

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.001

# 直流电压时间尺度下光伏并网控制系统稳定性分析

龚梓威<sup>1</sup>, 王海风<sup>1</sup>, 陈珏<sup>2</sup>, 杜文娟<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**随着光伏发电并网规模的扩大,由其换流器控制系统动态特性引起的小干扰稳定性问题愈加突出。而单台光伏发电单元容量较小,故并网光伏发电系统中往往包含大量光伏发电单元,系统模型阶数较高,极大地增加了稳定性分析的复杂程度。因此,为提出一种较为简单有效的稳定性判别方法,文中首先通过时间尺度分解建立并网光伏发电系统在直流电压时间尺度下的小干扰稳定分析降阶模型;随后,在该模型的基础上,由劳斯-赫尔维茨判据推导得到系统的小干扰稳定判据,并结合判据分析直流电压时间尺度下影响系统小干扰稳定性的关键因素,辨识出3个影响稳定性的不利因素:重负荷、弱连接、不恰当的控制参数设置;最后,通过仿真算例验证该稳定性判据的正确性和有效性。结果表明:所得出的稳定性判据能有效评估并网光伏发电系统在直流电压时间尺度下的小干扰稳定性,并且不需要建立复杂高阶的系统模型,极大地简化了计算和分析过程。

**关键词:**光伏并网发电系统;直流电压外环;锁相环;直流电压时间尺度;稳定性判据;小干扰稳定性

**中图分类号:** TM712

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)06-0002-12

## 0 引言

为应对能源紧缺与环境污染所带来的巨大挑战,一个以新能源发电为标志的电力系统新时代正在到来<sup>[1-2]</sup>,其中光伏发电因具有安全性高、无噪音、无污染等优点而备受青睐<sup>[3-4]</sup>。光伏发电通过电力电子装置大规模接入电网,在一定程度上改变了网内电源结构,其电力电子装置多时间尺度控制系统动态特性对电力系统动态特性的影响显著,电力系统稳定性问题变得更加复杂<sup>[5-6]</sup>,其中小干扰稳定问题愈发突出<sup>[7]</sup>。因此,研究大规模光伏接入对电力系统稳定性的影响具有重要意义。

由于大规模光伏电站动态模型的阶数较高,现有文献大多聚焦于仅包含一台或几台电压源换流器(voltage source converter, VSC)的简单并网光伏发电系统,对于大规模并网光伏发电系统的研究相对较少<sup>[8]</sup>。并网光伏发电系统对应的动态时间尺度根据控制带宽的不同可分为交流电流时间尺度和直流电压时间尺度,前者带宽通常为后者的数十倍。因此,现有研究通常将这2个时间尺度下的稳定性问题分开进行讨论<sup>[9-15]</sup>,不仅能够有效降低模型阶数,同时也便于进行机理分析。文献[9]研究了并网光伏发电系统在交流电流时间尺度下的稳定性问题,并分析了该时间尺度下导致系统振荡失稳的关键因素,指出电流控制内环与锁相环的带宽

越接近、交流电网的强度越低,电流内环控制越易失稳。文献[10-14]针对直流电压时间尺度下并网光伏发电系统的小干扰振荡稳定性问题展开研究,指出系统中的其他动态元件可能会向直流电压环节提供负阻尼,且直流电压控制环节与锁相环环节之间的动态交互作用也可能导致系统发生小干扰振荡失稳,同时指出了影响并网光伏发电系统小干扰振荡稳定性的关键因素。文献[15]提出了并网光伏发电系统的4种简化模型,并采用特征值分析法分析了系统振荡模式对其状态变量的敏感度。然而,以上研究大多是在调节某些参数的基础上分析某一数值指标的变化,缺乏对各参数之间制约关系的分析。考虑到大规模并网光伏发电系统的复杂程度,有必要提出一种直流电压时间尺度下并网光伏发电系统的等值降阶模型,给出相应的稳定性分析方法,为小干扰振荡稳定性问题提供机理解释。

因此,在现有研究的基础上,文中基于光伏发电系统的全阶模型建立并网光伏发电系统在直流电压时间尺度下的降阶简化模型;通过劳斯-赫尔维茨判据推导相应的小干扰稳定性判据,分析影响小干扰稳定性的关键因素;通过仿真验证该稳定性判据在不同情况下的有效性和正确性。

## 1 直流电压时间尺度下光伏发电系统的降阶简化模型

单级式和双级式是光伏发电单元的2种主要结构。其中,双级式光伏结构可将前后级控制分别实现,简化了各级控制器设计,且对光伏阵列输出电

收稿日期:2023-05-09;修回日期:2023-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077144)

压的等级要求较低,有利于提高系统的稳定性<sup>[16]</sup>,故文中以双级式光伏模型作为光伏并网系统中的光伏发电单元模型。此时,并网光伏发电单元主要由光伏阵列及其出口电容  $C_{pv}$ 、DC-DC 变换器及其控制系统、直流稳压电容  $C_{dc}$ 、DC-AC 变换器及其控制系统、滤波电感  $X_f$  以及外部电网组成<sup>[17]</sup>,结构如图 1 所示。其中,DC-DC 变换器实现最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制功能; $X_L$  为汇流母线与外部电网之间的输电线路电抗; $U_{pv}$  为光伏阵列输出电压; $U_{dc}$  为直流电容电压; $P_{dc}$ 、 $P_{vsc}$  分别为 DC-DC 变换器的输出功率和 DC-AC 变换器的输入功率; $P_v + jQ_v$  为 DC-AC 变换器的输出功率; $U_{vd} + jU_{vq}$ 、 $I_{vd} + jI_{vq}$  分别为  $dq$  坐标系下 DC-AC 变换器交流侧端电压和输出电流相量; $U_{pd} + jU_{pq}$  为  $dq$  坐标系下光伏并网端电压相量。

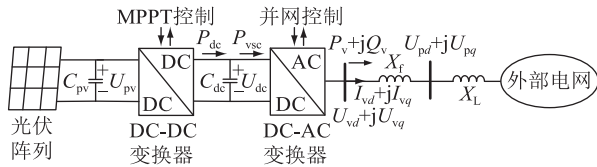


图 1 并网光伏发电单元结构

Fig.1 Structure of a grid-connected photovoltaic (PV) unit

现有研究结论表明,并网光伏发电系统的稳定性问题主要与变换器控制系统有关<sup>[18]</sup>。对于双级式光伏发电单元,其变换器控制系统包含 MPPT 控制器和并网逆变控制器,分别由图 1 中 DC-DC 变换器和 DC-AC 变换器实现 MPPT 控制以及并网逆变控制<sup>[19]</sup>。对图 1 所示系统,有:

$$C_{dc} U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_{dc} - P_{vsc} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dI_{vd}}{dt} = \frac{\omega_0}{X_f} U_{vd} - \frac{\omega_0}{X_f} U_{pd} + \omega_0 I_{vq} \\ \frac{dI_{vq}}{dt} = \frac{\omega_0}{X_f} U_{vq} - \frac{\omega_0}{X_f} U_{pq} - \omega_0 I_{vd} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\omega_0$  为稳态情况下系统的同步转速。

文中稳定性分析的重点是稳态运行情况下光伏并网系统的小干扰稳定性,且双级式光伏前后级变换器之间的大容量直流电容  $C_{dc}$  可以缓冲前后级能量的变化,在控制上起到前后级解耦的作用<sup>[16]</sup>,故文中忽略直流侧动态特性对系统稳定性的影响,认为  $P_{dc}$  为常量,  $\Delta P_{dc} = 0$ 。由图 1 可知,  $P_{vsc}$  可以表示为:

$$P_{vsc} = U_{vd} I_{vd} + U_{vq} I_{vq} = U_{pd} I_{vd} + U_{pq} I_{vq} \quad (3)$$

DC-AC 变换器控制系统主要由锁相环、电流内环控制以及直流电压外环控制组成。其中,直流电

压外环控制环节以及电流内环控制环节的控制策略<sup>[20]</sup>如图 2 所示。图 2 中脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 一般采用平均模型。

