

面向智算的供电架构演进研究

Research on Evolution of Power Supply
Architecture for Intelligent Computing

董 雯¹,王 蕾²,耿国胤³,王 镇³,冯南雁¹(1. 中国联通研究院,北京 100048;2. 中国联合网络通信集团有限公司,北京 100033;3. 中讯邮电咨询设计院有限公司,北京 100048)

Dong Wen¹, Wang Lei², Geng Guoyin³, Wang Zhen³, Feng Nanyan¹(1. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China;2. China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China;3. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China)

摘要:

随着人工智能产业的高速发展,智算服务器的高功耗、高散热特性对基础设施提出了严峻挑战,现有供电架构难以满足智算高功率机柜的供电需求。针对高功率服务器带来的传输损耗大、转换效率低、散热压力大等问题,提出了智算机柜由分布式供电向集中式供电的演进方向,同时也阐述了智算中心整体供电架构的全直流演进路线,最后对未来智算中心供电系统的兼容性和智能化提升进行了展望。

Abstract:

With the rapid development of the artificial intelligence industry, the high power consumption and high heat dissipation characteristics of intelligent computing servers pose a serious challenge to the infrastructure. The existing traditional rack power distribution architecture is unable to meet the power supply requirements of high-power intelligent computing cabinets. Faced with the problems of high transmission loss, low conversion efficiency, and high heat dissipation caused by high-power servers, it proposes an evolutionary direction from distributed power supply to centralized power supply, and elaborates on the full DC evolution route of the overall power supply architecture of the intelligent computing center. Finally, it looks forward to the compatibility and intelligence improvement of the power supply system for future intelligent computing centers.

Keywords:

Artificial intelligence; Artificial intelligence data center; Power supply architecture; Power density

引用格式:董雯,王蕾,耿国胤,等. 面向智算的供电架构演进研究[J]. 邮电设计技术,2025(11):88–92.

0 前言

随着人工智能在医疗、金融、制造业、零售业和交通运输等领域的广泛应用,传统的数据中心已无法满足日益增长的计算需求,智算中心应运而生。它能够支持大规模数据处理、机器学习、深度学习和其他智能算法的需求。当前,智算中心的规模和处理能力正在呈指数级增长,以满足日益增长的算力需求。

数据中心正由通用服务器向智算服务器过渡,然

关键词:

人工智能;智算中心;供电架构;功率密度

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.11.017

文章编号:1007-3043(2025)11-0088-05

中图分类号:TN86

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



而智算服务器高功耗、高散热的特性,对基础设施提出了严峻的挑战。制冷系统由单一制冷方案演变为多元化制冷方案,尤其是液冷技术将进入大规模应用的快车道。供电系统的架构设计需要兼顾算力服务器、制冷技术兼容、成本控制等多方面需求,实现算力和电力资源的高效分配,进而优化算力与电力之间的关系,为智算基础设施的节能降碳提供坚实保障。

1 面向智算场景的供电需求分析

1.1 智算中心发展趋势

在 AI 时代,算力需求不断提升,我国算力规模持

收稿日期:2025-09-24

续扩大,未来仍将保持高速增长的态势。IDC与浪潮信息联合发布的《2023—2024中国人工智能计算力发展评估报告》显示,我国算力规模已步入快速发展阶段。我国通用算力由2020年的39.6 EFlops增长至2022年的54.5 EFlops,预计到2027年,通用算力规模将达到117.3 EFlops。同时,我国智能算力由2020年的75 EFlops增长至2022年的259.9 EFlops,预计到2027年智能算力规模将达到1 117.4 EFlops。2022—2027年期间,年复合增长率预计达33.9%^[1]。

我国的数字经济高质量发展推动算力由1.0向2.0演进。算力1.0中的传统数据中心被视为“算力仓库”,主要提供数据存储和分发服务。从2020年开始,国家着重规划算力2.0,以新型智算中心为依托,打造融合、协同、高效、智能的算力体系。该体系不仅包括通用算力,还涉及到专用算力、智能算力等多种算力的协同,能够满足复杂的人工智能模型训练、大数据分析等多样化、高性能的计算需求。

1.2 智算设备功耗特点

面对人工智能、云计算等行业的快速发展,芯片性能的提升成为满足海量算力需求的重要途径,CPU、GPU等芯片功耗水平持续攀升。Intel、AMD等主要芯片制造商持续提高芯片的散热设计功耗(Thermal Design Power, TDP)。目前,主流系列英伟达NVIDIA H100 AI芯片的峰值功耗已经达到700 W,新一代AI芯片B200的功耗将达到1 000 W。预计未来在后摩尔定律时代下,芯片算力与功耗仍将大幅增长^[2]。

