

# 大规模光伏电站并网的振荡模式分析

高本锋<sup>1</sup>,姚磊<sup>1</sup>,李忍<sup>1</sup>,赵书强<sup>1</sup>,杨琳<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,河北 保定 071003;

2. 华北电力大学 电气与工程学院,北京 102206)

**摘要:** 随着光伏电站容量的不断增大,其对于电网稳定性的影响也日趋明显。建立了大规模光伏电站并网系统的等值模型,采用特征值法和时域仿真验证其准确性。基于等值模型采用特征值法分析了大规模光伏电站的振荡模式,并研究了光伏逆变器的控制器参数、光伏阵列结构以及交流系统强弱对振荡模式的影响。仿真结果表明:光伏并网系统中主要包含正阻尼的次同步振荡模式和低频振荡模式,其中次同步振荡模式主要受  $q$  轴电流 PI 参数的影响,低频振荡模式主要受外环电压和  $d$  轴电流 PI 参数的影响;光伏阵列结构的变化对系统振荡模式有影响,会使系统中与直流电压相关的模式由非振荡状态变为振荡状态;交流系统变弱会导致振荡模态阻尼减弱,威胁系统的安全稳定运行。时域仿真验证了特征值分析的正确性。

**关键词:** 光伏电站;小信号模型;等值模型;振荡模式;特征值法;时域仿真;光伏阵列结构

**中图分类号:** TM 615

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.016

## 0 引言

近年来,中国光伏发电产业呈现快速发展的趋势。大力促进以光伏、风电为代表的新能源开发和利用,对于解决当前面临的能源短缺危机和环保问题具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。目前,太阳能正在实现从补充能源向替代能源的角色过渡,光伏并网发电是太阳能利用的重要形式,大规模并网光伏电站在电力系统调峰、调频和稳定控制等多个方面发挥着越来越重要的作用。

随着光伏电站装机容量的不断扩大,其对电网安全与稳定性的影响也在不断增大<sup>[5-6]</sup>。2015 年 7 月 1 日,我国新疆某地区的大型直驱风电场在附近电网无串补的情况下出现了次同步频率下的持续振荡现象<sup>[7]</sup>。由于光伏并网接口与直驱风机具有较高的一致性,且光伏逆变器与直驱风机换流器的控制策略较相似,因此并网光伏电站也有发生振荡的可能。

现有研究主要集中在容量较小的光伏发电系统,关于大规模光伏电站并网系统的振荡模式问题的研究相对较少。文献[8]分析了光伏微网孤岛运行时的多种振荡模式。文献[9-10]采用特征值法分析了光伏系统的小干扰稳定性。文献[11]提出了一种提高光伏系统稳定性的控制器参数全局优化设计方法。但文献[8-11]没有考虑大规模光伏电站及光伏阵列结构对振荡模式的影响。文献[12]借鉴复转矩系数法分析了串联补偿线路对并网光伏系统控

制策略的影响。文献[13]分析了光伏电站的接入对多机电力系统低频振荡的影响。文献[14-15]研究了光伏发电系统并网后对电力系统阻尼的影响。上述文献主要针对容量较小的光伏系统,以电网为研究对象进行分析,对于并网的大容量光伏电站自身的振荡模式及影响因素没有进行深入研究。

本文首先介绍了大规模光伏电站并网系统的实际拓扑结构,并建立其等值模型,对等值模型的外特性进行了验证。在此基础上,建立了大规模光伏电站并网系统的小信号模型,采用特征值法对系统的振荡模式进行了分析,并基于模态分析研究了逆变器控制器参数、光伏阵列结构和交流系统强弱对振荡频率和阻尼比的影响。

## 1 系统结构

### 1.1 光伏电站并网拓扑结构

大规模光伏电站并网系统的主要组成部分为:光伏阵列、光伏逆变器、分裂变压器、主升压变压器和输电线路等,其典型拓扑结构如图 1 所示。

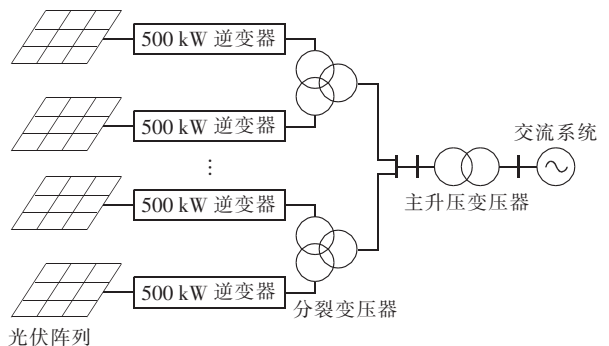


图 1 大型光伏电站并网系统拓扑结构

Fig.1 Topology of large-scale grid-connected PV power plant

收稿日期:2017-02-17;修回日期:2017-06-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507064);中央高校基本科研业务费资助项目(2015MS84)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507064) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2015MS84)

整个系统由多个容量为 1 MW 的光伏发电单元组成,其中每个发电单元由 2 组光伏阵列构成。每组光伏阵列分别通过直流侧电容连接各自的并网逆变器,然后通过 LCL 滤波器接入并网点。光伏阵列之间仅共用公共连接点,以避免各组并网逆变系统之间的环流<sup>[16-18]</sup>。

1.2 等值模型

大规模光伏电站内光伏组件、逆变器、控制器等数量较多,如果对每一个元件都准确建模,模型阶数较高,计算量较大。且对于大规模光伏电站并网问题的研究,从电网角度出发,主要侧重于光伏电站整体作为一个发电单元所表现出的外特性,而不需要体现每个发电单元的具体特性,因此有必要建立大规模光伏电站的等值模型。

鉴于目前我国大功率并网型光伏逆变器大多采用结构简单、成本低、损耗小的单级式拓扑<sup>[19]</sup>,本文建立了典型的单级式光伏电站等值模型<sup>[20]</sup>,其结构如图 2 所示。图中, $I$  为光伏电站输出电流; $i_{dk}$  为光伏逆变器输入电流; $C_{dc}$  为直流滤波电容; $U_{dc}$  为直流电容电压; $U_k$  为逆变器交流侧电压; $U_g$  为公共并网点电压, $g$  为公共并网点; $U_s$  为交流系统电压; $L_f$  为滤波电感; $R_L$  和  $X_L$  分别为输电线路和电网的等效电阻和电抗。

