

文章编号: 2095-4980(2025)07-0671-06

## 有源配电网功率控制稳定性时延裕度计算

王忠钰<sup>a</sup>, 尹喜阳<sup>a</sup>, 冯瑛敏<sup>b</sup>, 闫龙<sup>c</sup>, 张倩文<sup>a</sup>, 王林<sup>a</sup>, 冯春盛<sup>a</sup>

(国网天津市电力公司 a.信息通信公司; b.经济技术研究院; c.滨海供电分公司, 天津 300450)

**摘要:** 随着以光伏发电(PV)为代表的可再生能源分布式发电渗透率提升, 有源配电网面临潮流倒送、电压越限等问题。因光伏逆变终端与中央控制器间通信为全时全域异构网络, 通信延时不可避免, 导致控制性能降低甚至系统失稳。为此, 设计光伏逆变器有功功率控制, 调整配电网功率分布与调节节点电压; 提出计及通信时延的线性化状态空间模型, 采用线性矩阵不等式(LMI)方法获得通信时延依赖稳定性准则, 确定时延裕度, 保证系统运行稳定性。仿真试验结果表明, 所构建空间模型及时延裕度计算能够有效提升系统鲁棒性, 并适用于有源配电网中的多光伏系统。

**关键词:** 分布式光伏发电; 全时全域异构通信网; 线性矩阵不等式(LMI); 通信时延

中图分类号: TM930; TN911

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2024557

## Calculation of time delay margin for power control stability in active distribution networks

WANG Zhongyu<sup>a</sup>, YIN Xiyang<sup>a</sup>, FENG Yingmin<sup>b</sup>, YAN Long<sup>c</sup>, ZHANG Qianwen<sup>a</sup>, WANG Lin<sup>a</sup>, FENG Chunsheng<sup>a</sup>

(a.Information and Communication Company; b.Economic and Technical Research Institute;

c.Bin Hai Power Supply Branch, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300450, China)

**Abstract:** With the increasing penetration rate of distributed power generation represented by Photovoltaic(PV) power generation, active distribution networks are facing issues such as reverse power flow and voltage violations. Due to the fact that the communication between PV inverter terminals and the central controller is an all-time, all-domain heterogeneous network, communication delays are inevitable, which can lead to degraded control performance and even system instability. To address these challenges, a control strategy for the active power of PV inverters is designed to adjust the power distribution in the distribution network and regulate node voltages. A linearized state-space model that accounts for communication delays is proposed, and a stability criterion depending on communication delays is obtained by using the Linear Matrix Inequality(LMI) method. This approach determines the delay margin to ensure the stable operation of the system. Simulation results demonstrate that the constructed state-space model and the calculated delay margin can effectively enhance the robustness of the system and are applicable to multiple PV systems in active distribution networks.

**Keywords:** distributed photovoltaic power generation; all-time and all-area heterogeneous communication network; Linear Matrix Inequality(LMI); communication delay

光伏发电(PV)作为关键的清洁可再生能源, 在过去 20 多年里经历了全球范围内的快速增长<sup>[1]</sup>。其中大量分布式光伏系统被灵活接入集成到中低压配电系统中, 导致光伏渗透率达到了前所未有的水平(已经超过 50%), 并且

收稿日期: 2024-10-14; 修回日期: 2024-08-29

引用格式: 王忠钰, 尹喜阳, 冯瑛敏, 等. 有源配电网功率控制稳定性时延裕度计算[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(7): 671-676. DOI: 10.11805/TKYDA2024557.

Citation format: WANG Zhongyu, YIN Xiyang, FENG Yingmin, et al. Calculation of time delay margin for power control stability in active distribution networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(7): 671-676. DOI: 10.11805/TKYDA 2024557.

