

社区研究报告

吉瓦级数据中心 DC 800V 供配电研究报告

编委会作者:

赵峥, 北京抖音信息服务有限公司

周海涛、曾宪龙、张佳斌, 腾讯云计算(北京)有限责任公司

吴双鹤、李莺, 北京百度网讯科技有限公司

高磊、关瑞, 北京快手科技有限公司

张鹏飞、田文耀、李升, 京东云计算有限公司

李玉昇、张瑜、刘继亮, 中移动信息技术有限公司

王志强、刘金一, 中国电子工程设计院股份有限公司

周德文、李小兵, 华为技术有限公司

王海成、马莉莎, 施耐德电气(中国)有限公司

胡兴赞、金玉龙, 远景能源有限公司

张彦和, 中达电通股份有限公司

韩龙飞、王智勇、张俊文, 深圳麦格米特电气股份有限公司

闫昆、杜华锐, 北京世纪互联宽带数据中心有限公司

刘涛、张超, 万国数据服务有限公司

王元月、刘葵, 北京中科合盈数据科技有限公司

唐虎、高远，普洛斯普瑞数据科技（上海）有限公司

伏友文、王坤、胡豆豆、张之瀚、王健涛，杭州士兰微电子股份有限公司

邓昊昆、秦晟煜、刘石磊，惠州亿纬锂能股份有限公司

王安林、赵呈涛、王龙华、姚洪齐，维谛技术有限公司

目录

一、供电链路演进	4
二、800V DC 电源方式对比	4
2.1 背景简述	4
2.2 HVDC 简述	5
2.3 DC UPS 简述	7
2.4 SST 简述	7
2.5 Sidecar 方案简述	9
2.6 对比结论	10
三、800V 机房楼设计架构	15
3.1 背景与现状	15
3.2 800V 直流机房架构重构核心价值	16
3.3 800V 直流供电机房楼设计原则	16
3.4 机房楼供电架构设计	17
3.5 结论与展望	27
四、园区级备电与储能	28
4.1 AIDC 园区级供电系统重构的必要性	28
4.2 园区级备电与储能配置方案探讨	34
4.3 新型 AIDC 供电系统关键装备	38
4.4 新型 AIDC 供电系统控制方案	39
4.5 新型 AIDC 供电系统工作内容	40
4.6 园区级储能应用的挑战	41
五、直流系统配电与保护	43
5.1 直流系统配电	43
5.2 直流系统保护	43

一、供电链路演进

随着生成式 AI 与大模型技术的飞速发展，全球算力需求呈现前所未有的指数级增长态势。从 GPT、Gemini 到各类行业大模型的不断迭代，对算力硬件的性能和密度提出了极致追求。这直接驱动了 AI 服务器单机柜功率的急剧攀升，在短短数年内，已从传统的数十千瓦级别跃升至 100kW 以上，并正朝着 200kW、500kW 乃至兆瓦（MW）级的更高目标快速演进。

支撑这一变革的底层供电架构却面临着严峻挑战。延续数十年的传统交流入柜+54V 直流供电架构，在面对超高功率密度时已触及物理极限，其固有的设计约束成为制约 AI 算力进一步发展的核心瓶颈。而 800VDC 架构通过将电压提升一个数量级，将电流降至原来的 1/15 以下，从根本上解决了低压大电流带来的损耗、温升和布线难题。这使得兆瓦级机柜成为可能。

二、800V DC 电源方式对比

2.1 背景简述

随着 AI 技术的飞速发展，算力做为 AI 的支撑，也迎来了爆发式增长。算力的尽头是电力，AI 电力的需求也呈指数级增长。GPU 与超节点的发展让单机柜功率从 30 多千瓦一路飙升至 130 多千瓦，以及规划中的 600 多千瓦，未来甚至会突破一兆瓦，机柜功率密度提升到传统 IT 机柜的 60 倍。除了如此高的功率密度，更棘手的是其功率负载的波动性：负载可能突然加到额定功率的 1.9 倍，1.6 倍等然后又瞬间卸到零，这种波动是一直持续，每秒数次。电力需求大，单机柜功率密度高，负载的频繁波动性，成为未来 AIDC 的 3 大特点。这让传统供电方案难以有效应对。

传统数据中心供电采用 AC UPS，即采用 AC 转直流，电池接入直流母线中，再从直流逆变到 AC 的多级变换架构，全链路效率 96%（含工频变），此方案在通用机房中无任何问题，但在应对 AIDC 的 3 大特点时，其输出电压偏低（铜排更大），其波动功率的补偿复杂，且占用空间大，成本也较高。而采用直流供电，电池（或储能电容）可直接通过 DCDC 并联在直流输出，可较容

易解决负载波动和备电问题，通过提高 DC 的母线电压，可以减少铜排的使用。另外，直流母线还可以为光伏、储能等绿电提供天然的接入接口，能更好适配数据中心绿色化趋势，直流化是一个需要考虑的趋势。

直流供电最早应用在通讯供电系统中，48Vdc 给通讯设备供电。在数据中心应用中，因其功率更大，为了取得更高的供电效率，扩大供电半径，中国从 2010 年开始引入了 240V 和 336V 标称电压的 DC 供电方案。其中 240V 在国内被推广应用的主要原因：传统服务器能够直接接入 DC240V。随着 GPU 单机柜功率密度的激增，240V 直流供电的局限性也变得明显。以单机柜 1000kW 为例，在 240Vdc 时其电流为 4160A，铜排截面至少 2000 平方毫米，如果把供电电压提高到 800Vdc，其电流为 1250A，铜排截面 600 平方毫米就可以，大大节省了铜的使用，更主要的是减少了 AI 机柜中铜排的体积，把宝贵的空间留给 GPU 算力。800Vdc 在电力系统中仍属于低压（低于 1000Vdc 的为低压），对操作人员要求不高，而且 800Vdc 在当前电动车的超充站，储能中也被广泛应用，其供应链非常成熟。所以把 800Vdc 作为 AIDC 供电的优先选择之一。

2025 年 5 月，英伟达宣布自 2027 年起率先采用 800V 直流供电，2025 年 10 月，英伟达在北美 OCP 全球峰会上正式发布《下一代 AI 基础设施的 800 伏直流架构》白皮书，明确 800V 直流将成为未来 AI 数据中心供电主流方案。中国邮电等相关机构也在近期推出了中国自己的 800V 直流供电的白皮书。

2.2 HVDC 简述

采用国内传统 HVDC 的做法，将输出电压提高到 800Vdc。如下图 1 所示，10kVac（或 35kVac）接入传统变压器降压到 380Vac（或 480Vac）接入 3 相整流模块，3 相整流模块内含 PFC（功率因数校正），隔离 DCDC（直流转直流）输出 800Vdc，所有模块输出并联，经配电给下游负荷供电。

PFC 级一般采用维也纳整流，将 AC 电压变换成 800Vdc，其核心是控制输入电流跟踪输入电压，控制功率因数接近 1。如图 2 所示。该架构在 1993 年被申请专利，当前已经过期，可以不受专利限制。

DCDC 级一般采用 LLC 拓扑，将 800V 电压变换成隔离的 800Vdc，其核心是隔离、稳压和限流，控制输出电压恒定，低纹波，可限制输出电流大小等。如图 3 所示。该架构在 2006 年被申请专利，但有更早的文章揭露该拓扑，可以不受专利限制。

该方案，器件可采用 SiC（600V PFC 级，1200V DCDC 级）提高效率 and 功率密度，可将峰值效率做到 98%。

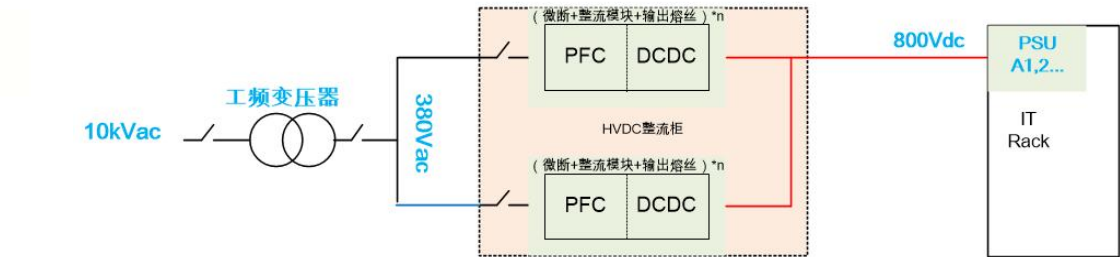


图 1：传统 800V HVDC

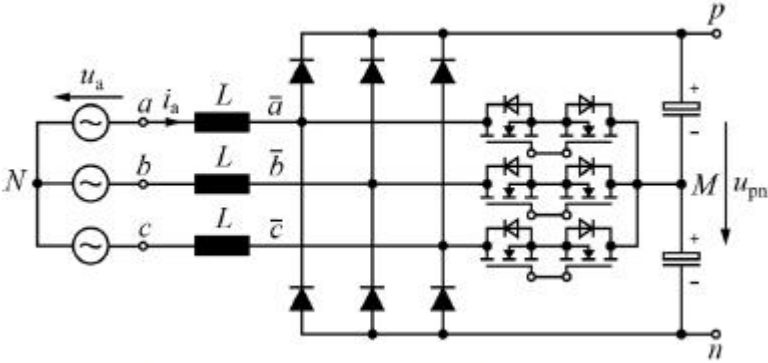


图 2：PFC 级的电路拓扑

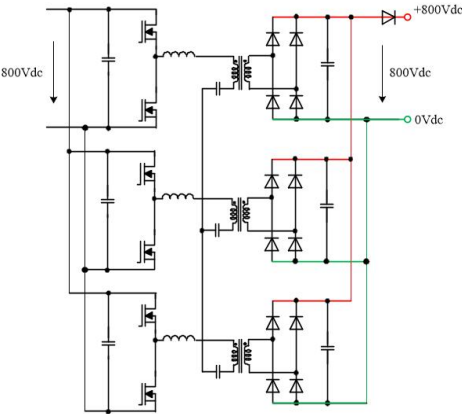


图 3：DCDC 级的电路拓扑

2.3 DC UPS 简述

国标 HVDC 中规定 DC 输出与大地要 floating，这样更安全可靠，功率因数要 0.99，这样才能减少对电网的需求。为此传统 HVDC 的做法中，模块需要有 2 级 PFC 级，和隔离型 DCDC 级，比较复杂。如果采用移相变压器，通过变压器把 PFC 级实现，这样整流模块就不需要 PFC。同时移相变压器副边有多个悬浮绕组，通过副边悬浮绕组将 DCDC 级简化为不隔离的，这样可以大大简化整流器的做法。这个方案就是多绕组移相变方案（巴拿马或 DC UPS 方案）。如下图 4 所示，10kVac（或 35kVac）接入多绕组移相变压器，降压到某一电压，再接入 3 相整流模块，3 相整流模块内含二极管不控整流，非隔离 DCDC 输出 800Vdc，所有模块输出并联，经配电给下游负荷供电。

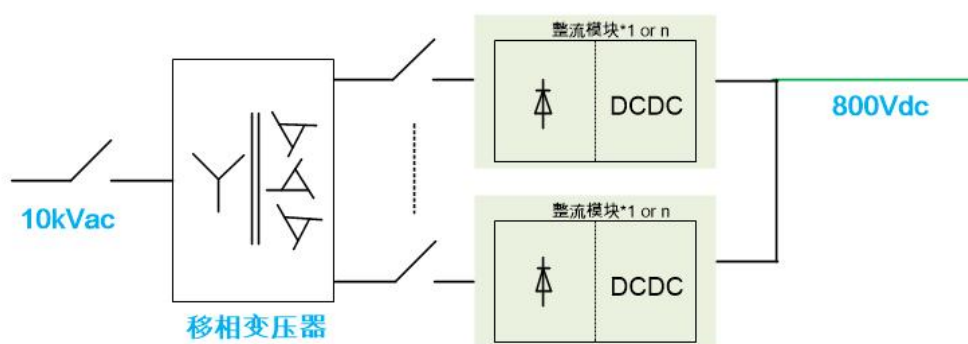


图 4：多绕组移相变 800V 方案（巴拿马）

2.4 SST 简述

上面提到的 800Vdc 方案，都有一个共同点，采用工频变压器，无论移相变还是多绕组变，都是属于低频（50HZ）的范围，都是用硅钢片做铁芯和铜做绕组。随着 AIDC 的大功率，变压器的使用量越来越多，铜的使用也随之上升。为了减小变压器的体积和用铜量，可采用固态变压器（SST）直接将中压 AC 变为 800Vdc，如图 4 所示，其中 10kVac 接入后，分 3 个单相，每个单相有 7—9 个模块串联（参考图 5），每个模块内含 PFC 功能，含高频隔离的 DCDC 功能，输出 800Vdc，所有模块输出并联。再经配电到负载。

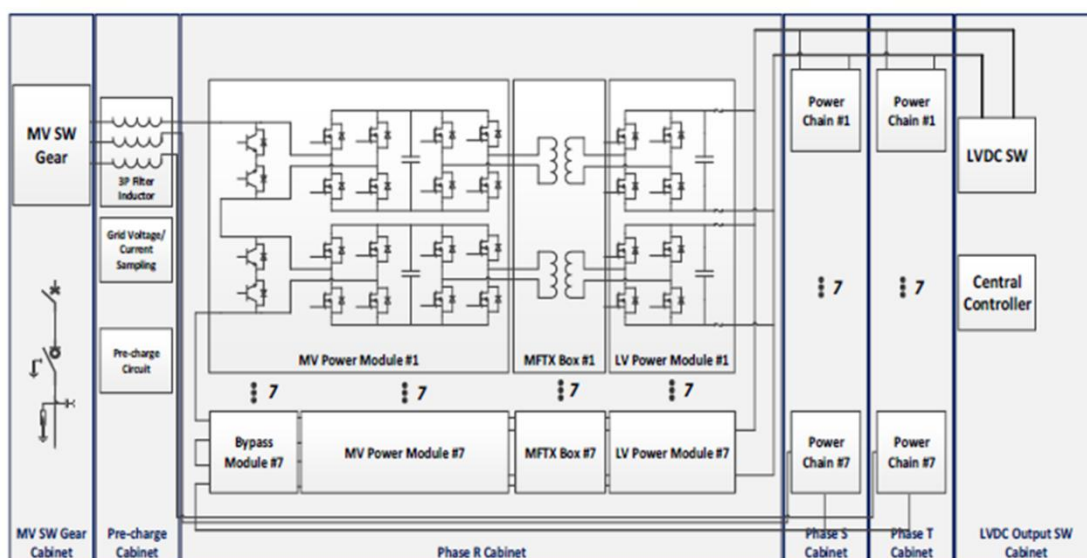


图 4：SST 方案 800Vdc 系统框图

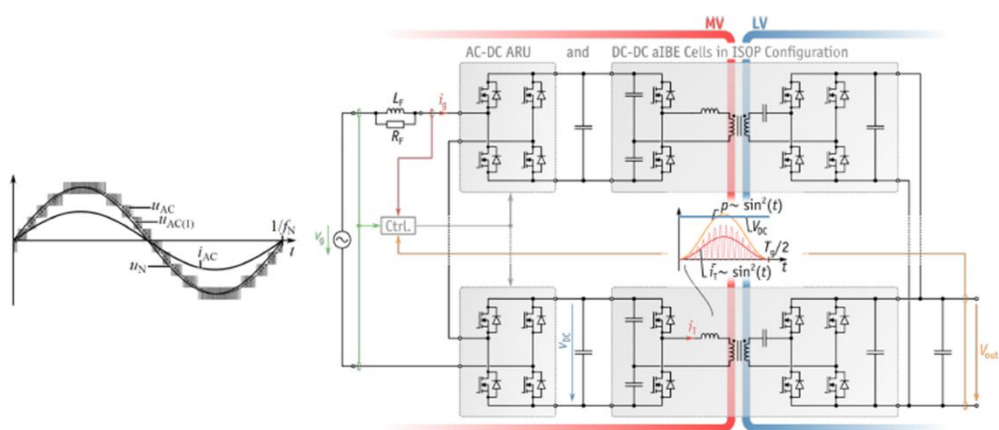


图 5：SST 方案每个单相内的框图

该方案，将变压器高频化（大约 50KHZ），大大减少变压器的体积，减少变压器的铜用量，铁心采用高频导磁材料铁氧体，损耗小，与传统变压器比空载磁芯损耗小很多，无励磁涌流问题，系统效率可达 98%。

该方案有以下局限性：1：模块串联结构，对电网质量问题的抗干扰性与传统变相比不够强。虽然 SST 中有 3 个电抗器，但因为其模块串联结构，当电网异常波动时，会将波动直接加到模块侧，造成模块过压等。2：中压进机柜对运维等有挑战。中压操作规范是，维护时需要 off 输入，但这样当某一模块宕机维护时，就会造成一个供电系统的宕机。影响面较大。并需要对运维人员做培训。3：高频高压绝缘的处理。与传统变压器比，该 SST 变压器很小，只有拳

头大，在这样的尺寸内，需要做 10kV 对低压侧的绝缘，必须采用固态绝缘，而固体绝缘对散热有很大的影响。在长期的冷热应用中，如何保证固体绝缘不失效不裂缝，是一个很大的挑战。