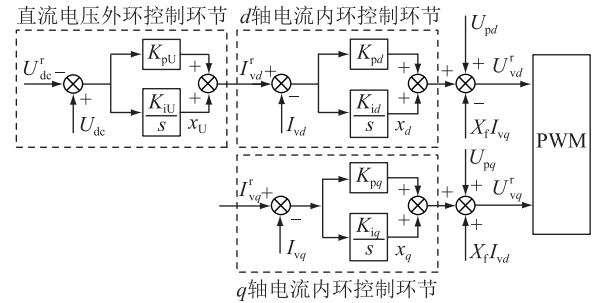


图 2 变换器控制系统结构

Fig.2 Structure of the converter control system

图 2 中,  $x_U$ 、 $x_d$ 、 $x_q$  分别为直流电压外环、 $d$  轴电流内环以及  $q$  轴电流内环中积分环节输出的状态变量;  $K_{pU}$  ( $K_{iU}$ )、 $K_{pd}$  ( $K_{id}$ )、 $K_{pq}$  ( $K_{iq}$ ) 分别为相应环节的比例(积分)控制参数;  $s$  为拉普拉斯算子;  $I_{vd}^r$ 、 $I_{vq}^r$ 、 $U_{dc}^r$  分别为  $I_{vd}$ 、 $I_{vq}$ 、 $U_{dc}$  的参考值,其中  $U_{dc}^r$ 、 $I_{vq}^r$  一般为给定值;  $U_{vd}^r$ 、 $U_{vq}^r$  分别为 DC-AC 变换器控制侧输出电压  $d$ 、 $q$  轴分量的参考值。

由图 2,有:

$$\begin{cases} \frac{dx_U}{dt} = K_{iU}(U_{dc} - U_{dc}^r) \\ \frac{dx_d}{dt} = K_{id}(I_{vd}^r - I_{vd}) \\ \frac{dx_q}{dt} = K_{iq}(I_{vq}^r - I_{vq}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} I_{vd}^r = K_{pU}(U_{dc} - U_{dc}^r) + x_U \\ U_{vd}^r = K_{pd}(I_{vd}^r - I_{vd}) + U_{pd} - X_f I_{vq} + x_d \\ U_{vq}^r = K_{pq}(I_{vq}^r - I_{vq}) + U_{pq} + X_f I_{vd} + x_q \end{cases} \quad (5)$$

变换器 PWM 采用平均模型,有:

$$\begin{cases} U_{vd}^r = U_{vd} \\ U_{vq}^r = U_{vq} \end{cases} \quad (6)$$

不考虑直流电容电压参考值以及  $q$  轴电流参考值的变化 ( $\Delta U_{dc}^r = 0$ ,  $\Delta I_{vq}^r = 0$ ), 对式(1)一式(6)线性化,有:

$$C_{dc} U_{dc0} \frac{d\Delta U_{dc}}{dt} = -\Delta P_{vsc} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{d\Delta I_{vd}}{dt} = \frac{\omega_0}{X_f} \Delta U_{vd} - \frac{\omega_0}{X_f} \Delta U_{pd} + \omega_0 \Delta I_{vq} \\ \frac{d\Delta I_{vq}}{dt} = \frac{\omega_0}{X_f} \Delta U_{vq} - \frac{\omega_0}{X_f} \Delta U_{pq} - \omega_0 \Delta I_{vd} \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta P_{vsc} = U_{pd0} \Delta I_{vd} + I_{vd0} \Delta U_{pd} + U_{pq0} \Delta I_{vq} + I_{vq0} \Delta U_{pq} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{d\Delta x_U}{dt} = K_{iU}\Delta U_{dc} \\ \frac{d\Delta x_d}{dt} = K_{id}(\Delta I_{vd}^r - \Delta I_{vd}) \\ \frac{d\Delta x_q}{dt} = -K_{iq}\Delta I_{vq} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta I_{vd}^r = K_{pU}\Delta U_{dc} + \Delta x_U \\ \Delta U_{vd}^r = K_{pd}(\Delta I_{vd}^r - \Delta I_{vd}) + \Delta U_{pq} - X_l\Delta I_{vq} + \Delta x_d \\ \Delta U_{vq}^r = -K_{pq}\Delta I_{vq} + \Delta U_{pq} + X_l\Delta I_{vd} + \Delta x_q \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta U_{vd}^r = \Delta U_{vd} \\ \Delta U_{vq}^r = \Delta U_{vq} \end{cases} \quad (12)$$

式中:下标“0”表示相应变量的稳态值。

变换器控制系统实现矢量控制需要通过锁相环确定电网  $xy$  公共坐标系与  $dq$  坐标系之间的相对位置<sup>[21]</sup>。通常情况下,将  $d$  轴的方向取为并网光伏发电系统的端口电压在公共  $xy$  坐标系中的方向。电网  $xy$  公共坐标与  $dq$  坐标相对位置关系和锁相环工作原理分别如图 3 和图 4 所示<sup>[22]</sup>。其中,  $\theta_{dq}$ 、 $\theta_{xy}$  分别为光伏并网点电压在  $dq$  坐标系下的量测相位以及在  $xy$  公共坐标系下的实际相位;  $K_{p\theta}$ 、 $K_{i\theta}$  分别为锁相环控制环节的比例和积分控制参数;  $x_\theta$  为其积分环节的输出状态变量;  $F(s)$  为低通滤波器的传递函数;  $U_0$  为稳态情况下光伏并网点电压幅值;  $U \angle \theta_{xy} = U_x + jU_y$  为  $xy$  坐标系下光伏并网点端电压相量。

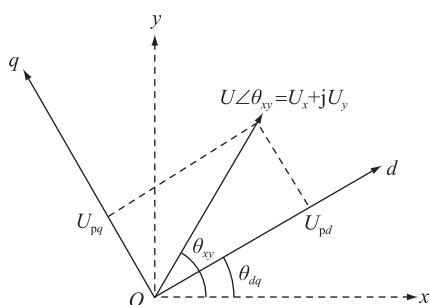


图 3 电网  $xy$  坐标与  $dq$  坐标相对位置关系  
Fig.3 Relative position of  $xy$  coordinates to  $dq$  coordinates in the grid

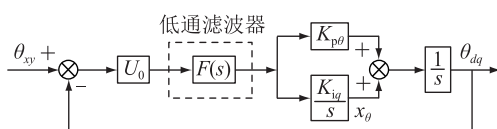


图 4 锁相环工作原理

Fig.4 Operating principle of the phase locked loop

由图 3 可知:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{dq} & -\sin \theta_{dq} \\ \sin \theta_{dq} & \cos \theta_{dq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{vd} \\ I_{vq} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_{vd} \\ I_{vq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{dq} & \sin \theta_{dq} \\ -\sin \theta_{dq} & \cos \theta_{dq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{dq} & -\sin \theta_{dq} \\ \sin \theta_{dq} & \cos \theta_{dq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{pd} \\ U_{pq} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_{pd} \\ U_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{dq} & \sin \theta_{dq} \\ -\sin \theta_{dq} & \cos \theta_{dq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} \end{cases} \quad (14)$$

$I \angle \theta_{xy} = I_x + jI_y$  为  $xy$  坐标系下光伏并网点输出电流相量。

由图 4 可得:

$$\begin{cases} \frac{dx_\theta}{dt} = K_{i\theta}U_0(\theta_{xy} - \theta_{dq}) \\ \frac{d\theta_{dq}}{dt} = K_{p\theta}U_0(\theta_{xy} - \theta_{dq}) + x_\theta \end{cases} \quad (15)$$

一般而言,DC-AC 变换器内环控制响应速度远快于外环控制的响应速度,因此,考虑系统在直流电压控制时间尺度下的稳定性问题时,可忽略内环控制的动态特性<sup>[10]</sup>,即认为:

$$\begin{cases} \Delta I_{vd}^r = \Delta I_{vd} \\ \Delta I_{vq}^r = \Delta I_{vq} \end{cases} \quad (16)$$

在这一前提下,由式(9)一式(15),可得并网光伏发电单元在直流电压时间尺度下的降阶简化模型为:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X_4}{dt} = A_4\Delta X_4 + B_4\Delta U_{xy} \\ \Delta I_{xy} = C_4\Delta X_4 \end{cases} \quad (17)$$

