

# Voltage Stability Control Strategy for Power System under New Energy Grid Integration

Guangyuan Liu<sup>1</sup> Zedong Zhang<sup>2</sup>

1. State Grid Shennongjia Power Supply Company Control Center, Wuhan, Hubei, 442400, China
2. State Grid Wuhan Power Supply Company Hankou Power Supply Center, Wuhan, Hubei, 430000, China

## Abstract

Under the “dual carbon” goals, large-scale grid integration of renewable energy sources such as wind and solar power has become a pivotal trend in power system transformation. By 2025, China’s installed renewable energy capacity is projected to exceed 1.5 billion kilowatts, accounting for over 40% of total installed capacity. The intermittent and highly variable output characteristics of renewables, coupled with grid connection through power electronic converters, lead to reduced system equivalent inertia, weakened reactive power support, and prominent issues including voltage fluctuations and overvoltage/undervoltage conditions, posing significant threats to grid security. This study analyzes the underlying mechanisms, proposes multidimensional control strategies, and explores optimization directions to provide theoretical and practical references for voltage stability control in high-renewable-energy integration scenarios.

## Keywords

New energy grid integration; Power system; Voltage stability; Control strategy

## 新能源并网下电力系统电压稳定控制策略

刘光源<sup>1</sup> 张泽栋<sup>2</sup>

1. 国网神农架供电公司调控中心, 中国·湖北 武汉 442400
2. 国网武汉供电公司汉口供电中心, 中国·湖北 武汉 430000

## 摘要

“双碳”目标下, 风电、光伏等新能源大规模并网成为电力系统转型核心趋势, 2025年我国新能源装机容量突破15亿千瓦, 占比超40%。新能源出力间歇性、波动性强且经电力电子变流器并网, 导致系统等效惯量下降、无功支撑弱化, 电压波动、越限等问题突出, 威胁电网安全。本文分析其影响机制, 阐述多维度控制策略, 探讨优化方向, 为高比例新能源并网下电压稳定控制提供理论与工程参考。

## 关键词

新能源并网; 电力系统; 电压稳定; 控制策略

## 1 引言

全球能源转型加速, 清洁低碳成为核心导向, 风电、光伏等新能源凭借无污染、可再生优势, 逐步替代传统化石能源, 成为电力系统主力电源。我国新能源产业发展迅猛, “沙戈荒”等大型新能源基地相继投运, 但新能源出力的随机性、波动性及电力电子设备与电网的交互作用, 打破了传统电力系统的功率平衡与电压稳定。传统电压控制策略基于同步发电机主导的电网结构设计, 难以适应高比例新能源并网后的复杂工况, 导致电压失稳事故频发, 影响新能源消纳及电网安全<sup>[1]</sup>。因此, 深入研究新能源并网对电压稳定的影

响机制, 探索高效控制策略, 解决相关关键问题, 对推动新能源大规模并网、保障电网安全稳定运行具有重要理论与工程价值。

## 2 新能源并网对电力系统电压稳定的影响机制

### 2.1 新能源出力特性对电压稳定的影响

风电、光伏等新能源出力受自然条件影响显著, 具有极强的间歇性、随机性和波动性, 且波动幅度大、响应速度快, 直接打破电网功率平衡, 引发电压波动。其中风电小时级波动超 20%, 光伏日波动达 80%, 这类快速功率波动会通过输电线路引发并网点电压波动, 波动幅度可达  $\pm 3\%$ – $\pm 8\%$ 。新能源出力骤增时, 输电线路功率传输量上升、线路压降增大, 若无功补偿不及时, 会导致并网点及周边节点电压升高甚至越限; 出力骤降时, 电网有功功率缺口增大,

【作者简介】刘光源 (2001–), 男, 中国湖北武汉人, 本科, 助理工程师, 从事电力系统方向研究。

易引发电压跌落乃至失稳。此外,新能源出力预测精度不足会导致调控滞后,进一步加剧电压波动,其“反调峰”特性也会增加电压调节难度,影响电压稳定<sup>[2]</sup>。

