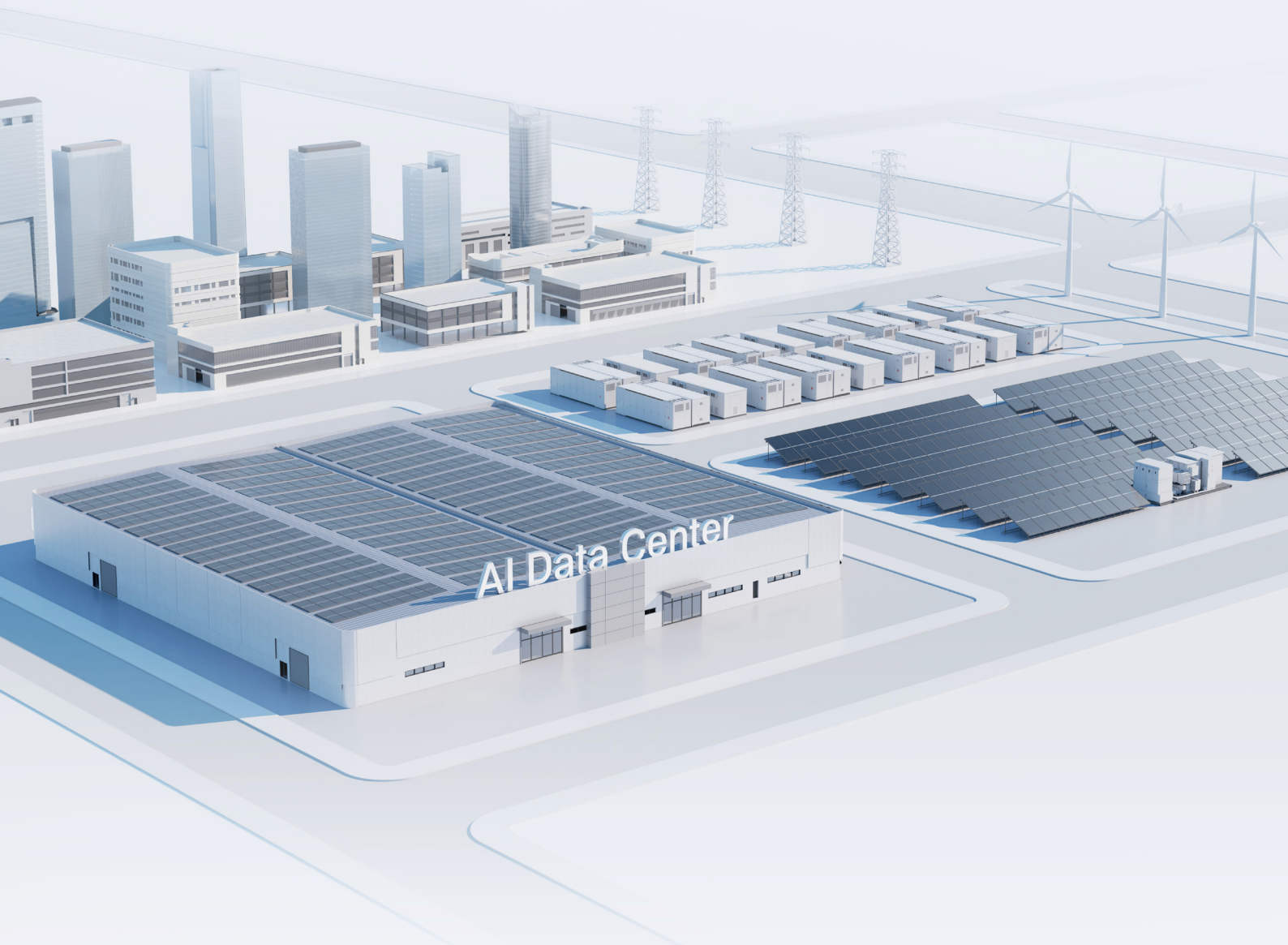


Technical Guide for Compute-Power Synergy in AIDC Microgrids

面向算电协同的 AIDC微电网技术指南



SUNGROW

CAICT 中国信通院

主编单位

阳光电源股份有限公司
中国信息通信研究院

主编人员（按拼音排序）

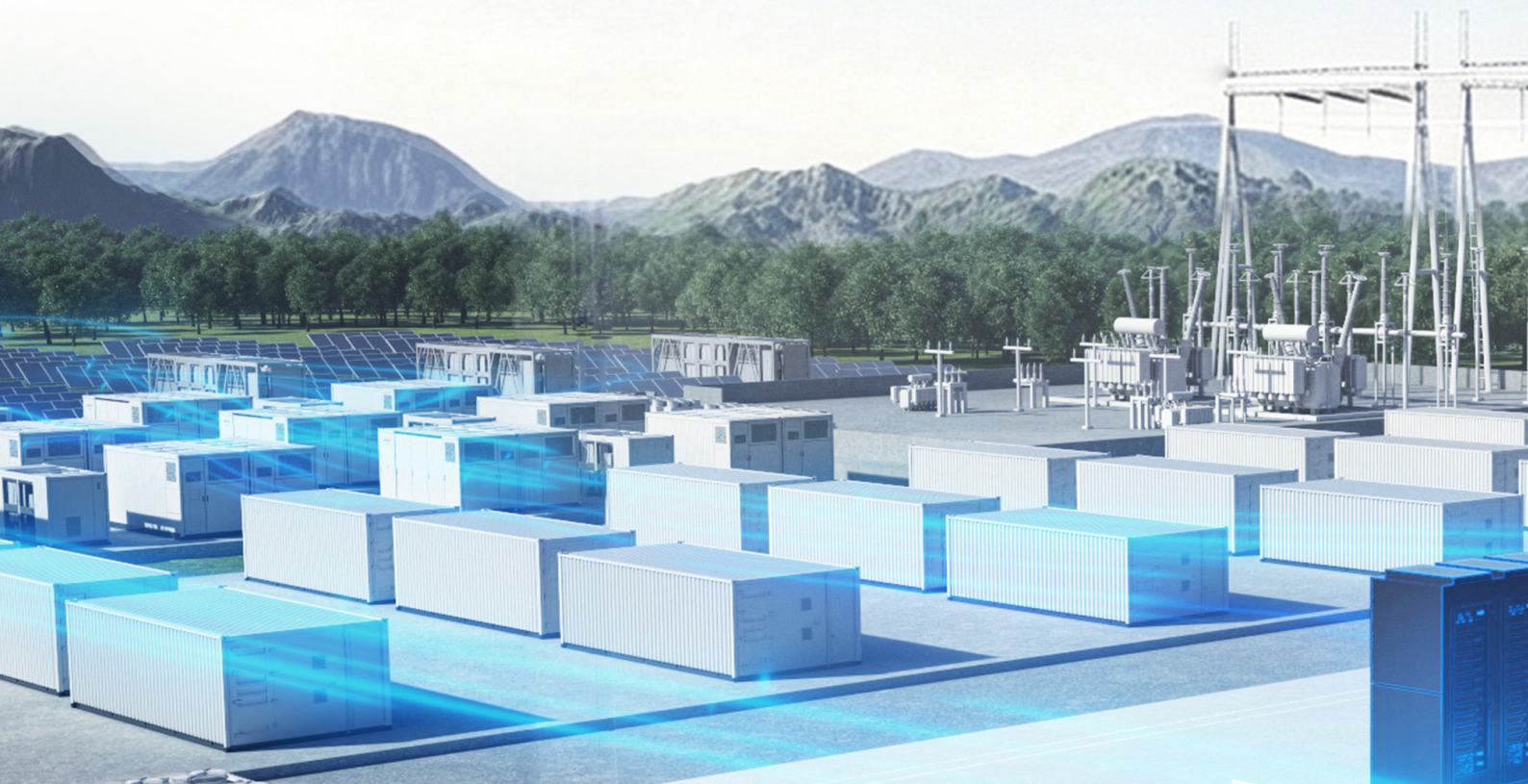
程 锋 姜凌菲（信通院） 茆秀艳（信通院） 李梦圆 李 扬 柳航越 刘 洋
潘先跃 邱惠恂（信通院） 冉令泽 王 月（信通院） 汪振强 吴华勇 谢华兵
许 盛 余军军 张佳琪（信通院） 张 迪 张 延 周华健

前言

大模型训练、智能推理及生成式人工智能应用的快速扩张，正驱动全球算力基础设施加速迭代。随之爆发的算力需求，对算力中心供电可靠性与能源保障提出了更高要求，并沿产业链向上游传导，催生新的用能增量。2025 年我国算力中心能耗总量 1960 亿千瓦时，同比增长 18.1%。随着算力规模扩大，算力与电力协同成为支撑人工智能基础设施发展的重要方向。

人工智能算力中心（以下简称：AIDC）微电网为算力与电力协同运行提供重要支撑。面向 AIDC 高可靠、绿色化供能需求，微电网通过协调新能源、储能、电网交互和智能控制等资源，提升能源供给灵活性和运行韧性，促进源网荷储资源与算力负荷协同优化，破解 AIDC 高能耗与绿电消纳难题，推动算力中心从“被动用电”向“主动构网”转变，是实现算电协同的关键路径。

本报告系统提出了“1+3+3”技术体系，即以一套“矩阵架构”为统一底座，根据应用需求灵活适配并网型、离网型、增强型微电网三种解决方案，并从稳定性、经济性、运维三个方面指明协同路径，实现 AIDC 微电网架构设计、场景适配与运行保障的有机统一，形成面向 AIDC 微电网规划、建设与运营全流程的技术指南。期望本报告能够为产业界提供参考，推动算电协同理念落地，规范 AIDC 微电网建设与运营，促进风光储资源就近利用，充分挖掘算力负荷柔性调节潜力，助力算力基础设施绿色高质量发展。



目录

01

AIDC微电网发展背景

- 1.1 政策引导算电协同高质量发展 01
- 1.2 AI重塑算力与电力运营新逻辑 02
- 1.3 算电协同面临多重结构性矛盾 02
- 1.4 算力爆发催生电力发展新命题 03

02

AIDC微电网概述

- 2.1 矩阵架构 05
- 2.2 三类场景全域覆盖 06

03

AIDC微电网三大协同路径

- 3.1 稳定性协同：筑牢AIDC用电可靠防线 10
- 3.2 经济性协同：最大化全生命周期价值 16
- 3.3 运维协同：以预测性维护提升运营效率 19

04

AIDC微电网创新技术

- 4.1 光储协同构网 25
- 4.2 多微网群优化调度 25
- 4.3 虚拟电厂 26

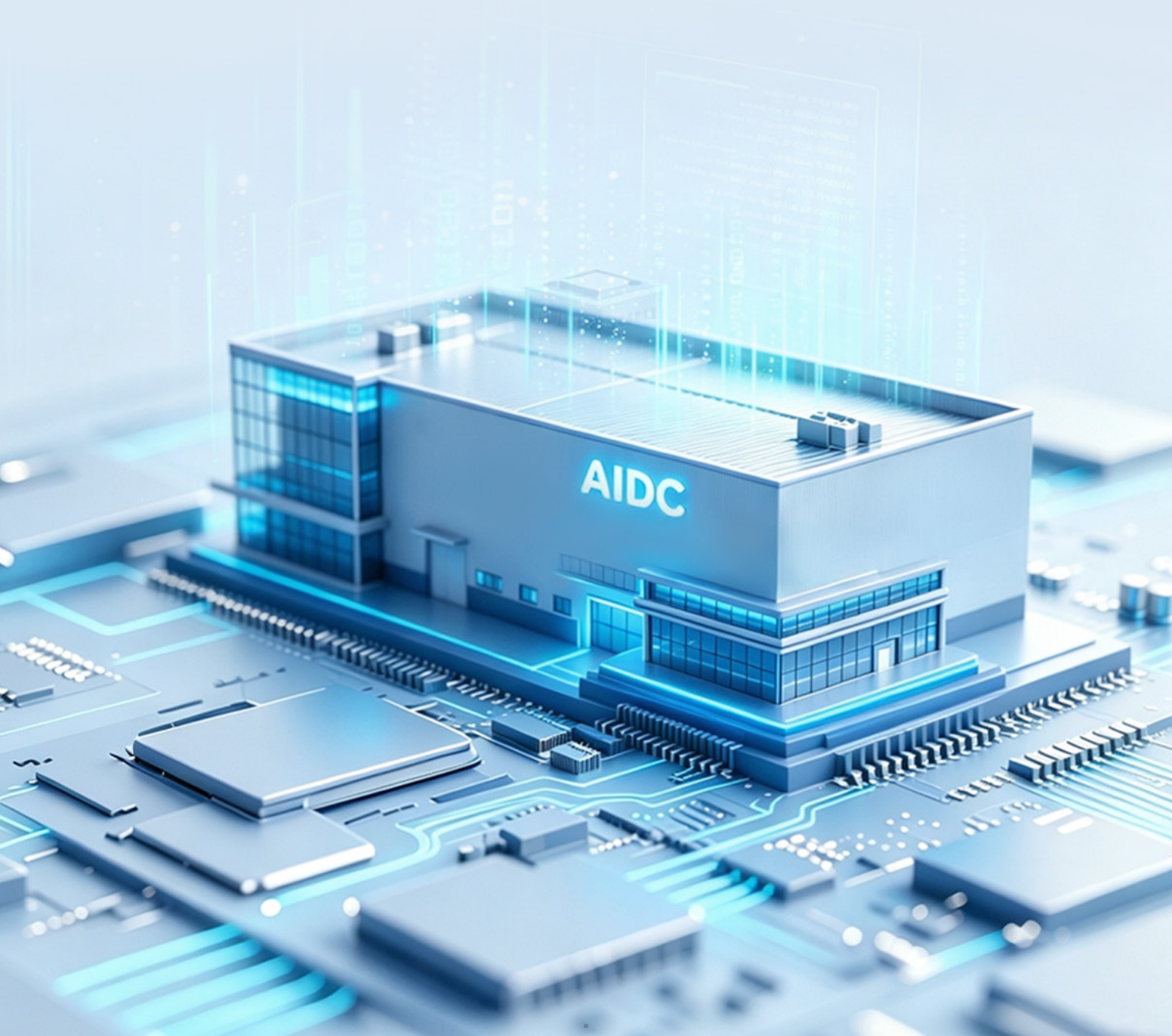
05

未来展望

- 5.1 架构融合深化：从设备革新走向系统协同 28
- 5.2 运行价值拓展：从成本优化转向效益提升 28
- 5.3 产业生态完善：从局部配套走向全链协同 28

