

线损分析与低损调度

光伏出力与线路损耗（线损）不仅有直接关系，而且呈现一种典型的“先降后升”的 U 型曲线关系。

线损控制在 **6%** 以内，是因为线损率是电力局极其核心的经济与综合管理考核指标（KPI）。在大批量光伏接入后，很多原本低损耗的线路在中午反向出力高峰期时，线损会急剧飙升甚至暴涨翻倍，直接导致供电局的指标“爆表”。

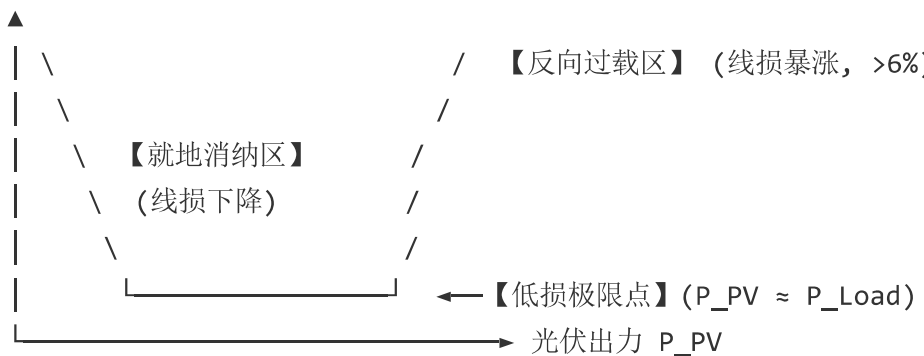
一、光伏出力与线损的关系：为什么会呈现“U型曲线”？

根据电路基本原理，线路的有功损耗（Joule Heating）公式为：

$$P_{\text{loss}} = I^2 R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R$$

其中 P 为线路传输的有功功率， Q 为无功功率， U 为节点电压， R 为线路电阻。光伏接入对线损的影响主要取决于**光伏出力与本地负荷的匹配关系**：

线路损耗 P_{loss}



1. 就地消纳阶段（降损区）

- 现象：**光伏出力 P_{PV} 小于本地负荷 P_{Load} 。
- 机理：**光伏发出的电直接被附近用户吃掉，无需从上级变电站远距离输送电流，线路上的总净功率 $P_{\text{net}} = P_{\text{Load}} - P_{\text{PV}}$ 显著减小。
- 结果：**线路电流 I 降低，线损 P_{loss} 明显下降。

2. 刚好抵消点（最低线损点）

- 现象：光伏出力 P_{PV} 约等于本地负荷 P_{Load} 。
- 机理：干线功率流动几乎为零，实现了“源荷就地平衡”。
- 结果：线路电流 $I \approx 0$ ，线损达到全局最小值。

3. 反向倒送阶段（增损区 —— 甲方的痛点）

- 现象：中午光伏暴发（ $P_{PV} \gg P_{Load}$ ），功率严重过剩。
- 机理：过剩电能向上级变电站反向倒送，线路净功率 $P_{net} = |P_{PV} - P_{Load}|$ 重新变大，且可能远超原本的正常负荷电流。
- 结果：由于损耗与电流的平方（ I^2 ）成正比，反向电流翻倍会导致线损呈指数级暴增，轻松打破 6% 的红线。

4. 三相不平衡与无功引发的附加损耗

低压台区常见单相光伏随机接入，这会导致三相严重不平衡。中性线（零线）会流过极大电流 I_N ，产生额外的 $I_N^2 R_N$ 零线损耗；同时，若逆变器或负荷无功补偿不当，也会徒增无功功率 Q 损耗。

二、在方案中如何增加“线损分析与优化”模块？

在之前的技术方案基础上，我们无需推翻架构，只需在核心算法平台与管控决策层中，增加“配电网线损实时计算、溯源分析与低损优化控制”模块。

详细的补充方案设计如下：

1. 理论模型：承载力 vs. 损耗最优容量

在方案中明确区分两个概念，突出算法的深广度：

- 最大安全承载力（Hosting Capacity, HC）：线路不越限（电压不越限、不发热过载）能接纳的光伏上限（安全边界）。
- 低损最优承载力（Loss-Optimal Capacity, LOC）：使线路综合线损率控制在 6% 以内（或全局最低）的光伏最佳输出区间（经济边界）。

2. 新增子系统功能项：线损分析与控制（三步走）

第一步：线损实时计算与多维分解（感知与溯源）

实时采集潮流数据，利用正向与反向潮流模型，将线损进行物理拆解：

$$P_{\text{loss, total}} = \underbrace{\sum R_{ij} \frac{P_{ij}^2}{V_i^2}}_{\text{有功倒送损耗}} + \underbrace{\sum R_{ij} \frac{Q_{ij}^2}{V_i^2}}_{\text{无功流动损耗}} + \underbrace{I_N^2 R_N}_{\text{三相不平衡损耗}}$$

- 指标面板展示：**实时显示全线/台区的综合线损率（如：当前 4.2%），并预测未来 2 小时在光伏峰值时的线损率预警（如：预计 12:30 将达到 7.8%）。
- 损耗归因分析：**自动识别导致线损超 6% 的主导因素（是光伏反向倒送严重？无功功率补偿不足？还是三相不平衡导致？）。

第二步：考虑线损约束的“源-网-荷-储”低损优化调度

以“综合线损率 $\leq 6\%$ ”为硬性约束条件之一，构建多目标优化调度模型：

$$\min \text{Line Loss} = \sum_{(i,j) \in E} R_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_i^2}$$

约束条件：

- 线损率控制约束：** $\frac{P_{\text{loss}}}{\sum P_{\text{supply}}} \leq 6\%$
- 线路热稳定与节点电压约束
- 逆变器 P-Q 运行极限约束

第三步：降损闭环控制响应逻辑

当预测或监测到线损率接近或超过 6% 时，联动自动化终端执行以下降损动作：

- 无功 P-Q 协同降损：**动态调节光伏逆变器的无功输出（功率因数在 0.95（超前）~ 0.95（滞后）之间调节），利用无功就地补偿抵消线路无功流动，降低 $Q^2 R$ 损耗。
- 储能削峰填谷（转移倒送电）：**在光伏反向倒送高峰期（线损即将超标时），指令分布式储能 PCS 满功率充电，吸纳倒送有功，压降干线电流 I ，将线损硬生生拉回 6% 以内。
- 三相换相/换相开关动作：**针对低压台区，下发换相指令均衡三相负载与光伏，消除中性线损耗。
- 有功微调限幅：**若储能与无功调节仍无法将线损压至 6% 以下，边缘终端按最小牺牲原则对边缘节点光伏执行微量有功限幅。

三、亮点总结

总结：

“针对**线损率控制在 6% 以内**的核心要求，我们在原有的‘承载力防过载方案’中，进一步升级了‘**防过载+低损耗**’**双目标协同控制机制**。我们深知分布式光伏大批量接入后，中午反向倒送电会导致线路 I^2R 损耗呈现指数级暴增，很多线路因此突破 6% 的线损红线。本方案通过**实时计算线损 U 型曲线**，能够精准锁定每条线路的‘低损最优运行区’。当预测到光伏倒送会导致线损突破 6% 时，系统不仅能提前预警，还会**优先通过逆变器无功补偿和储能吸收反向功率来压降线路电流**，在不盲目切光伏的前提下，确保线路既不过载、线损又稳稳控制在 6% 的优质区间。”