DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.124 **中图分类号**：TM712 **文献标志码**：A

光伏并网系统的等效惯量评估及调频控制参数整定

叶诚炜[1]，何 震[1]，曾平良[1]，杭丽君[1](中国电源学会高级会员)，刘颖明[2]
(1.杭州电子科技大学自动化学院，杭州 310018；2.沈阳工业大学电气工程学院，沈阳 110870)

摘要：在光伏装机容量占比不断提高、电力系统低惯量问题日益凸显的当下，如何评估光伏并网系统惯量支撑能力、通过调频参数的整定使系统频率满足并网导则的需求是亟待解决的关键问题。为此，通过类比同步发电机的转子运动方程，对已配备典型附加调频控制的光伏并网系统等效惯量做了量化评估；然后，考虑光伏设备的物理约束及新能源并网导则的需求，给出了集中式光伏并网系统调频控制参数的整定方法；更进一步，在前述物理约束和并网导则需求的基础上，额外引入网络线路损耗最低的目标，给出了分布式光伏并网系统的调频控制参数整定方法；最后，利用MATLAB/Simulink仿真验证了调频控制参数整定的正确性。

关键词：光伏并网；等效惯量评估；一次调频；虚拟惯量

Inertia Evaluation and Frequency Modulation Control Parameter Setting for Photovoltaic Grid-connected System

YE Chengwei[1], HE Zhen[1], ZENG Pingliang[1], HANG Lijun[1], *Senior Member*, *CPSS*, LIU Yingming[2]
(1. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 2. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: As the proportion of photovoltaic installed capacity continues to increase and the low inertia problem inpower systems becomes increasingly prominent, how to evaluate the inertia supporting capacity of a photovoltaic grid-connected system and how to set the frequency modulation parameters of the system to meet the requirements of grid-connected guidelines are the key issues to be solved urgently. The equivalent inertia of a typical grid-connected photovoltaic system with additional frequency modulation control is quantitatively evaluated by analogizing the rotor motion equation of synchronous generators. Then, considering the physical constraints of photovoltaic equipment and the requirement of new energy grid-connected guidelines, the frequency modulation control parameter setting method for a centralized photovoltaic grid-connected system is put forward. Furthermore, based on the physical constraints and grid-connected guideline requirements, a target of minimum network line loss is introduced additionally, and the frequency modulation control parameter setting method for a distributed photovoltaic grid-connected system is formulated. Finally, the simulation results based on MATLAB/Simulink verify the correctness of frequency modulation control parameter setting.

Keywords: Photovoltaic grid-connection; evaluation of equivalent inertia; primary frequency modulation; virtual inertia

2022年，全国新能源新增装机容量152 GW。其中，光伏发电新增并网容量 87.40 GW，包括集中式光伏电站36.29 GW、分布式光伏51.11 GW[1]。但是，作为静止元件，光伏不具备惯量。随着光伏装机容量占比的不断增大，电力系统的等效惯量不断减小。当惯量水平低于一定程度时，电力系统的频率稳定将面临严峻挑战。2016 年澳大利亚“9·28”

收稿日期：2023-10-17；**修回日期**：2023-12-20；**录用日期**：2024-01-12；**网络首发日期**：2024-04-26
基金项目：浙江省自然科学基金资助项目(LQ22E070002)
This work is supported by Zhejiang Province Natural Science Foundation of China under the grant LQ22E070002

大停电、2019 年英国“8·9”大停电均与该地区不断减小的等效惯量密切相关[2]。因此，为解决电网日益严峻的低惯量问题，亟需开展光伏并网系统的等效惯量基础理论与关键技术研究。目前，国内外学者已围绕低惯量问题展开诸多研究，提出了许多能主动提供惯量和一次调频支撑的控制策略。功率/转矩/直流电压环指令调节[3-4]、锁相优化[5-6]及虚拟同步[7]是当前并网系统采用的 3 种典型调频控制方式。与此同时，国内外对低惯量问题也有着高度重视。国家标准 GB/T 40595—2021《并网电源一次调频技术规定及试验导则》[8]明确要求储能电站、光伏、风电等均应具备一次调频能力。IEEE Std 1547-2022 也明确要求并网分布式能源主动提供支撑能力。然而，现有研究只是从技术上回答“如何使系统拥有惯量支撑能力”。围绕已配备典型附加调频控制的光伏并网系统，如何评估其惯量支撑能力、通过调频参数的整定使系统频率满足并网导则的需求是亟待解决的关键问题。

当前，电力系统等效惯量评估主要是基于数据驱动的计算方法，可分为 3 类：大扰动评估法[9]、小扰动评估法[10-12]及准稳态评估法[13]。大扰动评估法将等效惯量定义为大扰动下系统功率偏差与频率变化率之比，而后通过同步相量测量单元 PMU (phasor measurement unit)检测到的数据计算等效惯量；小扰动评估法则基于小扰动下系统的频率响应特性，通过系统振荡模态与惯量之间的关联关系实现系统惯量评估；准稳态评估法基于电网实时运行过程中表现出来的频率变化情况，通过参数辨识、机器学习等手段实现系统惯量的评估。此外，由数学模型驱动的解析策略是等效惯量评估的另一种典型方法，其做法是从能量的角度分析新能源、直流输电系统在频率扰动事件下有功出力的变化，而后通过类比同步机转子运动方程，推导系统频率响应的动态解析式及各装备的等效惯量[14]。整体而言，数据驱动的方法评估准确性过于依赖数据检测精度和快速性，同时机理性不强；而模型驱动的代表是基于幅相运行方程的分析方法[15]，其物理概念清晰，且充分考虑了与机电尺度相关联的物理及控制环节，但目前尚未有专门针对光伏并网系统的幅相运动建模。

