DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.289 **中图分类号**：TM7 **文献标志码**：A

数据中心供电架构概述与展望

周京华(中国电源学会高级会员)，王江博(中国电源学会会员)
(北方工业大学电气与控制工程学院，北京 100144)

摘要：数据中心的供电系统是其关键基础设施，为数据中心所有动力驱动设备提供稳定、可靠的电源支持，以保证其正常运行。随着大数据、云计算、5G等技术的快速发展，我国数据中心的数量和规模高速增加，对供电可靠性的要求越来越高，总体电能消耗也不断增大，且由于数据中心目前所用电能主要来源于传统能源，高碳排问题愈发明显。因此，如何实现绿色、节能、低碳的供配电模式，是数据中心供电系统发展的重点。在分析数据中心供电系统典型供电架构功能和特点、介绍数据中心供电架构发展和演变的基础上，以“碳达峰、碳中和”为背景，结合数据中心供电系统发展中遇到的问题，对数据中心供电架构的未来作出了展望，为其深入研究及后续发展提供借鉴。

关键词：数据中心；供电系统；不间断电源；直流供电

Overview and Prospect of Data Center Power Supply Architectures

ZHOU Jinghua, *Senior Member, CPSS*, WANG Jiangbo, *Member, CPSS*
(School of Electrical and Control Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: The power supply system in a data center is its critical infrastructure, which provides stable and reliable power support for all the power-driven equipment therein to ensure itsnormal operation. With the rapid development of technologies such as big data, cloud computing and 5G, the number and scale of data centers in China are increasing rapidly, requiring higher reliability of power supply and increasing the overall power consumption. In addition, the problem of high carbon emissions is even more obvious because the data centers at present mainly use electricity from the traditional energy sources. Therefore, how to achieve a green, energy-saving and low-carbon power supply and distribution mode is the focus of the development of data center power supply systems. The functions and characteristics of typical power supply architectures of data center power supply system are analyzed, and the development and evolution of power supply architectures of data center are introduced. On this basis, “carbon peaking and carbon neutrality” is taken as the background, and a prospect for the power supply architectures of data center in the future is given combined with the problems encountered in the development of power supply system of data center, providing reference for its in-depth research and subsequent development.

Keywords: Data center; power supply system; uninterruptible power supply; DC power supply

随着互联网通信技术的发展，大型数据中心在我国的建设和投运已是常态化。数据中心的供电系统是数据中心的关键基础设施，为中心提供不间断的电源，以保证数据中心设备的正常运行，因此，数据中心供电系统的设计显得尤为重要[1-3]。为了实现数据中心高可靠性、高效率的运行，各大互联网企业都在探索和研究适合自己的供配电模式。随着我国“碳达峰、碳中和”目标的提出，作为能耗大户的数据中心供电又面临着绿色、节能、环保的挑战[4]。因此，本文将归纳总结数据中心典型供电架构的功能和特点及适用场合，深入分析其发展和演变过程，以便为数据中心供电架构未来的发展

收稿日期：2023-05-18；**修回日期**：2023-07-23；**录用日期**：2023-09-04；**网络首发日期**：2023-10-26
基金项目：北京市高水平创新团队建设计划资助项目(IDHT 20180502)
This work is supported by Beijing High Level Innovation Team Construction Plan under the grant IDHT20180502

指明方向，从而选择正确的切入点进行深入研究。

1 数据中心供电架构分类

数据中心供电架构指数据中心供电系统所采用的供配电模式，根据其现有的供电方案，主要可以分为交流不间断电源 UPS(uninterruptible power supply)供电架构、高压直流供电架构、中压直供集成式供电架构和柔性直流输电架构，每种架构根据不同的应用场合又有不同的配置方式，其分类如图 1 所示。

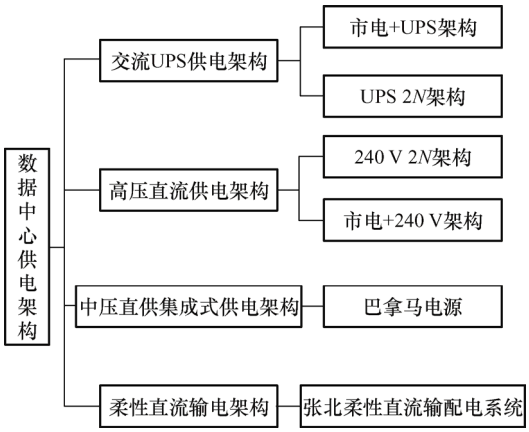


图 1 数据中心供电架构分类

Fig. 1 Classification of data center power supply architectures

1.1 交流 UPS 供电架构

交流 UPS 供电架构，由整流器、逆变器、蓄电池组、静态 STS 切换开关组成，如图 2 所示。市电正常时，市电通过整流器、逆变器向负载供电，同时为蓄电池充电；当市电异常或中断时，蓄电池作为电源，通过逆变器向负载供电；当逆变器、蓄电池等中间环节故障时，通过 STS 切换开关，改由交流旁路向负载供电[5]。

