

光伏并网发电机组惯量阻尼控制方法研究

杨雨涵

(西安科技大学 电气工程工学院, 西安 710000)

摘要: 光伏并网发电机组惯量阻尼控制性能过差会增加系统输出功率振荡幅值, 降低系统工作效率, 为了提高系统稳定性和振动应力抵抗性, 提出光伏并网发电机组惯量阻尼控制方法研究的方法; 分析光伏并网发电机组机械结构, 确定影响机组惯量阻尼的干扰因素, 分析光伏并网发电机组暂态特性, 构建光伏并网发电模型; 将 VSG 本体算法指导的惯量阻尼控制过程作为模型核心算法, VSG 控制策略的基本原理作为模型框架, 组建基于 VSG 的惯量阻尼控制模型, 将虚拟惯量和虚拟阻抗分别与二阶、三阶、五阶模型结合, 根据模型输出结果, 不断平衡机组间的稳定性和振动应力抵抗性, 实现光伏并网发电机组惯量阻尼控制。实验结果表明, 在惯量阻尼控制性能测试中, 所提方法控制光伏并网发电机组, 在充电状态和放电状态下始终无视 K_p 和 D_p 干扰, 将输出功率维持在最小振荡幅值; 在同步性测试中, 所提方法在 K_p 和 D_p 突变的第一时间控制机组惯量阻尼, 维持功率振幅, 完成光伏并网发电机组惯量阻尼控制, 且控制性能好、同步性能好; 表明所提方法能够应用在光伏并网发电机组惯性阻尼控制上。

关键词: 光伏并网发电机组; 惯量; 阻尼; VSG; 控制模型

Research on Inertia Damping Control Method of Photovoltaic Grid-connected Generator Sets

YANG Yuhuan

(College of Electrical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: The poor inertia damping control performance of photovoltaic grid-connected generator sets will increase the amplitude of the system output power oscillation and reduce the efficiency of the system. An inertia damping control method of photovoltaic grid-connected generator sets is proposed to improve the stability and vibration stress resistance of the system, analyze the mechanical structure of the photovoltaic grid-connected power generation sets, determine the interference factors that affect the inertia damping of the sets, analyze the transient characteristics of the photovoltaic grid-connected power generation sets, and build the photovoltaic grid-connected power generation model. The inertia damping control process guided by a VSG ontology algorithm is taken as the core algorithm of the model, and the basic principle of VSG control strategy as the model framework. The inertia damping control model based on the VSG is established. The virtual inertia and virtual impedance are combined with the second-order, third-order and fifth-order models respectively. According to the output results of the model, the stability and vibration stress resistance between the sets are constantly balanced to achieve the inertia damping control of the photovoltaic grid-connected power generation sets. Through the inertia damping control performance test, the experimental results show that the proposed method has no effect on the parameters of K_p and D_p at all times in the charging and discharging states, and the output power of the photovoltaic grid-connected generator sets is maintained at the minimum oscillation amplitude; In the synchronization test, the proposed method controls the inertia damping of the sets at K_p and D_p mutation firstly, maintains the power amplitude, and completes the inertia damping control of the photovoltaic grid-connected generator sets with good control performance and synchronization performance. It is shown that the proposed method can be applied to the inertial damping control of photovoltaic grid-connected generator sets.

Keywords: photovoltaic grid-connected generator sets; inertia; damping; VSG; control model

0 引言

光伏并网发电机组是由分布式电源和电力电子化系统共同组成的大规模电网发电系统^[1], 通过利用光伏阵列装置, 将接收到的太阳能的辐射转换为高电压的直流电。通过逆变器进行反向转换, 将与电压同频同相的正弦型交流电流输入到电力系统中。因具备较为优越的有功备用能力,

常作为可再生能源的接入电网, 被广泛应用于航空航天、医疗卫生、机械制造、煤矿挖掘等多种领域。然而即便是机电发展尤为迅速的现代社会, 光伏并网发电机组仍存在不容忽视的内部缺陷, 即机组惯量阻尼极易受到干扰因素的影响, 出现作用规律不稳定等问题。为了提高光伏并网发电机组的工作效率, 相关人员投入到机组惯量阻尼控制

收稿日期: 2023-01-30; 修回日期: 2023-02-08。

作者简介: 杨雨涵(2002-), 女, 山东泰安人, 大学本科生, 主要从事电气工程及其自动化方向的研究。

引用格式: 杨雨涵. 光伏并网发电机组惯量阻尼控制方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 149-155.

