

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.04.026

# 基于光伏逆变器的快速功率控制系统研究及应用

李可雨<sup>1</sup>, 王峰<sup>2</sup>, 贾红云<sup>1</sup>, 刘鑫鑫<sup>1</sup>, 蔡德胜<sup>2</sup>, 李强<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学自动化学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京丰道电力科技有限公司, 江苏 南京 210032; 3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**为使新能源功率输出能快速响应系统有功功率和无功功率平衡需求,文中提出光伏电站毫秒级功率控制的系统性方案。首先,基于光伏逆变器的功率快速交换能力,在光伏电站并网点直采电压、电流,实时监测并网点频率和电压变化,根据一次调频参数计算光伏电站有功出力。在此基础上,通过高速环网通信链路群控光伏逆变器进行有功出力,使得光伏电站具备一次调频能力。在无功功率控制方面,文中通过智能多状态序列判别算法实时计算光伏电站并网点对电力系统的阻抗,根据并网点电压波动实时群控光伏逆变器进行无功出力,使得光伏电站具备动态无功响应能力,从而完成光伏电站功率的快速控制。目前该系统已经在淮安金湖光伏电站中试运行,现场试验数据说明应用文中提出的控制系统可实现一次调频响应时间小于0.15 s,动态无功响应时间小于30 ms的指标,验证了控制系统的有效性和可行性。

**关键词:**新能源场站;逆变器;快速功率控制;动态无功响应;一次调频;现场试验

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)04-0241-07

## 0 引言

随着传统化石能源的日益紧缺,以风力发电、太阳能发电等为代表的新能源发电技术迅速发展,在全国范围内形成以新能源为主体的新型电力系统<sup>[1-2]</sup>。新能源电源的接入对电网能源供给起到了有益的补充作用,但受新能源机组特殊的发电工况影响,地区级电网运行特性发生较大变化。高比例新能源并网会显著影响电力系统的有功平衡、无功电压、暂态稳定、功角稳定性和继电保护及相关保护防御策略性能,给电力系统的运行控制带来新的挑战<sup>[3-5]</sup>。光伏新能源系统以电力电子器件为基础单元,具备快速调节功率的能力,若其能快速响应调度指令,参与系统调频调压,则有利于提升电网运行的稳定性。

在光伏电站的快速功率控制方面,文献[6]以逆变器本体为研究对象,优化逆变器无功功率的快速响应;文献[7]实现了光伏逆变器单体秒级的一次调配功率响应;文献[8]实现了光伏逆变器单体毫秒级的功率快速响应。但总体来说,当前利用光伏新能源参与电网频率控制的研究集中于单机单站调频、虚拟同步技术调频以及微电网调频等<sup>[9-12]</sup>,缺少对新能源高比例区域的新能源场站快速功率控制技术的研究。目前存在的问题主要有:(1)对新能源快速一次调频以及快速无功响应的认识不

统一、相关研究不足<sup>[13]</sup>。相关技术规程、工程实施、实验验证均停留在传统观念上,新能源场站设备一次调频能力不足,快速一次调频功能欠缺。风电、光伏等无惯性的电力电子并网电源受制于电压穿越、频率穿越,必须在1 s甚至数个周波内提供频率电压支撑,才能减少脱网风险,在系统扰动情况下保持稳定运行。(2)目前针对新能源协同开展毫秒级功率动态调节的研究还不够完善。单个新能源场站自主调节效果受制于信息有限,调节不具备系统性。

综上所述,为实现电力系统以毫秒级速度控制区域新能源的功率输出,响应系统有功功率和无功功率平衡需求,进而提升系统的稳定能力,文中将光伏电站为代表的新能源场站作为研究对象,在光伏电站部署毫秒级控制系统,从整体架构设计、站控层对电网频率电压快速感知、可靠通信以及发电单元快速响应等方面进行研究,并给出了现场系统试验情况,验证了控制系统的有效性和可行性。

## 1 现阶段光伏电站功率控制实现

### 1.1 光伏电站功率控制系统架构

光伏电站主要通过自动发电控制(automatic generation control, AGC)/自动电压控制(automatic voltage control, AVC)子站系统与光伏逆变器和静态无功补偿(static var compensator, SVC)/静止无功发生器(static var generator, SVG)等无功补偿设备组网,完成对光伏电站的功率控制<sup>[13]</sup>,其系统架构如

