

新形势下光伏电站组串优化设计研究

国家能源集团新能源技术研究院

2024年4月17日



国家能源集团
CHN ENERGY

总体概况

新能源技术研究院成立于2010年8月，是集团公司“1+2+3+N”中2个前沿研究院之一。2021年4月，按照集团公司部署，国华研究院并入新能源院，形成了集**技术监督服务、设计优化评价、科技研发、智能发电**为一体的创新型专业化研究院，在新能源及常规火电技术监督和服务、管理技术支撑、基建设计优化、金属微创研究、智能发电、海水淡化、碳减排等领域拥有核心能力，具备为**集团总部职能部门、集团电力及化工产业子(分)公司**的生产运营、基本建设、科技管理、智能智慧建设等提供技术和管理服务的能力。

新能源团队业务

光伏、风电等新能源技术研发，**集成行业内**研发机构最新思路、上下游供应商**先进技术**，提供新能源科技创新解决方案。**结合集团基地项目，打造优质示范工程**

新能源基础业务方面，**向集团二级公司新能源项目**开发管理**提供技术支持**，累计服务光伏项目总容量达到450万千瓦，风电项目总容量493万千瓦，总计完成服务项目容量达到943万千瓦，服务项目138项

科技研发与基础业务结合，集成先进技术方案应用于集团基地项目，**打造优质示范工程**；开展了海上风电业务开发指导意见等专题报告编制