随着国内外对 SST 的加大投入，以上问题会逐步被克服解决，但其需要一个过程，目前在几个 IDC 机房有灰度试验 SST，其效果是可预期的。

2.5 Sidecar 方案简述

800V Sidecar（边车/旁挂电源柜）方案本质上是把 AC/DC 整流、储能、保护、配电单元从 IT 计算机柜内剥离，做成独立机柜，并排部署在 GPU 算力柜侧边，其在 Sidecar 内部将交流市电转换成 800VDC 高压直流电，再用短距离高压线缆送入算力机柜，最后在服务器内部做一级 DC-DC 降压至 GPU 内核低压（12V/48V/54V）。该种方案和 2.1-2.4 方案并不是互相取代的关系，更多的是一种新型分布式部署形式，主要供电链路如下：

380VAC 市电 → 原有集中 UPS 不间断系统（可选） → 800V Sidecar 边柜（三相 AC→800VDC 整流） → 800V 直流线缆 → IT 机柜内置 DC-DC 模块 → 54V 母线 → GPU 服务器。它可以保留现有 UPS 配电设施，也不用改造机房上游高压配电；

一台标准 800V Sidecar 功率柜分为 5 大单元：

1) 交流输入单元

- 单路/多路 380V AC 输入，通过连接器的方式接入。

2) 三相 AC-DC 整流模块（核心功率单元）

- 输入：三相 380 AC；输出：稳定 800 VDC；
- 拓扑：2.1 到 2.4 当中的电源拓扑原则上均可以选择，但需考虑部署的便利性
- 单模块功率：30~100kW
- 模块效率 $\geq 98\%$ ，功率因数 > 0.99 。

3) 就近储能单元（BBU & 超级电容，可选）

- BBU 在国内因为安全性原因部署的可能性不大，更多的是采用拉

远通过锂电池/铅酸电池进行接入，但是业内目前公认的是应该配置 DC/DC 模块而不是直挂母线

- 超级电容则争议比较大，主要在放置位置以及与电解电容的取舍问题

4) 高压直流配电与保护系统

- 800V 直流断路器、电子熔断器、预充电路、防反灌；
- 高压绝缘监测、漏电保护、过压 / 过流 / 短路快速保护；
- 支持 800V 直流热插拔，维护不带电操作，保障人身安全。

5) 母线输出单元

- 多路独立 800VDC 输出端子，通过短距离高压电缆直连相邻 IT 机柜，避免长距离低压大电流母线。

2.6 对比结论

在全球范围之类，OTT/Cloud、COLO 以及设备厂家已有和已发布的 800Vdc 供电规划总结下来存在两大类 5 种技术路线，一类是分布式，靠近 IT，在 DataHall 内入列部署，包括 SideCar $\pm$ 400V、SideCar800Vdc，第二类是集中式，在配电室或配电方仓内部署，包括 DC UPS、HVDC 以及 SST。具体主导者和应用场景如下：

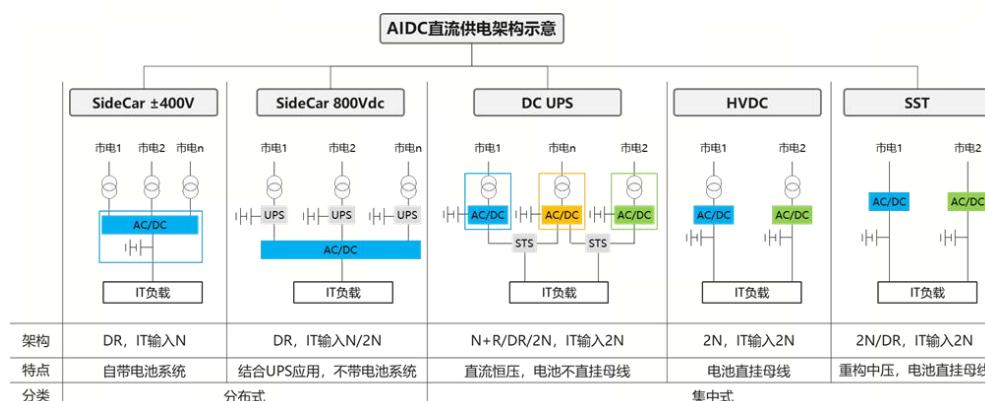
- ① Meta、Google 等海外 OTT 客户主导的 SideCar $\pm$ 400V，在 100kW 及以上高功率机柜内将传统 OCP 48Vdc 及锂电外置到 SideCar 电源柜内，电源柜标配 BBU 锂电模块，同时支持市电到配电变压器低压侧的供电与现有架构保持不变；
- ② NV 在全球范围内推动的 800Vdc 供电架构，通过 SideCar 800Vdc 实现 NVL576 及未来代际的智算整柜 PowerShelf 从 IT 柜内外置到 SideCar 电源柜内，支持自带电池备电，替代现有 UPS 架构，同时也支持市电到配电变压器低压侧以及 UPS 系统与现有架构保持不变；
- ③ 以阿里为代表 DC UPS 架构，直流系统恒压供电，电池不再直挂母线，从 270Vdc 向 800Vdc 发展；

- ④ 中国区互联网企业广泛采用的传统 HVDC 电源，其从 240Vdc 向 800Vdc 升压发展；
- ⑤ 行业广泛推崇的 SST 固态变压器，其是中压侧的供电重构方案，普遍认为 SST 是未来 800Vdc 供电架构发展方向之一。

结合当前主流变压器容量规格，摒除供电架构带来的差异性，选择针对单系统容量为 2.5MW、IT 产出不超过 2.25MW 的电源工程展开论述系统架构、效率、占地和成本。其中占地和成本分析约定模型如下：1 栋 AIDC 产出 40MW IT，部署 72 个 560kW/R 机柜，统一采用 4DR 供电架构，且不配置 STS。

2.6.1 供电架构

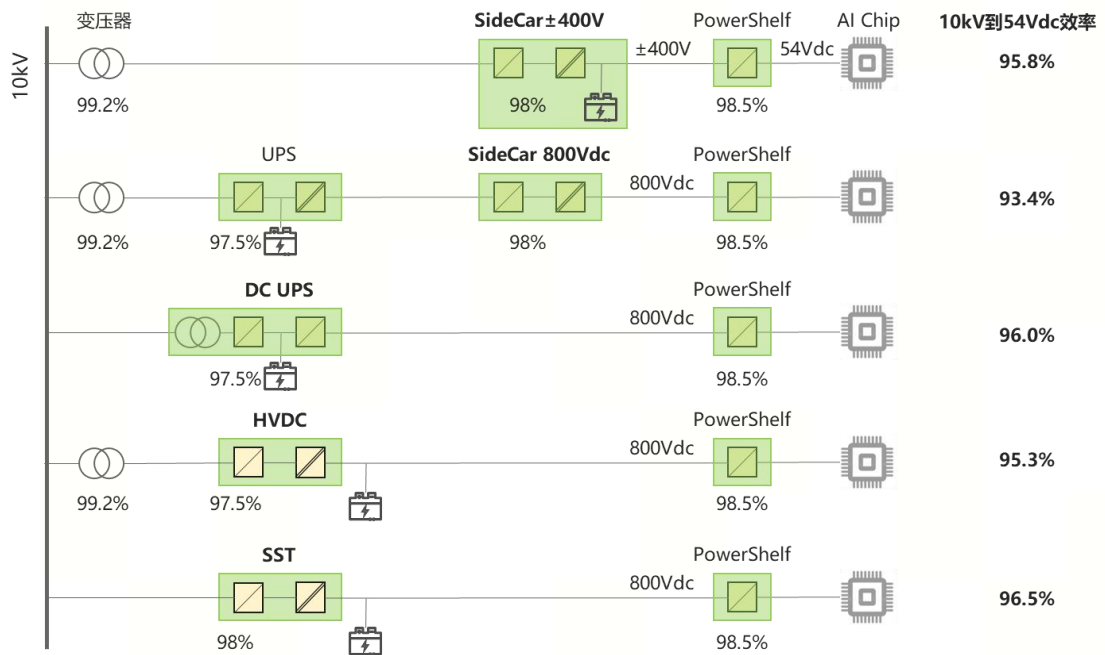
供配电系统有 2N、DR 两种常见架构形式，同时也存在 N+R、RR 等各种形式。2N 系统具有高可用度、结构简单、运维便捷等特点，但其建设和基本电费的支出偏高。DR 系统可用度、结构复杂程度、运维难度、基本电费支出等在三个系统中均处于中间水平，其还具有建设成本低、系统运行损耗小等优点，但其系统在负载分配、设备和线路物理位置冗余等方面需要在数据中心规划和设计阶段重点考虑。N+R 和 RR 系统造价较低，但其可用度、维护便捷性、抗灾能力方面也相对较低。面向 5 种直流技术路线，主流客户选择了不同的供电架构形式，帮助其建造出适合自身应用的高可用、绿色、高经济性 AIDC。



2.6.2 供电效率

效率提升是电源直流化、高压化的核心驱动力之一，5 种直流技术路线链路效率各有优劣。从 10kVac 市电到机柜内 54Vdc Busbar 之间的链路效率上，

SST > DC UPS=SideCar ± 400V=HVDC=SideCar 800Vdc。



2.6.3 占地面积

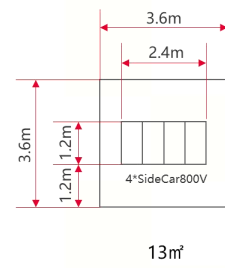
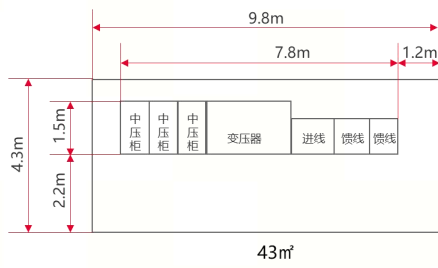
随着服务器芯片算力的提升，IT 机柜单柜平均功率向 100kW 甚至 MW 级演进，供配电占用空间与 IT 空间的比例越来越高，从 1:4 向 3:1 发展，IT“得房率”（或者说出柜率）越来越低，降低供配电占用面积成为 AIDC 行业急需解决的问题。

占地面积上，SideCar ± 400V < SideCar 800Vdc < SST < DC UPS < HVDC。

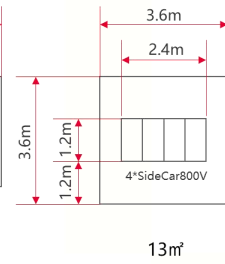
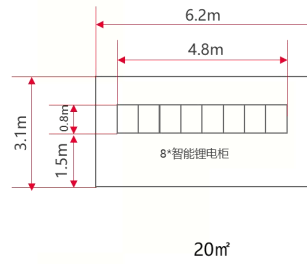
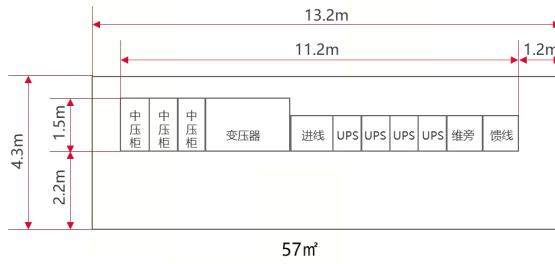
分类	直流技术路线	占地（㎡）	备注
分布式	SideCar ± 400V	1266	24 套 2.5MW 变压器系统、72 套 SideCar ± 400V 带 BBU
	SideCar800Vdc	1626	24 套 2.5MW 变压器系统、72 套 SideCar800Vdc 及外置锂电
集中式	DC UPS	1656	24 套 2.5MW 室内 DC UPS 和锂电
	HVDC	1920	24 套 2.5MW HVDC 系统和锂电
	SST	1632	24 套 2.5MWSST 和锂电

备注：单系统设备布局参考如下

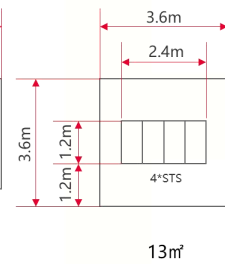
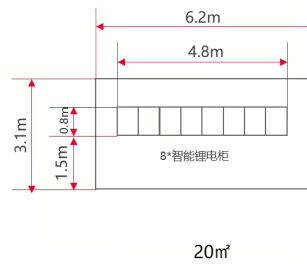
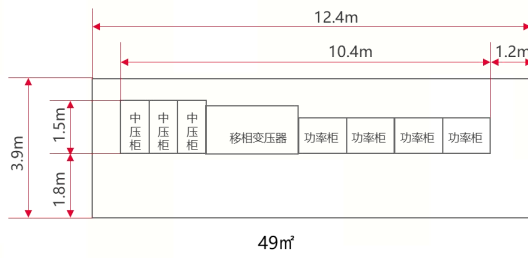
SideCar±400V



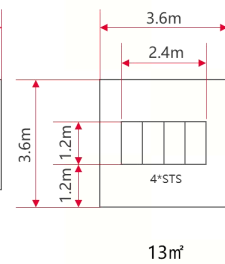
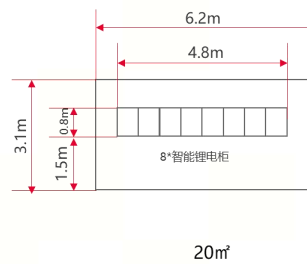
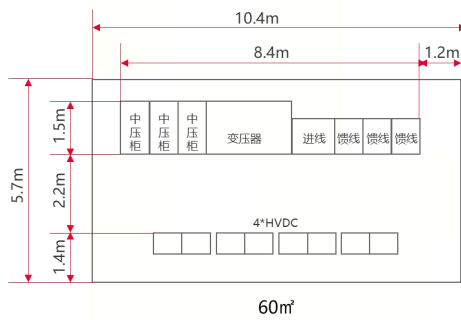
SideCar800V



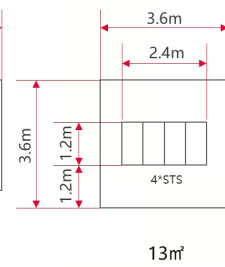
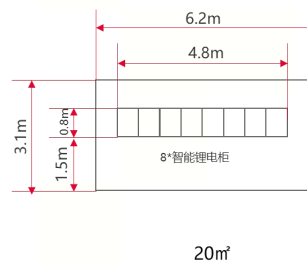
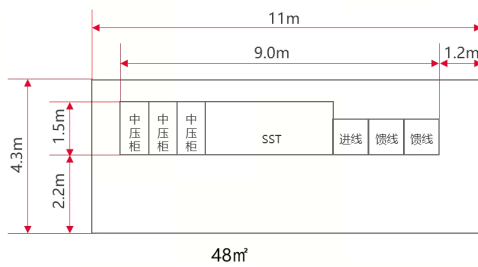
DC UPS



HVDC



SST



2.6.4 成本

5 种技术路线场景与架构多元化，同时各种设备也都研发中为主，故设备本身的成本尚无实据，以下分析只提供一个参考值。

电源成本上，DC UPS < HVDC < SideCar 800Vdc < SideCar ± 400V < SST。

分析项	数量 (套)	分布式		集中式		
		SideCar ± 400V	SideCar800Vdc	DC UPS	HVDC	SST
10kV 中压柜	72	360	360	360	360	360
变压器	24	720	720		720	
低压配电	24	1056	1056		936	840
SideCar ± 400V	72	8280				
SideCar800V	72		3816			
DC UPS	24			3192		
HVDC	96				2208	
SST	24					7200
锂电及电缆	24		3792	3792	3792	3792
智能母线/电缆		1368	1368	605	605	
小计 (万元)		11784	1112	7949	8621	12192
成本系数 (A)		0.97A	0.91A	0.65A	0.71A	A

综上所述分析，直流供电 5 种技术路线的场景、架构深度融合。分布式电源中，SideCar800Vdc 成本较优，电池可外置，也可与现有 AIDC 交流 UPS 供电兼容性应用，是现实版的可落地方案，成本上也有进一步下降的空间；SideCar ± 400V 占地较优，但是锂电入机房，对运维要求较高。集中式电源中，DC UPS 相比 HVDC 优势明显，是当前直流集中式供电最优解；SST 效率、占地有一定优势，成本上未来可下降空间较大。

三、800V 机房楼设计架构

随着人工智能算力产业高速扩张，智算中心单机柜功率密度突破 200kW 并向兆瓦级演进，传统 220/380V 交流、240/336V 低压直流供电架构在传输损耗、空间利用率、动态负载适配、扩容弹性等维度出现系统性瓶颈。800V 高压直流（800V HVDC）凭借低传输电流、少电能变换层级、模块化预制部署、适配新能源并网等核心优势，成为下一代高密度算力机房楼供配电体系的主流革新方向。

本章基于工程实践，梳理高密度算力机房传统供电架构痛点，确立 800V 直流机房楼设计原则；对比分析双绕组工频变压器、多绕组移相变压器、固态变压器（SST）三种 800V 直流实现路径；系统拆解集中式、分布式下 2N、DR、RR 冗余拓扑机房供电架构；从转换效率、空间占用、建设成本、运维难度开展量化对比。并剖析 800V 直流供电机房落地现存技术难点并提出标准化演进路径，为兆瓦级智算中心机房楼供配电整体设计提供工程参考。

