

# 基于虚拟同步机的高海拔光伏场站惯量调频与功率智能分配策略研究

李杰龙

云南华电金沙江中游水电开发有限公司梨园发电分公司 云南 丽江 674100

**【摘要】**：高海拔地区光伏场站受特殊地理气象条件影响，光照骤变频繁、出力随机性强，且场站自身低惯量、弱阻尼特性突出，叠加偏远地区薄弱电网结构，电网频率稳定调控难度大幅提升。本文结合高海拔光伏特殊运行特性，优化 VSG 核心控制算法，设计耦合光照波动的自适应惯量调频机制，提出考虑光伏预测误差的功率动态分配策略，并构建与 AGC 系统的分级协调控制框架。结果显示，大幅提升高海拔光伏场站并网稳定性与调频响应能力，为高海拔新能源场站参与电网主动调频提供可行技术方案，具备较强工程实用价值。

**【关键词】**：虚拟同步机；高海拔光伏；惯量调频；功率分配；AGC 协调

DOI:10.12417/2811-0528.26.11.045

## 1 引言

随着新能源并网规模的不断扩大，高海拔地区因其丰富的太阳能资源，成为光伏场站建设的重要区域。虚拟同步机（VSG）技术通过模拟传统同步发电机的转子运动方程和电磁特性，可为电网提供惯量支撑和调频能力，是解决新能源场站低惯量问题的有效手段。目前，国内外学者围绕 VSG 在光伏场站中的应用开展了大量研究。文献<sup>[1]</sup>提出自适应惯量 VSG 控制策略，通过耦合频率变化率动态调整惯量参数，提升调频响应速度，但未考虑高海拔光伏光照骤变这一核心扰动源，导致调频触发滞后；文献<sup>[2]</sup>设计多逆变器功率分配算法，优化了分配精度，但未引入光伏预测误差补偿，难以适配高海拔光伏出力的强随机性。现有研究仍存在明显局限，传统 VSG 固定参数无法适配高海拔光伏动态波动。针对上述问题，本文结合高海拔光伏场站运行特性，开展 VSG 惯量调频与功率智能分配策略研究，优化 VSG 控制算法，完善协调控制机制，通过仿真验证策略有效性，为高海拔光伏场站并网稳定运行提供技术支撑。同时，明确本文方法与已有典型研究的本质差异，凸显创新优势。

## 2 基于 VSG 的高海拔光伏场站惯量调频与功率分配策略

### 2.1 自适应惯量调频控制机制

针对原自适应惯量调频仅耦合频率信号、脱离高海拔核心扰动的问题，本文重构控制逻辑，将实时光照波动强度与电网频率变化率、频率偏差双向耦合，作为调频触发与调节核心依据，解决传统策略响应滞后、针对性弱的问题。相较于文献<sup>[4]</sup>固定阈值的调频触发方式，本文引入光照波动系数动态调整响应阈值，适配高海拔光照骤变特性。搭建多源信号采集模块，

实时采集光照强度、光伏出力波动量、电网频率偏差与频率变化率，将其作为调频优先级判定指标。针对多重扰动叠加的极端场景，结合光照骤变幅度同步提升虚拟惯量输出强度，强化短时惯量支撑；当光照反向波动或频率趋于稳定，立即闭锁惯量叠加功能，防止过度响应引发频率振荡，实现“光照扰动预判-频率动态跟踪-惯量精准调节”的闭环控制，完全适配高海拔光照骤变的核心特性。

### 2.2 VSG 算法在高海拔光伏场站的适用性改进

针对高海拔光照变化剧烈、光伏出力随机性强的特点，需优化 VSG 算法参数，重点调整虚拟惯量和阻尼系数，使其适配高海拔光伏场站的运行特性。传统 VSG 算法的虚拟惯量和阻尼系数为固定值，当光伏出力骤升或骤降时，固定参数无法快速响应，易导致惯量支撑不足或系统振荡。本文采用动态参数优化策略，结合实时光伏出力、光照强度等气象数据，建立虚拟惯量和阻尼系数的动态调整模型，如式(1)、式(2)所示：

$$J(t) = J_0 \cdot [1 + k_J |\Delta P_{pv}(t)|]$$

$$D(t) = D_0 \cdot [1 + k_D |\Delta P_{pv}(t)|]$$

式中， $J(t)$ 、 $D(t)$ 分别为  $t$  时刻的动态虚拟惯量和动态阻尼系数， $J_0$ 、 $D_0$ 分别为额定虚拟惯量和额定阻尼系数， $k_J$ 、 $k_D$ 分别为惯量、阻尼调整系数， $\Delta P_{pv}(t)$ 为  $t$  时刻光伏出力波动量。

### 2.3 光伏波动性的功率动态分配算法

在惯量调频过程中，多逆变器间的功率分配精度直接影响调频效果和设备安全。现有基于样本逆变器的等比例分配算法，未考虑光伏出力波动性和逆变器实时状态，易出现功率上限越限或分配精度不足的问题<sup>[2]</sup>。本文在等比例分配算法基础上，结合实时气象数据与逆变器运行状态，提出考虑光伏预测

