doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.05.033

# 基于微控制器的光伏发电与并网系统优化设计

彭磊1,吴丫丫1,祁琛峰1,李天钰2,刘硕2

(1.国网甘肃省电力公司 陇南供电公司,甘肃 陇南 746000; 2.兰州理工大学 计算机与通信学院,甘肃 兰州 730050)

摘 要:针对光伏发电数据采集不准确以及光伏设备出现故障而导致并网系统产生安全问题的情况与实际需求,提 出了一种基于微控制器的创新设计方案,将电子机械技术、物联网技术和传感器技术相结合,对光伏发电系统进行系 统化的软硬件设计。通过设计和实验完成了主控模块、分模块数据采集和通信模块之间的连接,验证了系统的完整 性和准确性,成功解决了光伏发电系统数据采集不准确的问题,为光伏发电系统的智能化和并网安全性提供了可靠 的解决方案。针对光伏发电与并网系统可能出现的低压穿越问题,采用撬棍电路进行电路保护,并对整体电网进行 改造。这一设计在提升电力设备智能化和并网智能水平方面具有显著的应用价值。

文献标识码:A 文章编号:1007-4414(2024)05-0127-05

Photovoltaic Power Generation and Grid-Connected System based on Microcontroller

PENG Lei<sup>1</sup>, WU Ya-ya<sup>1</sup>, QI Chen-feng<sup>1</sup>, LI Tian-yu<sup>2</sup>, LIU Shuo<sup>2</sup>

(1.Longnan Power Supply Company of State Grid Gansu Electric Power Company, Longnan 746000, Gansu, China;
2.School of Computer and Communications, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In response to the challenges faced by the photovoltaic (PV) power generation systems regarding inaccurate data collection and safety issues in the grid-connected systems, this study proposes an innovative design solution based on micro-controller technology. By integrating electronic mechanical, Internet of Things (IoT), and sensor technologies, a systematic hardware and software design for PV power generation systems is developed. Through design and experiments, connection between the main control module, sub-module data acquisition and communication modules is completed, and the integrity and accuracy of the system are verified. This design solution successfully addresses the issue of inaccurate data collection in PV power generation systems, providing a reliable solution for the intelligence and grid safety of such systems. To mitigate the potential problem of low-voltage ride-through in PV power generation and grid-connected systems, lever circuitry is employed for circuit protection, accompanied by overall grid modifications to effectively address the issue. This design holds significant application value in enhancing the intelligence of power equipment and grid integration capabilities.

Key words: electro-mechanical; photovoltaic power generation; sensor technology; Internet of things; grid-connected system

# 0 引 言

近年来,随着对可持续能源需求的增加,人们对 清洁能源的研究和应用也在不断加速。在这个背景 下,太阳能发电作为一种重要的可再生能源备受关 注。光伏发电系统作为利用太阳能发电的主要方式, 在解决城市电力需求方面发挥着重要作用,特别是在 城市快速扩展、电力需求急剧增长的情况下,其重要 性更甚。通过光伏发电系统,可以有效地将太阳能转 化为电能,并且其与城市电网相连,因此可为城市提 供稳定可靠的清洁能源。然而,目前光伏发电系统存 在数据采集不准确的问题,导致工作人员无法获得准 确的数据,可能会错过检修时间等重要信息。同时, 当光伏发电设备出现问题时,可能会导致并网点电压 下降,因此必须确保在电压下降期间光伏发电系统不 会脱网并能继续正常运行。 笔者致力于解决光伏发电系统中数据采集和电 压跌落问题,并提出了一种改进方案。利用微控制器 和传感器对影响因素进行光伏数据汇总,在系统出现 电压跌落问题时,采用撬棍电路对系统进行保护,以 确保光伏发电系统能够稳定地完成低压穿越。该方 案综合运用了传感器、编码器和撬棍电路等技术手 段,从而提高了系统对低压穿越问题的应对效率。此 改进方案可为光伏发电系统的优化提供可行和有效 的解决方案<sup>[1-3]</sup>。