3.1 背景与现状

智算场景算力密度爆发式增长，对机房基础设施设计带来巨大挑战。

第一，传统低压架构电流过载损耗失控。采用单一 54V 直流母线供电时，1MW 机柜母线电流近 20000A，单柜铜排耗材超 200kg，线缆发热、电压降、承重超标问题无法根治；220/380V 交流系统需多级 AC/DC、DC/DC 变换，全链路供电效率不足 85%，大型算力园区年电能损耗可达千万度级别。

第二，机房物理空间供需失衡。传统工频变压器、UPS 配电系统体积庞大，兆瓦级算力场景下，机房面积急剧收缩、变配电室面积比例持续增长，机房楼有效部署面积被配电设备挤占，机房楼平面布局、层高、荷载设计面临重构压力。

第三，动态算力负荷冲击供电稳定性。AI 集群存在瞬时峰值、潮汐式波动负载，传统工频变压器响应速度慢，多级变换链路放大电压扰动，易引发 GPU 集群瞬时降频、宕机；同时传统 UPS 交流架构储能接入链路复杂，光伏、风电

等绿电协同并网难度高。

当前行业主流 220/380V AC、240/336V DC 供电体系已无法适配兆瓦级高密度算力长期发展需求。在此背景下，800V 高压直流供电架构通过提升配电电压降低传输电流、简化电能变换层级、适配模块化预制机房，成为业界共同主推的下一代机房能源底座方案，国内多家机构已启动 800V 直流应用试点规划研究。

3.2 800V 直流机房架构重构核心价值

极致能效：简化为“中压 AC→800V DC→机柜侧 DC-DC”两级能量变换，消除 UPS 冗余逆变环节，端到端供电效率提升至 92%~98%，30MW 智算中心年节电超千万度，PUE 同步优化 0.1~0.25。

空间集约化：传输电流大幅降低，母线、线缆截面缩减 45% 以上；SST 固态变压器体积仅工频变压器 1/2~1/3，同等算力规模 IT 变配电室面积减少 40%以上。

动态负载适配：SiC 高频电力电子器件微秒级响应，可抑制 GPU 瞬时电流冲击，母线电压稳定性提升；直流母线天然适配锂电池、光伏、风电直接并网，微网调度、冷启动功能原生支持。

模块化弹性建设：800V 转换单元、配电单元支持工厂预制、模块化堆叠，分期扩容即插即用，适配 AI 机房分批投产模式，降低前期固定资产投入。

3.3 800V 直流供电机房楼设计原则

结合机房工程框架，面向 200kW~1MW 单机柜高密度算力场景，确立 800V 机房楼四个设计原则。

3.3.1 高可靠性与全链路容错原则

机房楼供电系统需满足 A 级容错数据中心标准，消除单点故障。一是转换设备模块化 N+X 冗余 ($X \geq 1$)，单模块故障不影响整机输出；二是供电架构采用无单点故障的冗余隔离设计，局部短路故障仅隔离故障区段，保证算力

机柜持续供电；三是多层次直流电弧、过流、过压保护，针对 800V 直流无过零点、电弧难以熄灭特性，配置极速固态断路器、预充电回路；四是双路独立中压市电接入，配套储能电池作为后备电源，实现电网波动、断电场景零中断供电。

3.3.2 极致效率与高动态响应协同演进原则

全链路效率分层管控：中压转换环节目标效率 $\geq 97\%$ ，机房 800V 直流母线传输损耗 $< 0.8\%$ ，机柜侧 DC-DC 变换效率 $\geq 97\%$ 。动态响应层面，要求 800V 转换单元电压调节响应时间 $< 100\mu s$ ，可覆盖 GPU 毫秒级峰值负载波动；负载 20%~100% 区间维持高效运行，避免低负载工况能效断崖下跌。

3.3.3 高弹性预制模块化部署原则

机房楼整体可采用“预制电力模块 + 液冷算力模块”组合架构，所有 800V 整流、配电、储能单元工厂预制调试完成，现场仅完成管线对接，交付周期缩短 50%。容量弹性适配：支持 250kW、500kW、1MW 多功率机柜混合部署，后期扩容无需改造机房土建结构，仅新增标准化 800V 电源模块堆叠接入母线；机房楼平面预留标准化配电舱位，适配集中式、分布式两种架构灵活切换。

3.3.4 兆瓦级末端配电单元适配原则

针对单机柜兆瓦级功率密度，重构机房末端配电体系：取消传统机柜内置大体积 AC PSU，采用 Sidecar 旁置电源架构，将 800V 转低压 DC-DC 单元外置至机柜侧边电源柜，释放机柜内部算力部署空间；

优化末端母线走线与连接器规格，采用大载流低阻抗定制化铜排，适配 1MW 机柜近 1300A 的持续供电需求；同时配置独立的直流分路保护，单机柜故障不影响同一母线段其他机柜运行，满足高密度场景下故障隔离要求，可支撑下一代超高密度算力机柜的落地需求。

3.4 机房楼供电架构设计

在 AIDC 800V 直流供电技术体系下，符合 GB 50174-2017 A 级标准的三类无单点故障电气架构依然是：2N 冗余、DR 分布式冗余（Distributed Redundancy）、RR 后备式冗余（Repetition Redundancy）。三类高可靠拓扑在可靠性、经济性、功率适配性、

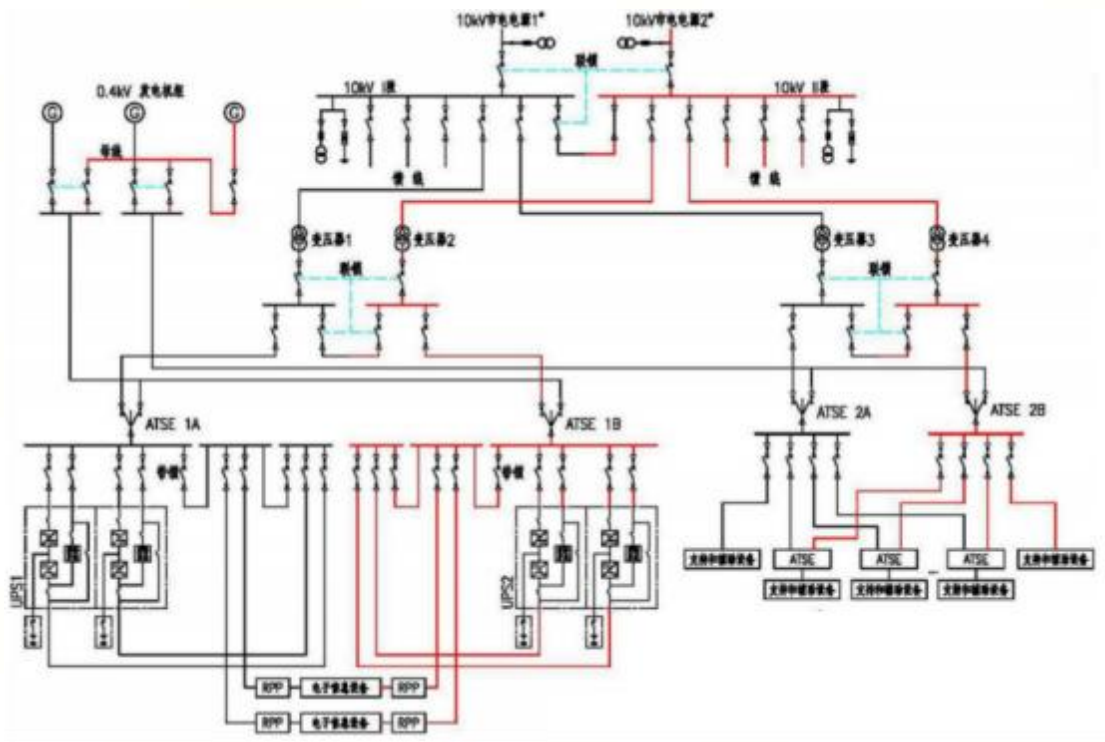
运维复杂度上各有优劣，可对应不同的算力业务场景。以下从拓扑原理、可靠性、全生命周期造价、运维便利性等层面展开深度对比分析。

3.4.1 机房楼 800V 供电电源架构

3.4.1.1 2N 架构：经典容错的高可靠方案

A. 拓扑原理

2N 架构由电气完全独立的完整供配电单元组成，单套供配电单元的容量即可覆盖机房 100% 的满负载需求。从接入链路看，该架构要求双路独立市电引入，后续分别配置中压配电柜、变压器、HVDC/UPS 主机、列头柜，通过两路完全独立的馈线回路，接入机柜的双路冗余 PDU，为服务器双电源模块供电。两套单元全程无任何公共串联节点，保持完全的电气隔离。



2N 架构典型拓扑结构图

常态运行逻辑：两套单元各承担 50% 以下负载，以较低负载率运行，分摊常态供电压力；

故障切换逻辑：任意一套单元发生设备故障、或处于计划性检修状态时，另一套单元可无间断、无感知地承接机房全部负载，故障状态转换过程零中断、

零电压波动。

B. 可靠性

2N 架构是行业内可靠性等级最高的电气拓扑方案，各级变配电均为双电源系统。相互冗余的双电源变配电设备系统独立，相互冗余供电线路供电线路沿不同路径敷设，不会同时受到故障影响；两套独立单元清晰隔离，故障排查与处置不会波及正在运行的另一套系统、故障影响范围可控，整体供电系统具备极高的可靠性、连续性。

系统可用性可达 99.999%，理论年停机时间不超过 5.26 分钟，适配智算关键训练/推理的核心算力业务、核心金融级算力业务等不可中断的高优先级场景。

C. 全生命周期造价

由于全部变配电设备配置完全 1+1 冗余，所以 2N 架构的初始建设成本是三类架构中最高。相较于另外两类架构，设备利用率仅能维持在 40%—50% 区间，冗余资源长期处于闲置状态，单位算力的配电建设成本最高。运营阶段不仅闲置设备仍需维持基本的巡检、维保，产生额外的运维开销。结合初始投资和长期运营成本核算，其全生命周期总造价为三类架构之首。

D. 施工运维

2N 架构的运维便利性是三类架构中最优的：双独立母线的设计逻辑清晰，故障设备与运行单元的电气边界明确，运维人员可在不中断负载供电的前提下，对任意一套单元开展隔离检修、设备更换或升级扩容作业。同时该架构与国内运维人员的传统技术习惯高度匹配，故障排查时长显著低于其他架构，运维难度显著低于另外两种架构。

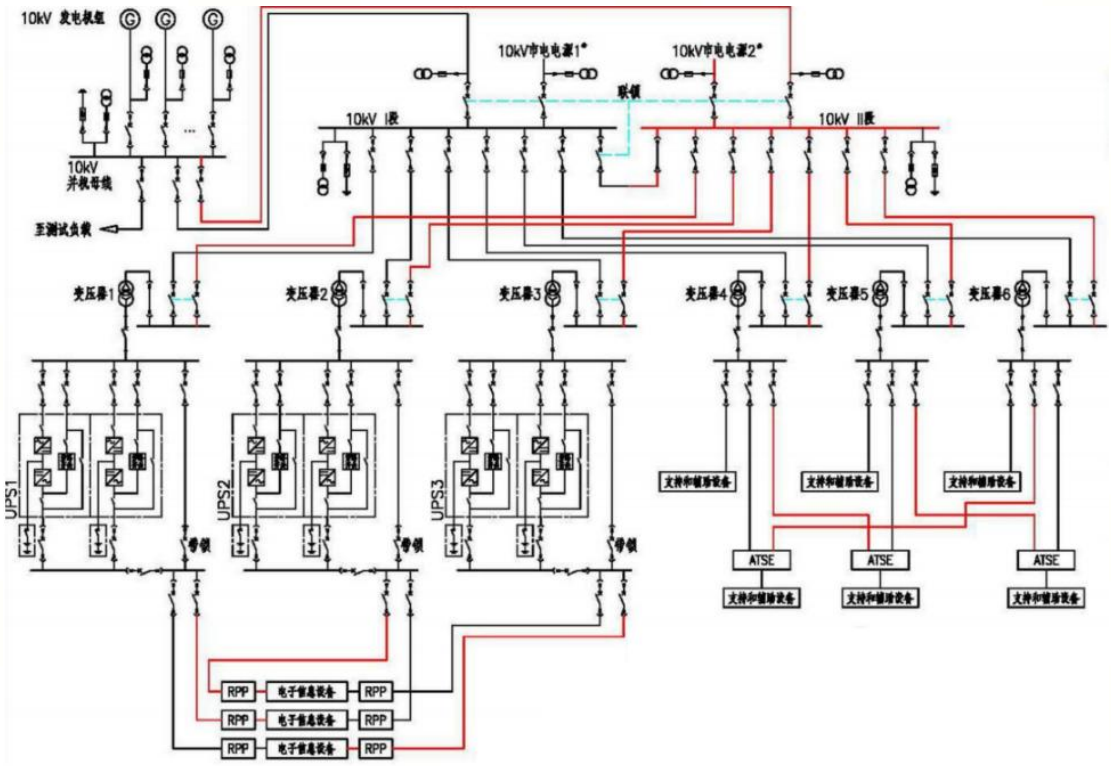
3.4.1.2 DR（分布式冗余）架构：性价比均衡的规模化方案

A. 拓扑原理

DR(Distribution Redundancy, 分布冗余)系统，是由 $(N+1)$ 个同配置的供配电单元组成， $(N+1)$ 个单元同时工作、互为备用 $(N \geq 2)$ ，构成形似“手拉手”样式的供电方式。按照 DR 架构常规冗余程度，通常采用“3DR”（即 2+1 冗余）或

“4DR”（即 3+1 冗余）配置。每个供配电单元可包含独立的中压输入开关、变压器、HVDC/UPS 主机，通过列头柜配出两路完全独立的馈线回路，接入机柜的双路冗余 PDU，为服务器双电源模块供电。任意一个单元故障退出时，剩余单元可共同承接其承载的负载，无需额外的切换动作即可保持供电连续。

相较于 2N 架构，DR 架构以 (N+1) 方式设置单元级的独立冗余，单元负荷分布式承接；任意一个单元故障退出时，其余单元仅平均分摊故障单元的负载。拓扑层面全程无“单点故障”，单元间通过分布式负载分摊实现冗余，既保留了多单元的独立隔离性，又避免了 2N 架构大量冗余资源长期闲置的问题。另外，DR 架构要求负载必须均匀分配在多个供配电单元之中，否则无法保证电源容量充分利用。



3DR 架构典型拓扑结构图

常态运行逻辑：以 3DR（即 2+1 冗余）或 4DR（即 3+1 冗余）整套供配电单元的标准配置为例，平时单套单元负荷率 66%或 75%以下，所有单元同步在线运行，负载均匀分布在环形网络中。

故障切换逻辑：以 3DR（即 2+1 冗余）或 4DR（即 3+1 冗余）整套供配电单元的标准配置为例，任意一套单元故障退出运行时，其对应的负载会通

过末端双路电源，自动转移至相邻“2 套”或“3 套”供配电单元，由相邻单元各承接约 33%或 25% 的额外负载。任意一套单元发生设备故障、或处于计划性检修状态时，另“2 套”或“3 套”单元可无间断、无感知地承接机房全部负载，故障状态转换过程零中断、零电压波动。

B. 可靠性

相较于 2N 系统，DR 架构的容错能力存在一定限制：N+1 套电源组内，能容忍单一供配电单元故障，虽无单点故障，但冗余程度低于 2N；另外，DR 架构中的用电负荷在各单元交叉供电，故障排查过程需要确认故障单元影响范围，对运维人员的专业能力要求更高，同时也存在故障影响范围扩大的潜在可能，但只要做好日常负载管控，避免出现偏载问题，就能维持稳定可靠的运行状态，完全满足可靠性供电要求。

该架构的系统可用性可达 99.99%，理论年停机时间不超过 52.56 分钟，足以满足高优先级的智算关键训练/推理等核心算力业务需求。

C. 全生命周期造价

DR 分布式冗余架构采用“环状互助”的组网逻辑，标准配置为 N+1 套规格完全一致的供配电单元，各单元共同构成容量备份，形成“手拉手”式的环形配电网络。

DR 架构的核心优势是可靠性与经济性的精准平衡：通过分布式备份的设计，将冗余资源从“全量复制”优化为“按需互助”，正常运行工况下负荷率从 2N 架构的 50% 提升至 66%（3DR）或 75%（4DR），初始建设成本较 2N 架构下降 20%~30%。从长期能耗维度看，由于设备常态负载率提升了 16 %（3DR）或 25 %（3DR），适配超大规模 AIDC 园区的规模化成本控制需求。