这一趋势持续增长。含高渗透率光伏发电的配电系统若控制不当，将诱发潮流倒送、电压越限等问题。当局部时段太阳辐照度高而负载需求低时，可能发生过电压问题，使电网中某些节点处的电压可能由于反向功率流而超过可接受的上限，导致设备损坏，造成用电安全隐患。目前，通过探索 PV 逆变器真实功率控制能力，国内外部分学者开展了有功功率削减(Active Power Control, APC)方法研究以解决过电压问题，如基于下垂的有功功率削减、全局电压灵敏度矩阵方法、自适应真实的功率封顶方法以及基于共识的方法<sup>[2-4]</sup>。这些方法多数基于无通信延时的假设，即所有测量信号和控制信号是在没有通信延时的理想通信环境中获得、处理和传递的，但由于中低压配电网中的大量组件，在本地控制设备之间以及本地控制设备与中央控制器之间部署专用通信信道在经济上是不可行的。因此借助共享信道的全时全域通信系统，延时和损耗是不可避免的，这给具有高 PV 渗透率的配电网的控制带来了巨大的挑战。若能够计算全时全域异构通信网时延裕度，将有效保证有源配电网功率控制的稳定性。

本文聚焦该问题，根据有源配电网光伏逆变器有功控制策略，提出一种计及通信时延的线性化状态空间模型，并基于线性矩阵不等式(LMI)方法，获得不同系统参数下的全时全域通信网通信时延依赖稳定性准则，严格确定时延裕度，保证系统运行稳定<sup>[5-6]</sup>。仿真试验结果表明，所构建空间模型及时延裕度计算能够有效提升系统鲁棒性，并适用于有源配电网中的多光伏系统。

### 1 理想通信环境中具备功率控制能力的并网 PV 模型

新型智能光伏逆变器具有在零与最大功率点(Maximum Power Point, MPP)之间调节真实的功率并提供无功功率补偿的能力，即 PV 系统可作为可控源操作。具有电压调节真实功率控制能力的并网光伏系统如图 1 所示，由对象模型、逆变器控制器和电网电压控制器<sup>[7]</sup>3 个主要部分组成。

系统的主电源电路采用 DC/AC 逆变器，将直流转换为交流，通过逆变控制器实现真实的功率控制。逆变控制器通过生成直流母线基准电压  $U_{dc\_ref}$  调节 PV 输出电流  $i_{pv}$ ，以遵循 PV 电流基准  $i_{pv\_ref}$ 。由于没有 DC/DC 转换器，直流母线电压  $U_{dc}$  也是 PV 输出电压。直流总线电压误差信号  $U_{dc}-U_{dc\_ref}$  与 d 轴电流  $i_d$  结合，由逆变器输出真实的功率。电网电压控制器将电网电压控制误差  $U_{ref-V}$  作为输入，并生成用于控制逆变器的参考电流  $i_{pv\_ref}$ 。为方便分析原理，在该模型中使用 4 个比例积分(Proportional-Integral, PI)控制器，见图 1。PI<sub>1</sub> 用于从  $i_{pv}-i_{pv\_ref}$  产生 PV 板的参考直流电压  $U_{dc\_ref}$ ，PI<sub>2</sub> 和 PI<sub>3</sub> 是 DC/AC 逆变器控制中常用的传统控制器，PI<sub>4</sub> 从  $U_{ref}-U$  产生 PV 板的参考电流  $i_{pv\_ref}$ 。

系统的状态变量选择如下： $x_1$  为 PI<sub>1</sub> 的积分器输出； $x_2$  为 PI<sub>2</sub> 的积分器输出； $x_3$  为  $i_{d\_ref}$  的一阶响应； $x_4$  为 PI<sub>3</sub> 的积分器输出； $x_5$  为输出电流的 d 轴分量  $i_d$ ； $x_6$  为逆变器的输入电流  $i_{dc\_inv}$ ； $x_7$  为逆变器的直流侧的电压  $U_{dc}$ ， $U_{dc}=U_{pv}$ ； $x_8$  为 PI<sub>4</sub> 的积分器输出。