收稿日期:2023-04-13;修回日期:2023-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62203225)

图 1 所示。

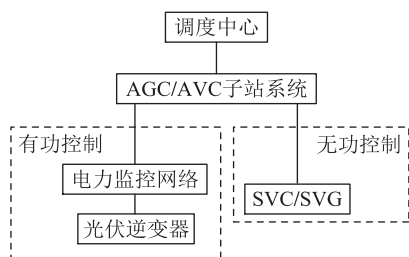


图 1 光伏电站功率控制系统示意

Fig.1 Schematic diagram of power control system of photovoltaic power station

AGC/AVC 以非实时操作系统处理相关指令,且 AGC/AVC 系统与光伏逆变器和无功补偿设备通信协议的处理速度具有一定瓶颈,这使得光伏电站整体功率控制速度较慢,一般为秒级<sup>[14]</sup>,无法满足电网紧急调度及暂态电压控制的要求。

### 1.2 功率控制

光伏电站功率控制主要分为有功功率控制和无功功率控制两部分。

有功功率控制的具体实施过程如下:首先,通过光伏区监控网络下发遥调指令到逆变器通信板卡,然后转发到逆变器执行板卡,进而驱动绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)进行功率响应<sup>[15]</sup>。AGC 与逆变器之间的通信环节在未经优化的情形下,其整体响应时间为秒级。现阶段,在光伏电站 AGC 系统的基础上增加光伏电站有功-频率下垂控制环节,可以实现光伏电站一次调频控制功能。

而无功功率控制大多采用逆变器结合电容器或动态无功补偿设备进行无功响应<sup>[16]</sup>。其中,动态无功补偿设备主要负责完成暂态电压支撑和稳态无功调节,当其无功容量不足时采用逆变器辅助调节以进行无功支撑。但动态无功补偿设备通常直挂在母线侧,运行功耗大、经济性差、易损坏且维修频率高,并且集中式的无功补偿设备损坏后无功支撑的可靠性也会变差。而辅助的逆变器无功支撑受通信环节影响,调节过程一般较长,这使得站内整体无功响应速度较慢。

## 2 快速功率控制系统

### 2.1 快速功率控制系统架构及控制流程

文中所提的快速功率控制系统架构如图 2 所示,其主要包括光伏电站、快速功率控制装置和通信网络。其中,快速功率控制装置安装在光伏电站并网点侧,具备直采并网点电压、电流,快速感知电网频率和电压变化的功能;高速且高可靠性的光纤

环型通信网络则用来在快速功率控制装置与光伏逆变器之间传送指令,其采用高可靠性面向通用对象的变电站事件(generic object oriented substation event, GOOSE)协议承载遥调指令,从而对光伏逆变器进行群控,完成对光伏电站的快速功率控制。

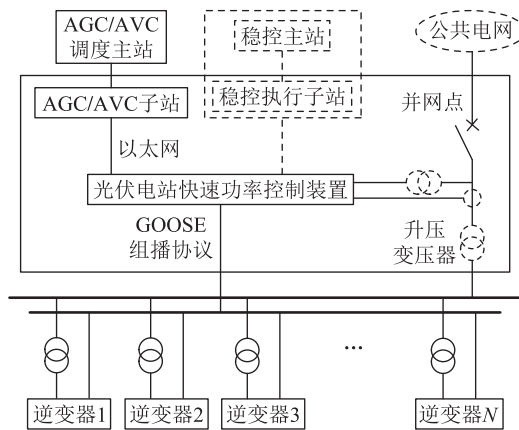


图 2 快速功率控制系统架构

Fig.2 Fast power control system architecture

快速功率控制系统须遵循以下控制流程:首先,根据并网点高压侧电压、电流信号,实时跟踪并网点电压、频率的变化;其次,根据调度主站功率指标,对越限电压或频率实时计算对应无功或有功总调节量(光伏电站须预留调频备用容量来实现有功上调)<sup>[17]</sup>;然后,根据光伏逆变器在线状态和功率可调容量进行策略制定,并实时下发无功或有功遥调指令<sup>[18]</sup>;最后,光纤环网实时转发遥调指令到光伏逆变器侧,光伏逆变器实时响应遥调指令,执行功率调节。调节结果经快速功率控制装置跟踪,最终形成闭环的功率调节过程。