AI服务器通常采用异构架构,配备大量高功率的CPU、GPU芯片,整机功率随之大幅升高。例如,用于训练ChatGPT的英伟达AI服务器H100包含8颗GPU和2颗CPU,假设满配8卡,单台H100服务器仅内部GPU所需的功耗就达到5.6 kW,加上CPU、存储等设备,服务器总功耗高达10 kW^[3]。对比来看,传统通用服务器的功耗只有几百瓦,以新华三的H3C UniServer R4900 G6服务器为例,其最大功率为350 W。从几百瓦的CPU服务器到10千瓦的GPU异构服务器,热功耗提升了数十倍^[4]。

因此,在智能算力高密部署场景的驱动下,数据中心机柜正朝着高功率密度的方向转型。目前,主流的传统数据中心单机柜功率密度在15 kW以下,而智算中心单机柜功率密度普遍在20~40 kW,未来将逐步发展至40~120 kW甚至更高。

1.3 智算中心负载波动

传统数据中心投入运行以后,负载相对平稳,极少会达到波峰或波谷状态。智算中心的工作主要包括训练和推理,推理的负载相对平稳,而训练任务的计算量和数据处理需求会随时间变化,这导致用电负载波动明显。在训练的不同阶段,如模型初始化、迭代训练、参数更新等,设备的运算速度和资源占用情况不同,进而使电力消耗呈现出动态变化的特点。当智算中心的计算设备同时启动或执行某些突发的高强度计算任务时,会产生较大的瞬时电流和功率冲击,这对供电系统的稳定性和可靠性提出了较高要求。

由此可见,智算中心的负载波动非常大,主要表现为周期性、大幅度、并发性及瞬时冲击等特点。

2 传统供电架构面临挑战

2.1 传统服务器机柜的供电架构

传统的通算服务器普遍采用交流供电方式,在服务器内部通过2级电源转换对CPU、传输、存储等元器件供电,供电架构如图1所示。

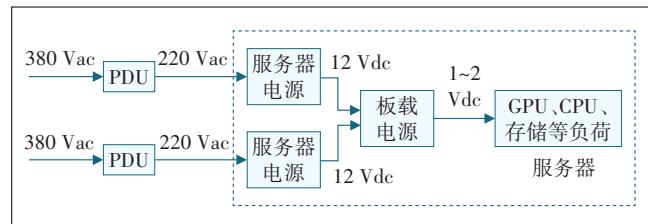


图1 传统服务器机柜供电架构

UPS设备输出通过列头柜配电后引入IT机柜,经过PDU再分配至每台服务器。服务器内部采用2级电源转换,第1级为服务器电源PSU,将220 V交流转换为12 V直流;第2级为板载电源,将12 V直流转换为1~2 V直流,为CPU、存储、传输等服务器主板上的元器件供电。一般来说,PDU、服务器电源和板载电源均采用2N配置。

2.2 高功率带来挑战

2.2.1 传输损耗大

对于高功率的智算机柜,如果仍采用AC-12V-1V的中间母线架构,会带来很大的电流传输损耗。根据焦耳定律, $Q=I^2Rt$,大电流会使传输过程中的能量损耗大幅增加,降低能源利用效率。例如,1台12 kW的服务器在12 V输出下电流高达1 000 A,因此即便传输阻抗仅为1 mΩ,也会带来1 kW的能耗,如此大的电流

将导致线路过载、发热等问题,给供电线路和连接部件带来巨大挑战。

在同样的负载功率下,若采用48 V供电架构,电压提升了4倍,电流则降低为原来的1/4,电流传输损耗降低为原来的1/16。当服务器功率在10 kW以内时,损耗的问题还不太明显,但随着GPU和服务器功率的进一步提升,这个电流传输损耗问题会变得越来越严重。

2.2.2 转换效率低

服务器内部的12 V电源模块效率较低,以80PLUS铂金级服务器电源为例,在10%、20%、50%和100%负载下,其电源转换效率分别为90%、92%、94%和91%。48 V整流模块的转换效率显著优于12 V整流模块。根据权威机构提供的数据,在20%~100%负载率下,现阶段主流48 V整流模块的转换效率比12 V整流模块高1.5%~2.3%^[5]。