其中:

$$\Delta X_4 = [\Delta U_{dc} \quad \Delta x_U \quad \Delta x_\theta \quad \Delta \theta_{dq}]^T \quad (18)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} -\frac{K_{pU}U_0}{C_{dc}U_{dc0}} & -\frac{U_0}{C_{dc}U_{dc0}} & 0 & -\frac{Q_0}{C_{dc}U_{dc0}} \\ K_{iU} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_{i\theta}U_0 \\ 0 & 0 & 1 & -K_{p\theta}U_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} -\frac{I_{x0}}{C_{dc}U_{dc0}} & -\frac{I_{y0}}{C_{dc}U_{dc0}} \\ 0 & 0 \\ -\frac{K_{i\theta}U_{y0}}{U_0} & \frac{K_{i\theta}U_{x0}}{U_0} \\ -\frac{K_{p\theta}U_{y0}}{U_0} & \frac{K_{p\theta}U_{x0}}{U_0} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$C_4 = \begin{bmatrix} K_{pU} \cos \theta_{dq0} & \cos \theta_{dq0} & 0 & -I_{y0} \\ K_{pU} \sin \theta_{dq0} & \sin \theta_{dq0} & 0 & I_{x0} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\Delta U_{xy} = [\Delta U_x \quad \Delta U_y]^T \quad (22)$$

式中: $Q_0$ 为光伏发电单元并网点输出无功功率的稳态值,  $Q_0 = I_{x0}U_{y0} - I_{y0}U_{x0}$ 。

## 2 直流电压时间尺度下并网光伏发电系统的小干扰稳定性分析

图5为并网光伏发电系统的结构示意图,其结构采用文献[23]中所述的传统交流集中式系统,其中 $x_k$ 为第 $K$ 条线路的电抗。如图5所示, $N$ 个光伏发电单元分布在 $M$ 条支链上,汇集到光伏电站并网点后经过传输线路接入外部电力系统。

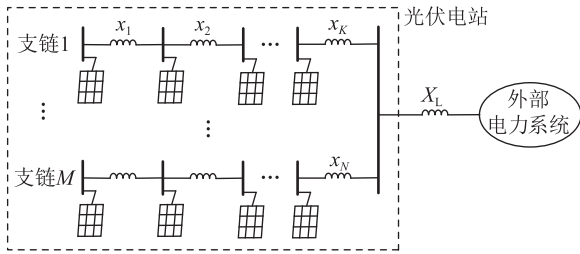


图5 并网光伏发电系统结构

Fig.5 Structure of a grid-connected PV system

由式(17)可知,第 $n$ 个光伏发电单元在直流电压时间尺度下的降阶简化模型可表示为:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X_{n4}}{dt} = A_{n4}\Delta X_{n4} + B_{n4}\Delta U_{nxy} \\ \Delta I_{nxy} = C_{n4}\Delta X_{n4} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $A_{n4}$ 、 $B_{n4}$ 、 $C_{n4}$ 、 $\Delta X_{n4}$ 分别为第 $n$ 个光伏发电单元对应降阶模型的系统矩阵、输入矩阵、输出矩阵以及状态变量列向量; $\Delta U_{nxy}$ 、 $\Delta I_{nxy}$ 分别为第 $n$ 个光伏发电单元在 $xy$ 公共坐标系下的并网点端电压以及输出电流列向量。将式(23)所描述的降阶模型记为 $(A_{n4}, B_{n4}, C_{n4})$ 。

对于图5所示并网光伏发电系统,忽略线路电阻,可得其网络电抗矩阵为:

$$X_g = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N1} & x_{N1} & \cdots & x_{NN} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中:主对角元素 $x_{nn}$ 为第 $n$ 个光伏发电单元与光伏电站并网点之间连接线路的总电抗,例如 $x_{11} = x_1 + x_2 + \cdots + x_k + X_L$ ,  $x_{NN} = x_N + X_L$ ;而非对角元素 $x_{mn}$ 则表示第 $m$ 与第 $n$ 个光伏发电单元到并网点的连接线路公共部分的电抗,例如: $x_{1k} = x_{k1} = x_k + X_L$ ,  $x_{1N} = x_{N1} = X_L$ 。并网光伏电站的网络方程<sup>[19]</sup>为:

$$\Delta U = X_G \Delta I \quad (25)$$

其中:

$$X_G = \begin{bmatrix} x_{11}P & x_{12}P & \cdots & x_{1N}P \\ x_{21}P & x_{22}P & \cdots & x_{2N}P \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{N1}P & x_{N1}P & \cdots & x_{NN}P \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$P = \begin{bmatrix} \frac{s}{\omega_0} & -1 \\ 1 & \frac{s}{\omega_0} \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中: $\Delta U$ 、 $\Delta I$ 分别为并网光伏发电系统中各光伏发电单元并网点端电压和输出电流组成的列向量。

由式(23)和式(25)可知,并网光伏发电系统在直流电压时间尺度下的线性化降阶模型为:

$$\frac{d\Delta X_F}{dt} = A_F \Delta X_F \quad (28)$$

其中:

$$\Delta X_F = [\Delta X_{14}^T \quad \Delta X_{24}^T \quad \cdots \quad \Delta X_{N4}^T]^T \quad (29)$$

$$A_F = \text{diag}[A_{n4}] + \text{diag}[B_{n4}]X_G\text{diag}[C_{n4}] \quad (30)$$

式中: $\text{diag}[A_{n4}]$ 表示对角线元素为 $A_{n4}$ 的分块对角矩阵。

不考虑并网光伏发电系统内各光伏发电单元之间动态特性的差异,认为各光伏发电单元的降阶模型均为 $(A_v, B_v, C_v)$ ,其中 $A_v$ 、 $B_v$ 和 $C_v$ 分别为模型的系统矩阵、输入矩阵以及输出矩阵,可得:

$$(A_{n4}, B_{n4}, C_{n4}) = (A_v, B_v, C_v) \quad (31)$$

记 $\xi_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为 $X_g$ 的第 $i$ 个特征值,则文献[22]中已证明式(28)所表示的降阶系统可等效为 $N$ 个彼此独立的子系统,第 $i$ 个等效子系统的线性化模型可表示为:

$$\frac{d\Delta X_{fi}}{dt} = A_{fi} \Delta X_{fi} \quad (32)$$

$$A_{fi} = \left( I_4 - \frac{1}{\omega_0} \xi_i B_v C_v \right)^{-1} (A_v + \xi_i B_v P_2 C_v) \quad (33)$$

式中: $\Delta X_{fi}$ 为第 $i$ 个等效子系统的状态变量列向量; $I_4$ 为4阶单位矩阵; $A_{fi}$ 为第 $i$ 个等效降阶子系统的系统矩阵; $P_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 。

将并网光伏电站模型等效为由式(32)所表示的 $N$ 个等效子系统后,其动态特性由这 $N$ 个等效子系统的动态特性所决定。

将式(17)、式(23)及式(31)代入式(33),同时

考虑到  $U_{p0} = U_0$ , 则可得:

$$\mathbf{A}_{fi} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} \\ a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad (34)$$

对于上述第  $n$  个降阶等效子系统而言, 其特征方程为:

$$|\lambda I - \mathbf{A}_{fi}| = k_4 \lambda^4 + k_3 \lambda^3 + k_2 \lambda^2 + k_1 \lambda + k_0 = 0 \quad (35)$$

其中特征方程各系数为:

$$k_0 = \frac{K_{i\theta n} K_{iUn} a_2}{C_{dcn} U_{dcn0} a_1} \quad (36)$$

$$k_1 = \frac{K_{pUn} K_{i\theta n} + K_{iUn} K_{p\theta n}}{C_{dcn} U_{dcn0} a_1} a_2 \quad (37)$$

$$k_2 = \frac{K_{pUn} K_{p\theta n} a_2}{C_{dcn} U_{dcn0} a_1} - \frac{K_{iUn} K_{i\theta n}}{C_{dcn} U_{dcn0} a_1} \left( \frac{P_{n0}}{\omega_0 U_{n0}} \right)^2 + \frac{1}{a_1} \left( \frac{K_{iUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} + K_{i\theta n} \right) \left( \xi_i \frac{Q_{n0}}{U_{n0}} - U_{n0} \right) \quad (38)$$

$$k_3 = \left( K_{p\theta n} + \frac{K_{pUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right) \frac{U_{n0}}{a_1} - \xi_i^2 \frac{K_{pUn} K_{i\theta n} + K_{iUn} K_{p\theta n}}{C_{dcn} U_{dcn0} a_1} \left( \frac{P_{n0}}{\omega_0 U_{n0}} \right)^2 - \frac{\xi_i}{a_1} \left[ \left( K_{i\theta n} - \frac{K_{iUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right) \frac{P_{n0}}{\omega_0 U_{n0}} + \left( \frac{K_{pUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} + K_{p\theta n} \right) \frac{Q_{n0}}{U_{n0}} \right] \quad (39)$$

$$k_4 = 1 \quad (40)$$

式中:  $U_{dcn0}$  为第  $n$  台光伏发电单元直流电容电压的参考值;  $a_1$ 、 $a_2$  为中间变量;  $P_{n0}$ 、 $Q_{n0}$  分别为第  $n$  台光伏发电单元的稳态有功和无功输出功率;  $U_{n0}$  为第  $n$  台光伏发电单元并网点稳态电压幅值。

$$a_1 = \left( 1 + \xi_i \frac{K_{pUn} P_{n0}}{\omega_0 C_{dcn} U_{dcn0} U_{n0}} \right) \left( 1 - \xi_i K_{p\theta n} \frac{P_{n0}}{\omega_0 U_{n0}} \right) \quad (41)$$

$$a_2 = \left( \xi_i \frac{Q_{n0}}{U_{n0}} - U_{n0} \right)^2 - \xi_i (\xi_i I_{n0}^2 - Q_{n0}) \quad (42)$$