### 2.2 功率调节算法

#### 2.2.1 有功调节

快速功率控制系统通过调节有功功率来参与系统的频率响应,具体通过如图 3 所示的下垂控制策略<sup>[19]</sup>来实现。其中, $P_N$ 为额定功率; $P_0$ 为有功功率初值; $a$ 为频率下扰时光伏电站调频增加出力不大于额定功率的百分比; $b$ 为频率上扰时光伏电站调频减少出力不大于额定功率的百分比; $c$ 为频率上扰时光伏电站有功功率调节最低功率百分比; $f_d$ 为快速频率响应死区值,其上下限分别为 $f_{d,up}$ 和 $f_{d,down}$ 。

在结合光伏电站一次调频参数、系统频率波动以及频率下垂特性计算得到总的有功调节量后,须快速采集逆变器侧的信息,主要包括当前有功功率、逆变器容量和逆变器状态;再考虑实际光强的波动因素对总的有功调节量进行分配,文中采用等

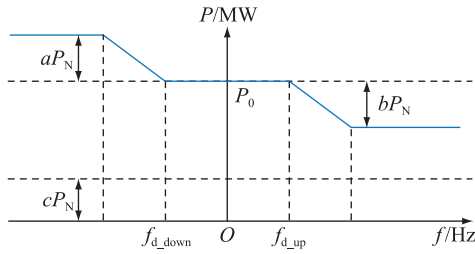


图3 光伏电站频率下垂特性

Fig.3 Frequency droop characteristics of photovoltaic power station

比例裕度分配策略。当前逆变器大多采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)算法<sup>[20]</sup>,其在预留调频备用的情况下,只能限功率运行;而在新能源高比例接入后,可以对光伏电站预留调频备用,配合样本逆变器(预测逆变器有功上限)或适当增加部分储能完成有功上调。

(1) 频率上扰。感知系统频率上扰后根据频率下垂特性计算有功调节量  $\Delta P$ ,则第  $i$  台逆变器有功目标值  $p_i$  可表示为:

$$p_i = \begin{cases} p_{0,i} - k(p_{0,i} - p_{L,i}) & k < 1 \\ p_{L,i} & k \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$k = \Delta P / \sum_{i=1}^N (p_{0,i} - p_{L,i}) \quad (2)$$

式中:  $p_{0,i}$  为第  $i$  台逆变器当前有功功率;  $p_{L,i}$  为第  $i$  台逆变器当前有功下限;  $k$  为等比例系数;  $N$  为光伏电站正常运行时的逆变器数量;  $\Delta P$  为有功调节量。

(2) 频率下扰。根据频率下垂特性计算  $\Delta P$ , 则  $p_i$  可表示为:

$$p_i = \begin{cases} \eta p_{H,i} & k \geq 1 \\ p_{0,i} + k(p_{H,i} - p_{0,i}) & k < 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $p_{H,i}$  为第  $i$  台逆变器当前有功上限;  $\eta$  为不同光伏矩阵对有功上限的校准参数,默认为 1。等比例系数  $k$  为:

$$k = \Delta P / \sum_{i=1}^N (p_{H,i} - p_{0,i}) \quad (4)$$

### 2.2.2 无功调节

快速功率控制系统通过调节无功功率来参与系统的电压响应,具体根据并网点电压、系统阻抗参数及电网目标电压、功率因数或无功目标值实时计算光伏电站无功调节量,然后根据逆变器无功裕度进行分解<sup>[21]</sup>。

考虑到光伏电站内逆变器型号及容量差异,假设第  $i$  台逆变器最大吸收无功为  $-q_{\max,i}$ ,最大发出无功为  $q_{\max,i}$ 。设置需要发出和吸收的无功分别为  $Q_c$ 、 $Q_l$ ,则逆变器无功输出目标值  $q'_i$  为:

$$q'_i = \begin{cases} q_{\max,i} & \xi_c \geq 1 \\ q_i + \xi_c (q_{\max,i} - q_i) & \xi_c < 1 \\ q_i + \xi_l (-q_{\max,i} - q_i) & \xi_l < 1 \\ -q_{\max,i} & \xi_l \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $q_i$  为第  $i$  台逆变器当前无功出力,  $i=1,2,\dots,N$ ;  $\xi_c$ 、 $\xi_l$  分别为逆变器发出和吸收的无功出力百分比。

$$\begin{cases} \xi_c = Q_c / \sum_{i=1}^N (q_{\max,i} - q_i) \\ \xi_l = Q_l / \sum_{i=1}^N (-q_{\max,i} - q_i) \end{cases} \quad (6)$$