以一个平均总功耗为10 000 kW的数据中心为例,如果电源使用效率(PUE)为1.5,服务器能耗占比为66%,服务器电源效率提高2%,每年就能减少1.33%的电能消耗,节省116.5万kWh的电能。根据生态环境部、国家统计局2024年发布的全国电力平均二氧化碳排放因子核算,这相当于减少约692.2 t碳排放^[6]。按照每千瓦时电费0.8元计算,每年可节省电费约93万元。随着智算中心的规模和能耗不断增长,采用48 V电源模块相比传统的12 V电源模块,节省的电费和降低的碳排放量将相当可观。

2.2.3 散热压力大

大电流通过供电线路和连接部件时,会产生大量的热量,这些热量需要及时散发出去,否则会导致服务器内部温度升高,进而影响GPU、CPU等元器件的性能和寿命。因此,采用AC-12V-1V的中间母线架构时,需要更大的散热设备或更高效的散热方案来维持服务器的正常工作温度,这会增加服务器的散热负担和散热成本。

3 智算高功率机柜供电架构演进

3.1 冗余方式演进

在传统数据中心时代,为追求运营环境的高可用性,在服务器机柜内部采用了AC-12V-1V供电制式,2N冗余方式是最常见的供电方案。这种架构以其建设简单、维护便捷的优势得到业内广泛认可,成为服务器机柜供电架构的主流。

由于智算服务器功率大幅度提升,如果仍然采用2N冗余方式,不仅会面临硬件成本和维护成本增加的难题,冗余的电源模块还会占用额外空间,服务器内部空间通常十分紧凑,增加一个电源模块可能会影响内部布局,限制其他组件的扩展,或者导致服务器机箱需要设计得更大,这不利于智算服务器的小型化、高密化部署。

3.2 电压制式演进

随着智算中心对末端配电容量需求的不断提升,传统单相PDU已难以胜任更高功率的应用场景。相比之下,三相PDU可提供更高的功率支持,但也使服务器的电源分配变得更加复杂,尤其需要重点关注三相负载平衡问题。而且,三相PDU的尺寸比传统单相PDU更大,加之智算服务器的深度增加,以及液冷分液器的安装,进一步压缩了机柜背面的安装空间。面对智算高功率场景,欧美某些机柜厂商采用63~80 A三相的PDU来支持30~80 kW的液冷机架。例如,英伟达的4+2电源方案,采用DR架构选取任意3路的3相PDU,然后在机架的剩余空间放置液冷歧管。这种方式虽然可行,但是DR架构的前端配电非常复杂,这增加了扩容升级和运行维护的难度。

对于国内部分数据中心使用的240 V高压直流系统,高密度机柜对末端配电的要求更高。考虑到电池直挂方案的最低电压约为216 V,63 A的直流PDU大概只能提供10~12 kW功率,30 kW机柜需要6根PDU,结合液冷服务器后部歧管布局要求,机架后部空间布局非常困难。

3.3 智算机柜的48 V供电架构

面对智算服务器带来的挑战,海外一些互联网巨头在高功率机柜供电上开始采用48 V直流体系,将分布在各个服务器内的整流模块PSU改为集中设置,统一安装在机柜内,与监控模块一起组成机柜供电单元,称作电源框(Power Shelf)。单个机柜内可安装多个电源框,每个电源框既可以独立运行,也可以多个电源框并联运行,电源模块支持2N、N+1、N+X多种冗余方式。48 V电压制式一般可以支持单机柜功率不小于60 kW,在优化母线架构和柜体供电布局的情况下,甚至能够满足单机柜功率达100 kW以上。

当然,如果智算服务器机柜采用48 V供电架构,需要服务器产业链多环节的支持与配合,服务器主板厂商要重新设计服务器主板,使其支持48 V直接输入以及高效的48 V-1 V的转换电路,优化主板布局与布

线,从而提高电源传输效率和稳定性,降低电磁干扰。智算服务器机柜供电架构如图2所示。

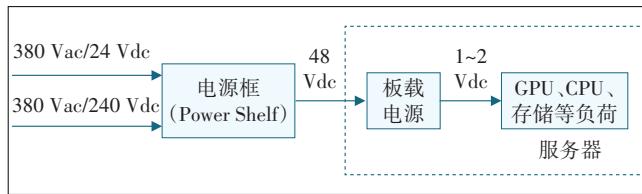


图2 智算服务器机柜供电架构

同时,48 V供电架构还可以支持服务器机柜中插入模块化智能锂电池组,将传统的集中式备电演进为分布式备电,从而具有以下优势。

- a) 简化了整个供电链路,省去前端的UPS或HVDC设备,节省了整个供配电系统的设备和机房面积。
- b) 采用机架电源+智慧锂电模式,替代UPS/HVDC设备+服务器电源,减少了电压变换级数,使供配电链路效率提升了约3%。
- c) 设备数量和种类少、供电链路简单,提升了整个系统的可靠性。
- d) 面向智算机柜需求,采用标准化、模块化分布式设计,备电时间更加灵活,设备扩容升级更加简便,能够缩短建设时间、降低运维难度、精确匹配需求。
- e) 智算机柜的供电采用全模块化设计,能够更好地支持未来智算中心的全直流供电架构。近期可在前端增加750 V~48 V的DC/DC转换器,远期将电源框升级为支持DC 750 V输入,就可接入750 V直流母线,便于分步分批进行升级改造。