目录

1

新形势下光伏发展现状与前景

2

组串优化设计

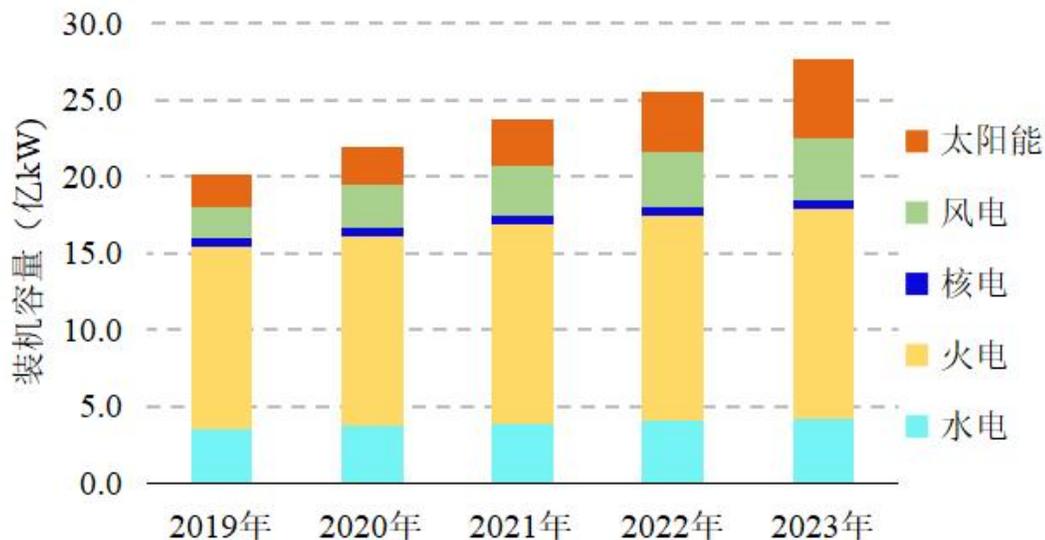
3

结论与建议

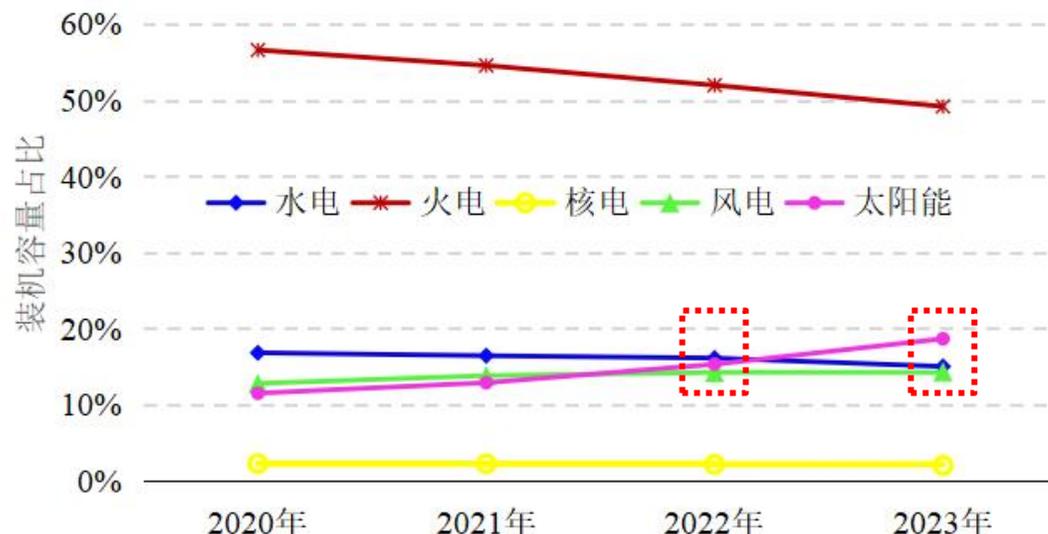
1.1 我国光伏发展的迅猛现状

截止2023年9月，全国累计装机容量27.9亿kW，其中火电占比49%，太阳能占比18.7%，水电占比15%，风电占比14.3%。

2023年前三季度太阳能累计装机首次超过水电，成为继火电之后的**第二大装机电源**，累计装机容量连续两年超过风电。



2019-2023年国内发电装机容量



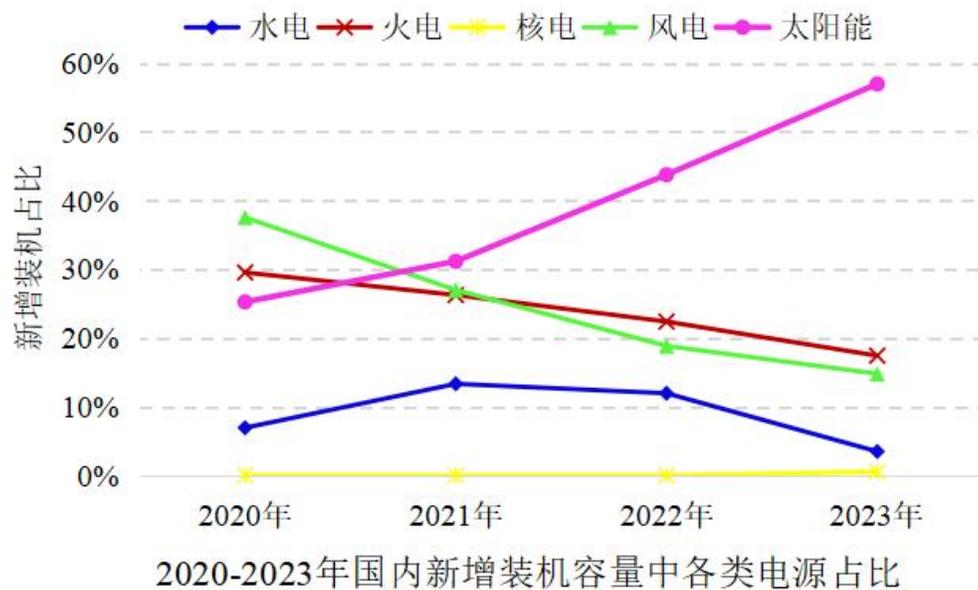
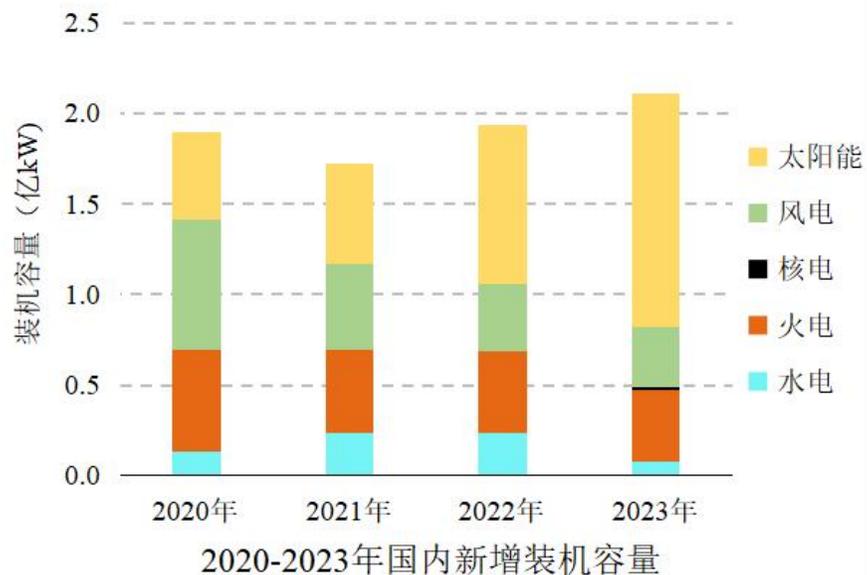
2020-2023年国内发电装机容量中各类电源占比

1.1 我国光伏发展的迅猛现状

2023年1-9月，全国新增装机容量2.2633亿kW，比2022年全年新增容量高2659万kW，新增装机容量中，火电占比17.43%，太阳能占比56.97%，水电占比3.48%，风电占比14.79%。