系统初始化时,逆变器群按照功率因数 1 工作,即  $q_i = 0$ 。当系统需要无功支撑时,为避免部分逆变器满发而另一部分逆变器处于无功空载不平衡,文中采用等比例平衡分布算法分配无功调节目标值。该算法一方面可以平衡逆变器的散热,另一方面可以减少无功调节的迭代次数,缩短动态到稳态的闭环时间。

### 2.3 试点运行所采用技术

在实际工程应用中,为实现快速功率控制系统的功率调节功能,综合采用高精度频率快速测量、阻抗测量以及可靠通信等技术。

(1) 高精度频率快速测量。光伏电站参与电网一次调频时,快速功率控制装置测量电网频率既要满足快速性要求又要满足高精度要求。文中系统硬件层面采用低通滤波技术和十微秒级高速采样技术<sup>[22]</sup>,软件层面通过硬滤波算法、过零点曲线拟合技术和硬离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)算法相结合完成对电网频率的快速、高精度测量<sup>[23-24]</sup>。通过上述技术,系统在不含谐波工况下频率测量精度优于 0.001 Hz,在不同谐波工况下频率测量精度优于 0.003 Hz,实现了高精度的频率测量。

(2) 系统阻抗测量及快速电压感知。光伏电站对电网的阻抗因电站所处电网位置不同而有所差异。通过智能多状态序列判别算法计算光伏电站对电网的阻抗,为光伏电站动态无功电压调节提供技术支持。智能多状态序列判别算法定时对光伏电站进行阻抗测量和更新,无须人为干预测量,即可加速光伏电站快速功率控制系统参与电网调压的实施进度。而为实现光伏电站暂态电压支撑,系统须快速感知电网电压跌落或抬升过程。快速功率控制系统采用瞬时采样点电压拟合技术实现十毫秒级快速电压计算功能和电压无功算法。

(3) 光伏区通信可靠性实现。文中设计系统主

要从通信冗余性和实时可靠通信两方面进行完善。提高通信冗余性主要通过以下措施来实现:首先,在二次设备与光伏逆变器之间采用光纤环网,且光纤环网节点设备采用双向实时数据交换,设备节点能智能判别重复报文,筛选优先到达的有效报文。采用光纤环网后,若出现光纤单链路故障,其通信不会受到影响。此外,快速功率控制接口装置采用网络二层订阅过滤报文的方法,可以有效降低环网通信带宽。而为实现实时可靠通信,文中采用GOOSE组播协议,结合GOOSE重发机制<sup>[25-26]</sup>,进一步提高通信可靠性和稳定性。

### 3 现场试验

#### 3.1 一次调频试验

光伏电站一次调频参数可根据当地电网需求进行定义,现场试验参数设定中,选取 $a$ 、 $b$ 和 $c$ 皆为10%; $f_d$ 为0.06 Hz;系统额定频率为50 Hz;光伏快速响应频率调差率为3%。为验证所提快速功率控制策略的有效性,文中设置了如下4种工况。工况1:出力区间为 $20\%P_N \sim 30\%P_N$ ,限功率;工况2:出力区间为 $20\%P_N \sim 30\%P_N$ ,不限功率;工况3:出力区间为 $50\%P_N \sim 90\%P_N$ ,限功率;工况4:出力区间为 $50\%P_N \sim 90\%P_N$ ,不限功率。

##### 3.1.1 频率阶跃扰动

首先,在4种工况下采用阶跃扰动信号进行频率阶跃扰动试验,测试光伏电站在阶跃扰动情况下的响应特性,测试结果如表1所示。其中,T1、T2分别为工况1下的阶跃上扰和下扰;T3为工况2下的阶跃上扰;T4、T5分别为工况3下的阶跃上扰和下扰;T6为工况4下的阶跃上扰。可以看出,在不同工况下控制偏差均较小,说明所设计的快速功率控制系统能快速准确地调节有功功率输出。

表1 光伏电站频率阶跃扰动试验结果  
Table 1 Frequency step disturbance test results of photovoltaic power station