设备的调频控制参数也会对电网的频率响应特性产生重要影响。频率扰动下设备的动态特性及稳态运行期间的小信号稳定性是参数整定的考虑重点。文献[16]针对大规模光伏并网导致电力系统一次调频能力不足的问题，提出 1 种保留光伏发电一定有功功率的调频控制策略，对电网频率的稳定起到调节作用；文献[17]围绕分布式光伏系统，分析其向电网提供惯量支撑过程中的变流器状态变化，而后以变流器电气应力不过限为约束，提出了虚拟惯量参数的设计原则；文献[18]考虑同步机及光伏的调频控制，解析计算了光伏发电不平衡有功功率激励-相位输出响应关系，给出了惯量控制参数的整定方法；文献[19]建立了两电平电压源变流器 VSC(voltage source converter)的小信号模型，由此分析不同惯量控制参数对闭环特征根的影响。整体而言，现有关于调频控制参数整定的研究大多聚焦设备本身，即以电气应力不越限、小信号稳定等条件为整定原则，鲜有从系统的视角来审视如何通过控制参数的整定提升和优化电网的频率响应特性，导致系统层面的频率响应并不理想。

针对上述亟待解决的问题和研究现状中的不足，本文的主要贡献为：①通过类比同步发电机的转子运动方程，对已配备典型附加调频控制的光伏并网系统等效惯量做了量化评估，并验证其正确性；②考虑设备自身备用容量、过载能力约束的前提下，充分兼顾了并网导则中对系统频率变化率 RoCoF(rate of change of frequency)和频率偏差的要求，提出了集中式光伏并网系统的调频控制参数整定方法；③针对分布式光伏并网场景，在前述物理约束和并网导则需求的基础上，额外引入了调频期间网络线路损耗最低的目标，提出了适用于分布式光伏并网系统的调频参数整定方法。最后，利用 MATLAB/Simulink 仿真平台验证集中式/分布式光伏并网系统调频控制参数整定方法的可行性。

1 光伏并网系统的调频控制结构与策略

光伏并网系统由太阳能电池阵列、直流(DC-DC)变流器、交直流(DC-AC)逆变器等部件组成，其物理结构与控制结构如图 1 所示。前级 DC-DC 采用定有功功率控制，其有功功率参考指令 P^*根据最大功率点跟踪 MPPT(maximum power point tracking)算法获得[20]；后级 DC-AC 采用定直流电压控制，直流电压指令为U_{dc}^*。电网系统可能发生的扰动功率为ΔP_L，f_{ref}为电网电压的额定频率，网侧频率f_g通过锁相环测量得到。

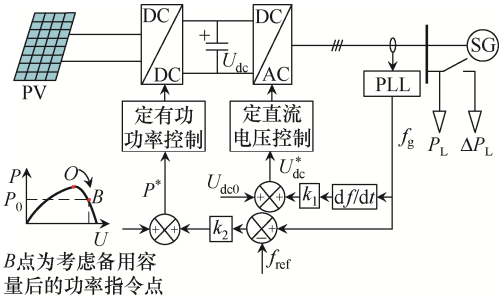


图 1 光伏并网系统的物理结构与控制结构

Fig. 1 Physical structure and control structure of photovoltaic grid-connected system

传统电力系统中，同步发电机的调频过程可表示为

$$P_m - P_e = 2H \cdot \mathrm{d}f/\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：P_m为同步机的机械功率；P_e为电磁功率；H为同步发电机的惯性时间常数；f为同步机频率。当电网遭受频率扰动后，机械转子的转动惯量首先阻碍系统频率的快速变化，此即为惯量响应阶段；随后，调速系统感受到转子转速的变化，进而增大或减小原动机的出力，改变机械功率，进一步稳定系统频率，此即为一次调频。

为了获得与同步机类似的频率支撑能力，虚拟同步和功率/转矩/直流电压指令调节是现有工程中较为成熟的 2 种方法[8]。但是虚拟同步控制对控制结构的改动较大，且应用场合受限，本文主要在功率/转矩/直流电压指令调节方式的基础上，展开参数整定优化研究，其具体控制策略如图 1 所示，包含如下 2 个部分：①虚拟惯量控制：为使光伏并网系统具有虚拟惯量，将系统 RoCoF 反馈叠加至 DC-AC 变流器的直流电压控制指令，控制参数为 k_1。该反馈控制可通过电容吸收或释放能量来降低电网的 RoCoF，用于模拟同步机的惯量响应。②虚拟一次调频控制：国标 GB/T 40595—2021 及 IEEE Std 1547-2022 均将其作为新能源并网参与主动频率支撑的要求，通过预留备用容量，使得光伏并网系统具有一次调频能力。首先光伏板满足持续工作在一定光照强度、电池板遮挡等外部情况下，通过 MPPT 控制跟踪到最大功率点 O，得到光伏板的输出功率曲线，然后调整光伏板的工作电压，增大至 B 点。此时，P_0为稳定工作点的输出功率，光伏板工作在非最大功率状态，功率参考指令为 P^*。频率扰动期间，系统的频率偏差(Δf)反馈至 DC-DC 有功功率指令，控制参数为 k_2。该反馈控制可增加或减小光伏出力来支撑电网频率，用于模拟同步机的一次调频。

2 光伏并网系统的等效惯量评估与频率响应分析

2.1 光伏并网系统的等效惯量评估

考虑到光伏并网系统锁相环控制和电流环控制的响应速度较快，对光伏惯量的影响较小，所以在评估光伏等效惯量时采用能量等效的方法，在直流电容电压上叠加控制策略。光伏并网系统的直流电容主要用于平衡 DC-DC 的输出功率和 DC-AC 的输入功率，其动态特性可表示为

$$P_{PV} - P_G = CU_{dc} \cdot \mathrm{d}U_{dc}/\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中：P_{PV}为光伏的有功功率；P_G为网侧的有功功率；U_{dc}为直流电容的电压；C为等效电容。