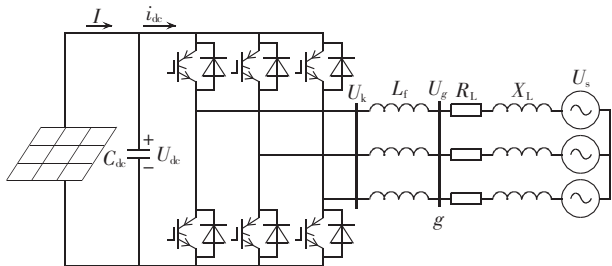


图 2 大型光伏电站并网等值模型结构图

Fig.2 Structure of equivalent model of large-scale grid-connected PV power plant

光伏电站等值模型需要满足并网点处电压、有功输出和无功输出与实际模型保持一致。根据以上原则,可得等值模型一次系统参数计算公式如下:

$$C_{dc}=nC_{dc0} \tag{1}$$

$$L_f=L_{f0}/n \tag{2}$$

$$I=nI_0 \tag{3}$$

其中, $C_{dc0}$ 、 $L_{f0}$  和  $I_0$  分别为实际模型中每个光伏阵列的直流滤波电容、滤波电感与输出电流; $C_{dc}$ 、 $L_f$  和  $I$  分别为等值模型中光伏阵列的直流滤波电容、滤波电感和输出电流; $n$  为光伏阵列的并联个数。

1.3 等值模型验证

以容量为 10 MW 的光伏电站为例,在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 上分别搭建其实际模型与等值模型。其中,实际模型由 20 个结构完全相同

的 0.5 MW 光伏阵列构成,经过 20 台逆变器并入交流系统;等值模型为 1 个 10 MW 的光伏阵列经 1 台逆变器并入交流系统。部分算例参数见表 1。

表 1 算例参数

Table 1 Example parameters

| 参数        | 参数值                    | 参数       | 参数值           |
|-----------|------------------------|----------|---------------|
| $S_B$     | 100 MV·A               | $R_L$    | 0.05 $\Omega$ |
| $U_B$     | 110 kV                 | $X_L$    | 0.5 mH        |
| $S$       | 1 000 W/m <sup>2</sup> | 串联个数     | 12            |
| $T$       | 25 $^{\circ}\text{C}$  | 并联个数     | 44 000        |
| $U_{unf}$ | 43 V                   | $k_{p1}$ | 0.75          |
| $I_{unf}$ | 4.5 A                  | $k_{i1}$ | 10            |
| $U_{cnf}$ | 54 V                   | $k_{p2}$ | 0.5           |
| $I_{cnf}$ | 4.9 A                  | $k_{i2}$ | 60            |
| $C_{dc}$  | 25 000 $\mu\text{F}$   | $k_{p3}$ | 0.5           |
| $L_f$     | 0.425 mH               | $k_{i3}$ | 60            |

通过对比实际模型与等值模型的各项输出特性,检验等值模型是否满足建模的原则,同时观察等值模型是否能够准确地反映光伏电站的输出外特性及动态响应性能,验证模型的正确性。

仿真运行 5 s 时刻,设置三相短路接地故障,故障持续时间为 0.05 s,实际模型和等值模型的启动过程与暂态故障下交流母线电压、有功和无功功率的响应特性对比如图 3 所示。

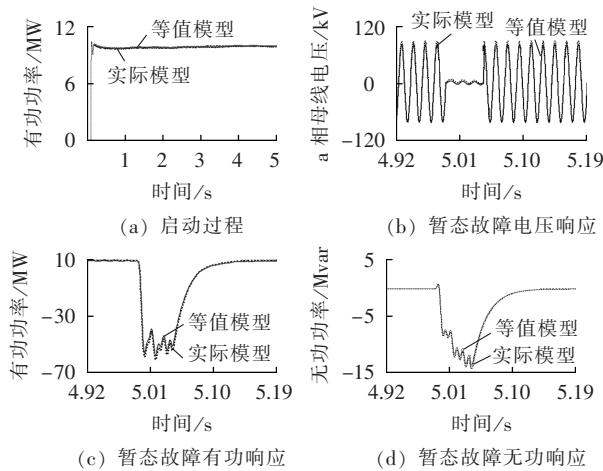


图 3 实际模型与等值模型输出特性对比

Fig.3 Comparison of output characteristics between real and equivalent models

从图 3 中可以看出,2 种模型的输出特性曲线基本一致,因此大规模光伏电站等值模型可以准确地表现实际模型的外特性。下文将基于等值模型,采用特征值法分析大规模光伏电站并网的振荡模式。

2 小信号建模

建立大规模光伏电站并网系统的小信号模型,采用特征值法研究其振荡模式与阻尼特性。小信号模型主要包括光伏电池、逆变器及其控制器、直流滤

波电容和交流系统 4 个部分。

## 2.1 光伏电池建模

本文采用光伏电池的工程模型,通过光伏电池厂家提供的标准工况下( $S_{\text{ref}}=1000 \text{ W/m}^2$ 、 $T_{\text{ref}}=25^\circ\text{C}$ )的 4 个电气参数(短路电流  $I_{\text{scref}}$ 、开路电压  $U_{\text{ocref}}$ 、最大功率点电流  $I_{\text{mref}}$ 、最大功率点电压  $U_{\text{mref}}$ )、来推导非标准状况下的  $U-I$  特性方程<sup>[21]</sup>:

$$I = I_{\text{sc}} \{ 1 - C_1 [e^{U/(C_2 U_{\text{oc}})} - 1] \} \quad (4)$$

$$\begin{cases} C_1 = (1 - I_{\text{mref}}/I_{\text{scref}}) e^{-U_{\text{mref}}/(C_2 U_{\text{ocref}})} \\ C_2 = (U_{\text{mref}}/U_{\text{ocref}} - 1) / \ln(1 - I_{\text{mref}}/I_{\text{scref}}) \end{cases} \quad (5)$$