根据劳斯-赫尔维茨判据, 可知该降阶等效子系统稳定的充分必要条件为:

$$\begin{cases} k_j > 0 & j = 1, 2, 3, 4 \\ k_1 k_2 - k_0 k_3 > 0 \\ k_1 k_2 k_3 - k_0 k_3^2 - k_1^2 > 0 \end{cases} \quad (43)$$

由于光伏发电单元的功率因数一般很高, 即  $Q_{n0} \approx 0$ , 将  $k_0 - k_4$  的表达式代入, 则可解得第  $n$  个降阶等效子系统保持稳定的充要条件为:

$$\xi_i \frac{P_{n0}}{U_{n0}} < 1 \text{ 且 } \xi_i \frac{P_{n0}}{U_{n0}} < J_n \quad (44)$$

其中:

$$J_n = \frac{\omega_0}{3T_3} \left( -T_2 - 2\sqrt{T_2^2 - 3T_1 T_3} \cos\left(\frac{1}{3} \arccos T_5\right) \right) \quad (45)$$

$$T_1 = K_{p\theta n}^2 \frac{K_{iUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} + K_{i\theta n}^2 - \left( \frac{K_{iUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right)^2 - K_{i\theta n} \left( \frac{K_{pUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right)^2 + \frac{2K_{i\theta n} K_{iUn} \left( K_{i\theta n} - \frac{K_{iUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right) \left( K_{p\theta n} + \frac{K_{pUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right)}{K_{i\theta n} K_{pUn} + K_{p\theta n} K_{iUn}} \quad (46)$$

$$T_2 = \frac{K_{i\theta n} K_{iUn} \left( K_{i\theta n} - \frac{K_{iUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right)^2}{K_{i\theta n} K_{pUn} + K_{p\theta n} K_{iUn}} + \omega_0^2 \times \left[ \frac{K_{i\theta n} K_{pUn} + K_{p\theta n} K_{iUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} - K_{p\theta n}^2 \frac{K_{pUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} - K_{p\theta n} \left( \frac{K_{pUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right)^2 \right] - K_{i\theta n}^2 \frac{K_{pUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} - K_{p\theta n} \left( \frac{K_{iUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right)^2 \quad (47)$$

$$T_3 = K_{i\theta n} \left( \frac{K_{iUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right)^2 + \omega_0^2 K_{i\theta n} \left( \frac{K_{pUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right)^2 - K_{i\theta n}^2 \frac{K_{iUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} - \omega_0^2 K_{p\theta n}^2 \frac{K_{iUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \quad (48)$$

$$T_4 = \frac{K_{pUn} K_{iUn}}{(C_{dcn} U_{dcn0})^2} + K_{p\theta n} K_{i\theta n} + K_{p\theta n} \left( \frac{K_{pUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right)^2 + K_{p\theta n}^2 \frac{K_{pUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} - \frac{K_{i\theta n} K_{iUn} \left( K_{p\theta n} + \frac{K_{pUn}}{C_{dcn} U_{dcn0}} \right)^2}{K_{i\theta n} K_{pUn} + K_{p\theta n} K_{iUn}} \quad (49)$$

$$T_5 = \frac{2T_2(T_2^2 - 3T_1 T_3) - 3T_3(T_1 T_2 - 9T_3 T_4)}{2\sqrt{(T_2^2 - 3T_1 T_3)^3}} \quad (50)$$

式中: 下标“ $n$ ”表示第  $n$  台光伏发电单元中相关变量的数值。

式(44)中,  $\xi_i$  为网络电抗矩阵的第  $i$  个特征值。对于式(24)所描述的网络电抗矩阵, 易知其所对应的  $N$  个特征值均为正实数, 将所有特征值中数值最大者记为  $\xi_{\max}$ , 则由式(44)可得出并网光伏发电系统在直流电压控制时间尺度下的小干扰稳定判据为:

$$\xi_{\max} < \frac{U_{n0}}{P_{n0}} \text{ 且 } \xi_{\max} < T_n \quad (51)$$

其中:

$$T_n = \frac{U_{n0}}{P_{n0}} J_n \quad (52)$$

由  $J_n$  以及各中间变量的表达式可知,  $J_n$  的数值由直流电压外环和锁相环的控制参数、直流电容及其稳态参考电压的大小所决定。因此,由式(51)可见,并网光伏发电系统在直流电压时间尺度下的小干扰稳定性由各光伏发电单元的稳态有功输出和并网点端电压、直流电压外环及锁相环的控制参数、直流稳压电容及其稳态参考电压大小以及网络拓扑等因素决定。式(51)直观地说明了并网光伏发电系统中光伏发电单元的有功输出越高、网络电抗矩阵的最大特征值越大,越不利于系统在直流电压时间尺度下的小干扰稳定性。

由上述分析可知,系统负荷增大(将导致光伏发电单元有功输出增大)、网络连接变弱(光伏电站与外部电网之间传输线路电抗增大,将导致网络电抗矩阵的最大特征值变大)均会对并网光伏发电系统的小干扰稳定性造成不利影响,严重时甚至可能导致系统失稳。此外,由式(51)所示稳定性判据可知,并网光伏发电系统在直流电压时间尺度下的小干扰稳定性与锁相环以及直流电压外环的控制参数密切相关,故若这两个环节的控制参数设置不当,也可能导致系统的稳定性变差甚至失稳。因此,通过式(51)所示小干扰稳定判据,成功辨识出3个影响并网光伏发电系统在直流电压时间尺度下的小干扰稳定性的重要不利因素:重负荷、弱连接以及不恰当的控制参数设置<sup>[24-25]</sup>。

在光伏电站的规划设计过程中,各光伏发电单元的参数详情以及负荷情况通常无法获取。因此,通常采用单级式光伏的典型模型结构、参数以及负荷情况<sup>[26]</sup>。在这种情况下,光伏电站内各光伏发电单元动态特性相似,可认为:  $(A_{n4}, B_{n4}, C_{n4}) = (A_v, B_v, C_v)$ ,  $n=1, 2, \dots, N$ 。因此,式(51)所示稳定性判据可用于检测并网光伏电站在直流电压时间尺度下由直流电压外环控制环节以及锁相环控制环节所决定的小干扰稳定性。

当各光伏发电单元在直流电压时间尺度下的降阶简化模型  $(A_{n4}, B_{n4}, C_{n4})$  存在较大差异时,假设  $\lambda_k$  是由第  $k$  个光伏发电单元所主导的不稳定振荡模式。将光伏电站内其余  $N-1$  个光伏发电单元的降阶模型均替换为第  $k$  个光伏发电单元的降阶简化模型,即:

$$(A_{n4}, B_{n4}, C_{n4}) = (A_{k4}, B_{k4}, C_{k4}) \quad n = 1, 2, \dots, N; n \neq k \quad (53)$$