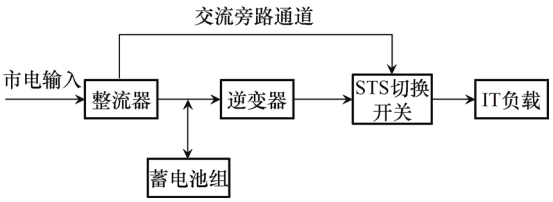


图 2 交流 UPS 供电架构

Fig. 2 AC UPS power supply architecture

交流 UPS 供电架构的优点有：①输出的电能品质高。在交流 UPS 供电架构中，当整流器、逆变器正常工作时，对负载的供电均是由 UPS 的逆变器提供，因此，能消除来自市电电网的电压波动和干扰，实现对负载的无干扰稳压供电[6]。②无转换时间。在交流 UPS 系统中，一般都是由逆变器向负载供电，因此，不论是市电供电还是市电中断由蓄电池供电，UPS 内部并没有产生任何转换运作，其对负载供电的转换时间为 0[6]。

交流 UPS 供电架构的缺点有：①供电效率较低，电能损失严重。交流 UPS 供电架构中，电能从输入系统传输到 IT 设备的主板电路，需要反复进行多次交流电和直流电之间的转换，每一次转换均会产生损耗，最终导致交流供电系统效率的低下。②结构复杂，维护困难。为了提高供电可靠性，UPS 供电架构通常需要采用冗余供电方案，这就导致系统结构复杂；在交流 UPS 运行时，其逆变、整流的任意环节出现故障都会导致系统故障，维护难度较大。③交流 UPS 供电可靠性较差。当市电中断时，对设备的供电是由蓄电池放电再通过逆变模块输出，如果逆变模块损坏，蓄电池也就无法供电给负载，因此，其供电可靠性较差[7-8]。

实际应用中的交流 UPS 供电架构又主要分 UPS 2*N* 架构和市电+UPS 架构 2 种。

1.1.1 UPS 2*N* 架构

UPS 2*N* 架构是由 2 套完全独立的 UPS 系统、同步 LBS 控制器、静态 STS 切换开关、变压器等设备组成，又称为 UPS 双总线供电架构，如图 3 所示。在该架构中，2 套 UPS 系统从不同的低压配

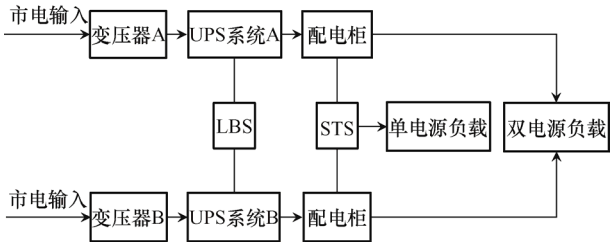


图 3 UPS 2*N* 架构

Fig. 3 UPS 2*N* architecture

电系统引电，平时每套系统带载一半负荷，当一套系统出现故障时另外一套系统带载全部负荷[9]。

1.1.2　市电+UPS 架构

市电+UPS 架构是由 1 路市电和 1 路 UPS 系统组成，如图 4 所示。平时市电作为主用电源带载全部负荷，当市电断电或者质量不满足要求时转由 UPS 供电[9]。

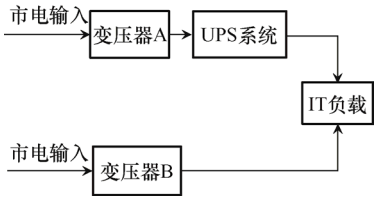


图 4　市电+UPS 架构

Fig. 4 Architecture composed of mains electricity and UPS

1.2 高压直流供电架构

高压直流供电架构由交流配电模块、整流器、直流配电模块、蓄电池组和监控装置组成，如图 5 所示。其中整流器为其核心部件，将交流电通过整流模块、直流配电模块为 IT 设备供电，并为蓄电池组充电，保障在市电断电和市电质量不满足要求时，通过蓄电池组给负载连续不间断地供电[10-11]。

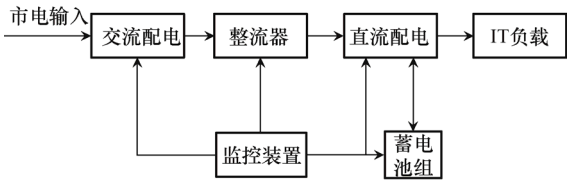


图 5　高压直流供电架构

Fig. 5 High-voltage DC power supply architecture

高压直流供电架构的优点有：①节能。高压直流和交流 UPS 系统相比，直流供电没有逆变环节，减少转换步骤和电路设备，同时高压直流集肤效应比交流电小，因此输电损耗降低。②供电可靠性高。当外电停电时，蓄电池为后端负载直接供电，高压直流母线电源的不间断能确保供电的连续性；直流供电没有逆变环节，设备数量少，故障点减少，供电可靠性得以提高。③无“零地”电压问题。采用直流输入，系统无零线，也就无“零地”电压，避免一些不明的故障。④有利于新能源的接入。高压直流供电架构能减少分布式发电系统(如光伏、沼气发电)及直流负荷接入电网的中间环节，进而降低接入成本，提高功率转换效率和电能质量[12-14]。

高压直流供电架构的缺点有：①对配电开关灭弧性能要求高。直流电不存在过零点，与交流电相比灭弧相对困难，因此直流配电所需的开关性能要求更高。②换流设备成本较高。直流换流站比交流变电站的设备多，结构复杂，造价高，损耗大，运行费用高。

