

AI INFRA · 电力

从缺芯到缺电

AI 算力的真瓶颈与电力链价值再分配——当 GPU 供给缓解，决定数据中心上线节奏的，已是大型变压器交期与并网时点，而非芯片到货。

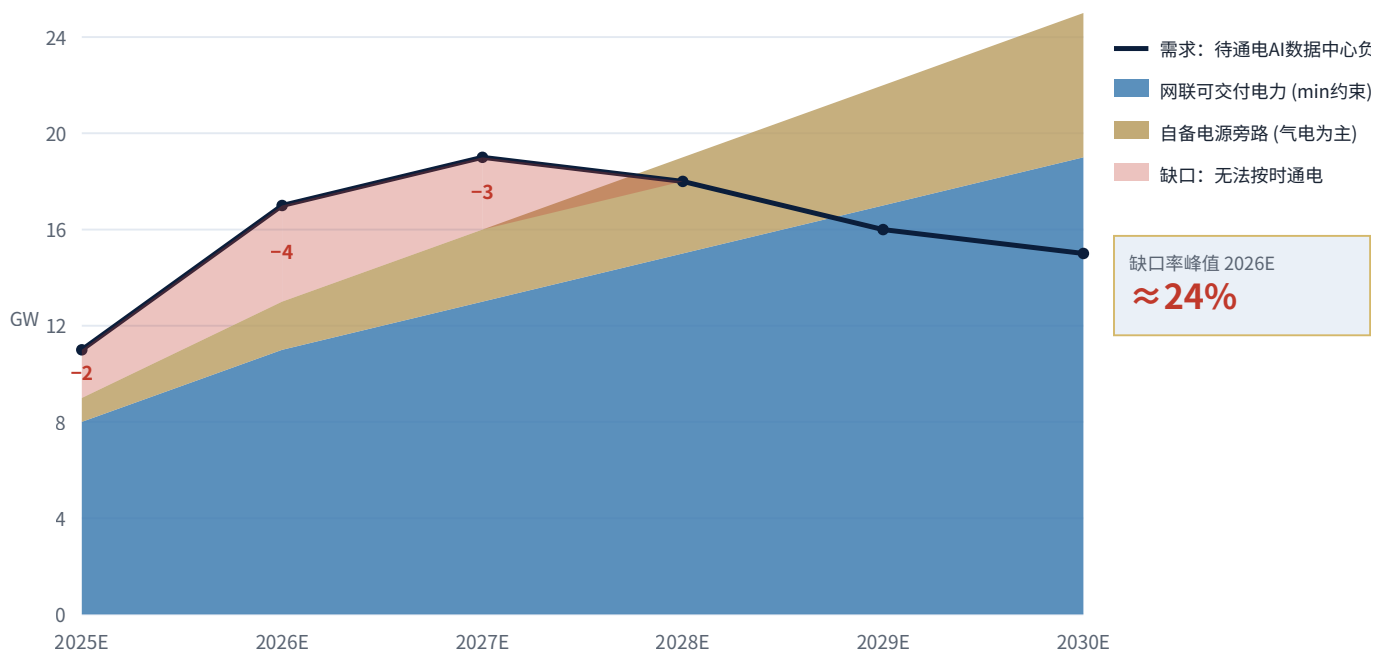
01 核心观点

KEY CALLS

AI 扩张的 binding constraint 正从硅转向电子。GPU 缺口收敛之际，大型变压器交付与并网时点接棒成为数据中心上线的真实卡点；价值沿电力链向一次设备与输配电再分配——这是一笔有明确窗口、而非永续的结构性的交易。

- 01 卡点已换锚。** GPU 交期回落至数月、缺口收敛；但大型变压器(>100MVA)交期仍达 **128 周**、并网排队中位 **>4 年**——电力取代芯片成为新瓶颈。〔Wood Mac Q2'25; LBNL〕
- 02 缺口可量化。** K Research 自建模型测算：北美 AI 数据中心"按时通电"缺口率 2026E 峰值 $\approx 24\%$ ，base 情景 2028 回落 <10%；marginal 大项目上线被拖累 **约 2-4 个季度**，最深者承受变压器全周期 80-128 周。
- 03 价值向一次设备迁移。** 网侧电气设备单位强度由 2020 的 $\sim \$1.2\text{M}/\text{MW}$ 升至 2026E 的 $\sim \$2.1\text{M}/\text{MW}(+75\%)$ ；2025-30E 增量设备 TAM $\approx \$183\text{B}$ ，其中大型变压器+变电站 $\approx \$40\text{B}$ 。
- 04 卡脖子的卡脖子是硅钢。** 美国取向硅钢(GOES)自给率仅 $\sim 20\%$ 、单一本土供应商(Cleveland-Cliffs)——这是 L7 最深不可替代节点，决定变压器产能爬坡的真实斜率。〔Cliffs FY25 ARS〕
- 05 自备电源不是近端解药。** 航改型燃机可 <30 天装机，是 2025-27 唯一一桥接；重型燃机 slot 已排到 **2029-30**、SMR 首电要 2030+。base 情景缺口缓解主要靠**并网改革**而非表后发电。〔GEV 1Q26; Siemens Energy〕
- 06 中国出海是隐性赢家。** 2025 中国变压器出口 **+36%** 创纪录(对欧洲 +138%)；金盘海外新签 +281%、思源海外 +89%——但对美直供 -4.4%，份额经由欧洲/中东/墨西哥与"供货给 GE"的间接路径兑现。〔海关总署〕
- 07 价格已 price-in 多年。** GE Vernova 远期 PE **64.7x**(行业中位 $\sim 19x$)、在手订单 \$163B；西门子能源两年涨 ~ 10 倍。Backlog 是真的，但估值隐含"十年无瑕交付"——共识最脆弱处不在需求方向，而在**需求斜率与缺口久期**。

