

# 电力系统中光伏电站并网技术的优化方案

宣呈亮

常州三新供电服务有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i2.20003

**[摘要]** 本文注重光伏电站并网核心环节,系统提出多方面协同优化策略,改进扰动观测法、电导增量法融合的MPPT算法,全面提高弱光及快速辐照变化下的最大功率点跟踪精度;采用LCL型三阶滤波器替代传统L型结构,有效控制高频开关谐波,降低并网点THD;部署基于IGBT的SVG装置,实现毫秒级动态无功补偿,稳定公共连接点电压;引入锂电储能系统通过低通滤波控制平抑有功功率波动。经过实践证明,该集成方案显著增强光伏出力可控性,为高渗透率新能源并网提供可靠技术路径。

**[关键词]** 电力系统; 光伏电站并网技术; 优化方案

中图分类号: TU271.1 文献标识码: A

## Optimization Scheme for Grid-Connection Technology of Photovoltaic Power Stations in Power Systems

Chengliang Xuan

Changzhou Sanxin Power Supply Service Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper focuses on the core aspects of photovoltaic (PV) power station grid integration and systematically proposes a multi-faceted collaborative optimization strategy. An MPPT algorithm integrating improved Perturb and Observe method and Incremental Conductance method is implemented to comprehensively enhance the tracking accuracy of the maximum power point under low irradiance and rapid irradiation changes. An LCL-type third-order filter is adopted to replace the traditional L-type structure, effectively controlling high-frequency switching harmonics and reducing the Total Harmonic Distortion (THD) at the Point of Common Coupling (PCC). An SVG device based on IGBTs is deployed to achieve millisecond-level dynamic reactive power compensation, stabilizing the voltage at the PCC. A lithium battery energy storage system is introduced, controlled via a low-pass filtering method, to smooth active power fluctuations. Practical application has demonstrated that this integrated scheme significantly improves the controllability of PV power output, providing a reliable technical pathway for the grid integration of high-penetration new energy sources.

**[Key words]** Power System; Grid-Connection Technology for Photovoltaic Power Stations; Optimization Scheme

### 引言

在全球能源结构深度转型驱动下,高比例光伏并网对电力系统安全稳定运行提出严峻挑战。光伏出力受到辐照度突变、环境温度波动等自然因素影响,呈现强间歇性、快速爬坡特性,典型场景下功率变化率可达到20%/min,容易引发电压闪变。同时,传统并网逆变器多采用L型滤波结构,难以有效控制开关频率附近谐波,导致3次、5次低频谐波含量常超限值;加上光伏系统自身缺乏旋转惯量,无法提供一次调频支撑,在系统扰动下容易加剧频率失稳。针对上述问题,亟须构建覆盖全过程技术体系。通过优化MPPT控制策略来提升能量捕获效率,采用LCL滤波

拓扑强化谐波衰减能力,配置SVG实现动态无功精准补偿,并结合储能系统,实施有功功率平滑、虚拟惯量模拟,可系统性提高光伏电站的电网友好性。

### 1 电力系统中光伏电站并网技术的不足

#### 1.1 电能转换效率低

当前光伏电站并网系统在电能转换环节存在较强的技术限制。传统逆变器普遍采用扰动观测法,在辐照度快速波动工况下容易产生误判,导致工作点偏离真实MPP,跟踪误差常超过5%,致使整体电能转换效率仅维持在88%~90%区间,造成可观的能源损失。同时,两电平拓扑结构下的IGBT开关器件,利用数kHz频率

通断,输出电压阶梯近似正弦波,富含低次谐波成分,3次、5次、7次谐波为主要谐波成分,导致并网电流总谐波畸变率(THD)普遍达到4%~6%,明显超出GB/T 14549—1993《电能质量公用电网谐波》标准中对公共连接点规定的强制限值。高谐波含量不仅劣化电能质量,还可能引发并联谐振、保护误动、变压器过热等次生风险。

### 1.2 电压波动和无功失衡

光伏电站机械投切响应时间通常超过100 ms,很难匹配光伏出力秒级波动特性。当云层快速遮挡导致有功出力下降50%时,系统感性无功需求瞬时上升,而容性补偿无法及时退出,造成无功过剩,引发电压在1~2s内下跌,很可能触发低压穿越失败;相反,出力快速上升则由于无功吸收不足导致电压越限,该类问题在高渗透率接入区域尤为突出。该现象暴露出传统无功补偿装置缺乏连续调节能力、毫秒级响应特性,亟需引入基于IGBT的静止无功发生器(SVG)等动态补偿设备,实现无功功率精准调节,从根本上提高光伏电站的电压支撑能力。