频率扰动类型	阶跃目标值/Hz	响应滞后时间/s	响应时间/s	调节时间/s	阶跃前有功/MW	阶跃后有功/MW	控制偏差/%
T1	50.21	0.07	0.11	0.83	5.49	3.54	0.02
T2	49.79	0.09	0.12	0.89	5.50	7.45	0.02
T3	50.21	0.05	0.08	1.01	5.60	3.64	0.04
T4	50.21	0.10	0.15	0.40	14.02	12.06	0.04
T5	49.79	0.08	0.12	0.69	12.02	14.04	0.34
T6	50.21	0.05	0.11	0.35	15.51	13.55	0.04

##### 3.1.2 模拟实际频率扰动

为模拟实际电网中的频率扰动,文中分别在工

况1和工况3下采用电网频率扰动信号,测试光伏电站在模拟电网实际频率扰动情况下的特性。

图4、图5分别为电网频率上扰和下扰的试验曲线。通过对比可以发现,实际输出功率能够快速追踪理论值变化。

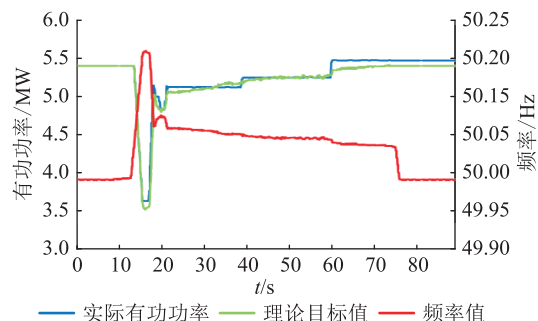


图4 模拟电网频率上扰

Fig.4 Simulation of frequency increase caused by the disturbance

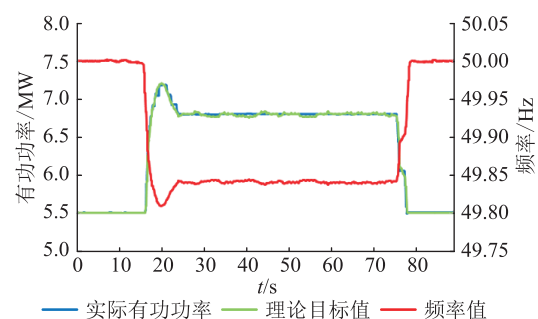


图5 模拟电网频率下扰

Fig.5 Simulation of frequency decrease caused by the disturbance

#### 3.2 动态无功响应试验

图6、图7分别为母线电压抬升和跌落2种工况下的无功动态响应曲线,其中电压抬升513 V经过27.12 ms后恢复,电压最大跌落508 V经过23.15 ms后恢复,电压过冲小于 $0.5\%U_N$ ,稳态调节精度小于 $0.2\%U_N$ ,其中 $U_N$ 为并网点正序电压。

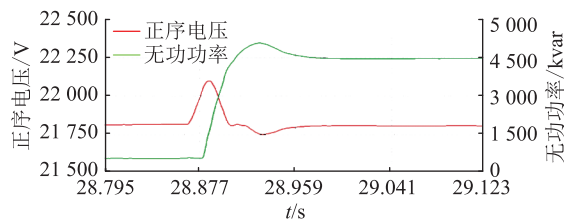


图6 电压抬升时无功动态响应曲线

Fig.6 Reactive dynamic response curve during voltage rise

#### 3.3 现场运行数据分析

系统调试完毕后,进一步测试了挂网运行的实际效果。图8展示了单日的实际运行曲线。由图8

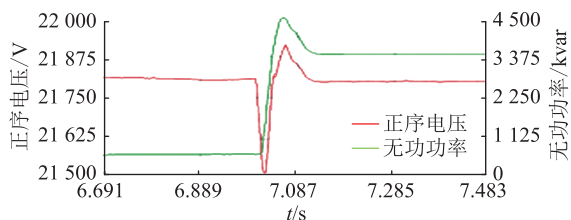


图7 电压跌落时无功动态响应曲线

Fig.7 Reactive dynamic response curve under voltage drop

可知,并网点电压严格跟踪电网目标电压曲线,精度小于 $0.2\%U_N$ ,工作时间内无任何电压越限点。

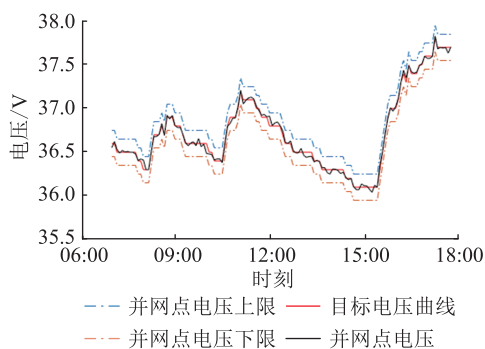


图8 系统电压运行曲线(单日)