## 2.2 电力电子接口特性对电压稳定的影响

新能源发电设备通过电力电子变流器与电网连接,变流器的控制特性、响应速度直接影响电力系统电压稳定。与传统同步发电机相比,电力电子变流器响应速度快(毫秒级),但缺乏转动惯量(惯量常数  $H < 1s$ , 常规电源  $H=3-5s$ ),无法提供惯性支撑,也难以主动参与电压调节,电压支撑能力较弱。一方面,变流器的电流源模式在强电网下可保证稳定,但在弱电网场景中稳定性差、调节能力不足;电压源模式虽能提供电压支撑、适用于弱电网,但控制复杂度较高。另一方面,电网电压跌落时,部分新能源设备低电压穿越能力不足,变流器过流保护会导致设备脱网,甚至引发连锁脱网的“雪崩效应”,进一步破坏电压稳定<sup>[3]</sup>。

## 2.3 电网结构与负荷特性的协同影响

电网结构薄弱是新能源并网下电压稳定问题凸显的重要诱因,尤其是“沙戈荒”等新能源大基地,地处偏远、远离负荷中心,输电距离长、结构稀疏、短路容量小,电压支撑能力弱。新能源大规模集中接入后,其出力波动会直接引发汇集点电压剧烈变化,日内波动可达数十千伏,传统电压支撑模式难以奏效。同时,新能源集中并网会加剧输电线路潮流波动,日变化幅度超50%,提升20%线路过载风险,进一步恶化电压稳定。此外,电动汽车等新型负荷普及使负荷随机性、波动性增加,与新能源出力波动叠加,打破功率平衡,扩大电压波动范围,影响电压稳定<sup>[4]</sup>。

# 3 新能源并网下电力系统电压稳定控制策略

## 3.1 新能源发电侧电压稳定控制策略

新能源发电侧是电压稳定控制的第一道防线,核心是通过优化发电设备控制策略,提升新能源发电单元的电压支撑能力,抑制出力波动对电压的影响,主要包括变流器控制优化、低电压穿越控制和出力预测优化三方面。变流器控制优化是核心手段,并网逆变器的电流源模式适用于强电网,电压源模式更适配弱电网且能提供电压支撑,引入虚拟同步发电机(VSG)技术可弥补新能源惯量不足缺陷,结合下垂控制、PID控制等,可动态调整无功输出,维持并网点电压稳定。低电压穿越控制是保障电网故障时设备不脱网的关键,通过优化变流器保护电路和电流控制策略,确保电压跌落至20%额定值时设备仍能并网,注入无功电流支撑电压恢复,可使风电场故障脱网率下降70%-80%。出力预测优化需融合大数据、机器学习等技术,构建高精度预测模型,将短期及超短期预测误差控制在10%以内,基于预测结果提前调整出力和无功配置,实现闭环控制,减少出力波动对电压的冲击<sup>[5]</sup>。

变流器控制优化是提升发电侧电压支撑能力的核心手段。目前,并网逆变器主要有电流源模式和电压源模式两种

控制方式,针对高比例新能源并网的弱电网场景,可采用电压源模式控制,以电压为控制目标,使并网逆变器的外特性表现为受控电压源,能够为电压和频率提供支撑。同时,可引入虚拟同步发电机(VSG)技术,通过模拟同步发电机的惯量特性、励磁调节特性,为电网提供惯性支撑和电压调节能力,弥补新能源发电单元惯量不足的缺陷,抑制电压波动。此外,优化变流器的无功功率控制策略,采用下垂控制、PID控制等方法,实现无功功率的实时调节,根据电网电压变化,动态调整无功输出,维持并网点电压稳定。例如,通过优化光伏逆变器的无功容量利用率,避免因无功调节能力不足导致的电压支撑薄弱问题,确保电压偏差控制在 $\pm 2%$ 以内。