D. 施工运维

DR 架构的施工及运维难度显著高于 2N 架构，核心痛点总结为以下三点：

一是现场施工的电气管线交错，环形组网的路由复杂度高，配电线路交叉互联，对施工人员和运维人员的技术能力提出了更高要求；

二是故障定位需要跨单元排查，由于负载是分布式分摊在环形网络中，故

障发生后需要逐一核查各单元的运行状态、线路连接情况，才能定位具体故障点，对运维人员的技术熟练度要求更高；

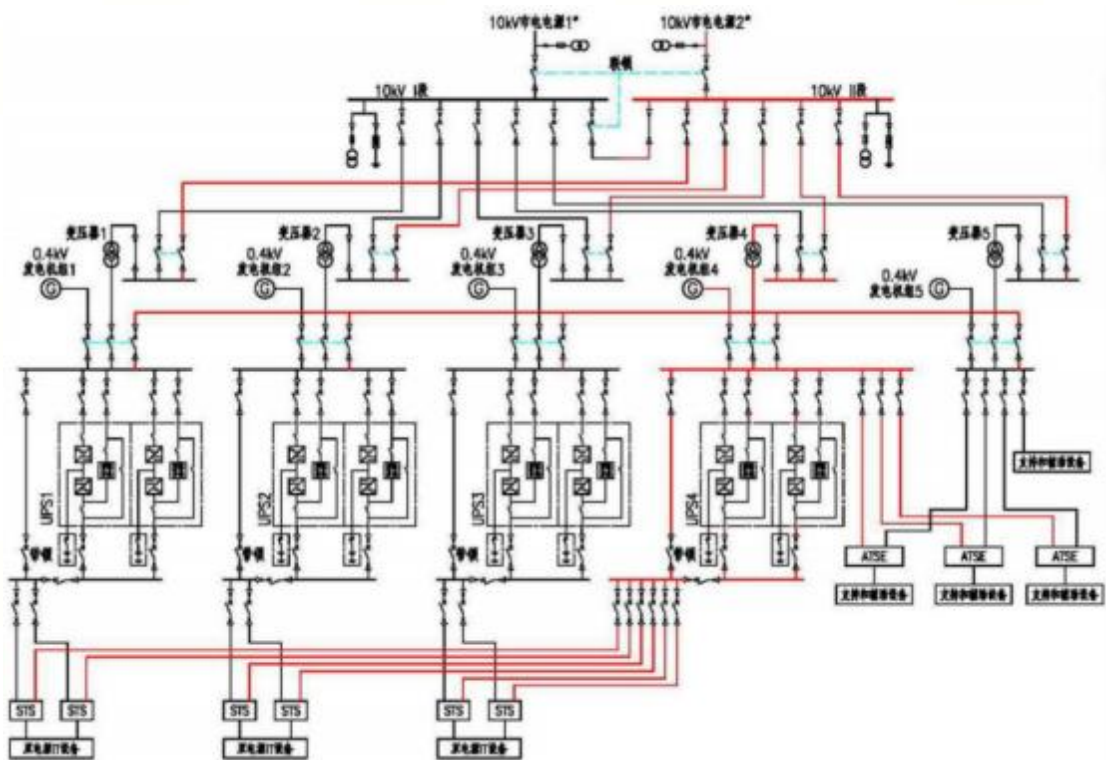
三是计划性检修需要调整整个环形网络的负载分布，操作流程相对复杂，若负载转移设置不当，可能引发额外的供电风险。

3.4.1.3 RR（后备式冗余）架构

A. 拓扑原理

RR 后备冗余架构采用“集中备用”的设计逻辑，由多套主用单元与 1 套或多套公共备用单元组合而成。主用单元的容量与分组后的 IT 负载匹配，负责正常状态下供电；公共备用单元不承接常态负载，始终处于“空载热备”待机状态。

在 HVDC/UPS 输出侧，RR 后备冗余架构通过 STS 在 10ms 以内实现各 IT 负载组的主备电源转换，转换过程不中断 IT 设备供电。在 UPS 输入侧，RR 后备冗余架构通过 ATS 在 100ms 以内实现各 UPS 负载组的主备电源转换，转换过程不中断 IT 设备供电。



RR 架构典型拓扑结构图

常态运行逻辑：所有工作单元满负荷运行，负载率可达 90% 以上，备用单元保持“空载热备”待机状态；

故障切换逻辑：任意一套工作单元故障时，转换开关会以不中断 IT 设备供电的方式完成主备回路切换，将该单元对应的负载转由公共备用单元供电，实现故障冗余保障。

B. 可靠性

N+1 冗余的 RR 供配电架构在容错能力方面存在短板：一是全局一套公共备用单元是整个系统的唯一冗余节点，若处于“空载热备”待机状态下的备用单元自身发生故障很难被准确检测到，若此时发生主用工作单元故障，将直接丧失冗余保护能力；二是切换过程的供电波动风险，STS 的 10ms 以内切换时长虽短，但部分高精度 AI 芯片对供电暂降的敏感度极高，可能触发芯片保护机制，导致算力降频或业务丢包。

该架构的系统可用性可达 99.9%，理论年停机时间不超过 8.76 小时。为提高该架构下的供电可靠性，可考虑采用 N+2“多重冗余”方式增强配置。

C. 全生命周期造价

RR 供配电架构可实现冗余资源全局复用：仅配置一套公共备用单元，为所有主用单元提供冗余保障，正常运行工况下电源设备负荷率可达 90% 以上，但是 UPS/HVDC 等电力电子设备最佳效率区间在 50%负荷率左右，能耗水平并不优秀。但相比较于 2N，RR 架构增加了大量 STS、ATS 装置，使得初始建设成本并不比 2N 架构低。如考虑采用 N+2“多重冗余”方式增强配置，初始建设成本会显著高于 2N 架构。

D. 施工运维

RR 供配电架构的运维复杂度是三类架构中最高的：一是切换环节的运维验证难度大，STS 装置在 AI 冲击负载场景下可能出现故障，需每月定期开展切换测试，测试流程复杂、风险点多。二是备用单元的运维压力大，公共备用单元长期处于“空载热备”待机状态，功率模块及电池的健康状态需持续监控。运

维人员需具备丰富的运维经验，技术门槛显著高于其他两类架构。

3.4.1.4 核心指标对比

结合 AIDC 高功率密度、高可靠性要求、大规模部署的核心特征，三类架构的关键指标对比如下：

对比维度	2N 架构	DR 架构 (4DR、3+1 标准配置)	RR 架构 (3+1 标准配置)
供配电系统 可靠性程度	2N 容错	N+1 分布式冗余	N+1 后备式冗余
系统可用性	≥99.999%	≥99.99%	≥99.9%
单点故障	无	无	无
平时工况下额定 负荷率	~50%	~75%	~90%（主用单元）
IT 供配电投资成本	基准值 100%	约 75%~80%	约 100%
故障切换时间	0ms (双电源系统自然 承接)	0ms (多电源系统自然 承接)	<10ms（STS 静态 切换） <100ms（ATS 机 械切换）
单点故障影响范围	无全局单点，单故障不影响负载供电	无全局单点，单故障仅提升相邻单元负载率	备用单元为全局单点，故障后全系统丧失冗余
运维复杂度	低，故障边界清晰，设备隔离操作简单	中，故障后负载转移需持续监控过载风险	高，切换逻辑复杂，备用单元需定期轮换测试
扩容灵活性	差，扩容需同步新	中，可逐单元新	优，仅需新增工作单

	增两套完整配电单元	增，同步调整负载分组即可	元，备用系统可全局复用
--	-----------	--------------	-------------

3.4.1.5 架构优劣势解析

A. 2N 架构：核心算力集群的可靠性首选

核心优势：一是可靠性最好。全链路两套独立系统彻底消除单点故障，可同时应对一路市电中断、单台变压器故障、单组 UPS 检修等多重异常；不依赖双电源切换环节就能实现无中断故障承接，不会因切换波动触发高端 AI 芯片保护机制，且故障边界清晰、运维简单；适配对业务连续性、可靠性要求极致严苛的核心算力场景，适配智算关键训练/推理的核心算力业务、核心金融级算力业务等不可中断的高优先级场景。二是最典型架构运维与合规性最优。架构逻辑简单，故障边界清晰，运维人员技能要求低，且完全契合 GB 50174-2017 的 A 级条文，各地住建验收标准统一，无合规风险。

核心劣势：一是初始投资成本高企，更多冗余资源配置，对于超大规模 AIDC 园区来说经济性较差。供配电设备与线缆配置翻倍，单位算力配电成本较 DR 架构高 25%~30%。二是空间占用大。两套完整的配电设备需占用大量机房电力室面积，在土地资源紧张的一线城市园区，会直接挤占算力机柜的部署空间，降低单位面积算力产出。

B. DR 分布式冗余架构：超大规模 AIDC 的性价比方案

核心优势：一是可靠性与成本的均衡性最优。在满足无单点故障的 A 级要求下，正常运行工况下电源设备负荷率从 2N 架构的 50% 提升至 66%（3DR）或 75%（4DR），单位算力投资成本较 2N 架构下降 20%~25%，同时空间利用率提升 30% 以上，非常适合万柜级超大型 AIDC 园区的规模化部署。二是故障无切换中断。与 RR 架构不同，DR 末端采用双路直连负载，故障时为自然负载转移，无 STS 切换过程，不会出现供电瞬时中断，可适配 AI 芯片对供电暂降敏感的特性。三是扩容弹性优于 2N。可根据算力集群的建设节奏逐批次新增配电单元，无需一次性投入全套冗余设备，匹配 AI 业务逐步上线的建设周期，降低初期资金压力。

核心劣势：一是容错能力存在明确边界。仅能承受单套配电单元故障，若出现相邻两套单元同时故障（即相邻系统的二次故障），将直接导致负载失电；且单单元故障后，相邻单元负载率从 66%（3DR）或 75%（4DR）跃升至 100%，若恰逢 AI 负载峰值，易出现过载保护跳闸，引发次生故障。二是末端配电设计复杂。“手拉手”组网要求每一组负载都与两套配电单元连接，电缆与母线路由交叉多，施工与运维难度大；在高功率密度场景下，末端大电流线缆的敷设与温升管控难度显著提升。三是标准规范不统

一。目前版本国标未对 DR 架构给出明确的设计细则，不同设计院、不同地区的验收口径存在差异，部分项目需额外开展容错验证，增加了不确定性

C. RR 后备冗余架构：非核心场景选择

核心优势：一是设备利用率极致。公共备用单元的复用模式使主用单元正常工况下运行在 90% 以上的高负载率区间，变压器、UPS 等核心设备数量容量精简；但相比较于 2N，RR 架构增加了大量 STS、ATS 装置，使得初始建设成本并不比 2N 架构低。二是扩容灵活性最强。新增算力集群仅需配套工作单元，备用系统可全局复用，非常适合分批建设、负载逐步上线的推理类 AIDC、边缘计算节点与测试机房。

核心劣势：一是容错等级最低，存在公共备用供电单元“空载热备”待机状态下故障很难被准确检测到问题，增加了供电风险。备用单元是整个系统的唯一冗余节点，若备用单元自身故障，所有工作单元都将失去备份，单次故障的影响范围远大于 2N 与 DR 架构，不符合核心训练业务的高可靠要求。二是高功率场景适配性差。AI 负载存在 1.5 倍的瞬时冲击电流，STS 静态切换开关在大电流、高冲击场景下易出现误动作或器件损坏，目前国内几百千瓦级的大电流 STS 成熟度不足，制约了 RR 架构在高密 AIDC 中的应用。三是切换过程存在电压暂降。10ms 以内的切换时间虽短，但部分高精度 AI 芯片与存储设备仍可能出现算力降频、数据丢包等问题，无法满足训练类业务的严苛要求。

3.4.2 集中式与分布式 800V 电源方案

集中式架构核心特征：在机房楼设置集中的变配电室，所有 SST / 工频转换设备集中布置于各层或整层，电源设备高度集中管理；集中 800V 直流电源设备统一配出 800V 直流供电线路放射式敷设至 IT 机房，机房内部配置末端 DC-DC 服务器电源单元。

分布式架构核心特征：将小型模块化 SST/800V 整流单元分散布置于每层 IT 机房边缘、机柜列头，中压/低压交流电源引入机房，就地生成 800V 直流适配兆瓦级高密度机柜用电需求。

集中式与分布式架构对应冗余拓扑同样可分为分布式 2N、分布式 DR、分布式 RR 三类，底层冗余逻辑与集中式一致。差异在于 800V 直流转换单元是否分散布置在机房模块内部，机房楼变配电室是够只设置中压配电/常规变配电。

分布式架构核心优势：

无需大面积变配电室，机房楼全部建筑面积可用于部署 IT 算力机柜，单位面积算力产出提升；

分模块独立供电，单模块故障不影响其他楼层算力运行，故障影响范围缩小；

分期投产灵活性极强，单楼层算力扩容仅新增对应层分布式电源模块，无需改造主楼中央配电系统。

分布式架构短板:

电源设备分散在各楼层机房，运维巡检动线拉长；楼层配电设备占用少量 IT 机房机柜位，单机层算力部署数量略有折损。

集中式与分布式架构关键指标量化对比

评估指标	集中式 800V 架构	分布式 800V 架构
扩容改造难度	高（中央配电改造）	低（分层模块化扩容）
故障影响范围	大，影响变配电室供电范围内机柜。	小，影响单个机房机柜。
运维管理难度	低（集中管控）	中（分散巡检）

3.4.3 电池备电配置方案

800V 直流机房储能系统分为两种部署模式：集中式架构配套大容量锂电池/铅酸蓄电池室，电池组直接并联 800V 总配电母线，集中为整套电源提供后备电源；分布式架构采用小容量锂电池模组，就近接入机房侧 sidercar 内 800V 配电母线，直接为各台智算算力设备提供后备电源。

电池选型可根据需求采用磷酸铁锂模组/铅酸蓄电池，标称电压匹配 800V 母线，可为电池配置 DC-DC 升压变换；备电容量按满载 15min 配置，满足电网故障停机缓冲、黑启动需求，同时可平抑 AI 瞬时峰值负载，降低变压器峰值容量配置。

3.5 结论与展望

3.5.1 研究结论

未来，AI 算力单机柜向 250kW~1MW 兆瓦级演进背景下，传统交流、低压直流供电架构存在损耗高、空间利用率低、动态负载适配差、扩容弹性不足等系统性瓶颈，800V 高压直流是机房楼供配电架构革新的必然方向。

800V 直流机房设计需遵循高可靠容错、极致高效动态响应、预制模块化弹性部署、兆瓦级末端配电适配四大顶层原则，指导机房楼土建、配电、机柜、储能一体化设计。

三类 800V 能量转换路径分层适配不同项目阶段：双绕组工频方案适合短期存量改造，移相变压器适配中型新建机房，SST 固态变压器是长期超大型智算中心主流技术路线，综合效率、空间、扩容优势显著。

集中式电源架构运维集中、可靠性上限高，适合高等级核心算力；分布式架构母线损耗低、机房面积利用率高，完美匹配兆瓦级高密度机柜，是未来新建 AI 机房优先选型；2N/DR/RR 三类冗余拓扑可根据项目可靠性、成本需求灵活组合。

3.5.2 发展展望

未来 800V 直流机房楼将向三大方向持续迭代：一是电力电子深度集成，SST、储能、DC-DC 转换单元一体化预制，进一步压缩配电设备体积；二是直流微网协同，800V 母线打通光伏、储能、算力负载，实现园区能源自主调度，降低市电依赖；三是全链路数字化管控，依托数字孪生机房实时监控 800V 母线损耗、设备状态、负载波动，实现供电系统预测性运维。

随着国产碳化硅功率器件、高压直流成套设备技术突破与行业标准完善，800V 高压直流将全面替代传统供配电架构，成为下一代智算中心机房楼标准化能源底座，支撑国内 AI 算力产业可持续、绿色低碳高速发展。

四、园区级备电与储能

4.1 AIDC 园区级供电系统重构的必要性

过去十年，数据中心的能源议题主要聚焦于 PUE 优化、制冷效率提升、局部冗余设计和常规供配电可靠性保障。在传统互联网、企业云和通用 IDC 时代，这一套以“市电+UPS+柴油发电机”为核心的体系，曾经有效支撑了数据中心由中小规模向区域型大型园区的发展。然而，大模型训练、推理服务、云原生平台、高性能计算和智能制造等新应用的快速增长，正在把算力基础设施推向一个完全不同的阶段：算力中心从原来的“高可靠用电建筑”，逐渐演化为“超大规模、超高密度、强波动、强耦合”的新型电力负荷中心。

与此同时，供电环境也在发生深刻变化。全球范围内，电网接入周期拉长、容量指标收紧、电价波动加剧、碳约束持续强化，而风电和光伏等可再生能源

占比不断上升，电力系统整体正从“可预测、集中式、单向流动”转向“波动性增强、双向互动、源网荷储协同”的新阶段。换句话说，算力负荷在变，电力系统也在变；二者叠加后，传统数据中心供电模式的边界被迅速暴露出来。

从全球区域来看，北美是全球超大规模数据中心和 AI 基础设施建设最活跃的地区之一，但其热点州和重点园区已经出现变电站接入等待、输配电配套延后和高等级可靠电源资源紧张的问题。欧洲的数据中心虽然单体规模相对克制，但面临更严格的碳约束、电价波动和社会环境约束，因而更早开始探索新能源、储能、需求响应和低碳备用电源。中东地区凭借土地和能源条件吸引大型算力项目落地，但高温环境、长距离供能和极端工况下的韧性要求，同样在推动园区级综合能源体系建设。中国则表现出典型的“双重约束”：东部算力需求旺盛、接网资源紧张、绿电获取成本较高；西部资源富集地区具备更低电价和更高新能源占比，但往往需要解决弱网接入、电能质量和高等级保供之间的矛盾。

