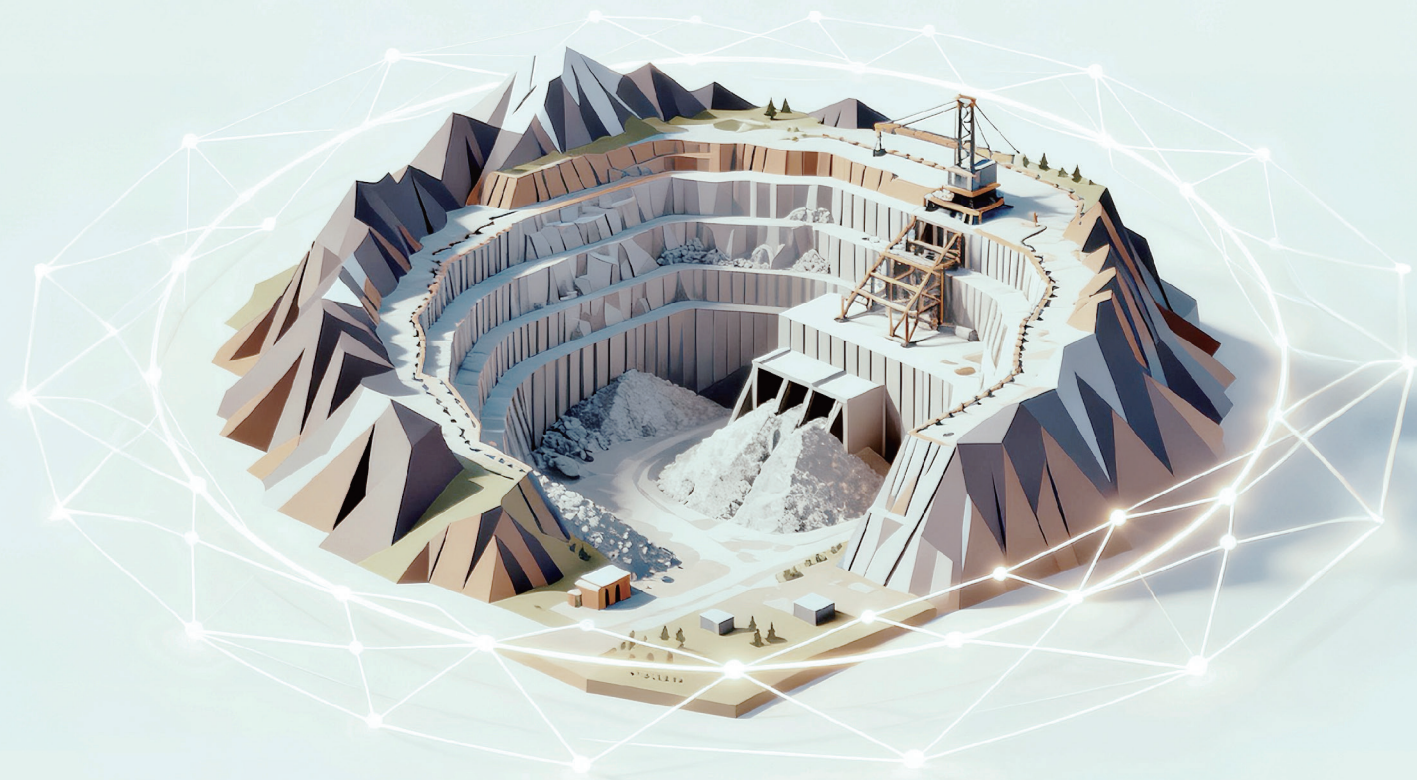
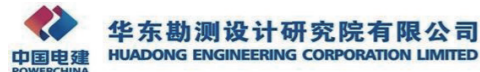


智能微网解决方案 技术白皮书

(矿山场景)



编审工作领导小组



- 组长：** 车长波 中国矿业联合会 秘书长
刘加进 华东勘测设计研究院有限公司 副总经理
姚 苾 华为数字能源技术有限公司微网矿山业务 总裁
- 副组长：** 吕 慷 华东勘测设计研究院有限公司 一级专家
张 帝 华为数字能源技术有限公司微网矿山海外业务 总经理
李祥辉 华为数字能源技术有限公司微网矿山业务 CTO
- 成员：** 陈国良 华东勘测设计研究院有限公司国际公司市场开发部 总经理
胡定国 华东院非洲区域总部 副总经理
曹 磊 华东勘测设计研究院有限公司国际公司海外工程技术中心 副总经理
陈晓宇 华东勘测设计研究院有限公司绿色矿山工程院 副院长
石亚远 华东院国际公司市场开发部 高级工程师
季石宇 华东院机电工程院国际设计中心 副主任
赵 微 华为数字能源技术有限公司微网矿山业务生态合作总监
王 俊 华为数字能源技术有限公司微网矿山业务解决方案专家

主编单位： 中国矿业联合会
华东勘测设计研究院有限公司
华为数字能源技术有限公司

主编人员：（按拼音排序）

蔡金华 陈 颢 陈 龙 季石宇 雷 盈 李训龙 李祥辉 石亚远
(华东院) (华东院)
余宏武 王君超 吴家宏 王 俊 张 岩 张泽家 赵 微 庄铁钢
(华东院)

矿山应用清洁能源是矿业发展的必然趋势，《智能微网解决方案技术白皮书（矿山场景）》为我们提供了矿山绿电切实可行的解决方案。龙净环保是中国环保产业的领军企业和国际知名的环境治理服务企业、能源服务供应商，为紫金矿业的权属企业；公司五十多年来始终专注于环保、节能领域研发及应用，致力于提供生态环境综合治理系统解决方案和新能源综合服务。龙净环保将携手华为及国内外同行，积极加速构建低碳与零碳矿山，以清洁能源驱动资源开发，为全球矿业转型树立标杆。

福建龙净环保股份有限公司总裁

在矿山能源革命的关键节点，博雷顿与华为并肩开拓矿山绿电新路径。《智能微网解决方案技术白皮书（矿山场景）》，以充分的市场洞察和业界先进的技术能力直击行业痛点——供电不稳、成本激增、碳排难降。我们深谙矿企之需：稳定可靠的电力保障、可预测的最优度电成本、量化的 ESG 价值。博雷顿作为零碳矿山的实践引领者，结合华为一体化解决方案，让矿山从能源消耗者蜕变为清洁能源生产者。这场变革不仅是技术升级，更是重塑矿业未来的战略支点。

博雷顿科技股份有限公司董事长

目录

引言

01



第一章 行业背景与发展驱动因素

03

- 1. 矿山行业电力需求特点 04
- 2. 政策与法规驱动 05
- 3. 经济与技术驱动 06
- 4. 当前发展矿山微电网面临的主要挑战 07



第二章 矿山微电网关键技术

09

- 1. 方案概述 10
- 2. 微网运行模式 11
- 3. 华为微电网架构创新与关键技术 12
 - 3.1 分层控制架构 12
 - 3.2 稳定运行六大关键技术 13
 - 3.3 经济运行关键技术 20
 - 3.4 矿山微网解决方案设计全流程 22



第三章 华为智能微网解决方案应用案例

25

- 1. 刚果金首个铜矿微电网项目 26
- 2. 蒙古 MAK 全球已投运最大的矿山微电网项目群 27
- 3. 刚果金马诺诺锂矿微电网项目 28
- 4. 沙特红海全球最大光储微电网项目 29



引言

矿业行业在可持续发展中面临保障供电稳定性与优化经济性的双重挑战，传统柴油发电因成本高、可靠性差、碳排放严重，难以适应绿色化、智能化转型需求。

华为智能微网解决方案以构网型储能为核心，融合多能源协同，既满足矿山高可靠性供电要求，又能降低度电成本超50%、减少碳排放，经多个国际大型矿山项目验证，已成为行业能源转型的可复制标杆。

矿山微电网正从“辅助供电系统”进化为“零碳矿山核心基础设施”。预计2030年后，风光储微电网将成为新建矿山的强制标配，矿山将从“能源消耗者”转变为“能源生产者”。早转型的矿企将在成本控制、ESG评级、市场准入等方面形成显著优势，重构全球矿产资源竞争格局。



第一章

行业背景与发展驱动因素

1. 矿山行业电力需求特点

矿山行业能源需求呈现“高能耗、高可靠、高挑战”三重特性，传统供电模式局限性凸显。

新能源产业爆发带动铜、锂等关键金属需求激增，2030年新能源领域铜需求将从2021年182万吨增至720万吨（增幅295%），锂从11万吨增至81万吨（增幅660%），钴、镍等增幅也超170%。金属需求增长推动矿业产能扩张，全球矿产开发用电量已占总能耗11%，且年增5%。

表 1-1：2021-2030 年全球新能源行业对各金属需求量及增幅

金属种类	2021 年需求 (万吨)	2030E 年需求 (万吨)	预计增幅
铜	182	720	295%
锂	11	81	660%
钴	10	29	178%
镍	23	115	410%
锰	10	56	454%
锌	54	175	222%

