

有功预留式构网型光伏变流器电压调控方法

章天晗¹, 吴俊飞¹, 周行¹, 杨彬¹, 洪建军¹, 于淼², 代一乐²


(1. 国网浙江省电力有限公司衢州供电公司, 浙江 衢州 324000;

2. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 低压台区分布式光伏渗透率持续提升, 因源荷不匹配、无功支撑能力不足导致的电压越限问题日趋突出。为此, 提出一种有功预留式构网型光伏变流器电压调控方法。在构网型VSG(虚拟同步机)变流器控制框架下引入最大功率跟踪/有功预留、无功自适应调压/无功锁存等多模态, 构建“无功优先调压、柔性有功兜底”的协同调压逻辑。基于状态空间法建立小信号模型, 辨识主导极点并给出参数整定准则; 采用对称分量法构建正负序输出阻抗, 结合阻抗比判据评估并网稳定性。在Simulink平台构建典型越限台区的精细化模型, 并集成所提控制策略开展仿真验证。结果表明, 该策略可在越限初期快速释放调压裕度, 有效实现柔性有功与无功自适应协同调压, 抑制并网点电压上浮并提供电压与频率支撑, 适用于存量与新增长台区推广。

关键词: 有功预留; VSG; 构网型光伏; 电压越限治理

DOI: 10.19585/j.zjdl.202603005

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

A voltage regulation method for active power reserve-based grid-forming photovoltaic inverters

ZHANG Tianhan¹, WU Junfei¹, ZHOU Xing¹, YANG Bin¹, HONG Jianjun¹, YU Miao², DAI Yile²

(1. State Grid Quzhou Power Supply Company, Quzhou, Zhejiang 324000, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The increasing penetration of distributed photovoltaic (PV) systems in low-voltage distribution areas has led to growing voltage violations due to source-load mismatch and inadequate reactive power support. To address this, a voltage regulation method for active power reserve-based grid-forming (GFM) photovoltaic (PV) inverters is proposed. In the grid-forming virtual synchronous generator (VSG) inverter control framework, multiple modes such as maximum power tracking/active power reserve, reactive power adaptive voltage regulation/reactive power locking are introduced, forming a coordinated voltage regulation logic with “reactive power regulation prioritized and flexible active power as backup”. A small-signal model is established using the state-space method to identify the dominant poles and provide parameter tuning criteria. The symmetrical component method is used to construct the positive and negative sequence output impedance, and the impedance ratio criterion is applied to evaluate grid connection stability. A fine-tuned model of a typical voltage violation area is built on the Simulink platform, and the proposed control strategy is integrated for simulation verification. The results show that this strategy can quickly release the voltage regulation margin in the early stage of voltage violation, effectively implement flexible active and reactive power adaptive coordinated voltage regulation, suppress voltage rise at the grid connection point, and provide voltage and frequency support. It is suitable for both existing and new distribution areas.

Keywords: active power reserve; VSG; grid-forming photovoltaic; voltage violation control

0 引言

截至2025年6月底, 全国分布式光伏装机规

模已突破4.93亿kW, 占光伏总装机容量的44.8%^[1], 其中99%以上接入10kV及以下中低压配电网。分布式光伏资源普遍具有单体规模小、点多面广^[2]、功率波动强等特性, 其大规模接入重塑了配电网的潮流结构与运行边界, 配电系统正迈向“非线性—不确定—强耦合”的多维动态演化阶段。在高渗透率分布式光伏接入的低压台区,

光伏集中满发时潮流频繁倒送，进而引发线路末端电压越限，严重冲击既有配电网的安全边界与调控机制。

现有台区调压手段主要包括安装无功补偿设备^[3]、变压器有载调压分接头调节^[4]以及网络拓扑重构^[5]等，存在着无功补偿经济性不足、有载调压对潮流倒送引发的电压越限治理效果有限、网络拓扑重构响应滞后甚至引发短时停电等问题，难以满足高渗透率场景下的快速电压稳定需求。相比之下，光伏逆变器凭借其灵活、快速的响应能力和良好的经济性，逐渐成为调压的重要工具。《光伏发电系统接入配电网技术规定》(GB/T 29319—2024)^[6]明确要求光伏逆变器具备动态无功调节能力，其输出范围应限制在0.48倍额定有功范围内，确保在不同运行状态下具备电压支撑功能。然而，传统并网光伏逆变器多采用MPPT(最大功率跟踪)控制，其无功调压潜力尚未被充分开发，且满发状态下缺乏主动电压调控能力。高渗透率分布式光伏接入的低压台区电压失稳根源在于源荷间歇性不匹配。因此，在台区电压越限严重时段，分布式光伏有必要进行适度柔性有功削减，发挥源端的本地快速调节潜力。

在此背景下，如何有效挖掘并提升台区光伏逆变器主动调压能力，已成为分布式光伏参与电压越限治理的关键。近年来，构网型控制技术的快速发展为解决这一问题提供了新的契机。目前，大多数新能源机组仍采用依赖锁相环的跟网型控制，其在弱电网条件下与电网动态耦合紧密，易引发振荡与失稳，难以满足配电网高渗透率运行的稳定性要求。区别于跟网型控制，构网型控制无需外部同步信号，而是通过主动建立电压源与相位实现自主并网，能够在电压、频率扰动下快速响应并提供有功与无功支撑，被视为高比例新能源系统的核心支撑技术之一。构网型控制的典型方法包括下垂控制^[7]、VSG(虚拟同步机)^[8]、匹配控制^[9]、虚拟振荡器^[10]等，并进一步衍生出融合控制^[11-16]、混合控制^[17-19]框架，展现出良好的发展前景。然而，因光伏出力的间歇性与波动性特征，传统构网型光伏往往需配套储能装置，以补充功率缺额或吸收多余功率。对于台区存量光伏机组而言，增配储能会显著提升系统成本与维

护复杂度，其经济性也远不及直接建设储能电站，因此构网型光伏的工程化改造面临较大阻力^[20-26]。

基于上述问题，本文提出一种有功预留式构网型光伏逆变器电压调控方法。该方法通过在光伏出力中预留一定功率冗余，使逆变器无需储能即可在电网扰动发生时释放备用功率，实现电压与频率的双重支撑。值得注意的是，这一机制与台区电压越限治理的有功削减需求天然契合。一方面，有功削减可释放无功调节空间，缓解电压上浮问题；另一方面，构网型光伏变流器需保留部分功率裕度以支撑频率稳定与电压恢复。因此，“有功预留”既满足了电压治理的需求，又为光伏逆变器构网化运行提供了物理基础，兼具低成本与快速响应优势。传统功率备用主要面向暂态频率支撑，而在高渗透率光伏接入的低压台区中，由光伏出力长期过剩、潮流持续倒送引发的电压越限问题更为常见。因此，本文所提控制架构优先开发其无功调压能力，并在无功调节能力不足时主动削减有功进行电压约束，通过柔性有功与无功自适应协同分配，维持直流侧电压稳定，提升交流侧电压调控与频率支撑能力。该方法适用于存量与新增台区灵活部署，避免额外储能配置或系统拓扑改造，支撑新型电力系统在配电层级的安全高效运行。