数据中心应用中的240 V高压直流供电架构主要有 240 V 2*N* 直流供电架构和市电+240 V 直流供电架构 2 种。

1.2.1　240 V 2*N* 直流供电架构

240 V 2*N* 直流供电架构由 2 套完全独立的 240 V 直流系统组成，如图 6 所示。2 套 240 V 直流系统从不同的低压配电系统引电，平时每套 240 V 直流系统带一半负载，当一套系统出现故障时另外一套系统带全部负载[10]。

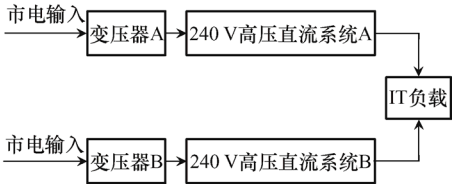


图 6　240 V 2*N* 架构

Fig. 6 Schematic of 240 V 2*N* architecture

1.2.2　市电+240 V 直流供电架构

市电+240 V 直流供电架构由 1 路市电供电和 1 路 240 V 直流系统供电组成，如图 7 所示。平时市电作为主用电源带全部负载，当市电断电或者质量不满足要求时转由 240 V 直流系统供电[10]。

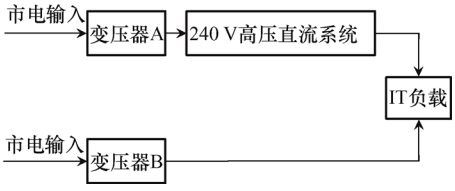


图 7　市电+240 V 直流架构

Fig. 7 Architecture composed of mains electricity and 240 V DC

目前，高压直流供电架构主要有 2 种标准：336 V 高压直流和 240 V 高压直流。336 V 高压直

流是中国移动的标准，配置时，需要改造设备和定制电源模块，其应用相对较少。240 V 高压直流是中国电信的标准，配置时基本不需要进行设备改造和电源定制，其技术的可行性已经得到较好验证，主要应用于百度、阿里巴巴、腾讯、中国电信、中国联通等企业的大型数据中心，并在不断改变数据中心供电系统以传统交流 UPS 为主的格局[15]。

1.3 中压直供集成式供电架构

中压直供集成式不间断供电架构中，不间断电源将 10 kV 的配电、隔离中压变压、模块化不间断电源和输出配电等环节进行了柔性集成，如图 8 所示。相比传统数据中心的供电方案，其占地面积减少 50%，设备和工程施工量可节省 40%，架构简洁、可靠性高。蓄电池单独安装，系统容量可以根据需求进行灵活配置[16-18]。

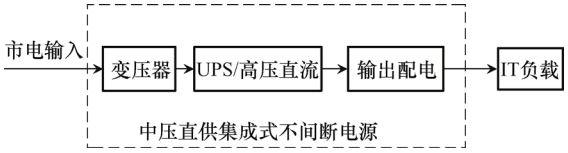


图 8 中压直供集成式供电架构

Fig. 8 Medium-voltage direct supply integrated power supply architecture

目前应用中的中压直供集成式供电架构主要以巴拿马电源供电方案为主。

巴拿马电源内部结构如图 9 所示，10 kV 市电经过移相变压器降压至 400 V，再经过整流和降压转换，输出 240 V 或 336 V 的直流电，最后通过直流输出配电柜为 IT 设备供电。其中移相变压器基于相位交错叠加消去原理和移相交错并联拓扑，通过电路叠加复用减小输出电流的波动，从而提高系统的稳定性，降低谐波电流，与传统供电架构相比，省去了多个中间环节，简化了拓扑结构，同时提高了电能转换效率[16,19]。

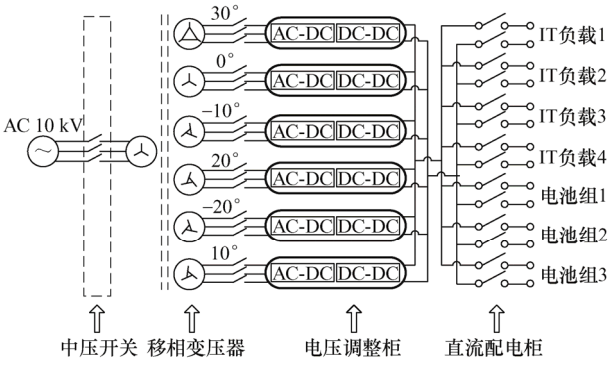


图 9 巴拿马电源内部结构

Fig. 9 Internal structure of Panama power supply

巴拿马电源系统的优点有：①供电架构极简，电能转换效率高。巴拿马电源供电架构将中间的环节集成为 1 个标准化产品，因此从 10 kV 进线至 IT 设备仅需要 3 级，可大大提高电能转换效率[19]。②占地面积少，节省投资。巴拿马电源在应用中减少了传统电源系统建设模式下从 10 kV 配电至通信电源输出的设备供电层级，减少了中间配电的相关设备、桥架、电缆等投资。③可靠性高。巴拿马电源在交流 UPS 和高压直流架构的基础上进一步简化了配电的中间环节，降低了故障出现的概率，提高了供电可靠性。

巴拿马电源系统的缺点有：①其变压器需要定制，设备成本较传统变压器高。②应用案例较少，技术成熟度待时间验证[20]。③在适用性方面，对于新建的大型数据中心，巴拿马电源能够充分利用电源系统的容量，降低电源系统的总体拥有成本 TCO(total cost of ownership)，然而对于小型数据中心或现有数据中心供电系统的改造，巴拿马电源方案限制条件较多，如无法替换在网运行的部分不间断电源[18]。