电力成本成矿企核心负担，不同矿种占比差异大：煤矿机械化采煤为20%-30%，铁矿、铜矿等主要金属矿20%，盐湖提锂、钨矿等稀有金属矿达25%-35%。以刚果金某年产10万吨露天铜矿为例，年耗电约2亿度，球磨机单机功率≥10MW，电力支出直接影响利润。

表 1-2：不同矿种电力成本占运营成本比例

矿种大类	细分矿种	电力成本占比
煤矿	机械化采煤	20%-30%
主要金属矿	铁矿，铜矿等	20%
非金属矿	石灰石，石膏	10%-20%
稀有金属矿	钨矿，钼矿，盐湖提锂等	25%-35%

全球80%以上大型矿山距主干电网超200公里，电网延伸成本高达200万元/公里，经济可行性低。且高海拔、极寒等极端环境使传统发电设备效率下降40%以上，供电压力更大。传统柴油发电是当前偏远矿山主要供电方式，却难适应行业发展。全球矿山年耗柴油约4000万吨，碳排放超1.2亿吨CO₂，非洲70%矿区依赖柴油，年耗1800万吨。⁽¹⁾⁽²⁾

柴油发电存在固有的技术局限性：相较于大电网或构网型储能，频率和电压稳定性弱，应急响应慢，难满足毫秒级需求（如非洲某铜矿遇光伏/负载波动导致频率不稳定，效率降15%以上，年损超千万美元）；环境适应性弱，高海拔功率衰减30%-50%，极寒效率更低，且噪音、排放不达标；运维复杂，故障间隔短；在非洲、拉美等基础设施薄弱地区，柴油运输依赖公路，供应链中断风险高（如暴雨导致道路中断），直接威胁生产连续性。

更重要的是发电成本居高不下，刚果金某铜矿柴发发电成本达40美分/度以上，远超光伏+储能，且隐性成本高、偏远矿区柴油运输距离常超500公里，运费占燃料总成本的15%-20%；储存需专用防爆设施，安全投入大。

随着风光储技术的成熟，柴油发电正从“主力电源”退居“应急备用”，其技术与成本劣势在清洁能源方案的对比下竞争力弱。

矿业生产的特殊性决定了其电力需求的复杂与严苛，具体可概括为六大核心特点：

可靠性

供电中断可能导致设备损坏、生产停滞或安全事故。如球磨机停机超10分钟会使研磨介质固结，清理需数天；井下排水系统停机1小时可能淹井，煤矿鼓风机停转10分钟或致瓦斯超标，需供电系统24/7连续运行且毫秒级故障响应。

稳定性

重负荷电机（破碎机、球磨机等）启停频繁易引发电压波动和谐波干扰，需动态无功补偿（SVG）、稳压器维持稳定；接入弱电网配旋转备用或储能，孤网运行依赖储能或柴发协同控制。

灵活性

需适应时空变化，时间上各阶段用电差异大；空间上露天矿需移动变电站，地下矿需扩展网络，还需支持设备短时过载与工序用电优化。

大容量

全流程功率需求高，开采环节电动液压铲、矿卡功率大，加工环节半自磨机电机达5-10MW，大型矿山需建110kV甚至220kV专用变电站及多台大容量变压器。

经济性

电力成本占运营成本15%-40%，电费降1%可显著增利，需优化电源、提能效、智能调度，成本优势决定生存。

节能环保

双碳目标下需减排，政策、技术、能源结构推动，节能环保影响采矿权获取与品牌价值，是可持续发展核心诉求。

2. 政策与法规驱动

在全球碳中和目标与各国微电网激励政策的共同驱动下，矿山能源系统正加速向绿色、低碳转型。这一趋势，叠加日益严格的碳交易机制，正在深刻重构全球矿业的竞争规则。以欧盟为例，其碳价EU ETS在2025年已升至每吨80欧元。据此测算，若刚果金年产260万吨铜全部销往欧盟，所需缴纳的碳税将高达4亿欧元，这占到了其销售收入的2%以上。碳成本已从潜在风险转化为切实的财务压力。

头部矿企已加速布局减排：必和必拓计划 2030 年减排 30%（以 2020 年为基准）、2050 年碳清零；力拓投入 50-60 亿美元发展可再生能源，目标 2030 年减排 50%；紫金矿业计划 2029 年碳达峰，比国家目标提前 1 年（见表 1-3）。

表 1-3：世界主要头部矿企碳减排目标

企业	国家	目标
必和必拓 (BHP)	澳大利亚	2030 减排 30% (相比 2020 年), 2050 碳清零, 投资合作交通电动化, 清洁能源发电; ⁽³⁾
力拓 (RioTinto)	英国	2030 年减排 50% (较 2018 基准), 2050 年净零, 投入 50-60 亿美元到 - 可再生能源、铝阳极、氧化铝工艺等; ⁽⁴⁾
紫金矿业	中国	2029 碳达峰 (比中国国家承诺早 1 年) 万元工业产值碳强度较 2020 年降 34.9%; 2050 碳中和; ⁽⁵⁾
嘉能可	瑞士	2035 年将总排放量减少 40% (相比 2019 年), 煤矿业务碳排放强度降低 50%; 2050 年实现净零排放; ⁽⁶⁾
淡水河谷	巴西	2030 减排 33% (相比 2020 年), 2050 碳中和; ⁽⁷⁾
英美资源	英国 / 南非	2030 年将温室气体排放量减少 30% (以 2016 年为基准), 2040 年前实现所有矿山运营的碳中和; ⁽⁸⁾
FMG	澳大利亚	投入 62 亿美元, 目标 2030 年澳洲陆上运营实现范围零排放, 年减碳 300 万吨; ⁽⁹⁾

碳中和目标还推动 ESG 监管加强与资本准入壁垒提高。欧盟 CBAM、国际矿业与金属委员会 (ICMM) 标准倒逼企业减排, 否则将面临出口限制与融资成本上升。高盛、摩根大通等金融机构已将减排进度列为贷款审批的核心指标, 高碳排矿企融资难度显著增加。⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

3. 经济与技术驱动

新能源成本下降与微电网技术成熟, 为矿山能源转型提供了可行性与经济性支撑。

单晶硅组件价格从 2015 年 0.6 美元 / Wp 降至 2025 年 0.11 美元 / Wp。2025 年后钙钛矿电池量产, 成本较单晶硅再降 30%, 2030 年后光伏系统度电成本或低至 0.02 美元 / kWh。锂离子电池成本从 2015 年 350 美元 / kWh 降至 2025 年 80 美元 / kWh, 循环寿命超 8000 次, 2030 年或降至 58 美元 / kWh, 储能度电成本相应降低。光伏和储能成本的持续降低促使光储微电网发电成本持续降低, 预计 2025 年后进入“加速平价”阶段, 在全球多数地区具备与煤电、燃气发电竞争的能力, 成为分布式能源的主流选择。⁽¹²⁾

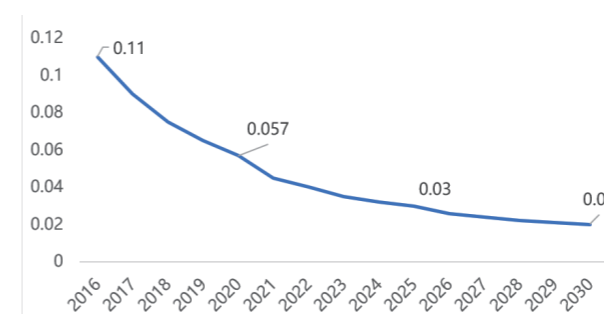


图 1-1: 2015-2030 年光伏系统 LCOE 趋势表 (单位: USD/kWh)

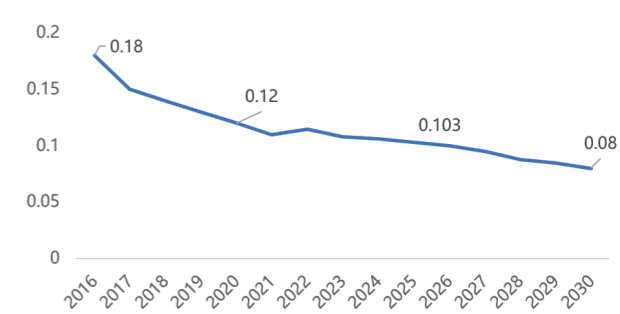


图 1-2: 2015-2030 年储能系统 LCOS 趋势表 (单位: USD/kWh)

微电网技术历经三个发展阶段, 已实现从“备用系统”到“核心基础设施”的跨越:

- 探索验证阶段** 早期以孤岛供电（如偏远农村、边防哨所）为主，规模仅几十至几百千瓦，系统架构为简单的“光储柴”，调度逻辑单一。
- 示范应用阶段** 虚拟同步机（VSG）技术成熟，构网型储能变流器（PCS）开始规模应用，具备与同步发电机相当的电网支撑能力；模型预测控制（MPC）引入调度，实现多目标协同；IEC61850 协议应用到微电网场景，解决异构设备互操作性问题。
- 规模化推广阶段** 上千台 PCS 作为电压源同步并机构网技术成熟，可支撑百 MW 级以上大容量光储离网 / 并离网微电网建设。微电网功能从单一供电升级为“能效管理 + 碳排管理 + 电力交易”的复合载体，从“大电网附属”变为“新型电力系统的稳定性基石”。