因此，GW 级算力中心的能源命题已经不再是“如何配一套更大的 UPS 和更多的柴油机”，而是“如何建设一个能够承载超大规模高品质算力、具备韧性、经济性与绿色协同能力的新型园区供电系统”。这意味着供电系统必须从设备级冗余思维，升级为系统级协同思维；从被动应急思维，升级为“备电、调峰、调频、保供、消纳绿电、优化成本”并重的多目标运行体系；从静态规划思维，升级为实时感知、动态优化和算电协同的运营思维。需要用构建大电网的思路去构建 AIDC 供电系统。

4.1.1 外电引入的逻辑变化

全球多个国家和地区已经出现算力项目“等电”的现象。所谓“等电”，并非当地没有发电能力，而是没有足够高质量、可承诺、高可靠的大容量接入条件。这种约束在超大规模数据中心时代会更加突出。对于算力中心而言，电不仅要有，还要稳、快、可扩展、可预测。

在北美，超大规模云服务商和 AI 企业集中的区域，普遍面临变电站新建周期长、输电扩容审批慢、局部电网承载力不足等现实问题。即使项目业主具

备充足投资能力，也往往受制于公共基础设施的建设节奏。欧洲则在电网容量之外，还要考虑电价结构、碳排放约束和环保许可，园区单纯依赖大规模市电接入的模式越来越难兼顾经济性与可持续性。中国“东数西算”热点地区则面临负荷密度高、土地紧张、接网指标受限等问题，使得“先拿到足够优质电力再建算力中心”越来越难。

在这种背景下，供电系统重构的核心目标之一，就是让算力园区从“完全依赖外部电网的被动用户”转变为“具备局部自治能力和调节能力的新型电力节点”。园区需要拥有一定的内部缓冲、快速支撑、局部平衡和事故恢复能力，以应对接入延迟、电压波动、频率扰动、区域性紧张供电乃至极端灾害事件。没有这套能力，GW 级算力中心的可落地性与可扩展性都会受到严重限制。

4.1.2 绿电消纳的需求

全球主要智算中心分布区域，对绿电消纳和碳排放的要求正在持续提高。不同区域侧重点有所不同，北美作为全球超大规模数据中心最集中的区域，越来越强调通过 PPA 购电协议、可再生能源证书和本地清洁能源接入提升绿电使用比例，头部科技企业普遍提出 100%可再生能源或无碳能源匹配目标。欧洲的要求更为严格，不仅关注绿电采购比例，还更加重视碳排放总量、能源利用效率、余热回收以及数据中心对区域电网和社区环境的影响，部分国家已将数据中心纳入更严格的能效和碳监管框架。中国则在“东数西算”、双碳目标和绿色数据中心政策推动下，持续提高数据中心绿电使用、PUE 控制和节能降碳要求，尤其鼓励在新能源富集地区建设大型智算中心，提升可再生能源消纳比例。中东及部分亚太新兴区域虽然监管要求相对仍在完善，但随着大型 AI 和云计算项目落地，也开始更加关注低碳供电、能源效率和绿色园区建设。总体来看，全球智算中心正从“保证供电”走向“既要可靠供电，也要更多消纳绿电、降低碳排放”的新阶段。

4.1.3 新能源电网及 AIDC 负载波动带来的双重稳定性挑战

全球主要智算中心分布区域中，新能源电网占比正持续提升。欧洲可再生能源占比较高，部分国家电力结构中风电、光伏、水电等新能源占比已超过

40%甚至 50%；中国近年来新能源装机快速增长，全国发电量结构中新能源占比持续上升，在西北、华北等资源富集地区更高；美国整体新能源占比也在不断提高，部分州已形成较高比例的风光供电结构。总体看，全球主要智算中心所在区域的新能源电力占比，已普遍进入 20%~50%+的提升通道。

新能源电网的主要特征是绿色低碳、出力波动大、时空分布不均、对灵活调节资源依赖强。风电和光伏具有随机性、间歇性和波动性，发电高峰往往与负荷高峰并不完全一致，因此新能源占比越高，电网越需要储能、灵活电源、需求响应和更强的调度能力来维持稳定。

另一方面，智算中心集群在大模型训练、推理切换和高密度算力调度过程中，往往会出现较大的瞬态功率波动。AI 训练集群负载瞬时波动率可达 50%，毫秒级电压波动就会造成 GPU 离线、模型训练中断。这对智算中心自身供电系统和外部“弱电网”都提出了更高要求。对园区内部而言，负荷快速爬升或骤降可能引起母线电压波动、UPS 和配电设备冲击加剧，甚至增加保护误动、局部过载和供电中断风险；对制冷、电池和备用电源系统来说，也会带来联动响应压力。

对“弱电网”而言，由于其本身短路容量低、频压支撑能力弱、抗扰动能力不足，智算中心的大幅瞬态波动可能进一步放大电压闪变、频率偏移和潮流冲击，严重时甚至影响局部电网稳定运行。

4.1.4 巨量电费支出

从全球总量看，当前数据中心已投产负载规模可大致为 50 – 80GW 量级，而随着 AI 训练和推理需求快速增长，未来几年继续快速上行。北美目前仍是全球最大的数据中心与智算中心集聚区，大致在 25 – 35GW 左右。欧洲整体数据中心负载规模大致在 10 – 15GW 左右。亚太整体规模大致在 15 – 25GW 左右，其中中国大致为 10 – 15GW 的数据中心在运行负载，且智算中心占比正在快速上升。中东、拉美及其他新兴区域目前总体仍相对较小，合计大致在 3 – 8GW 左右，但增速较快。

在美国，数据中心用电量目前大致已占全国用电的 4%~5%，部分热点州占

比更高；欧洲整体约在 2%~3%左右；中国数据中心整体耗电量占全社会用电比例大致在 1.5%~2.5%区间，并仍在持续上升。随着大模型训练和推理负载快速增长，未来这一比例还可能进一步提高。

从成本结构看，电力支出是智算中心全生命周期成本中的关键组成部分。若按基础设施视角衡量，包括变配电、制冷、备用电源、储能及运维等，电费通常约占全生命周期总成本的 35%~40%；对于电价较高、运行利用率较高或高密度算力中心，这一比例则更高。

换句话说，电力成本不仅决定智算中心的日常运营费用，也是影响选址、供电方案、绿电配置和长期投资回报的核心因素。因此，未来智算中心竞争不只是算力设备竞争，也越来越表现为能源获取能力、用电效率和电力成本控制能力的竞争。

4.1.5 柴发作为 AIDC 备用电源的挑战

柴油发电机作为数据中心长时后备电源，技术成熟、行业接受度高、可快速形成保供体系，因此在过去长期扮演“最终兜底”的角色。但在能源转型趋势下，柴油机方案的局限性愈发明显。

第一，排放和噪声问题越来越突出。尤其在欧洲和部分北美地区，柴油机长时间运行受到严格的环保许可约束，不适合作为高频使用的灵活资源。

第二，燃油储备和补给链在超大规模园区中难度明显增加。若按照极端场景设计数十小时乃至更长时间保供，园区需要配置大规模储油、消防和安全保障体系，既增加投资，也带来运营管理压力。

第三，从资产利用率看，柴油机大部分时间处于待命状态，只有在低概率事故场景下才发挥主要作用，静态资产占比高而日常价值释放有限。

第四，柴油发电机组供应链扩产能力有限，交付周期也存在不确定性，这使备用电源成本持续上升，柴发在数据中心 Capex 中的占比不断攀升。

第五，新能源电网稳定性不足，会导致频繁的倒闸投切，柴发启动。欧美多地环保新规限制柴发常态化使用，原有冗余备电体系失效。

第六，柴油发电机动态响应较慢，且在频繁启停和高冲击工况下运维压力较大，难以适配智算中心的瞬态负荷冲击。

因此，全球算力中心开始从“柴油机是唯一长时后备”转向“柴油机保底、多元资源协同”的新思路。储能可承担快速支撑和短中时调节，燃气轮机或燃气内燃机可承担更高利用率的长时支撑，燃料电池与氢氨路线则为未来低碳替代提供方向。其本质不是立即淘汰柴油，而是通过供电系统重构，降低对单一高碳备电方式的过度依赖，让后备体系从静态冗余资产转变为能够参与日常运行优化的柔性资源组合。

4.1.6 多目标的系统级效益提升将成为趋势

在“源、网、荷、储”系统中，GW 级智算中心不能是单纯追求“不断电”的用电终端，需要逐步成为电力系统中的可调节主体。其原因在于，随着新能源占比持续提高、电网运行环境更加复杂，以及智算负荷规模和波动性不断增强，系统运行目标不再是单一的，而是呈现明显的多目标特征。

在某些阶段，特别是电网扰动、局部弱网运行或重要任务保障场景下，系统必须把安全稳定放在首位，优先保障频率、电压、功率平衡和关键负荷连续供电；在新能源富余、碳约束增强或绿色算力要求提升的阶段，系统又可能将绿电消纳比例、碳足迹优化作为优先目标；而在电价波动明显、辅助服务市场机制逐步完善的环境下，经济性和综合收益最大化又会成为重要目标。这意味着算电协同系统必须具备在不同运行目标之间动态切换和综合权衡的能力。

在这一过程中，储能系统的角色正在发生根本变化。过去，储能更多被视为一种以“峰谷套利”为主要目的的资产，其收益来源相对单一。而在“源网荷储”一体化场景下，储能已经成为支撑多目标优化的关键资源。它既可以在稳定性优先时提供毫秒级快速响应，承担调频、稳压、功率平抑、故障支撑和黑启动辅助等功能；也可以在绿电优先时吸纳波动性新能源，提高绿电本地消纳比例、降低弃风弃光率；还可以在经济性优先时参与削峰填谷、需量管理、备用优化以及电网调峰调频等市场化服务，形成多元化收益结构。因此，储能的价值不再取决于单一时段电价差，而是越来越取决于其在整个系统中承担的综合调节功能。

与此同时，智算中心自身也必须从传统“被动负载”向“主动负载”转变。所谓主动负载，并不是牺牲核心业务稳定性，而是在极小的概率下，在保障关键算力任务连续运行的前提下，对非实时、可迁移、可调度的负荷进行柔性编排。例如，在电网紧张或系统稳定性优先时，适当压降非关键训练任务；在新能源出力高、电价低或绿电富余时，提升训练强度和资源利用率；在储能和电网需要协同时，通过任务调度与冷却负荷优化共同参与系统平衡。这样一来，智算中心就不再只是电力系统的“压力源”，而成为能够响应调度、参与优化、创造收益的“协同资源”。

总体来看，“源网荷储”整个供电链路需要从模块分割，走向协同治理；全系统需要在安全、绿色、经济三个维度上进行动态调优。这也是未来智算中心从高耗能设施走向新型能源基础设施的重要方向。

4.2 园区级备电与储能配置方案探讨

在硬件配置及软件调度方面，GW 级园区与传统数据中心的差异，主要在于储能和备电的重构，主要有以下 3 个方向。

1、从“机房级备电”走向“园区级能源系统”

过去数据中心更关注单栋楼、单个机房模块的电气冗余和设备可靠性，而未来 GW 级园区必须从总能量平衡、容量配置、分层保护、备用资源调度和全园区协同角度设计供电体系。也就是说，设计对象从单体建筑机电系统升级为园区级综合能源系统。园区中的电网接入、新能源、储能、柴油机、燃气机组、冷却系统、IT 负荷和控制平台都要被纳入统一框架。

2、从“静态冗余”走向“动态调节”

传统 N+1 或 2N 冗余并不会失效，但它已不足以应对新能源波动、AI 负荷波动和能源价格波动。未来更关键的能力是动态调节，即系统能够根据负荷、气象、电价、设备状态和电网约束实时调整运行方式。储能的毫秒级响应、微网控制器的快速切换、任务调度的灵活编排，都会成为供电系统能力的一部分。

3、从“备用电源孤立配置”走向多资源协同运行

柴油机、UPS、电池储能、燃气机组、燃料电池和新能源不应再各自孤立配置，而应在统一控制平台下协同运行。储能既可以承担 UPS 功能延伸，也可以参与日常削峰、调频和电能质量治理；柴油机不只是事故备用，还可在极端场景下与储能形成高韧性孤网；燃气与燃料电池则为低碳长时保供提供补充路径。真正的系统重构，不是多加设备，而是让这些设备在不同时间尺度和故障场景下形成清晰分工。

面对 GW 级智算园区，不是给 AIDC 找高可靠的电网接入电，而是把原本有容量，但没质量（弱电网、远端电网、接入质量不足）的区域，改造成可承载 AIDC 的高可靠新型电力节点。把园区外的新型能源和园区内的柴发，储能结合在一起做一套综合能源方案。以下方案可以作为思考。

4.2.1 方案推荐一：市电为主、储能增强、柴油保底

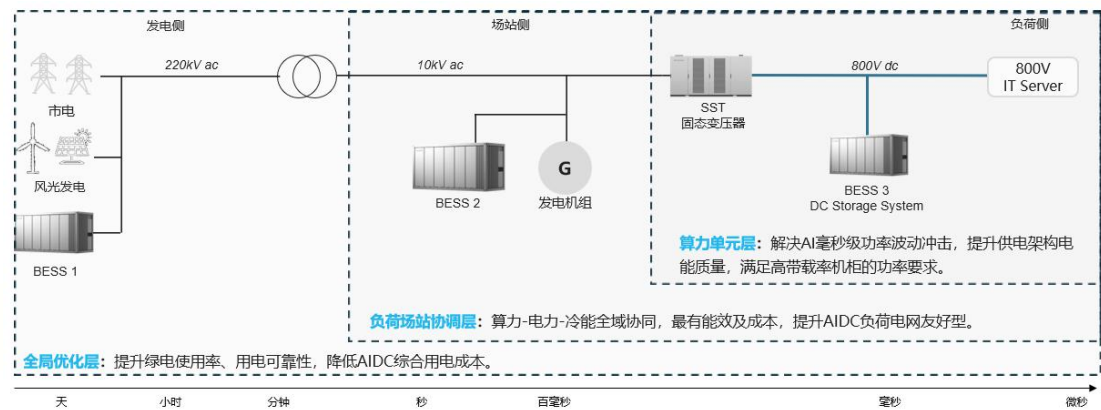
该模式适用于电网条件较好、接入等级高、可靠性基础较强的热点区域。其基本特点是：通过多回路高等级市电接入满足主供电需求，园区配置一定规模储能提升瞬态支撑和削峰能力，柴油机作为极端事故场景的最终兜底。该方案成熟度高、与现有数据中心运维体系衔接顺畅，适合一线城市周边和强网地区的大型项目。

AI 算力负荷最突出的特征之一，是瞬时功率变化更快、更集中。训练作业启动、算力任务调度、液冷系统协同变化，都可能在短时间内带来较大功率跃迁。储能通过毫秒级到秒级响应，可以在这些瞬态过程中快速填补功率缺口，抑制电压跌落和频率偏移，明显减轻上级电网和柴油机的压力。这一价值在高密度 GPU 集群环境下尤其突出。

储能引入后，柴发不必承担动态响应任务，尖峰负荷可以由储能来承接。柴发专注于长时稳态支撑和极端事故保供。柴发总容量仅按照长时平均负荷配置即可，不用承担尖峰部分的负荷。

下图展示了从能源到服务器的三级配储方案。在能源侧，因为风光发电的时间错配，必须要配置一定的储能来进行发电侧的平滑。墙内 10kV 侧可以配置一定数量的储能，对 AI 负载的秒级波动性进行一定平滑，以减少柴发带载

时候的负载瞬变，使得柴发能够平稳带载。在机柜上一级，则可以配置一定的储能，进行毫秒级的负载波动抑制，可以采用超容或锂超容的方案。具体储能部署的位置，如下图所示。



(方案一示意图)

4.2.2 推荐方案二：直流微网末端供电

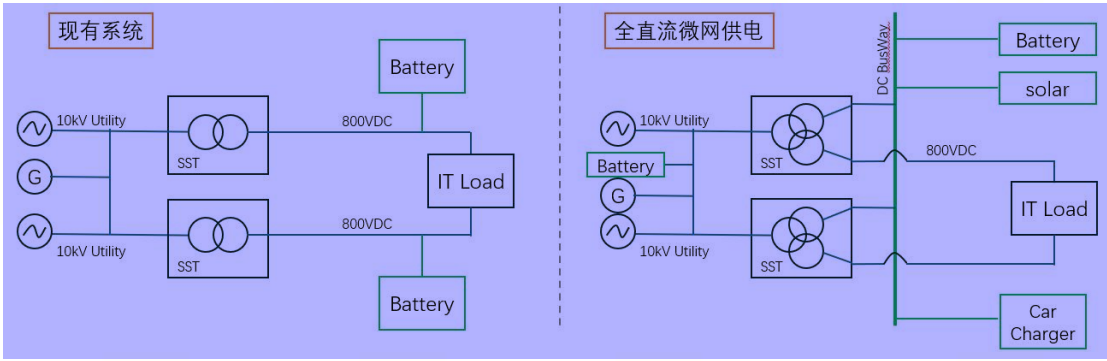
直流微网系统是一种基于多端口 SST（固态变压器）的智算中心直流微网供电方案。与现有系统相比，直流微网方案不再采用多个相对独立的 800V 直流支路分别供负载，而是以 10kV 交流电源为输入，通过多端口 SST 统一变换与耦合，构建一条园区级直流母线（DC Busway），再由该直流母线向 IT 负载、储能电池、光伏、充电设施等多种设备统一供能和协同调度。其本质是将原本分散的供配电结构升级为“交流接入、直流汇集、多端协同、统一调度”的新型供电架构。