01

AIDC微电网发展背景



1.1 政策引导算电协同高质量发展

随着算力爆发式增长，算力与电力的供需耦合日趋紧密，算力政策与电力政策逐渐进入战略交汇。国家先后发布《关于加快构建全国一体化大数据中心协同创新体系的指导意见》《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》，政策重心聚焦于算力基础设施的区域布局与集群发展，对能源维度的考量主要体现为关注能源条件，提升绿色低碳水平，尚未形成算力与电力系统的联动机制。2023年12月，发改委等五部门联合印发《关于深入实施“东数西算”工程 加快构建全国一体化算力网的实施意见》，首次提出“算力电力协同”概念。2024年到2026年，算电协同迎来政策部署的集中爆发期，算力领域《算力中心绿色低碳发展专项行动计划》《国家数据基础设施建设指引》等政策中均提到推进算力与绿色电力融合。同时“以电强算、以算促电”也成为电力领域的共识，《加快构建新型电力系统行动方案（2024-2027年）》《关于组织开展新型电力系统建设第一批试点工作的通知》等政策也明确协同规划布局算力与电力项目，提升源荷协同水平等。

算电协同已全面纳入国家顶层设计框架，进入系统性推进的新阶段。随着人工智能应用规模持续扩大，算力基础设施与能源系统之间的联系更加紧密。2026年3月，《政府工作报告》首次将“算电协同”列为新基建工程。同年4月，《关于促进人工智能与能源双向赋能的行动方案》明确提出统筹能源资源配置与算力设施建设。6月发改委和能源局联合印发《新型能源体系建设“十五五”规划》，提出“加强算电协同发展，统筹能源资源配置与算力设施建设”。多份顶层文件在密集部署，算电协同上升为国家顶层战略，进入系统性推进的新阶段。

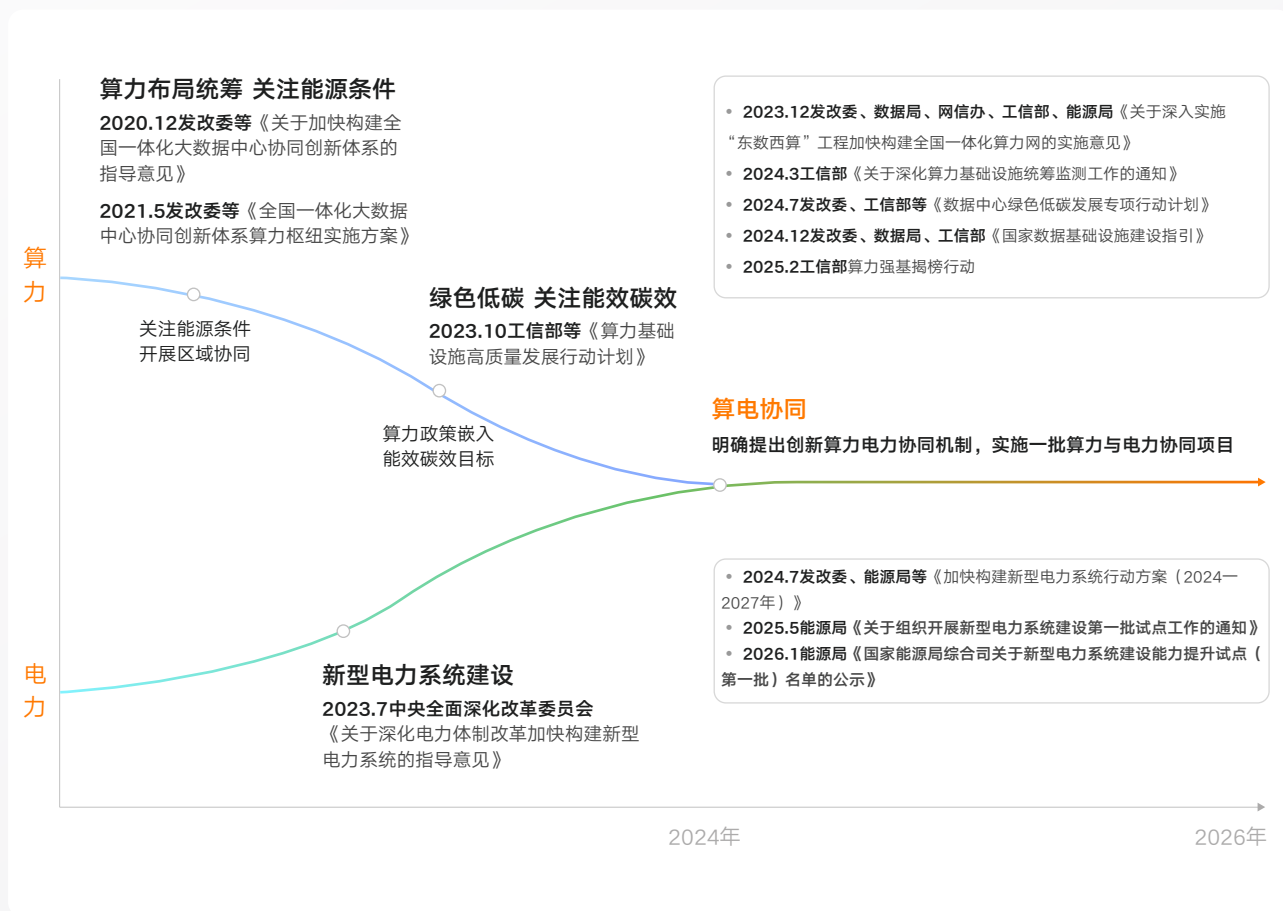


图1：算电协同政策梳理

1.2 AI重塑算力与电力运营新逻辑

AI时代算力中心的电力系统面临高容量用电与绿电约束双重挑战

随着 AI 芯片功耗持续攀升，单机柜功率密度从传统的 8-10kW 跃升至 50kW 以上，部分超算中心甚至超过 200kW。据估算，单座万卡级智算中心年用电量可达数亿千瓦时，逼近一座中小型城镇的生活用电规模。一方面，现有配电架构在大功率场景下的容量上限已无法满足高密度算力集群的刚性配电需求，同时也难以平抑智算负荷的瞬时大幅波动，亟需通过园区级微电网实现源网荷储协同调控。另一方面，国家对绿色用能的要求逐步趋严，要求枢纽节点新建算力中心绿电占比超过 80%。算力中心的电力供给结构面临清洁化变革，更好适配绿电高占比的建设要求。

就近配套新能源与储能设施成为超大规模AIDC兼顾效率与低碳的优化路径

全球算力飙升正将电力推向“临界点”，2025 年我国算力中心用电量为 1960 亿千瓦时，同比增长 300 亿千瓦时，增速为 18.1%，而同期全社会用电量增速仅 5.0%¹。算力与电力的关系被重新审视，形成“算随电走”与“电随算走”互动的新范式。“算随电走”，即以可调算力作为电力调节资源，绿电富余时提升算力负荷，电力紧缺时柔性调控算力，推动系统由源随荷动转向荷随源动。“电随算走”，即就近部署分布式光伏、分散式风电及配套储能设施的条件，能够以微电网形式实现新能源的就近高效消纳与灵活调节。AI 时代，算力与电力的运营逻辑也在重塑，从被动响应走向主动协同，共同构建安全高效、绿色低碳的新型能源体系与算力基础设施协同发展的新格局。

1.3 算电协同面临多重结构性矛盾

资源富集区“有电难送”、负荷中心“有需难绿”，绿电保供压力持续加大

我国能源与算力产业布局呈现区域分化特征。西北、西南地区新能源资源富集、开发潜力大，但电网对于电能质量的要求较高，难以吸纳大规模绿电接入。算力热点地区如京津冀、长三角、粤港澳等地用电需求爆发式增长，但本土绿电资源有限，难以满足新建大规模算力中心对于绿电的需求，跨区输电通道扩容速度难以匹配算力负荷增长节奏。空间维度的源荷逆向分布，亟待供给模式的范式转变——从依赖远距离大电网输送，转向依托微电网构建“源网荷储”局域自治系统，以多点微电网协同实现绿电的就地转化与算力的就近消纳，从空间解耦走向空间耦合，为算电深度融合筑牢底层物理架构。

算电双向耦合面临“源难随荷、荷难随源、柔性难释”三重结构性矛盾

一方面，算电双向扰动导致安全稳定运行挑战加剧。AI 算力负荷瞬时启停、功率陡变、波动无规律等特性，在电网局部节点上极易耦合放大，引发电能质量问题如电压闪变、频率扰动及谐波超标等。同时新能源出力也具有不可预测性，随着绿色能源应用比例提高，绿电出力波动难以保证算力中心的安全稳定运行。另一方面，电网亟需规模化柔性负荷资源，对冲新能源发电波动、实现源荷动态平衡；而 AI 算力负荷本身具备天然柔性潜力，非实时训练、离线批处理、数据备份等任务可错峰、可迁移、可延时调节。但在实际运行中，核心 AI 训练、在线推理等业务对连续性、低时延要求高，算力负荷“理论有柔性、实际不可调”，有效可调负荷空间有限。需要配备储能进行柔性调节，形成“荷随源动”的协同响应机制，促进算电深度融合。

1 来源：2025 年全社会用电量同比增长 5.0%——国家能源局

1.4 算力爆发催生电力发展新命题

算力需求的爆发式增长

正将电力保障从传统的保量供应 推向算电协同的新阶段

中国信通院预测，到 2030 年我国算力中心用电量预计在 5000 亿千瓦时左右，若人工智能爆发增长，或将超过 7000 亿千瓦时，占全社会用电量约 3.7%—5.3%。这不仅是电力负荷的数字叠加，更对供电质量、调节能力和系统效率提出了多维挑战。在此背景下，如何构建与人工智能发展深度适配的能源保障体系，已成为电力发展的核心命题。其关键路径在于，推动能源资源配置方式从被动响应向主动适配转变——既要通过源网荷储协同规划提升供电可靠性，满足算力负荷高密度、不间断的运行需求；也要依托电力市场机制和数字化调控手段，引导算力负荷灵活参与电网互动，提升绿电消纳水平和整体能效，实现算力增长与低碳转型的协同共进。

AIDC微电网

为连接算力负荷与绿色电力 提供全新的解决方式

AIDC 微电网有机集成新能源、电网、负荷、储能等环节，形成深度耦合的能源生态单元。在运行层面，AIDC 微电网通过储能与动态补偿装置平抑电网扰动，将供电可靠性提升至更高标准，同时利用峰谷电价和绿电出力曲线优化充放电策略，有效降低用能成本；在协同层面，其内置的能源管理大脑可联合优化算力任务调度与储能调节、绿电消纳，实现“算力—电力—碳排”的在线寻优。更深远地看，这一模式使 AIDC 从被动的用电负荷转变为具备主动支撑能力的柔性调节单元，为探索算电协同发展提供了可落地的实践路径。

02

AIDC微电网概述



AIDC微电网是以“源-网-荷-储”四维深度协同为核心理念的算能融合型电力系统

AIDC 微电网以电力电子变换与智能能量管理为技术底座，采用发电、配电、算力负荷、储能深度协同理念，具备自主调控能力的发配用一体化电力拓扑。传统“电网 + 柴油 + UPS”的架构在效率、动态响应、容量弹性与碳排优化方面已逐渐难以满足 AIDC 发展需求，亟需一套全新的架构实现风光出力、储能充放与算力负荷的多时间尺度匹配。**AIDC 微电网融合“1+3+3”技术体系，通过矩阵架构实现源网荷储一体化融合，提供并网型、离网型、增强型微电网三大场景化供电能力，并围绕稳定、经济、运维三大协同路径，共同构建高效率、高可靠的供电体系。**