图 0 自建模型：缺口 2026E 见顶 $\approx 24\%$ ，base 情景 2028 收敛



来源：K Research 自建测算；需求口径锚定 Grid Strategies 2025 国家负荷报告，供给约束取 Wood Mackenzie / LBNL，E 为 K Research 预测。数据截至 2026 年 6 月。

三情景速览 · 概率合计 100%

BEAR 25%

缺电延续 · 峰值 $\sim 44\%$ · 持续至 2030

BASE 55%

2027 后缓解 · 峰值 $\sim 24\%$ · 2028 <10%

BULL 20%

约束快解 · 峰值 $\sim 9\%$ · 2026 消退

02 产业链全景 · 七层卡点穿透

Q1 · Q4

电力链由"发电—输电—大型变压器—变电站/开关—中压配电—机柜"六环串联。**需求侧(L1)付费能力极强但议价权弱**，集成侧(L2)可瞬时切换；真正的卡点集中在**中段一次设备**——大型变压器与变电站。这两环既不可绕过、又交期最长，构成AI上线的物理闸门。

图1 卡点集中在电力链中段：发电与机柜两端宽、变压器/变电站窄

AI 数据中心电力链：从发电到机柜，瓶颈集中在中段一次设备



来源：K Research 整理，节点交期取 Wood Mackenzie Q2 2025、LBNL Queued Up 2025。数据截至 2026年6月。

七层 choke-point 穿透：沿链下钻，议价权与替代窗口逐层量化——越深越不可替代，决定缺口能多快被填平。

层	渗透对象	议价权	替代窗口	K Research 量化判断
L1	终端 AI 算力需求	弱	即时	买方分散，但 2026 capex \$630-725B、付费能力近乎无上限
L2	数据中心/园区集成	弱	<1 季	EPC 可替代性高，切换成本低
L3	大型变压器 >100MVA	强	6-10 季	交期 128 周、2025 缺口 30%；新增产能 2028 才上线
L4	取向硅钢 GOES	强	8-12 季	变压器铁芯命门，价格自 2020 约翻倍
L5	制造产线(浇注/绕线)	中	4-8 季	熟练工与产能爬坡受限，\$2B 扩产中
L6	GOES 冷轧/退火线(设备的设备)	中	8+ 季	隐形次级瓶颈，重资产长周期
L7	美国 GOES 自给 ~20% · 单一生产商	强(最深)	>12 季	Cleveland-Cliffs 独家；结构性依赖进口，关税扰动放大

机制：L3-L4-L7 三层叠加，意味着即使资本无限，变压器产能的真实斜率被最上游的硅钢与单一产线锁死。这正是"缺电"区别于"缺芯"的根本——芯片是先进制程的良率问题、可被资本与 EUV 快速放量解决；变压器是**重资产、长周期、上游材料垄断**的问题，无法用钱在 12 个月内变出来。

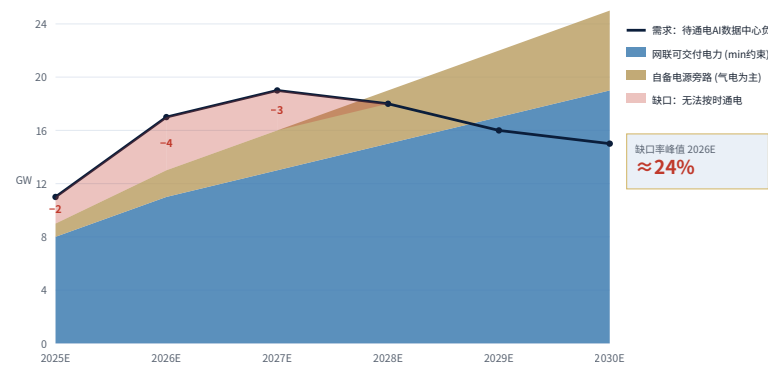
03 供需缺口 · 自建测算

Q2

◆ K Research 自建测算：AI 数据中心"按时通电"供需缺口模型

结构：需求 = 北美新增、待通电 AI 数据中心负荷(GW/年)；可交付供给 = min(变压器产能, 并网吞吐, 可服务发电) + 自备电源旁路。取 min 是 choke-point 的数学表达——三约束中最紧者决定能通多少电。缺口 = 需求 - 实际通电。

图 2 缺口 2026E 见顶 ≈24%，2028 收敛于变压器产能上线



关键假设(摘) · 标级别

- 需求 2026 = 17 GW/yr [Grid Strategies · 估计]
- 变压器交期 128 周 [Wood Mac · 事实]
- LPT 2025 缺口 30% [Wood Mac · 事实]
- 并网中位 >48 月 [LBNL · 事实]
- 自备旁路 1→6 GW/yr [K Research · 估计]
- 设备强度 \$2.1M/MW [K Research · 估计]