实际光照强度和电池温度下的电气参数  $I_{\text{sc}}$ 、 $U_{\text{oc}}$ 、 $I_{\text{m}}$ 、 $U_{\text{m}}$  可以根据标准工况下的参数,由式(5)推导得出。

$$\begin{cases} T = T_{\text{air}} + kS \\ I_{\text{sc}} = I_{\text{scref}} [1 + a(T - T_{\text{ref}})] S / S_{\text{ref}} \\ U_{\text{oc}} = U_{\text{ocref}} [1 - c(T - T_{\text{ref}})] \ln[e + b(S/S_{\text{ref}} - 1)] \\ I_{\text{m}} = I_{\text{mref}} [1 + a(T - T_{\text{ref}})] S / S_{\text{ref}} \\ U_{\text{m}} = U_{\text{mref}} [1 - c(T - T_{\text{ref}})] \ln[e + b(S/S_{\text{ref}} - 1)] \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $T_{\text{air}}$  为实际空气温度;  $T_{\text{ref}}$  为空气温度参考值;  $S$  为实际光照强度;  $S_{\text{ref}}$  为光照强度参考值;  $k$  为光伏电池温度系数,其典型值为  $0.03^\circ\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ ;  $e$  为自然对数的底数,取其近似值 2.71828;  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为补偿系数,分别取值为  $0.0025/^\circ\text{C}$ 、 $0.5$ 、 $0.00288/^\circ\text{C}$ 。

## 2.2 逆变器及其控制器模型

并网型光伏逆变器结构如图 4 所示,将  $d$  轴电压定位于公共并网点电压  $U_g$  上。可得  $dq$  坐标系下的光伏逆变器数学模型:

$$\begin{cases} \frac{L_f di_{dg}}{dt} = \omega_b (u_{dk} - u_{dg} + \omega L_f i_{qg}) \\ \frac{L_f di_{qg}}{dt} = \omega_b (u_{qk} - u_{qg} - \omega L_f i_{dg}) \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\omega_b$  为电力系统角频率基准值;  $t$  为时间有名值,单位为  $s$ 。

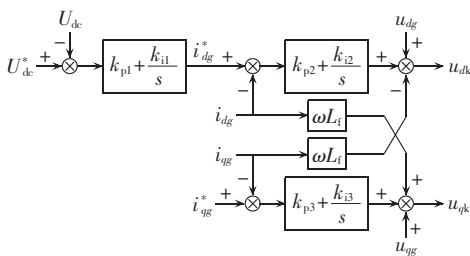


图 4 光伏逆变器控制框图

Fig.4 Block diagram of PV inverter control

三相光伏逆变器采用 PQ 解耦控制策略,电压外环与电流内环均采用比例积分(PI)控制器。当功率因数取 1 时,  $q$  轴电流  $i_{qg}$  保持为 0,此时无功功率为 0。  $d$  轴电流可以用来控制直流电压保持恒定。

逆变器的控制方程如下:

$$\begin{cases} U_{dc}^* = U_{\text{mref}} [1 - c(T - T_{\text{ref}})] \ln[e + b(S/S_{\text{ref}} - 1)] \\ dx_1/dt = U_{dc}^* - U_{dc} \\ i_{dg}^* = k_{p1}(U_{dc}^* - U_{dc}) + k_{i1}x_1 \\ dx_2/dt = i_{qg}^* - i_{qg} \\ u_{dk} = k_{p2}(i_{dg}^* - i_{dg}) + k_{i2}x_2 + u_{dg} - \omega L_f i_{qg} \\ i_{qg}^* = 0 \\ dx_3/dt = i_{qg}^* - i_{qg} \\ u_{qk} = k_{p3}(i_{qg}^* - i_{qg}) + k_{i3}x_3 + u_{qg} + \omega L_f i_{dg} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  为状态变量,均为有名值;  $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$  为外环电压 PI 控制器的比例积分系数;  $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$  和  $k_{p3}$ 、 $k_{i3}$  分别为内环  $d$ 、 $q$  轴电流 PI 控制器的比例积分系数。

## 2.3 直流滤波电容方程

由于逆变器的开关损耗较小,在建模中可以忽略,因此光伏电池组的输出功率等于逆变器输出的交流功率和直流侧电容增加功率之和。直流滤波电容的状态方程为:

$$C_{dc} dU_{dc}/dt = \omega_b (I - u_{dg} i_{dg}/U_{dc}) \quad (9)$$

## 2.4 交流系统模型

将交流系统电感归算到 L 型滤波器上,电网侧仅保留电阻特性,其电压  $U_s$  的相位为  $0^\circ$ ,则交流系统数学模型可以表示为:

$$\begin{cases} i_{dg} = U_s \sin \delta_g / R_L \\ i_{qg} = (U_s \cos \delta_g - u_{dg}) / R_L \end{cases} \quad (10)$$

## 2.5 整体线性化模型

选取状态变量和控制变量如下:

$$\Delta x_{PV} = [\Delta x_1 \ \Delta x_2 \ \Delta x_3 \ \Delta i_{dg} \ \Delta i_{qg} \ \Delta U_{dc}]^T \quad (11)$$

$$\Delta u_{PV} = \Delta S \quad (12)$$

其中,  $\Delta x_1$ 、 $\Delta x_2$ 、 $\Delta x_3$  为状态变量增量;  $\Delta i_{dg}$ 、 $\Delta i_{qg}$ 、 $\Delta U_{dc}$  和  $\Delta S$  分别为公共并网点  $d$  轴电流分量、 $q$  轴电流分量、直流电压和实际光照强度的增量。

将式(7)~(9)所描述的微分方程组在稳态值附近进行线性化,可以得到用于稳定性分析的整体线性化模型:

$$\frac{d\Delta x_{PV}}{dt} = A_{PV} \Delta x_{PV} + B_{PV} \Delta u_{PV} \quad (13)$$