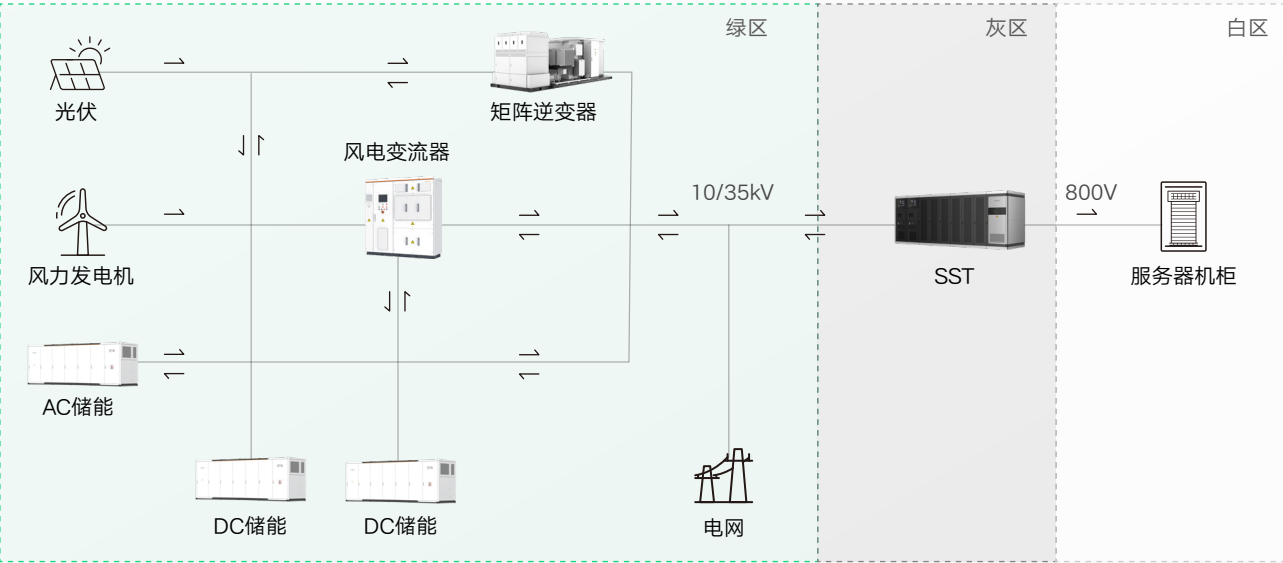


图2：AIDC算电协同微电网架构拓扑图

2.1 矩阵架构

AIDC微电网架构中，按照能源属性与负荷功能划分为绿区、灰区与白区三个核心区域

其中，绿区代表绿色能源供给区域，主要包括光伏、风电、储能等新能源设施，通过矩阵架构为算力中心提供高比例绿电供应与灵活能源调节能力；灰区代表非 IT 基础设施区域，主要包括固态变压器（后文简称为 SST），不间断电源 UPS 等，承担能源转换、供配电调节与运行保障功能；白区代表 IT 核心负载区域，主要包括服务器机柜、存储设备及 GPU 算力集群，是 AIDC 业务运行的核心载体。

矩阵架构通过光伏与储能的原生融合，实现从“设备协同”向“系统协同”的转变

面对算力中心超高功率密度，高供电稳定性需求，该架构突破传统光伏、储能独立建设与调度模式，在物理结构、能量流动和控制逻辑三个维度实现深度融合：通过集成光伏逆变器、储能变流器、构网控制能力，构建源网荷储一体化架构；通过多路径能量流动与动态切换能力，提升新能源消纳与供电灵活性；通过自感知、自调节、自平衡控制，实现微电网运行状态的实时优化。相较传统光伏 + 储能外部耦合模式，矩阵架构减少光伏发电后的交直流转换环节，提升系统全链路效率 5% 以上。同时，依托模块化矩阵设计，支撑 AIDC 业务规模增长下的弹性扩容，提升绿电利用效率、供电可靠性与能源自治能力，为高密度算力负荷提供更加高效、灵活、稳定的能源支撑。

2.2 三类场景全域覆盖

由于不同算力基础设施周围的电网情况、可再生能源资源与政策环境差异显著，单一微电网架构难以适配全场景需求。针对电网配额约束区、离网 / 延迟互联区、弱电网区三类典型落地场景，衍生出三类差异化的微电网解决方案，实现算力需求与电力系统的精准匹配。

1 电网配额约束区：并网型微电网

并网型微电网解决方案，采用“大电网为支撑、风光绿电为主体、储能为调节枢纽、柴发为备用、算力负荷为柔性资源”的架构

通过智能化平台实现源、网、荷、储全要素协同调度。同时，保留并网点的常态化并网运行模式，并依托负荷零感知的并离网无缝切换技术，保障算力中心用电稳定可靠。以我国华北北部为例，所处地带风光资源丰富，绿电政策扶持力度大，但电网增容配额严重受限或审批周期长，从大电网获取的电网容量往往仅能满足 AIDC 基础或首期需求，无法支撑算力集群的快速弹性扩容。

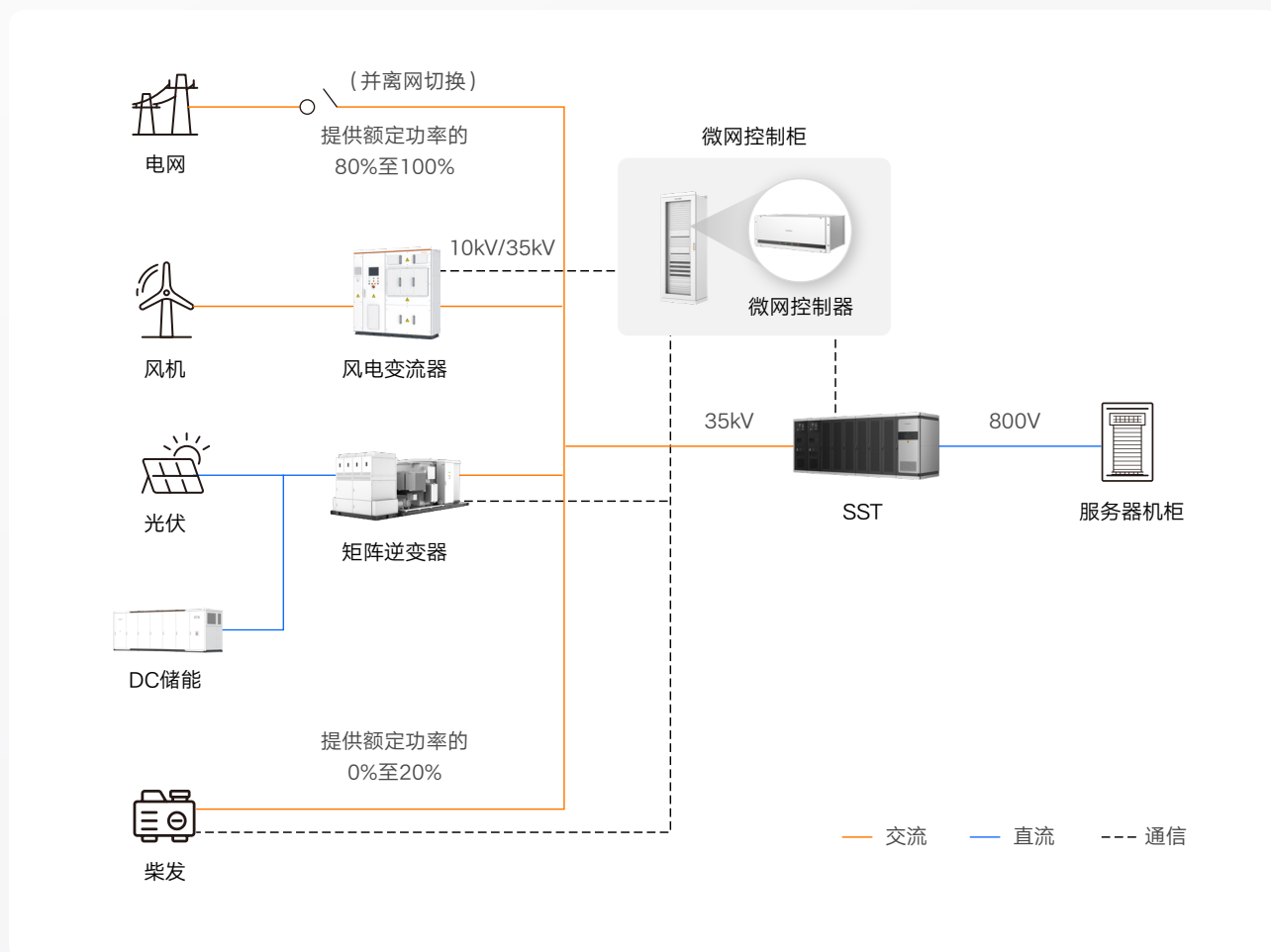


图3： 并网型微电网解决方案拓扑图

2 离网/延迟互联区：离网型微电网

离网型微电网架构采用“风光主供+柴发与备用电源兜底”

不依赖大电网独立运行，通过构网型储能建立系统电压与频率基准，结合算力分级负荷管控，实现独立电力系统的安全稳定与经济运行。以我国西北部为代表的区域，风光资源丰富，大电网覆盖薄弱或空白，电网建设周期通常长达 1~3 年，无法匹配快速部署的算力节奏。传统柴油发电机供电模式存在运行成本高、碳排放量大、供电稳定性不足等问题，难以支撑 AI 训练、数据存储等 7×24 小时连续运行的算力业务。

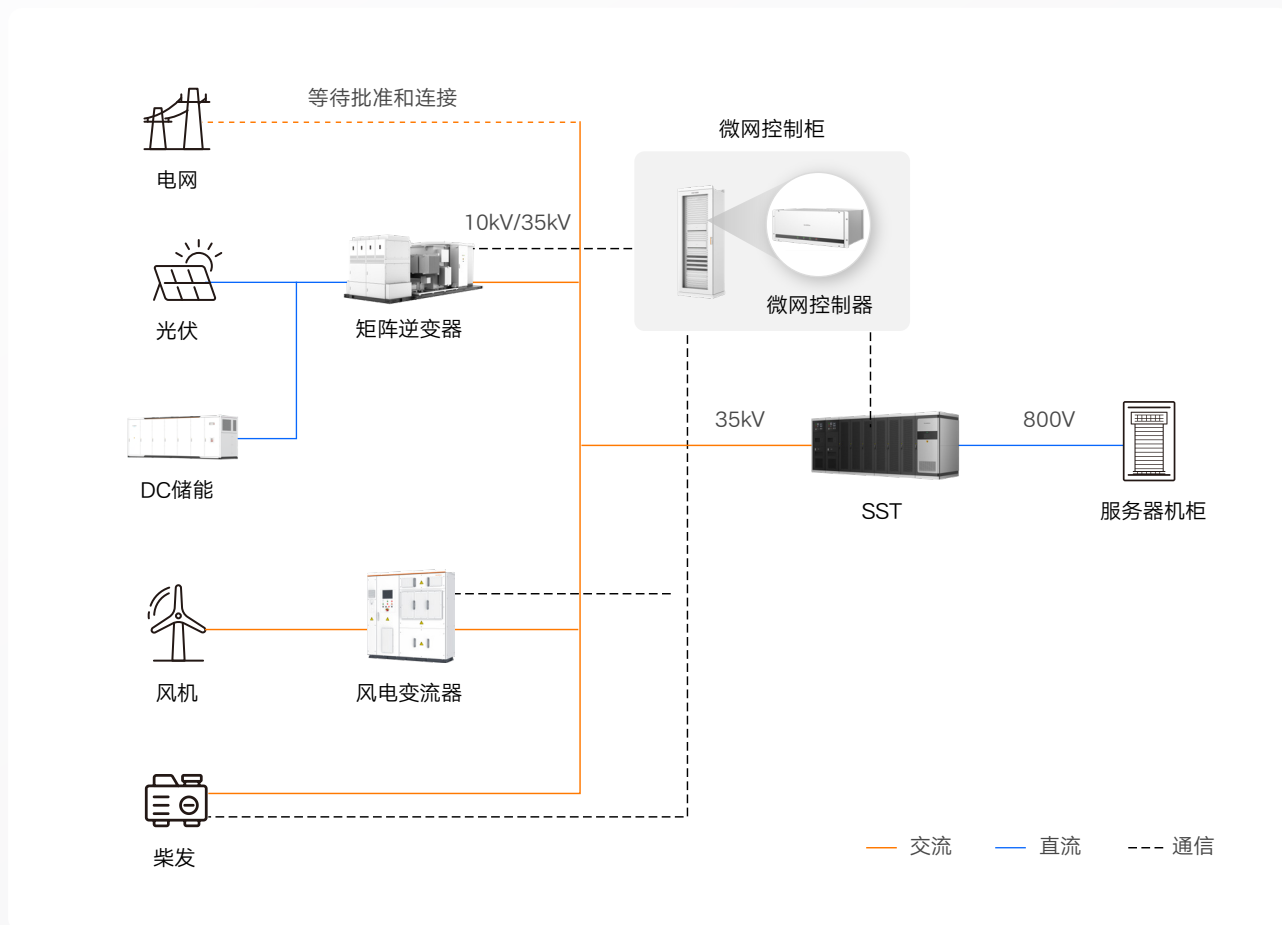


图4：离网型微电网解决方案拓扑图

3 弱电网区：增强型微电网

增强型微电网架构采用“电网主供+大容量储能缓冲+算力柔性调控”

依托大容量混合储能系统“电力缓冲器 + 电网支撑器”的双重功能，搭配算力负荷的柔性调节能力，可在不改造现有电网的前提下，提升算力承载水平。这一架构精准覆盖城市边缘、县域工业园区末端及老旧电网片区，解决这类区域因电网短路容量有限、电压与频率稳定性偏弱，无法承载大规模 AI 算力集群接入与扩容的核心痛点。