由于2020年电陆上风电抢装潮的影响高于2021年海上风电，2021年新增装机较2020年有所下降，之后逐年增加。

2021年开始，太阳能成为新增装机的主力军，在其他电源新增装机逐年下降的情况下，太阳能新增装机势头迅猛，2023年仅前三季度在新能源新增装机占比近57%。



太阳能发电成为我国发展最快的电源类型

1.2 2024年2月光伏利用水平骤降

地区	风电利用率	光伏发电利用率	地区	风电利用率		光伏发电利用率	
	1月	1月		2月	1-2月	2月	1-2月
全国	98.3%	98.0%	全国	93.7%	96.0%	93.4%	95.7%
北京	100.0%	100.0%	北京	94.9%	98.0%	98.6%	99.2%
天津	100.0%	100.0%	天津	95.3%	98.1%	93.6%	96.8%
河北	97.1%	97.8%	河北	84.0%	91.3%	87.4%	92.6%
山西	99.7%	96.3%	山西	95.9%	98.2%	94.4%	95.5%
山东	98.6%	99.4%	山东	90.1%	93.8%	90.8%	95.1%
蒙西	97.1%	96.4%	蒙西	90.3%	94.1%	88.6%	92.5%
蒙东	96.8%	99.1%	蒙东	87.8%	92.5%	97.8%	98.4%
辽宁	97.3%	98.7%	辽宁	91.0%	94.2%	94.1%	96.3%
吉林	96.2%	95.0%	吉林	82.9%	90.3%	94.7%	94.8%
黑龙江	99.8%	99.7%	黑龙江	91.2%	95.6%	91.5%	95.1%
上海	100.0%	100.0%	上海	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
江苏	100.0%	100.0%	江苏	99.5%	99.7%	98.6%	99.3%
浙江	100.0%	100.0%	浙江	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
安徽	100.0%	100.0%	安徽	99.4%	99.7%	98.6%	99.4%
福建	100.0%	100.0%	福建	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
江西	100.0%	99.9%	江西	97.9%	98.8%	87.5%	94.4%
河南	98.1%	97.7%	河南	89.1%	93.8%	95.1%	96.5%
湖北	100.0%	99.3%	湖北	97.1%	98.4%	88.3%	94.4%
湖南	100.0%	100.0%	湖南	93.9%	96.7%	99.5%	99.7%
重庆	100.0%	100.0%	重庆	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
四川	100.0%	100.0%	四川	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
陕西	97.6%	97.7%	陕西	94.2%	96.0%	89.7%	94.2%
甘肃	91.9%	92.9%	甘肃	91.2%	91.6%	93.2%	93.0%
青海	94.5%	93.1%	青海	92.4%	93.3%	89.7%	91.5%
宁夏	98.9%	98.7%	宁夏	97.7%	98.3%	92.2%	95.9%
新疆	97.4%	97.9%	新疆	95.9%	96.6%	95.1%	96.4%
西藏	100.0%	74.1%	西藏	100.0%	100.0%	70.9%	72.5%
广东	100.0%	99.5%	广东	99.6%	99.7%	99.8%	99.9%
广西	100.0%	100.0%	广西	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
海南	100.0%	99.2%	海南	100.0%	100.0%	97.8%	98.7%
贵州	100.0%	99.4%	贵州	98.9%	99.1%	97.4%	98.0%
云南	99.9%	98.9%	云南	97.8%	98.7%	94.2%	96.4%

2024年2月，多省光伏利用率骤降，表明光伏消纳形势严峻

- 全国光伏利用水平降低了近5%
- 光伏大省（山东、蒙西、河北、陕西），降低8%-10%
- 华中地区（江西、湖北）降幅也近10%

1.3 新能源参与电力市场化交易

从市场交易规模上看，2023年市场化交易电量56679.4亿千瓦时，同比增长7.9%，占全社会用电量比重为61.4%

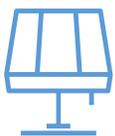
在市场化发电方面，燃煤火电以及风电、光伏等可再生能源机组仍是市场化电源的主要组成；在市场化用户方面，参与市场的用户主要是10千伏及以上工商业用户