## 3 振荡模式分析

### 3.1 特征值分析

对图 2 所示的等值模型,基于上述小信号模型采用特征值法分析其振荡模式,算例参数见表 1。计算系统状态矩阵的特征值、阻尼比和振荡频率,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,并网光伏系统的所有特征值都分布在复平面左侧,是小干扰稳定的。整个系统有 2 个振荡模式  $\lambda_{1,2}$ 、 $\lambda_{5,6}$  和 2 个非振荡模式  $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$ 。从振荡频率上看,模式  $\lambda_{1,2}$  的振荡频率为 0.133 Hz,阻尼比为 0.0846,属于低频振荡模式;模式  $\lambda_{5,6}$  的振荡频率

表 2 状态矩阵特征值、阻尼比和振荡频率

Table 2 State matrix eigenvalues, damping ratios and oscillation frequencies

| 振荡模式            | 特征值                  | 振荡频率/Hz | 阻尼比    |
|-----------------|----------------------|---------|--------|
| $\lambda_{1,2}$ | $-0.06 \pm j0.84$    | 0.133   | 0.0846 |
| $\lambda_3$     | -315.8               | —       | —      |
| $\lambda_4$     | -122.1               | —       | —      |
| $\lambda_{5,6}$ | $-158.35 \pm j113.7$ | 18.1    | 0.81   |

为 18.1 Hz, 阻尼比为 0.81, 属于次同步振荡模式。

因此, 大规模光伏电站并网系统受到扰动后, 存在低频振荡模式和次同步振荡模式, 但系统的阻尼较强, 振荡会快速衰减。

### 3.2 参与因子

为了研究系统状态变量和振荡模式之间的关系, 计算各振荡模式的参与因子, 并将参与因子归一化, 所得结果如图 5 所示。

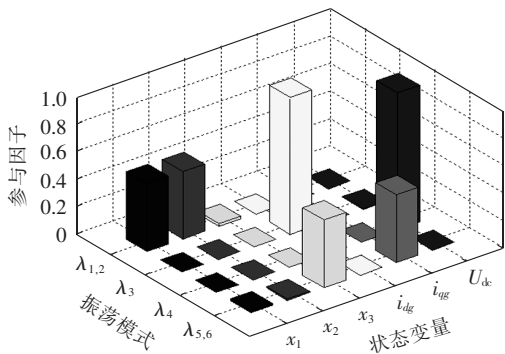


图 5 振荡模式的参与因子

Fig.5 Participating factors of oscillation modes

由图 5 可知, 低频振荡模式  $\lambda_{1,2}$  与状态变量  $x_1$  和  $x_2$  相关, 主导因素为外环电压与  $d$  轴电流, 主要受控制器参数  $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$ 、 $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$  影响; 次同步振荡模式  $\lambda_{5,6}$  与状态变量  $x_3$ 、 $i_{dq}$  相关, 主导因素为  $q$  轴电流, 主要受控制器参数  $k_{p3}$ 、 $k_{i3}$  影响; 非振荡模式  $\lambda_3$  和  $\lambda_4$  与状态变量  $i_{dq}$ 、 $U_{dk}$  相关, 主导因素为  $d$  轴电流和直流电压。总体上看, 振荡模式受控制器参数影响比较大。

## 4 振荡模式的影响因素分析

详细分析系统参数对振荡频率和阻尼特性的影响, 对于研究振荡机理、提出基于频率的抑制措施具有重要意义。下面将从控制器参数、光伏阵列结构和交流系统强弱 3 个方面分析振荡模式的变化趋势, 其中控制器参数方面重点分析  $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$  和  $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$  对低频振荡模式的影响, 以及  $k_{p3}$ 、 $k_{i3}$  对次同步振荡模式的影响。

### 4.1 控制器参数对低频振荡模式的影响

令控制器外环电压比例增益  $k_{p1}$  在  $[0.5k_{p10}, 2k_{p10}]$  ( $k_{p10}$  为  $k_{p1}$  的初始值) 范围内变化、积分增益  $k_{i1}$  在  $[0.5k_{i10}, 2k_{i10}]$  ( $k_{i10}$  为  $k_{i1}$  初始值) 范围内变化, 振荡频率和阻尼比随  $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$  的变化曲线如图 6 所示。

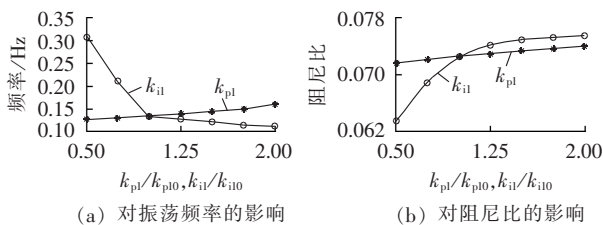


图 6 振荡频率和阻尼比随  $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$  的变化曲线

Fig.6 Curves of oscillation frequency and damping ratio vs.  $k_{p1}$  and  $k_{i1}$

由图 6 可以知道, 振荡频率随着  $k_{p1}$  的增大而增大, 随着  $k_{i1}$  的增大而减小; 阻尼比随着  $k_{p1}$  和  $k_{i1}$  的增大而增大, 但是  $k_{i1}$  的影响更大。总体上看,  $k_{i1}$  在  $[0.5k_{i10}, k_{i10}]$  范围内对振荡模式的影响较大, 在  $[k_{i10}, 2k_{i10}]$  范围内对振荡模式的影响较小。在保持系统稳定的情况下, 适当增加  $k_{p1}$  和  $k_{i1}$  可以提高低频振荡模式的阻尼。

令控制器内环电流比例增益  $k_{p2}$  在  $[0.5k_{p20}, 2k_{p20}]$  ( $k_{p20}$  为  $k_{p2}$  初始值) 范围内变化、积分增益  $k_{i2}$  在  $[0.5k_{i20}, 2k_{i20}]$  ( $k_{i20}$  为  $k_{i2}$  初始值) 范围内变化, 振荡频率和阻尼比随  $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$  的变化曲线见图 7。