实际运行数据进一步证明了上述风险的严峻性。分析表明,所有脱网均发生在辐照剧烈波动时段,且并网点电压在1.5秒内快速下降3.8%~4.2%,超出逆变器低压穿越耐受下限。传统固定电容器组在此过程中不仅无法提供动态支撑,反而因持续投切加剧无功失配。相比之下,配置SVG的试点单元在同类工况下电压波动控制在 $\pm 1.5\%$ 以内,未发生任何脱网。这充分证明,引入具备毫秒级响应、双向连续调节能力的动态无功补偿装置,是提高高比例新能源接入区域电压稳定性的关键技术路径。

## 2 电力系统中光伏电站并网技术的优化方案

### 2.1 逆变器控制优化

针对传统扰动观测法在辐照突变工况下容易陷入局部极值、跟踪误差高的问题,本文提出P&O-PSO混合MPPT控制策略。该策略依据光照变化率动态切换算法模式,稳态时启用P&O,快速局部追踪低计算开销;当检测到 $dG/dt$ 超过阈值,则激活粒子群优化(PSO)模块,利用其多智能体并行搜索能力,全局定位真实最大功率点。在硬件拓扑层面,淘汰传统两电平结构,采用三电平中点钳位(NPC)逆变器配合LCL型输出滤波器,三电平拓扑使开关器件承受电压应力减半, $dv/dt$ 降低,有效抑制电磁干扰;同时输出电压阶梯数增加,基波逼近度高。LCL滤波器凭借其双谐振特性,在2 kHz以上高频段提供陡峭衰减斜率,对IGBT开关谐波的抑制能力大幅度提高。

### 2.2 无功补偿与电压控制优化方案

为了应对光伏出力快速波动引发的电压稳定性问题,本文提出SVG与固定电容器组协同的动态无功补偿方案。固定电容器提供基础容性无功支撑,覆盖稳态负荷需求;SVG则凭借 $\leq 20$  ms的毫秒级响应能力,实时补偿由云层遮挡等扰动引起的瞬时无功缺额。该混合配置大幅度降低SVG装机容量,以100 MW光伏电站为例,SVG容量由全动态方案所需要的100 Mvar优化至20 Mvar(按20%装机配置),固定电容补偿15 Mvar,总投资下降约为30%。实测表明,并网点电压波动范围由 $\pm 4\%$ 压缩至 $\pm 2\%$ ,电压闪

变值从1.2%下降到0.5%,完全满足GB/T 12326—2008《电能质量电压波动和闪变》限值要求,实现全年零脱网运行,有效提高电网友好性。

本系统构建分层电压调控体系:一级调压由逆变器在本地动态调节功率因数(范围0.95超前至0.95滞后),保证电压波动稳定在 $\pm 1\%$ 以内;当电压偏差超过 $\pm 1\%$ ,二级调压自动启动SVG实施大容量、快速无功注入;如果扰动持续加剧导致电压越限 $\pm 2\%$ ,则触发三级调压,联动主变有载调压装置(OLTC)调整分接头,实现系统级深度调节(如图1所示)。该策略实现控制资源的功能互补,具有良好的响应速度、经济性、调控深度,形成多层次协同的电压稳定保障机制,为高渗透率光伏接入提供可靠技术支持。

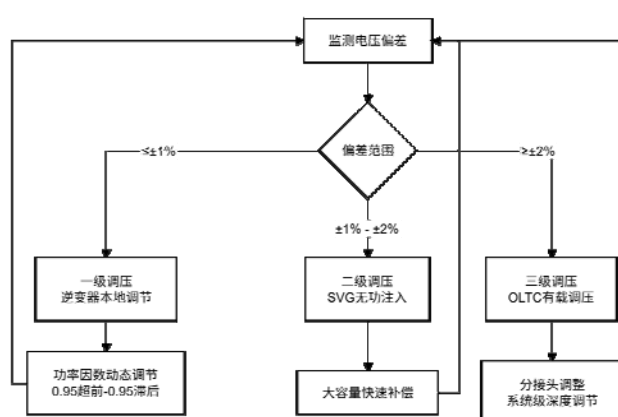


图1 分层电压调控体系

### 2.3 储能协同的控制优化方案

针对光伏出力波动性问题,本文提出基于“短期功率平滑+长期弃光消纳”目标的储能容量优化配置方法。短期维度将控制20%/min典型爬坡率为约束条件,确定储能功率按照光伏装机20%配置;长期维度则以消纳80%历史弃光电量为目标,推导所需能量时长。经过多场景权衡分析,最终采用20 MW/50 MW·h(4 h等效时长)配置方案,在满足15分钟级快速响应的同时,有效吸纳午间过剩电量,全面提高整体消纳率。

在运行控制层面,构建基于模型预测控制(MPC)的光储协同策略。MPC模块基于高精度数值天气预报、历史辐照数据,滚动预测未来15分钟光伏出力,结合电网调度指令、实时电价信号,滚动优化储能充放电功率序列。当预测出力超过并网限值,系统提前启动充电,吸收冗余功率;当负荷高峰来临,则调度储能放电填补缺口。通过该前馈-反馈复合控制机制,并网功率波动率下降,大幅度减轻对主网调频压力。