双碳目标下，包括光伏、风电在内的新能源项目开发进入新的竞争态势，一方面随着国内新能源电力市场的改革推进，新能源全面参与电力市场交易的脚步越来越近

1.4 新能源设备升级速度越来越快，系统集成优化难度加大

- 随着技术的发展，光伏组件、逆变器、风电机组等主要设备可选的方案越来越多，不同形式的设备组合方案呈几何级增加，为工程方案的系统集成寻优提出了更大的挑战。

光伏



组件

N型

P型

182

210

支架

固定式

跟踪式

逆变器

集中式

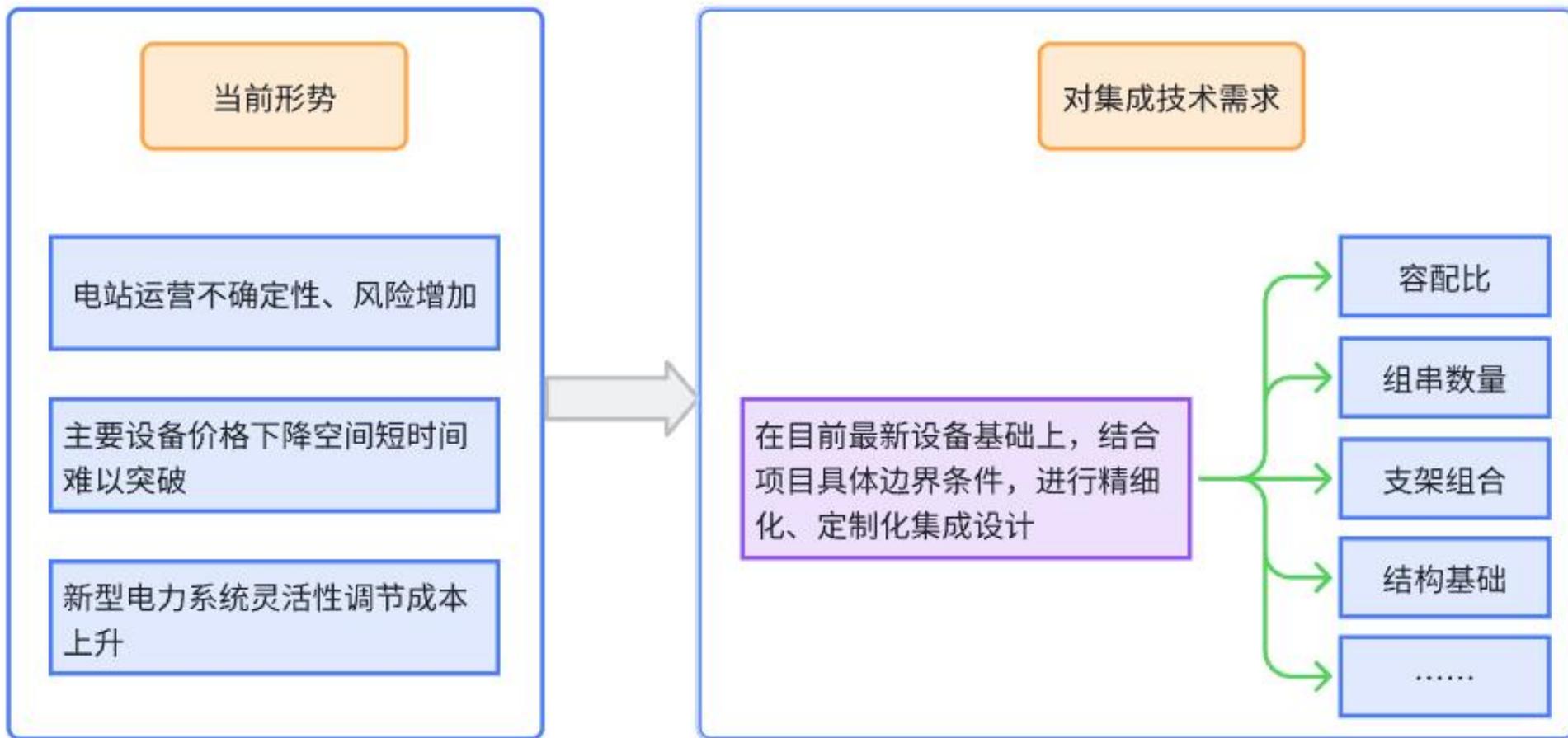
组串式

风电



开发条件越复杂，早期基于二维地理信息系统的设计在项目精细化、集成化、协同化设计等方面遇到瓶颈。

1.1 以度电成本优化为目标的系统集成技术



在目前光伏电站运营不确定性与风险增加的环境下，以度电成本优化为目标的精细化、定制化系统集成技术，对电站持有企业的重要性越来越高。



目录

1

新形势下光伏发展现状与前景

2

光伏电站组串优化设计

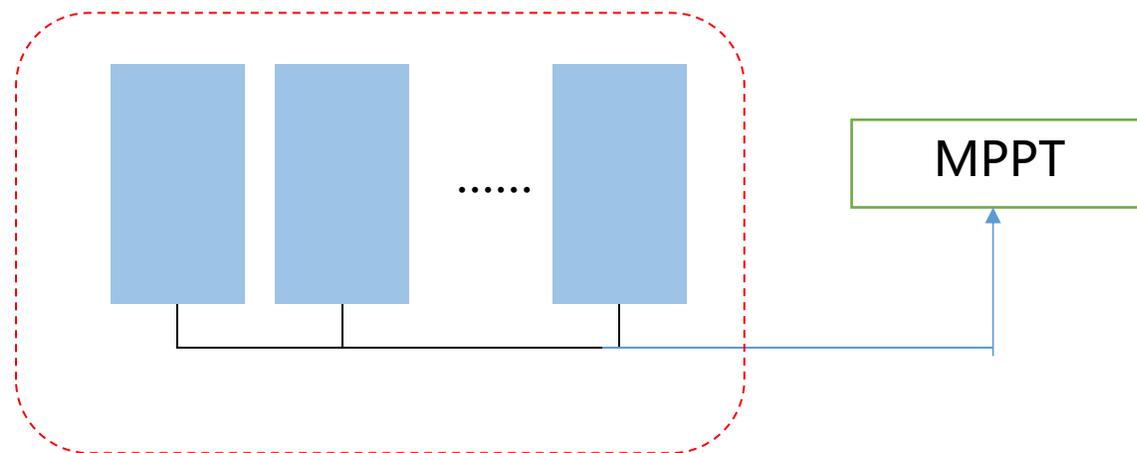
3

结论与建议

2.1 光伏电站组串数增加的收益

□ 光伏组串数

组串数：MPPT串联的光伏组件个数
常用的182组件组串个数一般为26



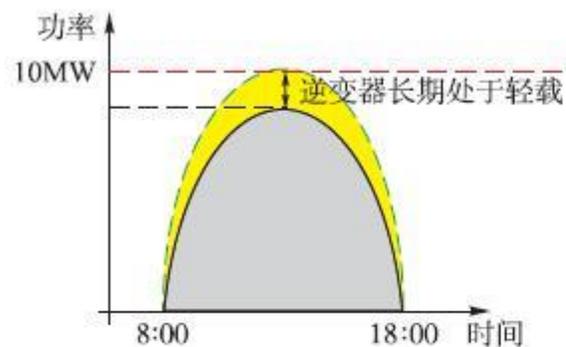
□ 光伏组串数量增加带来的收益

投资收益：组串数增加时，由于电站规模增加，支架、桩基、线缆等成本增幅较少，单位BOS成本会降低

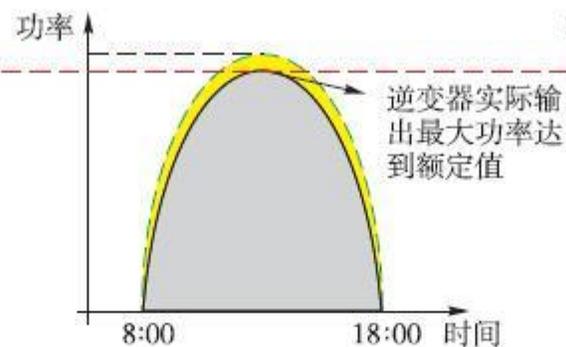
2.1 光伏电站组串数增加的收益