4 智算中心整体供电架构演进

4.1 全直流供电架构

随着智算中心单机柜功耗和密度的提升,供电系统优化的关注点将转向更高电压等级,750 V/800 V等

输出电压是重点发展方向,这能够解决导体截面积过大等问题,同时增强远距离输电优势,带动设计架构变革。2024年百度推出的“瀚海”直流电源配备了750 V输出柜,支持单机柜100 kW的功率,效率提升约2%。

全直流供电架构特别适用于有高能效要求和新能源接入的场合,可有效支撑数据中心供配电系统向小占地面积、高功率密度和智能化控制的方向发展。全直流供电架构基于电力电子变压器构建输入串联、输出并联型的拓扑结构,可实现10 kV高压交流输入、DC 750 V直流输出。并且,该架构方便匹配光伏储能等新能源直接并网,实现真正意义上的光储柔直系统。

具体来说,智算中心全直流供电架构的关键在于引入新型的电力电子变压器来代替传统电力变压器和UPS/HVDC设备。该架构具备电压精确控制、高效能转换、多电压制式输出、快速响应、灵活可编程等优势,运行方式如下。

从电网引入10 kV交流电缆,与中压油机切换之后进入固态变压器,转换为750 V直流输出到总母线上,用电负荷、光伏发电、储能/备电电池等设备都并接接入直流总母线。负荷类设备通过DC/DC或DC/AC变换器实现用电,光伏系统通过DC/DC变换器对母线供电。储能/备电电池需要配置双向DC/DC设备,既可以充电又可以放电。具体架构如图3所示。

全直流架构需要根据光伏发电的出力情况、储能电池的状态以及用电设备的负荷需求,合理分配和协调市电、光伏、储能多种电源之间的功率。当光伏发电量充足时,优先满足用电设备的需求,并将剩余电量存储到储能电池中;当光伏发电量不足时,优先使用市电,并由储能电池补充不足的功率,以维持直流母线电压的稳定。因此,全直流供电架构需要具备完善的智能控制技术,包括最大功率点跟踪(MPPT)技

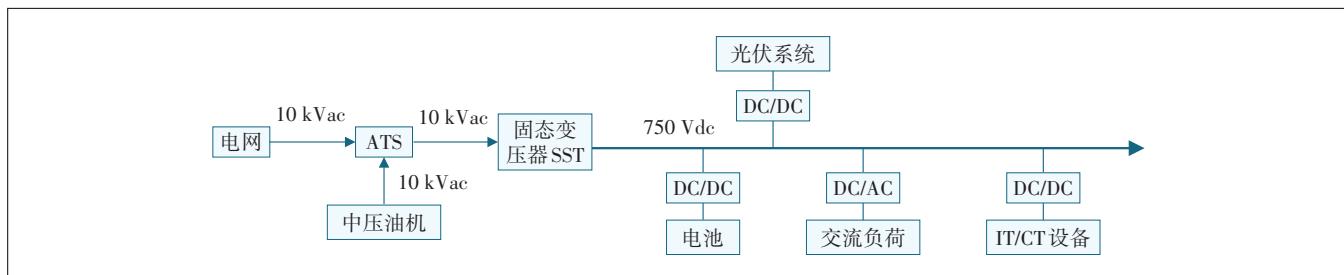


图3 智算中心全直流供电架构

术、储能电池管理系统(BMS)技术、分布式电源协调控制技术、智能负载管理技术等。

供电电压提升也会带来一些风险,如单体产品的可靠性降低、短路和弧闪的风险增加,以及人身操作安全等问题。在选择供电方案时要综合考虑这些因素,并确保产业链整合、标准制定以及市场接受度等方面得以完善。

4.2 从“多能互补”到“算电协同”

要解决智算中心负载波动大的问题,对于已经选址建设或改造的数据中心来说,可以通过增加光伏能源、储能设施,以及采用与通算中心共址的方式来应对。

光伏+储能可以在智算中心负载较低时储存电能,在负载高峰时释放电能,起到平抑功率波动的作用。通过合理控制储能设施的充放电过程,使智算中心的用电负载更加平稳,减轻电网的负担。同时,增加光伏能源有助于减少对电网的依赖,从而降低用电成本。