4. 当前发展矿山微电网面临的主要挑战

矿山推广“新能源 + 储能”型微电网面临技术、经济、模式等多维度挑战, 需系统性应对。

技术难题 新能源发电间歇性与矿山稳定用电需求矛盾突出, 储能应用受成本、寿命、极端环境适应性及系统集成复杂度限制。老旧电网难支撑并网, 设备在特殊环境下的耐久性和效率保障也成问题。

资金难题 项目周期与设施寿命不匹配致成本难摊薄, 初始投资高加重资金压力, 融资成本因地区差异攀升, 储能成本拉长回报周期, 绿电资源与需求不匹配也增加成本。

建设运维 偏远矿区施工难、成本高, 技术人员短缺, 系统运维要求高, 智能化协同调度技术难度大。

商业模式 矿企与能源开发商在投资主体等方面分歧大, 缺乏成熟风险共担模式, 第三方投资面临多重问题。

政策环境 各国政策差异大且多变, 审批冗长, 项目还面临土地、生态、社区接纳及地缘政治等风险。



第二章

矿山微电网关键技术

3. 华为智能微网解决方案架构创新与关键技术

3.1 分层控制架构

针对微电网面临的各种挑战，华为提供了一套轻量化的标准智能微网解决方案。其中，分层分级控制是微电网系统在经济性和稳定性之间实现最佳平衡的核心，主要依据多时间尺度控制理念及功能实现将微电网控制系统分为三层：稳定构网控制层、高效协调控制层、智能优化调度层。

- ① 稳定构网控制层：以设备调频调压能力为核心，通过合理的构网电源与拓扑设计，保障 100% 新能源稳定同步构网，支撑负荷连续供电。
- ② 以微网控制器为核心，在百毫秒实现系统内源网荷储的快速协调控制，在功率负荷不平衡时实现快速平滑波动，保证微电网频率、电压的稳定，同时需要实现无缝并离网切换以及快速黑启动等功能。未来协调控制层向集成化演进，即一套设备集成数据采集、集中控制与通讯功能，可大幅提升数据采集及处理效率，在保证性能的同时能降低设备投资，同时减少后续调测和维护难度，为规模化复制及系统扩展提供良好基础。
- ③ 智能优化调度层：以能量管理系统为核心，实现微电网分钟级经济优化调度与运行安全裕度管理，保证微电网内电力电量平衡。微电网的优化调度需要基于气象或历史发电数据对未来发电情况进行预测，基于前瞻结果对储能系统的充放电功率做出合理规划，并基于发电情况对负荷使用情况进行预估，源荷深度双向互动匹配，由源随荷走向源互动，实现自由用电。

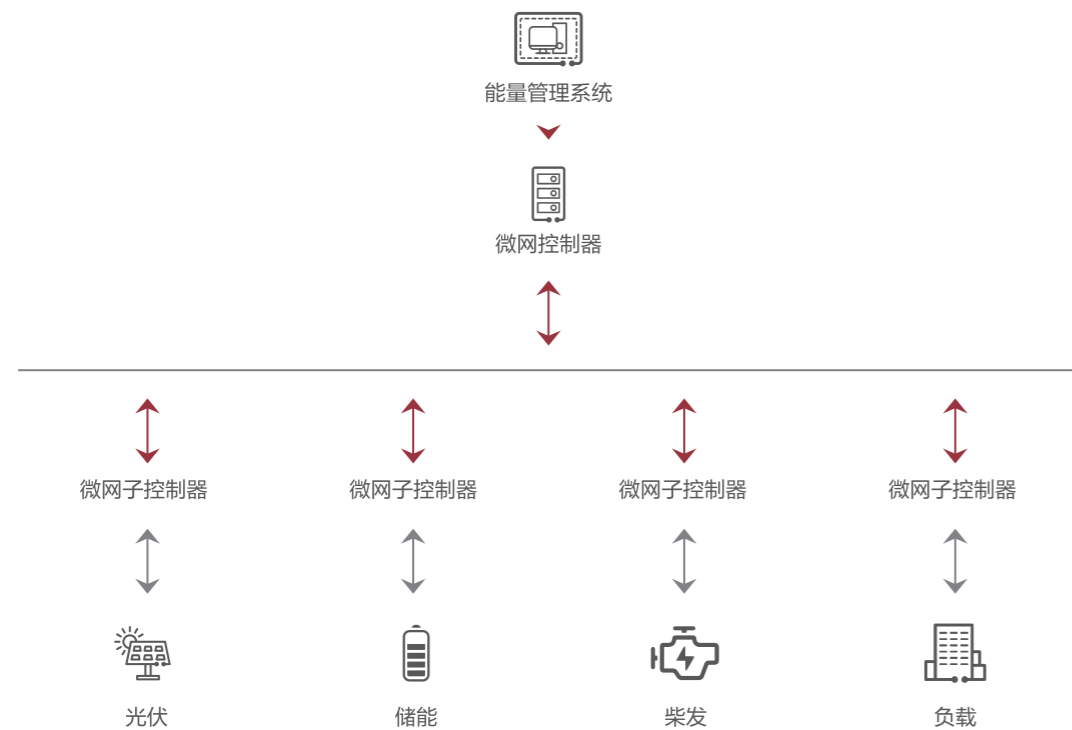


图 2-3：微电网分层控制架构

3.2 稳定运行六大关键技术

(1) 大规模储能构网技术

挑战 随着构网型储能技术突破和光储成本下降，GWh 级微电网已成现实。然而，大规模构网型储能并网仍面临关键挑战：当数百至数千台独立电压源并联时，如何实现稳定同步运行成为技术难点。主要问题包括：1) 环流问题导致功率分配不均；2) 多机交互引发宽频振荡；3) 控制算法依赖的高精度同步协调难题。解决这些挑战是实现高比例可再生能源电力系统的关键。

解决方案 为应对高比例新能源接入带来的电网稳定性挑战，华为构网型储能系统采用虚拟同步机（VSG, Virtual Synchronous Generator）技术，模拟同步发电机的运行特性，通过电力电子变流器实现毫秒级功率调节，保障微电网的电压和频率稳定。华为智能组串式 PCS 开关频率高，控制带宽高，能够更好的抑制环流。

① 主动快速一次调频技术

在微电网运行中，负荷突变或分布式电源功率波动会导致发电与用电失衡，引发频率偏差。华为构网型储能通过调速器模型实时检测频率变化，计算有功功率调节指令，在 5ms 内完成动态响应，实现有功-频率下垂控制，快速恢复系统频率稳定。

② 主动快速一次调压技术

电压波动同样威胁微电网安全运行。华为构网型储能基于励磁器模型，通过动态调节内电势和无功功率输出，在系统电压骤变时 5ms 内完成调整，有效抑制电压偏差，提升电网电压稳定性。

该技术通过模拟同步发电机的惯量、阻尼和调频调压特性，使储能系统在离网运行时能够作为稳定的电压源，独立支撑微电网的电压和频率，确保系统在无主网依赖的情况下稳定供电，有效提升离网电力系统的自主性与可靠性。

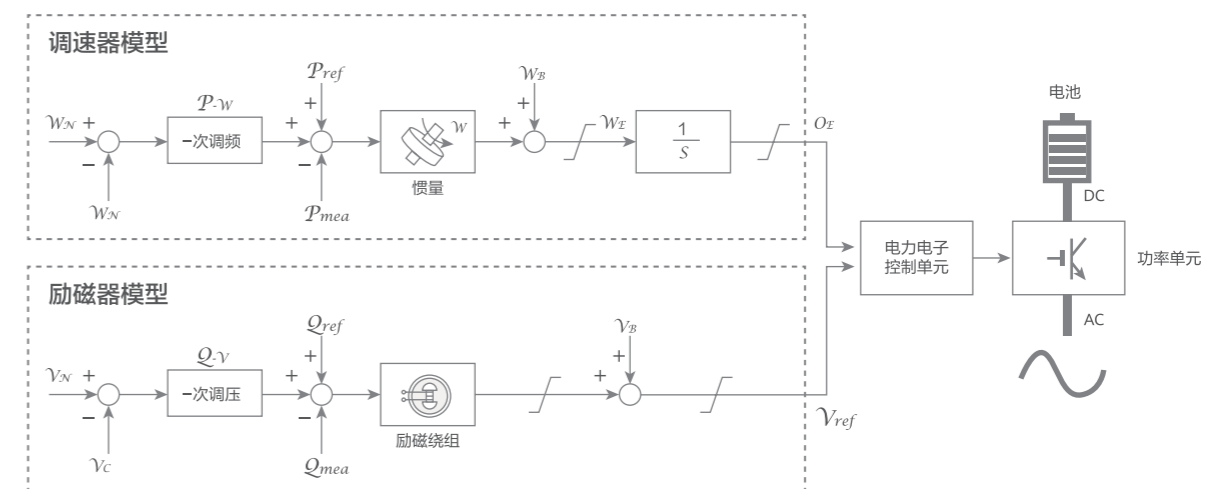


图 2-4：构网型储能虚拟同步机工作原理框图

(2) 大规模储能黑启动技术

必要性 在电力系统发生完全停电后，黑启动是指依靠系统内部具备自启动能力的电源（如储能系统、柴油发电机等）逐步恢复供电的过程。对于 10MW 级别的离网矿山而言，停电可能造成每小时数十万至百万元的经济损失，因此快速可靠的黑启动能力至关重要。由于无法依赖主网，矿山必须通过分布式电源实现自主恢复。目前，中国已明确要求矿山微电网具备黑启动能力。同时，欧盟、澳洲等地也对矿山的应急电源和黑启动功能提出了严格的法规要求。