这一技术方案的核心在于多端口 SST。传统变压器主要完成电压变换和电气隔离，而多端口 SST 在此基础上进一步集成了交直流变换、功率电子控制、多端口能量路由和柔性调节能力。因此，它不仅能把 10kV 交流电高效转换为 800V 直流，为服务器、液冷系统等高密度负载供电，还可以将电池储能、分布式新能源和其他直流设备直接挂接到同一母线，实现源、网、荷、储的一体化联动。对于智算中心而言，这意味着系统可减少中间变换级数，降低损耗，提升供电效率和动态响应能力。

该方案的优势主要体现在四个方面。第一，效率更高。采用全直流架构后，可减少传统交流配电、UPS、PDU 等环节中的多次 AC/DC、DC/AC 转换，降低

整体损耗。第二，架构更灵活。直流母线天然适合接入储能、电池、光伏和充电负荷，有利于扩展成园区级综合能源系统。第三，动态调节能力更强。多端口 SST 具备快速功率控制能力，可更好适应智算中心高密度、强波动负荷特征。第四，更适合算电协同与微网运行，在并网、离网、局部自治和削峰填谷等场景下具有更强适配性。

这一方案适用于新建高密度智算中心、园区级 AI 算力中心、全直流微网试点项目以及需要同时接入储能和多类直流设备的综合能源场景。不过，它对 SST 设备成熟度、保护策略、直流系统安全和控制系统能力要求较高，现阶段更适合在高端新建项目或示范性园区中率先落地。



(方案三示意图)

4.2.3 推荐方案三：低碳长时电源路线

当园区供电目标不再停留于 UPS 或锂电池提供的“分钟级桥接保障”，且希望尽量减少化石燃料使用时，就需要在短时储能之外，引入能够承担持续出力的低碳长时电源，构成分层保供体系。

通常可采用“锂电池储能+天然气发电/燃气轮机/内燃机+氢能/氨能/SOFC 等低碳电源”的组合架构，其中锂电池负责毫秒级到分钟级快速响应、功率波动抑制和切换桥接，天然气机组或燃气轮机承担小时级长时供电，氢能、氨能及 SOFC 等则作为面向未来的低碳长时支撑技术，逐步替代传统高碳后备能源。

这一方案的优势主要体现在三个方面。第一是保供时间大幅延长。锂电池虽然响应快，但时长越长、成本越高，且占地和配置规模会迅速放大，而燃气机组、燃气轮机和燃料电池等技术更适合长时间持续运行，能够有效弥补纯电

化学储能在经济性上的不足。第二是供电结构更灵活。通过多种能源协同，园区可以根据不同工况选择最优运行方式：平时由电网和储能承担日常优化，故障初期由储能桥接，长时停电时则由气电或燃料电池接续，实现“快慢结合、长短互补”。第三是更符合低碳转型方向。相比单纯依赖柴油机，天然气发电和 SOFC 等路线在排放和效率方面更具优势，而氢、氨等零碳或低碳燃料则为未来绿色算力园区提供了更大的想象空间。

这一方案特别适用于 GW 级智算中心、弱网地区算力基地以及对连续供电和低碳指标要求同时较高的项目。例如，在西部新能源基地、高温高负荷园区、重要行业算力中心或海外大型 AI 园区中，这种“储能+长时电源”模式都具有较强现实意义。当然，该方案也对系统集成、燃料保障、控制协调和初始投资提出更高要求，通常需要统一的能源管理平台进行优化调度。总体来看，这是智算中心从“短时备电”走向“长时保供、低碳运行和多能协同”的关键技术路径。

4.3 新型 AIDC 供电系统关键装备

构建基于“源网荷储”的新型 AIDC 供电系统离不开新型电力装备，主要有智慧型风机、构网型光伏、构网型储能、

燃气轮机（氢、氨、天然气）、固体氧化物燃料电池（SOFC）、多端口固态变压器（SST）等。

智慧型风机：不仅具备风能转换功能，还强调状态感知、功率预测、主动调节和友好并网能力，可通过智能控制提高出力稳定性和并网友好性，在资源条件适合的区域为园区提供绿色电源支撑。

构网型光伏：不同于传统跟网型光伏，其具备一定电压、频率支撑能力，在弱网或微网场景下可参与系统稳定控制，不再只是“能发多少发多少”的被动电源，而是具备更强系统支撑属性。

构网型储能：新型 AIDC 供电体系中的核心装备之一。它既可承担传统 UPS 桥接和短时续航功能，又可在园区级层面承担调频、削峰、黑启动、并离网切换支撑等任务，是连接“储能”与“备电”的关键纽带。相比传统电池系统，其

特点在于响应快、控制灵活、可作为电压源参与系统稳定。

燃气轮机：氢氨燃机、天然气燃气等则更适合长时保供场景。天然气路线技术成熟、启动较快，是现阶段较现实的长时低碳电源；未来随着氢、氨燃料应用推进，燃气轮机有望进一步降低碳排放，成为智算中心园区的重要持续供电装备。

固体氧化物燃料电池（SOFC）：一种高效率、低排放的分布式发电技术，能够利用天然气、氢气、氨等多种燃料发电，发电效率高、噪声低，尤其适合需要高品质电源和热电联供潜力的场景，但目前成本和工程成熟度仍需进一步优化。

多端口 SST（固态变压器）：不仅可实现传统电压变换和隔离，还能集成交直流变换、多端口能量路由和快速功率控制，为构建全直流微网、交直流融合系统和源网荷储一体化架构提供核心支撑。

总体来看，这些关键装备各有分工：有的提供绿色电源，有的增强系统稳定，有的承担长时保供，有的重塑供电架构，共同构成新型 AIDC 供电系统的技术基础。

4.4 新型 AIDC 供电系统控制方案

供电系统重构并不仅是一次设备层面的变化，更是控制逻辑和运行方式的变化。传统数据中心供电的控制逻辑相对简单：正常状态下市电供电，异常状态下 UPS 无缝切换，随后柴油机投入。而在 GW 级园区场景中，系统可能同时拥有电网接入、储能、新能源、柴油机、燃气机组和柔性负荷，运行状态不再是“正常/异常”两种，而是包含多种边界工况与目标函数。

首先，需要建立分层分区的控制体系。站级层面负责与外部电网的协调、功率边界控制和大范围故障处理；园区级层面负责储能调度、母线分段、能源平衡与负荷优先级管理；末端层面负责关键业务负荷保障、局部电能质量控制和设备级切换策略。

其次，要区分时间尺度进行调度：毫秒级到秒级依赖储能和电力电子装置

完成动态稳定；分钟级到小时级依赖机组出力调整、储能充放策略和冷站负荷优化；天级到周级则需结合电价、气象、新能源预测和算力任务排程进行全局优化。

此外，算电协同将成为控制策略的重要组成部分。不同业务对时延、可中断性和实时性要求不同，未来园区完全可以将任务分类管理，关键推理和核心业务负荷始终保障，非实时训练作业和批处理任务则可在能源富余时加速执行，在系统紧张时适当延后。这样一来，供电系统就不再只是服务于算力，而是与算力共同构成一个协同运行的整体。

数字孪生将是“源网荷储”调度系统的一个重要工具，通过数字孪生和仿真平台，可在项目建设前验证短路容量、故障场景、黑启动流程和多资源协同效果，在运行阶段进行预测调度和策略迭代。这是把“设备堆叠”转化为“系统能力”的关键一环。

大模型是“源网荷储”调度系统的另一个重要工具，主要体现在预测、辅助决策、协同优化和智能交互四个方面。它可以融合天气、负荷、风光出力、设备状态和电网运行数据，提升新能源发电预测与负荷预测精度；可辅助调度人员进行告警分析、故障研判和调度方案生成，提高响应效率；还能在源网荷储协同场景下，支持多目标优化，帮助平衡安全、经济、消纳和低碳目标。此外，大模型还可作为调度系统的智能交互入口，通过自然语言方式实现知识检索、操作辅助和报告生成，提升复杂电网场景下的人机协同能力。

4.5 新型 AIDC 供电系统工作内容

构建新型 AIDC 供电系统，并不是单纯增加几类设备或对传统机电系统做局部升级，而是一项涉及规划、设计、验证、控制和工程实施的系统性工作。

首先，在前端规划阶段，需要开展源网荷储一体化规划，统筹分析园区负荷特性、供电可靠性目标、电网接入条件、新能源接入能力、储能配置规模以及备用电源路线，明确系统在安全性、经济性、低碳性和可扩展性之间的平衡关系。尤其对于高密度智算中心，还要重点研究负荷波动、冷却负荷变化以及未来扩容对供电系统的影响。

其次，必须进行系统建模与仿真分析。新型 AIDC 供电系统通常涉及电网、电力电子设备、储能、UPS、备用电源和多类负载协同运行，传统经验设计已难以覆盖复杂工况。需要通过稳态分析、暂态仿真、故障仿真和控制仿真，对潮流分布、短路容量、电压波动、切换过程、孤网运行和黑启动等场景进行验证，提前发现系统瓶颈和控制风险。

第三，要推进系统架构一体化设计。这意味着不能将市电接入、UPS、储能、备用电源、制冷动力和监控系统割裂设计，而应从园区级角度统一考虑电压等级、供电拓扑、冗余方式、控制接口、保护协调和能量流动路径，形成“平时高效运行、故障快速切换、极端场景具备韧性”的整体架构。

第四，需要开展子系统测试与验证。储能、UPS、构网型设备、发电机组、控制器等关键设备，在实验室和样机阶段就应完成功能测试、接口联调、故障穿越、并离网切换、热管理与安全验证，避免问题在工程现场集中暴露。

最后，在工程实施阶段，还必须完成系统集成调试。重点验证各子系统在真实工况下的协同能力，包括功率分配、控制响应、保护动作、负荷切换、黑启动流程和通信可靠性等。

总体来看，新型 AIDC 供电系统建设的关键，不只是设备先进，更在于通过规划、仿真、设计、验证和调试形成一个真正可运行、可扩展、可落地的系统。

4.6 园区级储能应用的挑战

尽管方向清晰，但 GW 级园区供电重构仍然有多个障碍需要跨越。

1、墙内场地限制

如果在智算中心部署大规模储能系统，随着储能容量和时长提升，系统规模会快速放大。特别是在需要小时级以上续航时，单位场地所承载的有效储能量往往难以无限提升。因为大规模储能不仅可能挤占算力设备部署空间，还会增加消防安全、热失控防控、噪声隔离和运维组织的复杂度。特别是在高等级园区中，储能系统往往不能简单“见缝插针”布置，而必须进行专门的总图规划。

2、安全性考量

消防灾害对于智算中心而言，是最大的危害源，其严重程度超过了电力中断。大规模电池储能系统，其消防、隔离、热失控控制、运维巡检和故障处置机制都必须按照更高标准设计。

“源网荷储”一体化系统，控制和保护复杂度显著上升。多电源并列、多模式切换、微网孤网运行、黑启动、交直流混合系统等，都会对继电保护、控制接口、通信可靠性和运维团队能力提出更高要求。

3、综合 TCO 挑战

在 GW 级园区项目中，任何供电系统重构方案都必须回答一个问题：值不值。传统方式往往以一次性设备采购成本做判断，但对于储能、多元电源和柔性配电系统而言，单看初始 CAPEX 往往会得出错误结论，因为资金问题难以落地。真正合理的评价应基于全生命周期成本。

首先要看直接成本。包括变电站与接网投资、UPS 与配电设备、储能系统、柴油机或其他备用机组、土建和消防配套、燃料储运系统以及数字化控制平台。其次要看间接成本，例如扩容等待时间带来的业务损失、接网延迟导致的机会成本、极端事故下业务中断损失和碳成本。再次要看运行收益和节约，包括削峰填谷、减少最大需量电费、提高绿电自用率、减少柴油机试运行和维护成本、参与需求响应或辅助服务、推迟上级电网扩容等。

对于 GW 级算力园区而言，供电系统重构的价值往往不在单一收益项，而在多个维度叠加后的综合效果：更快落地、更低长期购电成本、更高设备利用率、更高绿电占比、更强事故韧性以及更好的政策与客户认可度。因此，要看它是否能够降低未来十年整个园区的运营风险与能源成本。

4、工程经验不足

当前，新型供电系统方案还面临标准与工程经验不足的问题。比如构网型储能不同厂商设备间的协同、交直流融合配电的保护整定、燃料电池在数据中心场景下的长期可靠性验证等，都还需要更多工程实践来完善。因此，GW 级园区供电重构不能简单追求“技术最先进”，而要坚持“成熟一批、导入一批、

预研一批”的原则，分阶段推进。

五、直流系统配电与保护

800V 高压直流供配电与系统保护，是未来 GW 级数据中心急需攻克的核心课题。直流系统特有的无自然过零点、全局强容性以及 AI 负载剧烈阶跃（EDPp）等物理特征，给传统配电架构带来了本质变革。

5.1 直流系统配电

800V 直流配电方案可分为两种：集中式架构和分布式架构。

集中式架构：在数据中心入口处将 13.8kV 交流统一转换为 800VDC，通过直流母线输送至各机架。适用于新建大型数据中心，投资集中、便于管理，但对直流母线可靠性要求极高。

分布式架构：在各 IT 机架或机柜排部署独立的 AC/DC 转换模块，就近输出 800VDC。灵活性强、故障影响范围小，适合改造项目或分阶段建设场景，但设备分散、维护成本较高。

直流配电系统具备能效高，新能源接入友好，空间高度集成等优点。同时缺点也比较明显，如初始投资高，技术标准滞后，800VDC 系统保护困难。供应链不成熟等。

5.2 直流系统保护

直流系统保护是保障 AIDC（AI 数据中心）800V 直流供电方案安全、可靠与稳定运行的关键枢纽。本章节将聚焦于 800V 高压直流配电架构下的保护系统设计，深入剖析其核心挑战、演进方向及关键技术手段。

5.2.1 数据中心 800V 供电保护面临的挑战

数据中心供电架构从传统交流（AC）向直流（DC）演进，不仅是电压形态的改变，更是系统底层物理属性的本质变革。

表 1 交流与直流系统的本质对比

特性对比	交流系统 (AC)	直流系统 (DC)
阻抗本质	感性主导： 依靠磁场储能。电感具有阻碍电流突变的“惯性”缓冲效果。	容性/阻性主导： 依靠电场储能(直流电容)。系统阻抗极低，电容瞬时泄放能量。电流上升极快。
惯量	旋转动能： 依靠发电机组巨大的物理转动惯量，提供系统稳定的“压舱石”。	虚拟/算法惯量： 物理惯量极低(微秒级)。依靠控制算法或并联电池组模拟“惯性”，提供柔性支撑。
自恢复能力	强(自动振荡复位)： 故障清除后，利用电磁场与机械能转换，自动复位。依靠励磁和电网惯量支撑。	弱(需要外部介入)： 故障清除后，必须依靠控制算法重启变换器，执行软启动流程，或依赖电池介入。
短路响应特性	短路电流有自然过零点，灭弧容易。上升速度相对较缓。保护时间窗口可达秒级。	无自然过零点，灭弧困难。电容放电产生高 di/dt 和巨大的高峰值电流尖峰。如不采取限流措施，保护时间窗口仅为微秒/毫秒级。

基于上述物理特性的根本转变，面向 GW 级算力集群的 800V 直流保护系统在实际工程落地中面临以下挑战：

- ◆ **无过零点强行灭弧挑战：** 由于直流电流缺乏天然过零点，传统的气吹或磁吹交流灭弧栅在高压直流电弧面前极易失效。系统必须采用具备更强灭弧能力的直流专用机械断路器，或引入基于全控型功率器件（如 SiC MOSFET、IGBT 等）的固态断路器（SSCB），以实现精准的故障隔离。
- ◆ **变换器多元故障特性的标准化缺失：** 直流系统由大量电力电子变换器主导，其故障输出特性不再呈现传统同步机的恒定阻抗特征，而是高度取决于控制环路算法（如限流控制），呈现非线性、多模态的特征。目前行业在这一领域的标准体系、测试规范仍处于空白状态。
- ◆ **电池接入方式改变带来保护链条的重构：** 在 800V 直流架构下，备用电池系统通常不再直接并网，而是通过高功率双向 DCDC 变换器耦合至 800V 主母线。这种拓扑改变使得 DCDC 变换器的动态响应与保护协同设计变得复杂。
- ◆ **强容性环境下的高频暂态涌流冲击：** 为满足 AI 服务器暂态高动态负载的需求，800V 直流母线及末端机架 PSU 侧并联了大量的支撑电容。系统发生金属性短路时，如不采取限制措施，这些电容将在微秒级窗口内集中释放电荷，激发出极高的短路电流尖峰，极易造成保护器件发生热损坏或动稳定破坏。
- ◆ **“多源多向”复杂网络下的选择性配合问题：** AIDC 800V 配电网从传统的“单源单向”辐射型网络，转变为多能源节点并存的“多源多向”有源网络。短路故障时，故障电流路径交织缠绕，给系统保护带来很大挑战。