逆变器收益——能效更优

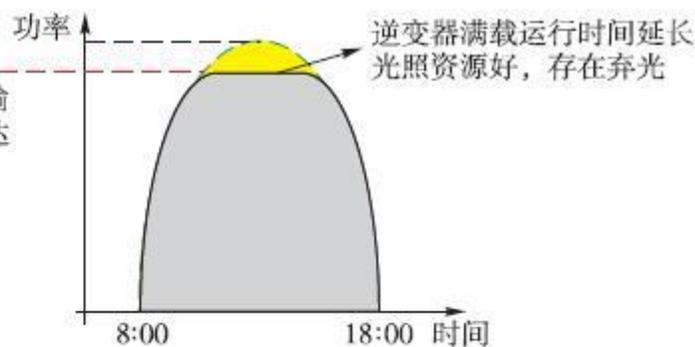
- 1、满载运行时间增加
- 2、更快启动



(a) 无超配工况
(a) NO overmatch condition



(b) 补偿超配工况
(b) Compensation overmatch condition



(c) 主动超配工况
(c) Active overmatch condition

----- 直流侧功率

———— 逆变器实际输出功率

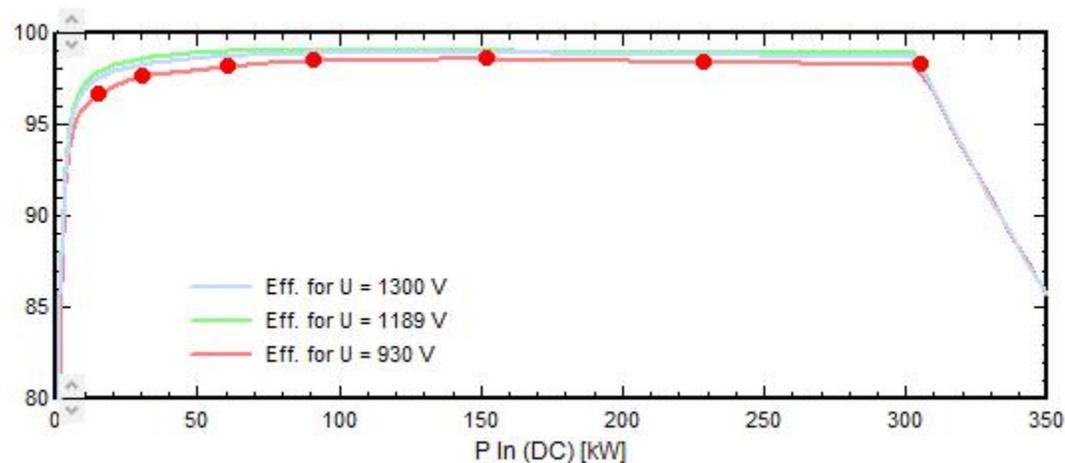
----- 逆变器额定输出功率

投资收益

能效收益

度电成本LCOE降低

逆变器效率-输入功率
曲线



2.2 当前存在的问题：组串数过于保守！

当前主流的组串数设计，是否合理？（26个182组件，28个210组件）



大庆实证基地结果：组串最大运行电压2022年实测为1234V（82.27%），2023年实测为1270V（84.67%），与1500V系统电压仍存在较大冗余。



现行GB50797-2012《光伏发电站设计规范》要求采用组件工作条件下的极限低温计算串联数量，但现实组件实际运行温度高于环境温度，使组件的串联数偏少，没有发挥新型组件的优势

2.3 当前组串数上限计算方法

基本原理

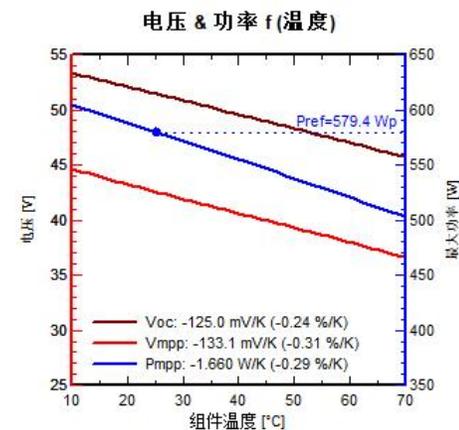
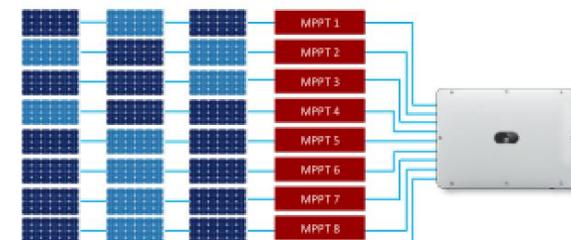
$$N \leq \frac{V_{dcmax}}{V_{oc} \times [1 + (t - 25) \times K_v]}$$