光伏系统的详细动态模型见图 2。4 个 PI 控制器由  $K_{pi} + \frac{K_{li}}{s}$  表示，其中  $i=1,2,3,4$ ， $s$  为拉普拉斯变换中的复频率变量。 $T_2$  为 PV 板  $U-I$  特性的线性化模型。PV 系统通常在  $U_{MPP}$  和  $U_{oc}$  之间工作，见图 3。 $U_{oc}$  为 PV 板的开路电压，是太阳辐照度、温度、面板材料、串联 PV 数量等的函数； $U_{MPP}$  为最大功率点处的电压。对于固定 PV 面板，如果太阳辐照度和温度恒定，则  $U_{oc}$  也是常数。PV 板的  $U-I$  关系可表示为：

$$i_{pv} = \frac{U_{oc} - U_{pv}}{R_{pv}} \quad (1)$$

式中： $U_{pv}=U_{dc}$ ； $R_{pv}$  为电池板的等效电

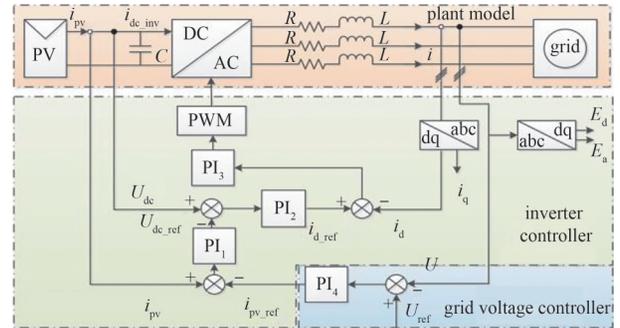


Fig.1 Schematic diagram of a grid-connected PV system  
图1 光伏并网系统示意图

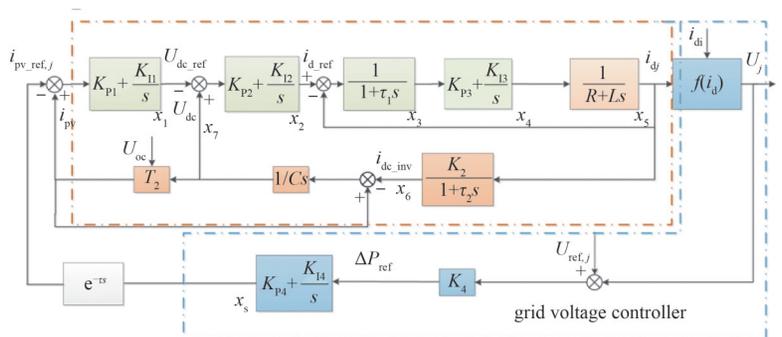


Fig.2 Model of the  $j^{\text{th}}$  grid-connected PV system  
图2 第  $j$  个并网光伏系统模型

阻, 随 PV 电压变化。为不引入大的误差, 在该模型中使用线性化的等效电阻  $R_{pv}$ 。即在计算  $R_{pv}$  时考虑直线  $AB$ , 见图 3。

$$R_{pv} = \frac{U_{ov} - U_{MPP}}{i_{MPP}} \quad (2)$$

式中  $i_{MPP}$  为 PV 工作在最大功率点对应的电流。逆变器的直流输入电流  $i_{dc\_inv}$  由逆变器输出电流决定, 最终由逆变器输出功率决定:

$$i_{dc\_inv} = i_d \times \frac{K_2}{1 + \tau_2 s} \quad (3)$$

式中:  $i_{dc\_inv}$  是逆变器的直流输入电流;  $i_d$  为逆变器输出电流的 d 轴分量;  $\tau_2$  为一阶系统的时间常数;  $K_2$  为常数, 可基于逆变器的输入功率和输出功率之间的功率平衡进行计算。