1.4 柔性直流输电架构

柔性直流输电结合了电力电子、电力系统、通信原理和自动控制等各方面先进技术，是 1 种以电压源换流器为基础的新型直流输电技术[21]。

柔性直流输电架构的优点有：①没有无功补偿和换相失败问题、可孤岛运行、谐波小、可独立调节有功和无功功率、运行方式灵活[21-22]。②在数据中心供电系统中，柔性直流输电可直接对负载进行直流供电，实现了分布式电源、储能系统和交直流负荷的高效稳定接入，使配电网运行结构转变为灵活的、可主动运行的“智能”结构，从而为数据中心提供稳定的、高质量的电能[23]。

柔性直流输电架构的缺点有：对元器件和调制技术的要求高、内部装置的成本和造价较高、控制

系统复杂[24]。

以张北阿里云数据中心柔性直流输配电系统为例，分析柔性输电技术在数据中心的应用。

张北交直流混合配电网及柔性变电站示范工程结构如图 10 所示。该系统主要包括光伏电站、DC-DC 变换器、柔性变电站和 DC-AC 双向变流器等部分。

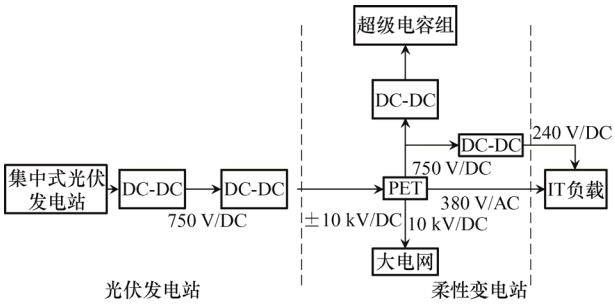


图 10　张北交直流配电网结构

Fig. 10 Structure of Zhangbei AC-DC distribution network

电能由集中式光伏发电站发出，经 DC-DC 进行升压变换，后传输至柔性变电站。柔性变电站是张北柔性交直流配电系统的核心，具有多个端口，中压交流 10 kV 连接大电网，中压直流±10 kV 接入集中式光伏发电站，低压直流 750 V 母线可以灵活接入储能和分布式新能源，也可以经过直流变换器接入各种电压等级的直流负荷，或经逆变成为工频交流电为交流用户供电，其智能化潮流控制，能实现电能在不同电压等级的交、直流端口间“按需分配”，从而实现绿色能源优先供电，自主选择能量流向、可再生能源就地消耗或并网，同时保障重要负荷的供电可靠性[25]。

2018 年 12 月 26 日，由国网冀北电力有限公司建设运营的世界首个柔性变电站在张北阿里巴巴数据港正式投入商业运行，意味着我国率先提出的交直流混合配电网技术从理论变为现实。该项目就地消纳光伏发电，交直流多端口柔性互联，为数据中心负荷提供可靠供电，实现了智能电网与云计算产业的深度结合与 100%清洁能源供电，为电力用户高质量供电和新能源高效率消纳提供了新的技术手段，对未来电力系统的发展具有引领作用[25]。

柔性直流输电在孤岛输电、新能源并网、海上风电外送等方向有着独特优势，但目前尚未在互联网数据中心形成大规模应用。

2　数据中心供电架构演变与展望

2.1　主要演变过程

早期数据中心供配电采用交流 UPS 供电方案，常用 *N*+1、2*N* 等供电架构，但系统复杂、效率低，逐渐难以满足数据中心的供电要求。随着数据中心以通信行业为主爆发的市场发展，2007 年开始探索发展并日趋成熟的高压直流供电方案，在投资成本、系统效率、占地空间等方面，较交流 UPS 具有更大的优势，已得到较大规模的推广和应用。随着互联网公司数据中心的崛起，近些年研发成功的以巴拿马方案为代表的中压直供集成式供电架构实现了更加简洁的系统架构，使得整体系统效率增至 98.5%，但其应用时间不长，客户接受度不高，目前尚未形成大规模应用。而柔性直流输电相较于高压直流输电在运行性能上又有着显著优点，但由于技术水平限制，亦尚未在数据中心展开规模应用。

近年来，华为、科华等企业推出了针对大、中型数据中心的供、配、备电融合型智能电力模组解决方案，即交流 10 kV 中压输入转直流 240 V/336 V 输出的集成式电力模组。图 11 所示为科华云电源电力模组架构图，电力模组通过一体化、集成式的设计，整合了中压柜、变压器柜、输出、监控等环节，减少供电系统占地面积，降低系统损耗，通过预制化、去工程化，降低交付复杂度，缩短部署工期，运用智能算法和 AI 技术，智能运维，保障系统运行安全，最高运行效率可达 98.5%。



图 11　科华融合型电力模组架构

Fig. 11 Architecture of Kehua integrated power module

融合型电力模组继承了传统供电系统的安全

规范要求，同时对配电的系统架构、电气连接、系统监控等方面进行了多方位的创新，对于急需投运且投入成本较低的客户来说，电力模组方案无疑是最优选，但要满足不断更新的数据中心供配电新需求，还需要进行不断地探索和研究，这不仅需要企业的创新，也需要从企业到用户的共同尝试和推动。