方法的研究之中。

例如,申志鹏^[2]等人提出基于柔性直流输电系统的双边惯量和阻尼模拟控制方案,通过两端互联交流电网推导发电系统双边惯量和阻尼系数,并将推导值作为建模依据,参考 BIDE 控制方案建立基于光伏并网发电机组的三相接地线路控制模型,实现光伏并网发电机组惯量阻尼控制,该方法存在控制性能较差的问题。岳家辉^[3]等人提出基于自适应惯量阻尼的双馈风电机组虚拟同步控制策略,通过模拟有功功率突变条件下虚拟电流闭环的二阶信号,获取有功功率变化阈值内的转动惯量和阻尼系数。通过制定系统输入量,并沿输入轨迹交错控制电机恒参数,实现光伏并网发电机组惯量阻尼控制。孙宇新^[4]等人提出基于虚拟同步发电机的惯量和阻尼自适应控制,通过将微电网与协同控制模型结合,获取自适应虚拟惯量和阻尼系数的协同控制策略,实现光伏并网发电机组惯量阻尼控制。上述两种方法虽然实现了光伏并网发电机组惯量阻尼控制,但是却存在光伏并网发电机组同步性能较差的问题。

为了解决上述方法中存在的问题,提出了光伏并网发电机组惯量阻尼控制方法研究的方法,重点与难点在于基于 VSG 的惯量阻尼控制模型,将惯量阻尼控制过程作为核心算法,将转动惯量和阻尼系数视为光伏系统的控制变量,匹配低频惯性效应和低频阻尼效应,调节稳定性和振动应力抵抗性。实验结果显示,在惯量阻尼控制性能测试中,所提方法控制光伏并网发电机组,在充电状态和放电状态下,能够不受 K_p 和 D_p 干扰,其输出功率的振动幅度较小;在同步性测试中,所提方法能够在 K_p 和 D_p 突变的第一时间,控制机组惯量阻尼,并且能够维持功率振幅。表明所提方法的控制性能好、同步性能好。

1 稳定性和振动应力抵抗性平衡控制

光伏发电技术作为 21 世纪应用价值最高的发电技术之一,已成为现代社会的重点发展项目,被记录在《国家能源发展规划》当中。想要控制光伏并网发电机组惯量阻尼,需要优先分析影响机组惯量阻尼的干扰因素,并以此为基础,建立基于光伏并网发电机组的平衡控制模型,以此实现光伏并网发电机组惯量阻尼的自动化控制。

1.1 光伏并网发电机组暂态特性分析

从宏观视角来看,光伏并网发电机组是由光伏组件、前级 Boost 变换器和后级逆变器共同组成的光伏高比例发电系统。相较于传统的静止式发电机,光伏并网发电机组在暂态电压的调度方面和一次能源的蓄电强度方面均具有独特的优势。光伏组件负责叠加系统光伏渗透率,以维持接入电力系统直流母线电压的稳定^[5-6]。通常情况下,一次能源注入过程需要同时测量接入电力系统低压侧和高压侧直流母线的电容值,以保证系统恒定功率与无穷大电网之间的等效电压和等效电流始终不超过电池储能与机械能转换途中产生的额定电压和额定电流。

前级 Boost 变换器负责接收光伏组件释放的电压指令和电流指令,其具有较小的射频干扰和较低噪声的优点。由

于光伏组件缺乏电力元件,无法将叠加成功的光伏渗透率并行投射至系统全层^[7],因此需要以指令的形式提高前级 Boost 变换器电压和电流,以达到系统全层并网的目的。后级逆变器近似一个频率下垂环,主要负责响应系统动态运行途中的电阻和电感,以及时诊断系统电源侧及负荷侧的扰动因素,维持系统正常状态^[8]。光伏渗透率叠加公式如下:

$$G = \frac{a\Delta t}{q + \theta_i} \quad (1)$$

式中, a 为系统稳态运行时的功角; Δt 为直流电压时间尺度; q 为并网变换器的励磁电势幅值; θ_i 为出口电压的基波分量。

直流母线电容值计算公式如下:

$$L = -\Delta\omega \left(\frac{1}{2} p_i p_j \right)^2 \quad (2)$$

式中, $\Delta\omega$ 为直流电容参考电压; p_i 为并网变换器电压等级; p_j 为输出电压与电网电压间的相位角。

1.2 光伏并网发电模型

机组惯量阻尼是光伏并网发电机组按标准动态方程运行途中产生的物理参数,对系统工作起到变量增益的作用。光伏并网的基本思路是:以太阳能电池为基础,通过采用半导体器件的电子性能,在太阳光照射的作用下,形成一种强大的内部静电场,将光能量转换成电能,再通过逆变器进行反向转换后,能够向电网输出与电网电压同频、同相的正弦交流电流。

考虑到机组惯量阻尼与系统惯性水平和阻尼能力存在明显对应关系,且惯性水平决定系统发生位置变化的概率,惯性水平越强^[9-10],系统出现随机运动的概率越小、系统整体装置越稳定;阻尼能力决定系统机械零件间的共振振幅,阻尼能力越强,系统因震动应力达到极限而造成的零件损坏概率越低,因此将惯量阻尼的变化规律视为光伏并网发电机组的研究重点,试图通过提高机组惯量阻尼控制能力,优化光伏并网发电机组的工作效率^[11-12]。由于不可抗力 and 动态失稳机制的存在,机组惯量阻尼并不总是维持在系统结构参数和稳态工作点参数共同决定的理想状态,而是在外界干扰因素的作用下,以低频惯性效应和低频阻尼效应的形式呈现在不平衡系统能量源图中。不平衡系统能量源如图 1 所示。