#### 1 系统总体设计思路

此研究在对光伏发电设备分析的基础上,确定了 影响光伏发电的基础数据,并对光伏发电设备与并网 系统进行了研究。系统整体分为三部分,第一部分是 硬件部分设计,从光伏发电的电流、电压这些基础数 据分析出影响光伏发电的因素,利用传感器技术对其 进行数据收集,在设计光伏发电与并网系统时,需要 选择一款主控模块,这个主控模块具有处理多种数据 的能力,可以将各种传感器采集到的数据进行数字化 处理(数模转换),以完成对硬件设备的数据采集工 作。这种主控模块可以同时处理多种类型的数据,例 如电信息、发电量、温湿度等,从而实现了系统对各种 数据的集中管理和处理。第二部分是并网系统设计, 利用撬棍电路对其进行低压穿越,从而解决光伏发电 出现的电压跌落的问题。第三部分是软件设计,对整 个系统进行软件设计,以实现软硬件结合的智能设备 的完整设计<sup>[4-6]</sup>。

# 1.1 硬件部分设计

(1) 主控模块部分

在光伏发电与并网系统中,各个传感器采集到的 数据需要进行数字信号和模拟信号之间的转换,这就 需要一个低功耗且处理能力高的主控芯片来实现这 个功能。因此,文中选择了 STM32 系列芯片中的 STM32F103C8T6作为主控芯片,此芯片能够满足对 传感器数据进行数模转换和处理的要求。

(2) 温湿度数据采集模块

DHT11 温湿度传感器是一种用于测量温度和湿 度的模块,并可提供标准的数字信号输入输出。由于 其内置校准和标准化设计,因此该传感器的输出信号 具有高度的精确性和可靠性,同时具备稳定性高和响 应迅速的优点。另外,DHT11 传感器无需外接部件 即可直接连接到 STM32 芯片,且功耗非常低,在应用 中具有便捷性和高效性。

(3) 电信息数据采集模块

为了处理设备上较多的传感器数据,文中选择了 一个自带 MCU 的 HLW8023 模块,专门用于电参数 的收集。HLW8032 模块是可以对交流电的电压、电 流和有功功率进行采集,通过这些数据的收集可以计 算出功率和累计产生的电量。

(4) 光强数据采集模块

设备使用的光强度传感器为 BH1750,这是一种 数字型光强度传感器集成电路,适用于两线式串行总 线接口。它能根据收集的光线强度数据调整液晶或 键盘背景灯的亮度,具有高分辨率和较大范围的光强 度探测能力。BH1750的内部结构简单,由光敏二极 管、运算放大器、ADC 采集和晶振等组成,具有误差 变动小、对红外线的敏感性小的特点。

(5) 风速数据采集模块

文中采用的风速传感器为 Adafruit 风速计,其为 转杯式设计,工作原理是利用风杯的旋转驱动内部的 发电机产生与风速成正比的电压输出。传感器采用 三个风杯,可以在风的作用下水平旋转,适用于各种 风速测量需求。

(6) 灰尘数据采集模块

此设备是在西北地区开发,当灰尘附着在太阳能 板上时会影响太阳辐射,从而影响发电的功率。文 中使用的灰尘传感器型号为 GP2Y10.其工作原理 是传感器中的小孔可以让空气在里面自由流通,其 内部带有光学设备,通过空气中灰尘的折射进行数 据采集。

(7) 通信模块

LET 4G 是目前远程环境监控的较佳解决方案, 采用 SIM7600 模块实现。该模块支持 LTE 无线通 信,覆盖多频段 LTE-TDD/LTE-FDD/HSPA +/TD-SCDMA 和双频段 GSM/GPRS/EDGE,可实现高达 150 Mbps 的 LTE CAT4 下行链路数据传输。SIM7600 模块简单易用,只需插入 SIM 卡、GPS 天线和两根 4G -GSM 天线,接通电源即可工作,其 STALED 蓝色指 示灯亮起表示设备正在工作中。

#### 1.2 并网系统设计

实地测试中考虑到光伏电力设备出现故障可能 引起并网点电压下降的情况,为了确保在电压下降期 间光伏发电设备能够继续供电而不脱网,文中选择了 电路分析中的撬棍电路作为解决方案。撬棍电路是 一种电源保护电路,主要用于快速切断电路,以防止 电压或电流超过设定范围而损坏电路。

1.3 软件部分设计

对主控模块、电信息模块和通信模块进行软件部 分编写,分别对传感器接入的引脚进行初始化,对并 网中的编码器进行数据书写,设置连接电网系统的自 动控制程序,并对电网中的并网信号进行设置。

#### 硬件设计 2

基于 STM32 的光伏发电与并网系统的硬件设计 流程主要包括三个部分:数据收集、通信协议和数据 接收。首先,根据实地考察确定需要收集的数据,包 括电压、电流、温湿度、光强、风速和灰尘等。然后,利 用电信息采集模块、温湿度传感器、光强传感器、风速 传感器和灰尘传感器等进行数据收集。最后,收集到 的数据通过通信协议传输,最终工作人员可在 PC 端 接收和查看光伏发电的实时数据,并为工作人员提供 实时数据更新信息。系统设备的总体架构如图 1 所示。