综合来看，当前高压直流供电架构综合优势明显，逐渐被各大互联网企业在其数据中心进行了应用，并且高压直流供电还与我国节能减排理念相适应，具有极好的发展前景。

2.2 面临的问题与挑战

目前为止，数据中心高能耗、高碳排的问题依旧没有得到妥善解决。高能耗问题的形成主要有 2 方面的原因，一方面，数据中心关键 IT 设备的不间断运行需要消耗大量电能；另一方面，数据中心关键 IT 设备的运行环境要求恒温、恒湿，而且 IT 设备的运行也会产生大量的热量，因此需要大量空调设备长时间恒温运行，亦需消耗大量电能。同时，高耗电量导致电费成本大大增加，进而提高了数据中心运营总成本，给数据中心的发展带来很大难度[26]。且由于数据中心能量来源依旧以传统能源为主，高碳排的问题也愈发明显[27-28]。因此，降低数据中心的高能耗、高碳排迫在眉睫。

“双碳”目标的提出，对作为能耗和碳排放大户的数据中心来说既是挑战，也是重大的发展机遇，这将极大推动数据中心未来在能源、技术、解决方案等方面一系列的变革与改造。

2.3 发展趋势与展望

工业和信息化部印发的《新型数据中心发展三年行动计划(2021—2023 年)》提出将引导新型数据中心向新能源发电侧建设，就地消纳新能源，推动新型数据中心持续优化用能结构，助力信息通信行业实现“碳达峰、碳中和”目标[29]。

针对“双碳”背景下数据中心供电的环保改造，目前已有相关文献进行了研究。在系统方面，文献[30]提出可将基于模块化多电平换流器 MMC (modular multilevel converter)的柔性直流输电系统、高压储能系统和通信电源系统进行一体化设计，避免了工频变压器的使用，而且采用 1 套整流或者逆变设备可以实现高压直流输电、高压储能、通信系统供电等功能，节约了大量的电力电子器件，结合碳化硅、氮化镓等第三代半导体器件，进一步降低了系统造价、体积和重量，将进一步提升数据中心电源设备的整体效率；文献[31]提出通过优化配电结构、应用节能产品、运行节能，重点关注电源系统效率的提升，降低电源设备和线路损耗；文献[32]提出通过在供电侧自备清洁可再生电厂、购入“零碳绿电”、储能供能和备发灵活电源机组的方式推动数据中心“碳中和”的实现；文献[33]建立了数据中心分布式能源系统供能成本与供能可用性耦合的数学模型，并通过验证得出分布式能源系统具有最佳的经济性，可满足数据中心的能源供应要求。在供电架构方面，文献[34]通过阐述 336 V 高压直流电源对于传统 UPS 系统的优势，提出 1 种 336 V 高压直流电源系统加磷酸铁锂后备电池新型供电方式；文献[35]提出 1 种以 336 V/240 V 高压直流为基础的市电混供架构，兼容交流 UPS 和高压直流的优点，实现数据中心灵活供电，能够解决数据中心 IT 设备直流不匹配问题，降低能耗，达到节能减排效果。总体来讲，目前关于数据中心供配电系统的设计研究基本以高效、节能、经济为导向，从多个方面、多个环节入手，结合用电需求、投资等实际情况，构建数据中心新型供配电系统。

作为数据中心的关键基础设施，数据中心供配电系统未来将重点围绕能效、经济等因素，利用新能源、储能、新型供电技术及新型电力电子器件，在电能的来源和配置 2 方面进行数据中心供配电的变革。

(1)在能量来源方面，可加大可再生能源利用，打造以清洁为方向、以电能替代为重点、风光储多种能源协同互补的供能模式，这将有力缓解电网压力，降低碳排放[36]。随着我国“东数西算”工程的实施，未来将有大量数据中心落地于我国风光资源

丰富的西部地区，数据中心就近使用可再生能源发电作为能量来源，通过减少输电距离大大降低输电损耗，促进可再生能源 100%消纳。

在大量使用可再生能源的背景下，针对风、光等可再生能源的间歇性、波动性等特点，可通过配置储能环节保障数据中心供电的可靠性和稳定性，数据中心可组合使用压缩空气储能、电化学储能、氢储能等技术手段。其中压缩空气储能目前尚未进行大规模应用，电化学储能采用铅酸电池或锂电池作为储能设备，技术较为成熟，已具备大规模商用条件，在部分数据中心已展开应用。同时，可将氢能引入数据中心供电的储能环节，氢能作为 1 种清洁灵活的二次能源，在新能源为主体的新型电力系统中可作为电力介质的载体，实现氢−电灵活转化[37-38]。可将电化学储能与氢储能相结合，既能弥补前者因电池自放电特性、储能密度低等因素对储能规模的限制，也能提高新能源消纳，降低能源存储、转化和供给中的碳排放，助力数据中心的低碳、可靠运行。

随着数据中心、可再生能源及储能的深度融合，通过构建数据中心能源规划系统，将多种能源协同规划，促进可再生能源消纳、提升数据中心运行效率，对于数据中心行业发展具有重要意义。数据中心可根据实际运行条件和供能需求，以绿色低碳、降本增效为目标导向，基于数据中心电力负荷的时空调度灵活性，实现用电负荷的精准调控。通过负荷调度控制使用可再生能源的时间和地点，利用峰谷电价降低用电成本，同时应对可再生能源的波动性带来的消纳难题。