假设逆变器中没有功率损耗且 d 轴与相位  $A$  对齐, 则当没有无功功率时可建立以下功率平衡方程(即  $i_q=0, E_q=0$ ):

$$\begin{cases} U = \sqrt{E_d^2 + E_q^2} = E_d \\ U_{dc} i_{dc\_nv} = \frac{3}{2} E_d i_d \rightarrow U_{dc\_ref} i_{dc\_nv} = \frac{3}{2} E_d i_d \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $E_d$  为电网电压的 d 轴分量;  $E_q$  为电网电压的 q 轴分量。

在这种情况下,  $K_2$  为:

$$K_2 = \frac{3E_d}{2U_{dc\_ref}} \quad (5)$$

图 2 中  $f(i_d)$  块表示连接注入电流和系统总线电压的电力网络代数方程, 其中  $i_d = [i_{d1}, i_{d2}, \dots, i_{dn}]^T$ 。系统总线电压  $U_{bus}$  可根据系统阻抗矩阵  $Z_{bus}$  和注入电流源  $I_{bus}$  获得

$$U_{bus} = Z_{bus} I_{bus} \quad (6)$$

电网  $j$  母线电压为

$$U_j = \sum_{i=1}^n Z_{ji} i_{di} + \sum_{i=n+1}^N Z_{ji} i_k = \sum_{i=1}^n Z_{ji} i_{di} + U_j^0 \quad (7)$$

式中:  $i_{di}(i=1, \dots, n)$  是来自光伏源的注入电流;  $n$  为配电网中光伏的总数;  $U_j^0$  为其他发电源  $i_k$  对母线  $j$  的电压贡献, 本文中为一个常数。图 2 中  $K_4$  为一个常数系数, 将电压误差  $U_{refj} - U_j$  转换为功率变化信号来控制光伏系统。从控制的角度看,  $K_4$  可从网络的雅可比矩阵中获得。

## 2 考虑通信时延情况下基于 LMI 的 PV 系统及其控制

基于上述光伏系统功率调控动态模型, 考虑实际情况中本地控制设备与中央控制器之间测量信息和控制指令通过全时全域网络所具有的通信时延<sup>[8]</sup>, 建立所提出系统的状态空间模型。该模型由光伏子系统动力学和电网电压控制器组成:

1) 光伏子系统动力学: 子系统动力学描述了光伏系统和逆变控制器的瞬态特性。在具有通信时延的情况下,  $PV_j$  子系统动力学的状态空间为:

$$\begin{cases} \dot{x}_j(t) = A_j x_j(t) + B_j u_j(t - \tau) + H_j \sigma_j(t) \\ y_j(t) = C_j x_j(t) + D_j u_j(t - \tau) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $x_j(t)$  为第  $j$  个光伏子系统动态特性的状态变量;  $u_j$  为子系统的输入;  $\tau$  为配电网中央控制器下发指令时的通信延时;  $y_j$  为 PV 输出电流  $i_{dj}$  的 d 轴分量;  $\sigma_j$  为扰动;  $A_j$  为系统矩阵, 描述光伏子系统的状态变量随时间变化的动态特性;  $B_j$  为输入矩阵, 描述外部输入对系统状态的影响;  $C_j$  为输出矩阵;  $D_j$  为直接传递矩阵, 描述输入信号对输出的直接影响;  $H_j$  描述外部扰动对系统状态的影响。本文中扰动被表示为光伏板的开路电压(图 2 中的  $U_{oc}$ ),  $U_{oc}$  会随着太阳辐照度的变化而变化。

2) 电网电压控制器: 在具有中央控制器的配电网中, 当同一控制器发送控制信号时, 网络中的其他光伏设备可能会遇到类似的通信延时。本文使用单个延时  $e^{-\tau s}$  来近似此类场景, 因此图 2 中子系统的输入可写为  $u_j(t - \tau)$ 。电网电压控制器的状态空间为:

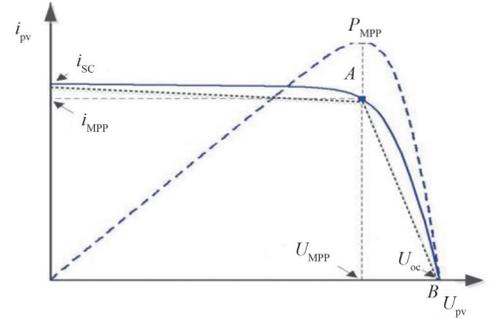


Fig.3 PV I-U curves  
图 3 光伏电流电压曲线

$$\begin{cases} \dot{z}_j(t) = A_j^F z_j(t) + B_j^F \omega_j(t) \\ u_j(t-\tau) = C_j^F z_j(t-\tau) + D_j^F \omega_j(t-\tau) \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\omega_j$ 为本地控制器的输入，等于 $(U_{\text{ref}j} - U_j)$ ； $u_j$ 为控制器的输出，即 $i_{\text{pv-ref}j}$ ，为式(8)中的输入； $A_j^F, B_j^F, C_j^F$ 和 $D_j^F$ 由式(10)求得， $F$ 是电网电压控制器模型的标识符。

$$A_j^F = [0]; \quad B_j^F = [K_4 K_{14}]; \quad C_j^F = [1]; \quad D_j^F = [K_4 K_{p4}] \quad (10)$$

将式(9)和式(7)代入式(8)，时滞系统的状态空间模型可写为：

$$\begin{cases} \dot{x}'(t) = Ax'(t) + A_d x'(t-\tau) + F\sigma'(t) \\ y'(t) = Cx'(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中：新的状态变量 $x'(t)$ 为 $x_j(t)$ 和 $z_j(t)$ 的组合； $\sigma'(t)$ 是由 $\sigma_j(t)$ 和 $U_{\text{ref}j(t)}$ 组成的新的系统扰动； $C = \text{diag}[C_1, C_2, 0, 0]$ ；

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & 0 \\ -B_1^F Z_{66} C_1 & -B_1^F Z_{67} C_2 & A_1^F & 0 \\ -B_2^F Z_{76} C_1 & -B_2^F Z_{77} C_2 & 0 & A_2^F \end{bmatrix}; \quad A_d = \begin{bmatrix} -B_1 D_1^F C_1 Z_{66} & -B_1 D_1^F C_2 Z_{67} & B_1 C_1^F & 0 & 0 \\ -B_2 D_2^F C_1 Z_{76} & -B_2 D_2^F C_2 Z_{77} & 0 & B_2 C_2^F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} H_1 & B_1 D_1^F & 0 & 0 \\ 0 & B_1^F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_2 & B_2 D_2^F \\ 0 & 0 & 0 & B_2^F \end{bmatrix}^{\circ}$$

由式(6)可知 $Z_{ij}$ ，其他符号与式(9)和式(8)类似。对于安装了 $n$ 个PV的系统，可通过相同的方法扩展状态空间模型。

### 3 PV控制系统的时不变稳定性准则

在系统模型中，扰动 $\sigma_j$ 会引起系统产生控制偏差，但在有界情况下，如噪声干扰，不会影响系统状态矩阵 $A$ 和 $A_d$ ，因此并不会影响系统的稳定性，故本文忽略其影响。式(11)可被重新表述为一个具有时滞的系统，即

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t-\tau), \tau \geq 0 \quad (12)$$

式中 $\tau$ 为时间延时。当 $\tau < \tau_d$ (延时裕度)时，系统稳定；当 $\tau > \tau_d$ 时，系统不稳定。采用线性矩阵不等式LMI方法获得不同系统参数下通信延时裕度 $\tau_d$ ：

**定理 1:** 假设 $[0, \tau_d]$ 中有一个不确定的时不变时延，即 $\tau \in [0, \tau_d]$ ，如果存在矩阵 $P > 0, Q > 0, U > 0$ 和 $W$ ，使

$$\begin{bmatrix} (1,1) & -W^T A_d & A^T A_d^T U & (1,4) \\ -A_d^T W & -Q & A_d^T A_d^T U & 0 \\ UA_d A & UA_d A_d & -U & 0 \\ (1,4)^T & 0 & 0 & -U \end{bmatrix} < 0, \quad \text{则系统是渐近稳定的。其中，}(1,1) \triangleq (A + A_d)^T P + P(A + A_d) + W^T A_d + A_d^T W + Q;$$