为模拟如式(1)所示同步发电机的惯性时间常数，将变化的直流电压类比变化的同步机转子转速，提供虚拟惯量。结合式(1)和式(2)，有

$$2H_{dc} \cdot \mathrm{d}f/\mathrm{d}t = CU_{dc} \cdot \mathrm{d}U_{dc}/\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中，H_{dc}为电容的等效惯性时间常数。对式(3)两端积分，得

$$2H_{dc}(f-f_{ref})=\frac{1}{2}C(U_{dc}-U_{dc0})^2 \tag{4}$$

式中，U_{dc0}为直流电压稳态值。因电容电压在小范围内波动，可对其小信号线性化，得

$$2H_{dc}\Delta f=CU_{dc0}\Delta U_{dc} \tag{5}$$

根据图 1 所示的虚拟惯量控制，引入具有低通滤波器的 RoCoF 作为控制指令。因为引入了微分运算，系统在频率变化瞬间会出现高频谐波，利用时间常数在 10~100 ms 的低通滤波器可将其滤掉。考虑到惯量响应时间尺度在秒级，对其近似处理。RoCoF 和直流电压偏差的关系为

$$U_{dc}=U_{dc0}+\frac{k_1}{Ts+1}\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}\approx U_{dc0}+k_1\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

通过式(5)和式(6)得到光伏并网系统等效惯量表达式为

$$H_{dc}=\frac{1}{2}CU_{dc0}(k_1 s) \tag{7}$$

由式(7)可知，光伏并网系统的等效惯量和稳态直流电压、直流电容、控制支路的控制参数的大小存在正比关系。由于直流电容的储能有限，其模拟的等效惯量无法与同步机机械惯量相比，因此需要光伏提供额外的主动支撑能力。理论上，可附加有功控制指令，调用光伏的备用余量为系统提供频率支撑。扰动发生后，光伏的备用余量可以等效同步机增加的机械功率，以获得额外的系统惯量，即

$$(P_m+k_2\Delta f)-P_e=2H_{dc}\cdot \mathrm{d}f/\mathrm{d}t \tag{8}$$

2.2 光伏并网系统的频率响应模型

基于光伏并网系统的调频控制策略，其理论推导的频率响应分析模型如图 2 所示。当系统突增负载，会使得电网功率不平衡，造成频率下降。图 2 的前向通路代表同步机的转子惯量支撑环节，同时同步机的调速系统参与电网一次调频。此外，在光伏并网系统虚拟惯量控制下，当电网电压和频率下降时，反馈支路调节直流电容的电压，在一定时间内释放电容的部分能量，进而提供惯量支撑；同时，在光伏并网系统的虚拟一次调频控制下，反馈支路调节光伏的有功功率指令，利用备用余量增加出力，使同步机出力减小，提供频率支撑。

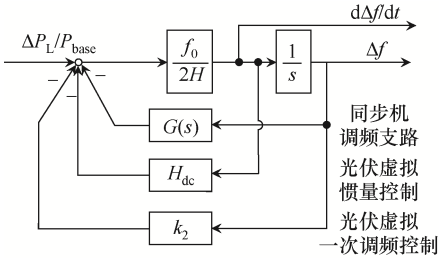


图 2　光伏并网系统的频率响应分析模型

Fig. 2 Frequency response analysis model for photovoltaic grid-connected system

通过图 2，可以推导获得负载功率扰动分别至 RoCoF 和稳态频率偏差的传递函数为

$$F(s)_{RoCoF}=\frac{f_0/(2H)}{1+\dfrac{f_0}{2H}[CU_{dc0}k_1+k_2/s+G(s)/s]} \tag{9}$$

$$F(s)_{\Delta f}=\frac{\dfrac{f_0}{(2H+f_0CU_{dc0}k_1)s}}{1+\dfrac{f_0}{(2H+f_0CU_{dc0}k_1)s}[k_2+G(s)]} \tag{10}$$

式中：f_0为光伏并网系统稳态运行额定频率；$G(s)$为再热器式汽轮发电机调速器传递函数，其表达式为

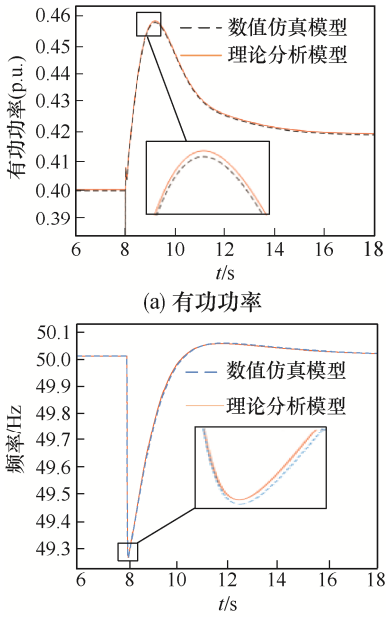
$$G(s)=\frac{1+F_{HP}T_{RH}}{(1+T_G s)(1+T_{CH}s)(1+T_{RH}s)} \tag{11}$$

式中：F_{HP}为再热器式汽轮发电机调速器系统的高压缸功率系数；T_{RH}为再热器式汽轮发电机调速器系统的再热蒸汽容积时间；T_G为再热器式汽轮发电机调速器系统的转子动作时间常数；T_{CH}为再热器式汽轮发电机调速器系统的高压蒸汽容积时间。