挑战 传统发电机组单机容量较大，在黑启动过程中能够较容易地带动大范围负载，操作也相对简单。相比之下，电化学储能单子阵功率有限，在矿山这类高负载场景中直接启动容易导致设备过载，甚至引发系统再次崩溃。因此，百 MWh 级的大规模矿山微电网需依赖多组储能子阵协同完成黑启动，以提供足够的容量支撑后续负荷的逐步投入。多台储能变流器（PCS）在电压源模式下并联运行时，微小的电压或相位差异都可能引起环流，造成过流保护动作，最终导致黑启动失败。

解决方案 为解决这一难题，可采用无同步并机线电压同步技术，通过多 PCS 之间的自动电压同步与采样校准，支持子阵内多 PCS 并联缓启同步升压（多 PCS 同步并联技术，多 PCS 自锁相再同步技术），子阵间多子阵并联缓启同步升压（多子阵 GOOSE 广播通讯同步技术），结合高精度硬件通信协议，实现能量管理系统（EMS）指令的精准同步下发。该系统能够在 1 分钟内完成从零电压到全系统电压的平稳建立，过程中各 PCS 之间的环流得到有效抑制，电流有效值偏差始终控制在 5% 以内。实现输配电网络的同步缓启后，仅需投入相应配电线路即可快速恢复全网供电，显著提升系统自恢复能力和供电可靠性。

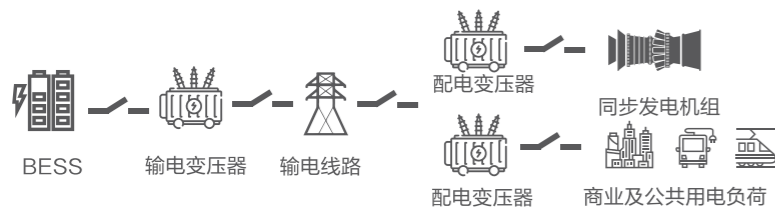


图 2-5: 黑启动简化拓扑

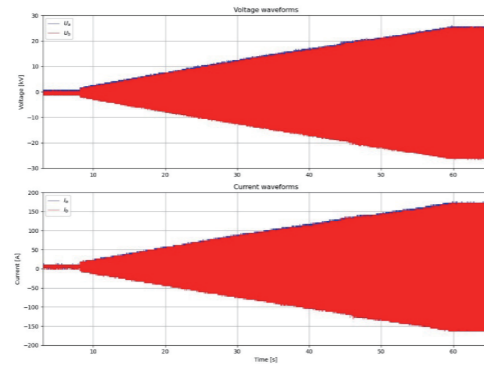


图 2-6: 储能系统带载黑启动波形

(3) 离网故障穿越技术

必要性 矿区微电网的运行环境具有显著的特殊性和复杂性：负荷侧大型采矿设备频繁启停造成功率剧烈突变；电源侧柴油发电机响应缓慢，光伏和储能系统的输出也具有较强随机性；加之长距离供电线路阻抗高，以及高粉尘、强电磁干扰等恶劣环境因素，系统极易因电压波动而导致设备脱网甚至全网崩溃。因此，提升系统的高低电压穿越能力，是保障矿区电力持续稳定运行的关键。

挑战 作为微电网的核心电压源，构网型储能系统必须具备完整的故障穿越能力，包括低电压穿越、高电压穿越及连续故障穿越功能，以确保矿山微电网在各类扰动中保持稳定。相较于并网系统只需实现简单的限流保护，100% 新能源构成的孤岛微网在故障穿越方面面临更大挑战：系统不仅需提供足够的短路电流以支撑保护装置正确动作，还要维持相角稳定，并在故障清除后快速重建电压、恢复供电。

解决方案 离网故障穿越是大型孤岛电网中最具挑战的难题，当前全世界范围内没有成熟的机制和标准可以参考。通过对多学科技术的综合运用，我们实现了对故障过程中微秒至秒级动态响应的完整覆盖。相关实践已验证，即使在多电源、100% 电力电子化的高压发输电系统中，实现安全可靠的故障穿越是可行的。这些能力可帮助客户显著提升系统鲁棒性和供电连续性，有效减少因电压问题导致的非计划停机和设备损坏，支撑矿山在恶劣工况下的连续生产，降低运营风险与经济损。

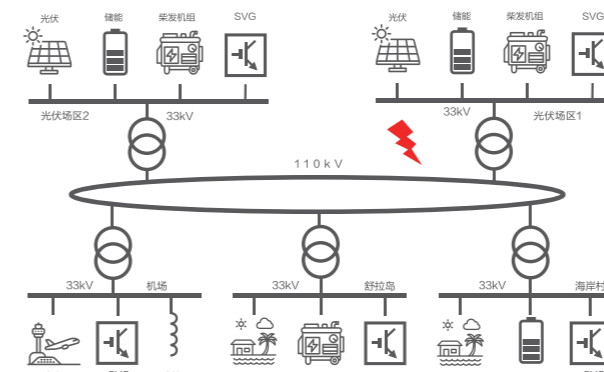


图 2-7: 故障穿越示意图

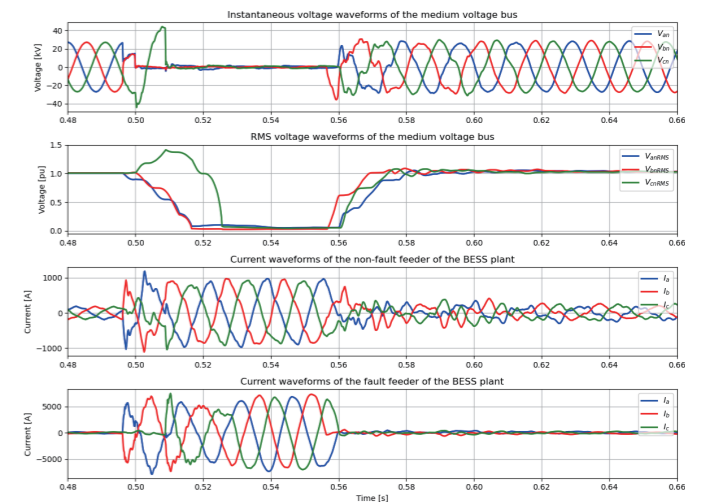


图 2-8: 系统层级：故障后重同步算法

(4) 抗变压器投切冲击技术

必要性 矿山微电网面临独特的变压器频繁投切挑战，年均操作达 100–200 次，主要源于：

- ① 负荷冲击特性：矿山破碎机、球磨机等大型设备（单机功率达 MW 级）频繁启停，导致电网负荷剧烈波动。下图为一台 3MW 球磨机启动时产生 6–8 倍额定电流瞬时冲击，峰值视在功率达额定 9–13 倍，持续数秒。为稳定电压，系统需频繁调整变压器分接头或投切备用变压器，这加剧了暂态过程的不稳定性。
- ② 运行模式复杂：矿山微电网需频繁切换并网/孤岛运行模式，且长距离电缆易受雷击等影响，故障率较高。故障时需快速切换变压器，而变压器投切产生的励磁涌流可达额定电流的 6–12 倍。

解决方案 为应对这些挑战，先进的抗励磁涌流冲击技术通过在变流器中集成先进控制算法并提升系统过载能力，结合快速限流、主动均流和抗相位跳变等方法，实现了变压器直接投入时的励磁控制功能。该技术可在不触发系统过载保护的前提下，有效抑制励磁电流并延长励磁时间。实际项目验证表明，储能变流器可承受高达 150% 额定容量的变压器合闸涌流，在不增加额外储能配置的情况下，即可应对大容量变压器投切带来的冲击。实验数据表明，即使在变压器投入导致中压母线出现短暂电压跌落或过冲的情况下，系统仍可保持稳定运行，为客户提供持续、可靠的电力保障。

核心价值

- 显著降低投资成本：无需为应对变压器冲击而额外扩容储能系统，节省初始设备投入。
- 提升系统稳定可靠性：有效抑制励磁涌流和暂态电压波动，保障关键负荷连续运行，减少生产中断风险。
- 增强运行适应性：支持频繁、复杂的运行模式切换与变压器操作，适应矿山恶劣工况与高故障率环境。
- 延长设备寿命：通过抑制电流冲击和电压突变，降低电气设备应力，减少维护需求。