(2)在供电技术方面，直流供配电将是主流供电方案，直流供配电可以省去大量整流和逆变环节，提高能量转换效率和供电可靠性，降低投资成本，也可以使可再生能源并网变得更加便捷和经济；在具体的供电架构配置上，数据中心可以根据供电可靠性、供电范围及投资等因素来灵活选择供电架构，以市电+240 V 直流为主的高压直流供电架构、巴拿马电源方案为主的中压直供集成式供电架构及阿里张北数据中心所应用的柔性直流供电架构等为代表的新型供电架构将在数据中心供电领域展开大规模推广和应用。

在供电方案的产品形式上，预制化、集成化的供配电模组具备快速部署、快速组装、快速迁移、建设成本低、空间利用率高、防护能力高等诸多优势，预计将成为主流方案。此外，预制化、集成化的供配电模组还可以作为独立的单元，快速部署到偏远和环境条件恶劣的地区，为用户提供最佳解决方案，满足数据中心快速灵活的需求。可以预见，随着对集成式电力模组架构和功能的深入研究，预制化、集成化、智能化也将成为数据中心供配电系统发展的必然趋势[39]。

(3)在电力电子器件方面，数据中心可使用以碳化硅和氮化镓为基础的第三代电力电子器件。目前电力系统主要应用以硅基器件为基础的电力装置，但由于硅基器件的性能限制，为了适应实际要求往往就需要复杂的电路拓扑来弥补，从而使装置的可靠性降低，成本和损耗也会加大，再加上受限制于材料，大多数器件的电学性能已经达到理论极限[40]。由宽禁带半导体材料制成的第三代电力电子器件，与硅基器件相比其宽禁带、高击穿场强、高热导率、更低的传导损耗和更快的开关速度等优异性能，使得电力系统能够工作在更高电压、更高频率和更高功率密度条件下[41]。数据中心供配电系统使用第三代电力电子器件，可降低电能损耗，提高供电效率，简化电路拓扑，减少占地面积。

(4)数据中心作为数据化的底层支撑，其安全性是至关重要的，因此其供电系统及整个数据中心的运维要求必然很高，随着 AI 技术和数字化在数据中心的引入和不断完善，未来数据中心将实现智能化运维，实现全供电链路可视化，实时监控，自主诊断，解放运维人力，大幅提升运维效率。

因此，新能源、储能、新型供配电技术和产品、新型电力电子器件及 AI 技术相结合的发展方案，将在兼顾成本的同时大力推动数据中心绿色节能建设，同时，需要各方面技术相互配合、相互促进发展，发挥整体协同效能，助力“双碳”目标在数据中心领域的实现。

3 结语

本文通过介绍传统交流 UPS 供电、高压直流供电、柔性直流输电、新型中压直供集成式供电等经典供电方案，总结了数据中心供电架构长久以来的发展和演变，分析了数据中心供电架构目前发展中遇到的问题。在“双碳”目标的大趋势下，数据中心未来的发展将兼顾“低碳节能”与“降本增效”，因此在电能来源方面，太阳能、风能等新能源将会逐步改变以传统能源为主的供能形式，储能环节也会在其中发挥重要作用；在供电架构方面，高压直流技术的应用将会更加广泛，以巴拿马电源为代表的中压直供预制化、集成式供电方案会呈现加速发展的趋势；第三代电力电子器件的发展也使得其在数据中心供电系统的应用成为可能。集可再生能源、储能、新型供电技术、第三代电力电子器件及 AI 技术为一体的新型供电方案也必将为数据中心未来在绿色低碳、降本增效方向的发展提供一条现实有效的途径。

参考文献：

[1] 臧国秀, 贾桥龙, 崔国利, 等. 浅析数据中心供配电架构[J]. 石化技术, 2020, 27(8): 119-121, 109.
Zang Guoxiu, Jia Qiaolong, Cui Guoli, et al. Analysis on power supply and distribution architecture of data center [J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(8): 119-121, 109. (in Chinese)

[2] 蒋鹏, 陈鑫, 周海峰, 等. 海底数据中心用 SOFC 热管理方法研究[J]. 电源学报, 2025, 23(7): 171-180.
Jiang Peng, Chen Xin, Zhou Haifeng, et al. Research on SOFC thermal management method for submarine data center [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(7): 171-180. (in Chinese)

[3] Yu Ling, Liu Piao, Li Yuqing, et al. Research on new electric power data center based on DC power supply and distribution technology [C]// 2022 IEEE International Conference on Power Systems and Electrical Technology (PSET). Aalborg, Denmark, 2023: 297-302.

[4] 柏晨, 王念春, 卓青. 绿色数据中心的供电运行控制和能量管理[J]. 电源学报, 2021, 19(1): 107-114.
Bai Chen, Wang Nianchun, Zhuo Qing. Power supply operation control and energy management in green data center [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(1): 107-114. (in Chinese)

[5] 郑怀玉. 浅谈不间断 UPS 供电系统的可靠性[J]. 科技与创新, 2020(16): 69-70.
Zheng Huaiyu. On the reliability of UPS power supply system [J]. Science and Technology & Innovation, 2020(16): 69-70. (in Chinese)

[6] 左蔚. 分布式 UPS 在数据中心中的运用[J]. 科技经济市场, 2021(6): 27-28.
Zuo Wei. Application of distributed UPS in data center [J]. Science & Technology Ecnony Market, 2021(6): 27-28. (in Chinese)

[7] 傅军栋, 陈浩杰, 孙翔, 等. 基于 EKF-Markov 的 UPS 荷电状态预测与健康管理系统[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 225-233.
Fu Jundong, Chen Haojie, Sun Xiang, et al. SOC prediction and health management system of UPS based on EKF-Markov [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 225-233. (in Chinese)

[8] Al-Harbi A, Al-Jwesm F, Al-Howeish Y. Improving efficiency, reliability and life-time cost of data centers using DC technology [C]// 2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM). Matsue, Japan, 2020: 1-5.