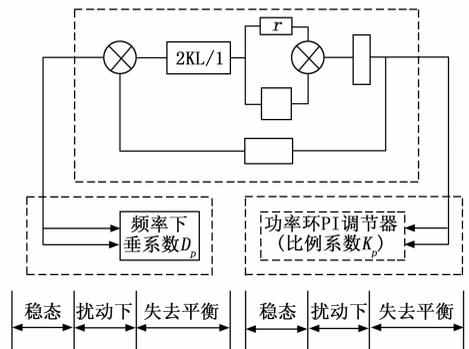


图 1 不平衡系统能量源图

由图 1 可见，影响机组惯量阻尼的干扰因素是频率下垂系数 D_p 和变比例—退饱和式 PI 调节器的比例系数 K_p [13-14]。频率下垂系数 D_p 指的是有功功率参考值与频率偏差的系数，当逆变器的容量越大时，其对应的下垂系数越小。变比例—退饱和式 PI 调节器的比例系数 K_p 是指根据系统的误差、利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制。当系统中出现偏差时，可以通过比例调节来减少系统的偏差。通过在电网电压矢量定向的同步旋转坐标系中建立光伏并网发电模型，并在模型中添加抑制干扰能力处于活跃状态的 D_p 和 K_p ，模拟发电机与电流、电压谐波一体化条件下机组惯量阻尼的低频特性。低频特性指的是系统在低频区域运行时，由于其起动力值较低，导致其启动性不够理想。在低频稳定状态下，由于电网的电压和负荷的变化，以及变频器的输出电压波形的异常，会引起系统启动困难甚至无法启动，同时还会造成电机的振动。如果变频调速装置与电机之间的间隔过长，以及由于高次谐波的影响，很容易造成电机的爬行。

根据低频特性分析惯量阻尼影响规律，可知 D_p 和 K_p 的值越大，惯量越小。其中， K_p 对惯量的影响强度较 D_p 更甚， D_p 对阻尼的影响强度较 K_p 更甚。随着 D_p 和 K_p 与机组惯量阻尼的耦合程度越高，系统功率回路的载荷越大 [15-16]，光伏并网发电机组输出功率幅值越振荡，系统稳定性和振动应力抵抗性越差。

标准动态方程的表达式如下：

$$K = x_n + x_m - e^{-1} \quad (3)$$

式中， x_n 为蓄电池电压； x_m 为光伏系统的功率变化量； e^{-1} 为光伏容量。

光伏并网发电模型的函数表达式如下：

$$M = \left(y_n + \frac{U_{ij}^2}{\epsilon} \right) (c - 1) \quad (4)$$

式中， y_n 为等效线路阻抗； ϵ 为输出功率振幅强度； U_{ij}^2 为电流过载程度； c 为电压过载程度。

2 光伏并网发电机组惯量阻尼控制

在深入分析机组惯量阻尼，并掌握二者干扰因素后，以此为基础，建立光伏并网发电机组的惯量阻尼控制模型。

VSG 是建立在微电网逆变控制策略基础上的一种自动化惯量阻尼综合控制器 [17-18]，该控制器的核心思路围绕并网输出的虚拟惯量和虚拟阻抗展开，即通过将虚拟惯量和虚拟阻抗分别与二阶、三阶、五阶模型结合，达到简化原动机本地负载、放大光伏系统输出功率微小变化的目的。参与结合的各阶模型在影响因素的多个扰动周期内与发电机转子旋转特性和功率振荡的超调量有关。由于发动机转子旋转特性和功率振荡的超调量依赖虚拟惯量和虚拟阻抗在扰动后的自适应变化，因此可以将转动惯量和阻尼系数视为光伏系统的控制变量 [19]。

VSG 的拓扑结构包括：直流电源，电力电子变换器，输出 LC 滤波器。将同步发生器的方程式嵌入到变换器的

控制中，VSG 可以根据同步发电机的特性，使 VSG 实现直流电源和系统之间的功率交换。VSG 的拓扑结构如图 2 所示。

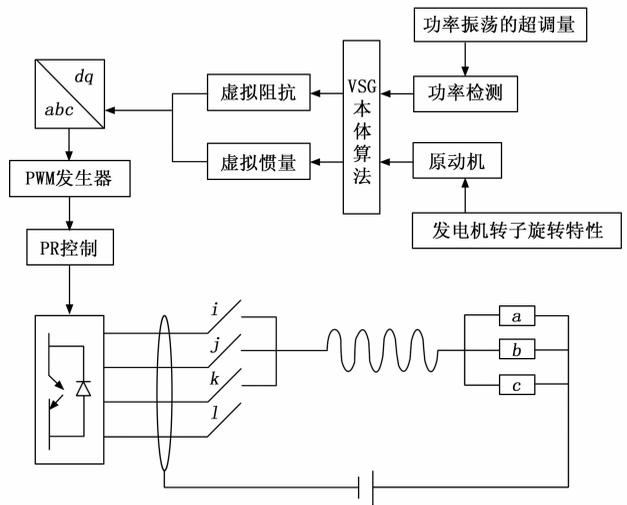


图 2 VSG 的拓扑结构

二阶、三阶、五阶模型的表达式如下：

$$\begin{cases} J = g_m \frac{\Delta b}{2\alpha} \\ S = \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda_{uc} t'(u) \\ A = \frac{1}{2} (I_n s_i - s_j) \end{cases} \quad (5)$$