# 2.1 主控模块

文中采用的通信模块为 STM32F103C8T6,该模 块配备了两个晶振,可以提供稳定的时钟源,符合低 功耗设计的要求。为了确保系统稳定上电,设置了复 位电路,使系统在上电时自动复位。在连接方面,主 控模块的 PAO 模拟口接风速传感器, PA1 接温湿度

· 128 ·

传感器,PA2 接灰尘传感器。主控模块的 A9 和 A10 引脚带有 RX 和 TX 功能,分别与电信息模块反接,以 确保模块间通信。通信模块和光强模块采用引脚复 用技术连接,具体连接方式如图 2 所示。



#### 2.2 数据采集模块

#### 2.2.1 电信息数据采集模块

该传感器共有 8 个引脚,但在文中仅利用了其中 的 VDD、GND、TX、RX 四个引脚。首先,将 220 V 交 流电的一根火线接地,另一根连接到 VDD,以建立电 路回路,并通过蓝色指示灯确认模块处于正常运行状 态。随后,将主控模块的 A9 引脚连接到 HLW8032 的 TX 引脚,A10 引脚连接到 HLW8032 的 RX 引脚。 经过电信息模块的数据传输到 STM32 中,再由主控 模块通过通信模块上传至目标端。在与电网连接时, 需要使用变压器实现电网连接,并通过电阻对采集的 电信息进行限制,以确保电路的安全性,避免发生 故障。

## 2.2.2 温湿度数据采集模块

将 DHT11 传感器与 VCC 和 GND 分别与开发板 的电源和地相连,而 DATA 数据接口连接至主控模块 的 PA1 接口。将传感器采集到的温度和湿度数据通 过 DATA 数据接口传输至主控模块。在主控模块中, 这些数据被接收并存储起来,以备后续处理和传输之 用。接着,经过主控模块的处理,数据被发送到连接 的 4G 模块。4G 模块负责将经过处理的数据发送至 PC 端,以供进一步分析和监测。这个过程实现了从 传感器采集数据到数据最终被 PC 端接收的完整流 程,确保了温湿度数据的及时传输和利用,使其实现 实时监测和分析。为了确保能准确采集到太阳能板 上的实时温湿度数据,文中采用焊接方式将温湿度传 感器固定在太阳能板上。这种安装方式可确保传感 器与太阳能板的稳定连接,从而保证了数据采集的准 确性和可靠性。通过这样的设计,系统可以及时、精 确地监测到太阳能板所处环境的温湿度变化,为光伏 发电系统的运行提供重要的数据支持。

#### 2.2.3 光强数据采集模块

BH1750 传感器内部的光敏二极管用于接收光 信号,运算放大器用于放大信号,ADC 采集器则负责 将模拟信号转换为数字信号,晶振用于提供稳定的时 钟源。这些组件共同工作,使传感器能够准确地测量 环境光强度。它的设计能够适应广泛的光照范围,相 当于 1-65535lx,并且具有最小误差变动在 20%的特 性,同时对红外线的影响较小。为了实现数据交流, 文中将主控模块 STM32 的 A9 引脚连接到 BH1750 的 TX 引脚,而 A10 引脚连接到 BH1750 的 RX 引脚, 从而使得两个模块之间可以进行有效的数据传输和 通信。

## 2.2.4 风速数据采集模块

风速数据采集需用到 Adafruit 风速计传感器以 及 MT360 升压转换器模块。首先, Adafruit 风速计传 感器具有 VCC、GND 和 DATA 三个引脚,需要连接到 主控模块以采集风速数据。由于其工作电压范围在 7~24 V,不符合 STM32 的供电电压要求,因此需要使 用 MT360 升压转换器模块将电池的 3.7 V 升至 7.5 V。在实际操作中,首先将电池连接至 MT360 的 输入口,并通过调节旋转电位器来确保输出电压达到 7.5 V。然后,将风速计的 VCC 引脚连接到 MT360 升 压至 7.5 V 的输出端,GND 连接到主控模块的 GND, DATA 连接到主控模块的模拟口 PAO。最后,为了进 行风力数据的采集,需要将传感器的连接线延长并固 定在光伏发电设备的外部。