Fig.8 System voltage operation curves (single day)

图9为一周的系统运行曲线,可知其完全满足电网对光伏电站电压考核要求。

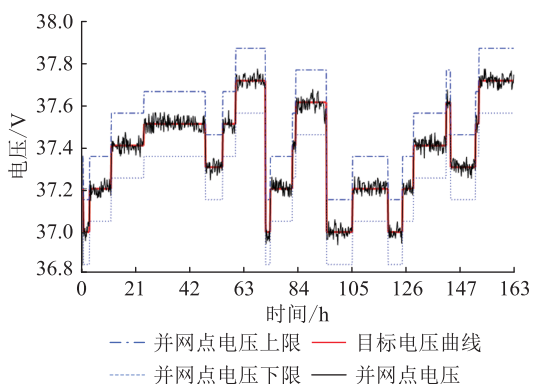


图9 系统电压运行曲线(一周)

Fig.9 System voltage operation curves (one week)

文中所设计的快速功率控制系统在现场试验中已经顺利通过了中国电力科学研究院有限公司的检测试验,试验各项结果均满足相应标准<sup>[27-28]</sup>。其中,一次调频频率阶跃扰动试验最大响应时间为 $0.15\text{ s}$ ,最大调节时间为 $1.73\text{ s}$ ,最大控制偏差为 $0.34\%$ ;模拟实际网频最小出力响应合格率为 $73.71\%$ ,最小出力积分电量合格率为 $96.53\%$ ,最小合格率为 $85.12\%$ ;动态无功响应时间在吸收和发出无功2种工况下分别为 $27.12\text{ ms}$ 和 $23.15\text{ ms}$ ;无功功率控制能力最大调节精度为 $1.91\%$ ,最大响应时

间为 $24.36\text{ ms}$ 。

## 4 结语

文中主要围绕新能源接入对电力系统频率、电压稳定的影响展开分析,并给出光伏电站快速功率控制系统方案,具体介绍了方案的设计、实现、现场试验过程和试验结果。实验结果显示,一次调频响应时间不大于 $0.15\text{ s}$ ,响应速度达到了国内领先水平,动态无功响应时间小于 $30\text{ ms}$ ,满足电网对新能源动态无功响应的要求,使得新能源尤其是光伏电站参与电网调频调压成为可能,为电网电压、频率稳定提供基础技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 陈维江,赵国亮.以新能源为主体的新型电力系统关键技术和装备[J].全球能源互联网,2022,5(1):1.  
CHEN Weijiang, ZHAO Guoliang. Key technology and equipment of new power system based on renewable energy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(1): 1.
- [2] 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.
- [3] 张军六,李佳朋,唐震,等.基于本地测量的高比例新能源电力系统不平衡功率估算与附加功率控制策略[J].电力科学与技术学报,2022,37(3):50-60.  
ZHANG Junliu, LI Jiapeng, TANG Zhen, et al. Local measurement based unbalanced active power estimation and supplementary power modulation for power systems with high proportions of renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 50-60.
- [4] 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.
- [5] 钟成元,桂前进,江千军,等.数据驱动的高比例新能源发电集群分布式电压控制[J].全球能源互联网,2022,5(3):254-263.  
ZHONG Chengyuan, GUI Qianjin, JIANG Qianjun, et al. Data-driven distributed voltage control for high-penetration renewable power clusters without complete model[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 254-263.
- [6] 陈燕东,罗安,陈智勇,等.一种快速无功支撑的阻容性逆变器并联控制方法[J].中国电机工程学报,2014,34(30):5296-5305.  
CHEN Yandong, LUO An, CHEN Zhiyong, et al. A rapid reactive power control method for parallel inverters using resistive-capacitive output impedance[J]. Proceedings of the CSEE,