式中， g_m 为转子转速； α 为衰减因子； Δb 为期望阻尼； λ_{uc} 为阻尼偏差； t' 为模型权重； u 为惯性响应间隔； I_n 为发动机转子角频率基准值； s_i 为有功负荷扰动阈值； s_j 为联络线功率振荡幅值。

VSG 是将同步发电机的数学模型，融入到逆变电路的控制中。将静态功率器件模拟为旋转电机的运行技术，对同步发电机进行一次调频调压，使其具备快速波动的阻尼、频率、功率自动分配、同步电网运行等作用。VSG 控制原理是在有功控制的基础上，增加转子惯量，模拟发电机惯量，以此实现对电网运行性能的提升。

根据 VSG 控制策略的基本原理建立基于 VSG 的惯量阻尼控制模型 [20-21]，其具体建立步骤如下：首先以 VSG 控制策略为外骨架，搭建容纳虚拟惯量和虚拟阻抗的三组模型，然后计算变比例—退饱和式 PI 调节器的比例系数 K_p 在多个扰动周期内抑制的虚拟惯量，以及频率下垂系数 D_p 在多个扰动周期内抑制的虚拟阻尼 [22]。利用 VSG 本体算法削弱转子存储动能和功率谱变化率。

将 VSG 本体算法指导的惯量阻尼控制过程作为核心算法，与 VSG 控制策略的基本原理结合，建立基于 VSG 的惯量阻尼控制模型。VSG 本体算法的表达式如下：

$$T = R' + |i_n - i_m| \quad (6)$$

式中， R' 为转子角速度； i_n 为转子线速度； i_m 为负荷扰动后

的暂态持续时间。

促使受抑制的虚拟惯量与虚拟阻尼在极短的时间内自动回落，直至光伏并网发电机组输出功率恢复初始振荡幅值，完成机组惯量阻尼全局控制^[23-24]。

惯量阻尼控制过程的输出结果^[25]表达式如下：

$$F = h_o \hat{y} + \beta \quad (7)$$

式中， h_o 为扰动周期抑制频率； \hat{y} 为转子初始存储动能； β 为功率谱初始变化率。

根据惯量阻尼控制模型的输出结果，实现光伏并网发电机组惯量阻尼的自动化控制。

3 实验结果与分析

3.1 实验环境

为了验证光伏并网发电机组惯量阻尼控制方法研究的整体有效性，需要对其测试。分别采用基于柔性直流输电系统的双边惯量和阻尼模拟控制方案（以下简称：文献 [2] 方法）和基于自适应惯量阻尼的双馈风电机组虚拟同步控制策略（以下简称：文献 [3] 方法）作为对比方法。

拟定测试实验平台为 MatlabR 2019b，利用 MATLAB 仿真软件中的 Simulink 软件包，模拟光伏并网发电机组电路。仿真电路的拓扑结构如图 3 所示，仿真系统参数设置如表 1 所示。

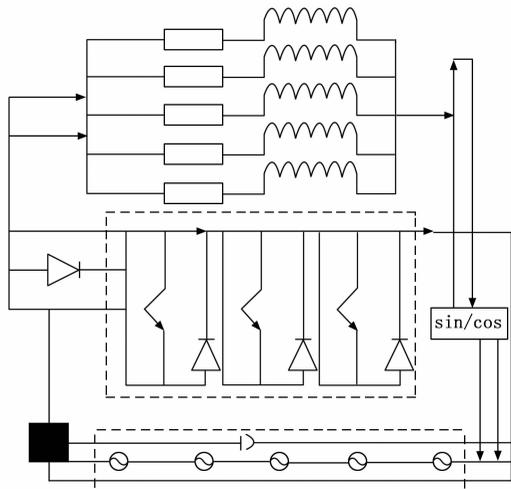


图 3 仿真电路的拓扑结构

表 1 仿真系统参数设置

参数	设置
最大功率点电压 V_m/V	380
最大功率点电流 I_m/A	27.3
开路电压 V_{oc}/V	420
短路电流 I_{sc}/A	29.5
编码器的参考值 S_{ref}	1 000
参考时钟的周期长 T_{ref}/s	25
仿真步长/s	5×10^{-6}