在此情况下,假定  $\tilde{\lambda}_k$  为对应于  $\lambda_k$  的振荡模式。由于  $\lambda_k$  是由  $(A_{k4}, B_{k4}, C_{k4})$  主导的不稳定振荡模式,故当所有光伏发电单元的降阶模型均由  $(A_{k4}, B_{k4}, C_{k4})$  表示时,  $\tilde{\lambda}_k$  的阻尼应该不强于  $\lambda_k$ <sup>[27]</sup>。因此,  $\tilde{\lambda}_k$  也是不稳定振荡模式。而对于由式(53)表示的光伏电站而言,由于其中各光伏发电单元的动态特性相同,故可由式(51)所示的稳定性判据对其直流电压时间尺度下的小干扰稳定性进行检测,由于存在不稳定振荡模式  $\tilde{\lambda}_k$ , 故应有  $\xi_{\max} > T_k$ 。因此,在光伏电站内各光伏发电单元动态特性存在较大差异的情况下,  $\xi_{\max} > T_k$  也可用于检测光伏电站内的小干扰失稳风险。

### 3 算例分析与验证

文中采用的算例系统如图6所示,包含12台光伏发电单元的光伏电站经过电抗为  $X_L$  的传输线路接入外部电网。算例中各传输功率以及线路电抗均采用标么值。

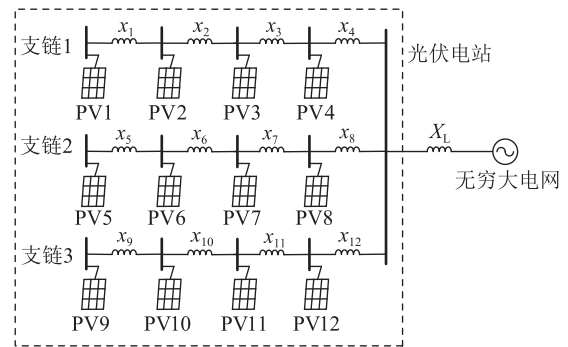


图6 并网光伏电站结构

Fig.6 Structure of a grid-connected PV plant

#### 3.1 各光伏发电单元动态特性相同情况下的算例验证

##### 3.1.1 不同参数设置情况下的稳定性判据验证

初始参数设置情况记为参数设置情况1,情况1下光伏发电单元相关控制参数设置如下:  $K_{pUn} = 0.05$ ,  $K_{iUn} = 300$ ,  $K_{p\theta n} = 0.08$ ,  $K_{i\theta n} = 200$ ,  $K_{pdn} = 1.2$ ,  $K_{idn} = 300$ ,  $K_{pqn} = 0.8$ ,  $K_{iqn} = 80$ ,  $C_{den} = 10$  p.u.;各线路电抗为:  $x_1 = 0.002$  p.u.,  $x_2 = 0.0025$  p.u.,  $x_3 = 0.0025$  p.u.,  $x_4 = 0.002$  p.u.,  $x_5 = 0.0023$  p.u.,  $x_6 = 0.0028$  p.u.,  $x_7 = 0.0023$  p.u.,  $x_8 = 0.0028$  p.u.,  $x_9 = 0.003$  p.u.,  $x_{10} = 0.0027$  p.u.,  $x_{11} = 0.0027$  p.u.,  $x_{12} = 0.003$  p.u.,  $X_L = 0.155$  p.u.;第  $n$  个光伏发电单元稳态有功输出  $P_{n0} = 0.2$  p.u.。

情况1下光伏电站内网络电抗矩阵的最大特征值  $\xi_{\max} = 1.8793$ ,系统中  $T_n$  ( $n = 1, 2, \dots, 12$ ) 的计算结果如表1所示。

表1 参数设置情况1下  $T_n$  的计算结果

Table 1 Computational results of  $T_n$  in parameter setting case 1

支链号 $r$	$T_{4(r-1)+1}$	$T_{4(r-1)+2}$	$T_{4(r-1)+3}$	$T_{4(r-1)+4}$
1	1.679 5	1.679 5	1.679 5	1.679 5
2	1.679 4	1.679 4	1.679 5	1.679 5
3	1.679 4	1.679 4	1.679 4	1.679 5

由表1可知,此时  $\xi_{\max} > T_n (n=1, 2, \dots, 12)$ , 则由稳定性判据可知此时系统不稳定。将系统中实部最大的振荡模式记为主导振荡模式  $\lambda_s$ , 由模式分析理论可知,若  $\lambda_s$  处于复平面的左半平面,则系统稳定<sup>[28]</sup>。对于参数设置情况1下的系统,经计算仿真可得  $\lambda_s = 0.169 1 + j29.971 0$ , 系统失稳,与稳定性判据的分析结果一致。

除直流电压外环控制参数外,保持系统中其余各相关控制参数不变,对参数设置情况2 ( $K_{pU_n} = 0.2, K_{iU_n} = 260$ ) 以及参数设置情况3 ( $K_{pU_n} = 0.8, K_{iU_n} = 220$ ) 下的系统进行仿真,结果如表2所示。由于各光伏发电单元动态特性相同时  $T_n$  与  $T_1$  的差值非常小,故表2中以  $T_1$  代表  $T_n$  的计算结果。

表2 参数设置情况1—3下模式分析及稳定判据结果

Table 2 Computational and stability assessment results in parameter setting case 1, 2 and 3

参数设置	$T_1$	判据结果	$\lambda_s$
情况1	1.679 5	不稳定	0.169 1±j29.971 0
情况2	1.883 2	稳定	-0.007 1±j28.209 5
情况3	2.023 4	稳定	-0.817 5±j26.233 2

由表2可知,在不同的直流电压外环控制参数设置情况下,式(51)所示判据对稳定性进行判定的结果与模式分析结果一致,验证了该判据在不同直流电压外环参数设置情况下对并网光伏电站进行直流电压时间尺度下小干扰稳定性判断的正确性。

将直流电压外环控制参数设置为  $K_{pU_n} = 0.3, K_{iU_n} = 350$ , 改变各光伏发电单元锁相环控制参数,其余参数均与情况1相同,分别对情况4 ( $K_{p\phi_n} = 0.05, K_{iU_n} = 50$ )、情况5 ( $K_{p\phi_n} = 0.3, K_{iU_n} = 100$ ) 以及情况6 ( $K_{p\phi_n} = 1.8, K_{iU_n} = 150$ ) 下的系统进行仿真,仿真结果如表3所示。

表3 参数设置情况4—6下模式分析及稳定判据结果

Table 3 Computational and stability assessment results in parameter setting case 4, 5 and 6

参数设置	$T_1$	判据结果	$\lambda_s$
情况4	1.491 8	不稳定	0.161 5±j25.651 6
情况5	2.020 1	稳定	-0.004 3±j29.401 4
情况6	2.199 9	稳定	-0.099 1±j31.028 2

由表3可知,当锁相环控制参数不同时,稳定判据结果与模式分析结果一致,验证了该判据在不同锁相环控制参数设置情况下进行小干扰稳定性判断的正确性。

为验证上述结论的正确性,对上述不同参数设置情况下的系统进行非线性仿真,结果如图7和图8所示。仿真中的扰动设置为:0.4 s时,光伏发电单元1的有功出力减少15%,并于10 ms后恢复(文中所有非线性仿真均采用该扰动设置)。

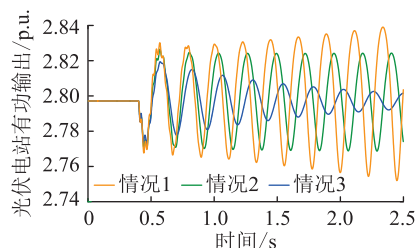


图7 直流电压外环控制参数不同时非线性仿真结果

Fig.7 Non-linear simulation results with different proportional-integral gains of the DC voltage control outer loop

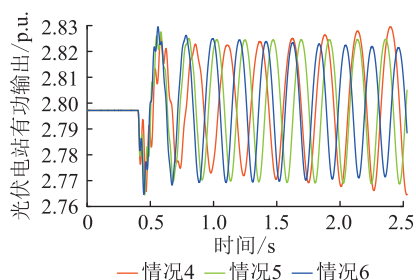


图8 锁相环控制参数不同时非线性仿真结果

Fig.8 Non-linear simulation results with different PI gains of the phase-locked loop

图7和图8所示的非线性仿真结果与模式分析结果一致,进一步验证了该稳定性判据用于不同参数设置情况下并网光伏发电系统在直流时间尺度下小干扰稳定性判断的有效性。

### 3.1.2 不同传输线路电抗下的稳定性判据验证

除传输线路电抗  $X_L$  外系统中其余参数均与情况4保持一致,则不同  $X_L$  下系统中网络电抗矩阵最大特征值  $\xi_{\max}$  以及主导振荡模式的阻尼  $\zeta_s$  的变化情况如图9所示。