$(1,4) \triangleq \tau_d [W^T + P]$ 。

本文中，李雅普诺夫方程表示为：

$$U[x(t-\alpha), \alpha \in [0, \bar{h}]] = U_1 + U_2 + U_3 \quad (13)$$

式中： $U_1 \triangleq x^T(t) P x(t)$ ； $U_2 \triangleq \int_{-h}^0 \int_{t+\beta}^t x^T(\alpha) A_d^T X A_d \dot{x}(\alpha) d\alpha d\beta$ ； $U_3 \triangleq \int_{t-h}^t x^T(\alpha) Q x(\alpha) d\alpha$ 。

证明：利用系统的动态特性，并结合延迟性质：

$$x(t) - x(t-h) \equiv \int_{t-h}^t \dot{x}(\eta) d\eta \quad (14)$$

对 $U$ 取时间倒数 $\dot{U}$ 计算。结合文献[3]中的引理1对交叉项进行估计，简化 $\dot{U}_1$ 中的 $x^T(t) P x(t)$ 和积分项估计，然后结合 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 和 $\dot{U}_3$ ：

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 \leq x^T(t) \{ (A + A_d)^T P + P(A + A_d) + \bar{h}^2 (W^T + P) U^{-1} (W + P) \} x(t) + 2x^T(t) W^T A_d \int_{t-h}^t \dot{x}(\alpha) d\alpha + \\ & \dot{x}^T(t) A_d^T U A_d \dot{x}(t) + x^T(t) Q x(t) - x^T(t-h) Q x(t-h) = \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{12}^T & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-h) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

式中： $X_{11} \triangleq (A + A_d)^T P + P(A + A_d) + \bar{h}^2 (W^T + P) U^{-1} (W + P) + A^T A_d^T U B A + Q + W^T A_d + A_d^T W$ ； $X_{12} \triangleq -W^T A_d + A^T A_d^T U B B$ ； $X_{22} \triangleq -Q + A_d^T A_d^T U A_d A_d$

保证了 $\dot{U}$ 的负定性，保证了系统的渐进稳定性。

### 4 算例分析

搭建一个 6 区域, 并含 2 处分布式光伏的有源配电系统, 仿真验证所提出的全时全域异构通信网时延裕度计算方法的有效性。系统中低压馈线通过 10 kV/0.4 kV 变压器接入电网。图 4 中的每个负载代表具有不同功耗级别的单独子社区。光伏系统连接到节点 6 和 7, 为电网提供额外电力。节点 1 至 6 彼此距离较近, 采用短距离无线通信方式; 节点 7 距离较远, 通过 3.0 km 电力线连接到网络, 通信方式考虑到经济性, 采用电力线载波通信。负载的分布见图 4。太阳辐照度设置为 25 °C、1 000 W/m<sup>2</sup>, 则可通过数值计算获得网络中各节点电压分布。