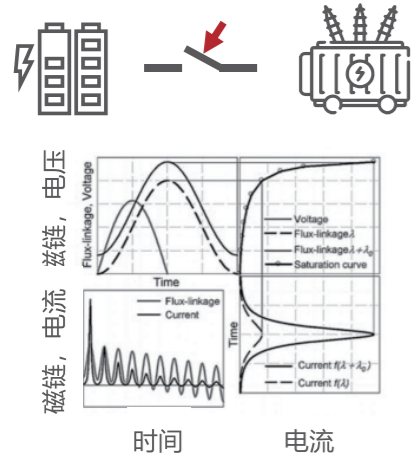


图 2-9：变压器投切

铁磁材料饱和特性、剩磁与合闸角度导致变压器合闸励磁电流冲击

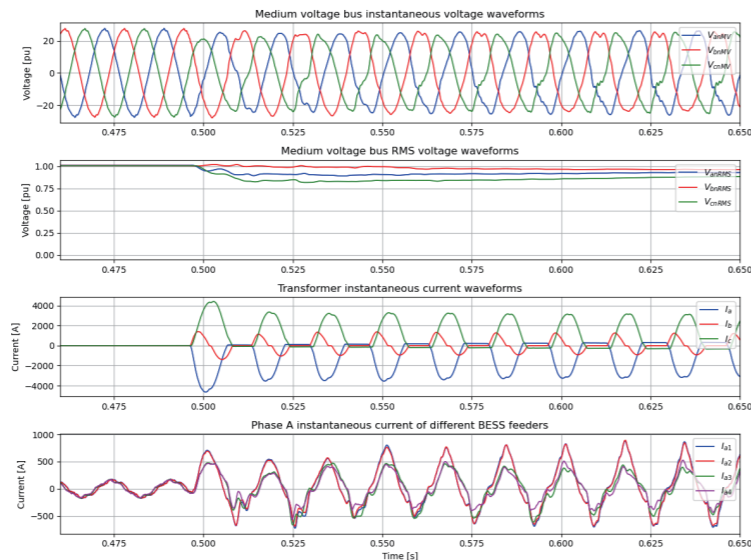


图 2-10：微电网储能系统大型变压器励磁冲击实测波形

- (a) 微电网电压瞬时值
- (b) 微电网电压有效值
- (c) 变压器冲击电流
- (d) 储能馈线电流

(5) 并离网停电不停产技术

必要性 矿山微电网的供电系统面临高连续性、高稳定性的严苛要求如大型设备：1) 安全负荷长时间停电将直接危及人身安全，引发重大事故；2) 工艺要求连续生产的负荷停电将造成生产中断，直接降低全年的有效生产时间，如年产 10 万吨铜矿，每停电一小时损失高达 85 万元；3) 大型电机驱动设备启机电流达 6–8 倍，持续数秒，导致母线电压骤降，造成微网系统崩溃。表 2-1 列举一些关键矿山设备及其供电需求。

表 2-1：矿山典型设备对应负荷等级和供电要求举例

负荷需求	负荷分级	设备类型	允许停电时间	停电后果	设计要求
一级负荷	因供电中断可能导致人员伤亡、重大设备损坏、重大经济损失或严重影响社会公共安全的电力负荷	应急照明、通信	≤ 500 毫秒	人员安全事故	双回路供电 + 快切 + 智能监控
		有能量回收的长距离皮带	≤ 2 秒	皮带跑偏，机械损伤	
		主扇风机	≤ 10 分钟	瓦斯爆炸风险	
二级负荷	因供电中断可能导致较大经济损失、生产停滞或影响重要公共设施运行的电力负荷，但不直接危及人身安全或引发重大灾难	球磨机	≤ 10 分钟	研磨介质固结，清理耗时	双回路供电，允许短时切换延时
		矿浆泵	≤ 10 分钟	管道堵塞，化学沉积	
		铜矿电解槽	≤ 20 分钟	铜反溶，需要返工	

解决方案 实现停电不停产方案的核心是由发电设备、继电保护装置与负荷共同配合实施：

- ① 电网的故障识别及穿越技术：快速准确地识别微电网内外的各类短路和开路故障，并精确控制 POI 联络开关的分合闸操作。其独特的离网故障穿越技术可在并离网切换过程中维持足够的短路电流，同时确保大规模储能 PCS 保持功角同步。当 POI 联络开关断开后，系统内所有储能变流器能够同步快速重建微电网电压，确保持续为负荷供电。
- ② 关键负荷电压暂降耐受能力优化：通过改进电机启动方式（如直启改为变频启动）降低系统冲击，优化负载运行参数，减少设备频繁启停；同时提升关键敏感负荷的电压暂降耐受能力（从 ≤ 20ms 提高到 ≥ 300ms），确保微电网切换过程中关键设备持续运行。下图展示了微电网在外部电网故障时的无缝切换测试结果。

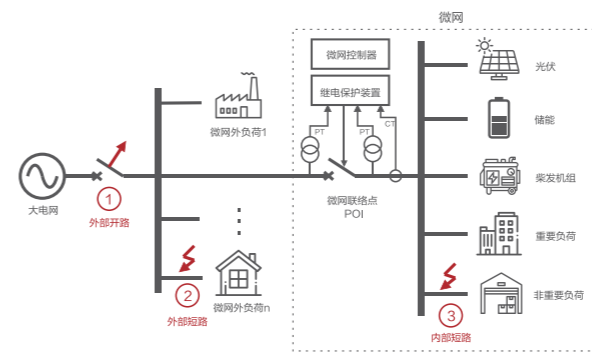


图 2-11：并离网切换示意图

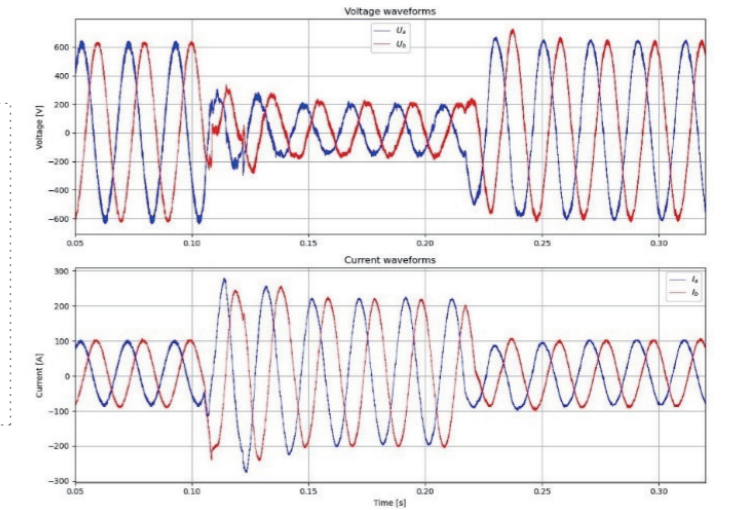


图 2-12：非计划性并离网切换的实验室测试结果

客户价值 该方案通过发电与负荷双侧协同控制，实现了外部电网故障时微电网的无缝切换，最大限度避免因停电导致的安全事故和生产中断，有效提升系统连续运行时间，为客户构建安全可靠的高韧性供电系统。

(6) 光储柴协同技术

挑战 在传统以柴油发电机和光伏为主力电源的微电网系统中，由于柴油发电机组的调频能力有限，光伏系统往往需要降载运行以保证系统稳定，这不仅降低了光伏发电效率，还造成能源浪费，同时频繁断电也显著影响了微电网的可用性。为提升系统稳定性，实现柴油发电机与储能系统同时作为电压源运行并互为备份，以及光伏、储能、柴发三种电源的协同运行和毫秒级响应调度，已成为微电网暂态稳定研究的关键课题，但目前仍面临以下主要挑战：

- ① 多机并联协调：多台储能 PCS 并联运行时，易产生环流或失步问题；
- ② 模式切换：柴发和储能 PCS 在并网 / 离网模式切换时，因控制策略差异（如 VSG 构网模式与 PQ 跟网模式）可能导致电压、频率波动或短暂断电；
- ③ 电压与频率稳定性：双电压源并联运行时，柴发的励磁和调速特性可能引发电压和频率波动；
- ④ 系统经济性：传统单电压源微电网需预留大量容量裕度应对负载突变，导致资源利用率低下。

解决方案 华为智能微网解决方案创新性地采用构网型储能技术，有效解决了多机并联环流问题，并结合先进的光储微网自适应控制算法，使系统能够智能感知环境条件、负荷需求和电网状态，实现运行策略的自主优化。该方案通过储能与柴油发电机的双电压源协同构网运行，大幅提升了微电网系统的稳定性和可靠性。该方案具备三大核心优势：

光伏自动最大化输出：光伏始终工作在最大功率跟踪（MPPT）状态，自动最大化发电输出。系统实时监测光伏发电与负荷需求，动态调节储能充放电状态，确保微电网稳定高效运行，有效减少弃光，提升整体发电量。