由图9可见,模式分析结果与稳定性判据结果基本一致,即当  $\xi_{\max} < T_n$  时,系统稳定,而当  $\xi_{\max} > T_n$  时,主导振荡模式提供负阻尼,系统不稳定。为进一步验证上述结论,分别对  $X_L = 0.14$  p.u. 和  $X_L = 0.155$  p.u. 下的系统进行非线性仿真,结果如图10所示。由图10可知非线性仿真结果与模式分析结果一致,进一步验证了该判据对不同传输线路电抗情况下的小干扰稳定性进行判断的正确性。

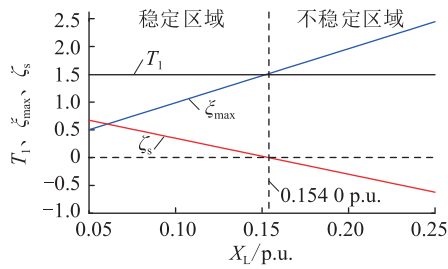


图9  $T_1$  和  $\xi_{\max}$  以及  $\zeta_s$  随  $X_L$  变化曲线

Fig.9 Curves of  $T_1$ ,  $\xi_{\max}$  and  $\zeta_s$  when  $X_L$  is different

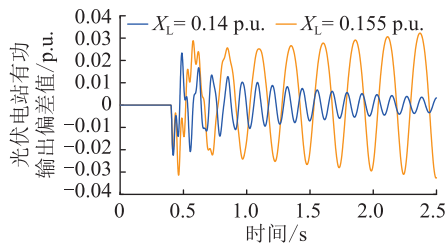


图10 不同  $X_L$  下非线性仿真结果

Fig.10 Non-linear simulation results when  $X_L$  is different

### 3.1.3 不同有功出力情况下的稳定性判据验证

除各光伏发电单元稳态有功出力  $P_{n0}$  外系统中其余参数均与情况 1 保持一致,则不同  $P_{n0}$  下  $T_1$  以及  $\zeta_s$  的变化情况如图 11 所示。

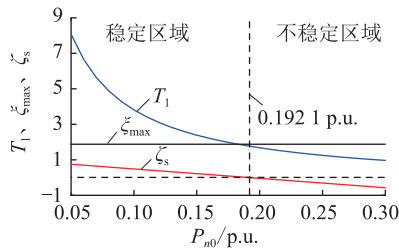


图11  $T_1$  和  $\xi_{\max}$  以及  $\zeta_s$  随  $P_{n0}$  变化曲线

Fig.11 Curves of  $T_1$ ,  $\xi_{\max}$  and  $\zeta_s$  when  $P_{n0}$  is different

由图 11 可见光伏单元出力不同的情况下模式分析的结果与稳定判据的结果基本一致。为进一步验证上述结论,分别对  $P_{n0} = 0.17$  p.u. 和  $P_{n0} = 0.2$  p.u. 两种情况下的系统进行非线性仿真,非线性仿真结果如图 12 所示。

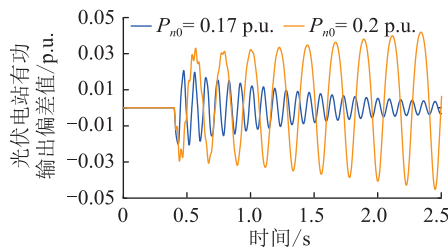


图12 不同  $P_{n0}$  下非线性仿真结果

Fig.12 Non-linear simulation results when  $P_{n0}$  is different

由图 12 可知非线性仿真结果与模式分析结果一致,进一步验证了该判据在对相应的小干扰稳定性进行判断时的正确性。

## 3.2 各光伏发电单元动态特性不同情况下的算例验证

3.1 节已经通过算例验证了式(51)所示判据在各光伏发电单元动态特性相同情况下对并网光伏发电系统进行小干扰稳定性判断的有效性。然而,在实际电力系统中,光伏电站各光伏发电单元的动态特性可能存在较大的差异<sup>[29]</sup>。下文将通过算例验证该稳定性判据在不同光伏发电单元间动态特性存在明显差异时对并网光伏发电系统进行直流电压时间尺度下小干扰稳定性判断的有效性。算例中,各支链上各光伏发电单元的动态特性保持一致,而不同支链上的发电单元其动态特性存在明显差异。

### 3.2.1 各光伏发电单元控制参数不同情况下的稳定性判据验证

对于图 6 所示算例系统,除直流电压外环及锁相环控制参数外,系统中所有参数设置均与情况 1 相同。对于直流电压外环与锁相环的控制参数,分别对场景 1(支链 1、2、3 上光伏发电单元的控制参数分别采用情况 4、5、6)以及场景 2(支链 1、2、3 上光伏发电单元的控制参数分别采用情况 2、3、6)下的系统进行仿真计算,得到系统中振荡模式的分布情况如图 13 和图 14 所示。

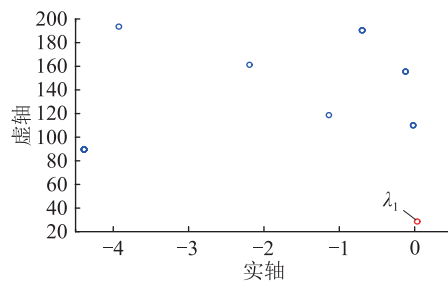


图13 场景 1 下模式计算结果

Fig.13 Results of modal computation in scenario 1

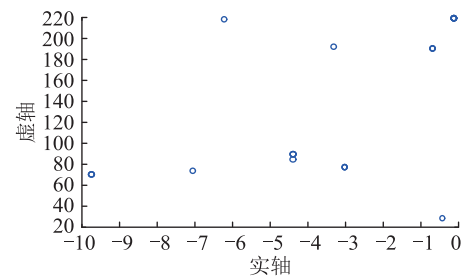


图14 场景 2 下模式计算结果

Fig.14 Results of modal computation in scenario 2



由图 13 和图 14 可知,场景 1 下系统中存在负阻尼模式,系统不稳定,而场景 2 下系统中所有振荡模式均处于复平面的左半平面,系统稳定,这与表 2 和表 3 中稳定判据结果一致。由表 2 和表 3 可知,在系统中其余参数不变的情况下,当第  $n$  台光伏发电单元的控制参数采用情况 2、3、5、6 时,其对应的计算结果  $\xi_{\max} < T_n$ ,满足式(51)所示稳定性判据,而当光伏发电单元控制参数采用情况 4 中的参数时,对应有  $\xi_{\max} > T_n$ ,不满足稳定性判据,从而可能导致系统失稳。因此,对于场景 2,由于系统中各光伏发电单元均满足  $\xi_{\max} < T_n$ ,故系统保持稳定;而对于场景 1,由于支链 1 上各光伏发电单元控制参数采取情况 4,故有  $\xi_{\max} > T_n (n = 1, 2, 3, 4)$ ,支链 1 上各光伏发电单元将引起系统失稳。

为验证上述分析,计算图 13 中主导振荡模式  $\lambda_1$  的参与因子,结果如图 15 所示。可见,  $\lambda_1$  主要由支链 1 上各光伏发电单元主导,这与采用式(51)进行判断的结果一致。图 16 为分别对场景 1 和场景 2 进行非线性仿真的结果,模式分析和非线性仿真结果均验证了式(51)所示判据在并网光伏发电系统内各光伏单元控制参数不同的情况下对小干扰稳定性进行判断的正确性。

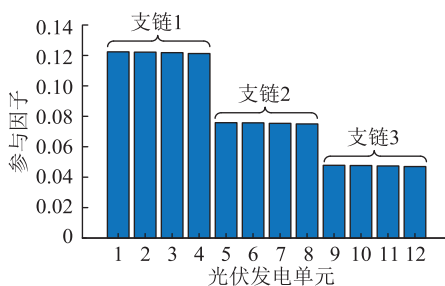


图 15 场景 1 下各光伏发电单元对  $\lambda_1$  的参与因子

Fig.15 Participation factors of each PV unit for  $\lambda_1$  in scenario 1

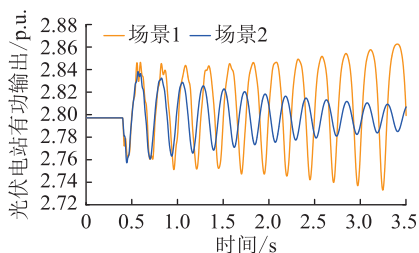


图 16 场景 1 和 2 下的非线性仿真结果

Fig.16 Non-linear simulation results in scenario 1 and 2

### 3.2.2 各光伏发电单元有功出力不同情况下的稳定性判据验证

除各光伏发电单元有功出力外,算例系统中所

有参数设置均与情况 1 相同,分别对场景 3(支链 1、2、3 上光伏发电单元的有功出力分别为 0.16、0.19、0.25 p.u.)以及场景 4(支链 1、2、3 上光伏发电单元的有功出力分别为 0.16、0.19、0.18 p.u.)下的系统进行仿真计算,得到系统中振荡模式的分布情况,分别如图 17 和图 18 所示。