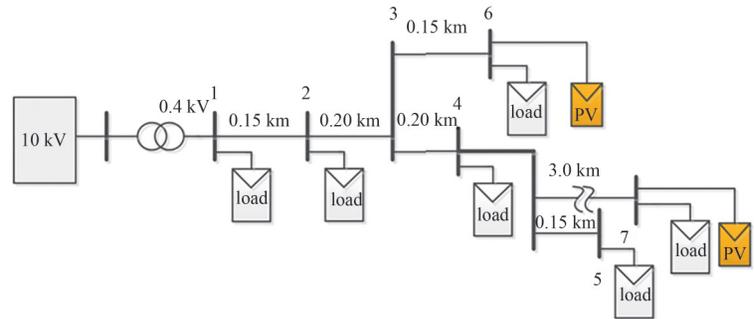


Fig.4 Testing network in six communities  
图 4 6 个小区测试网络

1) 有功功率电压调节。基于光伏有功调节能电压方法的性能见图 5。初始阶段, 由于未进行有功调节能电压, 节点 6 的电压曲线在  $t=2.1$  s 时峰值已达到 1.06 标么值(p. u.), 见蓝色实线, 严重超过了安全电压范围, 过电压将导致电气元件损坏。将本文所提出的有功功率控制方法加载于控制光伏逆变器, 效果明显, 在  $t=2.6$  s 时, 参考电压  $U_{ref}$  回落至正常 1.00 p.u.。观察功率调节曲线(图中红色曲线), 中心控制器在  $t=2.1$  s 发出指令, 节点 6 光伏输出有功功率从 287 kW 削减至 130 kW, 节点 6 电压在  $t=2.6$  s 时成功达到参考值。

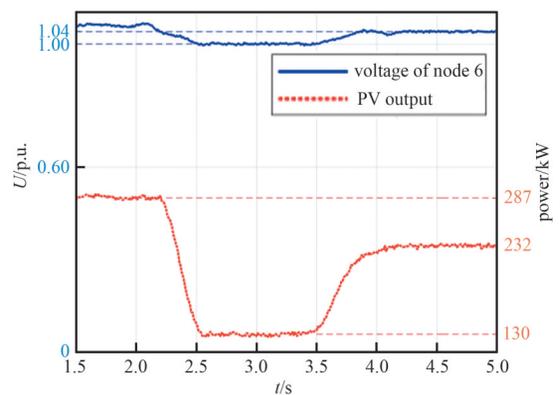


Fig.5 Voltage and PV active power output at node 6  
图 5 节点 6 的电压和光伏有功输出

2) 延时裕度稳定性准则实验。仿真实验中, 时滞相关的时不变稳定性准则可通过使用不同的控制器增益集求解式(12)中的 LMI 获得。表 1 为不同  $K_{p4}$  和  $K_{i4}$  的延时裕度。  $\tau_d$  的结果表明, 对于恒定的通信延时, 延时余量  $\tau_d$  随着  $K_{p4}$  和  $K_{i4}$  的减小而增加, 特别是当  $K_{p4}$  和  $K_{i4}$  很小时, 如,  $K_{p4}=0.010$ ,  $K_{i4}=0.50$ 。

表 1  $K_{p4}$  和  $K_{i4}$  的不同延时裕度(s)

Table1 Different delay margins for  $K_{p4}$  and  $K_{i4}$ (s)

item	$\tau_d$				
	$K_{i4}=0.50$	$K_{i4}=0.75$	$K_{i4}=1.00$	$K_{i4}=1.25$	$K_{i4}=2.00$
$K_{p4}=0.100$	0.121	0.106	0.101	0.099	0.030
$K_{p4}=0.050$	0.334	0.315	0.305	0.287	0.146
$K_{p4}=0.025$	0.681	0.670	0.652	0.447	0.374
$K_{p4}=0.010$	1.200	0.931	0.673	0.491	0.423

由表 1 可知, 当系统参数  $K_{p4}=0.05$ 、 $K_{i4}=2.00$  时, 延时裕度为 0.146 s。在实验算例系统中, 实际全时全域网络通信延时为 0.140 s, 基于仿真实验, 验证了根据线性化模型计算延时裕度的准确性。故基于本文给出的延时裕度设计的控制器能够保证系统稳定, 见图 6 绿色点划线。若不采用本文延时裕度计算方法而将其设定为 0.136 s, 则通过仿真实验可知节点 6 电压跌落, 系统失稳, 见图 6 红色点划线。因此, 本文计算获得的延时裕度可帮助设计有功控制器, 提高系统性能和稳定性。