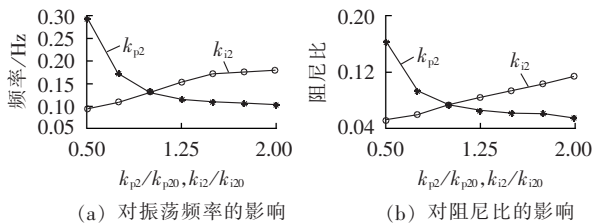


图 7 振荡频率和阻尼比随  $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$  的变化曲线

Fig.7 Curves of oscillation frequency and damping ratio vs.  $k_{p2}$  and  $k_{i2}$

由图 7 可知, 振荡频率随着  $k_{p2}$  的增大而减小, 随着  $k_{i2}$  的增大而增大; 阻尼比随着  $k_{p2}$  的增大而减小, 随着  $k_{i2}$  的增大而增大。总体上看,  $k_{p2}$  在  $[0.5k_{p20}, k_{p20}]$  范围内对振荡模式的影响比较大; 而  $k_{i2}$  对振荡频率的影响在  $[0.5k_{i20}, 1.5k_{i20}]$  范围内较大。在保持系统稳定的情况下, 适当减小  $k_{p2}$ 、增大  $k_{i2}$  可以提高低频振荡模式的阻尼。

### 4.2 控制器参数对次同步振荡模式的影响

令控制器内环电流比例增益  $k_{p3}$  在  $[0.2k_{p30}, 1.4k_{p30}]$  ( $k_{p30}$  为  $k_{p3}$  初始值) 范围内变化、积分增益  $k_{i3}$  在  $[0.2k_{i30}, 1.4k_{i30}]$  ( $k_{i30}$  为  $k_{i3}$  初始值) 范围内变化。图 8 为振荡频率和阻尼比随  $k_{p3}$ 、 $k_{i3}$  的变化曲线。

由图 8 可知, 振荡频率随着  $k_{p3}$  的增大而减小, 随着  $k_{i3}$  的增大而增大; 阻尼比随着  $k_{p3}$  的增大而增大, 随着  $k_{i3}$  的增大而减小。总体上看, 振荡频率受  $k_{p3}$  和  $k_{i3}$  的影响程度相近, 但变化趋势相反, 在 3~25 Hz 范围内波动; 阻尼比受  $k_{i3}$  的影响较小, 受  $k_{p3}$  的影响较大。在保持系统稳定的情况下, 适当增大  $k_{p3}$ 、减小  $k_{i3}$

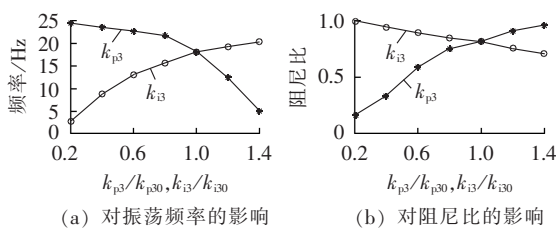


图 8 振荡频率和阻尼比随  $k_{p3}$ 、 $k_{i3}$  的变化曲线  
Fig.8 Curves of oscillation frequency and damping ratio vs.  $k_{p3}$  and  $k_{i3}$

可以提高次同步振荡模式的阻尼。

4.3 光伏阵列结构对振荡模式的影响

光伏阵列结构的变化会导致其输出电压发生改变,从而引起振荡模式的变化。研究光伏阵列在不同结构下的振荡模式,对于并网逆变器的选取具有一定的指导意义。

4.3.1 光伏阵列结构

在光伏电站中,光伏电池是最小单元,将其封装后可以得到光伏电池组件,光伏电池组件经过串并联组合形成光伏阵列,其结构如图 9 所示。

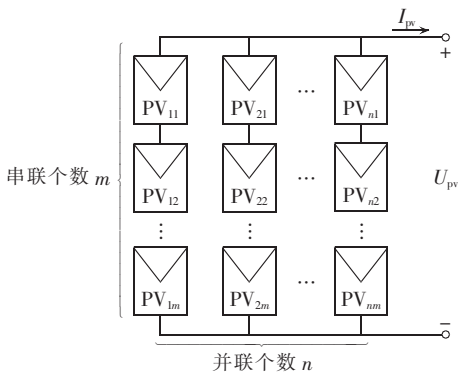


图 9 光伏阵列结构图  
Fig.9 Structural diagram of PV array

图 9 中,  $U_{pv}$  和  $I_{pv}$  分别为光伏阵列输出的电压和电流;  $m$ 、 $n$  分别为电池组件的串、并联数。设每个光伏电池组件输出的电压、电流分别为  $U$ 、 $I$ , 则光伏阵列输出的电压  $U_{pv}$ 、电流  $I_{pv}$  和功率  $P_{pv}$  分别为:

$$\begin{cases} U_{pv} = Um \\ I_{pv} = In \\ P_{pv} = U_{pv} I_{pv} \end{cases} \quad (14)$$

当光伏阵列输出功率一定时,由式(13)可知,  $m$  和  $n$  可以有多种组合方式,每种组合方式在图 9 中都对应不同的光伏阵列结构。

4.3.2 光伏阵列结构对振荡模式的影响

目前,大规模光伏电站大多采用容量为 0.5 MW 的光伏阵列,而市场上额定功率为 0.5 MW 的光伏并网逆变器有多种型号,其允许输入电压为 300~1000 V 不等,对于不同的输入电压,  $m$ 、 $n$  也有不同的取值。使光伏阵列的输出功率保持为 0.5 MW,改变光

伏阵列结构,以  $m$  作为变量,令  $m$  在 [8,22] 范围内变化,对应的  $n$ 、 $U_{pv}$  和  $I_{pv}$  的取值如表 3 所示。