来源：K Research 自建测算，E 为预测。截至 2026年6月。

数学链(可复现)：有效供给_t = min(变压器_t, 并网_t, 发电_t) + 自备_t；缺口_t = 需求_t - min(需求_t, 有效供给_t)；累计缺口 = Σ 缺口_t。base 输出：累计未通电 9 GW，折算平均上线延迟 ≈2.2 个季度。

图 3 敏感性矩阵：价格对"需求斜率 × 供给吞吐"高度发散

供给吞吐乘数 (变压器+并网产能爬坡) → 越往右越慢

		×1.3	×1.2	×1.1	×1.0	×0.9	×0.8	×0.7
需求乘数 (A数据中心负荷) ↓ 越往下越高	×0.7	0	0	0	0	0	2	6
	×0.8	0	0	0	1	3	7	12
	×0.9	0	0	1	4	8	13	19
	×1.0	0	2	5	9	14	19	26
	×1.1	2	6	10	15	20	26	34
	×1.2	7	11	15	21	27	34	42
	×1.3	12	16	22	28	34	42	52

单元格 = 2025-2030E 累计无法按时通电缺口 (GW)；
金框 = base 中心情景 (累计缺口 9 GW)。蓝→红=缺口由小到大。

来源：K Research 自建测算；单元格=2025-30E 累计缺口(GW)，金框=base 中心情景。E 为预测。

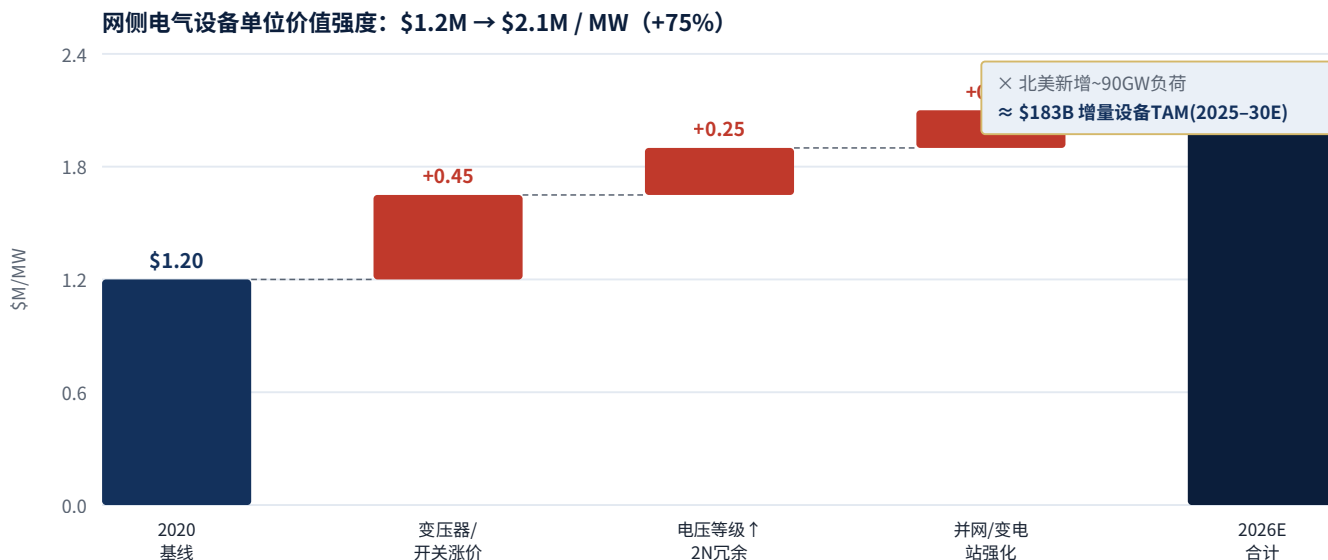
五段锻造：数据交期128周+并网>4年+缺口30% → 机制三约束取min，2026需求爬坡最快而供给最紧 → 结论缺口2026见顶~24% → 反驳反方：自备燃机可绕过电网 → 再结论重型燃机slot已满至2029，航改机仅~1GW级、杯水车薪，故base缺口要到2028变压器扩产+并网改革才实质收敛。

04 单位经济 · 价值再分配

Q3

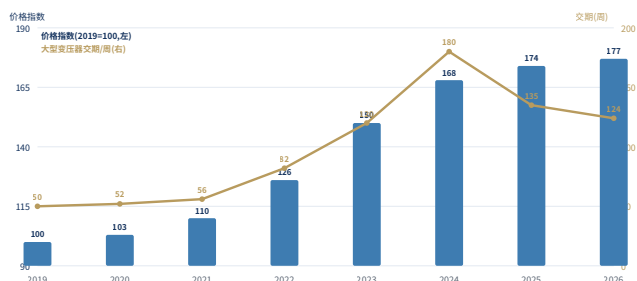
单座数据中心建造成本约 \$10M/MW(\$8-12M)，其中电气系统占开发成本 40-45%。但真正改变价值分配的，是网侧一次设备单位强度的抬升：电压等级提高、2N 冗余、并网与变电站强化，叠加变压器与开关本身涨价，把每 MW 流向电力设备商的价值显著做厚。

图 4 价值再分配：网侧设备单位强度 \$1.2M → \$2.1M / MW(+75%)