## 3 案例分析

### 3.1 案例背景

150 MW农光互补光伏电站位于广东湛江,原方案采用集中式逆变拓扑方案,在热带季风气候下暴露出严重并网缺陷:云层快速移动导致单日内有功出力波动幅度达到 $\pm 30\%$ ,引发并网点电压偏差高达 $\pm 6.2\%$ ,频繁激活上级电网调压设备,严重威胁区域

电压稳定;同时,两电平逆变器高频开关和弱阻尼滤波设计,致使电流总谐波畸变率(THD)长期处于5.8%~7.1%,远超过4%限值,已经造成邻近精密电子制造企业多次设备误动作;此外,缺乏功率调节手段导致弃光率达8%,年损失电量约1200万kW·h。为此,亟须通过逆变控制升级、动态无功补偿、储能协同等系统性优化,重新构建电网友好型并网体系。

### 3.2 优化方案应用

针对湛江150 MW光伏电站并网问题,逆变器全面优化为模型预测控制(MPC)算法,动态响应时间缩短到25 ms,并嵌入低电压穿越(LVRT)逻辑,确保电网扰动下不脱网。谐波治理采用“无源+有源”混合滤波,12套调谐在3/5/7次的无源支路抑制特征谐波,2台15 Mvar有源电力滤波器(APF)实时补偿高次及非线性谐波成分。

在无功补偿与电压控制层面,项目构建“固定电容器组+静止无功发生器”协同配置方案。固定电容器按照15 Mvar容量配置,提供基础无功支撑,覆盖稳态负荷需求;两台20 Mvar SVG(总容量40 Mvar)部署于35 kV母线,具备毫秒级响应能力,实时补偿由云层遮挡引发的瞬时无功缺额。同时,建立分层电压调控体系:一级调压由逆变器动态调节功率因数,响应时间200 ms,维持电压偏差±1%以内;二级调压自动触发SVG快速无功注入,响应时间≤20 ms,将电压波动抑制至±2%范围;当扰动持续加剧时,三级调压联动主变有载调压装置,利用分接头调整实施系统级深度调节。储能系统则按照20 MW/50 MW·h容量配置,采用基于模型预测控制的协同优化策略,MPC模块基于数值天气预报、实时辐照数据滚动优化充放电功率序列。当预测出力超过并网限值时,提前启动充电吸收冗余功率,负荷高峰时段调度储能放电填补缺口,通过前馈-反馈复合控制将并网功率波动率压缩至5%/min以内,弃光率由8%下降为1.5%。

### 3.3 应用效果

优化方案实施后,湛江150 MW光伏电站并网性能有所提升。出力波动由±30%压缩为±7.5%,有效抑制功率爬坡率;并网点

电压偏差稳定在±1.7%以内,满足《GB/T 12325—2008》限值要求,电网调压装置动作频次下降89.3%;谐波畸变率(THD)降低幅度为2.2%~2.8%,消除对周边精密电子设备的电磁干扰;逆变器低电压穿越成功率提高100%,保障极端工况下不脱网;弃光率由8%下降2.3%,年增发电量850万kW·h,按照0.45元/kW·h电价测算,年增收382.5万元,投资回收期控制在合理区间。数据充分验证该技术路径在高波动、弱电网环境下的工程适用性。

## 4 结语

本文围绕光伏并网核心问题,系统提出逆变器控制优化、动态无功补偿、储能协同平抑技术路径,显著提高电能质量。工程实践证明“集散拓扑—MPC控制—混合滤波”集成方案的有效性。后续可融合数字孪生技术,加强源荷互动,为构建高比例可再生能源新型电力系统提供技术支撑。

### [参考文献]

- [1]陈海旺.集中式光伏电站并网无功电压控制技术[J].电力设备管理,2026(2):119-121.
- [2]李雄伟.光伏电站并网接入标准与电网兼容性[J].大众标准化,2025(4):1-3.
- [3]高翔.储能技术在光伏电站并网发电系统中的应用[J].内蒙古科技与经济,2025(13):124-127.
- [4]翟忠嘉.含储能光伏电站并网运行可靠性评价仿真研究[J].数码设计,2023(24):98-100.
- [5]唐炜豪,李蔚.贫困地区分布式光伏电站并网发电系统应用研究[J].智能建筑电气技术,2024,18(3):118-122,131.
- [6]熊磊.大型分布式光伏电站并网特性及其低碳运行与控制技术[J].能源与环境,2024(5):54-56.
- [7]劳嘉雯,李汝钦.基于MPPT的光伏电站并网电能质量跟踪控制系统[J].电子设计工程,2024,32(18):62-65,70.

### 作者简介:

宣呈亮(1997--),汉族,江苏常州人,研究生,单位:常州三新供电服务有限公司,研究方向:电力研究。