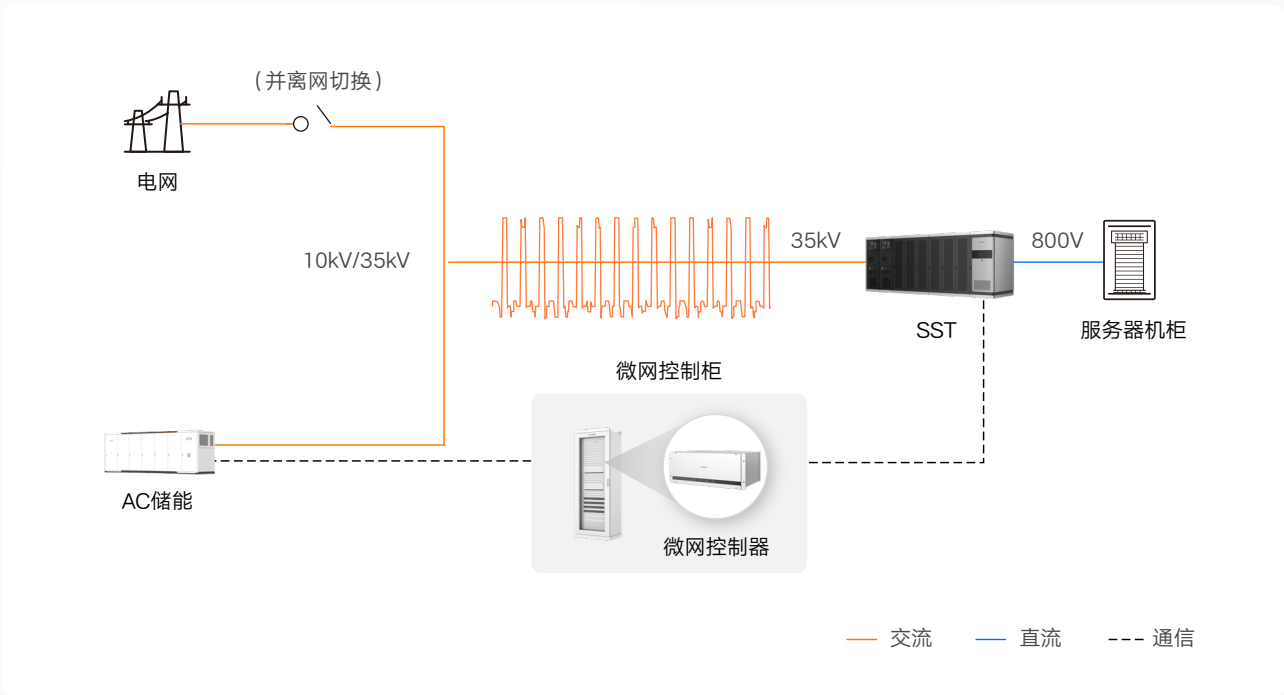


图5：增强型微电网解决方案拓扑图

03

AIDC微电网三大协同路径



3.1 稳定性协同：筑牢AIDC用电可靠防线

稳定性协同通过电源侧、负荷侧、储能侧与控制系统的协同互动，构建具备主动感知、快速响应、故障自愈和持续供电能力的新型能源保障体系，实现从“被动保障供电”向“主动提升供电韧性”的转变。按照电力扰动发生的影响程度，可划分为三类典型场景，分别对应不同关键技术。

场景类型	具体表现	关键技术
日常运行波动	AI 算力负载快速变化、电能质量波动	IT 高频波动负荷功率分频控制、优化电能质量
电网故障情况	电网电压跌落、频率扰动，供电品质持续失准，影响IT 设备稳定运行	故障穿越，并离网切换
极端失电情况	公共电网完全失压，微电网内部频率电压异常失控	自动故障解列、黑启动

表1：AIDC稳定性三类场景及技术对策

1 日常运行波动

在日常运行场景，由于 AI 训练任务批次启停、推理业务潮汐效应、服务器集群动态调度等因素而引发功率波动与电能质量扰动，虽然通常不会直接导致供电中断，但长期存在会造成变压器、UPS 等设备运行效率下降，电能质量指标恶化等问题。

• IT高频波动负荷功率分频控制

AIDC 的 GPU 集群、高速服务器等 IT 设备,存在毫秒级至小时级的多频率叠加波动特性,传统“全频段统一兜底”方案,易导致 UPS 电池循环次数远超设计值,寿命缩短 30% 以上。同时,高频波动一方面会导致配电设备受冲击影响故障率上升,另一方面，由于无法通过市电侧有效响应，会进一步加剧电能质量问题。

针对 AIDC 算力中心 IT 负荷高频波动、随机扰动频繁的问题，采用基于频域分析的功率分频控制技术，对原始负荷功率进行频谱分解，根据不同频率波动特征划分低频、中频、高频功率分量。其中，低频功率由电池储能及常规电源承担，实现长期能量调节；中频波动由电池储能快速响应进行平抑；高频瞬态冲击由超级电容快速吸收，实现毫秒级功率补偿。通过多类型储能资源协同控制，实现“不同频段、不同资源、精准匹配”的动态调节。

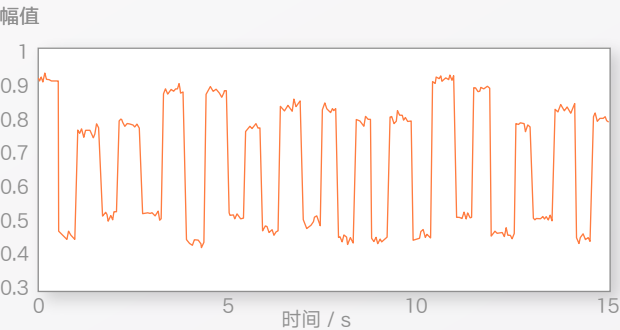


图6：原始负荷时域波动
IT负荷存在大量快速、剧烈的瞬态波动，对电网稳定运行带来冲击

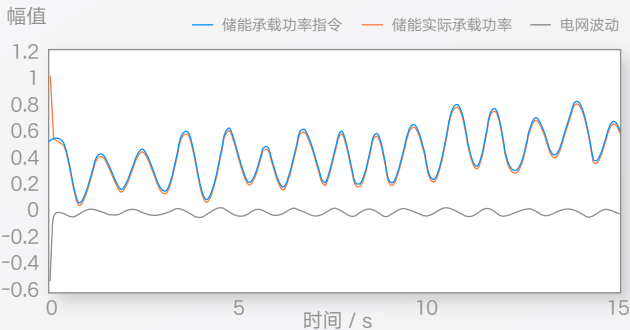


图7：分频控制后的电网侧功率
通过电池储能与超级电容的高低频协同补偿，有效削弱负荷波动，使输出至电网侧的功率曲线实现平滑稳定

功率类型	响应资源	实现效果
高频分量	超级电容 / 快速响应储能单元	毫秒级吞吐功率，平抑 GPU 动态功耗带来的尖峰毛刺
中频分量	电化学储能	任务切换、集群调度秒级响应
低频分量	电化学储能及常规电源	匹配业务潮汐等慢变量功率需求

表2：不同功率类型下效果实现对比

面向 AIDC 高动态负荷接入场景，SST 配合电化学储能，依托直流侧能量缓冲和多时间尺度功率协调能力，将高频、快速变化的负荷扰动优先消纳于站内，向上级电网呈现更平滑、更具可预测性的净负荷特性。在不改变既定供电可靠性与业务负荷需求的前提下，可有效抑制功率尖峰与快速爬坡对电网侧的冲击，为大规模 AIDC 负荷的柔性、友好接入提供技术支撑。

• 优化电能质量

AIDC 内部密集的 UPS 整流器、服务器开关电源、变频驱动装置产生大量谐波、无功冲击和相间不平衡。AI 服务器对电能质量敏感度远高于传统 IT 设备，极易导致训练任务中断。同时，谐波会增加电源损耗，加速硬件老化，甚至触发保护停机。传统算力中心仅在进线侧配置无源滤波装置，无法覆盖末端负载的精细化需求。由于电能质量问题导致的算力中断、设备损坏，单次损失可达数十万至数百万元。

优化电能质量技术，通过构建“全网协同、分级治理”的全链路电能质量优化体系，实现与 AIDC 供电架构的深度融合。该技术采用集中治理方案，在并网点配置有源电力滤波器（APF）+ 静止无功发生器（SVG）的情况下，集中治理谐波、补偿无功，抑制电网侧电压暂降 / 暂升的传导。同时，通过母线级动态支撑，复用微电网储能变流器（PCS）的电能质量治理功能，平抑母线电压波动，补偿三相不平衡。负载方面，联动 AIDC 机柜级供电单元，对敏感算力集群进行精细化电压补偿，通过负载调度优化三相负载均衡度。最后，利用微电网能源管理系统（EMS）实时监测全网电能质量数据，动态调整各治理单元输出，实现从电网到负载的全链路管控。相较于传统无源滤波方案，该技术在频率稳定性、电压控制精度与谐波治理效果上实现全面提升，助力 AI 集群长期稳定运行。

2 电网故障情况

在实际运行过程中，电网面临电压暂降、频率波动、短路故障以及区域性失电等多类扰动，传统供电架构在应对快速变化和极端工况时存在响应能力不足的问题，容易引发算力业务波动甚至中断。因此，需要构建具备高抗扰、高自愈能力的算电协同微电网体系，提升故障状态下的供电可靠性。

• 故障穿越技术

高密度 GPU 集群和服务器系统对电源连续性要求极高，即使故障时间较短，也可能导致 IT 设备重启、算力任务中断、数据计算失败等问题，造成经济损失。

全场景故障穿越能力可实现电网故障下算力零中断。正负序电压穿越控制结合增量式虚拟阻抗技术，实现 PCS 与继保系统的智能协同。短路瞬间，PCS 实时启动负序电压控制并叠加虚拟阻抗，动态匹配不同短路工况。切除短路故障后，降低虚拟阻抗，快速恢复电压至额定值。

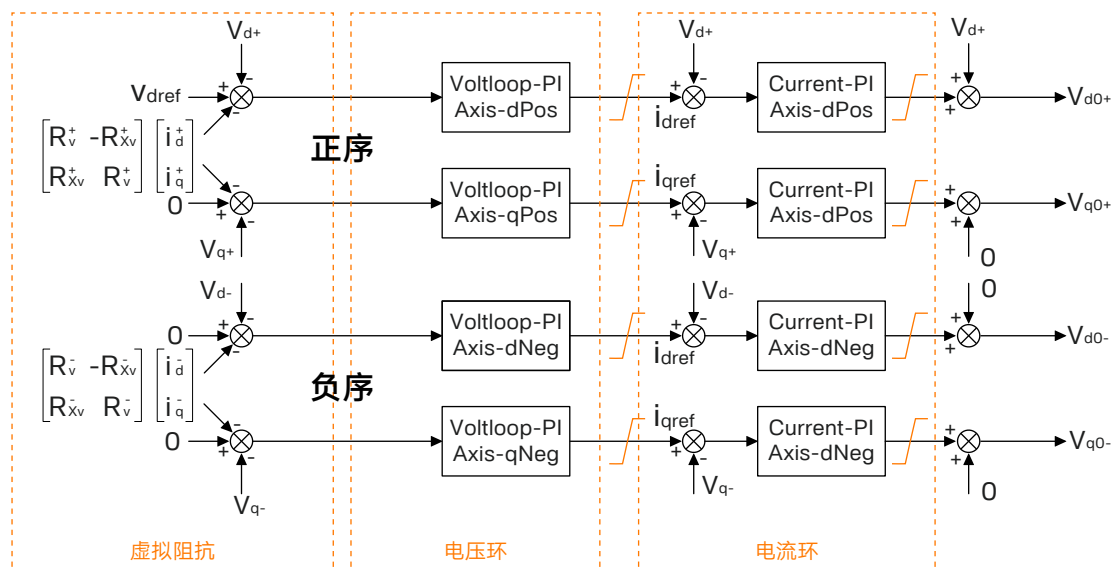


图8：故障穿越控制框图

故障穿越技术在并网场景下，支持连续 6 次穿越。离网场景下，稳定输出最大 3 倍短路电流持续 2 秒，显著提升 AIDC 对电网短时扰动的耐受能力，减少非计划算力中断，提升云服务连续性。

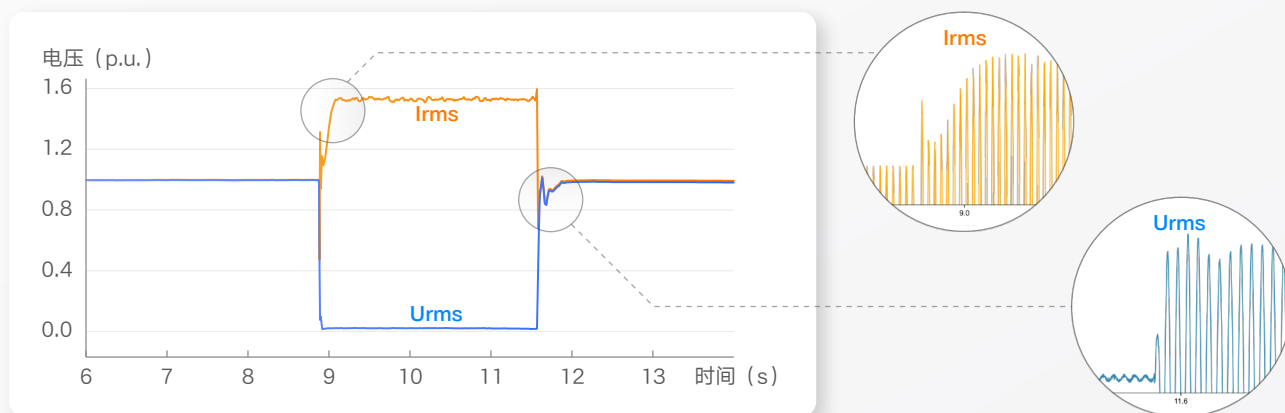


图9：BESS短路电流支持故障穿越

• 并离网无缝切换

当外部电网发生瞬时电压跌落、短时中断或持续故障时，AIDC 微电网需要由并网运行平稳过渡至孤网运行；当外部电网恢复并满足并网条件后，再完成同步并网与运行方式恢复。