来源：K Research 估计，基于 dgtlinfra/行业建造成本拆解(\$10M/MW、电气40-45%)。E 为预测。截至 2026年6月。

图 5 价与量齐升：交期与价格指数同向



来源：Wood Mackenzie、Electrical Trader、BLS 整理。

设备商单位经济在改善。变压器价格自 2019 累计 +77%(名义)、约 +40%(实际,BLS)；产能紧 + 定价权强,龙头毛利与 EBITDA 率上行。GE Vernova 增资 \$5.3B 全资并购 Prolec,后者 EBITDA 率 >20%、在手订单一年增 25% 至 \$5B；西门子能源燃机引入"slot 预订费"、新订单 +10-20%/kW。

这是定价权外溢:当上线时点由设备交付决定,买方(hyperscaler)对价格不敏感、对交期极敏感——议价权从买方转向能"按时交货"的卖方。

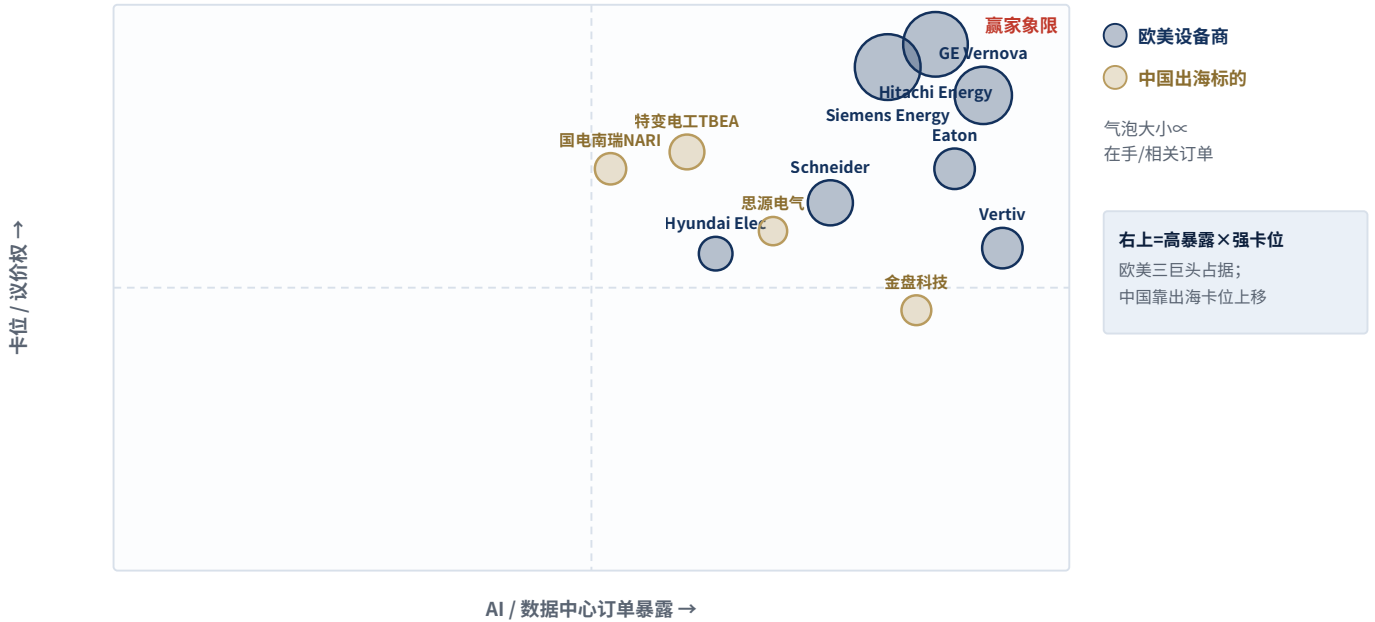
规模化:设备强度 ~\$2.1M/MW × 北美新增 ~90 GW ⇒ 2025-30E 增量设备 TAM ≈ \$183B;其中大型变压器+变电站约 22% ≈ \$40B。对照美国公用事业 2025 年 capex 创纪录 \$212B、Hitachi Energy 在手订单 \$57.9B,数量级自治。

05 竞争与卡位

Q4

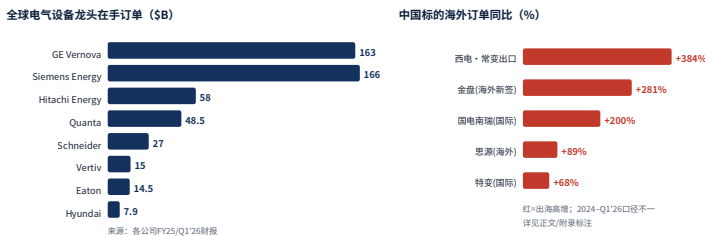
全球大型变压器格局是"欧美三巨头 + 韩日 + 中国出海"。Hitachi Energy(FY25 营收 \$19.8B/+26%、订单 \$32.8B、在手 \$57.9B)稳居第一,西门子能源电网科技、GE Vernova 电气化紧随;Eaton、Vertiv 在数据中心侧暴增(Eaton 数据中心订单 +240%、Vertiv 在手 +109%、book-to-bill 2.9x)。

图 6 战略矩阵:欧美占据"高暴露×强卡位",中国靠出海上移



来源:各公司 FY25/Q1'26 财报、海关总署整理;气泡∞相关在手订单。截至 2026年6月。

图 7 在手订单与中国出海增速



来源:公司财报、海关总署。口径见标注。

中国是隐性赢家、但路径间接。2025 变压器出口 RMB 64.6B(+36%、创纪录),对欧洲 +138%、中东(沙特)放量,对北美 -4.4%(关税;区域增速为年内累计口径)。TBEA 拿下沙特 RMB16.4B EHV 大单、海外占比 >35%;金盘数据中心收入 +197%、Q1'26 海外新签 +281%;思源海外 +89%。