2.3 光伏并网系统的频率响应分析验证

为验证频率响应分析模型的正确性，利用 MATLAB/Simulink 分别建立如图 1 所示的光伏并网系统数值仿真模型和如图 2 所示的光伏并网系统的频率响应理论分析模型。参考调频控制参数整定的文献[17]，在电网扰动为 0.1 p.u.的情况下，取控制参数 k_1、k_2均为 0.1 p.u.，对比数值仿真模型和频率响应理论分析模型的计算结果，如图 3 所示。图中，虚线为电网扰动下数值仿真模型的

结果，实线为电网扰动下频率响应理论分析模型的结果。可以看出，两者基本拟合，从而验证了所推导的等效惯量和所建立的频率响应分析模型的正确性。



(a) 有功功率

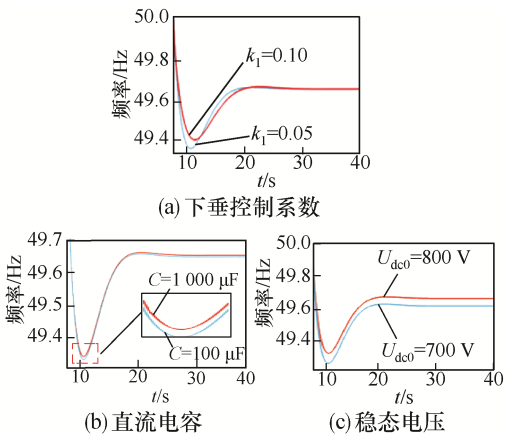
(b) 电网频率

图 3 光伏并网系统在扰动下的有功功率和频率响应对比

Fig. 3 Comparison of active power and frequency response of photovoltaic grid-connected system under disturbances

2.4 仿真参数对光伏并网系统等效惯量的影响

为验证式(7)中参数对光伏并网系统等效惯量的影响，利用光伏并网系统数值仿真分析模型得到不同参数下系统受到扰动后的频率响应效果，如图 4 所示。当下垂控制系数 k_1、直流电容 C 及其稳态电压 U_{dc0} 增大时，系统的频率最低点均有所提高，内在本质是系统的等效惯量增大，与理论分析相符。



(a) 下垂控制系数

(b) 直流电容

(c) 稳态电压

图 4 不同参数下光伏并网系统的频率响应

Fig. 4 Frequency response of photovoltaic grid-connected system under different parameters

3 集中式光伏并网系统的调频控制参数整定

基于第 2 节的等效惯量和频率响应分析模型，本节将给出集中式光伏的调频控制参数整定原则。集中式光伏并网系统调频控制参数的整定不仅需要满足并网导则对 RoCoF 和频率偏差的约束，还要满足设备对备用余量和瞬时过载能力的约束。

3.1 并网导则的约束

根据式(9)，利用初值定理，可计算出光伏并网系统不平衡功率扰动下初始时刻的 RoCoF (R_{o0})。为满足并网导则的约束，需在系统可能发生的最大功率扰动前提下计算 R_{o0}，即

$$R_{o0}=\lim_{s\to\infty}sF(s)_{\mathrm{RoCoF}}\frac{\Delta P_{\mathrm{Lmax}}/P_{\mathrm{base}}}{s}=\frac{\Delta P_{\mathrm{Lmax}}}{P_{\mathrm{base}}}\cdot\frac{f_0/(2H)}{1+f_0/(2H)CU_{\mathrm{dc0}}k_1}\leqslant R_{\mathrm{omax}} \tag{12}$$

式中：P_{base} 为同步机的额定功率；ΔP_{Lmax} 为系统可能发生的最大扰动功率(例如当地最大一台机组跳闸或交流联络线断线等)[21]；R_{omax} 为并网导则约束下的最大频率变化率。由于无法预测系统的扰动大小，在考虑控制参数的取值范围时，将约束条件限制在最大扰动功率，如果在最大扰动功率下，系统的频率支撑效果也能满足并网要求，则证明控制参数的取值范围基本可以满足系统大小扰动所需的惯量支撑要求。

根据式(10)，利用终值定理，可以计算出光伏并网系统不平衡功率扰动下的稳态时刻的频率偏差，此时系统发生最大的可能扰动功率，有

$$\Delta f_{\infty}=\lim_{s\to0}sF(s)_{\Delta f}\frac{\Delta P_{\mathrm{Lmax}}/P_{\mathrm{base}}}{s}=\frac{\Delta P_{\mathrm{Lmax}}}{P_{\mathrm{base}}}\cdot\frac{1}{k_2+G(0)}\leqslant\Delta f_{\mathrm{max}} \tag{13}$$

式中：$G(0)$为再热器式汽轮发电机调速器 s=0 时的值；Δf_{max} 为并网导则约束下允许的最大频率偏差。

根据式(12)和式(13)获得虚拟惯量控制支路的控制参数 k_1 和虚拟一次调频控制支路的控制参数 k_2 的最小取值范围分别为

$$k_1 CU_{\mathrm{dc0}} \geqslant \frac{\Delta P_{\mathrm{Lmax}}/P_{\mathrm{base}}}{R_{\mathrm{omax}}} - \frac{2H}{f_0} \tag{14}$$

$$k_2 \geqslant \frac{\Delta P_{\mathrm{Lmax}}/P_{\mathrm{base}}}{\Delta f_{\max}} - G(0) \tag{15}$$

3.2 设备自身的约束

集中式光伏并网系统在调频的同时也需满足设备的物理约束，即设备自身备用余量和瞬时过载能力的约束。频率扰动下，直流电容向电网提供虚拟惯量支撑，处于短时过载状态，提供的惯量不能超过其短时过载极限，即

$$CU_{\mathrm{dc0}} k_1 R_{\mathrm{omax}} \leqslant \zeta P_{\mathrm{PV}}/P_{\mathrm{base}} \tag{16}$$