1 控制架构与工作原理

1.1 构网型变流器

典型的构网型控制架构如图1所示，通常由电压、电流双闭环与功率外环构成。

因电流内环和滤波器阻感方程的响应速度远

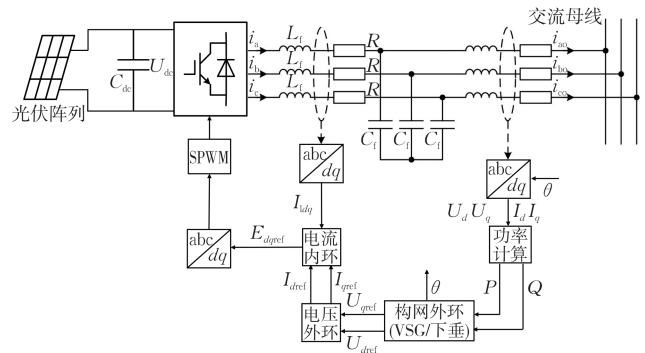


图1 构网型光伏逆变器控制框图

Fig.1 Control block diagram of a grid-forming PV inverter

快于电压外环和滤波器电容方程的响应速度, 依据奇异摄动原理^[27], 在外环尺度上, 内环环节可视为单位增益。据此, 可建立电容电路方程和外环电压控制环节如图2所示。

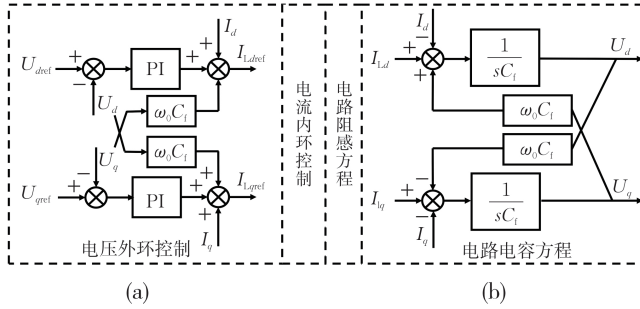


图2 构网型控制器建模与电路等效模型

Fig.2 Modeling of grid-forming controller and equivalent circuit model

电压外环解耦后与电容电路交叉耦合项抵消, 合理设计PI(比例-积分)参数实现零极点抵消, 即构网型电压电流双环控制可以等效为受控电压源, 进而实现电网电压和频率支撑的功能。

典型的虚拟同步机控制在此框架上进一步引入同步发电机的转子动力学方程:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{(P_{ref} - P)}{\omega_{ref}} - D(\omega_{ref} - \omega) \quad (1)$$

式中: J 和 D 分别为发电机的惯量、阻尼; ω 和 ω_{ref} 分别为同步发电机的输出角频率、额定角频率; P_{ref} 和 P 分别为同步发电机的额定参考有功功率、实际有功功率。

同步发电机因其惯量 J 的存在使其在功率和频率动态响应过程中具备惯性, 阻尼 D 则使其具备

阻尼振荡能力。其典型的控制框图如图3所示。

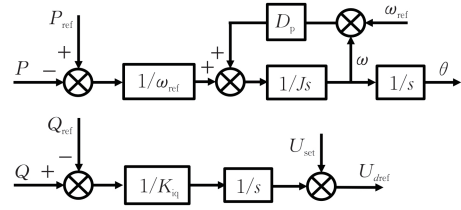


图3 典型VSG控制框图

Fig.3 Typical VSG control block diagram

1.2 有功预留式构网型光伏变流器

所提有功预留式构网型光伏变流器控制策略在典型虚拟同步机控制框架的基础上, 针对光伏出力的间歇性特征和台区电压越限治理需求, 设计了“无功调节-有功预留”双链路控制结构。在功率环中, 参考传统同步发电机AVR(励磁调节器)工作原理, 将电网电压信号引入功率控制环节, 以模拟电压-功率耦合特性。区别于同步机以储能装置为直流支撑, 光伏电源受辐照波动影响, 可能出现“AVR需求大于供给”的情况。因此, 功率环须设计成可切换的双模态。

整体控制结构如图4所示, 在电压电流双环和功率外环的基础上, 增加模态切换与功率冗余管理机制, 以实现电压与频率的主动支撑。在有功参考通道引入“最大功率追踪模态”和“有功预留模态”两种工作状态; 同时无功通道设计“自适应调节模态”和“无功锁存模态”。通过模态切换逻辑, 逆变器可根据电压运行状况在最大功率输出与主动支撑之间灵活调整, 兼顾光伏发电利用率与电压稳定性。

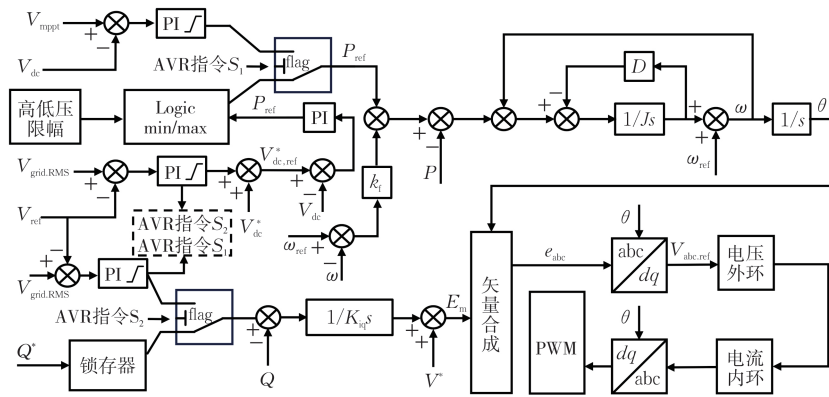


图4 有功预留式构网型光伏变流器控制框图

Fig.4 Control block diagram of active power reserve-based grid-forming PV inverter

通过上述设计, 构网型光伏逆变器能够在电压正常时保持最大功率运行, 在电压越限时灵活切换至有功预留模式, 并结合无功支撑实现多模式的动态电压调节。

1.3 柔性有功与无功自适应协同调压机理

为应对电压越限问题, 控制器需依据实时运行状态在不同模式间灵活切换。控制逻辑遵循“无功调节优先, 柔性有功兜底”原则: 在电压越限初期优先利用无功支撑, 待无功调节能力达到上限时, 切换至有功预留模式, 通过主动削减有功释放调控空间。整体控制流程如图5所示。具体流程如下:

1) 在每个控制周期内, 构网型光伏逆变器的控制器实时监测并网点的电压、电流并计算瞬时输出有功功率 P 和无功功率 Q 。

2) 基于AVR指令 S_1 进行有功相角链路选择:

(1) 当 $S_1=0$ 时, 系统处于最大功率跟踪模式。控制器采用扰动观测法获取当前最大功率点对应电压 V_{mpt} , 并经PI控制器调节后输出有功功率指令 P_{ref} 。

(2) 当检测到无功控制器输出达到国标规定上限(0.48 p.u.)时, 触发AVR指令 $S_1=1$, 此时系统进入有功预留模式。控制器将电网电压有效值 $V_{grid,RMS}$ 与母线电压指令值 V_{ref} 比较, 计算电压偏差并通过PI限幅钳位控制器调节生成直流母线电压偏移量 ΔV_{dc} , 与基准电压 V_{dc}^* 叠加后, 形成自适应

直流母线电压参考量 $V_{dc,ref}^*$ 。随后, 控制器以 $V_{dc,ref}^*$ 与实际直流电压 V_{dc} 计算误差, 生成新的功率指令参考值 P_{ref} , 并结合限幅模块与逻辑处理器输出最终有功参考值, 进一步驱动功角计算。

3) 基于AVR指令 S_2 选择无功电压链路:

(1) 当 $S_2=0$ 时, 系统处于无功自适应调节模式。控制器将 V_{ref} 与 $V_{grid,RMS}$ 比较后, 经PI控制器生成无功功率参考值 Q_{ref} 。

(2) 当系统进入有功备用状态并未达到最大输出幅值时, 触发 $S_2=1$, 控制器进入无功指令锁存模式。此时无功参考值 Q^* 被钳位锁定, 作为 Q_{ref} 输入, 无功调节链路保持输出, 继续提供无功支撑, 形成 E_m 幅值输出稳定支撑。