#### 2.2.5 灰尘数据采集模块

在考虑到气候条件的情况下,为了确保太阳能板 的太阳辐射不受影响,向设备中添加了灰尘传感器 GP2Y1010。灰尘传感器的作用是采集太阳能板表 面的灰尘情况,以便及时清理,保持太阳能板的高 效工作状态。该传感器具有良好的耐热性,能够适 应设备所处地区的日常温度变化。连接时,将 STM32 的 VCC 与灰尘传感器的 VCC 相连,将 GND 和其 GND 连接,确保电路连通,然后将数据接收口 与 STM32 的 PA3 引脚连接。最后,将灰尘传感器 固定在太阳能板上,以确保其可以直接采集到太阳 能板表面的灰尘情况,从而有效监测和维护太阳能

· 129 ·

# 板的工作状态。

#### 2.3 通信模块

文中使用 MT360 升压转换器模块来将风速计中 电池的输出电压与通信模块电压升压至系统所需的 电压水平。系统利用电池连接到 MT360 升压转换器 的输入端口,并调节其参数以输出所需的电压,以获 得稳定的电源供应,确保风速计与通信模块的正常工 作。首先,通过调节 MT360 转换器的旋钮,将输出电 压调整为3.7 V。通信模块只需要连接到主控模块的 TX、RX、VCC 和 GND 四个引脚。主控模块的 A9 引 脚连接到通信模块的 TX 引脚, 而 A10 引脚连接到通 信模块的 RX 引脚。此外, VCC 引脚连接到经过升压 后的 3.7 V 电源, 而 GND 引脚则连接到地。接下来, 将 SIM 卡插入主控模块,并连接 GPS 天线和 4G-GSM 天线。同时,将 SD 卡插入 SIM7600 的 SD 卡槽。 当主控模块接通电源后, SIM7600通信模块的 STALED 蓝色指示灯会点亮,表示模块正在工作,即 完成了通信模块的启动和连接过程。最后,启动 TCP 连接,使其连接到工作人员的 PC 端,即可正常进行 通信。

## 3 并网系统设计

光伏设备发生故障时,可能导致并网电压出现明显波动,这种情况下需要立即停止光伏设备对电网的供电,以确保光伏发电设备和并网系统的安全使用。因此,需要设计一种保护电路系统来监测并网电压的波动,并在检测到异常情况时立即切断光伏发电设备的供电,以防止可能产生的损坏或安全风险<sup>[7-8]</sup>。

#### 3.1 撬棍电路

撬棍电路的基本思想是在电压超过负荷值时,通 过短路的方式将电压降低,以保护电路不受损坏。然 而,为了确保电源在短路状态下不被损坏,需要保证 电源能够承受短时间的短路。为此,文中在撬棍电路 中引入了晶闸管。晶闸管不会自动导通,但可以通过 控制其电压或电流来使其导通。通过在 Matlab 中的 Simulink 建立模型并进行仿真,验证了该改进后的电 路设计的有效性<sup>[9]</sup>。橇棍电路如图 3 所示。



### 3.2 整体并网系统设计

首先将变压器与电信息采集模块进行连接,确保 电信息可以被检测到,这时将 STM32 接一个编码器, 将其光伏采集到的各类信息进行编码并生成并网信 号。编码器生成的并网信号连接并网开关,开关下接 电压跌落发生装置。另一端的通信模块还会接一个 数模检测模块,数模检测模块快接调压器。如图 4 所 示为整体并网系统,此时并网系统可以正常工作。



图 4 整体并网系统设计

# 4 软件设计

设备的软件设计主要分为三个部分:主控模块软件设计、数据采集分模块软件设计和通信模块软件设计。软件设计的主要目的是确保采集系统和通信系统能够正常工作。

## 4.1 主控模块软件设计

文中采用 STM32 作为主控制模块,在软件设计时,首先需要进行引脚初始化,以确保与通信模块 SIM7600 的连接正常。初始化后在循环函数中实现 了传感器数据的连续采集,以确保及时获取环境数 据。最后,利用 TCP 协议数据传输,以保证数据可靠 传送和实现通信功能。