通过微电网能源管理系统（EMS）协调储能、光伏、SST 及备用电源，实现电网异常情况下的快速离网、稳定供电及故障恢复后的有序并网。同时，避免 UPS 长时间深度放电或供电恢复不及时导致的低电量保护，提升 AIDC 在复杂电网扰动下的持续供电能力。

针对计划性并转离、计划性离转并及非计划性并转离三类场景实现精准控制。

计划性并转离时，EMS 主动调节储能功率，降低并网点交互功率后完成平稳过渡；计划性离转并时，EMS 协同调节电压、频率及相角，满足同期条件后快速合闸，避免并网冲击；非计划性并转离时，构网储能无延时快速响应电网异常，支撑关键 IT 负荷持续运行，实现 AIDC 核心算力不断供。

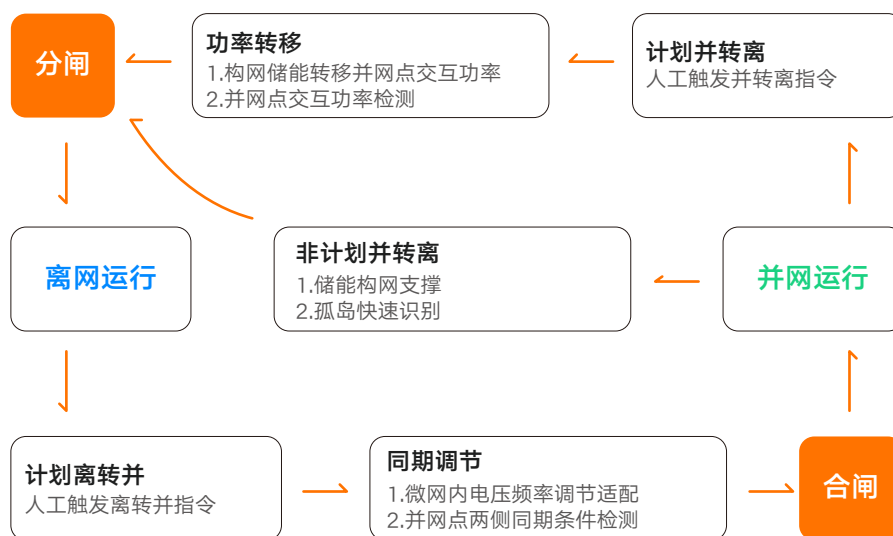


图10：并离网无缝切换技术方案流程图

计划性离网无缝转并网过程中，通过精准同步电压、频率与相位，降低并网瞬间冲击，保障设备安全稳定运行。

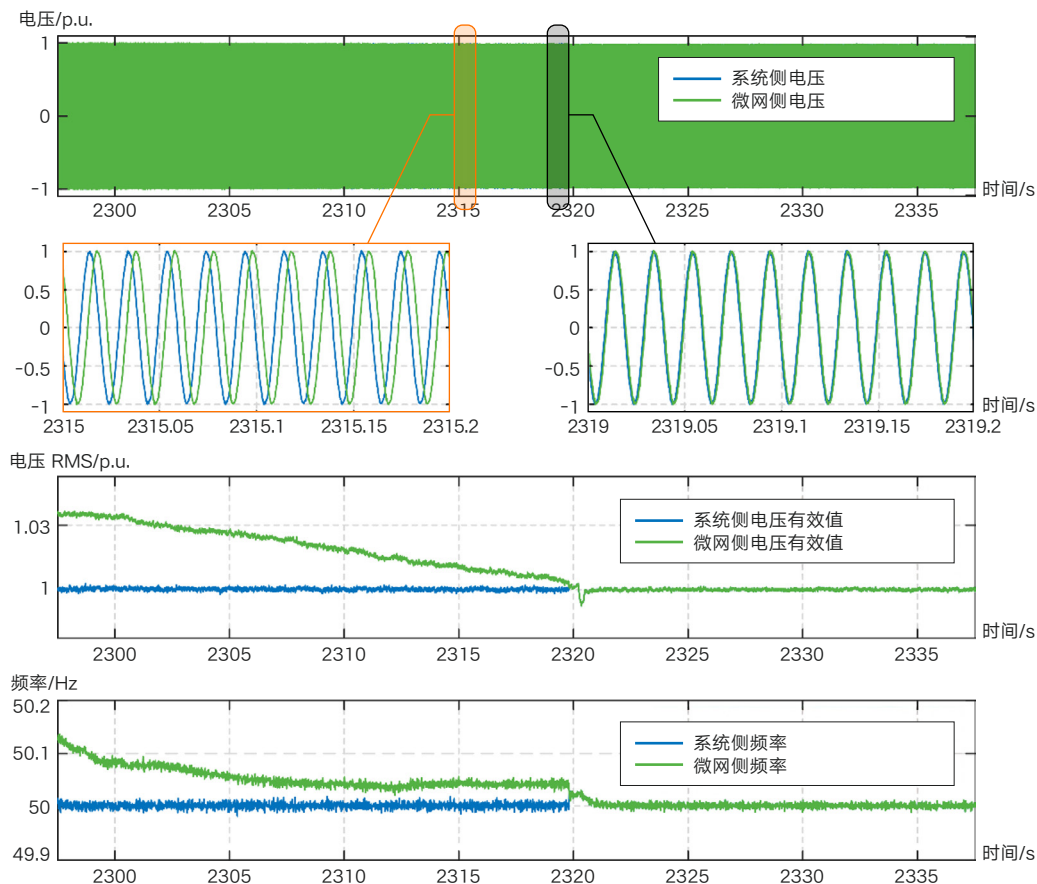


图11：离网无缝转并网（计划）波形图

在突发电网扰动或停电场景下，依托构网型储能无延时响应，实现并离网切换时间 $\leq 20\text{ms}$ ，避免关键算力负荷因供电中断导致业务中断。该技术有效提升 AIDC 能源系统对电网波动的适应能力，构建“电网支撑、微电网自愈、算力无感”的高可靠供电体系，保障算力中心 7×24 小时稳定运行。

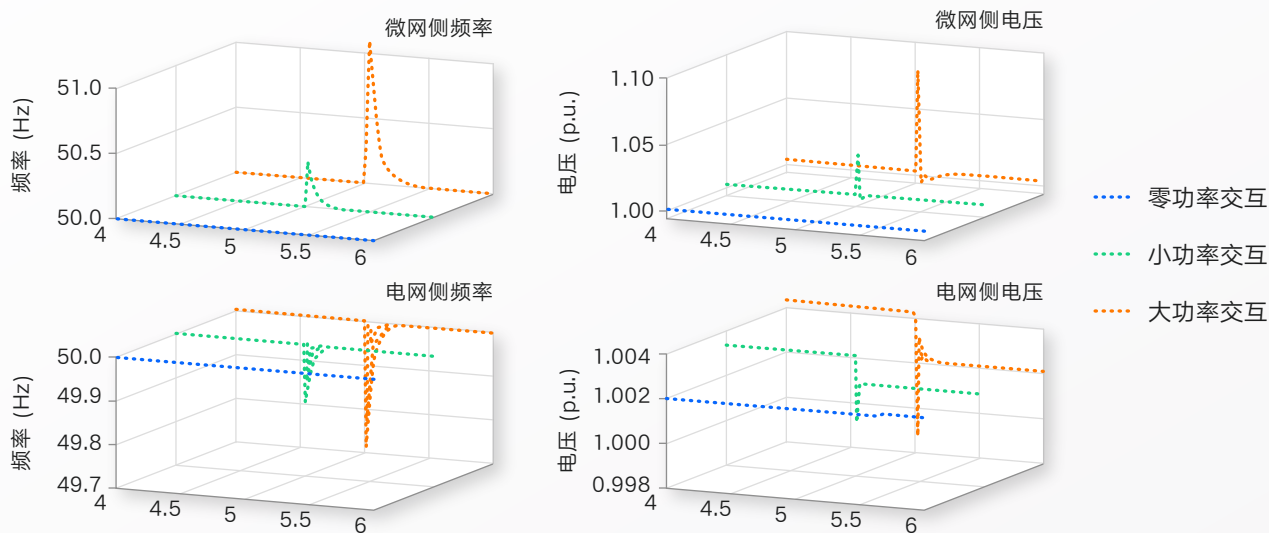


图12：并网无缝转离网（非计划）频率电压图

3 极端失电情况

AI 大模型训练与推理业务的快速发展，使 AIDC 逐渐成为承载数字经济运行的关键基础设施。然而，极端天气、区域电网故障等突发事件可能发生瞬时性或永久性故障，进而造成任务中断与资源损失。在此情况下，AIDC 微电网不仅需要具备维持供电的能力，还需要具备主动识别风险、隔离故障以及保护关键负荷的能力。

• 自动故障解列

传统电力系统主要依靠固定保护逻辑进行故障切除，但在 AIDC 算电协同微电网场景下，能源资源、负荷特性以及运行模式均具有更强动态性，传统保护方式难以满足复杂运行条件下的快速决策需求。

自动故障解列采用“基本轮 + 特殊轮”双层协同架构，适配 AIDC 高可靠供电需求。基本轮基于频率、电压及功率缺额等运行状态，采用多级阶梯式减载策略，根据负荷优先级逐级切除非关键负荷，避免过度解列。同时，通过差异化负荷保护机制，保障 AI 算力、监控、通信等核心负荷具备最高生存优先级，最大限度维持算力中心业务连续运行。**特殊轮**面向新能源波动、过剩出力及设备过载等复杂工况，配置高频 / 过压轮与过载轮控制策略。高频 / 过压轮通过快速调节新能源出力，防止频率、电压越限；过载轮基于设备热累积状态提前识别风险，主动解列过流支路，避免故障扩大。同时，通过双层协同解列机制，实现微电网故障从被动保护向主动防御转变，提升 AIDC 供电系统韧性与安全水平。

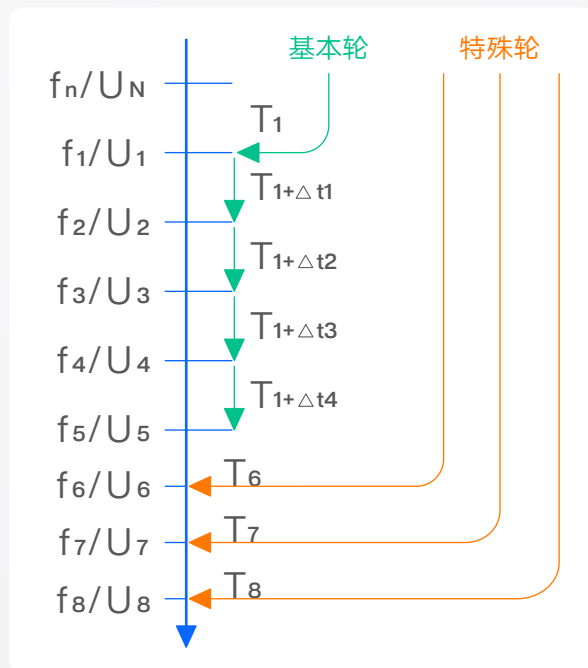


图13：自动故障解列技术方案设计图

自动故障解列与多层保护控制策略协同，构建 AIDC 微电网无盲区立体防护体系，提升弱网及极端扰动场景下的运行韧性。通过快速识别故障区域并执行精准隔离，实现秒级故障解列，避免故障扩散影响核心算力负荷，保障 AI 训练、云计算等关键业务持续稳定运行，核心负荷供电保障率达到 99.9%。

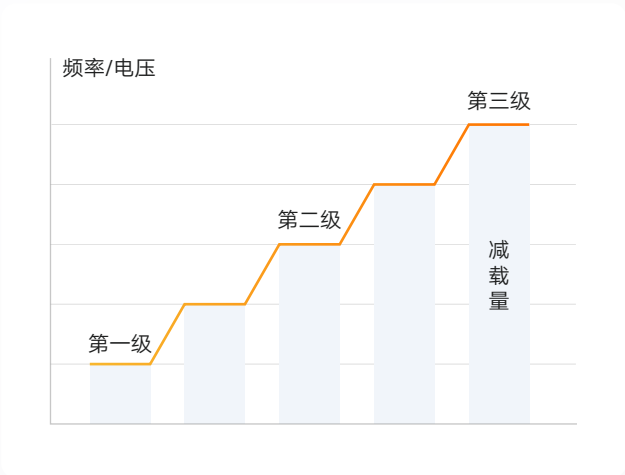


图14：基本轮：避免单次过调，频率恢复平滑

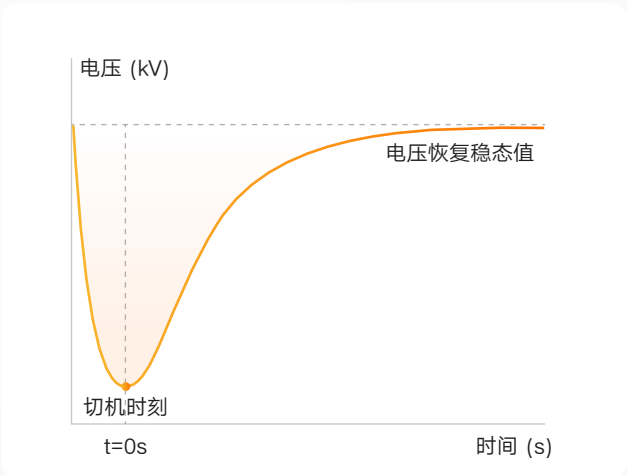


图15：特殊轮：极端情况，触发式切除维稳

• 黑启动

当 AIDC 陷入失电状态，传统算力中心黑启动完全依赖柴发和燃气轮机，启动时间长，且需按层级逐步恢复，过程中易出现负载冲击导致启动失败，AI 训练数据可能丢失，造成巨额损失。