- 2014,34(30):5296-5305.
- [7] 孙晓强,刘鑫,程松,等. 光伏逆变器参与西北送端大电网快速频率响应能力实测分析[J]. 电网技术,2017,41(9):2792-2798.
- SUN Xiaoqiang,LIU Xin,CHENG Song,et al. Actual measurement and analysis of fast frequency response capability of PV-inverters in northwest power grid[J]. Power System Technology,2017,41(9):2792-2798.
- [8] HOKE A F,SHIRAZI M,CHAKRABORTY S,et al. Rapid active power control of photovoltaic systems for grid frequency support[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2017,5(3):1154-1163.
- [9] 李东东,孙雅茹,徐波,等. 考虑频率稳定的新能源高渗透率电力系统最小惯量与一次调频容量评估方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(23):54-61.
- LI Dongdong,SUN Yaru,XU Bo,et al. Minimum inertia and primary frequency capacity assessment for a new energy high-permeability power system considering frequency stability [J]. Power System Protection and Control,2021,49(23):54-61.
- [10] 倪泽龙,林钰钧,王治涛,等. 基于模型预测的虚拟同步机控制储能调频研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(14):85-93.
- NI Zelong,LIN Yujun,WANG Zhitao,et al. Research on frequency regulation of VSG controlled energy storages based on model predictive control [J]. Power System Protection and Control,2022,50(14):85-93.
- [11] 万天虎,李华,唐浩,等. 基于多主站协调控制的光伏电站一次调频应用研究[J]. 智慧电力,2021,49(4):37-43.
- WAN Tianhu,LI Hua,TANG Hao,et al. Application & research on primary frequency modulation of photovoltaic power station based on multi-master coordinated control [J]. Smart Power,2021,49(4):37-43.
- [12] 赵晶晶,吕雪,符杨,等. 基于可变系数的双馈风机虚拟惯量与超速控制协调的风光柴微电网频率调节技术[J]. 电工技术学报,2015,30(5):59-68.
- ZHAO Jingjing,LYU Xue,FU Yang,et al. Frequency regulation of the wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIC cooperative strategy with variable coefficients between virtual inertia and over-speed control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(5):59-68.
- [13] 刘双,张建周,王汉林,等. 考虑多无功源的光伏电站两阶段无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(11):120-125,168.
- LIU Shuang,ZHANG Jianzhou,WANG Hanlin,et al. Two-stage reactive power and voltage coordinated control strategy for photovoltaic power station considering multiple reactive power sources [J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(11):120-125,168.
- [14] HAN X N,AI X,SUN Y Y. Research on large-scale dispatchable grid-connected PV systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2014,2(1):69-76.
- [15] 王淑超,段胜朋,王健,等. 光伏电站面向快速频率响应的优化控制技术研究与实践[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(14):59-70.
- WANG Shuchao,DUAN Shengpeng,WANG Jian,et al. Research and practice of fast frequency response oriented control optimization technology of PV power stations [J]. Power System Protection and Control,2019,47(14):59-70.
- [16] 甘雯,石博隆,姚瑛,等. 分布式光伏电站监控装置的研究和设计[J]. 浙江电力,2022,41(6):37-44.
- GAN Wen,SHI Bolong,YAO Ying,et al. Research and design of a monitoring device for distributed photovoltaic power station [J]. Zhejiang Electric Power,2022,41(6):37-44.
- [17] 刘轶,王景钢. 大型光伏电站并网暂态特性研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(7):182-187.
- LIU Yi,WANG Jinggang. Analysis of transient characteristics when large-scale photovoltaics are connected to a power system [J]. Power System Protection and Control,2021,49(7):182-187.
- [18] 赵晋泉,邓晖,吴小辰,等. 基于广域响应的电力系统暂态稳定控制技术评述[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(5):1-9.
- ZHAO Jinquan,DENG Hui,WU Xiaochen,et al. Review on power system transient stability control technologies based on PMU/WAMS[J]. Power System Protection and Control,2016,44(5):1-9.
- [19] 高生凯,曹炜,张旭航. 应用动态虚拟阻抗的光伏微网新型下垂无功补偿控制[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(3):176-181.
- GAO Shengkai,CAO Wei,ZHANG Xuhang. Novel droop reactive power compensation control of photovoltaic microgrid using dynamic virtual parameters[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2021,42(3):176-181.
- [20] 何伟,陈拓新,赵伟哲,等. 基于改进下垂控制策略的有功备用式光伏系统[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(5):251-260.
- HE Wei,CHEN Tuoxin,ZHAO Weizhe,et al. Active power standby photovoltaic system based on improved droop control strategy[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2021,42(5):251-260.
- [21] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 光伏发电并网逆变器技术要求:GB/T 37408—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements for photovoltaic grid-connected inverter: GB/T 37408-2019[S]. Beijing:Standards Press of China,2019.
- [22] 彭世康,马红伟,曹立伟,等. 基于动态响应参数的新能源发电站 AVC 系统[J]. 电网技术,2019,43(9):3328-3336.
- PENG Shikang,MA Hongwei,CAO Liwei,et al. AVC system of renewable power station based on dynamic response parameters [J]. Power System Technology,2019,43(9):3328-3336.
- [23] 余英,王健,朱正国,等. 浅析电力系统中高速采样系统的软硬件技术[J]. 电气自动化,2015,37(5):66-69.