## 3.2 电网侧电压稳定控制策略

电网侧电压稳定控制的核心是优化电网结构、配置柔性输电设备和无功补偿设备,提升电网电压支撑与功率传输能力,缓解新能源并网带来的电压压力,主要包括柔性输电技术应用、无功补偿配置优化和电网结构升级三方面。柔性输电技术(FACTS、VSC-HVDC)是关键,其中STATCOM可毫秒级动态补偿无功功率、快速调节电压,VSC-HVDC能独立控制有功与无功,快速抑制功率波动,UPFC可同步调节线路有功、无功及电压;无功补偿配置需结合新能源并网规模与分布,集中并网区域配置集中式设备,分布式并网区域配置分布式设备,同时优化控制策略,实现无功就地平衡,减少电压损耗;电网结构升级是根本保障,需加快特高压与区域联络线建设,完善主网架,优化配电网结构,合理规划新能源并网节点,缩短传输距离,避免新能源过度集中接入,缓解局部电网电压压力,保障电压稳定。

## 3.3 负荷侧电压稳定控制策略

负荷侧电压稳定控制的核心是通过引导负荷灵活调整,实现负荷与新能源出力的协同匹配,缓解电网功率平衡压力,辅助维持电压稳定,主要包括柔性负荷控制、需求响应和负荷聚合控制三方面。柔性负荷控制通过优化电动汽车、空调等柔性负荷的运行模式,采用错峰、移峰调控策略,在新能源出力高峰时,主动引导柔性负荷增加用电,充分消纳多余清洁电力;在新能源出力低谷时,引导柔性负荷减少用电或切换至储能充电模式,减少电网有功功率缺口,有效抑制电压波动,同时优化控制逻辑,提升负荷对电压变化的响应灵敏度,增强电压调节辅助能力。需求响应通过合理的价格激励与政策引导,充分调动用户主动参与电压稳定控制的积极性,当电网电压出现波动时,通过动态调整电价、发放用电补贴等方式,引导用户灵活增减用电负荷,缓解电网功率压力,同时依托智能电表、物联网等技术实现用电行为实时监测,精准推送调控指令,大幅提升需求响应的及时性与有效性。负荷聚合控制通过专业聚合平台,将分散的居民、商业等小负荷整合为规模化负荷聚合体,实现统一调度管理,根据电网电压状态和新能源出力变化,动态调整聚合体

用电功率,精准匹配功率平衡需求,助力维持电网电压稳定,进一步提升负荷侧参与电压控制的整体效能。

### 3.4 多维度协同控制策略

构建“源-网-荷-储”多维度协同控制体系,实现发电侧、电网侧、负荷侧及储能系统的深度协同联动,全面提升电压稳定控制的效果与可靠性。协同控制的核心是建立统一的智能调度控制平台,整合新能源发电单元、柔性输电设备、无功补偿设备、柔性负荷及储能系统等各类调控资源,打破各维度控制壁垒,实现信息实时共享与协同调度。该平台可精准实时监测电网电压、新能源出力、负荷变化等关键运行参数,结合高精度新能源出力与负荷预测数据,通过智能算法制定全局最优电压稳定控制策略,动态协调各维度设备运行状态,实现无功功率全局优化配置与电网功率平衡的动态调整。储能系统在协同控制中发挥关键缓冲作用,通过科学的充放电调控,平抑新能源出力波动、弥补电网功率缺口,新能源出力高峰时充电消纳多余清洁电力,避免电压过高;出力低谷时放电补能,防止电压跌落,同时与各维度设备深度协同,进一步提升控制灵活性与响应效率。此外,需兼顾电网故障应急控制,当发生电压失稳时,平台快速调度各维度控制设备采取紧急调控措施,有效抑制失稳扩散,确保电网快速恢复稳定运行,保障高比例新能源并网场景下电网安全。