卡位实质:中国份额经欧洲/中东/墨西哥转口与"供货给 GE/西门子"的间接路径兑现,而非对美直供——这决定了出海标的的弹性来自全球电网总需求,而非单押美国 AI。

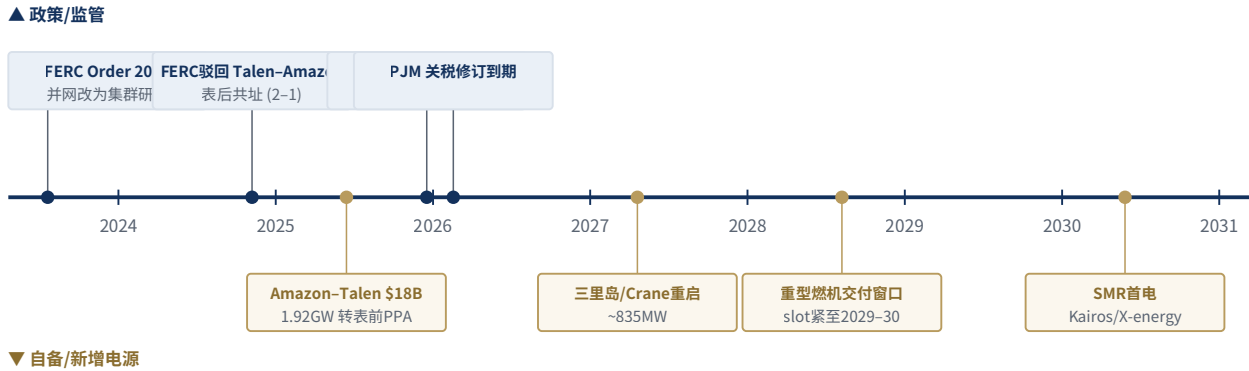
06 技术与政策拐点

Q5

缺口何时拐头,取决于两条曲线:政策松绑并网与自备电源交付。政策端,FERC Order 2023(2023.07)把并网改为"集群研究"、2023-A(2024.03)再确认;2024.11 FERC 以 2-1 驳回 Talen-Amazon 表后共址,2025.06 双方改签 \$18B/1.92GW 转表前 PPA 绕过;2025.12 FERC 令 PJM 重写共址与大负荷规则。

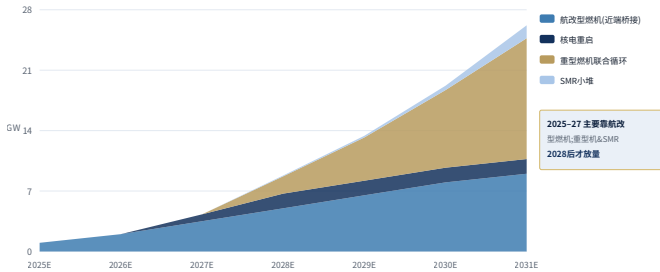
图 8 政策与供电时间线:2025-26 密集落子,缺口缓解靠并网先行

政策松绑与自备电源交付,决定缺口何时拐头



来源:FERC 令(ER24-2172)、Talen IR、ERCOT、各公司公告整理。截至 2026年6月。

图 9 自备电源:2028 前主要靠航改型燃机桥接



来源:GE Vernova 1Q26、Siemens Energy、各 SMR 项目公告。E 为预测。

自备电源是慢变量。航改型燃机(LM2500XPRESS)可 <30 天装机,是 2025-27 唯一可规模桥接者(已向 Crusoe 交付 ~1GW);重型燃机联合循环 slot 已排到 2029-30(GE Vernova 在手+预订 100GW、~25% 流向数据中心),新建气电成本 +66%。

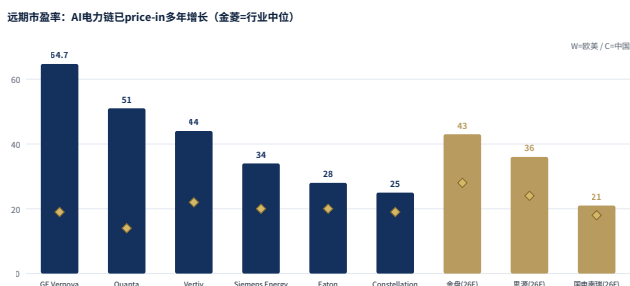
核电:三里岛/Crane 重启 ~835MW、2027-28;SMR(Kairos/X-energy/Oklo)首电要 2030+,2030 前对缺口贡献可忽略。技术 S 曲线上,自备电源仍处早期陡升前的平台,无法在 base 窗口内独立解决缺电。