图 2-13：刚果金马本德矿山微电网项目光储柴协同工作曲线对比

双电压源毫秒级响应：在光伏功率骤降（如云遮或日落）时有效发挥构网型储能技术，在 10ms 内快速检测并响应，有效避免光储柴系统失步振荡。相较之下，传统柴发系统需 2-3 秒完成调频，期间频率偏差可达 $\pm 0.5\text{Hz}$ 以上。

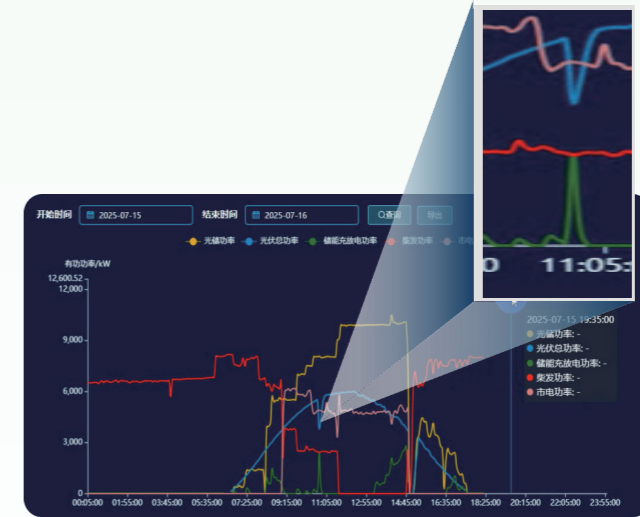


图 2-14：刚果金马本德矿山微电网项目有功快速响应

增强抗冲击能力：构网型储能与柴发联合构网，能有效应对大功率设备频繁启停的冲击。该系统通过智能功率分配，快速平抑电流突变，确保电压稳定，特别适合供电不稳的矿区使用。



图 2-15：刚果金马本德矿山微电网项目 300KW 球磨机突投曲线

3.3 经济运行关键技术

(1) 2:1 高光储比运行技术

矿业行业作为高耗能产业，多位于偏远地区，面临高昂用电成本。采用光储微电网系统，实现 60%–80% 高比例光伏渗透，可减少柴油机运行 70% 以上，显著降低 LCOE。但高光储比（光伏逆变器与储能 PCS 功率比 > 1:1）在离网运行时存在技术挑战：当负载突降时，光伏全部电流将涌向储能系统，易引发过流保护动作，导致微电网电压崩溃。目前行业普遍建议光储功率比控制在 1:1 以内以确保系统稳定。

华为智能微网解决方案通过对光伏与储能的智能协同控制，成功实现离网工况下 2:1 高光储比稳定运行。这一突破性技术使系统度电成本降低 30%，显著提升经济性。在 2:1 高光储比运行状态下，当负载突降时，光伏系统将以储能额定功率 2 倍的速率向其充电。华为智能光伏逆变器经过弱网适应性改造，可以实时感知母线电压和频率的波动，在关键时刻，可以不经 EMS 给出调度指令，自动触发降功率指令，在几个毫秒内把光伏功率降低到 PCS 可以承受的范围，快速完成频率、电压的精准恢复，确保微电网稳定运行。

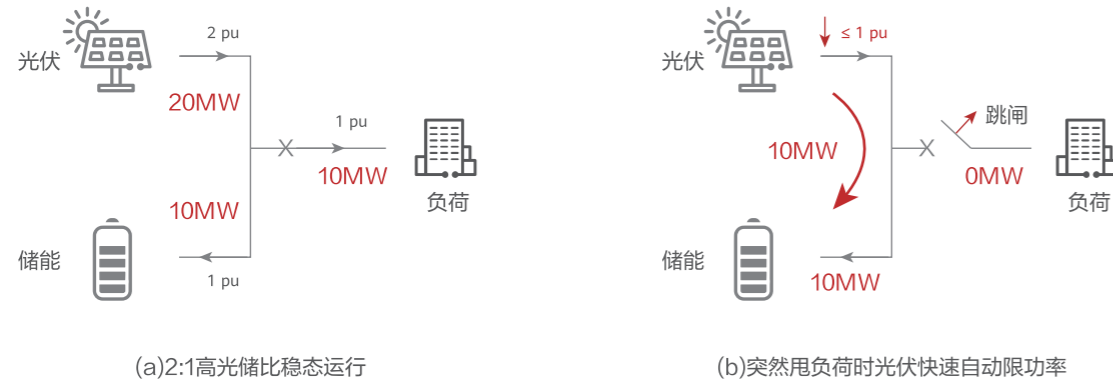


图 2-16：离网高光储比运行原理

(2) 宽 SOC 构网范围技术

构网型储能运行中需具备抗负荷扰动能力，以维持微电网功率平衡。当光伏发电功率较高而负荷突降时，储能需快速由放电转为充电；反之，当负荷较高而光伏骤降时，储能需迅速由充电转为放电。为确保构网能力，储能系统在任何时刻都必须保留足够的充放电裕度，避免完全充满或放空。若容量裕度不足，可能导致系统保护动作或负荷切除，引发微网停电事故。因此，必须在容量顶端和末端预留必要缓冲，以保障系统稳定运行。

基于一体化解决方案的精准 SOC 计算及功率快速分配、多资源统一调度，华为智能组串式构网型储能系统可在纯离网情况下实现 5~98% SOC 范围内构网，而业界离网下储能系统普遍在 10~90% SOC 范围离网运行，因此可节省初始配置 13% 以上。

解决方案

SOC管理四位一体层层加固

站级
微网控制器：站级 SOC 管理
 微网控制器自身配置充放电控制参数，精细化控制到每个子阵
 微网控制器根据子阵上送的充放电能力，快速调度全网的光储柴荷资源，实现功率再分配

子阵级
子阵控制器：子阵 SOC 管理
 子阵控制器自身配置充放电控制参数，精细化控制到每一簇
 子阵控制器统计子阵内部的 SOC 值和充放电能力，并上送至微网控制器

簇级 SOC
智能组串式构网型储能系统：簇级 SOC 管理
 主动识别电池包 SOC 差异，动态调整功率分配，提升整簇 SOC 精度
 自研高精度校准算法自动触发

电池包级 SOC
包级主动均衡模块：电池包级 SOC 管理
 基于华为自研芯片的 3% 高 SOC 精度
 主动均衡、被动均衡双重均衡技术保驾护航，规避电池包级电芯短板效应，实现真正的满充满放

(3) 源荷深度互动提升效益

实现矿山微电网经济最优运行的核心，是解决新能源发电波动与生产用电需求之间的动态平衡问题。如下图所示，光伏和风电的功率输出具有显著的随机性和波动性，理想情况下，负荷功率曲线完全匹配风光出力曲线，则无需额外储能或弃电。即通过负荷的柔性调节能力，实时抵消新能源波动，形成自平衡系统。

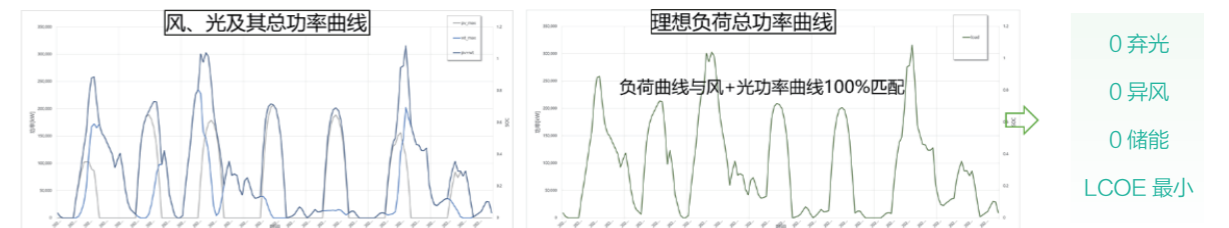


图 2-17：理想场景下发电曲线与负荷用电曲线

负荷分级管理

在新型电力系统的构建过程中，理想化的“源荷互动”模式往往受限于现实条件，如负荷调节能力不足、预测精度有限、设备响应延迟等。为在确保供电可靠性的同时最大化可再生能源消纳，可采用负荷分级管理策略，通过差异化调控方式，在部分可调节负荷上实现近似理想场景的优化效果：

- **关键负荷**需保障持续稳定供电，采用传统源随荷动模式，确保用电安全；
- **可调负荷**在有限范围内跟随可再生能源出力波动，实现荷随源动，提升系统灵活性；
- **弹性负荷**通过动态电价或需求响应激励，实现源荷互动，最大化匹配风光发电曲线，减少弃风弃光。

发用电曲线平衡及持续优化调度

- **日前经济调度**：基于高精度的光、风功率预测曲线，以系统运行的综合成本最小化为目标函数，以电力实时平衡与电量时段守恒为硬约束条件，动态优化储能充放电功率、SOC 状态及柴发出力计划。
- **实时修正策略**：根据超短期风、光预测偏差与负荷波动，在线调整储能功率分配，确保实时功率平衡的同时逼近日前经济性目标。