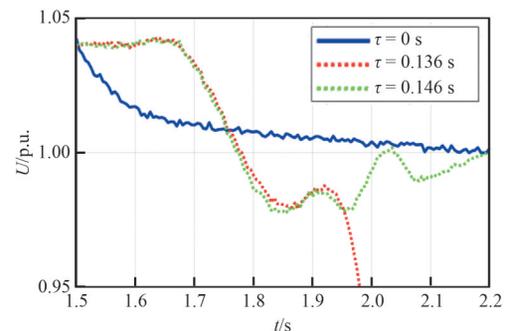


Fig.6 Voltage profile at node 6 with different communication delays  
图 6 节点 6 不同通信延时时的电压分布

### 5 结论

本文针对全时全域通信网络延时对有源配电系统功率控制稳定性影响问题, 根据光伏逆变器有功控制策略, 提出了一种计及通信时延的线性化状态空间模型; 进而采用线性矩阵不等式方法获得不同系统参数下的通信时

延依赖稳定性准则, 严格确定时延裕度, 保证系统运行稳定性。采用 6 区域 2 分布式光伏的有源配电系统进行实验, 结果表明, 所构建空间模型及时延裕度计算能有效提升系统鲁棒性, 且所计算获得的通信时延依赖稳定性准则是紧致且有效的。未来研究需考虑更多非线性因素, 如光伏系统输出功率因自然环境变化而呈现的随机性、间歇性对系统稳定性的冲击; 分布式光伏系统与有源配电网中其他设备交互作用所产生的非线性效应等, 为进一步优化光伏逆变器有功功率控制策略提供坚实基础。

#### 参考文献:

- [1] 张正言,高翔,孙耀杰,等. 局部遮挡条件下的最大功率点跟踪[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(6):759-764. (ZHANG Zhengyan,GAO Xiang,SUN Yaojie,et al. Maximum power point tracking under partially shaded isolation conditions[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(6):759-764.)
- [2] YANG Ting,LI Hao,CAI Shaotang,et al. Distributed voltage control for microgrids against time-varying communication delay interference[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024,15(3):2410-2423. DOI:10.1109/TSG.2023.3321117.
- [3] THOMSON M, INFIELD D G. Network power-flow analysis for a high penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007,22(3):1157-1162. DOI:10.1109/TPWRS.2007.901290.
- [4] LIU Jinhong, ZHOU Lin, ZHENG Chen, et al. Modeling and analysis of a digitally controlled grid-connected large-scale centralized PV system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018,33(5):4000-4014. DOI:10.1109/TPEL.2017.2712910.
- [5] GAGRICA O, NGUYEN P H, KLING W L, et al. Microinverter curtailment strategy for increasing photovoltaic penetration in low voltage networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015,6(2):369-379. DOI:10.1109/TSTE.2014.2379918.
- [6] 杨挺,秦楠,李浩,等. 计及信息不确定性的多端交直流混合配电网分布式二级协同控制[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024,57(6):602-612. (YANG Ting, QIN Nan, LI Hao, et al. Distributed secondary cooperative control of multiterminal AC/DC hybrid distribution networks considering information uncertainty[J]. Journal of Tianjin University, 2024,57(6):602-612.) DOI:10.11784/tdxbz202304018.
- [7] ALYAMI S, WANG Y, WANG C S, et al. Adaptive real power capping method for fair overvoltage regulation of distribution networks with high penetration of PV systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 5(6): 2729-2738. DOI: 10.1109/TSG.2014.2330345.
- [8] 周峰,刘珂. 基于相遇时长的时延容忍路由[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(6):1108-1113. (ZHOU Feng,LIU Ke. Contact duration-based routing in delay-tolerant networks[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(6):1108-1113.) DOI:10.11805/TKYDA2019385.

#### 作者简介:

王忠钰(1995-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力通信系统建设与运维, email:1217968131@qq.com.

张倩文(1994-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力通信系统建设.

尹喜阳(1978-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统运行规划.

王林(1991-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为电力通信.

冯瑛敏(1981-), 女, 学士, 正高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统管理.

冯春盛(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统管理.

闫龙(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力通信系统与信息系统管理.