表 3 光伏阵列参数  
Table 3 Parameters of PV array

| $m$ | $n$ | $U_{pv}/V$ | $I_{pv}/A$ |
|-----|-----|------------|------------|
| 8   | 323 | 344        | 1453.5     |
| 10  | 259 | 430        | 1165.5     |
| 12  | 216 | 516        | 972        |
| 14  | 185 | 602        | 832.5      |
| 16  | 162 | 688        | 729        |
| 18  | 144 | 774        | 648        |
| 20  | 130 | 860        | 585        |
| 22  | 118 | 946        | 531        |

振荡频率和阻尼比随光伏阵列结构的变化如图 10 所示。从图 10 可以看出,模式  $\lambda_{1,2}$  和模式  $\lambda_{5,6}$  的振荡频率随着  $m$  的增加先变大后减小,在  $m=16$  时达到最大值,阻尼比随着  $m$  的增加而变大。当  $m$  在 [8,14] 范围内变化时 ( $U_{pv} < 602$  V), 模式  $\lambda_{3,4}$  为非振荡模式;当  $m$  在 (14,22] 范围内变化时 ( $U_{pv} > 602$  V), 模式  $\lambda_{3,4}$  为振荡模式,振荡频率先增大后减小,在  $m=18$  时达到最大值,阻尼比先减小后增大。整体上看,光伏阵列结构对振荡模式  $\lambda_{1,2}$  和  $\lambda_{5,6}$  的影响不大,但会使  $\lambda_{3,4}$  由非振荡模式转化为振荡模式。

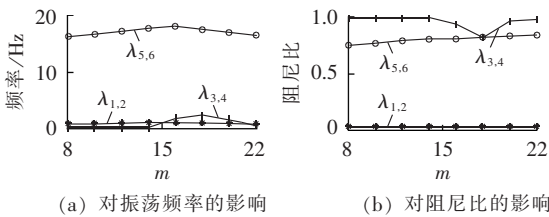


图 10 振荡频率和阻尼比随光伏阵列结构的变化曲线  
Fig.10 Curves of oscillation frequency and damping ratio vs. structure of PV array

4.3.3 参与因子分析

为研究  $\lambda_{3,4}$  与各状态变量之间的关系,找出其由非振荡模式变为振荡模式的原因,下面针对  $\lambda_{3,4}$  为振荡模式的情况,分析其参与因子。当  $m=18$  时,光伏系统状态矩阵特征值如表 4 所示。分析该工况下 3 个振荡模式的参与因子,结果如图 11 所示。

由图 11 可知,振荡模式  $\lambda_{3,4}$  主要与状态变量  $i_{dg}$  和  $U_{dc}$  相关。从机理上分析,当光伏阵列结构变化时,其输出电压  $U_{pv}$  也会发生改变,反映到逆变器中,即为直流电压  $U_{dc}$  发生变化。因此  $\lambda_{3,4}$  受直流电压的

表 4 状态矩阵特征值、阻尼比和振荡频率  
Table 4 State matrix eigenvalues, damping ratios and oscillation frequencies

| 振荡模式            | 特征值                  | 振荡频率/Hz | 阻尼比    |
|-----------------|----------------------|---------|--------|
| $\lambda_{1,2}$ | $-0.05 \pm j0.961$   | 0.153   | 0.0672 |
| $\lambda_{3,4}$ | $-32.27 \pm j15.135$ | 2.410   | 0.8197 |
| $\lambda_{5,6}$ | $-158.35 \pm j113.7$ | 17.527  | 0.8253 |

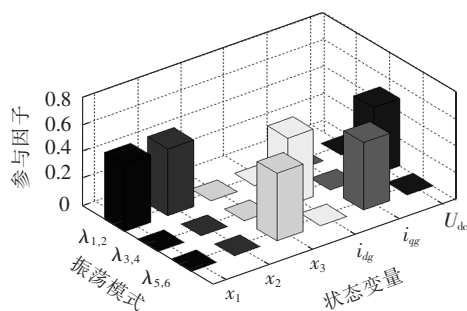


图 11  $m=18$  时各振荡模式的参与因子

Fig.11 Participating factors of oscillation modes when  $m=18$

影响较大。

为了降低振荡发生的风险,在选择光伏阵列及相应逆变器时,应该考虑阻尼较强且不会引入与直流电压相关的振荡模式的光伏阵列结构,从而增强系统稳定性。

#### 4.4 交流系统强弱对振荡模式的影响

大规模光伏电站并入电网时,光伏系统的稳定性会受到交流系统强弱的影响。以短路电流比(SCR)定义交流系统强弱,SCR 越大则交流系统越强。SCR 定义如下:

$$SCR = \frac{U_N}{\sqrt{3} |R_L + jX_L| I_N} = \frac{U_N^2}{|R_L + jX_L| S_N} \quad (15)$$

其中,  $S_N$ 、 $U_N$  分别为交流系统的额定容量和额定电压。

令 SCR 在 1.5~5 范围内变化,振荡频率和阻尼比随 SCR 变化的曲线如图 12 所示。

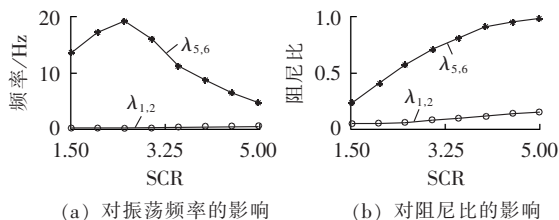


图 12 振荡频率和阻尼比随 SCR 的变化曲线

Fig.12 Curves of oscillation frequency and damping ratio vs. SCR

从图 12 中可以看出,振荡模式  $\lambda_{1,2}$  的振荡频率和阻尼比均随着 SCR 的增大而增大,但变化幅度相对较小; $\lambda_{5,6}$  的振荡频率随着 SCR 的增大先增加后减小,阻尼比随着 SCR 的增大而增大。整体上看,随着交流系统变强,光伏系统的阻尼明显增大,发生振荡的风险减小。

## 5 仿真验证

为了验证特征值分析结果的正确性,在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建 100 MW 光伏电站并网系统的电磁暂态模型,进行时域仿真。本文采用光照强度  $S$  阶跃上升作为系统扰动量,仿真设置