## 4 控制策略的优化方向

### 4.1 提升多维度协同控制的智能化水平

结合人工智能、大数据、物联网等技术,构建智能化的调度控制平台,实现电网运行状态的实时监测、精准预测和智能决策。通过机器学习算法,优化协同控制策略,提升各维度控制设备的协同联动精度,实现电压稳定的自适应控制,适应新能源出力和负荷的动态变化。例如,采用深度学习算法优化新能源出力预测模型,提升预测精度;通过强化学习算法,优化无功功率配置和负荷调度策略,实现全局最优控制。

### 4.2 完善弱电网场景下的控制技术

针对“沙戈荒”等新能源大基地的弱电网场景,优化电压源模式控制策略,提升变流器在弱电网下的稳定性和电压支撑能力;研发新型柔性输电设备和无功补偿设备,提升电网的电压支撑能力和功率传输能力;探索双模式控制策略,结合电流源模式和电压源模式的优势,适应电网阻抗大幅波动的场景,提升控制策略的适应性。

### 4.3 强化储能系统与各维度的协同控制

优化储能系统的充放电控制策略,提升储能系统的响

应速度和调节精度,实现储能系统与新能源发电单元、柔性负荷、电网设备的深度协同;研发新型储能技术(如固态电池、液流电池),提升储能系统的容量、寿命和安全性,为电压稳定控制提供更可靠的支撑;建立储能系统的优化配置模型,根据新能源并网规模和电网运行特性,合理配置储能容量和布局,提升储能系统的利用效率。

### 4.4 健全电压稳定控制的标准体系

结合新能源并网的发展趋势,完善新能源发电单元、柔性输电设备、无功补偿设备等的技术标准,明确电压稳定控制的指标要求;建立电压稳定控制的评估体系,对控制策略的效果进行全面评估,为控制策略的优化提供依据;加强行业协同,推动控制技术的标准化、规范化发展,确保不同设备、不同系统之间的协同兼容。

## 5 结语

新能源大规模并网是实现“双碳”目标、推动能源转型的必然选择,但也给电力系统电压稳定带来了严峻挑战,主要源于新能源出力的间歇性、波动性,以及电力电子变流器的弱支撑特性,叠加电网结构薄弱、负荷特性变化等因素,导致电压波动、电压越限、设备脱网等问题频发。本文从新能源并网对电压稳定的影响机制出发,系统阐述了发电侧、电网侧、负荷侧及多维度协同控制策略,分析了各策略的原理、应用场景及优缺点,并结合“沙戈荒”大基地、张北柔性直流电网等工程实践,探讨了控制策略的优化方向。研究表明,单一维度的控制策略难以满足高比例新能源并网下的电压稳定需求,需构建“源-网-荷-储”多维度协同控制体系,结合智能化技术、柔性输电技术、储能技术,实现电压稳定的精准控制。未来,随着新能源并网比例的持续提升,需进一步优化控制策略,完善技术标准,强化工程实践,提升电力系统对新能源的接纳能力,保障电力系统安全、稳定、高效运行,为能源转型提供有力支撑。

## 参考文献

- [1] 张兴,李建林,王健.新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J].全球能源互联网,2023,6(3):289-302.
- [2] 国网西北分部.高比例新能源并网下“沙戈荒”大基地电压稳定控制技术及应用[J].电力系统自动化,2025,49(7):1-8.
- [3] 刘振亚,王继业,张正陵.新能源并网背景下电力系统安全稳定运行关键技术[J].中国电机工程学报,2024,44(12):4123-4135.
- [4] 王承民,李响,张焰.高比例新能源并网下电力系统电压稳定协同控制技术研究[J].电网技术,2024,48(5):1721-1730.
- [5] 李庚银,赵磊,王磊.柔性直流输电技术在新能源并网电压稳定控制中的应用[J].电力自动化设备,2023,43(8):1-9.