式中，ζ 为变流器短时过载能力的占比系数。

频率扰动下，光伏并网系统向电网提供的频率支撑不能超过其预留的备用容量，即

$$k_2 \Delta f_{\max} \leqslant \eta P_{\mathrm{PV}}/P_{\mathrm{base}} \tag{17}$$

式中，η 为备用容量的占比系数。

根据上述并网导则对 RoCoF 和频率偏差的约束整定及设备对备用余量和瞬时过载能力的约束整定，可以求得集中式光伏并网系统调频控制参数的取值范围。

4 分布式光伏并网系统的调频控制参数整定

4.1 分布式光伏并网场景

分布式光伏并网系统是由多套分散在各个位置的独立光伏并网系统通过一定的网络连接而成。由于调频期间，系统的功率潮流会发生改变，所以本文所提出的分布式光伏并网系统调频控制参数的配置原则是在满足并网导则的约束和设备物理约束的前提下，额外引入线路网损最小的目标，使得网络线路损耗降到最低。考虑到分布式光伏并网系统远距离协调控制反应时间较慢，所以该场景下的调频参数整定配置仅聚焦响应时间相对较慢的虚拟一次调频控制，如图 5 所示。每个独立光伏并网系统的虚拟一次调频控制参数为 $k_{2,i}$，其中 i 表示第 i 个光伏。

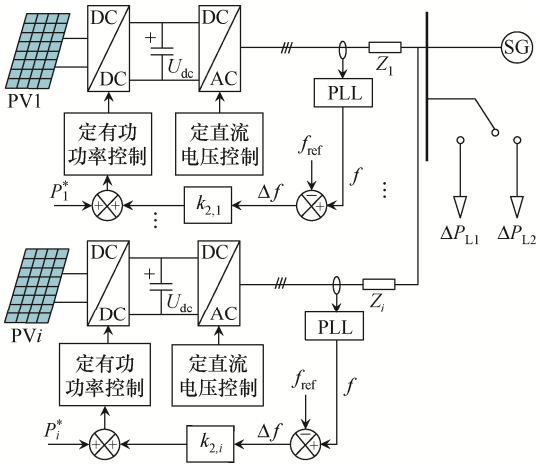


图 5　分布式光伏并网系统的控制策略和物理结构

Fig. 5 Control strategy and physical structure of distributed photovoltaic grid-connected system

4.2 分布式光伏并网系统控制参数的配置原则

4.2.1　电网最大频率偏差的约束

频率扰动下，分布式光伏并网系统将向电网提供频率支撑，稳态频率偏差需要满足并网导则的约束，即

$$\Delta f \leqslant \Delta f_{\max} \tag{18}$$

4.2.2　设备备用余量的约束

频率扰动下，单个光伏并网系统向电网提供的频率支撑能力不能超过设备预留的备用容量，即

$$\Delta f_{\max} k_{2,i} \leqslant \lambda P_{\mathrm{PV}i} \tag{19}$$

式中：$P_{\mathrm{PV}i}$ 为第 i 个光伏发电系统的有功功率；λ 为单个光伏并网系统备用容量的占比。

4.2.3　线路损耗最小化目标

在调频期间，系统的功率潮流会发生改变，若仅考虑分布式光伏并网设备的物理约束及新能源并网导则的需求，不一定处于最佳运行方式。本文所提出的分布式光伏调频控制参数自适应整定流程可通过调节单体光伏并网系统的调频参数，改变调频期间系统潮流的分布，使分布式光伏的线路损耗最低，步骤如下。

(1)设定调频控制参数的 $k_{2,i}$ 默认初始值

调频控制参数 $k_{2,i}$ 的大小表示单体光伏调频能力的强弱，若取如(19)式所示的最大值，则无法进一步通过 $k_{2,i}$ 的调节进行系统潮流优化；若取 0，则表明光伏并网系统在正常工况下不具备频率支持能力。因此，本文将 $k_{2,i}$ 最大取值的 1/2 作为其默认初始值。

(2)调频控制参数的自适应调节

首先，根据分布式光伏备用余量的要求设定初始调频控制参数 $k_{2,i}$；其次通过频率响应结果判断，在扰动情况下系统的稳态频率偏差是否满足并网导则最大频率偏差的约束，如果满足则进行潮流优化，如果没有满足，则按实际频率偏差和最大频率偏差的比值等比例调高调频参数 $k_{2,i}$，直至满足最大频率偏差的要求；再次进行潮流优化计算，使得光伏发电系统线路损耗最小；最后更新调频控制参数 $k_{2,i}$。

5 仿真验证

为验证调频控制参数整定方法的有效性，在 MATLAB/Simulink 仿真软件中搭建如图 1 和图 5 所示的集中式/分布式光伏并网测试系统。集中式光伏并网系统的仿真参数见表 1；分布式光伏并网系统包含 4 个独立光伏，仿真参数见表 2。电网额定频率取 50 Hz。仿真参数的设置主要参考杭电屋顶光伏项目和国家标准 GB/T 40595—2021。

表 1 集中式光伏并网系统参数设定

Tab. 1 Parameter setting for centralized photovoltaic grid-connected system

参数	数值
同步机惯性时间常数 H/s	6
同步机有功功率 P_G/MW	60
高压缸功率系数 F_{HP}	0.2
再热蒸汽容积时间 T_{RH}/s	0.3
转子动作时间常数 T_G/s	7.0
高压蒸汽容积时间 T_{CH}/s	0.3
调速器 s=0 时的值 $G(0)$	0.4
光伏初始功率 P_{PV}/MW	40
直流电容 C/μf	1 250
直流电容电压 U_{dc}/V	800
扰动功率 P_L/MW	10
最大频率偏差 Δf_{max}/Hz	0.3
最大频率变化率 R_{omax}/(Hz·s^{-1})	0.5