4) 控制器根据功率环中计算得到的三相瞬时相角与幅值(E_m, θ), 经后续电压电流双环控制输出桥臂驱动信号完成系统闭环动态调节。

2 有功预留式构网型光伏变流器控制策略稳定性分析

2.1 构网型光伏稳态工作点

典型光伏输出功率与端电压特性曲线如图6所示。以最大功率点作为划分, 曲线左侧下山区对应电流受限区, 右侧上山区对应电压受限区。通常最大功率跟踪控制会将工作点锁定在最大功率点附近, 以实现能量输出最大化。然而在构网型光伏有功预留需求下, 稳态工作点发生偏移, 控制策略对稳态工作点的选择对系统动态特性具有

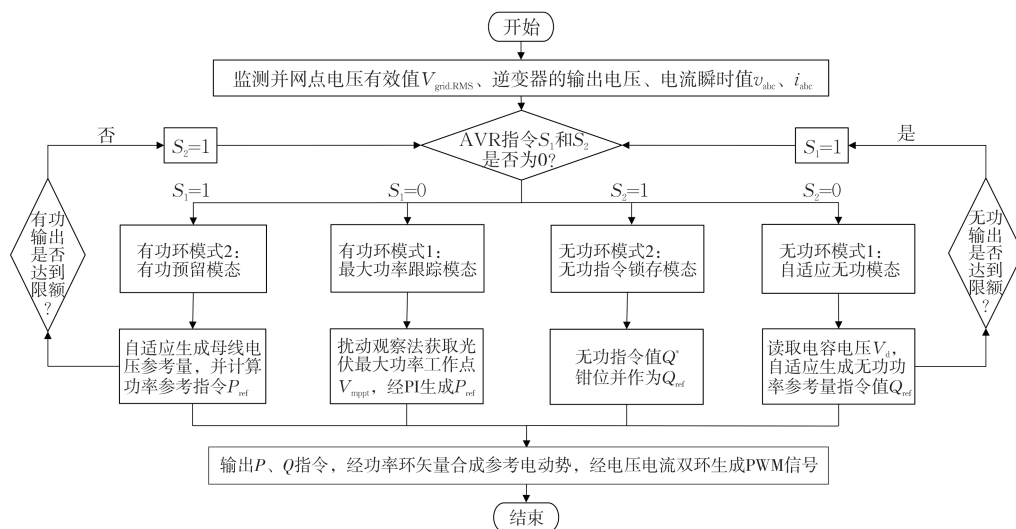


图5 柔性有功与无功自适应协同调压流程

Fig.5 Flowchart of flexible active and reactive power adaptive coordinated voltage regulation

重要影响。

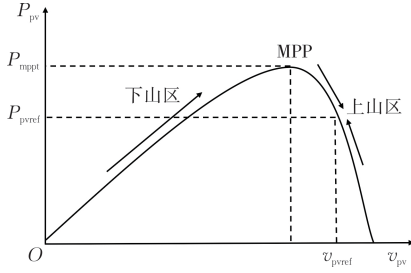


图6 光伏阵列功率特性曲线及参考工作点

Fig.6 Power characteristic curve of PV array and reference operating point

以典型单极式光伏的直流母线电容 C_{dc} 为分析对象, 母线功率平衡方程为:

$$C_{dc}V_{dc}\dot{V}_{dc} = P_{dc} - P_{ac} \quad (2)$$

式中: $P_{dc} = V_{pv}I_{pv}$ 为光伏阵列的直流侧输入功率; P_{ac} 为逆变器向交流侧输出功率。

对稳态工作点 (V_0, P_0) 进行小信号线性化分析, 记 $\Delta V = V_{dc} - V_0$ 、 $\Delta P_{dc} = P_{dc} - P_0$ 、 $\Delta P_{ac} \approx 0$ (交流侧功率环动态特性相对更慢, 扰动初期近似不变), 可得到:

$$C_{dc}\Delta V = \frac{1}{V_0}\Delta P_{dc}\frac{P_0}{V_0^2}\Delta V \quad (3)$$

光伏功率对母线电压的扰动敏感度可写为:

$$\Delta P_{dc} = \underbrace{\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}}_{P-V\text{阵列斜率}} \underbrace{\frac{\partial V_{pv}}{\partial V_{dc}}}_{\text{换流耦合}} \Delta V \triangleq K_{uv}\Delta V \quad (4)$$

式中: dP_{pv}/dV_{pv} 为光伏 $P-V$ 曲线的斜率; $\partial V_{pv}/\partial V_{dc} > 0$ 表示在定功率扰动观测下, 母线电压上升会推动阵列端电压同步上浮。将式(4)代入式(3)得闭环一阶模型:

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-D_p + K_\omega/\omega_0}{J} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_Q} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_f v_{q0} & \frac{K_o}{T_Q} & \frac{1}{T_o} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_f v_{d0} & 0 & 0 & \frac{1}{T_o} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\Delta \dot{V} = \left(\frac{K_{uv}}{C_{dc}V_0} - \frac{P_0}{C_{dc}V_0^2} \right) \Delta V \quad (5)$$

闭环系统稳定条件要求括号内系数小于0, 即:

$$K_{uv} < \frac{P_0}{V_0} \Leftrightarrow \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} \cdot \frac{\partial V_{pv}}{\partial V_{dc}} < \frac{P_0}{V_0} \quad (6)$$

由于 $\partial V_{pv}/\partial V_{dc} > 0$ 很小, 满足 $dP_{pv}/dV_{pv} < 0$ 可使 K_{uv} 为负, 从而显著降低式(5)的等效增益, 增强阻尼并自然满足式(6)。此时对应上山的工作特性。反之, 在下山区, $dP_{pv}/dV_{pv} > 0$, 导致 $K_{uv} > 0$; 式(3)的系数转为非负, 形成正反馈, 易触发功率/母线电压振荡。

因此, 所提有功预留式构网型控制策略选择将光伏稳态运行点定于上山区。利用母线功率平衡的负反馈稳定 ΔV , 同时为柔性有功支撑留出调控裕度。

2.2 控制器稳定性分析与参数整定

选取系统内部独立且数目最小的变量为状态变量, 对系统的数学模型进行完全描述, 可构建构网型光伏逆变器全阶小信号状态空间模型:

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $x = [\delta, \omega, E, \gamma_d, \gamma_q, \xi_d, \xi_q, i_d, i_q, i_{Ld}, i_{Lq}, v_d, v_q]^T$, δ 、 ω 、 E 为系统功率环相角、角频率、电动势, γ_d 和 γ_q 分别为电压外环积分量, ξ_d 和 ξ_q 分别为电流内环积分量, i_{Ld} 、 i_{Lq} 、 v_d 、 v_q 分别为 LC 滤波电感与电容暂态方程, i_d 和 i_q 为线路电感方程; $u = [P_{ref}, Q_{ref}, v_d^{ref}, v_q^{ref}]^T$ 分别为有功、无功参考值以及 dq 轴电压参考值。可建立 13 阶全阶状态空间方程。矩阵 A 、 B 元素见式(9)–(13), 仿真参数取值见 3.1 节。