黑启动协同控制体系实现能源侧与算力侧的快速恢复与稳定运行。通过发波与相位双同步技术，快速建立稳定电网电压，实现多电源、多储能设备间的精准同步，提升微电网自主建网能力，为 AI 服务器、液冷系统等关键算力基础设施提供快速供电恢复。同时，结合动态下垂控制技术，实时感知新能源、储能及算力负荷变化，根据 IT 负载功率波动动态优化功率分配，避免单设备过载。

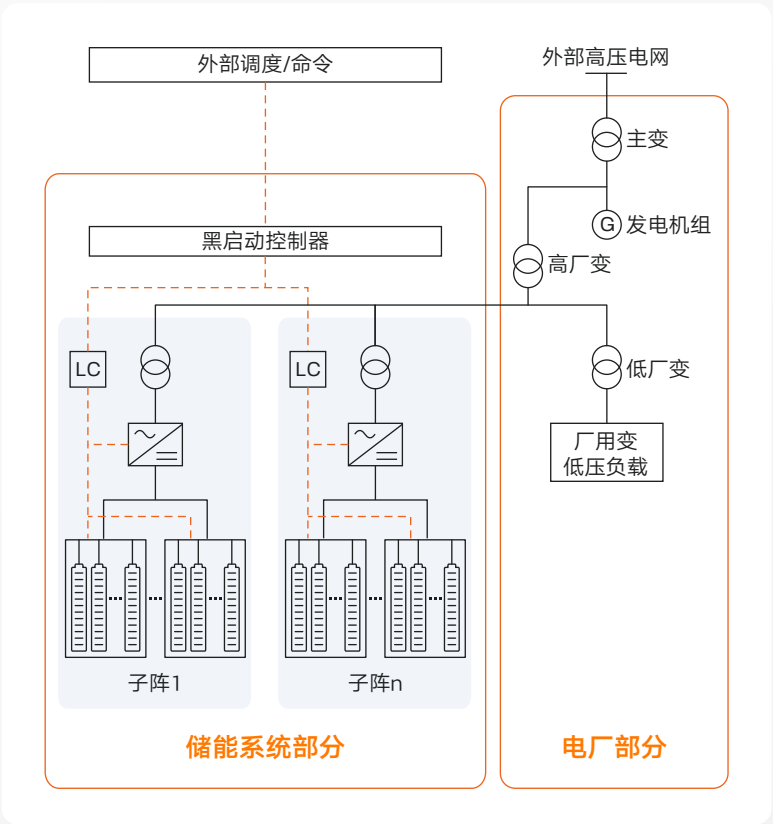


图16：大规模黑启动方案拓扑图

黑启动可支撑算力中心在电网极端故障场景下实现 GW 级分钟内自主建网与关键算力负荷恢复。通过源网荷储协同控制，实现电压稳态波动 $\leq 5\%$ 、设备间不平衡电流 $\leq 5\%$ 、百 MW 级黑启动带载率 $\geq 95\%$ ，实现从能源恢复到算力恢复的平滑过渡，保障 AIDC 业务连续运行。

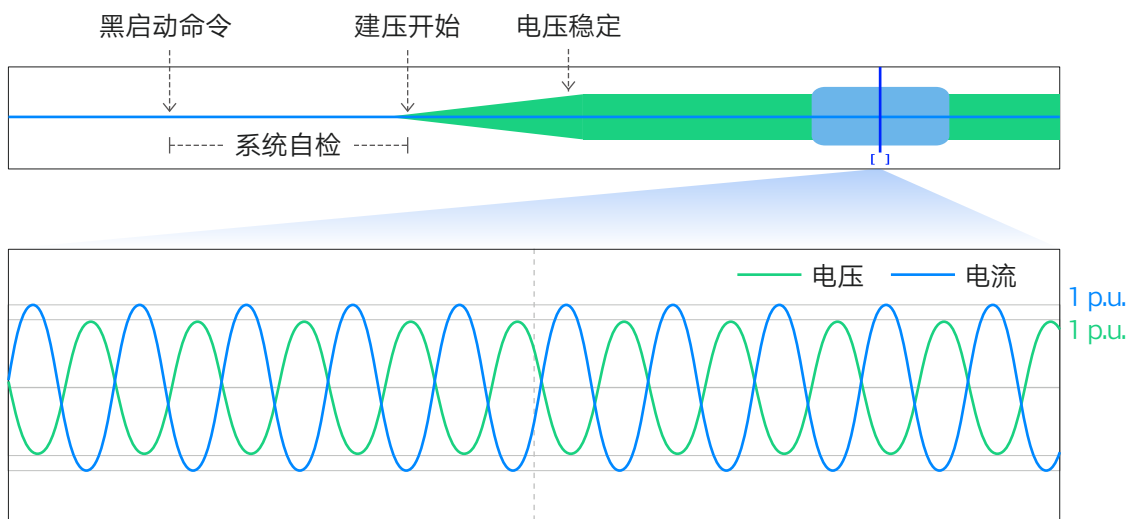


图 17：大规模黑启动效果波形图

3.2 经济性协同：最大化全生命周期价值

经济性协同以 AIDC 微电网全生命周期价值最大化为目标，通过能源系统与算力系统的深度融合，实现从规划建设、运行调度到碳资产管理的全过程优化。围绕“科学规划、智能调度、低碳运营”三个阶段，构建覆盖场站设计、能源优化、碳管理的一体化价值提升体系。

1 科学规划

科学场站规划是 AIDC 实现经济高效运行的前提。与传统电力设施固定容量设计的能源架构不同，AIDC 场景下的科学场站规划，以算力全生命周期的弹性电力需求为中心，精准匹配电源侧、电网侧、负荷侧的技术条件，实现资源适配、扩容弹性、快速投运三大目标。

• 智能电站设计

AIDC 微电网对规划精度的要求，在计算量、仿真复杂度方面，远高于传统工商业光伏电站、小型微电网项目。

智能电站设计需要同时考虑本地新能源资源条件、算力负荷特性、现有电网接入条件等因素，可基于全年 8760 小时全时序高精度仿真模型，深度解析 AI 算力负荷的高增长、高波动特征以及新能源出力的不确定性，构建源网荷储协同优化设计能力。通过负荷分级管理、算力负荷柔性调控策略与储能配置优化算法，在海量系统配置方案中实现快速寻优。

同时，支持从“高可靠供电”、“经济高效运行”、“绿色低碳发展”等多目标维度进行微电网规划设计。智能电站设计平台提供全景化功率仿真与运行策略验证能力，动态评估不同方案下的供电可靠性、能源利用效率及投资收益边界，为算力中心能源架构建设提供科学决策依据，并支持典型 AIDC 项目的快速复用与方案迭代。智能电站快速设计模式下，最快 5 分钟即可实现设计报告生成。相比传统 8 小时设计周期，效率提升 99%。通过数字化设计与智能优化算法融合，实现 AIDC 算力协同微电网从经验设计向智能寻优的转变，精准匹配算力负荷增长趋势与能源供给能力，降低系统冗余配置与投资成本。

• 绿灰白区协同扩容

传统供电模式下算力中心扩建往往需要同步申请市电容量提升，通过电网侧增容满足新增负荷需求。然而，电网增容常面临审批周期长、建设成本高、碳排放指标受限等核心痛点，已无法匹配 AIDC 快速、低碳、低成本的扩容需求。**绿灰白协同扩容技术通过绿色能源（绿区）、支撑类设备（灰区）以及核心 IT 设备（白区）的协同规划，实现能源系统容量动态匹配。**同时，根据算力业务增长节奏和能源供给情况，该技术采用模块化矩阵扩容方式，实现新能源、电网供电及储能系统的分阶段建设。通过微电网控制策略、新能源规模化供给、电网弹性支撑和储能智能调节，实现多能源之间的灵活切换与协同运行，在保障算力供电可靠性的同时，提高新能源利用比例。同时支持能源系统按业务需求分阶段建设，提高资金利用效率。

• 快速交付

传统数据中心能源系统建设，现场实施周期长、系统集成复杂，难以满足 AIDC 算力快速上线和能源系统同步扩容需求。

快速交付能力有效缩短 AIDC 能源基础设施建设周期，加速算力集群上线与业务部署，实现“算力增长”与“能源供给”的同步推进。“标准化设计、模块化交付、敏捷化调试”的快速交付体系，将核心设备安装、预调试及系统集成工作前置，减少现场复杂工程作业，实现系统到场后的快速部署。在调试阶段，通过“一键整定”与快速调试体系，提升核心设备调试效率 90%。针对 AIDC 场景下大规模光伏、储能资源接入需求，支持光伏子阵级快速离网调试，无需依赖柴发等临时电源及额外接线，相比传统方案节省 30 天以上建设周期。同时，采用开放式生态架构，提供标准化接口与多协议兼容能力，支持第三方电源设备、储能系统及能源管理平台灵活接入，降低现场施工复杂度和系统集成成本，提升微电网扩容灵活性。

2 智能能量调度

智能能量调度是 AIDC 算电协同微电网在运行阶段实现价值最大化的核心中枢。依托 AI 技术、电力市场机制，实现源、网、荷、储的全链路协同联动，将 AIDC 从单纯的电力消耗端，转变为具备灵活调节能力的增值资产端。

• AI优化调度

AIDC 微电网包含新能源、储能、柴发、市电、IT 负载、制冷负载等多类资源，运行目标多元（成本最低、绿电消纳最高、可靠性最强、设备寿命最优等），且新能源出力与 AI 负载均存在强不确定性。传统规则化调度策略僵化，无法适配多变量、强耦合、强随机的运行场景，易出现绿电浪费、峰时用电成本高、储能策略不合理等问题，导致用电成本居高不下，绿电消纳率低，无法实现全局最优。

AI 优化调度以 AI 光风功率预测和 AI 负荷预测为核心输入，通过融合气象数据、新能源运行数据及 AIDC 算力负荷特征，实现未来时段源侧发电能力与负荷侧用能需求的精准预测。该技术采用“站控端训练 + 协控端推理”的分层智能架构，站控端利用元启发式算法生成海量近优调度轨迹，结合强化学习模型训练，实现新能源消纳、储能优化、算力负荷响应及供电可靠性的多目标寻优；协控端由深度强化学习（DRL）模型分钟级滚动输出全局最优调度策略，并通过轻量规则引擎对新能源预测偏差、AI 负载突变等实时扰动进行秒级修正，驱动光储、备用电源与算力负荷实现全要素协同运行，保障 AIDC 业务连续性与能源高效利用。

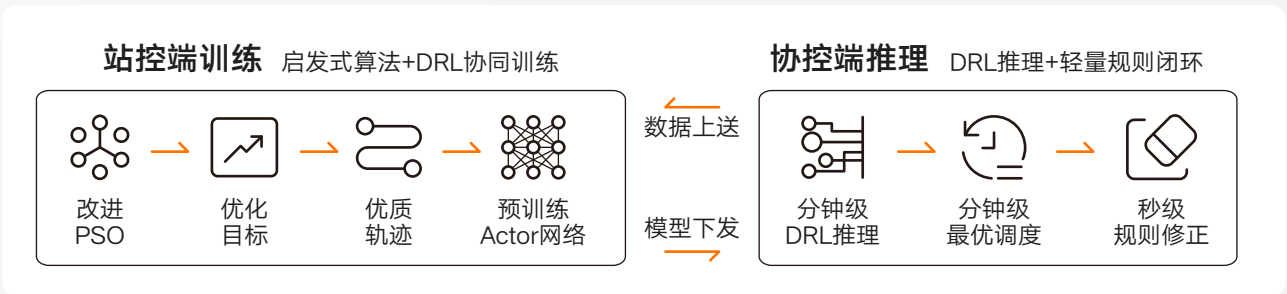


图18：AI智能优化调度算法流程示意图

相较于传统调度方法，该方案可提升 12% 以上综合经济收益，降低储能及备用电源配置成本；同时通过提前感知新能源波动与算力负荷变化，将供电损失概率（LPSP）控制在 0.1% 以下，实现经济性、稳定性与绿色低碳目标的协同提升。

3 智慧碳管理

随着全球碳边境调节机制、国内碳排放双控及资本市场对 ESG（环境、社会与治理）的严苛要求，“碳”已成为影响 AIDC 资产估值、市场准入和客户竞争力的新型要素。传统碳管理模式，主要依赖人工统计、事后填报的粗放式盘查方式，无法支撑绿电交易和碳资产变现的实际需求，导致碳资产的价值无法真正落地。