[9] 高岩丛. 数据中心不间断电源系统分析对比[J]. 长江信息通信, 2021, 34(10): 163-165.
Gao Yancong. Analysis and comparison of uninterruptible power supply system in data center [J]. Changjiang Information & Communications, 2021, 34(10): 163-165. (in Chinese)

[10] 龙利华, 李怀强. 高压直流电源系统在数据中心的应用[J]. 电子技术, 2021, 50(8): 262-263.
Long Lihua, Li Huaiqiang. Application of high voltage DC power supply system in data center [J]. Electronic Technology, 2021, 50(8): 262-263. (in Chinese)

[11] 余斌, 胥飞飞, 李善策. “双碳”背景下数据中心高压直

流供电的标准与实践[J]. 互联网天地, 2021(6): 54-58.
Yu Bin, Xu Feifei, Li Shance. Standard and practice of high voltage DC power supply in data center under the background of “double carbon” [J]. China Internet, 2021(6): 54-58. (in Chinese)

[12] Qi Shuguang, Sun Wenbo, Wu Yapan. Comparative analysis on different architectures of power supply system for data center and telecom center [C]// 2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). Broadbeach, QLD, Australia, 2017: 26-29.

[13] 李忠坤. 高压直流供电系统中不间断电源的研究与设计[D]. 南京: 东南大学, 2017.
Li Zhongkun. Research and design on the uninterruptible power supply in high voltage DC power supply system [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)

[14] Shrestha B R, Tamrakar U, Hansen T M, et al. Efficiency and reliability analyses of AC and 380 V DC distribution in data centers [J]. IEEE Access, 2018, 6: 63305-63315.

[15] 闫德生. 高压直流 336 V 电源系统设计探讨[J]. 通信电源技术, 2018, 35(1): 159-160.
Yan Desheng. Discussion on the design of high voltage DC 336 V power supply system [J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(1): 159-160. (in Chinese)

[16] Zhou Miaoxian, Guo Fang, Wen An, et al. Comparison of harmonics between Panama power supply and traditional AC UPS power supply system [C]// 2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Hangzhou, China, 2022: 1744-1748.

[17] Chen Yenan, Shi Keyan, Chen Min, et al. Data center power supply systems: From grid edge to point-of-load [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(3): 2441-2456.

[18] 丁聪, 叶新平. 数据中心巴拿马电源技术应用探讨[J]. 智能建筑电气技术, 2021, 15(1): 67-72.
Ding Cong, Ye Xinping. Exploration of Panama power technology applications for data center [J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2021, 15(1): 67-72. (in Chinese)

[19] 张文利, 徐坚, 王丽. 数据中心巴拿马电源系统架构应用研究[J]. 通信电源技术, 2020, 37(13): 28-31, 34.
Zhang Wenli, Xu Jian, Wang Li. Applied research of Panama power system in data center [J]. Telecom Power Technologies, 2020, 37(13): 28-31, 34. (in Chinese)

[20] 张震, 黄伟男. “双碳”目标下的数据中心低压配电系统供电方案选择[J]. 电气时代, 2023(1): 24-28.
Zhang Zhen, Huang Weinan. Power supply scheme selection of low-voltage distribution system in data center under the goal of “double carbon” [J]. Electric Age, 2023(1): 24-28. (in Chinese)

[21] 邹常跃, 韦嵘晖, 冯俊杰, 等. 柔性直流输电发展现状及应用前景[J]. 南方电网技术, 2022, 16(3): 1-7.
Zou Changyue, Wei Ronghui, Feng Junjie, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3): 1-7. (in Chinese)

[22] Cai H, Wang G, Xie Z, et al. Research on the application of flexible direct-current transmission technology in the system planning integrated with large scale of offshore wind farms [J]. IET Conference Proceedings, 2021, 2020(1): 339-343.

[23] 陈冰, 伦振坚, 张学昶, 等. 面向数据中心的柔性直流配电系统多目标综合评估[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3987-3995.
Chen Bing, Lun Zhenjian, Zhang Xuechang, et al. Multi-objective comprehensive evaluation method of flexible DC distribution system for data center application scenarios [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3987-3995. (in Chinese)

[24] 吕小伟. 柔性直流输电技术的应用探究[J]. 科技创新与应用, 2020, 10(13): 179-180.
Lü Xiaowei. Research on the application of flexible DC transmission technology [J]. Technology Innovation and Application, 2020, 10(13): 179-180. (in Chinese)

[25] 周京华, 吴杰伟, 陈亚爱, 等. 张北阿里云数据中心柔性直流输配电系统[J]. 电气应用, 2019, 38(1): 54-58.
Zhou Jinghua, Wu Jiewei, Chen Yaai, et al. Flexible DC transmission and distribution system of Zhangbei Alibaba cloud data center [J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(1): 54-58. (in Chinese)

[26] Ahmed K M U, Bollen M H J, Alvarez M. A review of

data centers energy consumption and reliability modeling [J]. IEEE Access, 2021, 9: 152536-152563.