误差的功率动态分配算法。首先，通过 CNN-BiLSTM 模型融合多气象变量，实现光伏出力精准预测，计算预测误差，预测误差如式(3)所示：

$$\delta P_{pv}(t) = |P_{pv,pre}(t) - P_{pv,act}(t)|$$

式中， $\delta P_{pv}(t)$ 为 t 时刻光伏出力预测误差， $P_{pv,pre}(t)$ 为 t 时刻光伏出力预测值， $P_{pv,act}(t)$ 为 t 时刻光伏出力实际值。其次，实时采集各逆变器的运行状态，包括输出功率、温度、过载情况等，确定各逆变器的功率调节上限；最后，基于预测误差和逆变器状态，通过多目标优化方法，动态调整功率分配比例，功率分配目标函数如式(4)所示，确保惯量调频过程中的功率上限不超限，且分配精度满足控制偏差±1%的要求。

$$\min \sum_{i=1}^n |P_{i,ref}(t) - P_{i,act}(t)|, P_{i,min} \leq P_{i,act}(t) \leq P_{i,max}$$

式中， $P_{i,ref}(t)$ 为 t 时刻第 i 台逆变器的功率分配参考值， $P_{i,act}(t)$ 为 t 时刻第 i 台逆变器的实际输出功率， $P_{i,min}$ 、 $P_{i,max}$ 分别为第 i 台逆变器的最小、最大输出功率。为验证算法效果，设计对比实验，选取高海拔光伏场站 10 台逆变器，分别采用传统等比例分配算法与本文提出的动态分配算法，测试不同光照条件下的分配精度和功率超限情况，结果如下表所示。

设置三组对比方案：方案 1 为传统固定参数 VSG+等比例功率分配；方案 2 为普通自适应 VSG+动态分配；方案 3 为本文耦合光照波动的优化 VSG+智能功率分配，核心指标对比结果见表 1，不同海拔与光照条件下鲁棒性测试结果见表 2。

表 1 核心指标对比结果

光照条件	分配算法	平均分配偏差	功率超限次数 (次/小时)	最大频率偏差
稳定光照	传统等比例算法	±1.23%	0.3	0.18Hz
稳定光照	本文动态分配算法	±0.78%	0	0.08Hz
波动光照	传统等比例算法	±2.15%	1.8	0.32Hz
波动光照	本文动态分配算法	±0.89%	0.2	0.11Hz

参考文献：

[1] 宋朋飞,田晓煜,范新桥,等.考虑多无功电源协调的光伏场站电压动态优化策略[J].可再生能源,2026,44(02):274-284.  
 [2] 唐培全,丁杨,李小伟,等.基于网源协同的光伏发电实时动态调频的技术改造[J].电工技术,2023,(S1):74-76+79.  
 [3] 陈铭玲,陈良.电气自动化在太阳能光伏发电中的实践探索[J].张江科技评论,2024,(10):57-59.  
 [4] 李斌,罗晓伊.分布式电源对电力系统电压无功优化影响的研究[J].电气技术,2024,25(10):55-61+78.

表 2 不同光照条件下的分配精度和功率超限情况

光照条件	分配算法	平均分配偏差	功率超限次数 (次/小时)
稳定光照	传统等比例算法	±1.23%	0.3
稳定光照	本文动态分配算法	±0.78%	0
波动光照	传统等比例算法	±2.15%	1.8
波动光照	本文动态分配算法	±0.89%	0.2

由表格可知，本文提出的功率动态分配算法，在稳定光照和波动光照条件下，均能满足分配精度±1%的要求，且显著减少功率超限次数，适配高海拔光伏出力的波动性，优于传统等比例分配算法。

2.4 与 AGC 系统的协调运行策略

AGC 系统是电网二次调频的核心，负责实现发电功率的精细化、自动化管理，而 VSG 惯量调频属于一次调频范畴，二者时间尺度和控制目标不同，若缺乏有效协调，易出现控制冲突，影响调频效果。本文建立快频响应与 AGC 调控的协调机制，明确两者的时间尺度配合与功率优先级划分。时间尺度上，VSG 惯量调频响应时间小于 100ms，负责应对短时频率波动，快速平抑频率变化率；AGC 系统响应时间为秒级至分钟级，负责应对长时频率偏差，实现频率精准恢复。功率优先级上，当电网频率出现剧烈波动时，优先启动 VSG 惯量调频，优先保障频率稳定；当频率趋于稳定后，AGC 系统介入，调整光伏场站出力至调度指令要求，实现惯量调频与 AGC 调控的无缝衔接。

3 结论

自适应惯量调频控制机制可根据电网频率变化率与频率偏差的耦合关系，实现惯量调频的智能投入退出与叠加闭锁，避免过度响应或响应不足；优化后的 VSG 算法可适配高海拔光照波动特点，提升惯量支撑能力和系统稳定性；功率动态分配算法可满足控制偏差±1%的要求，有效避免功率超限；与 AGC 系统的协调运行策略，实现了一次调频与二次调频的无缝衔接，提升电网整体调频效果。