07 资金与持仓 · 估值

Q6

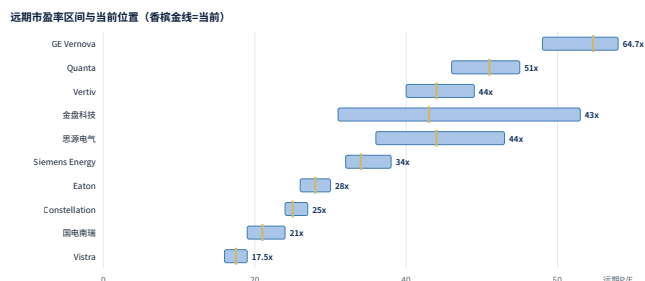
"AI 电力"是 2024 以来最拥挤的实主题之一。**西门子能源两年涨 ~10 倍**(€15→€193 峰)、GE Vernova 自 IPO 翻数倍、ATH \$1,149(2026.04)。GRID 电网 ETF 年内净流入 >\$3.1B、AUM ~\$11B。设备商 backlog 创纪录(GEV \$163B、Siemens ~€154B、Quanta \$48.5B),book-to-bill 普遍 >1.7x——**订单是真实的**。

图 10 远期 PE 已远超行业中位



来源:stockanalysis/gurufocus 等供应商快照,中国为卖方 26E。截至 2026年6月。

图 11 估值区间与当前位置



来源:同上;香槟金线=当前远期 PE。多供应商口径有差异。

已 price-in 多少:GEV 远期 PE 64.7x(行业中位 ~19x)、EV/EBITDA ~95x(TTM);Quanta 51x、Vertiv 44x。卖方明确警示"为十年交付付费"、2027 或现冷却/数据中心电力过剩。同时 **核电/IPP 板块 2026 YTD -22%**(CEG -20%)——这是动量解除而非逻辑破裂,但说明拥挤交易的脆弱性。中国标的(NARI 21x、TBEA 28x)估值更低,出海弹性未被充分定价。

08 反共识深论 · 攻击最脆弱假设

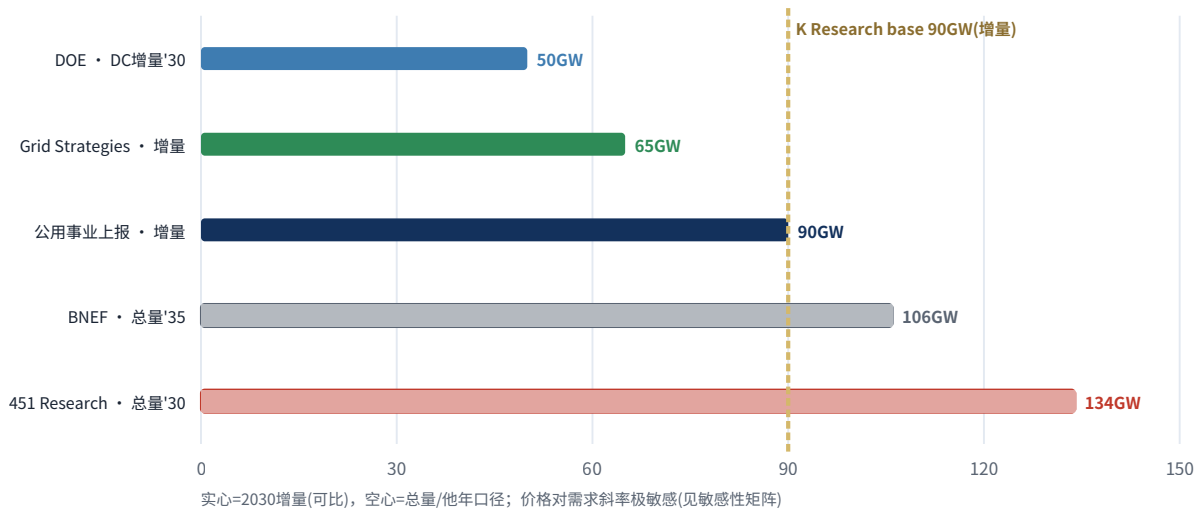
Q7

市场共识(白纸黑字):① 算力 = 芯片,电力是次要工程问题;② 在"电力是新瓶颈"已被部分接受后,电力设备 backlog 将线性、持久地兑现,缺口是多年甚至十年级的。前者已在 2025 被证伪,后者正是当前设备股估值的地基。

K Research 攻击点:不在需求方向,而在需求斜率与缺口久期。真正脆弱的,是"缺口持久"这一隐含假设。两股力量被系统性低估:其一,需求预测本身高度发散——2030 增量负荷的公用事业上报口径约 90GW,Grid Strategies 测算真实仅 ~65GW、并明示上报"高估";若改用总需求口径,451 Research 给到 134GW。无论何种口径,分歧均 >2 倍。其二,并网改革 + 表后共址常态化是被低估的供给侧解药:FERC 令 PJM 重写大负荷规则、ERCOT SB6 立法、MISO 自称"并网周期压到一年",叠加航改燃机旁路,都在加速填平缺口。

图 12 口径分歧 >2 倍:共识的地基是流沙

增量口径 50-90GW、总量口径达 134GW: 分歧>2倍



来源:Grid Strategies 2025、DOE、BNEF、451 Research 整理;实心=2030 增量(可比),空心=总量/他年口径;金虚线=K Research base(增量)。E 为预测。

结论(可证伪):缺口真实但自我修复——base 情景 2028 收敛。因此这是一笔 2025-27 的窗口交易,而非永续。设备股最大风险不是需求 miss,而是供给正常化 + 市场意识到缺口将闭合,导致即便 backlog 仍满、估值也压缩("好生意,但定价了完美")。反共识推论:当人人都在交易"缺电永续"时,真正的 alpha 在缺口收敛的拐点与中国出海这一份额转移上,而非追高已 price-in 的美国设备龙头。