$$A_{21} = \begin{bmatrix} \frac{v_{g0} \sin \delta_0}{L_g} & i_{q0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_{g0} \cos \delta_0}{L_g} & -i_{d0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-C_f K_i v_{q0}}{L_f} & \frac{K_i K_o}{L_f T_Q} & \frac{K_i}{L_f T_o} & 0 & \frac{1}{L_f T_i} & 0 \\ 0 & \frac{C_f K_i v_{d0}}{L_f} & 0 & 0 & \frac{K_i}{L_f T_o} & 0 & \frac{1}{L_f T_i} \\ 0 & v_{q0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -v_{d0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{d0}}{J\omega_0} & -\frac{v_{q0}}{J\omega_0} & 0 & 0 & -\frac{i_{d0}}{J\omega_0} & -\frac{i_{q0}}{J\omega_0} \\ -K_q v_{q0} & K_q v_{d0} & 0 & 0 & K_q i_{q0} - K_u & -K_q i_{d0} \\ -K_Q K_q v_{q0} & K_Q K_q v_{d0} & 0 & 0 & -K_Q (K_u - K_q i_{q0}) - 1 & -K_Q K_q i_{d0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 - K_Q K_o K_q v_{q0} & K_Q K_o K_q v_{d0} & -1 & 0 & -K_o (K_Q (K_u - K_q i_{q0}) + 1) & -C_f \omega_0 - K_Q K_o K_q i_{d0} \\ 0 & 1 & 0 & -1 & C_f \omega_0 & -K_o \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} -\frac{R_g}{L_g} & \omega_0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_g} & 0 \\ -\omega_0 & -\frac{R_g}{L_g} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_g} \\ -\frac{K_i (K_Q K_o K_q v_{q0} - 1)}{L_f} & \frac{K_Q K_i K_o K_q v_{d0}}{L_f} & -\frac{K_i + R_i}{L_f} & 0 & -\frac{K_i K_o (K_Q (K_u - K_q i_{q0}) + 1)}{L_f} & -\frac{K_i (C_f \omega_0 + K_Q K_o K_q i_{d0})}{L_f} \\ 0 & \frac{K_i}{L_f} & 0 & -\frac{K_i + R_i}{L_f} & \frac{C_f K_i \omega_0}{L_f} & -\frac{K_i K_o}{L_f} \\ -\frac{1}{C_f} & 0 & \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega_0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} & 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega_0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{J\omega_0} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_q & K_Q K_q & 0 & K_Q K_o K_q & 0 & 0 & 0 & \frac{K_Q K_i K_o K_q}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_u & K_Q K_u + 1 & 0 & K_o (K_Q K_u + 1) & 0 & 0 & 0 & \frac{K_i K_o (K_Q K_u + 1)}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & K_{o2} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_i K_o}{L_f} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

图7为名义参数下VSG全阶模型的极点-零点图。由图7可知全部极点位于左半平面，系统小信号稳定。

利用特征灵敏度 $S_{\lambda_k}^p = \omega_k^T (\partial A / \partial p) v_k (\omega_k^T v_k)^{-1}$ 计算主导极点对关键参数的敏感度，结果如图8所示，据此可辨识三类特征模态：

1) 功率环模态：一对低频共轭极点 λ_1 与 λ_2 ，主要由 δ 、 ω 与功率环决定。

2) 电压外环模态：一对低频共轭极点 λ_3 与 λ_4 与电压外环积分量 γ_d 和 γ_q 紧密相关。

3) 电流内环模态：频带中等，极点为 λ_6 与 λ_7 ，主要由电流内环积分量 ξ_d 和 ξ_q 决定。

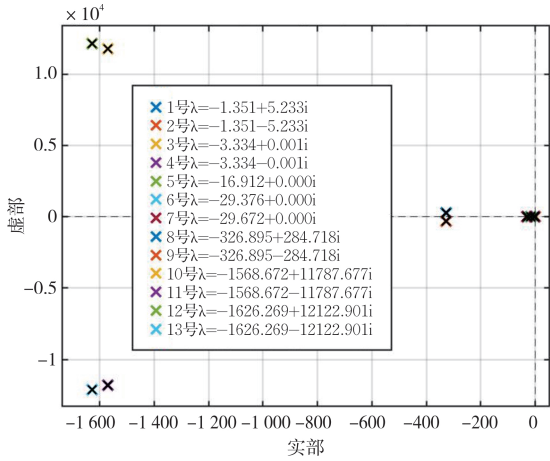


图7 VSG全阶模型的极点分布

Fig.7 Pole distribution of the full-order VSG model

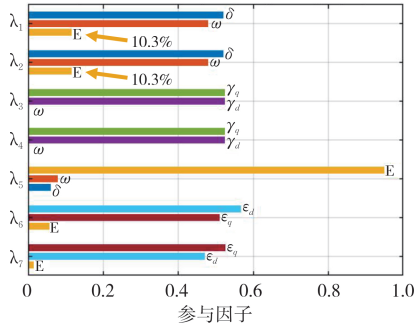


图8 VSG主导极点灵敏度辨识结果

Fig.8 Sensitivity identification results of the dominant poles of the VSG

幅值排序显示出明显的时间尺度分离： $|R\{\lambda_i\}| \gg |R\{\lambda_v\}| \gg |R\{\lambda_{vsg}\}|$ 。因此可保留主导极点对模型进行降阶。依据奇异摄动理论，忽略高频线路暂态模态，可得到低阶模型：

$$\Delta \dot{x}_r = A_r \Delta x_r + B_r \Delta u \quad (14)$$

式中： $x_r = [\delta, \omega, \gamma_d, \gamma_q, \xi_d, \xi_q]^T$ 。图9给出了降阶后的极点—零点分布情况，降阶前后极点对比如表1所示。

除 λ_1 与 λ_2 外，保留下来的主导极点位置与全阶结果高度一致，而快速极点被移除。因此，降阶模型在主导极点保持与误差可控的前提下，可作为后续参数灵敏度分析、控制器参数整定的可靠替代模型。

功率环主导模态可等效表示为二阶振荡形式，具体如式(15)所示。

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta} = \Delta \omega \\ J \Delta \dot{\omega} = -D \Delta \omega - K_s \Delta \delta + K_p \Delta P_{ref} \end{cases} \quad (15)$$

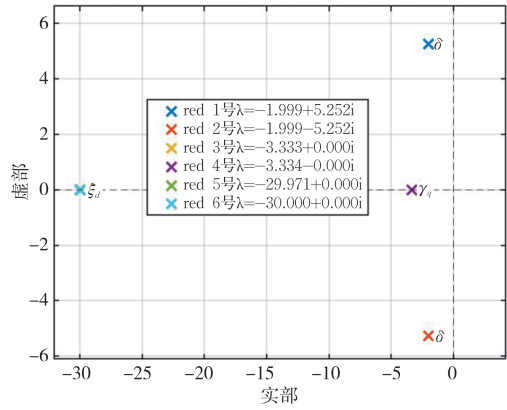


图9 降阶模型的极点分布

Fig.9 Pole distribution of the reduced-order model

表1 6阶模型降阶前后极点对比

Table 1 Comparison of poles before and after order reduction of the 6th-order model

全阶模型极点值	降阶模型极点值	误差率/%
-1.3508+5.2334i	-1.9986+5.2517i	11.99
-1.3508-5.2334i	-1.9986-5.2517i	11.99
-3.3337+0.0009i	-3.3336+0.0000i	0.03
-3.3337-0.0009i	-3.3336+0.0000i	0.03
-29.3757+0.0000i	-29.9711+0.0000i	2.03
-29.6720+0.0000i	-29.9711+0.0000i	1.01

式中： $K_s \approx E_0 V_0 \cos \delta / X_{eq}$ 为同步力矩系数(X_{eq} 含滤波电抗与并网电抗)； K_p 为功率参考输入增益。对式(15)求解可得固有频率与阻尼比，该二阶近似解释了惯量与阻尼“刚度”对低频模态的影响。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_s}{J}}, \zeta = \frac{D}{2\sqrt{JK_s}} \quad (16)$$

进一步分析，增大 J 使 $\omega_n = \sqrt{K_s/J}$ 降低，主导共轭极点向虚轴靠近；若 D 不变， $\xi \propto \sqrt{1/J}$ 降低，阻尼减弱，超调增大。增大 D 主要沿实轴将共轭极点左移，提高阻尼比、降低超调，但过大将引起响应迟缓。理论分析结果与降阶模型 J 和 D 的根轨迹图10和图11相契合，其中 n 为标么量，基值取自表2。