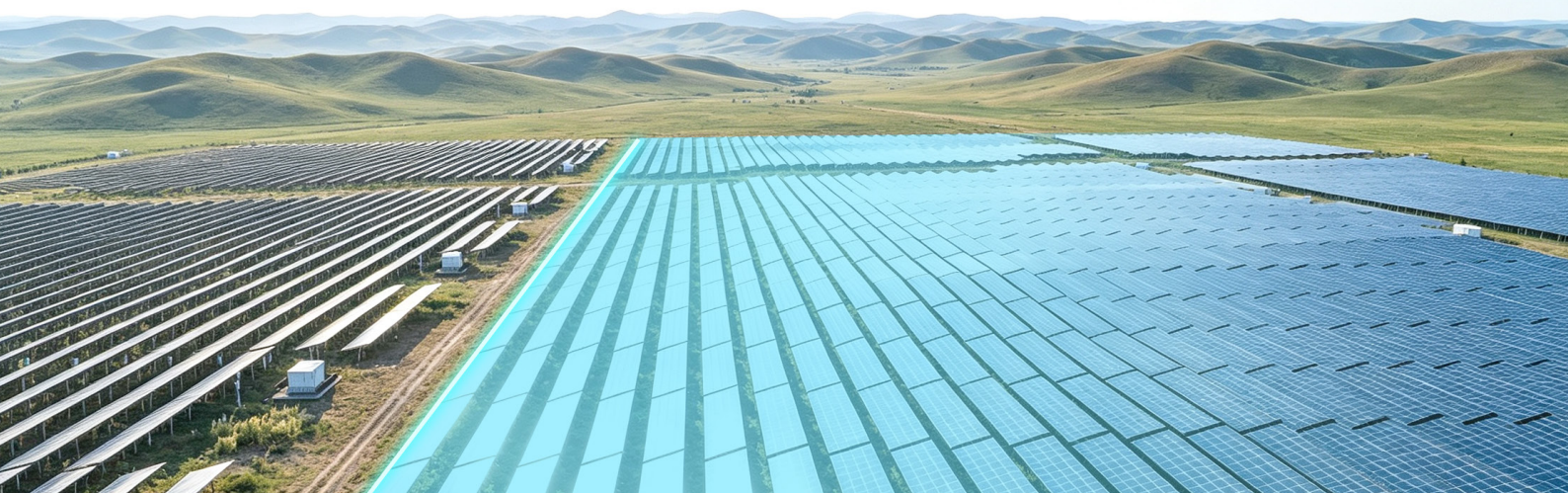
智慧碳管理通过数字化平台实现能源数据采集、碳排放计算、碳资产管理以及绿色运营分析，帮助 AIDC 实现从“节能降碳”向“碳价值运营”升级。智慧碳管理平台面向 AIDC 算电协同微电网场景，构建“碳-能-数”一体化数字协同管控体系，融合碳排放核算数据、光风储发电数据、AI 算力负荷数据及微电网运行数据，实现能源流、数据流与碳流的统一管理。平台基于物联网实时采集电源、电网、储能、负荷等多维运行数据，结合 AI 算法对新能源出力预测、算力负荷变化及能耗特征进行智能分析，优化微电网运行策略，实现源网荷储碳协同调度。同时，通过碳排放实时核算、能效分析与可视化展示，支撑 AIDC 园区碳资产管理、ESG 披露及运营决策。



图19：阳光慧碳iCarbon能碳平台

3.3 运维协同：以预测性维护提升运营效率

运维协同的核心在于将“被动响应”转化为“预测性主动干预”。面对 AIDC 高密部署、风光储多元融合以及算力负载剧烈波动的复杂工况，传统基于固定周期的被动运维模式极易导致非计划停机，进而引发算力服务协议违约的巨大损失。运维协同主要通过“主动运维技术”与“全链路系统性运维”两方面实现。



1 主动运维技术

AIDC 微电网融合了光伏系统、储能系统、SST 等多类型电力设备，设备运行状态直接影响算力中心供电连续性。传统运维方式难以及时发现组件性能衰减、电芯异常、电力电子器件老化等隐性风险，容易导致设备效率下降甚至引发系统故障。

主动运维技术通过高精度数据采集、智能算法分析和设备健康状态评估，实现关键设备运行状态实时监测、异常趋势提前预警和精准维护决策。

• IV诊断

光伏作为算力中心绿电的重要来源，在 AIDC 场景下的配套电站通常占地面积广，组件数量庞大。传统依靠人工巡检或发现异常再排查的方式存在严重滞后性，无法匹配 AIDC 对电力产出可预测性的严苛需求。

IV 诊断技术采用“电气特征诊断 + AI 智能增强 + 系统协同联动”的技术路线，通过采集组串短路电流、开路电压、最大功率点参数及 IV 曲线特征，构建光伏组件电气健康模型，实现遮挡、隐裂、衰减等典型异常精准识别；进一步结合统计分析、DBSCAN 聚类、孤立森林等 AI 算法，动态优化诊断边界，提升复杂气候、不同运行工况下的诊断准确性；同时打通光伏设备、微电网控制系统与运维平台数据链路，将组串健康状态与 AIDC 负荷需求、储能运行策略、绿电消纳目标协同分析，实现从故障发现到运行优化的闭环管理。

相比传统人工排查百 MW 电站耗时 2~3 个月、抽样率仅 3%~5%、单次成本近百万人民币，本技术可在 10 分钟内完成百兆瓦级电站全量扫描，全覆盖 22 种故障类型且准确率超 90%，以全量扫描取代抽样式排查。在 AIDC 场景下，最大化提升新能源发电效率，保障绿电稳定供给，降低运维成本，为高可靠算力能源保障提供支撑。

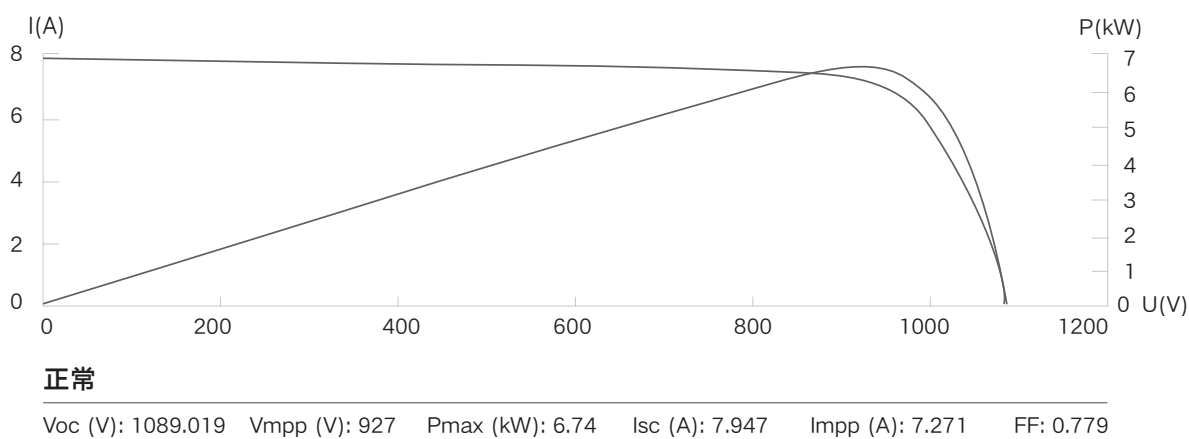
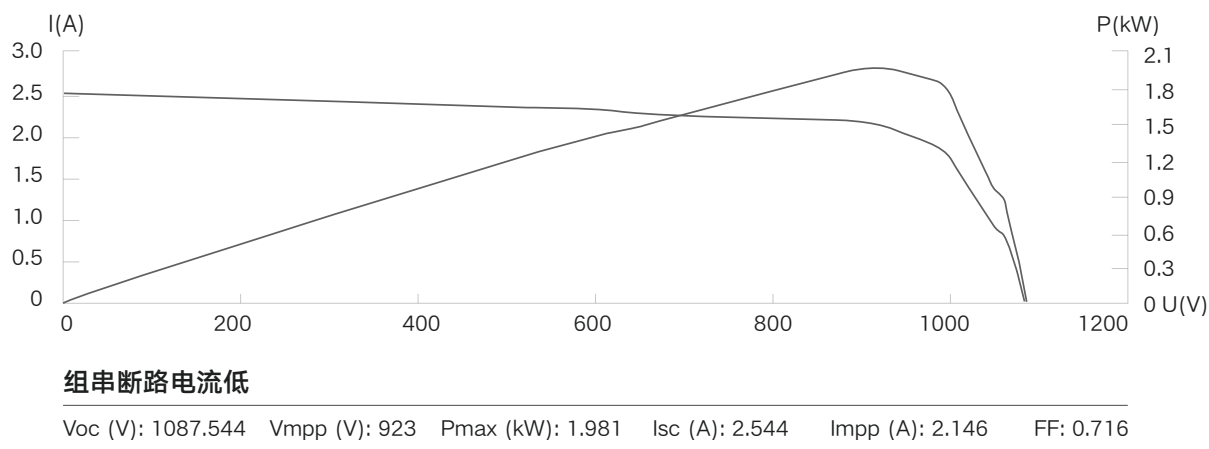


图21：光伏组串 I-V/P-V 曲线对比图

• 电芯诊断系统

算力中心百 MWh 级的储能舱，一旦某颗电芯发生失效，极可能引发整个电池簇解列，影响 GPU 集群供电与安全。传统的 BMS 只能基于电压和温度做基础保护，缺乏对电芯内部健康状况的深层洞察。

电芯预诊断系统实时采集电压、电流、温度等多维数据，结合历史运行特征，构建健康状态识别与异常预警模型。针对 AIDC 算电协同微电网场景下储能频繁参与调频、峰谷套利及突发算力负载导致的充放电深度大、速率快、热环境复杂等特性，系统从风险预警、故障告警、异常老化、行为分析、数据质量五个维度，精准识别电压暂降、温升异常、簇间一致性漂移、容量加速衰减等早期风险，通过趋势分析与模型诊断，最早提前 7 天预警热失控等安全隐患。

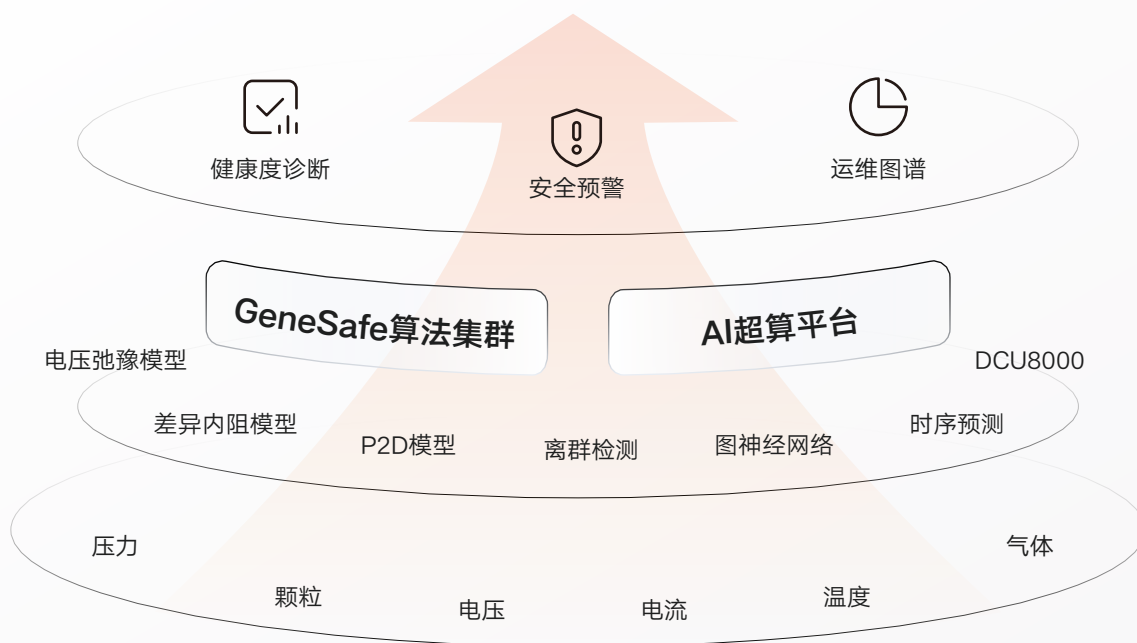


图22：电芯诊断系统技术方案架构图

电芯诊断系统将储能安全管理从“故障响应”升级为“风险预防”，帮助早期精准定位问题电芯，避免单体风险进一步扩散为电池簇故障，保障储能系统长期安全运行。同时，通过提升储能健康状态透明度，实现精细化运维和寿命管理，降低非计划停机风险。



图23：阳光电源iSolarBPS温度一致性评估结果示意图

• SST器件预警

SST 连接源侧的光伏、储能等新能源设备与荷侧的算力集群供电链路，是 AIDC 微电网中实现电力变换的关键枢纽设备。作为实现不同电压等级、交直流制式电力资源高效传输、精准匹配的核心环节，SST 运行状态的稳定性，直接决定了整个算力中心的供电可靠性。

SST 器件预警技术面向 AIDC 算电协同微电网中高可靠、高效率能源转换需求，构建“系统状态感知 + 核心器件健康评估 + 主动安全防护”的智能预警体系。针对 SST 长期运行于高频、高压、高热应力环境，通过直流绝缘监测、漏电流检测等技术，实时感知系统绝缘状态，提前识别潜在风险；同时采集 SiC/IGBT 功率器件、直流支撑电容、高频变压器等关键部件运行数据，结合电热耦合分析与寿命预测模型，实现器件退化趋势评估和剩余寿命预测，并进一步联动温度监测、局部放电检测及保护策略，实现从风险识别到故障防护的全链路安全管理。该技术推动运维模式由“故障响应”向“主动预防”转变，避免局部器件异常演变为系统停机，保障高密度算力负荷下能源转换系统安全稳定运行。