表 2 分布式光伏并网系统参数设定

Tab. 2 Parameter setting for distributed photovoltaic grid-connected system

参数	数值
同步机惯性时间常数 H/s	6
同步机有功功率 P_G/kW	3 800
调速器 s=0 时的值 $G(0)$	0.4
光伏 PV1 有功功率 P_{PV1}/kW	1 000
光伏 PV2 有功功率 P_{PV2}/kW	750
光伏 PV3 有功功率 P_{PV3}/kW	500
光伏 PV4 有功功率 P_{PV4}/kW	250
线路 1 的阻抗 Z_1/Ω	0.2+j0.08
线路 2 的阻抗 Z_2/Ω	0.3+j0.03
线路 3 的阻抗 Z_3/Ω	0.1+j0.06
线路 4 的阻抗 Z_4/Ω	0.3+j0.05
情况 1 的扰动功率 P_{L1}/kW	1 375
情况 2 的扰动功率 P_{L2}/kW	1 250
最大频率偏差 Δf_{max}/Hz	0.3

5.1 集中式光伏并网系统控制参数整定验证

根据国家标准 GB/T 40595—2021 及相关规定，仿真设定集中式光伏并网系统备用容量占比 η=0.1，变流器过载能力占比 ζ=0.2[8]。根据表 1 的仿真参数求得集中式光伏并网系统的调频控制参数的取值范围，如图 6 所示。

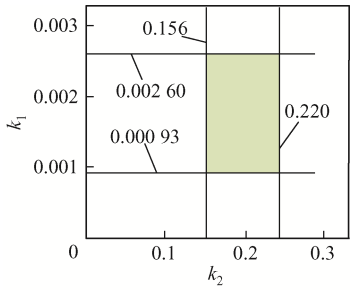
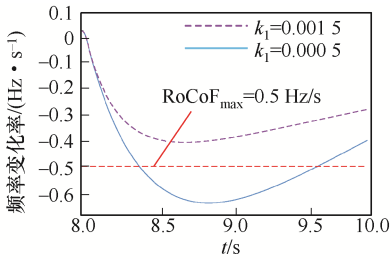


图 6 集中式光伏并网系统控制参数取值范围

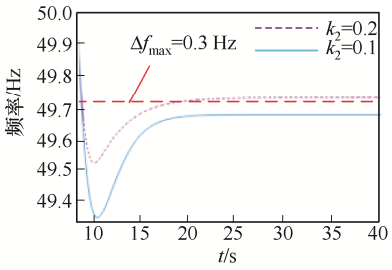
Fig. 6 Value ranges of control parameters for centralized photovoltaic grid-connected system

考虑到集中式光伏并网系统在受到扰动后向电网主动提供频率支撑，改变自身输出功率需要时间，参考部分光伏调节功率的文献将其时间定为秒级[22]。在 8 s 时加入扰动，扰动下虚拟惯量控制支

路和虚拟一次调频控制支路的频率响应结果如图 7 所示。根据图 7(a)的频率响应结果，当 k_1<0.000 93 时，频率响应 RoCoF 超出约束条件的范围，当 0.000 93<k_1<0.002 60 时，频率响应 RoCoF 在约束条件以内，符合理论推导。根据图7(b)的频率响应结果，当 k_2<0.156 时，频率响应 Δf 超出约束条件范围，当 0.156<k_2<0.220 时，频率响应 Δf 在约束条件以内，符合理论推导。虚拟惯量控制和虚拟一次调频控制下的响应结果表明，集中式光伏并网系统调频控制参数整定方法可以简便有效地在考虑设备的物理约束及新能源并网导则的需求下，求得扰动下集中式光伏并网系统的调频控制参数。



(a) 频率变化率响应情况



(b) 频率响应情况

图 7　扰动下的频率响应结果

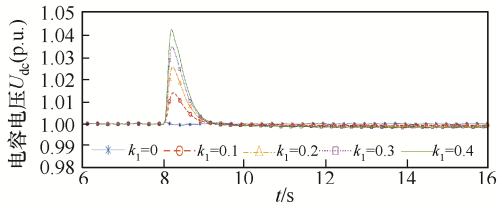
Fig. 7 Frequency response results under disturbance

5.2　调频控制参数对光伏并网系统稳定性的影响

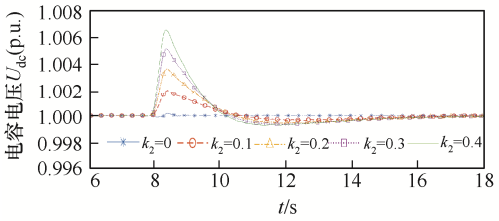
在 8 s 时对光伏系统施加 1 个+10%的阶跃扰动。利用仿真得到不同控制参数下光伏系统的直流电压和输出功率响应，如图 8 所示。可以看出，当控制参数 k_1、k_2 改变时，光伏的直流电压和输出功率响应都很平稳，表明本文所整定的调频控制参数变化区间不会导致系统失稳。