#### 4.2 数据采集分模块软件设计

(1) 电信息数据采集软件设计

由于电信息模块是现成的,因此需要进行初始 化,包括 RX 和 TX 的设置。首先定义了电压和电流 的变量,以便在程序中进行操作和存储。然后,利用 模块内置的数学公式,设置了电压和电流的系数,并 将传感器采集的原始数据转换成实际的电压和电流 数值。接着,在循环函数中设置了 K 值,用来控制数 据更新的频率或者其他相关参数的设定。再将数据 转换成十进制格式。将数据传输至主控模块中,在主 控模块中生成对象,用来保存采集到的电信息数据, 并在需要时传递给其他模块或设备。最后,通过通信 模块进行数据传递,将处理后的电信息数据发送至 PC。同时,对传输的数据进行初始化,确保传输的数 据格式和内容符合要求,使其能够被接收方正确解析 和处理。 (2) 温湿度数据采集软件设计

首先对模拟口初始化,以确保其准备好接收数据。然后,在主程序的循环体中编写代码,确保每次 循环都会进行初始化操作。在初始化过程中,设置波 特率等参数,并定义存储位置。最后,通过通信模块 将数据传递到目标设备或平台。

(3) 光强数据采集软件设计

对波特率进行设置,在循环结构中对光强值进行 初始化,初始化后对光强进行计算,因为是模拟值,这 里需要写一个数模转换协议,最后输出光强值,设置 500 的延迟。

(4) 风速数据采集软件设计

对模拟口初始化后,对主控模块中的风速传感器 进行初始化操作,以确保传感器能够正常工作并准确 地采集风速数据。这样,传感器就可以与通信模块进 行数据交换,将采集到的风速数据传输至目标设备或 系统,实现数据的实时传输和监测。

(5) 灰尘数据采集软件设计

对主控模块中的灰尘传感器进行了初始化与配置,以确保其正常运行并实现与通信模块的数据交换。通过这个过程,系统能够可靠地收集灰尘数据,并在需要时将其传输至其他设备,以便对振动情况进行监测和分析。

# 4.3 通信模块软件设计

首先,对通信模块进行初始化设置,包括配置通 信模块的参数、初始化通信接口等操作。然后对串口 进行初始化,其中包括设置波特率、数据位数、校验位 等参数。通过测试串口功能可以验证通信模块是否 能够正常发送和接收数据,以确保其功能完整性。在 Linux 环境下,对固件文件进行了编译和优化,以提高 系统的性能和效率,减小程序的体积并提高运行速 度。在程序启动后,设置登录点灯科技并绑定了账号 和阿里云。整个工作流程最终变成了通信模块发送 信息,并通过 TCP 协议将数据上传至 PC 端,实现了 数据的传输和通信功能<sup>[10]</sup>。

#### 5 系统性能测试与仿真结果

对传感器接收到的数据和市面上的仪器在光伏 发电设备中进行了测试,误差均在正常误差内。对偏 远地区的风力发电机进行实地改造后,根据手机接收 信息的通信能力来看,在1min内,PC端就可以查看 到各类数据。表1为发电信息数据对比。由表1可 以看出,接入该模块后,电信息采集变得更加准确了。 表2为温湿度对比,由表2可以看出文中的设备安装 方式要优于原设备,数据采集的精度有所提升。灰尘 传感器是文中的一个创新点,虽没有对比实验,但是 由公开的数据可知,优化后设备采集的灰尘直径为

表1 发电信息数据对比

参数	数 值	
	优化后设备	原设备
发电功率/W	63	60
	59	61
	62	62
发电量/kWh	2	1.98
	2.1	2.1
	2	2

表2 温湿度采集对比	と表
------------	----

 优化后设备 (温度/湿度)	原光伏发电设备 (温度/湿度)
 22.5 ℃/60.5 hPa 32.5 ℃/40.1 hPa	22.5 ℃/60.1 hPa 31 ℃/50.2 hPa

加入撬棍电路后,光伏设备与并网系统发生低压 穿越的仿真波形图如图 5 所示,从图 5 中可以看到, 一开始电压发生跌落现象,这时撬棍电路开始工作, 并网中的电压开始升高,最终保持额定功率完成低压 穿越。



图 5 低压穿越波形图

#### 6 结 语

通过文中的研究与实践,成功解决了光伏发电设 备在数据采集准确度以及与电网并网时的脱网和低 压穿越的问题。文章基于微控制器并结合传感器和 通信模块的软硬件设计,对加入了撬棍电路的并网系 统进行了改造和仿真。经过对电信息、发电量、温湿 度、灰尘等指标的测试,以及对加入撬棍电路后的并 网低压穿越波形的仿真,验证了系统的检测准确性和 安全性。综上所述,文中提出的方案在解决光伏发电 数据采集不准确情况以及光伏设备故障导致的并网 系统安全问题中发挥了关键的作用,为电网逐渐走向 智能化打下了坚实的基础。

#### 参考文献:

- [1] 冯立恒.环境因素对户外光伏板发电效率的影响[J].电气技术 与经济,2019,11(5):28-30.
- [2] 尤海侠.光伏发电效率影响因素分析[J].能源技术与管理, 2022,47(6):147-149.