- YU Ying, WANG Jian, ZHU Zhengguo, et al. A brief analysis of software and hardware technology in the high-speed sampling system of the electric power system[J]. *Electrical Automation*, 2015, 37(5): 66-69.
- [24] 岑光. 基于 FPGA 的 FIR 数字滤波器研究与设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.  
CEN Guang. Digital FIR filter research and design based on FPGA[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [25] 孔心怡, 张佑鹏, 应含含, 等. 基于改进 UDP 传输方式的无线智能分布式馈线自动化技术[J]. *供用电*, 2021, 38(9): 71-75, 95.  
KONG Xinyi, ZHANG Youpeng, YING Hanhan, et al. Wireless intelligent distributed feeder automation technology based on improved UDP transmission mode[J]. *Distribution & Utilization*, 2021, 38(9): 71-75, 95.
- [26] 樊轶, 周俊, 刘退龄, 等. 基于 GOOSE 协议和边缘计算的配电网设备监测系统[J]. *电力信息与通信技术*, 2021, 19(12): 61-68.  
FAN Yi, ZHOU Jun, LIU Xialing, et al. Distribution network equipment monitoring system based on GOOSE and edge computing[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2021, 19(12): 61-68.
- [27] 国家能源局. 电力系统网源协调技术规范: DL/T 1870—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.  
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Technical specification for power grid and source coordination: DL/T 1870-2018[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 光伏电站无功补偿技术规范: GB/T 29321—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for reactive power compensation of PV power station: GB/T 29321-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.

作者简介:



李可雨

李可雨(2002),女,研究方向为电气工程及其自动化(E-mail:1604578571@qq.com);  
王峰(1974),男,学士,高级工程师,从事继电保护、新能源及配电自动化技术相关工作;  
贾红云(1979),女,博士,副教授,研究方向为电机系统。

## Research and application of rapid power control system based on photovoltaic inverter

LI Keyu<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>2</sup>, JIA Hongyun<sup>1</sup>, LIU Xinxin<sup>1</sup>, CAI Desheng<sup>2</sup>, LI Qiang<sup>3</sup>

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Nanjing Harvest Road Power Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** A systematic solution for millisecond-level power control in photovoltaic (PV) power stations is proposed to enable the new energy power output to rapid response to the balance of active and reactive power demands in the system. Firstly, utilizing the fast power exchange capability of the PV inverter, real-time voltage and current are collected at the grid connection point of the PV power station, and the frequency and voltage changes are monitored to calculate the active power output of the PV power station based on primary frequency regulation parameters. Based on this, the PV inverters are controlled in a group via a high-speed interconnection communication network to achieve primary frequency regulation capability. In terms of reactive power control, an intelligent multi-state sequence discrimination algorithm is employed to calculate the impedance of the grid connection point of the PV power station to the power system in real time. Based on the voltage fluctuation at the grid connection point, the PV inverters are controlled in a group to achieve dynamic reactive power response, thereby achieving rapid power control of the PV power station. The proposed control system has been piloted at the Jinhu PV power station in Huai'an, and the on-site test data shows that the control system can achieve a primary frequency regulation response time of less than 0.15 s and a dynamic reactive power response time of less than 30 ms, thereby verifying the effectiveness and feasibility of the control system.

**Keywords:** new energy stations; inverter; rapid power control; dynamic reactive power response; primary frequency regulation; on-site test

(编辑 陆海霞)