5.3　分布式光伏并网系统控制参数整定验证

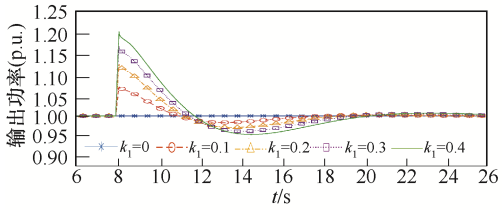
控制参数的初始值与设定要求相关，设定单个



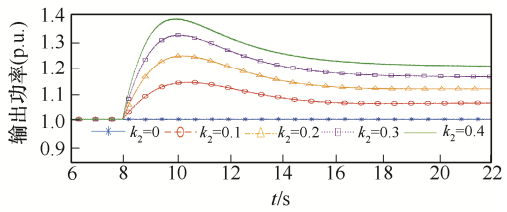
(a) k_1变化时光伏直流电压响应



(b) k_2变化时光伏直流电压响应



(c) k_1变化时光伏输出功率响应



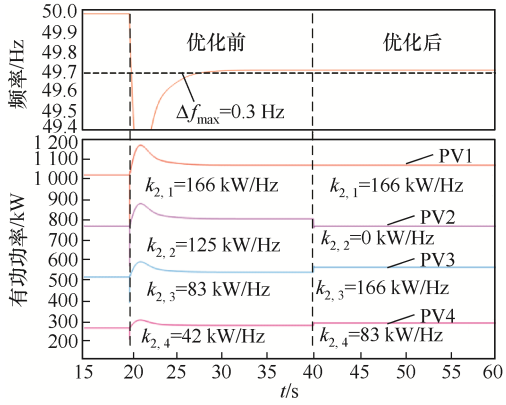
(d) k_2变化时光伏输出功率响应

图 8　不同控制参数下的光伏直流电压和输出功率响应情况

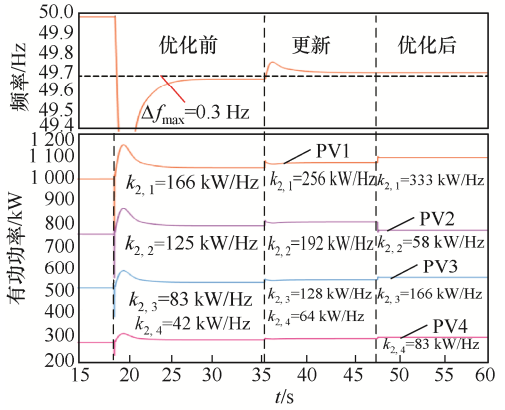
Fig. 8 Photovoltaic DC voltage and output power response under different control parameters

光伏并网系统备用容量的占比系数 λ 均为 0.1[8]。在 20 s 时加入扰动，当系统受到不同扰动后，通过分布式光伏并网系统调频控制参数提供主动频率支撑，会产生 2 种情况，满足调频要求和不满足调频要求，其调频效果和单个光伏优化出力情况如图 9 所示。

情况 1：初始调频效果达到预期，则控制参数 $k_{2,i}$ 的默认初始值就是调频控制参数。通过仿真分析，获得频率响应效果如图 9(a)所示，仿真结果见表 3。根据频率响应波形，可以看出此时系统稳态



(a) 情况 1



(b) 情况 2

图 9 不同扰动下的调频效果和单个光伏出力情况

Fig. 9 Frequency modulation effect and individual photovoltaic output under different disturbances

表 3 情况 1 的仿真结果

Tab. 3 Simulation results under Scenario 1

状态	P_{ZL}/kW	Δf/Hz
优化前	6.746 3	0.29
优化后	6.539 5	0.29

频率为 47.1 Hz，频率偏差小于 0.3 Hz，满足并网导则要求，总的线路损耗 P_{ZL} =6.746 3 kW；然后，通过潮流计算获得优化后的新控制参数，系统频率偏差依然满足最大频率偏差要求，此时总线损 P_{ZL} =6.539 5 kW。由表 3 可知，相比优化前，优化后电网频率满足最大频率偏差，符合约束条件，且线路损耗更小，线损降低 0.206 8 kW。仿真结果和理论控制参数整定流程相符。

情况 2：初始调频效果没有达到预期。通过仿真分析，获得频率响应效果如图 9(b)所示，仿真结果见表 4。根据频率响应波形，可以看出此时系统的频率偏差为 0.32 Hz，大于并网导则最大频率偏差的要求，为了凸显分布式光伏的频率支撑效果，将频率偏差预期设定为 0.29 Hz。此时，总的线路损耗 P_{ZL} =6.746 3 kW；然后，通过对比仿真频率偏差和预期频率偏差，等比例增大 $k_{2,i}$，再次仿真，频率偏差符合预期值，此时，总的线路损耗 P_{ZL} = 7.055 0 kW；最后，通过潮流计算获得优化后的控制参数，系统频率偏差依然满足要求。此时，总线损 P_{ZL} =6.944 9 kW。由表 4 可知，相比优化前，优化后不仅电网的稳态频率满足最大频率偏差，也实现了最小线耗的目标，线损降低 0.110 1 kW。仿真结果和理论控制参数整定流程相符。

表 4 情况 2 的仿真结果

Tab. 4 Simulation results under Scenario 2

状态	P_{ZL}/kW	Δf/Hz
优化前	6.746 3	0.32
更新初始参数	7.055 0	0.29
优化后	6.944 9	0.29

情况 1 和情况 2 的仿真结果表明，分布式光伏并网系统调频控制参数整定方法可以简便有效地在考虑设备的物理约束及新能源并网导则的基础上，求得分布式光伏发电系统最小线路损耗目标下的调频控制参数。