应策略先对其进行了预测,可以看到 0.5 s 时电压波 形有上升的趋势,在1 s 时,撬棍电路作用完成,可以 看到电压整体趋于稳定状态,稳定在了 400 V 左右, 完成了低压穿越。



图 7 电容两端的电压与转 图 8 电 子转速图

图 8 电压跌落故障图

如9所示为转子侧电流跌落故障图。由图9可 以看到,电网出现低压穿越时,电流之前处于100 A 左右,低压跌落出现时,自适应控制策略率先拉高了 电流,电流值瞬间到达了200 A 后,撬棍电路开始作 用,在0.5~1 s 内,撬棍电路对电路进行了保护,使其 电流值稳定在了先前的100 A 左右,完成低压穿越。



#### 5 结 语

文中利用撬棍电路和自适应控制策略解决了双

#### (上接第131页)

- [3] 顾章平.大型太阳能光伏发电并网系统优化设计研究[J].电器 工业,2020(7):70-75.
- [4] 伊 波,闫 琴,田文平,等.基于低压穿越光伏发电系统的继电 保护研究[J].集成电路应用,2022,39(1):30-31.
- [5] 王雨虹, 卢国义. 基于 VSC-HVDC 光伏电站低压穿越策略[J].
   制造业自动化, 2020, 42(12): 125-130.
- [6] 汪方斌,孙向东,张建权,等.光伏并网系统低电压穿越模糊自整 定控制策略研究[J].电工技术,2022,582(24):41-44+47.

馈异步风力发电设备并网时发生脱网而产生的低压 穿越问题。在最基本的 DFIG 数学模型中加入了保 护电路的撬棍电路模型后,又加入了自适应控制策略 对整体电路发生低压穿越问题进行预测的一个预测 模型。最后通过实验的仿真结果,对加入两种模型的 基本双馈异步风力发电机进行了数学模型基本测试, 并仿真了低压穿越情况,从这些方面可以看出该系统 整体呈现出检测准确、安全系数高等优点。此分析和 结果为电力设备智能化与电网智能化提出了一种新 的思路。

#### 参考文献:

- [1] 崔浩,王伟,郑涛,等.电网对称跌落故障时双馈风力发电机的改进控制策略研究[J].能源与环保,2022,44(9):246-251.
- [2] 张学思,于晓琳,丛培田.双馈风力发电机建模及仿真研究[J].
   一重技术,2022,210(6):55-57.
- [3] 孙子明, 葛 强, 石建全, 等. 基于 GA-BP 神经网络的双馈风力 发电机故障诊断[J]. 电工技术, 2022, 563(5): 19-21.
- [4] 胥心怡,武家辉,姚 磊,等.基于协同惯量控制的双馈风机并网 系统稳定性分析[J].电力建设,2021,42(12):59-67.
- [5] 管 萍,李小雷,王一博.双馈风力发电机单神经元自适应谐振 控制[J].计算机仿真,2020,37(10):73-77+91.
- [6] 王诗雯,刘 飞,刘沁怡,等.不对称故障下两级式光伏并网系统 低电压穿越控制[J].电网技术,2023,47(1):91-102.
- [7] 何 超.基于自适应控制的双馈异步风力发电机低电压穿越特性优化研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2020.
- [8] 焦东宏.双馈风力发电机并网积分切换自适应滑模控制策略研 究[D].郑州:华北水利水电大学,2019.
- [9] 汪方斌,孙向东,张建权,等.光伏并网系统低电压穿越模糊自整 定控制策略研究[J].电工技术,2022,582(24):41-44+47.
- [7] 孙银锋,李 溶,刘金鑫,等.大规模光伏电站经柔性直流并网系 统故障穿越策略[J].工程科学与技术,2023,55(2):107-116.
- [8] 王诗雯,刘 飞,刘沁怡,等.不对称故障下两级式光伏并网系统 低电压穿越控制[J].电网技术,2023,47(1):91-102.
- [9] 李 亚.光伏发电与并网技术研究[J].城市建筑空间,2022,29 (S1):143-144.
- [10] 孔垂跃,陈 羽,赵乾名.基于 MQTT 协议的配电物联网云边通 信映射研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(8):168-176.