同理，对电压环与电流环的主导模态亦可开展类似分析，限于篇幅，此处仅给出参数整定的通用准则。

为保证环路解耦并兼顾动态与鲁棒性，参数设计时应遵循分层带宽解耦原则。电流环带宽足够高，使外环在其频域范围内可近似将其视为单

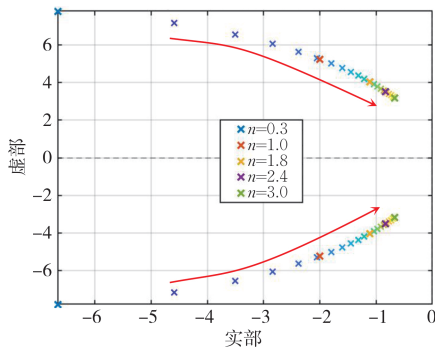


图 10 降阶模型在虚拟惯量 J 变化下的极点轨迹

Fig.10 Pole trajectories of the reduced-order model with varying virtual inertia J

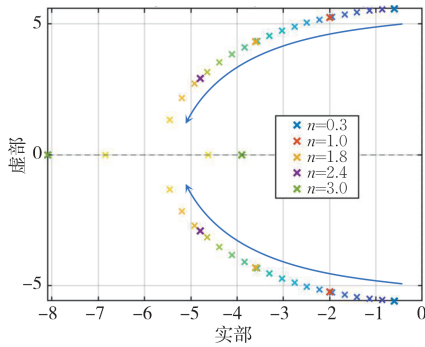


图 11 降阶模型在虚拟阻尼 D 变化下的极点轨迹

Fig.11 Pole trajectories of the reduced-order model with varying virtual damping D

表 2 控制器主要参数

Table 2 Main parameters of the controller

参数名称	符号	取值
虚拟转动惯量	J	20
虚拟阻尼系数	D_p	160
无功积分权重系数	K_{iq}	0.01
电压外环比例系数	K_o	3
电压外环积分时间常数	T_o	3/30
电流内环比例系数	K_i	10
电流内环积分时间常数	T_i	10/3 000
滤波电阻/ Ω	R_f	0.2
滤波电感/mH	L_f	3.2
滤波电容/ μF	C_f	73.1
线路电阻/ Ω	R_g	0.3
线路电感/mH	L_g	0.8

位增益；电压环带宽快于功率环，从而避免低频能量环与中频电压环相互牵连而引入附加相位滞后。电流内环PI参数依据滤波阻感 R_f 、 L_f 设计，带宽为开关频率的 1/10；电压外环PI参数依据滤波电容 C_f 动态方程设计，带宽约为电流环的 1/5~

1/10；功率环惯量系数 J ，阻尼系数 D 以及调压环参数通过频率-电压动态性能与稳态稳定性综合整定。

对降阶小信号模型进行惯量 J 和阻尼 D 参数扫描，结果如图 12 所示。沿 J 轴增大虚拟惯量，等效降低电角速度的自然频率，主导极点纵向上移但会贴近虚轴；沿 D 轴增大虚拟阻尼，主导极点整体左移，阻尼比提高、超调减小，但过大时会牺牲上升速度。

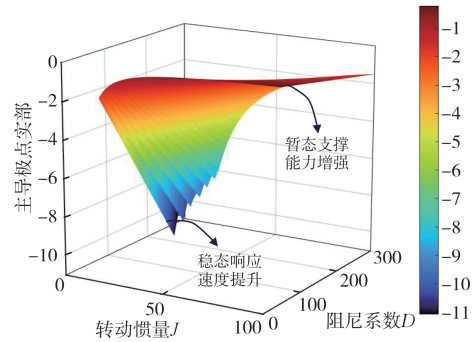


图 12 降阶模型在 J - D 参数空间下的主导极点分布

Fig.12 Distribution of dominant poles of the reduced-order model in the J - D parameter space

据此，在满足带宽层次的前提下，取 $J=20$ ， $D=160$ 。该点位于曲面负实部的稳定区内，主导极点与虚轴保持可观距离，既有充足的稳定裕度，又能获得较快且不过冲的功率/电压建立过程；同时对 J 、 D 的小幅扰动不敏感，便于工程实现与参数漂移下的鲁棒性维护。

2.3 构网型逆变器多机并联稳定性分析

考虑 n 台 GFM-PV 在同一馈线并联的情形，忽略线路 R、C 微小耦合并在小扰动域内线性化，得到第 $i=1, 2, \dots, n$ 台机组等效摆动方程：

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta}_i = \Delta \omega_i \\ J_i \Delta \dot{\omega}_i = -D_i \Delta \omega_i - \Delta P_{e,i}, i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (17)$$

逆变器输出功率线性化可以得到：

$$\Delta P_{e,i} = K_i (\Delta \delta_i - \Delta \delta_{bus}), K_i \approx \frac{3E_i U_{bus}}{X_{i1}} \quad (18)$$

由功率平衡得到母线等效相角增量：

$$\Delta \delta_{bus} = \frac{\sum_{j=1}^n K_j \Delta \delta_j - \Delta P_{load}}{\kappa}, \kappa \triangleq \sum_{j=1}^n K_j \quad (19)$$

将式(18)与(19)代回式(17)，得到全局状态空间方程：

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}L_{\text{par}} & -M^{-1}D \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}\frac{1}{\kappa}K \end{bmatrix} \\ y = \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta P_e \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I \\ L_{\text{par}} & 0 \end{bmatrix}}_C x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\kappa}K \end{bmatrix}}_D u \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\dot{x} = Ax + Bu$; $x = [\Delta\delta^T \quad \Delta\omega^T]^T$; $u = \Delta P_{\text{load}}$; $L_{\text{par}} \triangleq K - (K11^T K)/\kappa$; L_{par} 为并联系统的等效拉普拉斯矩阵。满足 $L_{\text{par}}\mathbf{1} = 0$ 。

定义 COI(加权质心)角与频率分别为 $\delta_{\text{coi}} = (1^T K \Delta\delta)/\kappa$ 、 $\omega_{\text{coi}} = (1^T M \Delta\omega)/(1^T M \mathbf{1})$ 。引入相对量 $\tilde{\delta} = \Delta\delta - \delta_{\text{coi}}\mathbf{1}$ 、 $\tilde{\omega} = \Delta\omega - \omega_{\text{coi}}\mathbf{1}$, 可将系统分解为 COI 模态 ($\dot{\delta}_{\text{coi}} = \omega_{\text{coi}}$) 与相对模态:

$$\dot{\tilde{\delta}} = \tilde{\omega}, M\dot{\tilde{\omega}} = -D\tilde{\omega} - L_{\text{par}}\tilde{\delta} \quad (21)$$

COI 模态与负荷扰动耦合, 相对模态由式(21)独立决定系统的同步一致性与振荡阻尼。

取二次型:

$$V(\tilde{\delta}, \tilde{\omega}) = \frac{1}{2} \tilde{\omega}^T M \tilde{\omega} + \frac{1}{2} \tilde{\delta}^T L_{\text{par}} \tilde{\delta} \quad (22)$$

由式(21)可得:

$$\dot{V} = \tilde{\omega}^T M \dot{\tilde{\omega}} + \tilde{\delta}^T L_{\text{par}} \dot{\tilde{\delta}} = -\tilde{\omega}^T D \tilde{\omega} \leq 0 \quad (23)$$