3.4 矿山微网解决方案设计全流程

(1) 解决方案工程化设计

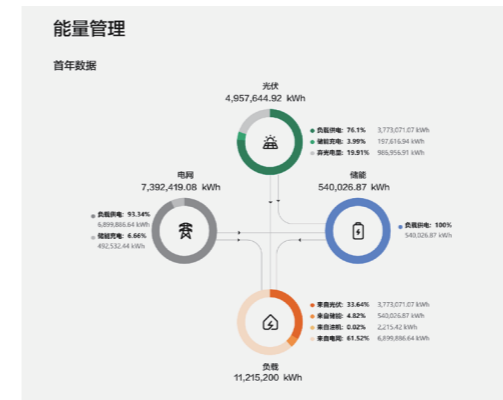
基于历史项目的关键经验提取，针对微电网系统高度复杂性和场景独特性，华为和行业专家共同构建“智能微网解决方案工程化设计”的方法论，通过解决方案“四阶段”、“十四步法”，为客户及设计院提供智能微网解决方案全流程参考。这种工程化思维的本质，是将负荷突变导致的电压崩溃、振荡等“不可见的系统风险”转化为可预研、可配置、可验证的标准化参数，从而在保障 99.99% 供电可靠性的同时，缩短 50% 以上的交付周期，这正是微电网从“定制化项目”升级为“可复制解决方案”的核心突破。百 MWh 级电站目前可以在一个月之内完成上电调试。

矿山微网解决方案全流程指导



图 2-18：解决方案“四阶段”、“十四步”法

(2) 解决方案设计验证三大黑武器



智能规划定容

微电网规划定容是微电网设计的核心环节，旨在优化分布式能源（如光伏、储能、柴油发电机）的容量配置，以满足负荷需求并实现高效经济运行。其核心是在矿山等复杂场景中，通过结合生产技术优化负荷，在满足电力电量平衡条件下，以最优 LCOE 或 IRR 等经济指标为目标，得到最优的光储配置方案。华为 SmartDesign 工具匹配自研光储设备的运行逻辑，并支持 N 年 *8760h 的负荷数据导入，可更加精准完成规划定容及经济性分析，做到设计阶段优化 10% 光储配置。



全球电网仿真中心

矿区微电网仿真通过动态分析系统运行、控制及稳定性，优化能源配置并保障供电可靠性，助力绿色低碳转型。针对矿山负荷波动大、供电距离远等特点，仿真可提前暴露电压崩溃、储能过充等问题，验证光伏 / 储能 / 柴油机等多能源协同能源协同能力，并测试极端场景下的系统冗余及黑启动能力。华为全球电网仿真中心拥有 10+ 仿真工具平台、2000+ 仿真节点，目前具备高精度机电仿真、电磁暂态仿真及半实物仿真能力（HIL），可全面验证稳态 / 暂态的各类复杂工况，确保矿区微电网安全高效运行。



构网型储能平台应用与测试中心

华为构网储能平台应用与测试中心是全球规模最大的电网层级测试实验园区，占地约 2 万平方米，总投资超过 3 亿元人民币，整体测试容量 40MW/100MWh。该中心专注于构网型光伏、构网型储能、光储并离网、微电网电站等解决方案的验证。实物测试平台不仅能在方案设计阶段验证产品的实际性能，确保交付质量，还能在后期项目运维中快速复现场问题，大幅缩短调测周期并提升运维效率。



第三章

华为智能微网解决方案
应用案例

案例 1：刚果金首个铜矿微电网项目

刚果民主共和国电力供应严重短缺，全国仅 9% 人口能用上电，总发电量 2.67GW。电力基础设施薄弱，日均停电 10 小时，迫使每年从赞比亚进口 1.4TWh 高价电力（18-20 美分 / 度电）。这也迫使矿业用电转向依赖成本高达 40~50 美分 / 升的柴油发电，并承受日益严峻的碳税压力。电力供应问题最终导致矿山企业年均减产超 20%。以 M 矿为例存在以下电力供应难题：

- ① 负荷稳定需求大，度电成本高。原有电力系统峰值负荷 16MW，日间平均负荷 15MW，夜间平均负荷 8MW，负荷波动在 10% 范围内。
- ② 冲击性负载频繁启停，容易引发停电。矿区负载包含球磨机和半自磨机等大功率感性负载，采用无变频启动方式，启动时冲击电流过大，容易导致柴发保护停机，引起全站停电，给微电网系统持续稳定供电带来严峻挑战。

解决方案实施

针对这些挑战，华为为 M 矿提供了完整的智能微网解决方案，系统配置包括 18MWp 光伏发电、10MWh 储能系统，并设计与矿区 6 台 1.8MW 柴油发电机联合构网运行，采用华为 MGCC（智能微网控制器）和 SPMS（智能电站管理系统）实现智能控制，从储能系统、二次系统设备到货到全站上电调试完成，设备上电、调试全程耗时 10 天。该方案采用构网型储能技术，实现了光储柴多能协同运行：

- ① 光储在日间稳定提供大部分电力，极大减少对柴油和高价进口电的依赖，度电成本显著下降；
- ② 构网型储能技术显著消除光伏发电的间歇性和波动性，显著减少因稳定性不足导致的停电、减产损失；
- ③ 构网型储能技术在球磨机、半自磨机启动时，瞬间吸收并抵消冲击电流（冲击电流从 7 倍减少为 3~4 倍，冲击持续时间从 6s 缩短为 3s 左右），显著缓解柴发调节压力，保持整个系统的频率和电压稳定，再次将因稳定性不足导致的停电、减产损失将至最低；
- ④ 在并网运行、离网运行场景下，均支持自动调节，实现柴发经济区间运行，光伏最大功率输出，有效减少弃光，发电效率提升 30%，自动控制减少监盘工作量 70%；
- ⑤ 智能微网解决方案支持快速部署，向导性调测，调测周期缩短 50%。

项目成果与价值

针对这些挑战，华为为 M 矿提供了基于构网型储能技术的完整智能微网解决方案，实现了并网、离网下的光储柴协同运行。

在发电侧，该解决方案实现了多项性能突破：光伏功率曲线完美匹配光照曲线，实现自动最大化输出，降低弃光率，无需现场人工调节；构网型储能系统能够在毫秒级快速响应光伏功率跌落，有效规避光储柴不同步引起的系统振荡，整体系统稳定性显著提升，甚至允许柴发停机。光储供电量从前期日均 35MWh 提升至 7 月日均 75MWh 以上，铜产量日增 12.3 吨，价值约 12 万美元。

在用电侧，解决方案同样带来了显著改善：构网型储能与柴发联合构网运行，有效降低大功率感性负载突投的电流冲击风险。球磨机启动时，柴发冲击电流从 7 倍额定值降至 3~4 倍，冲击持续时间从 6 秒缩短至 3 秒左右；同时投切负载时，操作员无需再将光伏功率手动降为零，大幅简化操作流程。该项目已稳定运行一周，光储柴联合系统的整体运行控制已完全由华为智能微网控制器实现自动化管理，系统运行效果获得了电厂

运营方和矿区用户的高度认可。通过智能控制系统的全面接管，不仅确保了能源供应的稳定性和经济性，同时显著降低了人工干预需求，实现了电站运维人员的有效人力释放。

行业影响与示范意义

M 矿光储微电网项目为刚果金矿业提供了创新电力解决方案，通过构网型储能和多能源协同控制技术，显著降低柴油依赖和发电成本，提升生产效益，同时减少碳排放，为非洲矿区能源转型提供了可复制的成功范例。



图 3-1：M 矿 18MW 光伏 +10MWh 储能铜矿微电网项目

案例 2：蒙古 MAK 全球已投运最大的矿山微电网项目群

作为蒙古国主要的矿业巨头之一，MAK 集团正站在未来五年发展的关键转折点。全球贵金属需求与价格的持续攀升，为集团加速扩张创造了宝贵机遇。然而，在蒙古国南部地区，电网覆盖不足、电力供应能力薄弱，已成为制约项目充分释放产能的核心瓶颈。为可持续地突破这一困局，MAK 集团正优先布局绿色能源解决方案，包括大规模光伏发电、先进储能系统及多能融合，以推动如察干苏瓦嘎铜矿等重点项目实现能源自给。通过构建自足、低碳的能源生态系统，MAK 不仅夯实了运营的稳定性和韧性，更在蒙古国的绿色工业转型中，确立了国家级的领导角色。

解决方案实施

项目总体规划建设光储容量达 53.7MW 光伏 + 139.5MWh 储能，分两期推进。其中，一期工程总装机容量为 36.5MW 光伏 + 90MWh 储能，覆盖三个核心站点，分别服务于水泥厂、煤矿厂及工业园区负载。项目于 2024 年初启动规划，凭借华为高效的工程实施能力及大规模、多站点协同的巨型项目集成能力，建设周期仅用时半年，目前已完成建设并陆续投入运营。规划中的二期工程容量为 17.2MW 光伏 + 49.5MWh 储能，预计于 2026 年交付投运。项目整体建成后，将以超百兆瓦时的系统规模，成为全球已投运规模最大的矿山微电网集群，树立矿业绿色能源转型的标杆典范。