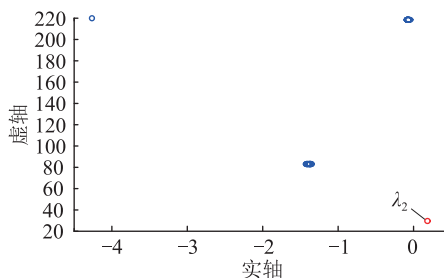


图 17 场景 3 下模式计算结果

Fig.17 Results of modal computation in scenario 3

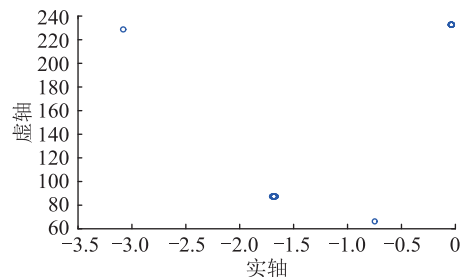


图 18 场景 4 下模式计算结果

Fig.18 Results of modal computation in scenario 4

由图 17 和图 18 可知,场景 3 下系统中存在负阻尼模式,系统不稳定,而场景 4 下系统稳定,这与图 11 中稳定判据结果一致。由图 11 可知,在其余参数不变的情况下,当第  $n$  台光伏发电单元的有功出力小于 0.1921 p.u.时,  $\xi_{\max} < T_n$ ,满足式(51)所示稳定性判据,否则对应有  $\xi_{\max} > T_n$ ,不满足稳定性判据,从而可能导致系统失稳。因此,对于场景 4,由于系统中各光伏发电单元均满足  $\xi_{\max} < T_n$ ,故系统保持稳定;而对于场景 3,由于支链 3 上各光伏发电单元有功出力  $P_{n0} = 0.25$  p.u. 故有  $\xi_{\max} > T_n (n = 9, 10, 11, 12)$ ,支链 3 上各光伏发电单元将引起系统失稳。

为验证上述分析,计算图 17 中主导振荡模式  $\lambda_2$  的参与因子,结果如图 19 所示。可见,  $\lambda_2$  主要由支链 3 上各光伏发电单元主导,这与稳定性判据的判断结果一致。图 20 为分别对场景 3 和场景 4 进行非线性仿真的结果,模式分析和非线性仿真结果均验证了式(51)所示判据在并网光伏发电系统内各光伏单元有功出力不同的情况下对小干扰稳定性进行判断的正确性。

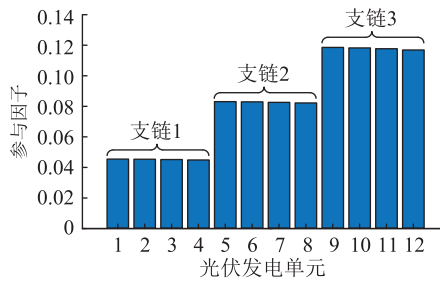
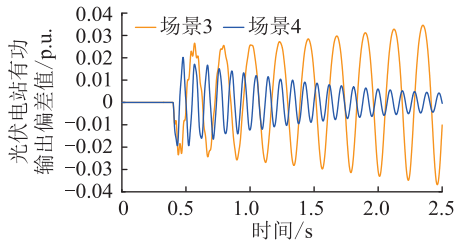
图 19 场景 3 下各光伏发电单元对  $\lambda_2$  的参与因子Fig.19 Participation factors of each PV unit for  $\lambda_2$  in scenario 3

图 20 场景 3 和 4 下的非线性仿真结果

Fig.20 Non-linear simulation results in scenario 3 and 4

## 4 结论

文中针对直流电压时间尺度下并网光伏发电系统的小干扰振荡稳定性问题,建立了综合考虑锁相环与直流电压外环控制环节影响的光伏发电单元降阶简化模型,并基于该模型将其应用推广到由大量光伏发电单元组成的并网光伏发电系统。由劳斯-赫尔维茨判据推导得到直流电压时间尺度下并网光伏发电系统的小干扰振荡稳定性判据,并通过一系列算例对该判据的正确性和有效性进行了验证。主要工作及结论如下:

(1) 推导得到含  $N$  个光伏发电单元的并网光伏发电系统在直流电压时间尺度下的小干扰振荡稳定性判据。该判据清晰地展示了由各光伏发电单元相关参数所决定的变量  $T_n$  以及由网络因素所决定的网络电抗矩阵最大特征值  $\xi_{\max}$  对并网光伏发电系统小干扰稳定性的影响:  $\xi_{\max}$  增大或  $T_n$  减小都将增大系统小干扰失稳的风险。此外,由该判据还可以看出,单组光伏发电单元的输出功率增加或者光伏电站与外部交流电网之间的传输线路增长均会对系统在直流电压时间尺度下的小干扰振荡稳定性产生不利影响。

(2) 该稳定性判据是在假定系统中各光伏发电单元动态特性相似的前提下推导得出的,然而,当光伏发电单元之间的动态特性存在明显差异时,所推导的稳定性判据仍可用于近似评估由锁相环和

直流电压外环所共同主导的并网光伏发电系统在直流电压时间尺度下的小干扰振荡稳定性。通过该稳定性判据对光伏并网系统在直流电压时间尺度下的小干扰稳定性进行判断时,不需要对系统建立状态空间模型而仅需将光伏发电单元的部分稳态运行参数以及控制参数代入进行代数计算,因而在一定程度上简化了计算过程。尤其是当系统中含有大量的光伏发电单元,且各发电单元彼此之间的动态特性差异较大时,通过该判据对小干扰稳定性进行评估相比于传统的通过状态空间模型进行特征值分析而言,极大地简化了稳定性分析的过程并且减小了计算量。

(3) 通过稳定性判据辨识出 3 个影响并网光伏发电系统在直流电压时间尺度下的小干扰稳定性的重要不利因素(重负荷、弱连接以及不恰当的控制参数设置),能够为并网光伏发电系统的实际规划与运行提供一定的指导作用。

文中针对由双级式光伏发电单元构成的并网光伏发电系统在直流电压时间尺度下的小干扰稳定性进行了剖析并推导得到相应的稳定性判据,接下来可尝试利用该思路对交流电流时间尺度下的小干扰稳定性进行分析,也可考虑对由单级式光伏发电单元组成的并网光伏发电系统进行小干扰稳定性分析。

### 参考文献:

- [1] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.  
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1):1-14.
- [2] 张思,杨晓雷,阙凌燕,等. 高比例光伏发电对浙江电网电力平衡的影响及应对策略[J]. 浙江电力,2022,41(11):9-16.  
ZHANG Si, YANG Xiaolei, QUE Lingyan, et al. The impact of high-proportion photovoltaic power generation on the power balance of Zhejiang power grid and its countermeasures [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(11):9-16.
- [3] 李英峰,张涛,张衡,等. 太阳能光伏光热高效综合利用技术[J]. 发电技术,2022,43(3):373-391.  
LI Yingfeng, ZHANG Tao, ZHANG Heng, et al. Efficient and comprehensive photovoltaic/photothermal utilization technologies for solar energy [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3):373-391.
- [4] 肖瑶,钮文泽,魏高升,等. 太阳能光伏/光热技术研究现状与发展趋势综述[J]. 发电技术,2022,43(3):392-404.  
XIAO Yao, NIU Wenzhe, WEI Gaosheng, et al. Review on research status and developing tendency of solar photovoltaic/thermal technology [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3):392-404.