若各机阻尼 $D_i > 0$ 且网络连通 ($\lambda_2(L_{\text{par}}) > 0$), 则 $\dot{V} = 0 \Rightarrow \tilde{\omega} = 0 \Rightarrow \tilde{\delta}^T L_{\text{par}} \tilde{\delta} = 0 \Rightarrow \tilde{\delta} = \alpha\mathbf{1}$, 即相对频率收敛为零、相角收敛到一致。因此, 若无通信并联系统满足 $J_i > 0$, $D_i > 0$, $K_i > 0$, $\lambda_2(L_{\text{par}}) > 0$, 多机在小角域内必然收敛到同步。

对 $L_{\text{par}} = U\Lambda U^T$ 作正交分解, 相对第 $k(k \geq 2)$ 个模态的标量化动力学近似为:

$$\ddot{z}_k + \frac{D_{\text{eq}}}{J_{\text{eq}}} \dot{z}_k + \frac{\lambda_k}{J_{\text{eq}}} z_k = 0 \quad (24)$$

式中: λ_k 为 L_{par} 的非零特征值; J_{eq} 和 D_{eq} 分别为参与该模态的等效惯性与阻尼。

据此得到阻尼下界:

$$\zeta_k \approx \frac{D_{\text{eq}}}{2\sqrt{J_{\text{eq}}\lambda_k}}, k \geq 2 \quad (25)$$

由式(25)可给出整定规律:

1) 提升虚拟阻尼 D_i 可线性提高相对阻尼。

2) 提高电压外环增益/降低等效电抗进而降低 J_{eq}/X_{fi} , 增大阻尼。

3) 通过虚拟阻抗/滤波电感重塑并联系统, 提高图代数连通度 $\lambda_2(L_{\text{par}})$, 可同时抬升各相对模态的自然频率与阻尼裕度。

3 仿真实验

3.1 仿真模型与参数说明

为验证所提电压越限治理方法的有效性, 选取浙江省衢州市某高渗透率分布式光伏接入的低压台区作为研究对象。其具体装机容量见表3, 馈线拓扑见图13。该台区光伏装机容量与用户最大负荷之比(渗透率)接近300%, 且馈线长度较长、末端阻抗较大; 在正午时段光伏满发、源荷错配显著, 潮流由末端向上级节点的倒送, 从而引发末端电压抬升与越限。图14给出某典型日的台区端口潮流曲线。日间时段出现明显功率倒送现象, 最大倒送功率约为100 kW, 源荷不匹配问题尤为突出。

表3 台区线路参数与分布式光伏额定装机容量

Table 3 Line parameters of the distribution area and rated installed capacity of distributed photovoltaic systems

参数名称	符号	取值
光伏装机容量/kW	PV ₁ /PV ₂ /PV ₃ /PV ₄	12.87/10.1/39.3/39.13
光伏装机容量/kW	PV ₅ /PV ₆ /PV ₇ /PV ₈	46.93/10.4/32.55/13.02
光伏装机容量/kW	PV ₉ /PV ₁₀ /PV ₁₁	22.32/10.8/14.3
光伏装机容量/kW	PV ₁₂ /PV ₁₃	7.32/7.32
线路电阻/(Ω·km ⁻¹)	R _l /R ₀	0.6888/0.688×3
线路电抗/(H·km ⁻¹)	L _l /L ₀	0.000 89/0.002 67

3.2 电压越限治理效果验证

选取12:00典型满发时刻进行电压越限仿真, 系统处于光伏出力高峰, 此时, 潮流反送与末端电压越限问题最为严峻。

仿真结果如图15所示。并网点电压稳定在250.2 V, 此时光伏出力功率因数接近1, 系统无功支撑能力不足, 末端电压远超235.4 V 低压台区电压上限。

10 s时刻, 光伏逆变器控制策略切换至所提有功预留式构网型光伏逆变器电压调控方法, 控制参数见表2。系统容性无功自适应增发, 系统电压逐步下降, 待系统无功输出达到阈值, 开启无功功率锁存模态并切换至自适应有功削减模态, 系统电压进一步下降。考虑台区内所有光伏采用所

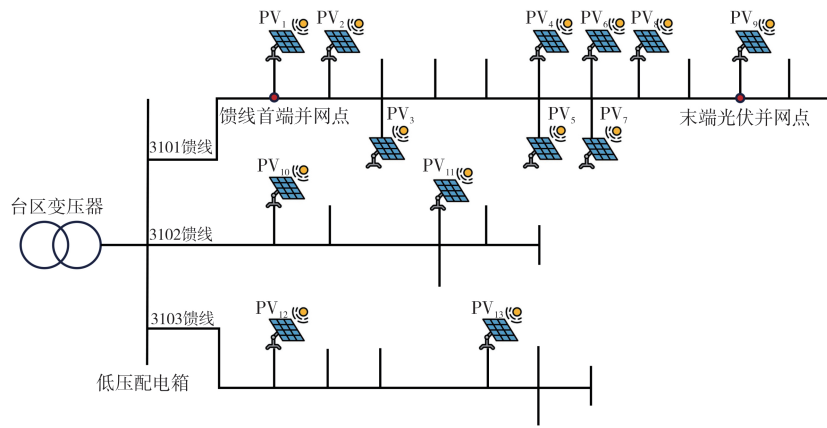


图 13 某高渗透率光伏低压台区实际拓扑

Fig.13 Actual topology of a high-penetration photovoltaic low-voltage distribution area

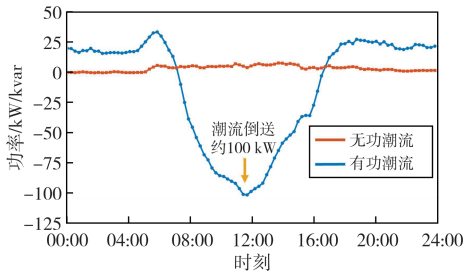


图 14 低压台区某典型日端口潮流曲线

Fig.14 Typical daily power flow curve at a port in a low-voltage distribution area

提控制方法，在越限最严重区间进行电压越限治理，仿真结果如图 15(a)所示，系统无功输出达到既定阈值，有功输出削减 15%，系统末端电压稳定在合理区间。

选取如图 16 所示机组进行局部构网型光伏改造，优先以大容量光伏机组作为主要改造对象，重点对台区末端光伏机组进行针对性改造，实现电压越限问题的精准治理与改造成本的最优平衡。

此时系统改造容量约为装机容量的 50%，仿真结果如图 15(b)所示，系统无功输出达到既定阈值，构网型改造机组输出削减 27%，系统末端并网点电压为 235.4 V，实现电压越限治理。

3.3 暂态频率与电压支撑能力验证

为验证所提策略暂态频率与电压支撑能力，在 30 s 时刻增加 30 kW 阶跃性负荷。测试结果如图 17、图 18 所示。

在 30 s 负荷突增扰动下，跟网型光伏频率瞬时跌落显著，最低点为 49.92 Hz，频率变化率为 3.2 Hz/s，表现为严重的惯量缺失。构网型光伏频率最低点为 49.987 Hz，频率变化率为 0.065 Hz/s，验证了所提策略的暂态频率支撑能力。

在相同扰动条件下，于负荷阶跃邻近位置对光伏变流器并网点进行电压暂降监测，测试结果如图 18 所示。跟网型光伏并网点电压出现明显暂降，最大跌幅约 29.6 V，最低电压仅 205.6 V，存在欠压风险。构网型光伏将电压跌落幅度缩小至 20.8 V，最低电压提高至 211.5 V，电压支撑能力较传统跟网控制显著增强。