6 结语

本文主要展开了光伏并网系统的等效惯量评估及调频控制参数整定研究。首先，对光伏并网系统等效惯量进行量化评估，发现其等效惯量与下垂控制系数、直流电容、稳态电压成正比关系，利用 MATLAB/Simulink 仿真平台验证等效惯量的正确性；然后，在已配备典型附加调频控制的光伏并网系统上，利用并网导则中对系统 RoCoF 和频率偏差的要求及设备自身备用容量和过载能力的约束，提出了集中式光伏并网系统调频控制参数整定方法；在此基础上，考虑调频期间系统潮流的变化，加入线路损耗最低的目标，提出了分布式光伏并网系统调频控制参数整定方法；最后，利用仿真验证

控制参数整定方法的正确性。

参考文献：

[1] 国家能源局. 2022 年光伏发电建设运行情况[EB/OL]. (2023-02-17)[2023-10-10]. http://www.nea.gov.cn/2023-02/17/c_1310698128.htm.
National Energy Administration. 2022 photovoltaic power generation construction and operation status [EB/OL]. (2023-02-17)[2023-10-10]. http://www.nea.gov.cn/2023-02/17/c_1310698128.htm. (in Chinese)

[2] 文云峰, 杨伟峰, 林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 211-222.
Wen Yunfeng, Yang Weifeng, Lin Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 211-222. (in Chinese)

[3] Zhu Jiebei, Shen Zhipeng, Bu Siqi, et al. Coordinated flexible damping mechanism with inertia emulation capability for MMC-MTDC transmission systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 7329-7342.

[4] 潘健，陈凤娇，张琦，等. 基于抑制环流的自适应下垂控制改进策略[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 101-109.
Pan Jian, Chen Fengjiao, Zhang Qi, et al. Improved strategy for adaptive droop control based on suppressing circulating current [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21 (5): 101-109. (in Chinese)

[5] He Wei, Yuan Xiaoming, Hu Jiabing. Inertia provision and estimation of PLL-based DFIG wind turbines [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 510-521.

[6] Harnefors L, Schweizer M, Kukkola J, et al. Generic PLL-based grid-forming control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 1201-1204.

[7] 邓鹏, 杨沛豪. 混合储能虚拟同步机频率优化调节研究[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 142-151.
Deng peng, Yang Peihao. Research on frequency optimal regulation of hybrid energy storage virtual synchronous generator [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 142-151. (in Chinese)

[8] 国家市场监督管理总局国家标准化管理委员会. 并网电源一次调频技术规定及试验导则: GB/T 40595—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Guide for technology and test on primary frequency control of grid-connected power resource: GB/T 40595—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[9] Bian Yuankai, Wyman-Pain H, Li Furong, et al. Demand side contributions for system inertia in the GB power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3521-3530.

[10] Cai Guowei, Wang Bo, Yang Deyou, et al. Inertia estimation based on observed electromechanical oscillation response for power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4291-4299.

[11] Yang Deyou, Wang Bo, Cai Guowei, et al. Data-driven estimation of inertia for multiarea interconnected power systems using dynamic mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(4): 2686-2695.

[12] Panda R K, Mohapatra A, Srivastava S C. Online estimation of system inertia in a power network utilizing synchrophasor measurements [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3122-3132.

[13] Schiffer J, Aristidou P, Ortega R. Online estimation of power system inertia using dynamic regressor extension and mixing [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4993-5001.

[14] Zhu Jiebei, Booth C D, Adam G P, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1277-1287.

[15] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
Yuan Xiaoming, Cheng Shijie, Hu Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395. (in Chinese)

[16] 吴馥云, 程卫, 李高宁, 等. 基于模型预测的光伏参与电网调频方法研究[J]. 电气工程学报, 2023, 18(3):

348-357.

Wu Fuyun, Cheng Wei, Li Gaoning, et al. Research on the method of photovoltaic participation in grid frequency regulation based on model prediction control [J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(3): 348-357. (in Chinese)

[17] Soni N, Doolla S, Chandorkar M C. Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1830-1838.

[18] 刘洋, 邵广惠, 张弘鹏, 等. 新能源参与系统一次调频分析及参数设置[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 683-689.

Liu Yang, Shao Guanghui, Zhang Hongpeng, et al. Analysis of renewable energy participation in primary frequency regulation and parameter setting scheme of power grid [J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 683-689. (in Chinese)

[19] 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.

Yue Jiahui, Zhang Xinyan, Zhou Peng, et al. Virtual synchronization control strategy for double-fed wind turbines based on adaptive inertia damping [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(9): 40-48. (in Chinese)

[20] Johnson J, Neely J C, Delhotal J J, et al. Photovoltaic frequency-watt curve design for frequency regulation and fast contingency reserves [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2016, 6(6): 1611-1618.

[21] 王宝财, 孙华东, 李文锋, 等. 考虑动态频率约束的电力系统最小惯量评估[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 114-127.

Wang Baocai, Sun Huadong, Li Wenfeng, et al. Minimum inertia estimation of power system considering dynamic frequency constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 114-127. (in Chinese)

[22] Kumar V, Singh M. Derated mode of power generation in PV system using modified perturb and observe MPPT algorithm [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(5): 1183-1192.



叶诚炜

作者简介：

叶诚炜(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：新型电力系统的主动支撑技术。E-mail：yechengwei@hdu.edu.cn。

何震(1991—)，男，通信作者，博士，讲师。研究方向：新型电力系统的主动支撑技术，模块化多电平变换器及其在高压直流输电中的应用。E-mail：hezhen_hz@hdu.edu.cn。

曾平良(1962—)，男，博士，教授。研究方向：电力系统分析与规划，分布式电源，电力市场。E-mail：plz@hdu.edu.cn。

杭丽君(1979—)，女，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：电力电子与电机拖动。E-mail：ljhang@hdu.edu.cn。

刘颖明(1973—)，男，博士，副教授。研究方向：大规模储能技术及风电场控制技术。E-mail：13555730215@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)