 V_{dcmax} 目前逆变器直流侧电压限值: **1500V** V_{oc}

STC条件下的开路电压, 182组件50V左右, 210组件45V左右

 K_v

组件开路电压温度系数



2.3 当前组串数上限计算方法

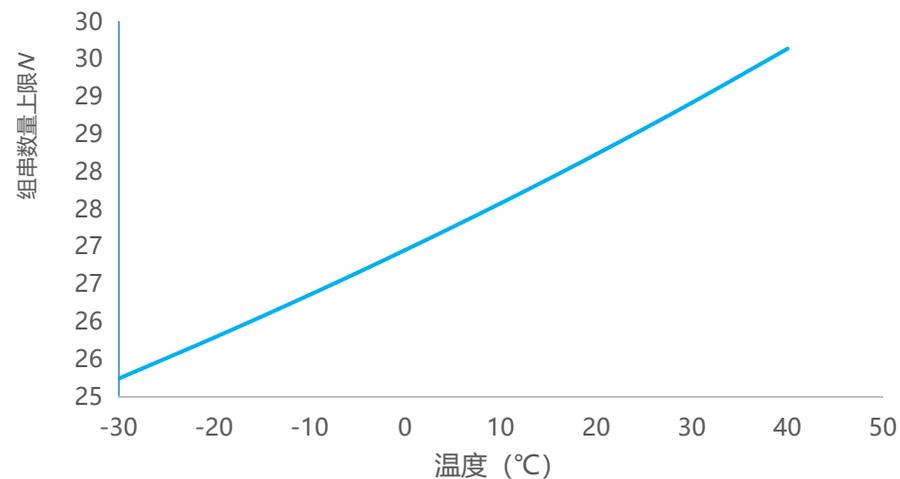
基本原理

$$N \leq \frac{V_{dcmax}}{V_{oc} \times [1 + (t - 25) \times K_v]}$$

t

组件最低温度

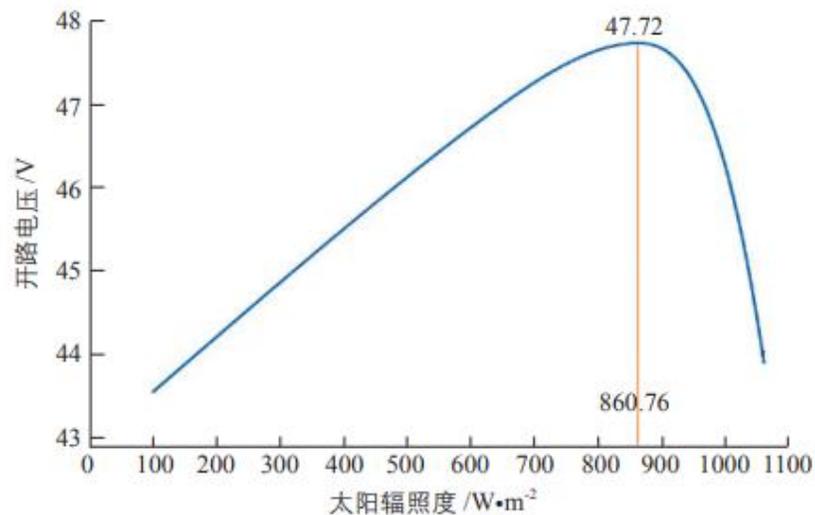
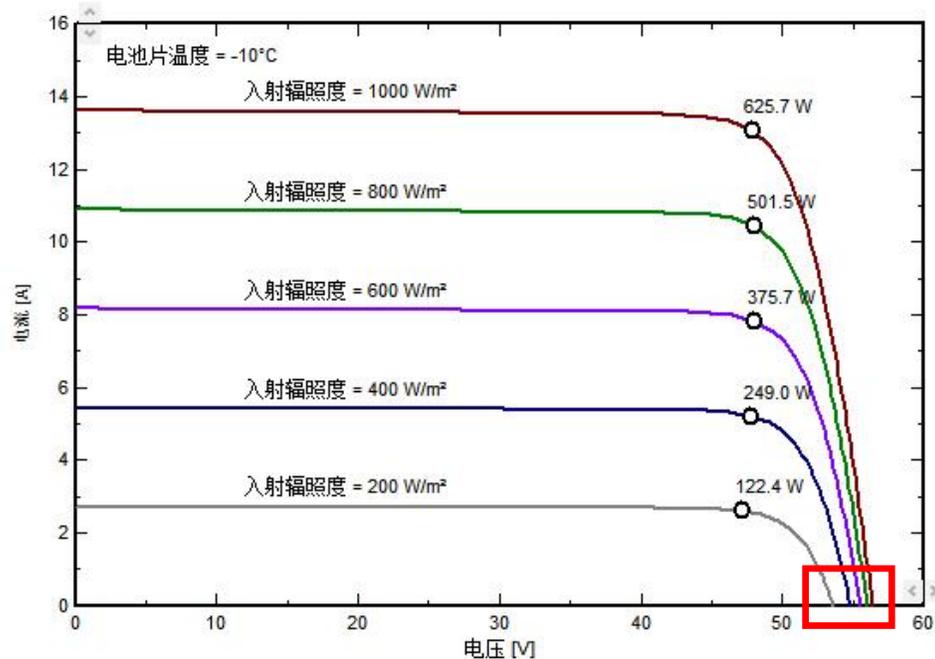
组串数量上限 N 最低气温 t 的关系