考虑云影穿越等典型动态情形，如图 19 所示。

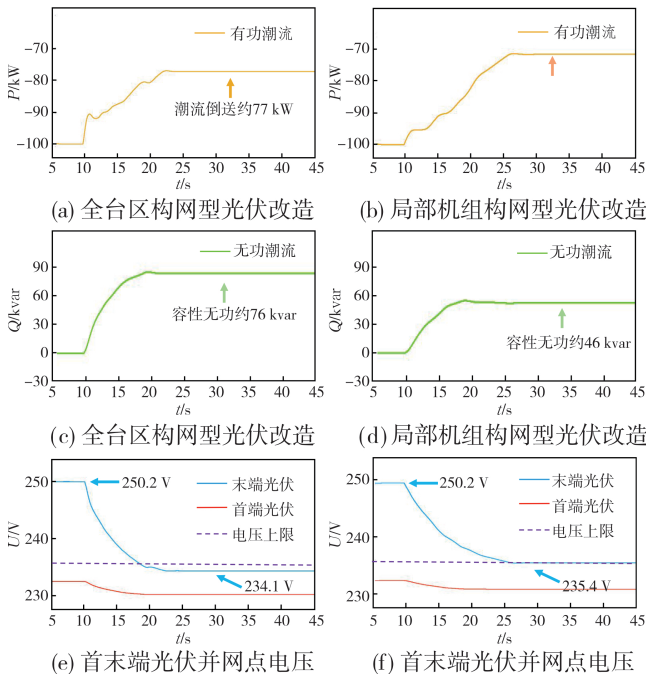


图 15 所提控制策略对台区馈线过电压的治理效果
Fig.15 Effect of the proposed control strategy on feeder over-voltage control in the distribution area

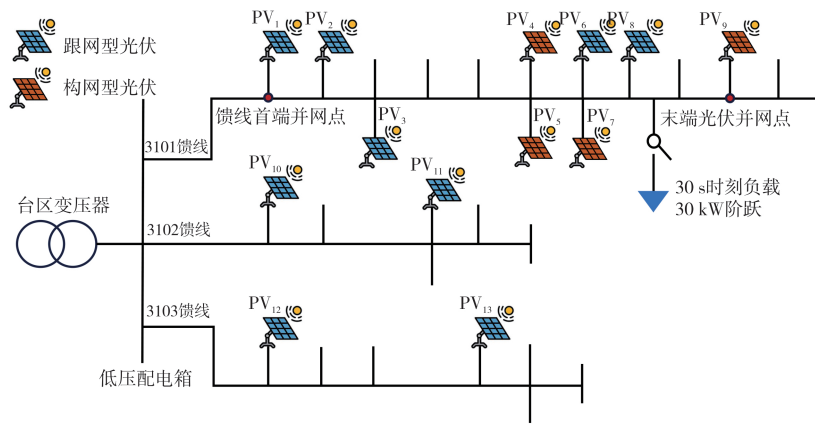


图 16 台区局部构网型光伏改造与负荷阶跃拓扑图

Fig.16 Topology of local grid-forming PV controller retrofit and load step change in the distribution area

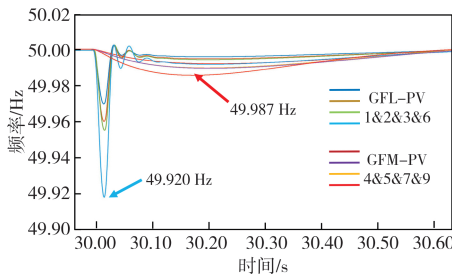


图 17 构网型光伏频率支撑测试结果

Fig.17 Test results of frequency support using the proposed grid-forming PV controller

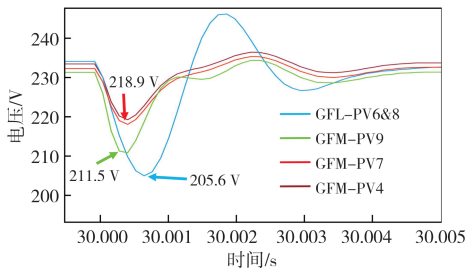


图 18 构网型光伏电压支撑测试结果

Fig.18 Test results of voltage support using the proposed grid-forming PV controller

在 30~33 s 内依次作用于其中两台机组, 其变化速率为每秒 200 W/m^2 , 这是移动云层情景下观测到的最高变化速率^[28], 30 s 叠加负荷突增构建了云影穿越时最恶劣工况, 其余机组辐照度各异。

测试结果见图 20, 各 GFM 机组轨迹保持一致性与良好阻尼, 系统频率最低点约 49.986 Hz, 随后快速回升并进入窄带振荡收敛。受辐照度下跌影响, PV5 在 30~31 s 辐照度阶段的暂态超调显著减小, PV4 在 32~33 s 辐照度回升引入一定的

频率超调, 但幅度有限且阻尼充分, 未出现机间耦合振荡。总体而言, 在云影动态与负荷扰动叠加的最不利场景下, 构网型光伏保持了频率同步性与暂态稳定性, 验证其对辐照度快速波动的鲁棒性。

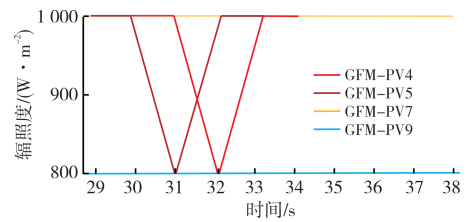


图 19 局部云影穿越下的辐照度时序

Fig.19 Solar irradiance time series under local cloud shadow passage

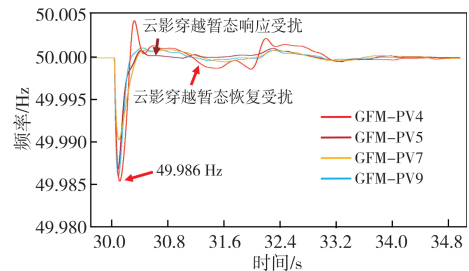


图 20 构网型光伏云影穿越测试结果

Fig.20 Cloud passage test results of the grid-forming PV system

由上述分析可知, 所提构网型光伏控制策略可显著提升光伏逆变器暂态支撑能力, 能够快速遏制频率下降速率并改善系统频率稳定性, 同时为系统提供稳定电压支撑, 提高了光伏并网系统的动态安全性与鲁棒性。

4 结语

本文围绕高渗透率分布式光伏接入低压台区的电压越限与惯量缺失问题,提出了一种有功预留式构网型光伏逆变器电压调控方法。在虚拟同步机控制框架下,构建“无功优先调压、柔性有功兜底”的协同逻辑,并基于小信号建模与阻抗稳定性分析给出系统化的参数整定准则。通过降阶模型的极点敏感性分析与工程化参数选择,保证了控制环路的解耦与鲁棒性。Simulink平台的仿真结果验证了该方法的有效性:在电压越限场景下,所提策略能够充分释放无功调压裕度并适时实施有功削减,使末端电压维持在允许区间;在暂态扰动下,构网型光伏显著抑制了频率跌落与电压暂降,频率变化率降低约两个数量级,电压跌幅减小约30%。该方法兼顾电压治理与频率支撑需求,无需额外储能配置,具有快速响应与低成本优势,适用于存量与新增台区的灵活部署,对提升高比例光伏渗透下配电网的安全稳定运行具有重要意义。