光伏并网发电机组的主要电路参数如表 2 所示。

表 2 光伏并网发电机组的主要电路参数

参数	数值
光伏侧电容 $C_{pv}/\mu F$	200
前级 Boost 电路滤波电感 L_1/mH	10
蓄电池侧电容 $C_b/\mu F$	1 500
双向 DC-DC 电路滤波电感 L_2/mH	20
直流母线电容 C/mF	12
DC/DC 开关频率/kHz	40
直流母线电压 U_{dc}/V	550
交流电网电压 U_g	420 V/60 Hz
L 型滤波电感 L_g/mH	8
网侧线路电抗 L_g/mH	18
DC/AC 开关频率/kHz	20
负荷的阻值 R/Ω	25

3.2 惯量阻尼控制性能对比测试

根据上述表 1 系统参数设置，以及表 2 光伏并网发电机组的主要电路参数设置，完成了对模拟光伏并网发电电路的设置。分别采用所提方法、文献 [2] 方法和文献 [3] 方法控制光伏并网发电机组在充电状态和放电状态下的惯量阻尼，实现对惯量阻尼控制性能的对比测试。

根据上述内容可知，影响光伏并网发电机组惯量、阻尼的主要因素是频率下垂系数 D_p 和变比例-退饱和式 PI 调节器的比例系数 K_p 。因此在验证惯量控制性能时，首先，保证试验对象 D_p 不变，观察 K_p 持续下降过程中，不同方法对惯量的控制性能测试；其次，在验证阻尼控制性能时，保证试验对象 K_p 不变，观察 D_p 持续下降过程中，不同方法对阻尼的控制性能测试。

考虑到 K_p 和 D_p 下降会直接干扰光伏并网发电机组的输出功率，使其功率振幅明显上升，而输出功率的振幅大小与惯量阻尼大小密切相关，即功率振幅越小，机组惯量阻尼越大。因此将输出功率作为纵坐标，观察 K_p 和 D_p 强迫输出功率振幅上升途中，不同方法下功率振幅的变化情况。充电状态和放电状态下不同方法的功率振幅如图 4~7 所示。

从图 4~7 的实验结果可以得出，采用所提方法控制光伏并网发电机组惯量阻尼，其在系统充电状态和放电状态下始终无视 K_p 和 D_p 干扰，将输出功率维持在最小振荡幅值，说明所提方法对 K_p 和 D_p 带来的影响持有较高的防御能力，即所提方法的控制性能较好。这是因为所提方法在建立惯量阻尼控制模型前，优先分析影响光伏并网发电机组惯量阻尼的干扰因素，并以此为基础，结合 VSG 实现惯量阻尼控制模型的构建。而采用文献 [2] 方法和文献 [3] 方法控制光伏并网发电机组惯量阻尼，二者在系统充电状态和放电状态下均受到 K_p 和 D_p 干扰，出现功率幅值明显振荡的趋势，说明文献 [2] 方法和文献 [3] 方法对 K_p 和