智算中心和通算中心的负载特性有所不同,智算中心在进行大规模训练任务时负载较高,而通算中心的负载相对较为平稳。将两者共址,有利于实现资源的共享和协同利用。当智算中心负载波动较大时,可利用通算中心闲置的计算资源或电力容量来分担部分负载,提高整体资源的利用率。

远期规划的智算中心应统筹考虑发展需求和绿电资源,科学整合源荷储资源,开展算力、电力基础设施协同规划布局,探索新能源就近供电、聚合交易、就地消纳的“绿电聚合供应”模式。同时,有效利用周边区域的各类可控能源,如小型水力发电、氢燃料电池等,形成综合能源供应池,确保电能足质足量供应。通过算力与电力的深度融合和协同调度,能够实现能源高效利用、算力成本降低、绿色低碳发展以及对电网负荷的优化调节,从而推动数字经济的高质量发展。

5 结束语

随着智算中心单机柜功率密度的提升,智算机柜供电架构将转向更高电压等级,以解决电流增大带来的母线、电缆等供配电导体截面积过大和占用更多空间的问题。同时,电压等级的升高也会带来远距离输电的优势,降低大电流导致的供电链路损耗和减少散热负担,带来潜在的性能提升和成本节约。

针对智算中心的供电架构,考虑到未来直流设备(如光伏、储能电池、直流充电桩、直流照明和空调设备等)的比重将越来越大,所构建的全直流供电架构需要不断提升兼容性和智能化水平,广泛接入数据中心及周边的新能源和储能设施,并支持负载侧的智能化调控。要对固态变压器、智慧锂电、智能开关等供配电设备进行统一调度和管理,实时监测全部设备的运行状态、故障情况等,构建数字化运维体系。根据市电、光伏等可再生能源的供电特性以及负荷业务等级,采用多种策略实施限峰供电、错峰供电、差异化备电、智能下电等运行模式,达成节能降碳目标。通过将光伏发电、储能、直流配电和柔性控制技术有机结合,高效利用可再生能源,提高能源利用效率,降低能源损耗,实现真正意义上的光储直柔系统。

参考文献:

- [1] 浪潮信息. 2023-2024 中国人工智能计算力发展评估报告 [EB/OL]. [2025-02-17]. <https://www.ieisystem.com/insights-for-the-computing-industry/12078.html>.
- [2] NVIDIA. NVIDIA H100 TENSOR CORE GPU 助力各个数据中心实现卓越的性能、可扩展性和安全性 [EB/OL]. [2025-02-17]. <https://images.nvidia.cn/aem-dam/en-zz/Solutions/data-center/h100/nvidia-h100-datasheet-nvidia-a4-2287922-r7-zhCN.pdf>.
- [3] NVIDIA. NVIDIA DGX A100 通用的AI基础架构系统 [EB/OL]. [2025-02-17]. https://images.nvidia.cn/aem-dam/zh_cn/Solutions/data-center/dgx-family-dgx-a100-datasheet-nvidia-a4-2146231-r4-zhCN.pdf.
- [4] H3C. H3C UniServer R4900 G6 服务器 [EB/OL]. [2025-02-17]. https://www.h3c.com/cn/Products_And_Solution/Server/H3C/Products/RackServer/Products_Series/Dualway_Server/R4900_G6/.
- [5] 佚名. 80 Plus 电源额定值及其含义 [EB/OL]. [2025-02-17]. <https://cn.windows-office.net/?p=11162>.
- [6] 生态环境部,国家统计局. 生态环境部、国家统计局关于发布2021年电力二氧化碳排放因子的公告 [EB/OL]. [2025-02-11]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202404/t20240412_1070565.html.

作者简介:

董雯,高级工程师,国家注册咨询师,硕士,主要从事数据中心、通信网络、通信局房相关电源节能专业的标准制定、新技术研究、测试验证等工作;王蕾,高级工程师,硕士,长期从事数据中心及通信局房规划建设管理、通信配套基础设施及节能减排技术管理工作;耿国胤,高级工程师,学士,主要从事通信枢纽楼和数据中心的咨询规划、工程设计、系统评估、机房认证、节能技术研究及应用等工作;王璞,工程师,硕士,主要从事数据中心电气规划设计、通信局房电源规划设计及新技术研究等工作;冯南雁,工程师,硕士,主要从事数据中心、通信网络、通信局房相关电源节能专业的标准制定、新技术研究、测试验证等工作。