09 二阶与三阶效应

传导链

图 13 电力卡点的传导:从设备受益到监管反身



来源:K Research 整理。箭头为逻辑传导,非资金流权重。

一阶(直接受益):大型变压器商、网侧电气设备、燃气轮机商、核电/IPP。这一层已被市场充分定价。

二阶(连锁):① 上游取向硅钢/铜紧张,定价权进一步上移(美国 GOES 自给 20%、中国却走向过剩——份额转移);② 电价上行传导至工业与居民,引发 ratepayer 反弹与政治压力;③ 公用事业进入 capex 超级周期(\$212B/年);④ 中国设备出海份额↑,经欧洲/中东兑现。

三阶(反身):① 监管反噬——FERC 对表后共址收紧,因其把成本社会化给普通用户;② AI 算力选址迁移,向电力富集区(美国 PJM 外、中东、北欧)甚至海外扩散,改变数据中心地理;③ 电力成为 AI 估值新锚——谁锁定了电,谁的算力扩张可信;④ 电网国产替代在中国加速,UHV/数字化龙头(NARI)受益。

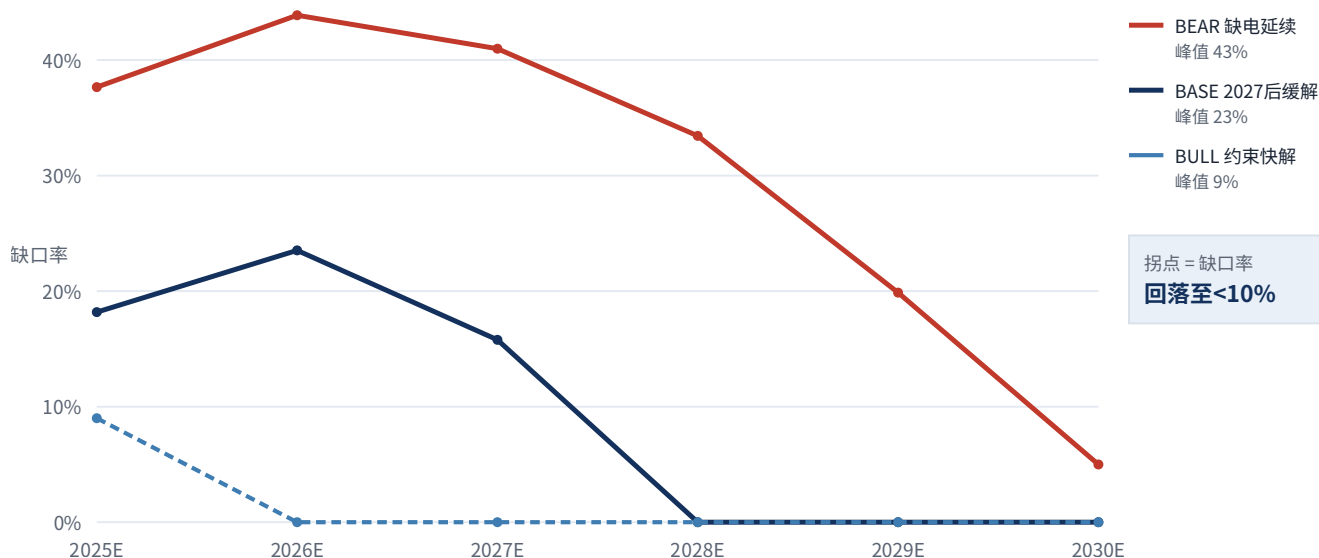
最值钱的二阶判断

缺电把“电”变成 AI 竞赛的战略储备:hyperscaler 从买算力转向囤电(PPA/自备/选址),电力供给能力成为算力护城河的一部分——这是芯片时代不存在的新竞争维度。

10 情景与风险

SCENARIOS

图 14 三情景缺口率:拐点 = 缺口率回落至 <10%



来源:K Research 自建测算,与模型三组假设输出对齐。E 为预测。截至 2026年6月。

情景	概率	缺口率峰值	触发条件 / 含义
BEAR 缺电延续	25%	~44%,持续至 2030	需求维持高位 + GOES/变压器紧 + 并网慢 + 燃机 slot 满;电力是硬约束,上线延迟 4-8 季
BASE 2027后缓解	55%	~24%, 2028<10%	变压器扩产 2028 上线 + 并网改革见效 + 航改机桥接;平均延迟 2-4 季
BULL 约束快解	20%	~9%,2026消退	需求被下修(预测高估证实)+ 并网提速 + 表后放行;缺口 2026 内消退

什么信号出现,说明我们判断错了(可证伪):

- ▶ **判 base 过悲观(转 bull):**若大型变压器交期在 2026H2 前回落至 <70 周,或 hyperscaler 下修 capex 指引 >15%——需求斜率证伪,缺口快速消退。
- ▶ **判 base 过乐观(转 bear):**若 LBNL 队列 gas 容量继续 >+50%/年且并网中位 >5 年;或 Cleveland-Cliffs/ArcelorMittal 美国 GOES 新产能 (2027)延期——缺口延长。
- ▶ **结构性证伪:**若 FERC 转向放行表后大负荷共址,自备电源放量绕过电网——缺口被"绕过"而非"填平",变压器卡点逻辑部分失效,但燃机逻辑增强。
- ▶ **价值再分配证伪:**若网侧设备单位强度未随电压等级/冗余抬升(维持 ~\$1.5M/MW),则 \$183B TAM 高估约 25-30%。