参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局2025年第三季度新闻发布会文字实录[EB/OL].[2025-07-31].<https://www.nea.gov.cn/20250731/83ffa46373ec42dd99e0e3271028c151/c.html>.
- [2] 姚宏民,秦文萍,景祥,等.基于可能性理论的低压配电网分布式光伏承载能力评估方法[J].高电压技术,2024,50(6):2682-2692.
YAO Hongmin, QIN Wenping, JING Xiang, et al. Possibilistic theory-based assessment method for distributed PV hosting capacity of low-voltage distribution networks [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2682-2692.
- [3] 傅国斌,孙海斌,王海亭,等.含高渗透率新能源电力系统多目标无功优化方法[J].高压电器,2025,61(5):291-301.
FU Guobin, SUN Haibin, WANG Haiting, et al. Multi-objective reactive power optimization method for new energy power systems with high permeability [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(5): 291-301.
- [4] 李志军,梁其琛,张家安.基于储能有功功率与OLTC协调的配电网电压控制[J].南方电网技术,2024,18(6):89-97.
LI Zhijun, LIANG Qichen, ZHANG Jiaan. Voltage control of distribution network based on coordination of energy storage active power and OLTC [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(6): 89-97.
- [5] 刘蓉晖,陈耿,孙改平,等.考虑风光联合场景的配电网动态重构策略[J].浙江电力,2025,44(7):93-101.
LIU Ronghui, CHEN Geng, SUN Gaiping, et al. Dynamic reconfiguration of distribution networks considering wind-PV-load scenarios [J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(7): 93-101.
- [6] 国家市场监督管理总局,国家标准化委员会.光伏发电系统接入配电网技术规定:GB/T 29319—2024[S].北京:中国标准出版社,2024.
- [7] DE BRABANDERE K, BOLSENS B, VAN DEN KEYBUS J, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [8] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine [C]//2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. October 9-11, 2007, Barcelona, Spain. IEEE, 2008: 1-6.
- [9] HUANG L B, XIN H H, WANG Z, et al. A virtual synchronous control for voltage-source converters utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1565-1577.
- [10] SEO G S, COLOMBINO M, SUBOTIC I, et al. Dispatchable virtual oscillator control for decentralized inverter-dominated power systems: analysis and experiments [C]//2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). March 17-21, 2019, Anaheim, CA, USA. IEEE, 2019: 561-566.
- [11] 罗魁,郭剑波,王伟胜,等.跟网型新能源附加频率控制对频率稳定及小扰动同步稳定影响分析综述[J].中国电机工程学报,2023,43(4):1261-1280.
LUO Kui, GUO Jianbo, WANG Weisheng, et al. Review of impact of grid following variable renewable energy supplementary frequency control on frequency stability and small-disturbance synchronization stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1261-1280.
- [12] HAN F, ZHANG X, LI M, et al. Stability control for grid-connected inverters based on hybrid-mode of grid-following and grid-forming [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(9): 10750-10760.
- [13] XIAO H Q, HE H L, ZHANG L D, et al. Adaptive grid-synchronization based grid-forming control for voltage source converters [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 4763-4766.
- [14] PAN R C, TANG G F, WU Y N, et al. Hybrid synchronization based grid forming control for photovoltaic inverter with frequency support [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 157: 109906.
- [15] 苏开元,刘朋印,殷波,等.适应短路比与惯量变化的直驱风电机组跟-构网融合控制策略及功率支撑特性[J].中国电机工程学报,2025,45(15):5798-5810.

- SU Kaiyuan, LIU Pengyin, YIN Bo, et al. GFL-GFM hybrid control strategy and power support characteristics for PMSG-based wind turbines adapted to variations in short circuit ratio and inertia [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(15): 5798-5810.
- [16] 刘朋印, 谢小荣, 缪庆庆, 等. 变流器自适应跟网-构网融合控制及其改善振荡稳定性的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(15): 6062-6069.
- LIU Pengyin, XIE Xiaorong, MIAO Qingqing, et al. Adaptive grid-forming and grid-following hybrid control and its mechanism for enhancing converter's oscillatory stability [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2025, 45(15): 6062-6069.
- [17] 周于清, 姚伟, 宗启航, 等. 基于运行短路比的新能源场站中跟/构网可切换单元的最优配置方法[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1091-1104.
- ZHOU Yuqing, YAO Wei, ZONG Qihang, et al. Optimal configuration of grid-following/grid-forming switchable units in new energy stations based on operating short-circuit ratio [J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1091-1104.
- [18] LI M, GENG H, ZHANG X. Hierarchical mode-dispatching control for multi-inverter power stations [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 10044-10054.
- [19] 李群, 唐伟佳, 汪成根, 等. 计及暂态电压稳定约束的构网-跟网变流器最优配比策略[J]. 浙江电力, 2025, 44(1): 76-83.
- LI Qun, TANG Weijia, WANG Chenggen, et al. An optimal allocation strategy for GFM and GFL converters considering transient voltage stability constraints [J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(1): 76-83.
- [20] 赵平, 杜龙, 龚砚, 等. 基于虚拟转速动态调节的构网型逆变器故障穿越控制策略[J]. 电力建设, 2026, 47(1): 49-62.
- ZHAO Ping, DU Long, GONG Yan, et al. Fault ride-through control strategy for grid-forming inverters based on dynamic virtual angular velocity regulation [J]. Electric Power Construction, 2026, 47(1): 49-62.
- [21] 薛瑞泽, 李星, 王嘉力, 等. 基于降阶高增益观测器的构网型光储系统滑模控制[J]. 山东电力技术, 2025, 52(6): 33-43.
- XUE Ruize, LI Xing, WANG Jiali, et al. Sliding mode control of grid-forming PV-storage system based on reduced-order high gain observer [J]. Shandong Electric Power, 2025, 52(6): 33-43.
- [22] 何佐仁, 黄云辉, 王栋, 等. 基于虚拟母线电压控制的跟网型与构网型并联系统稳定性优化[J]. 智慧电力, 2025, 53(6): 19-27.
- HE Zuoren, HUANG Yunhui, WANG Dong, et al. Stability optimization of grid-following and grid-forming converter parallel systems based on virtual bus voltage control [J]. Smart Power, 2025, 53(6): 19-27.
- [23] 朱宝宇, 王英, 张子翔, 等. 构网型储能变流器技术研究综述与展望[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(3): 1-12.
- ZHU Baoyu, WANG Ying, ZHANG Zixiang, et al. Review and prospects on research of grid-forming energy storage converter technology [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 1-12.
- [24] 胥德玉, 黄媛, 唐志远, 等. 面向配电网分布式光伏消纳和可靠性提高的构网型储能优化配置[J]. 电力建设, 2026, 47(1): 1-14.
- XU Deyu, HUANG Yuan, TANG Zhiyuan, et al. Research on grid-forming energy storage configuration for distributed photovoltaic consumption and reliability improvement of distribution network [J]. Electric Power Construction, 2026, 47(1): 1-14.
- [25] 杨世维, 李保宏, 江琴, 等. 考虑SOC的构网型储能参与风光制氢系统调频策略[J]. 智慧电力, 2025, 53(5): 8-15.
- YANG Shiwei, LI Baohong, JIANG Qin, et al. Frequency regulation strategy considering SOC for grid-forming energy storage participating in wind-photovoltaic hydrogen production systems [J]. Smart Power, 2025, 53(5): 8-15.
- [26] 胡振洋, 王嘉力, 傅作超, 等. 基于定时收敛滑模的构网型光储系统改进自抗扰控制[J]. 电力工程技术, 2025, 44(2): 69-79.
- HU Zhenyang, WANG Jiali, FU Zuochao, et al. Improved active disturbance rejection control for grid type photovoltaic energy storage system based on fixed-time convergence sliding mode [J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 69-79.
- [27] 戴诗正. 奇异摄动理论[J]. 系统工程与电子技术, 1988, 2: 1-12.
- DAI Shizheng. Singular perturbation theory [J]. Systems Engineering and Electronics, 1988, 2: 1-12.
- [28] GUO Z Z, WU W C. Matching synchronous machine control for improving active support of grid-forming PV systems with enhanced DC voltage dynamics [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2025, 13(1): 179-189.

收稿日期: 2025-09-28; 修回日期: 2025-11-10

作者简介:

章天晗(1997), 男, 工学博士, 工程师, 主要从事电网规划设计、电网调控运行等方面的研究工作。

代一乐(2002), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为并网逆变器控制、微电网、多逆变器系统稳定性分析。(通信作者)

(本文编辑: 徐 晗)