N_{max} 为 t 的正函数，范围为**25-31**

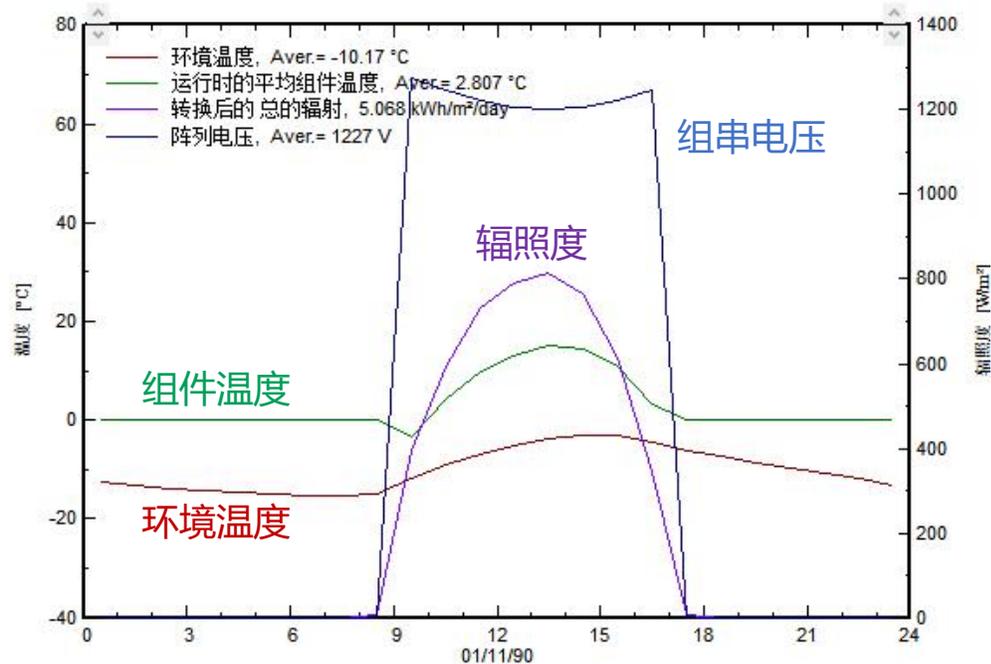
2.4 逆变器开路电压

- 开路电压大小主要受温度影响，其次为太阳辐照度
- 当太阳辐照度低于 200 W/m^2 时，晶体硅太阳能电池的开路电压与太阳辐照度近似呈正比例关系，当太阳辐照度高于 200 W/m^2 时，两者表现为对数关系。



2.4 逆变器开路电压

- 在清晨逆变器启动前，会自动检测组串开路电压 V_{oc} 是否大于逆变器最大电压 V_{dcmax} ，若大于则不会启动，直至组串开路电压小于逆变器最大电压后才会启动。
- 大多数逆变器启动后均有最大电压保护能力，若组串发生故障开路，组串开路电压 V_{oc} 大于逆变器最大电压 V_{dcmax} ，逆变器会启动高电压自动分断功能，以保护元器件。
- 温度选取可以分为3个层次：环境温度、光伏工作期间的环境温度、组件工作温度