11 方法论与数据附录

APPENDIX

模型搭建逻辑:缺口模型回答"电力多大程度拖累 AI 上线时点"。核心是 choke-point 的数学表达——取 min:无论资本多充裕,能通多少电由变压器产能、并网行政吞吐、可服务发电三者中最紧者决定。自备电源(燃机为主)作为旁路叠加,但本身受 turbine slot 约束。关键简化:以北美为口径、年度颗粒;未单独建模电网内部潮流约束与州际差异(已知局限)。

完整假设表(标来源与级别)

变量	取值	单位	来源	级别	备注
需求 D(2025→2030)	11→16	GW/yr	Grid Strategies 2025 国家负荷报告	估计	公用事业 90GW/2030 折年
大型变压器交期	128	周	Wood Mackenzie Q2 2025 survey	事实	power transformer 均值;GSU 144
LPT 2025 缺口	30	%	Wood Mackenzie 2025	事实	全国机队口径
美国 GOES 自给率	~20	%	Cleveland-Cliffs FY25 ARS / Power Mag	事实	单一本土产商
并网中位等待	>48	月	LBNL Queued Up 2025	事实	IR→COD,2018-24 建成
重型燃机 slot	2029-30	年	GE Vernova 1Q26 / Siemens Energy FY26	事实	在手+预订 100GW
自备旁路 BTM	1→6	GW/yr	K Research 估计	估计	航改机+重型机爬坡,受 slot 限
设备单位强度 2026	2.1	\$/MW	K Research 估计(建造 \$10M/MW、电气40-45%)	估计	网侧+部分表后电气
hyperscaler capex 2026	630-725	\$/B	各公司指引 / CreditSights / Tom's HW	事实	Big Four,~75% AI

关键一手信源(已读进并显式引用)

- ▶ LBNL 《Queued Up 2025 Edition》(2025.12)——队列 ~2,290GW、gas +72%、IR→COD 中位 >4 年。
- ▶ FERC 令 ER24-2172-000(2024.11.01,189 FERC ¶ 61,078)——驳回 Talen-Amazon 表后共址。
- ▶ GE Vernova 1Q26 业绩(2026.04.22)——燃机在手+预订 100GW、slot 紧至 2029-30。
- ▶ DOE/LBNL 《2024 美国数据中心能耗报告》(2024.12)——4.4%→6.7-12%(2028)。
- ▶ Wood Mackenzie Q2 2025 变压器调查——128/144 周、30% 缺口。
- ▶ 中国海关总署 2025 变压器出口——RMB 64.6B、+36%、对欧 +138%。

数据口径与已知局限(宁写未知,不写大概)

- ▶ 变压器价格 +77%(名义,自2019)与 +40%(实际,BLS)口径并存,正文取名义、敏感性覆盖。
 - ▶ 估值倍数为多供应商快照,EV/EBITDA 跨源差异大(如 VRT 28x vs 49x),仅作参考。
 - ▶ 中国出海增速 2024-Q1'26 口径不一,已逐条标注,不可简单年化。
 - ▶ 需求侧采公用事业上报口径(偏高);bull 情景已纳入"高估被证实"。
 - ▶ 未覆盖:电网内部潮流、州际/ISO 差异、铜与劳动力的独立瓶颈、汇率。
- 交叉验证:进入正文的关键数字均 ≥2 独立来源;冲突处给区间并说明取舍。全文经两轮红队自检(结论强度 / 数据脆弱性)。

12 结论与行动

CONCLUSION

核心结论:AI 的 binding constraint 已从硅转向电子。缺口真实、可量化(2026E 峰值 ~24%),但 base 情景自我修复于 2028——这是一笔有明确窗口的电力链价值再分配交易。价值向大型变压器与网侧一次设备迁移(\$183B 增量 TAM);最深护城河在取向硅钢(L7);最被低估的弹性在中国出海份额转移;最大风险不是需求 miss,而是估值已 price-in"缺口永续"。

关注时间表(季度催化)

窗口	跟踪信号
2026 H2	变压器交期拐点;Wood Mac 新一期 deficit 读数
2026 Q3-Q4	PJM 共址关税终稿;hyperscaler capex 指引修订
2027	三里岛/Crane 重启并网;美国 GOES 新产能进度
2028	\$2B 变压器扩产上线;缺口是否如期收敛

行动框架(非投资建议):跟踪缺口拐点而非追高;关注上游硅钢与中国出海这两个未被充分定价的环节;以可证伪信号(交期/队列/capex 指引)动态校准 bull-base-bear。

方法论一句话

本报告以"按时通电"供需缺口模型为认知地基:可交付供给 = min(变压器,并网,发电)+自备旁路。读者可据此自行代入新假设、推演缺口拐点——这是一个可复用、可证伪、带敏感性的框架。



扫码进入口罩哥知识星球
解锁全部 K Research 独家研报

免责声明:本报告由 K Research 基于公开信息独立研究撰写,仅供口罩哥知识星球订阅者参考,不构成任何投资建议或要约。报告中的数据、预测与判断截至发布日,可能因后续信息而变化;K Research 不保证信息的完整性与准确性。自建模型的假设与输出为研究推演,非对未来的承诺。投资有风险,决策需独立判断,据此操作风险自担。本报告版权归 K Research 所有,未经许可不得转载、引用或二次分发。