本章后续部分将针对上述挑战，逐一展开深度探讨。

5.2.2 直流系统电源故障输出特性

直流系统电源故障输出特性对直流系统保护方案的设计至关重要，不同的电源故障输出特性，需要匹配不同的系统保护方案。

5.2.2.1 交流与直流系统故障源本质对比

直流系统中的主要故障源与交流系统有很大不同，不同类型的故障源决定了故障电流的流向、峰值以及衰减特性：

■ 交流系统（AC）故障的主要贡献者：

- **发电机与电动机：** 作为传统旋转机械，在发生故障的瞬态过程中，其巨大的电磁惯性会持续向故障点输送反向电动势与短路电流。
- **上级电网：** 依托强大的电网无限大电源容量，提供稳定的工频故障电流注入。

■ 直流系统（DC）故障的主要贡献者：

- **电容器组：** 作为直流母线稳压与滤波的核心元件，在短路瞬间会呈现“近乎零阻抗”的放电特性，导致微秒级超高 di/dt 暂态电流尖峰。
- **整流器/变换器：** 其内部电力电子器件的续流及控制响应直接影响故障初期的电流走向。
- **储能电池：** 作为分布式有源节点，电池具备极低的内阻，在故障时会释放高额的稳态直流短路电流。

传统交流系统的故障源多为“电磁与机械耦合体”，电流增长受制于电感阻抗；而 800V 直流系统的故障源则呈现“强容性与多源分布式”特征，其保护必须跳出传统交流配电的固有思维框架。

5.2.2.2 直流系统电源故障输出特性分类

在传统的交流供电架构中，工频变压器作为单一电源供给点，发生短路故障时可等效为具有内部感性阻抗的戴维南电压源。然而在 800V 直流供电系统中，电源供给点演变为由多种电力电子变换器（AC/DC、DC/DC）及挂载在直流母线上的电容、储能电池组成的“多源多向”网络。

由于电力电子变换器的控制环路与物理限制，直流系统的短路计算方法与交流系统存在本质不同。目前行业发展的显著趋势是电池逐渐由传统“母线直挂”转向通过双向 DC/DC 变换器连接母线，以实现输出电压的稳定与故障电流的动态闭锁控制。

根据整体电源的输出与控制响应特性，可将直流系统的电源故障输出特性核心归纳为以下四类：

1. 短路限流型电源系统

此类系统通常由具备主动限流控制能力的变换器组成，或由基础变换器外加独立的故障限流装置（CLD）构成。

- **等效电路模型：** 故障输出行为模型可等效为受控电流源与输出端口电容的并联形态。
- **故障响应阶段：**
 - **瞬态阶段：** 短路瞬间，仅受限于输出端电容的等效串联电阻（ESR）和故障回路阻抗，支撑电容瞬间集中放电，激发出极高的 di/dt 和暂态脉冲电流尖峰。该过程通常在 0.1ms 至 1ms 内完成。
 - **稳态阶段：** 电容放电结束后，变换器内部控制环路强制介入，由恒压（CV）模式切换为恒流（CC）模式。稳态短路电流被严格锁定在限流阈值（通常为额定电流 I_n 的 1.5 倍），并维持特定时间（如 200ms）。若在此窗口期内故障未被切除，变换器将进入闭锁保护状态。

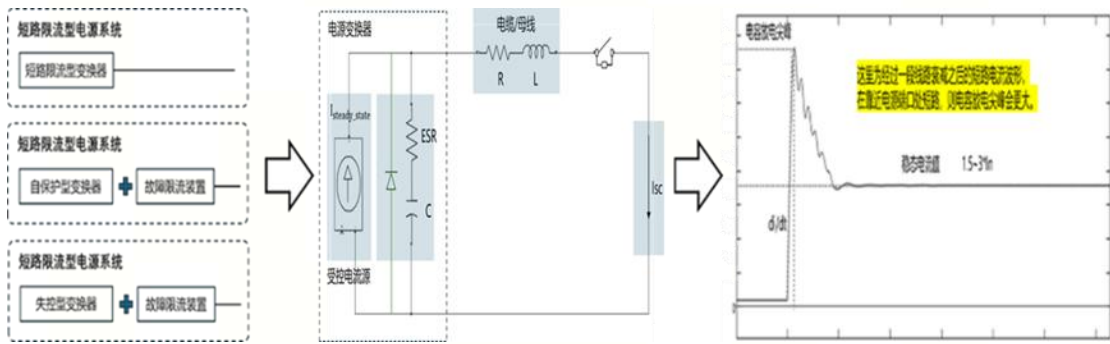


图 x: 短路限流型电源系统输出短路等效模型

2. 自保护型电源系统

此类系统内部的电源变换器自身不具备短路限流和维持输出的能力，但集成了极速的硬件保护逻辑。

- **故障响应特性：** 当发生短路故障、电流刚开始激增时，变换器能够在微秒级（ μs 级）窗口内迅速检测并执行硬件快速闭锁，主动切断能量输出以实现自我保护。
- **对保护系统的要求：** 由于其能量切断速度极快，末端或级联的传统熔断器或

常规机械式断路器（通常为 ms 级响应）在变换器自身闭锁前根本无法动作，导致常规的级联选择性配合失效。系统保护必须依赖具备同等微秒级响应的固态断路器（SSCB）。

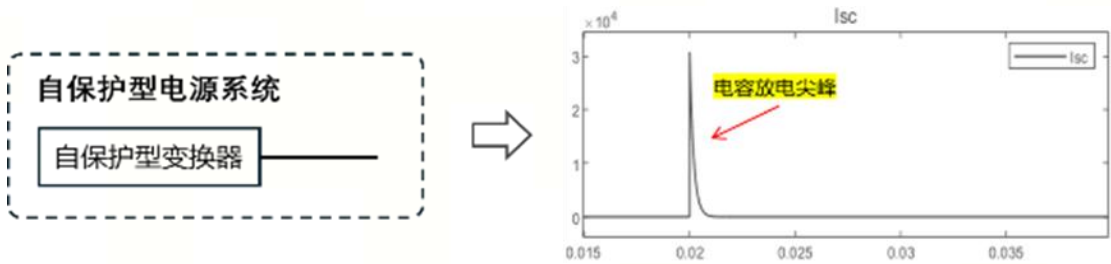


图 x: 自保护型电源系统短路输出特性

3. 失控型电源系统

此类系统由自身既无短路限流能力、也无微秒级自保护闭锁能力（或未配置独立限流保护装置）的电力电子变换器组成。

- **典型拓扑风险：** 例如采用 T 型三电平整流电路时，直流侧发生短路后，短路电流将直接通过开关管的反并联二极管或者体二极管强行形成无法受控的续流回路，缺乏主动限流与关断机制。
- **故障响应特性：** 在直流侧短路时，相当于交流侧经过整流桥后直接发生金属性短路，其输出的预期短路电流极高，具体取决于交流侧系统的短路容量。如果不采取外部强迫干预或级联保护，短路电流将持续攀升并产生剧烈热效应，最终导致变换器核心功率器件发生热击穿而损坏。

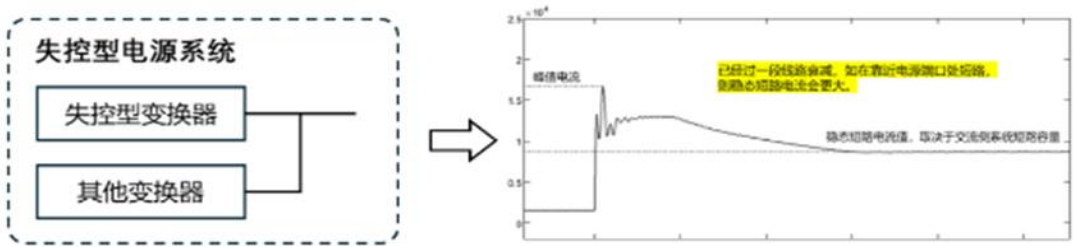


图 x: 失控型电源系统故障特性

4. 电池直挂型电源系统

虽然行业正向 DC/DC 耦合架构演进，但在某些场景中，电池直接挂载在直流母线上的方案依然存在。

- **等效电路模型：** 短路发生时，大容量电池组可等效为一个具有极低内部物理阻抗的纯直流电压源。
- **故障响应特性：**
 - **对后级保护的利弊：** 直挂电池组在故障时能够释放出巨大的、持续不

衰减的稳态短路能量。从保护配合的角度来看，这种高额且恒定的稳态电流非常有利于后级常规保护装置（如熔断器、断路器）精准识别并实现热熔断配合或磁脱扣分断。

- 带来的安全隐患：超大容量的整组锂电池或铅酸电池直挂，会导致整个系统的总短路电流峰值可能超出常规直流断路器的最大额定分断能力（ I_{cu} ）。一旦发生保护拒绝动作，极易引发母线损毁或电池热失控，因此在 800V AIDC 的设计中，必须对其最大短路容量进行极其严苛的校核与边界限制。

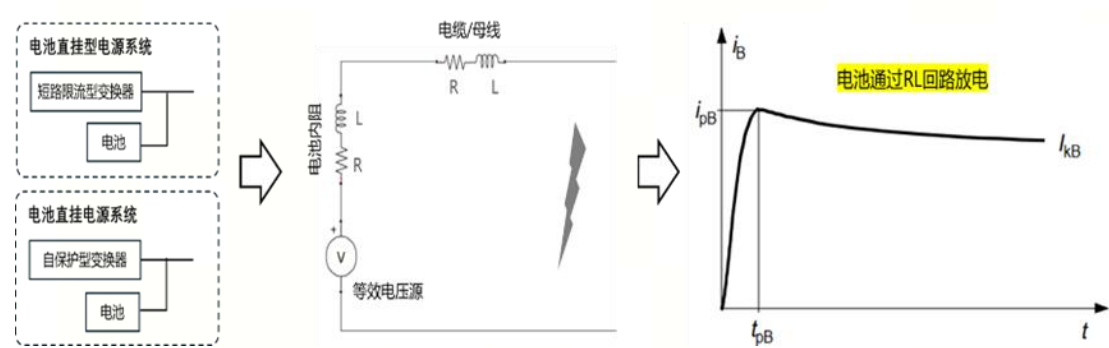


图 x： 电池直挂型电源系统及短路故障波形

5.2.3 直流保护器件特性与选型

由于直流故障电流不具备天然过零点，传统交流保护方案直接应用于 800V 高压直流系统时极易因无法灭弧而引发飞弧甚至设备燃爆。因此，AIDC 800V 直流配电系统必须强制采用直流专用的保护器件。

5.2.3.1 常用直流保护器件特性对比

目前直流配电系统中主流的保护与隔离器件主要包括熔断器、机械式直流断路器、固态断路器（SSCB）、以及混合式固态断路器。各器件的核心功能 及技术特点如表 x 所示：

表 x： 不同直流保护器件综合特性对比

分类	熔断器 (Fuse)	机械式断路器 (MCB/MCCB)	固态断路器 (SSCB)	混合式固态断路器 (Hybrid SSCB)
----	---------------	----------------------	-----------------	---------------------------

基 本 功 能	过 载 与 短 路 保 护；通过熔体过热熔断被动切断电路。	兼具电路保护与控制功能；可自动/手动断开短路与过载电流。	依托电力电子技术，通过全控型器件（如 SiC）与缓冲吸能回路实现微秒级快速开断。	采用“机械主触头+电力电子支路+吸能支路”拓扑，可实现低导通损耗并达到 1ms 左右快速分断。
核 心 特 点	1. 动作阈值离散度较大，若电流落在过载段可能存在持续干烧而不熔断的风险； 2. 熔体状态不可实时监测（需依赖辅助指示灯）； 3. 属于一次性器件，故障后必须整体更换。	1. 多采用热磁两段式或电子式保护； 2. 机械脱扣器的动作时间存在一定离散度，需谨慎校核级联配合关系。	1. 标准规范要求必须级联隔离开关以提供物理隔离点； 2. 具备微秒级超高精度开断能力； 3. 现阶段额定电流相对较小，且长期运行导通损耗与发热量大，大电流应用时需配置液冷或特殊散热设计。	1. 正常运行时电流走机械主拓扑，导通损耗与温升可接近机械式断路器，无需复杂散热； 2. 故障时通过高速机械开关将电流转移至半导体支路强行闭锁； 3. 结构较纯固态更为复杂，造价昂贵。
灭 弧 能 力	强（依靠石英砂、陶瓷颗粒等介质冷却并吸收电弧能量）。	较强（依靠直流专用的磁吹、栅片灭弧装置将电弧拉长并强行冷却）。	无弧分断（通过变流器或全控器件直接截断电流，无物理电弧产生）。	近无弧分断（机械主触头转移电流时产生极其微弱的电弧）。
带 负 荷 操 作	不支持。	支持，可重复使用。	支持，电气寿命远高于机械式断路器。	支持，如果混合式开关本身不具备物理隔离属性，仍需配置机械式隔离断点。
操 作 方 式	无需操作（被动热熔断）。	电动/手动。	全固态式无需机械操作（自动触发）；	混合式可配置手动/电动控制，内部快速机械开关与半导体执行毫秒/微秒级全自动协同。

5.2.3.2 直流断路器关键选型参数

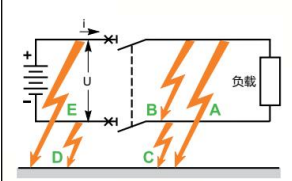
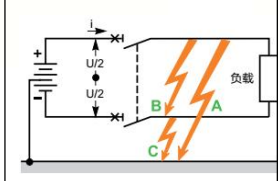
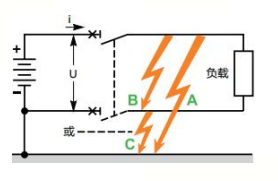
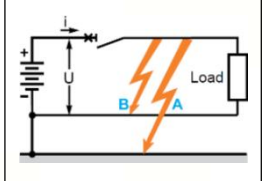
针对 800V AIDC 复杂的电源故障输出特性（如短路限流型的高 di/dt 尖峰、电池直挂型的高稳态容量等）以及服务连续性等级要求，直流断路器的选型必须严格校核以下核心电气参数：

- 额定工作电压 (U_e)：断路器在正常及故障工况下，能够安全承载、接通和分断电流的直流电压上限（标称值）。

- 额定电流 (I_n): 需结合 AI 服务器高动态瞬态负载特征, 并根据标准规定的电缆载流量进行环境温度校正。
- 额定极限短路分断能力 (I_{cu}): 断路器在特定电压下, 能够成功切断、且不发生自身爆炸或损毁的“最大短路电流极限值”。
- 额定短路接通能力 (I_{cm}): 断路器在规定电压、频率及特定时间常数下, 能够成功闭合且不发生触头熔焊的最大短路电流峰值。

5.2.3.3 接地系统对保护选型影响

不同的直流接地系统 (IT 系统、TN 系统) 发生单重或双重故障时, 短路回路的路径及施加在断路器断口上的电压截然不同, 选型时应遵循以下规范:

IT 系统	TN 系统		
不接地 两极保护	中点接地 两极保护	正或负极接地 两极保护	正或负极接地 单极保护
			
单一故障: ◆ 电压 U 下的最大 I_{sc}@两个执行极	单一故障: ◆ 电压 U 下的最大 I_{sc}@两个执行极	单一故障: ◆ 电压 U 下的最大 I_{sc}@单个执行极	单一故障: ◆ 电压 U 下的最大 I_{sc}@两极串联
◆ IEC60947-2 并没有定义断路器在双重故障下的性能要求, 但从安全性角度, 建议考虑双重接地故障。 ◆ 若有绝缘监测系统, 发生单一接地故障后必须排除, 可只考虑单一接地故障。		◆ 根据 IEC 60364 电气安装规则 (第 42 章) 的定义, TN 系统可以仅保护和断开未接地的一极。 ◆ 根据 IEC 60479-1 标准, 不同的电流流向对人体的伤害不同, 从脚流向手的电流危险性要显著高于从手流向脚的电流。因此为了防止触电, 建议将负极接地。对于 800V AIDC 应用, 不建议正极接地。	

5.2.4 直流系统保护方案

800V 直流供配电系统的保护设计必须兼顾瞬态故障抑制能力与全局选择性保护配合。通过系统级电源与后级直流保护器件的高效协同，将故障隔离在最小局部，从而确保 GW 级算力集群的电力安全与业务连续性。

考虑直流系统瞬态故障行为的复杂性，AIDC 800V 直流供电系统在确定保护方案之前，建议进行系统级的仿真分析，确定系统的短路电流波形和各种可能情况下的短路电流路径，进而为系统保护方案的选择提供理论依据。

5.2.4.1 直流系统电源特性与保护方案选择

根据数据中心不同的直流电源特性及备用电池耦合架构，系统需配置差异化的直流保护方案。

表 x 直流系统电源特性与保护方案选择

电源特性	电池连接方式	短路能量来源	建议保护方案	说明
电池直挂型电源系统	电池直挂母线	主要来自电池放电	◆ 熔断器+机械式断路器	电池放电导致的短路电流可能超出机械式断路器分断能力，需要熔断器配合。
短路限流型电源系统	电池通过 DC/DC 连接	来自电源模块自身或者单独的故障限流装置	◆ 机械式断路器 ◆ 固态断路器	如采用机械式断路器，则对电源系统限流维持时间有要求
自保护型电源系统	电池通过 DC/DC 连接	由于自关断保护，短路能量时间极短（us 级）	◆ 固态断路器	采用固态断路器，在电源模块进入闭锁保护之前切除故障。
失控型电源系统	N/A	交流系统短路能量	◆ 快速熔断器 ◆ 固态断路器	快速熔断器只能在极端情况下防止故障扩大，本身不能保证电源本身不损坏。

