。园区的交直流系统结构如图5所示。

低压负荷接入可考虑就近接入，根据园区负

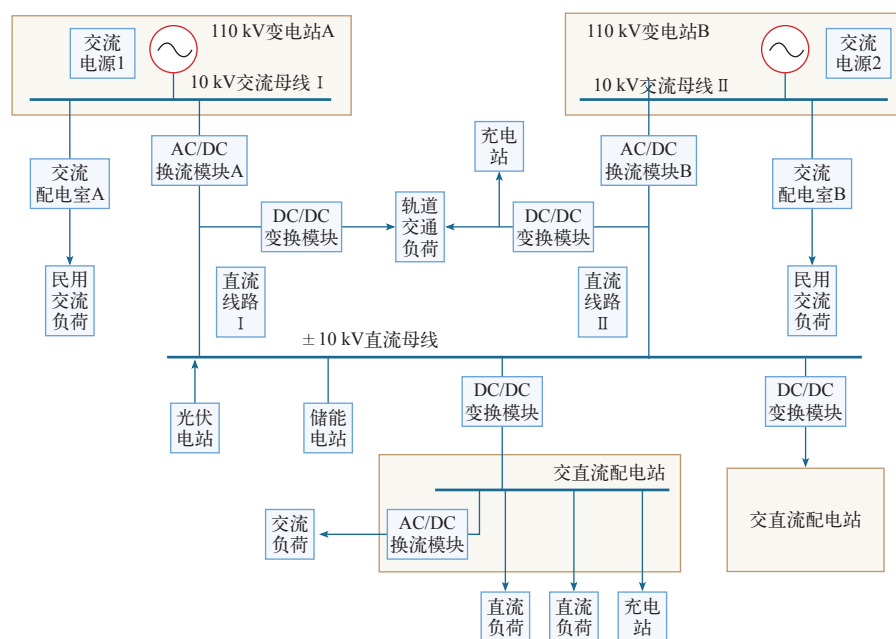


图5 园区交直流配电网结构

荷区块类型可分别接入交流配电房、直流配电房和交直流配电房，容量配置按负荷大小和站房配置考虑，区域内基本模块配置如表4所示。

表4 园区交直流配电网模块统计

模块类型	参数	数量
AC/DC换流模块2	10 kV AC/ ± 10 kV DC, 10 MW	2
DC/DC变换模块3	± 10 kV DC/ ± 0.75 kV DC (1.5 kV), 2 MW	10
直流配电模块3	± 10 kV DC, 10 MW	2
直流配电模块4	± 0.75 kV DC, 2 MW	10
直流线路模块3	± 10 kV DC, 10 MW	2
交流配电模块 (配电室)	10 kV AC, 2 MV·A	3

该交直流配电网方案以链式结构为核心，通过两侧变电站出口的换流站与直流线路对工业负荷中心供电，形成了多电源互为备用的交直流配电网结构。配电设施全部采用模块组合的配置方式，选择AC/DC换流模块、DC/DC变换模块、直流配电模块和直流线路模块等基本模块，并与传统交流配电设施结合，实现对交直流负荷的可靠供电。该设计方式在配电网建设和改造的环境中可以充分发挥交直流配电网特有的优势，减少电网升级改造的建设工作，为促进区域经济发展提供有力保障。

(下转第23页)

- 春：吉林大学，2014.
- [2] 王丽侠，张湃．基于物联网的智能家居系统的研发[J]．电气应用，2015，34(14)：26-29.
- [3] 朱达荣，欧剑，闵杰．无线传感器网络测距定位算法改进与分析[J]．安徽大学学报：自然科学版，2011，35(5)：52-57.
- [4] 姜文刚，蔡蓝图．智能家居无线传感器网络的研究[J]．江苏科技大学学报：自然科学版，2010，24(2)：169-173.

- [5] 王丁．基于演化博弈的无线传感器网络节点协作机制研究[D]．上海：东华大学，2016.
- [6] 沈士根．基于博弈论的无线传感器网络安全若干关键问题研究[D]．上海：东华大学，2013.
- [7] 乔成．基于博弈论的传感器网络的优化与设计[D]．福州：福建师范大学，2013.
- [8] 李紫川．基于演化博弈的WSNs节点信任机制的研究与仿真[D]．上海：东华大学，2014.

(收稿日期：2018-03-20) **EA**

(上接第19页)

5 结束语

随着直流电源、直流负荷和储能设施在配电网中的比重不断增大，交直流混合配电技术取得了快速发展，并在一些典型场景中体现出更大的技术优势。交直流配电网的设计需要综合考虑用户需求、负荷分布、设备水平和建设条件等多方面因素，选择合理的电压等级和网架结构，并通过对设备设施的选择与配置实现用户接入、电能输出和系统互供等功能，满足系统灵活多变的运行要求。针对交直流配电网的特点采用模块化的工程设计，可以充分发挥模块组合的灵活性与便捷性，避免个性化设计带来的困难，提高设计成果的规范性和标准化水平，推动交直流配电技术的推广应用，同时也为多元化发用电设施的接入创造便利条件。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 王丹，毛承雄，陆继明，等．直流配电系统技术分析 & 设计构想[J]．电力系统自动化，2013，37(8)：82-88.
- [3] 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.
- [4] 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.

- [5] 张祖平．直流配电技术的发展前景[J]．供用电，2014，31(7)：16-19.
- [6] 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.
- [7] 范明天，惠慧．国外直流配电系统的理论分析方法与应用实践[J]．供用电，2014，31(7)：36-43.
- [8] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]．Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1)：133-148.
- [9] Baran M E, Mahajan N R. DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges[J]．IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6)：1596-1601.
- [10] 孙国萌，齐琛，韩蓓，等．交直流混合配电网规划运行关键技术研究[J]．供用电，2016，33(8)：7-16.
- [11] 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.
- [12] 姜世公，吴志力，李红军，等．直流配电电压等级及负荷距分析[J]．电力建设，2017，38(6)：59-65.
- [13] 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.

(收稿日期：2018-02-12) **EA**