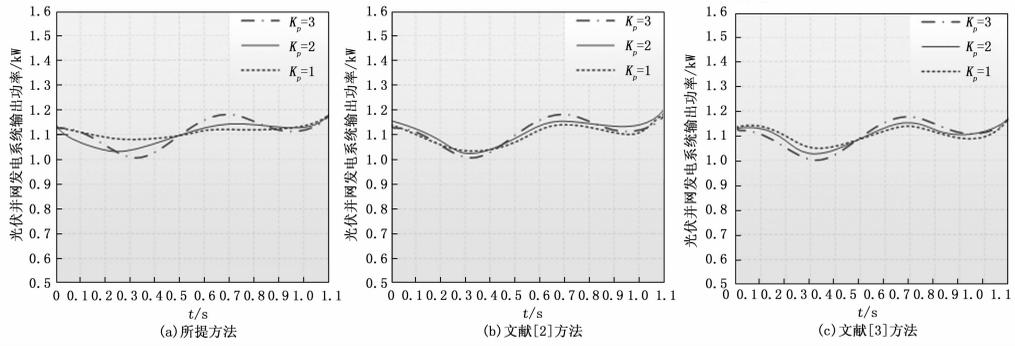


图 4 K_p 变化时充电状态下不同方法的功率振幅

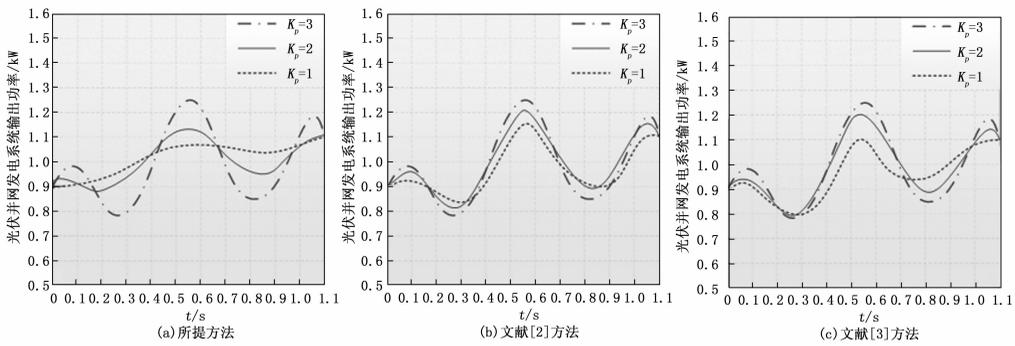


图 5 K_p 变化时放电状态下不同方法的功率振幅

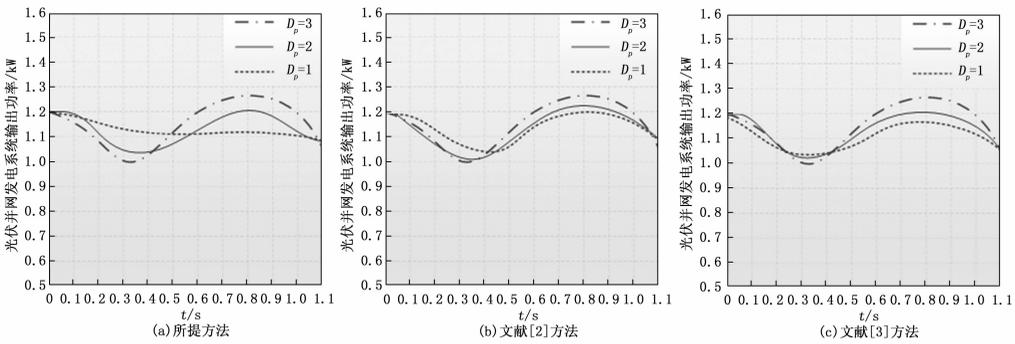


图 6 D_p 变化时充电状态下不同方法的功率振幅

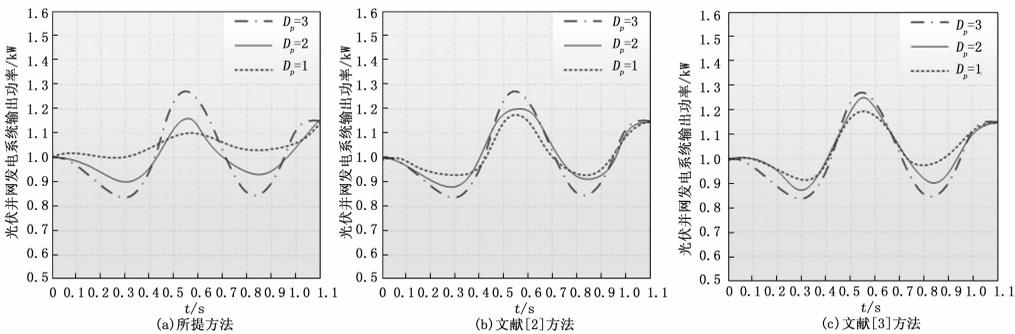


图 7 D_p 变化时放电状态下不同方法的功率振幅

D_p 带来的影响持有较低的防御能力，即文献 [2] 方法和文献 [3] 方法的控制性能较差。经上述对比，可知所提方

法对光伏并网发电机组惯量阻尼控制性能明显优于传统方法。

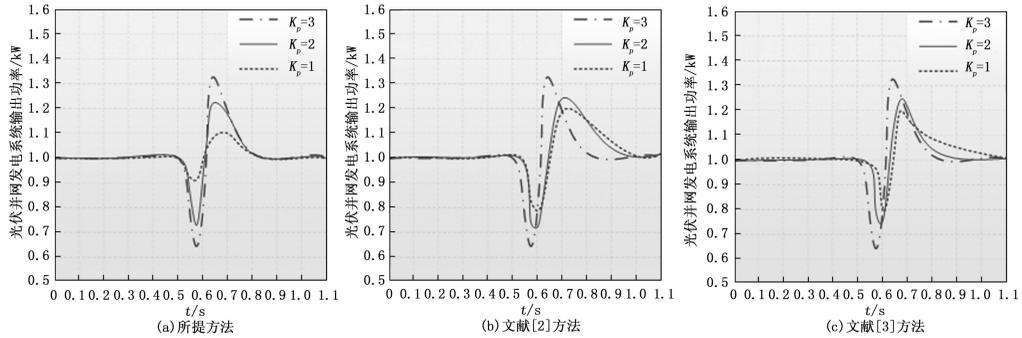


图 8 K_p 突变时不同方法的功率振幅变化情况

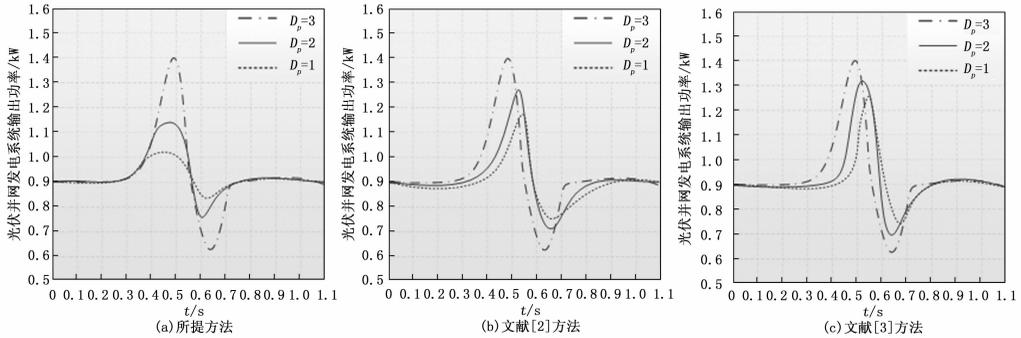


图 9 D_p 突变时不同方法的功率振幅变化情况

3.3 同步性能对比测试

为进一步测试所提方法的性能，分别采用所提方法、文献 [2] 方法和文献 [3] 方法控制光伏并网发电机组惯量阻尼。通过观察 K_p 和 D_p 突变时，不同方法的功率振幅变化情况，判断不同方法的同步性能。不同方法的功率振幅变化情况如图 8 和图 9 所示。

从图 8 和图 9 的实验结果可知，所提方法在 K_p 和 D_p 突变的第一时间控制机组惯量阻尼，维持功率振幅，说明所提方法的同步性能较好。而文献 [2] 方法和文献 [3] 方法在 K_p 和 D_p 突变后一段时间才开始控制机组惯量阻尼，且控制功率振幅波动较大，说明文献 [2] 方法和文献 [3] 方法的同步性能较差。经上述对比结果可知，文献 [2] 方法和文献 [3] 方法的控制机组惯量阻尼效果，较所提方法存在较大差距。因此，进一步验证了所提方法的同步性更好。

4 结束语