- [5] 王一珺,王海风. 直流电压动态时间尺度下大规模直驱风电场振荡稳定性及参数稳定域分析[J]. 中国电机工程学报, 2021,41(S1):92-107.  
WANG Yijun, WANG Haifeng. Analysis of oscillation stability and stability region of parameters in large-scale direct-drive wind farms under DC voltage dynamic time scale[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(S1):92-107.
- [6] 王旭斌,杜文娟,王海风. 弱连接条件下并网 VSC 系统稳定性分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1593-1604, 1895.  
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(6):1593-1604, 1895.
- [7] 邓年俊. 光伏并网发电系统小信号建模与分析[J]. 电气开关, 2018,56(4):47-54, 58.  
DENG Nianjun. Small signal stability modeling and analysis of photovoltaic grid connected generation system[J]. Electric Switchgear, 2018,56(4):47-54, 58.
- [8] 韩平平,范桂军,张征凯,等. 光伏电磁暂态模型降阶综述[J]. 电网与清洁能源, 2018,34(11):59-70.  
HAN Pingping, FAN Guijun, ZHANG Zhengkai, et al. Review on the order reduction of the photovoltaic electromagnetic transient model[J]. Power System and Clean Energy, 2018,34(11):59-70.
- [9] ZHAO M Q, YUAN X M, HU J B, et al. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC-connected weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016,31(4):2925-2937.
- [10] HUANG Y H, YUAN X M, HU J B, et al. Modeling of VSC connected to weak grid for stability analysis of DC-link voltage control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015,3(4):1193-1204.
- [11] YUAN H, YUAN X M, HU J B. Modeling of grid-connected VSCs for power system small-signal stability analysis in DC-link voltage control timescale[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(5):3981-3991.
- [12] HUANG Y H, ZHAI X B, HU J B, et al. Modeling and stability analysis of VSC internal voltage in DC-link voltage control timescale[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018,6(1):16-28.
- [13] WANG D, LIANG L, SHI L, et al. Analysis of modal resonance between PLL and DC-link voltage control in weak-grid tied VSCs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(2):1127-1138.
- [14] 黄云辉,宋泽凡,唐金锐,等. 连接弱电网的并网变换器直流电压时间尺度稳定器的设计与分析[J]. 电工技术学报, 2018,33(S1):185-192.  
HUANG Yunhui, SONG Zefan, TANG Jinrui, et al. Design and analysis of DC-link voltage stabilizer for voltage source converter as connected to weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018,33(S1):185-192.
- [15] 李永刚,严风,周一辰. 基于降阶模型的光伏发电系统振荡模式分析[J]. 电测与仪表, 2020,57(13):61-68.  
LI Yonggang, YAN Feng, ZHOU Yichen. Analysis of oscillation modes based on reduced model of photovoltaic power generation system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020,57(13):61-68.
- [16] 杨丽. 双级式光伏并网变换器控制策略研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学, 2014.  
YANG Li. Research on control strategy of double-stage grid-connected photovoltaic converter[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Tehchnology, 2014.
- [17] 周一辰. 含大规模集中式光伏汇纳的电力系统小干扰稳定性分析与控制研究[D]. 北京:华北电力大学, 2018.  
ZHOU Yichen. Small signal stability analysis and control for power systems with large-scale concentrated solar photovoltaic plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [18] 任必兴,孙蓉,李强,等. 弱连接下并网 VSC 外环控制稳定性分析[J]. 高电压技术, 2022,48(2):762-771.  
REN Bixing, SUN Rong, LI Qiang, et al. Stability analysis of power control outer loop of grid-connected VSC under weak connection conditions[J]. High Voltage Engineering, 2022,48(2):762-771.
- [19] 赵德建,杨秀. 光伏并网发电系统的小信号建模与分析[J]. 上海电力学院学报, 2014,30(1):27-31, 35.  
ZHAO Dejian, YANG Xiu. Small-signal modeling and analysis of grid-connected PV generation system[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2014,30(1):27-31, 35.
- [20] 赵书强,高瑞鑫,邵冰冰,等. 多光伏发电单元并入弱交流电网系统的站内/站网次同步振荡特性分析[J]. 电力建设, 2021,42(12):49-58.  
ZHAO Shuqiang, GAO Ruixin, SHAO Bingbing, et al. Inside-plant and plant-grid sub-synchronous oscillation characteristics analysis of multiple PV generation units connected to a weak AC power grid[J]. Electric Power Construction, 2021,42(12):49-58.
- [21] 赵贵龙,曹玲玲,祝龙记. 基于光伏并网逆变系统的改进锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015,43(2):108-112.  
ZHAO Guilong, CAO Lingling, ZHU Longji. Improved PLL design of PV grid inverter system[J]. Power System Protection and Control, 2015,43(2):108-112.
- [22] DU W J, DONG W K, WANG H F. Small-signal stability limit of a grid-connected PMSG wind farm dominated by the dynamics of PLLs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020,35(3):2093-2107.
- [23] 姚美齐,蔡旭. 大型光伏电站内网拓扑结构比较分析[J]. 电网技术, 2017,41(5):1406-1411.  
YAO Meiqi, CAI Xu. Comparative analysis of different topologies for large PV plants[J]. Power System Technology, 2017,41(5):1406-1411.
- [24] DU W J, WANG Y J, WANG H F, et al. Reduced-order method for detecting the risk and tracing the sources of small-signal oscillatory instability in a power system with a large number of wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021,36

- (2):1563-1582.
- [25] 舒国栋,贺平平,马瑞. 考虑风光预测精度特性的多时间尺度机组组合方法[J]. 电力工程技术,2020,39(3):78-83.  
SHU Guodong, HE Pingping, MA Rui. Multi-time scale unit combination method considering precision characteristics of wind power and solar power forecasting[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3):78-83.
- [26] DU W J, WANG Y J, WANG Y, et al. Analytical examination of oscillatory stability of a grid-connected PMSG wind farm based on the block diagram model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6):5670-5683.
- [27] DU W J, WANG Y J, WANG H F, et al. Small-disturbance stability limit of a grid-connected wind farm with PMSGs in the timescale of DC voltage dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3):2366-2379.
- [28] 郭勇,李勇,皇甫星星,等. 两级式光伏发电系统低电压穿越控制策略研究[J]. 电力工程技术,2017,36(6):7-13.
- GUO Yong, LI Yong, HUANGFU Xingxing, et al. LVRT control strategy of two-stage PV power system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6):7-13.
- [29] 高本锋,姚磊,李忍,等. 大规模光伏电站并网的振荡模式分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):123-130.  
GAO Benfeng, YAO Lei, LI Ren, et al. Analysis on oscillation modes of large-scale grid-connected PV power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):123-130.

作者简介:



龚梓威

龚梓威(1996),男,硕士在读,研究方向为新能源电力系统稳定性分析与控制(E-mail: 1562811474@qq.com);

王海风(1960),男,博士,教授,研究方向为电力系统稳定性分析与控制等;

陈珏(1985),女,学士,工程师,从事电力系统自动化相关工作。

## Stability analysis of grid-connected photovoltaic generation control system under DC voltage timescale

GONG Ziwei<sup>1</sup>, WANG Haifeng<sup>1</sup>, CHEN Jue<sup>2</sup>, DU Wenjuan<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** With the expansion of grid-connected photovoltaic power generation, the problem of small-disturbance stability caused by the dynamic characteristics of its converter control system becomes increasingly prominent. Due to the small capacity of a single photovoltaic power generation unit, the grid-connected photovoltaic power generation system often contains a large number of photovoltaic power generation units. As a result, the model of the system is high-order. And the large number of photovoltaic power generation units greatly increases the complexity of stability analysis. Therefore, in order to propose a relatively simple and effective stability discrimination method, a reduced-order model of small-disturbance stability analysis of grid-connected photovoltaic power generation system under DC voltage control timescale through the timescale decomposition method is established in this paper. Then the small-disturbance stability criterion of the system is deduced by applying the Routh-Hurwitz criterion on the basis of this model. From the criterion, the key factors affecting the small-disturbance stability of the system under DC voltage control timescale are analyzed. The main unfavorable affecting factors are heavy loading condition, condition of weak grid connection, improper setting of parameters of converter control systems. The correctness and effectiveness of the proposed stability criterion are verified by simulation examples. The results show that the stability criterion can effectively evaluate the small-disturbance stability of the grid-connected photovoltaic power generation system under DC voltage timescale. The evaluation method does not need to establish a complex high-order model of the system, which greatly simplifies the calculation and analysis process.

**Keywords:** grid-connected photovoltaic power generation system; DC voltage outer loop; phase-locked loop; DC voltage timescale; stability criterion; small-disturbance stability

(编辑 方晶)