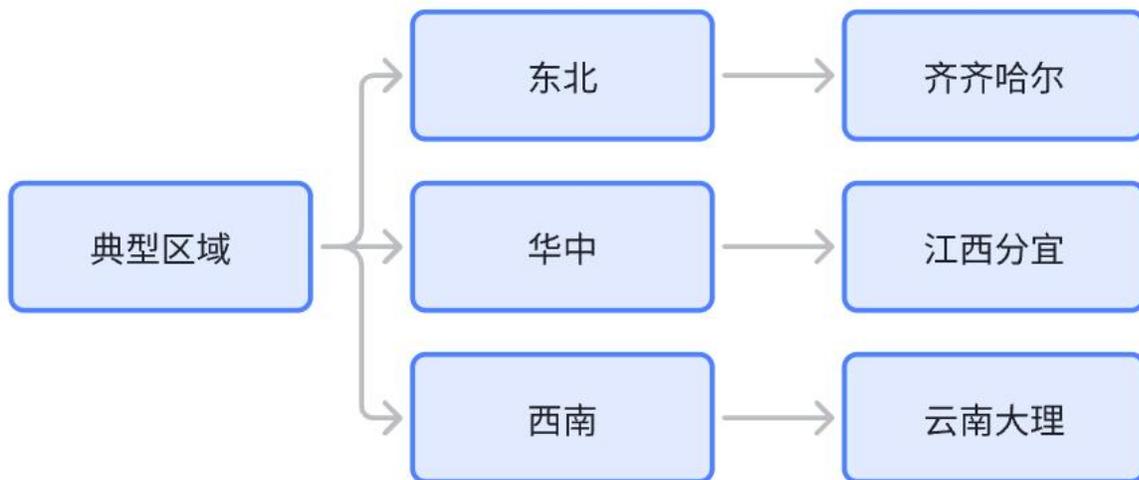
2.4 目前计算方法总结

标准或相关研究	计算方法
《光伏电站设计规范》 GB 50797-2012	$N \leq \frac{V_{dcmax}}{V_{oc} * [1 + (t-25) * Kv]}$ <ul style="list-style-type: none"> 未考虑工作条件下不同太阳辐照度对开路电压的影响; 一般采用历史最低气温来替代光伏组件运行极限低温。
IEC 62738-2018	<ul style="list-style-type: none"> 不再要求采用极端环境低温进行计算，而是允许在数据足够充分的情况下采用限制在日照时间内的年平均最低环境温度进行计算。
《Photovoltaic (PV) arrays— —Design requirements》 IEC 62548-1-2023 及相关学者研究的组件温升模型	<ul style="list-style-type: none"> 使用一个场所的绝对最低温度可能过于保守，因为它没有考虑到低辐照度条件下电池的实际温度和电压; 在计算最低温度时，可以排除低辐照度下的数据，即低于100W/m²的数据，或在极端年平均最低干球温度上增加10°C; 在某些地点可能需要考虑额外的因素，例如:反照率非常高的地点导致高辐照度与低温同时发生。在高辐照度和寒冷的白天温度存在的地方，可能发生开路电压状况。 ROSS等人提出了 $t_c = t_a + \frac{t_{NOC}-20}{800} G$, t_c为太阳电池的额定工作温度, t_{NOC}为NOC条件下组件的工作温度; G为太阳辐照度; t_a可取当地极端最低环境温度值

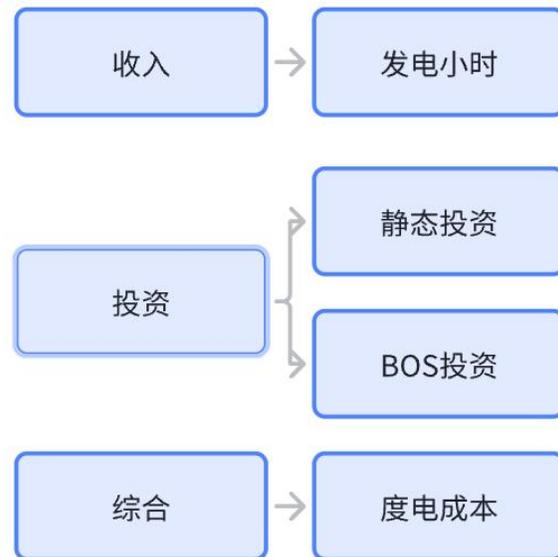
2.6 国内典型区域长组串案例计算

- 在国内3个典型区域中进行案例分析
- 对比指标方面，从项目收益、投资成本和综合性上进行分析

案例区域选择



对比指标



2.6 国内典型区域长组串案例计算

指标	单位	齐齐哈尔			江西分宜			云南大理		
		GB50797	IEC62548	温升模型	GB50797	IEC62548	温升模型	GB50797	IEC62548	温升模型
组串数		26	27	28	26	28	29	26	28	29
发电小时	h	1723	1722	1699	978	979	980	1631	1616	1606
单位静态投资	元/kWp	3500	3411	3329	3500	3329	3252	3500	3329	3252
度电成本	元/kWh	0.1864	0.1815	0.1801	0.3284	0.3127	0.3063	0.1970	0.1894	0.1925
bos单位投资	元/kWp	2400	2311	2229	2400	2229	2152	2400	2229	2152

- 发电小时方面，江西分宜随着组串数增加而增长明显
- 成本方面，单位千瓦投资变化约为0.09元/增长串数
- 度电成本方面，基本随组串数增加而降低
- 云南大理的度电成本呈现先增加后降低的现象，表明组串数优化需考虑容配比限制

高温、低辐照等地区的组串设计在降本增效上相对**具有更高的潜力**，需结合项目所在地所允许的容配比等限制条件综合考虑



目录

1

新形势下光伏发展现状与前景

2

光伏电站组串优化设计

3

结论与建议

- 当前**光伏发展**环境已进入新形势，发展速度迅猛的同时，需**面临利用率降低、电力市场价格的不确定**和风险，而光伏设备发展水平迭代较高，设计复杂度也在增强，**开展以度电成本为最优的光伏电站精细化、定制化集成优化技术具有迫切的需求**
- 目前的**组串设计**在大部分地区**存在逆变器直流侧裕度过高**的问题，**结合**项目所在**地区的环境温度与辐照**情况**测算**准确的**组件最低工作温度**，**可提高**开发项目的**降本增效潜力**
- **高温、低辐照**等地区的**组串设计**在降本增效上相对**具有更高的潜力**，需结合项目所在地所允许的**容配比**等限制条件综合考虑。

谢谢!