光伏并网发电机组仍存在惯量阻尼控制效果不理想等缺陷。为了增强光伏并网发电机组稳定性和振动应力抵抗性，提出光伏并网发电机组惯量阻尼控制方法研究的方法。通过分析光伏并网发电机组机械结构，确定影响机组惯量阻尼的干扰因素，并分析光伏并网发电机组暂态特性。利用 VSG 本体算法模型核心算法，组建基于 VSG 的惯量阻尼控制模型。根据惯量阻尼控制模型的输出结果，不断平衡机组间的稳定性和振动应力抵抗性，实现光伏并网发电机组惯量阻尼的自动化控制。实验结果表明：

1) 在惯量阻尼控制性能测试中，所提方法控制光伏并

网发电机组，在充电状态和放电状态下始终无视 K_p 和 D_p 干扰，其输出功率的振动幅度维持在最小振荡幅值，说明所提方法的控制性能较好。

2) 在同步性测试中，所提方法在 K_p 和 D_p 突变的第一时间控制机组惯量阻尼，维持功率振幅，说明所提方法的同步性能较好。

根据实验结果可知，所提方法取得了较好的实验结果，但仍存在一些问题需要解决。如何在保证机组惯量阻尼控制性能的同时，缩减惯量阻尼控制时长，是研究人员下一步工作的重点。

致谢：感谢我的论文指导老师曹乐，她以严谨的学风、渊博的知识详细指导着我，使论文的质量和学术水平有了提升，在此向曹乐老师致以真挚的谢意和崇高的敬意！

参考文献：

- [1] 余豪杰, 李官军, 杨波, 等. 基于分布式光伏/飞轮储能联合发电系统的并网点电压主动调控技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (3): 48-56.
- [2] 申志鹏, 朱介北, 李斌, 等. 基于柔性直流输电系统的双边惯量和阻尼模拟控制方案 [J]. 高电压技术, 2021, 47 (10): 3505-3519.
- [3] 岳家辉, 张新燕, 周鹏, 等. 基于自适应惯量阻尼的双馈风电机组虚拟同步控制策略 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33 (9): 40-48.
- [4] 孙宇新, 王鹏, 施凯, 等. 基于虚拟同步发电机的惯量和阻尼自适应控制 [J]. 电气传动, 2021, 51 (21): 35-40.
- [5] 武朝磊, 刘志民, 韦德远, 等. 温度和辐照对半片与叠瓦光伏