[27] Li Guozhu, Sun Zixuan, Wang Qingqin, et al. China's green data center development: Policies and carbon reduction technology path [J]. Environmental Research, 2023, 231: 116248.

[28] Ahammed M T, Osman N, Das C, et al. Analysis of energy consumption for a hybrid green data center [C]// 2022 International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISET). Chittagong, Bangladesh, 2022: 318-323.

[29] 中华人民共和国工业和信息化部.新型数据中心发展三年行动计划(2021—2023 年)[EB/OL]. (2021-7-14)[2023-4-12]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/txy/art/2021/art_d6068e784bef47ca9cda927daa42d41e.html.
Ministry of Industry and Information Technology of The People's Republic of China. A three-year action plan for the development of new data centers (2021—2023) [EB/OL]. (2021-7-14)[2023-4-12]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/txy/art/2021/art_d6068e784bef47ca9cda927daa42d41e.html. (in Chinese)

[30] 侯永涛, 王蕾. "双碳"目标下数据中心供电系统发展方向探讨[J]. 邮电设计技术, 2022(12): 66-70.
Hou Yongtao, Wang Lei. Discussion on development direction of power supply system in data center under "dual-carbon" target [J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2022(12): 66-70. (in Chinese)

[31] 彭精立, 李星. 数据中心供配电节能方案分析[J]. 光源与照明, 2022(10): 240-242.
Peng Jingli, Li Xing. Analysis of energy-saving scheme for power supply and distribution in data center [J]. Lamps & Lighting, 2022(10): 240-242. (in Chinese)

[32] 张言言. "碳中和"数据中心的概念、特征与实现路径[J]. 石油石化物资采购, 2021(33): 179-181.
Zhang Yanyan. Concept, characteristics and realization path of "carbon neutral" data center [J]. Petroleum & Petrochemical Material Procurement, 2021(33): 179-181. (in Chinese)

[33] Wang Shipeng, Xie Yurong, Zhang Zhongping, et al. Research on energy availability and economy coupling of distributed energy supply system in data center [C]// 2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Chengdu, China, 2020: 1893-1898.

[34] 王琪, 杨一宇. 336 V 高压直流电源与铁锂后备电池新型供电系统[J]. 信息通信, 2019, 32(10): 271-273.
Wang Qi, Yang Yiyu. New power supply system of 336 V high voltage DC power supply and iron-lithium backup battery [J]. Information & Communications, 2019, 32(10): 271-273. (in Chinese)

[35] 张宏超, 黄玺. 基于 336 V/240 V 高压直流为基础的市电混供技术在云计算数据中心的研究[J]. 长江信息通信, 2021, 34(7): 168-170.
Zhang Hongchao, Huang Xi. Hybrid power supply technology based on 336 V/240 V HVDC Research in cloud computing data center [J]. Changjiang Information &Communications, 2021, 34(7): 168-170. (in Chinese)

[36] 张军华, 刘宇. 碳达峰碳中和目标下数据中心绿色低碳发展策略[J]. 信息技术与标准化, 2021(12): 7-12, 20.
Zhang Junhua, Liu Yu. Green and low-carbon development strategy of data center under the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Information Technology & Standardization, 2021(12): 7-12, 20. (in Chinese)

[37] 张诚, 檀志恒, 晁怀颇. "双碳"背景下数据中心氢能应用的可行性研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 327-334.
Zhang Cheng, Tan Zhiheng, Chao Huaipo. Feasibility study of hydrogen energy application on data center under "carbon peaking and neutralization" background [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(6): 327-334. (in Chinese)

[38] 罗志斌, 孙潇, 孙翔, 等. 氢能与储能耦合发展的机遇与挑战[J]. 南方能源建设, 2022, 9(4): 24-31.
Luo Zhibin, Sun Xiao, Sun Xiang, et al. The coupling development of hydrogen and energy storage technology: Opportunities and challenges [J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(4): 24-31. (in Chinese)

[39] Tan Xionghua, Luo Jinman, Yi Chunjie, et al. Containerized power data center with multi-station integration [C]// 2022 12th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). Guangzhou, China, 2023: 662-666.

[40] 陈明会, 王春宁, 武浩. 碳化硅电力半导体器件在现代

电力系统的应用及展望[J]. 通信电源技术, 2018, 35(1): 11-13.

Chen Minghui, Wang Chunning, Wu Hao. Application prospect of SiC power semiconductor devices in modern systems [J]. Telecom Power Technologies, 2018, 35(1): 11-13. (in Chinese)

[41] 陈之勃, 陈永真. 碳化硅 MOSFET 与硅 MOSFET 的应用对比分析[J]. 电源学报, 2018, 16(1): 95-98.

Chen Zhibo, Chen Yongzhen. Comparative analysis of applications for SiC MOSFET and silicon MOSFET [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(1): 95-98. (in Chinese)



周京华

作者简介：

周京华(1974—　)，男，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，教授。研究方向：大功率变流技术。E-mail：zjh@ncut.edu.cn。

王江博(1997—　)，男，中国电源学会会员，硕士研究生。研究方向：电力电子变换与控制。E-mail：zh@mail.ncut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)



公益广告来源：杭州市公益广告宣传网