备注：在 AIDC 架构中不建议使用单独的失控型电源，必须强制加装独立故障限流装置。

5.2.4.2 直流保护方案技术路线对比

目前行业主流的两大核心保护技术路线及综合效益对比分析如下。

表 x 直流供电系统保护方案对比

方案	电源模块限流 + 机械式断路器方案	电源模块自保护 + 固态断路器方案
方案特点	1) 该方案属于经典电气控制与机械灭弧协同方案。 2) 当末端发生短路时，前级电源模块利用故障穿越算法主动将电流限制在安全阈值内，为后级机械断路器的跳闸灭弧争取足够的毫秒级的时间窗口。	1) 该方案属于全电力电子化的现代化智配方案。 2) 电源模块不承担 FRT 限流，发生故障时依靠后级固态断路器（SSCB）执行微秒级极速切断。 3) 固态断路器的选型/设计需考虑暂态 di/dt 的耐受极限。
方案优势	1) 分断性能可靠且经济性高：属于技术成熟的标准化方案。机械断路器具备天然的物理隔离点，系统综合造价较低。 2) 正常运行损耗与温升极低：机械触头在正常闭合状态下的接触电阻极小（微欧级别），几乎不产生额外的运行功耗与结温上升，配电柜无需复杂的强迫散热或液冷系统。 3) 结构简单，无需另外配置隔离断点：机械式断路器本身具备物理隔离属性，无需单独配置，运行功耗更优。	1) 极速隔离，实现“无感”自愈：SSCB 的故障分断时间被压缩至 10u 以内。在如此短的窗口内，直流母线电压几乎无明显跌落。非故障支路对整个过程完全“无感”。 2) 无电弧、电气寿命近乎无限：由于半导体全控型器件无触点开断，断开时无物理电弧产生，消除了飞弧火灾隐患；无机械磨损与触头烧蚀，适合极高频次的保护操作。 3) 保护功能高度集成与软件定义：内部集成高频电流/电压传感器，可通过软件控制算法实时预判 di/dt 的变化趋势，实现自适应、可编程的保护曲线设计。 4) 无需电源模块介入：电源模块仅负责自身的闭锁自保护，无需配置复杂的 FRT 限流算法。
方案劣势	1) 母线电压跌落严重：在机械断路器动作及灭弧期间，前级电源模块被迫处于限流状态，导致直流母线电压在故障清除期间跌落严重。 2) 故障隔离速度慢：短路故障清除时间长，可能会触发切换数据中心冗余电源，但不会影响业务连续性。 3) 对电源模块算法依赖度高：一旦前级电源模块的 FRT 限流算法在短路瞬间发生偶发性失效或响应	1) 长期运行功耗与散热压力巨大：由于半导体功率器件存在固有的导通压降，在大电流持续通过时会产生持续的静态导通损耗与剧烈发热。面向 GW 级机房的大电流应用时，SSCB 需要额外配置庞大的风冷散热器甚至引入定制化的液冷机制。 2) 固态开关本身缺乏物理隔离属性：固态断路器需配置额外的机械隔离断点，在 Standby 状态下，半导体材料内部依然存在微小的漏电流，不符合维护中的物理隔离要求。需

	滞后，存在系统保护失效风险。	要断开机械隔离断点进行维护。 3) 成本昂贵： 满足 800V 高压、大电流规格的功率模组及吸能缓冲回路物料成本高，现阶段 SSCB 的造价通常数倍于传统机械断路器。 4) 耐受过载与抗热击穿能力较弱： 半导体芯片的热容量极小，一旦后级短路能量越限或吸能回路失效，极易在微秒内发生不可逆的热击穿，导致断路器自身损坏。
--	----------------	--

针对 GW 级 AI 超算数据中心因单机架功率密度暴增、掉电经济损失极其巨大的核心痛点，从长远来看，当固态断路器技术成熟且成本下降后，其将成为直流供电系统保护的理想选择。

5.2.5 直流系统电容放电与多电源属性

在传统的交流（AC）数据中心供配电架构中，工频变压器作为单一的有源电力供给点，其电流与功率的方向是恒定单向流动的（单端电源系统）。此时保护器件的配置只需基于经典的辐射型网络进行设计，故障潮流路径清晰，保护配合相对简单。

然而，走向 800V 高压直流（DC）架构的 GW 级 AI 数据中心时，系统的底层物理特性发生了本质性的改变，整体系统呈现出强容性特征与复杂的分布式多电源属性。

5.2.5.1 直流柔性供电系统的强容性特征

为了实现电压稳定、平滑功率纹波以及支撑 AI 服务器瞬态高动态负载的需求，800V 直流网络中并联集成了规模庞大的实体电容器组。这些隐形或显性的对地及极间电容构成了系统的物理容性基础：

1. 系统容性特征的来源

- **变换器端口支撑电容 / Bulk 电容：** 存在于前级固态变压器（SST）、大功率整流器及双向电池 DC/DC 内部，数量极其庞大，用以吸收开关高频纹波与降噪。
- **动态功率电容（CBU/电容柜）：** 属于数据中心配电侧的独立设备，专门用于平滑 AI 服务器密集爆发的 EDPp（动态功率尖峰）。但目前多通过 DCDC 挂接在母线上。
- **负载侧输入滤波电容（Input Filter Capacitors）：** 并联在成千上万个高密 AI 服务器机架内部的 PSU 输入端。

- **寄生杂散电容 (Stray Capacitance)**：来源于 GW 级机房内部密集敷设的长距离大截面电缆、母排对地、相间以及功率器件的寄生电容。

2. 容性特征的双刃剑效应

- **工程利好 (Advantages)**：大容量电容充当了能量缓冲的“蓄水池”，实现了高效的电压稳定与动态解耦，平滑了电力电子器件高频开关产生的瞬时电流扰动与电磁干扰 (EMI)；同时，其微秒级的能量充放电为系统提供了**瞬时功率支撑 (或虚拟惯性)**，增强了系统对动态扰动的抑制能力。
- **安全弊端 (Disadvantages)**：
 - **初次上电浪涌**：极低启动阻抗导致复杂的预充电管理问题，合闸瞬间面临海量电容充入引起的暂态浪涌冲击。
 - **谐振风险**：容易与线路的长距离分布电感发生非线性谐振，激发出高频电压震荡，导致前级变换器控制环路失稳。
 - **短路故障尖峰**：一旦系统发生金属性短路，全链路电容会在微秒级窗口内集中泄放全部电荷，激发出惊人的超高电流上升率 (di/dt) 和极高的短路暂态电流峰值。

5.2.5.2 考虑电容放电波形对断路器选型的影响

根据仿真与物理模型对比分析，引入电容放电后，直流系统短路故障波形发生了根本性变换，导致标准的 IEC 60947-2 传统直流短路计算模型在 800V AIDC 场景中不再适用。

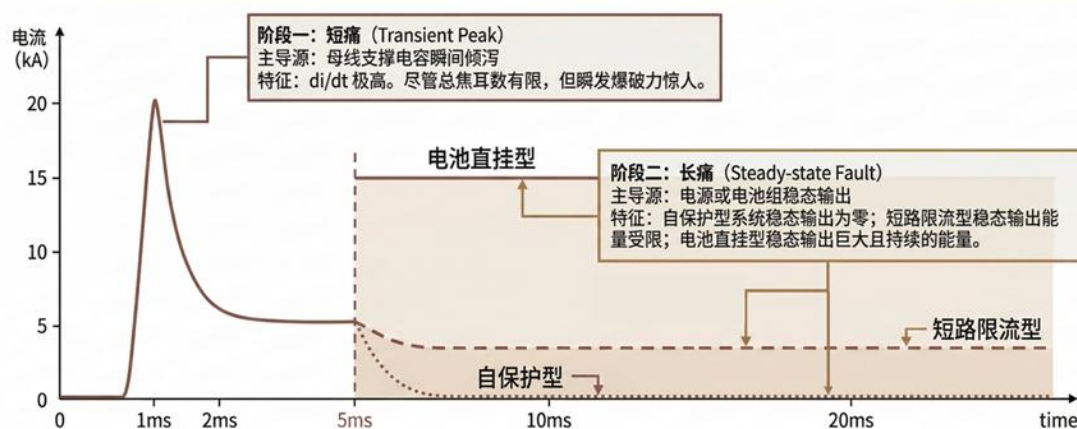


图 X：直流短路电流波形 - 电容放电暂态与短路输出稳态

系统的短路故障电流在时域上整体呈现出明显的“两阶段”演进特征：

- **阶段一：暂态 (Transient Peak)**
 - **主导特征**：短路发生后的微秒级窗口内，母线及端口支撑电容瞬间放电。
 - **选型映射**：该阶段瞬态激增出极高的 di/dt 暂态浪涌尖峰，直接影响系统的**额定短路接通能力 (I_{cm})**。断路器合闸瞬间必须能承受由此带来的巨大电动斥力与机械冲击，因此 I_{cm} 的校核成为一个关键指标，需要防止触头弹跳、飞弧及熔焊。

- 阶段二：稳态 (Steady-state Fault)

- 主导特征：毫秒级放电结束后，电容能量消耗殆尽，短路电流进入由电源侧特征决定的稳态阶段。
- 选型映射：该阶段的稳态短路能量决定了断路器的**额定极限短路分断能力** (I_{cu}/I_{cs})。如前所述，在现代 AIDC 柔性配电网中，若采用自保护型或短路限流型变流电源，阶段二的稳态电流将被迅速压低或切断，使得断路器分断动作时面对的实际稳态能量受限，从而在一定程度上降低了对 I_{cu} 灭弧热应力的刚性压力。

总结： 800V 直流保护选型须打破传统“重分断、轻接通”的固有思维，将 I_{cm} 与 I_{cu} 进行全链路的协同校验。

5.2.5.3 “多源多向”复杂拓扑架构下的挑战

除了整体呈现强容性外，GW 级 800V 直流数据中心配电网彻底颠覆了传统的“单源单向”瀑布型辐射网络。如图 x “多源多向系统架构”拓扑所示，配电网中集成了：

1. 由固态变压器 (SST) 或中压整流器构成的**市电主有源节点**。
2. 通过双向 DC/DC 或直接并网挂载的**多组分布式大容量电池 (BESS)** 节点。
3. 具备端口电容 (Bulk 电容、X 电容) 反向放电可能的**各个负荷支路节点**。
4. 其他可能的能源接入形式

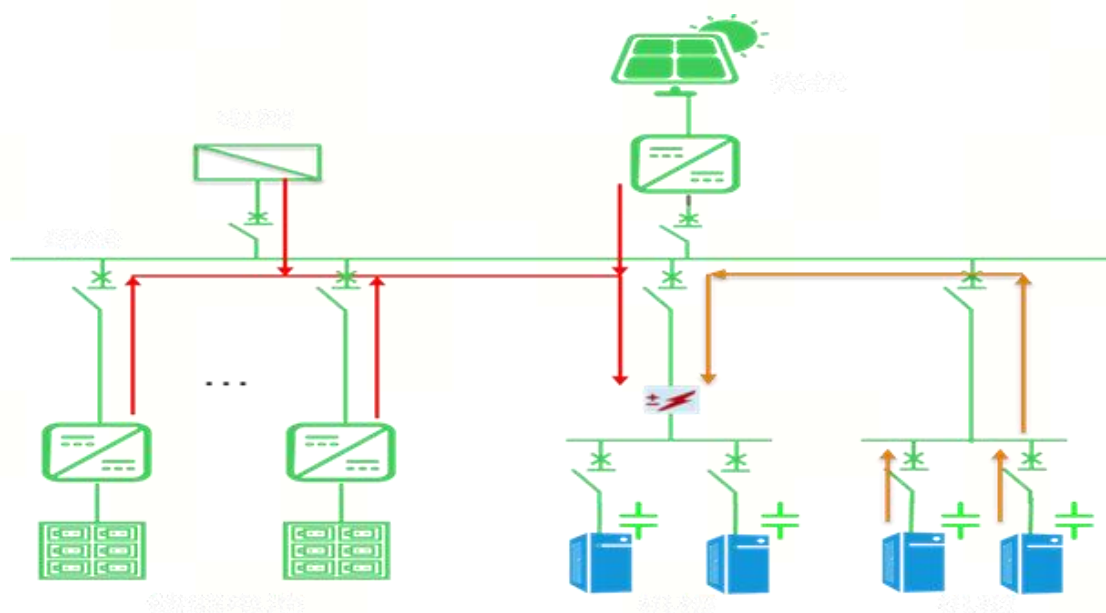


图 x: 多源多向系统架构

多电源网络带来的三大保护挑战:

- **故障潮流多向交织:** 当网络中的某一个机架支路或分配电主母排发生金属性短路时, 故障点的短路能量不仅来自于市电整流侧, 邻近未故障的储能电池组、以及邻近机架内 PSU 输入端的所有电容都会同时向故障点实施多路径反向放电注入。考虑可能的电容放电, 整个直流系统中的所有配电支路在故障瞬间均可能转化为事实上的故障源。
- **短路电流大小与方向复杂多变:** 故障总电流的幅值和流向完全取决于短路发生的相对物理位置、各路电源的并发接入容量、以及各个电池组的即时荷电状态 (SoC)。传统依靠单一方向、固定流向设定的过流脱扣或反时限保护基准在多源网络下极易发生大面积拒绝动作或无选择性越级误动作。
- **传统分析工具与标准方法失效:** 基于单端定阻抗的交流保护配合分析工具和简化公式不再适用。必须建立全有源节点的精细化瞬态控制仿真模型, 并推荐在关键骨干节点引入方向性保护 (Directional Protection), 以满足各个可能短路路径上的严苛选择性切除要求。

5.2.6 绝缘监测

在 AIDC 800V 直流供电系统中, 除配置过流与短路保护器件外, 绝缘监测同样是保障全局安全运行的底层核心。绝缘监测的主要目的在于实时在线侦测正负极母线及各分配电支路的对地绝缘电阻, 在发生皮肤接触漏电、绝缘层热老化或击穿前触发早期预警, 防止单相接地故障演变为严重的极间短路或危及人身安全的触电事故。

面对 GW 级 AI 超算中心高压 (800V)、高频纹波 (变换器 PWM 调制噪声) 以及对地电容的影响, 行业主流的绝缘监测技术路线表现出截然不同的物理特性。

5.2.8.1 方案一: 传统平衡电桥法

- **基本原理:** 在直流正负母线与地 (PE) 之间分别并联等值的精密高阻抽头, 通过实时采样中点对地电压的偏移量来反推绝缘电阻。
- **技术优势:** 拓扑结构极度简单, 硬件成本与造价极低, 且无需向配电网络主动注入任何外部信号源。
- **技术局限:** 存在完全的“对称故障检测盲区”。当正、负极对地绝缘电阻同时同比例下降时, 系统完全无法感知。此外, 该方案极易受高频开关噪声干扰, 在 800V 高纹波环境下误报率高。检测原理依赖母线电压, 在母线电压为零时无法检测。

5.2.8.2 方案二: 不平衡切换电桥法

- **基本原理：** 在平衡电桥的基础上引入受控电子开关，通过周期性切换正负极对地电阻的非对称状态，利用两组不同的对地电压采样点构建联立方程组，通过算法解调出正负极各自的对地绝缘电阻。
- **技术优势：** 克服了传统平衡电桥无法检测对称故障的盲区缺陷。硬件拓扑相对简单，成本适中，易于在各级配电支路进行模块化分布式部署。
- **技术局限：**
 - ◆ **速度瓶颈：** 在大电容环境下，RC 时间常数极大，导致单次测量周期严重拉长，电阻检测精度显著下降。检测原理依赖母线电压，在母线电压为零时无法检测。
 - ◆ **高频干扰敏感：** 在高压大纹波环境下，开关噪声会严重污染采样点，导致在高功率运行段的计算精度显著变差。

5.2.8.3 方案三：低频信号注入法

- **基本原理：** 通过在直流母线中点与地（PE）之间主动注入一个低频（通常为 0.1Hz~10Hz）的正弦波或方波交流信号。通过高精度的电流互感器与数字信号处理提取回路中的衰减信号与相位差，从而精准计算出对地绝缘阻抗。
- **技术优势：** 完美解决对称与非对称接地故障的全面侦测。由于注入信号频率极低，能够有效穿透系统超大对地电容的容性干扰，抗高频干扰能力极强，且通过耦合电容实现了全隔离高压物理防护，系统安全性高。克服了不平衡桥在大电容环境下单次检测周期长的问题，实现秒级快速响应。通过回路中注入信号电压和电流相位差的提取，在大电容环境下仍可以保持较高的绝缘电阻检测精度。信号注入的方式决定了不依赖母线电压，即使在母线电压为零时仍可以检测。
- **技术局限：** 算法复杂度高，初期研发及软件算力硬件成本较高。

综合来看，基于 GW 级 AI 数据中心高功率密度、大对地电容的物理实况，低频主动注入式的绝缘监测技术将成为极端算力环境下的更优选择。