- 组件性能的影响 [J]. 光学精密工程, 2021, 29 (8): 1782-1794.
- [6] 张珍睿, 刘彦呈, 杨鹏明, 等. 直流供电下的永磁同步电机驱动系统母线电压振荡抑制策略 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (12): 2982-2991.
- [7] 杨 谦, 刘继春, 蒋万泉. 光伏不同渗透率下考虑源网荷储深度互动的电力系统调峰策略 [J]. 电力建设, 2021, 42 (9): 74-84.
- [8] 廖贵文, 姜永正, 彭延峰, 等. 基于去耦电容的直流开关电源谐振影响因素及优化研究 [J]. 现代电子技术, 2022, 45 (14): 35-39.
- [9] 肖友强, 林晓煌, 文云峰. 直流和新能源高渗透型电网惯性水平多维度评估 [J]. 电力建设, 2020, 41 (5): 19-27.
- [10] 颜湘武, 孙雪薇, 崔 森, 等. 基于转子动能与超级电容器储能的双馈风电机组惯量和一次调频改进控制策略 [J]. 电工技术学报, 2021, 36 (S1): 179-190.
- [11] 刘其辉, 洪晨威, 逢思敏, 等. 基于弹性系数的双馈风电机组控制参数对次同步振荡作用分析及调整方法 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (14): 3528-3541.
- [12] 雷添翔, 律方成, 刘教民, 等. 双馈风力发电机组惯量阻尼特性与改进附加频率控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42 (4): 190-196.
- [13] 魏子涵, 赵 咪, 谷贵志, 等. 基于变比例-退饱和式 PI 调节器的开关磁阻电机调速系统设计 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47 (9): 16-21, 65.
- [14] 张 骞, 边晓燕, 徐鑫裕, 等. 基于 SVD-Prony 及主成分回归的次同步振荡阻尼特性影响因素研究 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (17): 4364-4376.
- [15] 蔡 晖, 张文嘉, 彭竹弈, 等. 基于大规模风电机组的虚拟惯量控制技术对江苏电网频率稳定性的影响研究 [J]. 电力
- 电容器与无功补偿, 2021, 42 (4): 41-46.
- [16] 管 飞, 黄永章, 杨 鑫, 等. 光伏经新能源同步机并网小干扰模型及次同步振荡抑制作用 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (1): 58-67.
- [17] 柴秀慧, 张纯江, 柴建国, 等. 不同线路阻抗下 VSG 控制参数通用设计方法 [J]. 电力电子技术, 2022, 56 (1): 1-4.
- [18] 熊鸿韬, 汪宗恒, 尚 磊, 等. 一种用于电力系统低频振荡抑制的新能源电站阻尼注入控制器设计及特性分析 [J]. 电网技术, 2022, 46 (7): 2690-2700.
- [19] 高子轩, 赵晋斌, 杨旭红, 等. 基于 RBF 的 VSG 转动惯量和阻尼系数自适应控制策略 [J]. 电力建设, 2022, 43 (9): 132-139.
- [20] 张永超, 王维庆, 王海云, 等. VSC-HVDC 逆变侧的 VSG 转动惯量和阻尼系数模糊自适应控制 [J]. 太阳能学报, 2021, 42 (11): 463-469.
- [21] 杨旭红, 姚凤军, 郝鹏飞, 等. 基于改进型 RBF 神经网络的 VSG 转动惯量自适应控制 [J]. 电测与仪表, 2021, 58 (2): 112-117.
- [22] 汪 颖, 孙建风, 肖先勇, 等. 扩大等效虚拟阻尼正区间的逆变侧电流双环反馈控制方法 [J]. 高电压技术, 2021, 47 (11): 3981-3991.
- [23] 倪安安, 王育飞, 薛 花. 基于混沌特征改进鲸鱼优化算法-相关向量机的超短期光伏发电输出功率预测 [J]. 现代电力, 2021, 38 (3): 268-276.
- [24] 赵天环. 五连轧 6 400 kW 同步电机故障分析与处理 [J]. 中国金属通报, 2021 (16): 277-278.
- [25] 雷添翔, 律方成, 刘教民, 等. 双馈风力发电机组惯量阻尼特性与改进附加频率控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42 (4): 190-196.
- ~~~~~
- (上接第 116 页)
- [12] 侯小芳. 几类离散系统的稳定性分析 [D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
- [13] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用 [M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [14] LI J N, PAN Y J, SU H Y, et al. Stochastic reliable control of a class of networked control systems with actuator faults and input saturation [J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2014, 12 (3): 564-571.
- [15] ZHU L B, DAI G Z, KANG J, et al. Guaranteed cost fault-tolerant control of networked control systems with sensor failure [J]. Control & Decision, 2008, 24 (7): 1050-868.
- [16] HOU Y. Reliable stabilization of networked control systems with actuator faults [J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 71 (3): 447-455.
- [17] YANG F, LI Y. Set-membership filtering for systems with sensor saturation [J]. Automatica, 2009, 45 (8): 1896-1902.
- [18] WANG Z, HO D, DONG H, et al. Robust finite-horizon control for a class of stochastic nonlinear time-varying systems subject to sensor and actuator saturations [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55 (7): 1716-1722.
- [19] ZHU X, YANG G. Jensen inequality approach to stability analysis of discrete-time systems with time-varying delay [C] //USA: Proceedings of the American Control Conference, 2008: 524-534.
- [20] 俞 立. 鲁棒控制: 线性矩阵不等式处理方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [21] HE Y, WU M, LIU G, et al. H_{∞} state-feedback controller design for networked control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53 (10): 2372-2377.
- [22] GUO Y, LI S. Output feedback stabilization for a discrete-time system with a time-varying delay [J]. Control Theory & Applications, 2008, 25 (3): 825-835.
- [23] LI Q, QIN L, FENG G, et al. Stability and stabilization of networked control systems with random time delays and packet dropouts [J]. Journal of the Franklin Institute, 2013, 350 (7): 1886-1907.