在 10 s 时  $S$  从  $800 \text{ W/m}^2$  跳变到  $1000 \text{ W/m}^2$ ,其他条件保持不变。

### 5.1 光伏阵列结构分析结果验证

对比光伏阵列在不同结构下受到扰动后输出的有功功率和无功功率,仿真结果如图 13 所示。

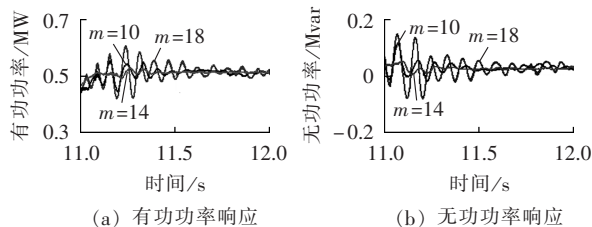


图 13 不同光伏阵列结构下的响应特性

Fig.13 Response characteristics of PV power plant for different PV array structures

由图 13 可知,  $m=18$  时,光伏阵列受到扰动后,有功和无功功率的恢复时间最长,系统的稳定性最差;  $m=14$  时,光伏阵列的有功和无功功率恢复时间最短,系统的稳定性最强。因此,  $m=18$  时系统阻尼最弱,  $m=14$  时系统阻尼最强。

当  $m=18$  时,系统有功功率的快速傅里叶变换(FFT)分析如图 14(a)所示(纵轴幅值为标幺值)。由图 14(a)可知,有功功率中除工频外还包含 1 Hz、3 Hz 和 17 Hz 分量,该结果与 4.3.2 节特征值分析结论一致。

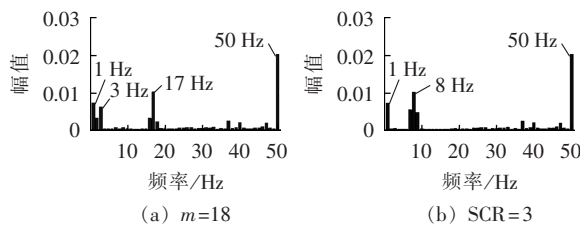


图 14 有功功率 FFT 分析

Fig.14 FFT analysis of active power

### 5.2 交流系统强弱分析结果验证

对比大规模光伏电站在不同电网强度下受到扰动后的有功、无功响应,仿真结果如图 15 所示。

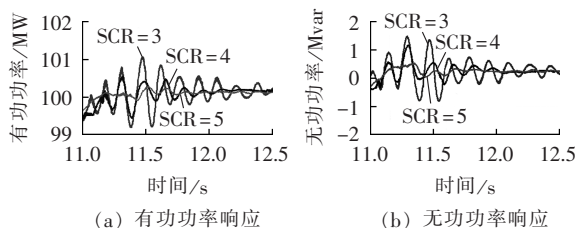


图 15 不同电网强度下光伏电站响应特性

Fig.15 Response characteristics of PV power plant for different system strengths

由图 15 可知,当光照强度变化时,随着 SCR 的减小(交流系统减弱),光伏电站受到扰动后,有功功

率和无功功率的恢复时间变长但没有发散。因此,交流系统变弱时,光伏电站提供的阻尼减小,系统的稳定性变差。

当 SCR=3 时,系统有功功率的 FFT 分析如图 14(b)所示。由图 14(b)可知,有功功率中除工频外还包含 1 Hz 和 8 Hz 分量,该结果与 4.4 节特征值分析结论一致。

## 6 结论

建立了大规模光伏电站并网系统的等值模型,采用特征值法和时域仿真分析系统振荡模式及其影响因素,主要结论如下。

a. 大规模光伏电站并网系统主要存在低频和次同步 2 种振荡模式,二者均呈现正阻尼。

b. 光伏逆变器的控制器参数对系统振荡频率和阻尼比均有较大影响,其中低频振荡模式的主要影响因素为外环电压控制器参数  $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$  和内环  $d$  轴电流控制器参数  $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$ ;次同步振荡模式的主要影响因素为内环  $q$  轴电流控制器参数  $k_{p3}$ 、 $k_{i3}$ 。适当增大  $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$ 、 $k_{i2}$ 、 $k_{p3}$ ,减小  $k_{p2}$ 、 $k_{i3}$ ,可以增强系统阻尼,提高系统的稳定性。

c. 不同结构的光伏阵列会使系统中与直流电压相关的模式由非振荡状态变为振荡状态,导致系统稳定性降低;光伏阵列结构对其他振荡模式的影响不大。

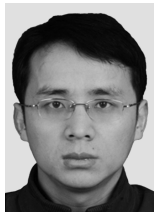
d. 交流系统强弱对大规模光伏电站的振荡频率和阻尼比影响比较显著。当交流系统变强时,振荡模式的阻尼有所提高,有利于系统的安全稳定运行。