解决方案价值

华为智能微网解决方案成功助力该项目攻克高寒、无电，解决电网薄弱区域的矿区稳定供电的世界级难题。在稳定性方面，储能采用虚拟同步发电机技术，支持计划性与非计划性的百毫秒级并离网切换，避免了因外部电网波动导致的频繁脱网和重启，极大提升了供电连续性；在离网运行时可自主构建稳定的系统电压与频率，确保矿山负载持续稳定运行；此外，凭借储能系统在离网工况下的连续高低电压穿越能力及抗变压器投切冲击能力，可以确保系统在面对矿山电机类负载的冲击时不脱网。在可靠性方面，储能具备 -40°C 极端低温稳定运行，全面适应矿区严苛工况。在经济性方面，解决方案实现孤岛模式下光伏与储能功率配比高达 2:1，意味着在相同储能配置下接入更多光伏发电，显著降低 LCOE。通过可再生能源，显著减少碳排放，同时提高能

源利用效率并降低公司整体电力费用。在环境与社会贡献方面，项目每年生产 6400 万千瓦时绿电，减排 76,571 吨，相当于植树 7 万棵，有力助推绿色矿业转型。



图 3-2：蒙古 MAK 53.7MW 光伏 +139.5MWh 储能煤矿微电网项目
* 二期 17.2MW 光伏 +36.5MWh 储能 2026 年完成交付

案例 3：刚果金马诺诺锂矿微电网项目

在全球能源转型与关键矿产资源需求激增的背景下，矿业企业的运营韧性与发展潜力，日益取决于其能源供应的稳定性与成本控制能力。位于刚果金的马诺诺（Manono）锂矿项目，是龙净环保与华为在刚果金合作的首个项目，为我们提供了一个通过新能源投资直接提升核心竞争力的典范。项目初期面临严峻挑战：本地电网基建落后，而远期水电无法满足矿山全部负荷；若依赖柴油发电如何平衡 60 美分 / 度电的用电成本，是保障项目实现预期经济效益的一个关键。

解决方案实施

为突破这一制约，项目决策将光储柴微电网定位为一项长期核心资产进行部署，结合当地光资源以及阴雨天气情况，通过配置 5.1MWp 光伏、2.5MW/5MWh 储能及备用柴发，精准覆盖矿区日间 1700kW、夜间 300kW 的负荷需求。采用华为智能微网解决方案，确保在恶劣工况下的高可靠性与高效运维，并且支持灵活扩容，计划远期增加光储容量接入水电形成水光储柴微电网系统项目。

项目投资价值

这一战略性投入已转化为显著的运营与财务成果，实现经济与环境效益双赢：

- ① 显著的降本增效：系统光储渗透率达 75%，年提供绿电超 618 万度。相较于纯柴油发电，每年直接节省电费支出高达 371 万美元，并减少约 1485 吨的柴油消耗与相关运输成本。
- ② 显著提升生产连续性：自给自足的电力供应彻底规避了外部电网不稳与电价波动的风险，为项目基建与未来生产提供了持续可靠的电力保障，确保了开发进度，预计每年可以覆盖约 2.25 万吨锂精矿的能源消耗，价值约为 2700 万美元。
- ③ 塑造绿色资产属性：该方案不仅解决了当前用电问题，更前瞻性地为矿山注入了绿色基因，为资产在全球能源转型背景下的长期增值奠定了坚实基础。



图 3-3：马诺诺 5.1MWp 光伏 + 2.5MW/5MWh 储能锂矿微电网项目

案例 4：沙特红海项目


沙特红海全球最大光储微网项目是“沙特阿拉伯 2030 愿景”策划的重点基础设施项目，是沙特首次采用 PPP 模式开展的公用事业建设项目，预计为每年 100 万人提供 100% 新能源电力。作为全球首个 GWh 级微网项目，其由 400MW 光伏与 1.3GWh 储能配合构成电网，备用少量燃气机组，该系统对光储 grid forming 与维持电网稳定有极高要求。华为提供整体的智能微网解决方案，全部交付于 2023 年中完成。目前，红海 100% 新能源项目已平稳运行 2 周年，主网的可靠度高达 99.9%。两年间，为沙特提供超过 20 亿度绿电，为沙特在全球提升其绿色形象。红海项目本质就是由光储系统构建的一个 110KV 的电网，其面临着微电网项目如何交付，如何完成电网构建，并最终实现用户端稳定供电等诸多挑战。

华为提供了模块化、预集成的智能微网解决方案，并协助客户一同完成微电网交付的前提准备、计划实施与现场实验的设计工作，达成客户快速交付的目标。红海作为一个光储协同构建的电网，整体运行逻辑以及电网的性能指标等都需要进行详细设计与仿真。华为凭借自身在设计、仿真以微网实验平台的能力，利用近两年时间，帮助完成客户完成微网逻辑的构建与仿真工作，包括但不限于光储协同构网，



图 3-4：沙特红海 400MW 光伏 +1.3GWh 储能红海新城微电网项目

电网 SCR 设计，能量分发逻辑，电网控制的稳态设计，暂态设计，一二次调频调压，PV/BESS/SVG 动态调压，load shedding 后的电网频率、电压控制，1000+PCS 同步黑启动、电网内多开关协同，同步与异步设计等，并在实际环境中验证，达成稳定运行目标。红海微网将会为酒店，海水淡化厂，污水处理厂，飞机场，医院等不同场景供应清洁电力。各种各样的供电设备和不同用户的操作类型，均对电网稳定运行提出挑战。华为智能微网解决方案在实际现场环境中，已完成多类设备以及多种操作的验证，达到稳定运行。



华为与产业伙伴一起为矿山等偏远和弱电网区域提供能源供应的第二选择。

微电网作为一种分布式能源系统，可以极大的增强能源供应的可靠性，可以灵活地满足各种环境下的电力需求，并促进可再生能源的利用和能源供应的多样化。华为坚持“三个融合”理念，即数字技术与电力电子技术融合、光伏与储能融合、能量流与信息流融合，打造智能微网解决方案，利用其先进的数字化和智能化系统，实现对能源的高效管理。通过在构网技术如 GWh 级光储黑启动，更高光储比，更强系统抗冲击能力，更优电能质量及光储柴协同控制等方面的持续创新，华为与产业伙伴一起为矿山等偏远和弱电网区域提供能源供应的第二选择。

参考文献

1	International Energy Agency. (2024). World energy outlook 2024. IEA. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024
2	African Development Bank. (2024). Sustainable Energy Fund for Africa: Annual Report 2024. African Development Bank Group. https://www.afdb.org/en/documents/sustainable-energy-fund-africa-annual-report-2024
3	BHP. (2020). Climate change report 2020. https://www.bhp.com/-/media/documents/media/reports-and-presentations/2020/200915_climatechangereport.pdf
4	Rio Tinto. (2021). Rio Tinto climate transition strategy 2021. https://www.riotinto.com/en/sustainability/climate-change
5	紫金矿业集团. 应对气候变化行动方案 [R]. 厦门: 紫金矿业集团, 2023 [2024-10-20]. https://www.zjky.cn/uploadfile/2024/0329/20240329105507813.pdf
6	Glencore. (2021). Climate Report 2021. https://www.glencore.com/.rest/api/v1/documents/5d9e6452-8e7e-4c26-95f1-8a9516e3a48c/Glencore-Climate-Report-2021
7	淡水河谷. 脱碳战略与管理 [R/OL]. 里约热内卢: 淡水河谷, 2021 [2024-10-20]. https://vale.com/sites/default/files/2021-10/decarbonization-strategy-management.pdf
8	Anglo American. (2018). Sustainable Mining Plan. https://www.angloamerican.com/sustainability/sustainable-mining-plan
9	Fortescue Metals Group. (2022, September). Decarbonisation Strategy and Plan. https://fmgl.com.au/media/kywnj0ix/fortescue-decarbonisation-strategy-plan.pdf
10	oGoldman Sachs. (n.d.). Sustainable finance framework. Retrieved October 20, 2024, from https://www.goldmansachs.com/citizenship/sustainable-finance-framework/index.html
11	JPMorgan Chase & Co. (2023). Climate Action Report. https://www.jpmorganchase.com/impact/our-structure/climate-action-report
12	BloombergNEF. (2025). Global energy cost report 2025. Retrieved from https://about.bnef.com/energy-transition/



版权所有©华为技术有限公司2025。保留一切权利。

非经华为技术有限公司书面同意，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本手册内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。

商标声明

和其他华为商标均为华为技术有限公司的商标或者注册商标。

在本白皮书以及白皮书描述的产品中，出现的其他商标、产品名称、服务名称以及公司名称，由其各自的所有人拥有。

免责声明

本文档可能含有预测信息，包括但不限于有关未来的市场、运营、产品、技术等信息。由于实践中存在很多不确定因素，可能导致实际结果与预测信息有很大的差别。因此，本文档信息仅供参考，不构成任何要约或承诺。华为可能不经通知修改上述信息，恕不另行通知。