2 全链路系统性运维

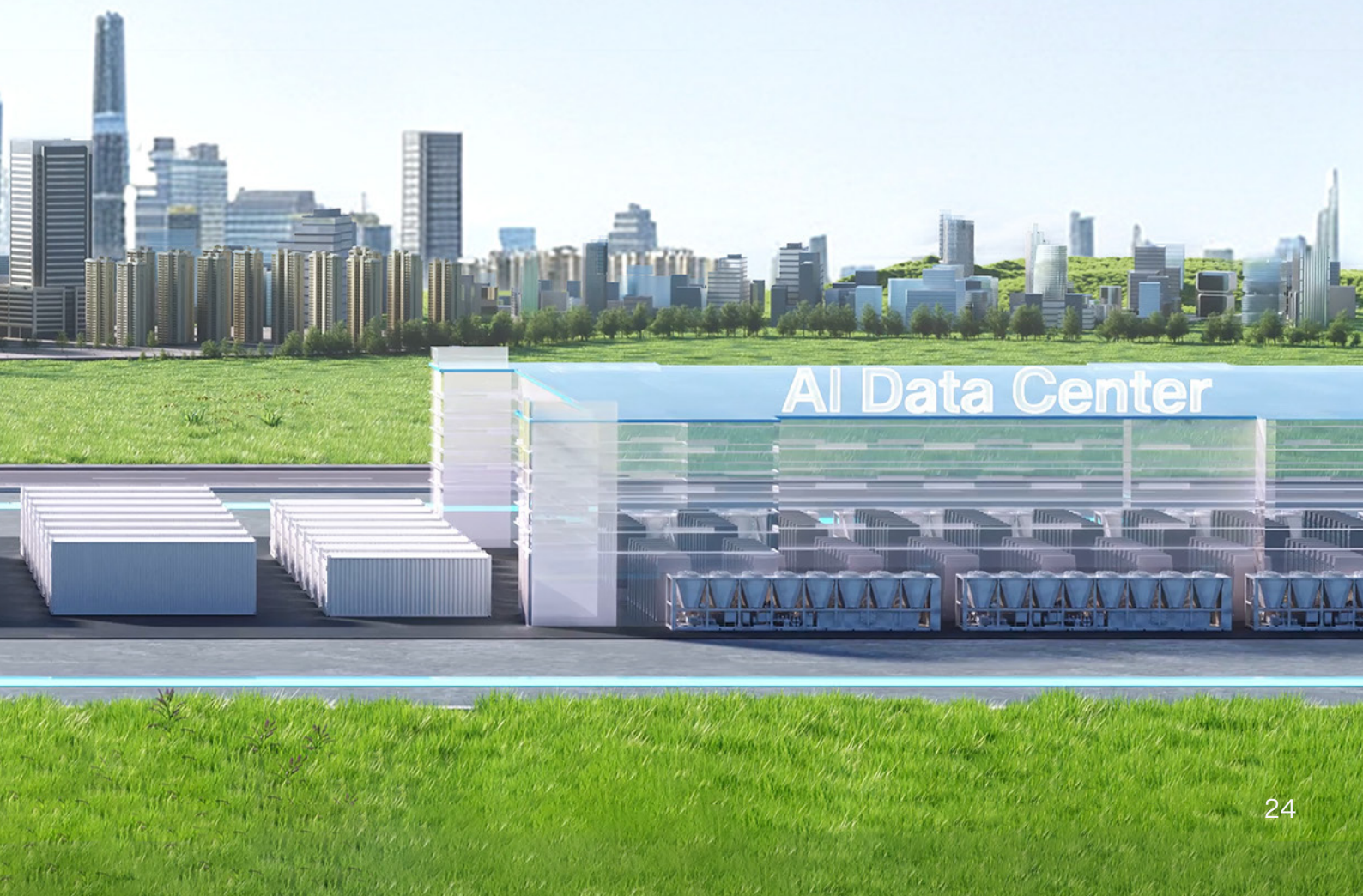
全球化服务能力、多技术融合背景、高度协同化的专业运维团队是保障全链路系统性运维模式真正落地的关键前提。传统模式下的“拼凑式运维”，将光伏、储能、SST 与冷电控制系统运维分别外包给不同厂商或不同班组，导致责任边界割裂，故障处理时出现推诿与信息传递失真等诸多问题。同时，算力中心对响应实时性、技术能力、协同运维能力的要求，远高于普通工业 / 商用微电网场景。因此，构建“风光储一体化”的全球 7×24 小时运维团队，实现风光储与算力负载的全景资源专家融合，远程数字孪生与现场快速响应结合成为 AIDC 微电网的必要运维条件。

*本章节所引用的技术数据来源阳光电源及第三方测评机构，数据口径及对应结论的解释权归数据提供方所有。



04

AIDC微电网创新技术



在“双碳”战略目标引领、全球能源体系向清洁低碳转型的背景下，源、网、荷、储各环节深度协同优化的绿色算力中心，已成为全球算力中心产业发展的必然方向与紧迫要求。在未来，可再生能源的接入比例将持续增高。然而新能源出力的随机波动与算力负荷的动态变化，使供需匹配、系统稳定和资源利用效率面临更高要求。

AIDC 能源体系需要通过更强的主动支撑能力、更灵活的协同调节机制以及更智能的资源聚合方式，实现算力需求与能源供给的高效融合，构建面向未来的新型能源基础设施。

4.1 光储协同构网

光储协同构网技术是高密度高波动算力规模化发展与新型电力系统高比例新能源转型双向驱动的必然结果。随着 AI 算力规模持续增长，AIDC 向超大规模、高功率密度方向发展，算力负荷快速波动对供电系统动态响应能力提出更高要求。同时，双碳目标推动 AIDC 提升绿电利用比例，但新能源间歇性、随机性加剧电网电压和频率波动，弱电网场景逐渐增多。未来 AIDC 需由依赖电网支撑的“跟网型负荷”向具备主动支撑能力的“构网型能源系统”转变。

方案思路

全部变流器（储能 PCS、光伏逆变器）统一运行于构网模式，其中储能作为主电压源与能量缓冲核心，提供基准电压频率与暂态功率支撑；光伏作为辅助构网电源与能量注入单元，在维持构网特性的同时实现新能源最大化消纳。

并网

构网型光储依靠虚拟惯量在电网频率扰动首周波自发响应，提供第一时间功率支撑，自适应阻尼与有源阻抗重塑消除宽频振荡风险。功角稳定控制确保电网故障时不失步、不脱网。

离网

多台构网型电源通过对等 GFM 与动态虚拟阻抗实现无需通信的精确均流与环流抑制。任一设备故障限流时，其余设备自发增发填补缺口，消除单点失效风险。

并离网切换

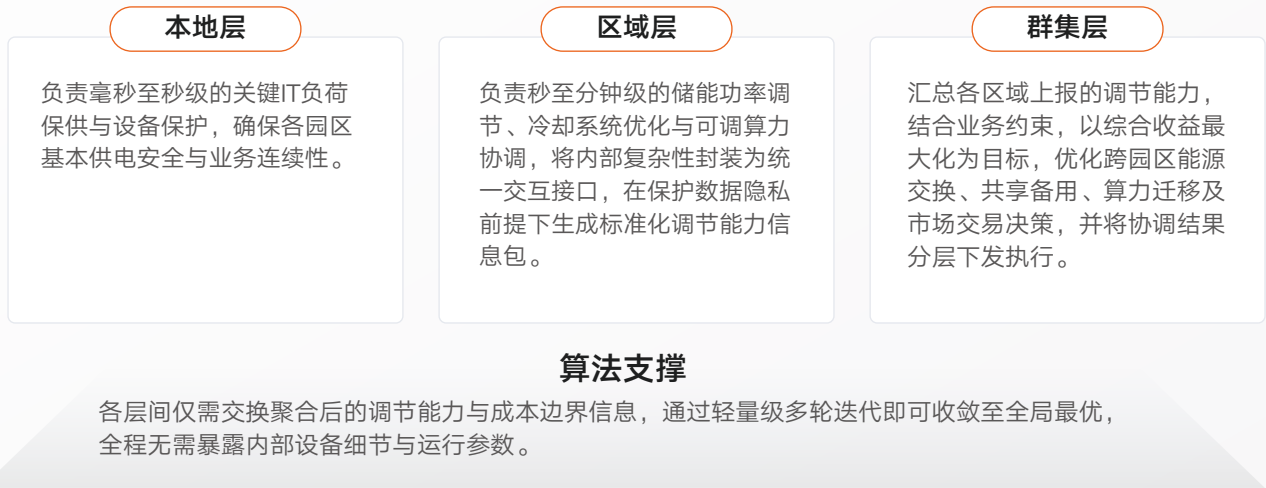
全时段自主运行，并网转离网时电压波形自然连续，无模式切换间断。离网转并网时强制同期与虚拟冲击电流预判，确保零冲击合闸。

4.2 多微网群优化调度

多微网群优化调度正从“单点自治”转向“有限共享、协同寻优”。随着 AIDC 向多园区、集群化方向发展，单一微电网依靠本地自治运行，难以充分发挥跨园区源荷互补、储能共享及算力协同价值。不同园区在算力负荷、新能源出力、电价及储能资源方面存在时空差异，易出现绿电消纳不足、用能成本偏高及资源配置冗余等问题。因此，需要构建多微网群优化调度体系，实现能源、算力与储能资源的跨区域协同，提高整体运行效率与供能韧性。

方案思路

在 AIDC 多微网群场景下，采用分层分布式优化架构，从“单点自治、各自为战”转向“信息有限共享、协同寻优”，实现整体成本最优下的个体共同受益。



4.3 虚拟电厂

虚拟电厂对 AIDC 园区内出力可预测的光伏、储能、备用电源，以及具备分层调度能力的柔性算力负荷与冷却系统开展一体化建模与协同调控，将其聚合为复合柔性资源。其核心是依托统一算力调度与能源管理，以 IT 保供、储能安全为硬约束，通过功率调控、任务迁移、冷却优化实现电力需求时空重构，参与需求响应、削峰填谷等场景。凭借精准预测、多尺度协同优势，既支撑电网灵活调节，也推动 AIDC 从用能者向产消者价值跃升。

方案思路

VPP 在 AIDC 场景下的具体实现思路可划分为三个核心层次，将分散的灵活性资源转化为可量化的电力市场价值。

资源层 | 全量聚合与可调度能力建模

将AIDC园区内的分布式光伏、储能、充电桩、柔性算力及制冷系统统一接入VPP云平台，量化每类资源的可调容量、响应速率（爬坡速率）、可持续时长及运行约束，形成标准化的灵活性商品台账。

调度层 | 云边协同的多时间尺度优化

通过“云端规划+边缘精调”的架构，基于现货与辅助服务市场的出清价格、超短期负荷预测及设备状态，执行“日前优化-日内修正-实时控制”多阶段协同调度，最大化整体调节收益。

交易层 | 多市场联合出清与收益叠加

将聚合后的资源池等效为一个虚拟单元，同时准入电能量现货、调频、备用、爬坡及容量等多个市场。通过组合投标优化算法与风险对冲策略，进行分时段、分市场的价值切分与复用，实现“一次调节、多重回报”。

05

未来展望



5.1 架构融合深化：从设备革新走向系统协同

AIDC微电网

以设备级技术革新为起点，
推动算力中心能源体系向
系统级协同纵深演进

随着 AI 大模型参数向万亿级演进，算力中心集群负荷向百兆瓦级甚至吉瓦级迈进，传统配电架构的瓶颈日益凸显——配电网容量饱和、电能质量敏感度攀升、绿电消纳压力加剧等问题相互叠加。这一瓶颈倒逼技术路径从设备底层破局：设备层面，全直流架构融合新一代电力电子技术，减少多级变换损耗、简化配电结构；全固态配电技术替代传统机械开关，提升响应速度与控制精度，增强微电网对大功率、高频波动负荷的适应能力。系统层面，微电网将源网荷储纳入统一框架统筹调度，实现算力中心内部能量管理与外部电网、可再生能源及储能设施的跨系统协同。面向不同算力中心场景，未来微电网需结合电力条件、资源禀赋与运行需求灵活配置，持续提升能源资源配置的灵活性与适应能力，为算力基础设施高质量发展筑牢能源底座。

5.2 运行价值拓展：从成本优化转向效益提升

AIDC微电网

运行目标将向兼顾可靠性、
经济性和绿色性的
综合优化方向发展

随着 AIDC 对连续运行和高品质供能需求不断提升，能源管理不再仅关注电力消耗规模和运行成本，而需要综合考虑能源利用效率、供能稳定性以及绿色能源应用水平。未来 AIDC 微电网将在保障算力业务连续运行的基础上，通过优化能源配置和运行策略，提高能源资源利用效率，促进供能体系整体效益提升。评价体系也将逐步从单一指标评价向多维度综合评估方向发展。传统算力中心能源管理通常关注能耗水平和运行成本，而面向人工智能基础设施的发展需求，需要进一步关注能源利用效率、可再生能源利用情况、系统运行韧性以及不同运行场景下的适应能力。通过建立更加全面的运行评价方法，可以更加准确地衡量 AIDC 微电网在保障算力需求、优化能源使用和提升运行水平方面的综合表现，为后续规划建设和运行优化提供参考。

5.3 产业生态完善：从局部配套走向全链协同

AIDC微电网

正推动算力中心、电力、
新能源及储能等主体形成
日益紧密的产业协同关系

微电网涉及能源供给、设备集成、运行管理和算力中心等多个环节，单一主体既难以独立完成从规划设计到运行维护的全过程，也无法应对跨领域技术耦合带来的复杂挑战。产业分工需要从过去局部的、点状的配套协作，逐步转向覆盖全链条的系统性协同，共同提升 AIDC 微电网建设和应用的整体适配能力。随着产业协同的深入推进，未来各方还将在标准制定、试点示范等方面共同发力，通过统一接口规范与评价体系降低跨领域协作门槛，依托多场景项目验证技术方案并积累工程经验，形成标准引领示范、示范反哺标准的良性循环，共同推动 AIDC 微电网从项目探索向规模化应用全面迈进，为算力基础设施与能源系统协同发展奠定坚实基础。

让人人享用清洁电力
Clean power for all

阳光电源股份有限公司
中国合肥市高新区习友路1699号
邮编：230088
总机：0551-65327878，7877
网址：www.sungrowpower.com



阳光光储充官方微信

中国信息通信研究院
北京市海淀区花园北路52号
邮编：100191
总机：010-62301618
网址：www.caict.ac.cn



信通院官方微信