## 参考文献:

- [1] 贡剑,常喜强,魏伟,等. 大规模光伏发电对新疆电网继电保护影响的研究[J]. 电气技术,2015,3(10):27-33.  
YUN Jian,CHANG Xiqiang,WEI Wei,et al. Study on effect of large-scale PV generation to relay protection of Xinjiang Power Grid[J]. Electrical Engineering,2015,3(10):27-33.
- [2] CARRASCO J M,FRANQUELO L G,BIALASIEWICZ J T,et al. Power electronics systems for the grid integration of renewable energy sources:a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2006,53(4):1002-1016.
- [3] BARKER P P,BING J M. Advances in solar photovoltaic technology:an applications perspective[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco,USA;IEEE,2005:1955-1960.
- [4] 陈权,李令冬,王群京,等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报,2013,28(3):241-247.  
CHEN Quan,LI Lingdong,WANG Qunjing,et al. Simulation model of photovoltaic generation grid-connected system and its impacts on voltage stability in distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(3):241-247.
- [5] 杨明,周林,张东霞,等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报,2013,28(9):214-223.  
YANG Ming,ZHOU Lin,ZHANG Dongxia,et al. Stability analysis of large-scale photovoltaic power plants for the effect of grid impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(9):214-223.
- [6] 周林,任伟,廖波,等. 并网型光伏电站无功电压控制[J]. 电工技术学报,2015,30(20):168-175.  
ZHOU Lin,REN Wei,LIAO Bo,et al. Reactive power and voltage control for grid-connected PV power plants[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(20):168-175.
- [7] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2366-2372.  
XIE Xiaorong,LIU Huakun,HE Jingbo,et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(9):2366-2372.
- [8] 杜威,姜齐荣,洪芦诚,等. 光伏微电网孤岛运行时多种振荡模式的小信号建模分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(10):17-23.  
DU Wei,JIANG Qirong,HONG Lucheng,et al. Small signal analysis of multiple oscillation modes in a photovoltaic microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(10):17-23.
- [9] HUANG Hanqi,MAO Chengxiong,LU Jiming,et al. Small-signal modeling and analysis of grid-connected photovoltaic generation systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(13):267-267.
- [10] 黄汉奇. 风力发电与光伏发电系统小干扰稳定研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.  
HUANG Hanqi. Research on small-signal stability of wind and photovoltaic power generation system[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2012.
- [11] 熊连松,刘小康,卓放,等. 光伏发电系统的小信号建模及其控制其参数的全局优化设计方法[J]. 电网技术,2014,38(5):1234-1241.  
XIONG Liansong,LIU Xiaokang,ZHUO Fang,et al. Small-signal modeling of photovoltaic power generation system and global optimal design for its controller parameters[J]. Power System Technology,2014,38(5):1234-1241.
- [12] 苗森,何维,张祥成,等. 串联补偿线路对光伏发电系统稳定性影响[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):106-113.  
MIAO Miao,HE Wei,ZHANG Xiangcheng,et al. Influence of series compensation lines on PV system stability[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):106-113.
- [13] 葛景,都洪基,赵大伟,等. 光伏电站接入对多机电力系统低频振荡的影响分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(22):63-70.  
GE Jing,DU Hongji,ZHAO Dawei,et al. Influence of grid-connected photovoltaic power plants on low frequency oscillation of multi-machine power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(22):63-70.
- [14] HUSSAIN M T,EL-AMIN I M. A PV controlled system for damping power system oscillations[C]//Innovative Smart Grid Technologies-Middle East. Jeddah,Saudi Arabia;IEEE,2012:1-5.
- [15] LI G J,RUAN S Y,CHOI S S. A photovoltaic damping system for suppressing power system oscillation[C]//IEEE International Conference on Control and Automation. Christchurch,New Zealand;IEEE,2009:1681-1686.
- [16] 郑晨,周林,解宝,等. 基于相位裕度补偿的大型光伏电站谐波谐振抑制策略[J]. 电工技术学报,2016,31(19):85-96.  
ZHENG Chen,ZHOU Lin,XIE Bao,et al. The harmonic resonance suppression strategy of large-scale photovoltaic plants based on phase margin compensation[J]. Transactions of China

- Electrotechnical Society, 2016, 31(19):85-96.
- [17] INZUNZA R, SUMIYA T, FUJII Y, et al. Parallel connection of grid-connected LCL inverters for MW-scaled photovoltaic systems [C]//Power Electronics Conference. Sapporo, Japan: IEEE, 2010: 1988-1993.
- [18] 罗宇强, 谭建成, 董国庆. 级联式光伏电站直流并网拓扑及其控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13):14-19.
- LUO Yuqiang, TAN Jiancheng, DONG Guoqing. Topology of direct-current connecting cascaded photovoltaic power station to power grid and its control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13):14-19.
- [19] 王旭阳. 大规模光伏电站建模及外特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- WANG Xuyang. Modeling of large scale photovoltaic power station and research on its external characteristics[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [20] 李春来, 王晶, 杨立滨. 典型并网光伏电站的等值建模研究及应用[J]. 电力建设, 2015, 36(8):114-121.
- LI Chunlai, WANG Jing, YANG Libin. Equivalent modeling research and application of typical grid connected photovoltaic power station[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(8):114-121.
- [21] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型[J]. 太阳能学报, 2001, 22(4):409-412.
- SU Jianhui, YU Shijie, ZHAO Wei, et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2001, 22(4):409-412.

#### 作者简介:



高本锋

高本锋(1981—), 男, 山东聊城人, 讲师, 博士, 主要研究方向为高压直流输电和电力系统次同步振荡 (E-mail: gaobenfeng@126.com);

姚磊(1992—), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统次同步振荡 (E-mail: yaolay2011@126.com);

李忍(1990—), 男, 湖北随州人, 博士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统稳定性分析与控制 (E-mail: liren9018@126.com)。

## Analysis on oscillation modes of large-scale grid-connected PV power plant

GAO Benfeng<sup>1</sup>, YAO Lei<sup>1</sup>, LI Ren<sup>1</sup>, ZHAO Shuqiang<sup>1</sup>, YANG Lin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The impact of PV(PhotoVoltaic) power plant on the stability of power system becomes more obvious along with its increasing capacity. An equivalent model of large-scale grid-connected PV power plant is established and its accuracy is verified by the eigenvalue method and time-domain simulation. Based on the equivalent model, the eigenvalue method is applied to analyze the oscillation modes of large-scale PV power plant and the influences of PV inverter controller parameters, PV array configuration and AC system strength on the oscillation modes are also researched. Simulative results show that, the grid-connected PV system mainly contains the positive-damping sub-synchronous oscillation mode and the low-frequency oscillation mode, the former is mainly affected by the PI parameters of  $q$ -axis current and the latter by the PI parameters of outer loop voltage and  $d$ -axis current; the change of PV array configuration may convert the nonoscillating state of DC-voltage-related system mode into the oscillating state; the weakened AC system may reduce the damping of oscillation modes, threatening the safe and stable system operation. Time-domain simulation verifies the correctness of eigenvalue analysis.

**Key words:** photovoltaic power plant; small-signal model; equivalent models; oscillation modes; eigenvalue method; time-domain simulation; photovoltaic array configuration