

分布式光伏并网装置的研制

丁明¹, 姚宇亮¹, 李林^{1,2}, 毕锐¹, 曹军²

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 科大智能电气技术有限公司, 安徽合肥 230080)

摘要: 设计了基于 ARM Cortex-M4 内核 32 位芯片的双 CPU 分布式光伏并网装置, 包括主控 CPU、通信 CPU。通过模块化设计、集成数据采集处理, 实现装置与配电网调度中心及逆变器等智能装置的信息交互, 具备带方向和复压闭锁过流保护、逆功率保护、零序电流保护、过负荷保护、被动式防孤岛保护、同期并网等功能。考虑分布式光伏电站对同期并网的高要求, 提出了基于采样点相角差预测捕捉合闸点的差频并网算法。微机继电保护系统测试结果表明, 所设计装置能够准确地进行数据采集、保护可靠动作; 相较于传统差频并网算法, 所提预测算法能够有效地提高并网精度。

关键词: 分布式光伏发电; 并网装置; 硬件; 继电保护; 预测算法; 同期并网

中图分类号: TM 615

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.001

0 引言

近年来, 光伏发电规模持续增长, 我国光伏发电利用的主要形式为“大规模集中开发、中高压接入”和“分散开发、低电压就地接入”并举的策略^[1], 其中“分散开发、低电压就地接入”一般接入 10 kV 及以下电压等级的配电网。文献[2-6]指出分布式光伏发电具有就地消纳、减少线路传输损耗、充分利用建筑物表面、安装灵活、减少占地面积、接入配电网能够改善配电网末端电压、运行灵活、适当条件下可脱离配电网孤岛运行等特点。配电网中分布式光伏渗透率的提高改变了传统辐射形配电网的格局, 光伏发电随机性、波动性和间歇性的特点增加了配电网对电压和无功的调节难度, 对配电网的保护、潮流控制、电能质量提出了新的挑战。为了改善配电网的运行条件、规范分布式光伏电站运行、提高供电可靠性, 国内外发布了一系列分布式光伏并网标准^[7-10]。这些分布式光伏并网规范主要从总体要求、电能质量、功率控制、电压频率响应、安全与保护、计量通信、并网检测等方面对分布式光伏电站的设计和运行提出了具体的要求。为了实现分布式光伏接入配电网后能够保证配电网的安全稳定运行, 满足并网规范提出的具体要求, 需要在分布式光伏与配电网的公共耦合点(PCC)接入包含安全自动、继电保护、防孤岛保护、电能质量检测等功能的并网装置。

当前分布式光伏并网装置研发中的功能设置尚不统一^[11], 有必要从整个分布式光伏电站的规范性以及与配电网的协调性层面考虑并网装置的功能。分布式光伏并网装置的研制存在以下三方面的问题: 功能比较单一, 文献[12]仅考虑并网检测功能, 文献[13]着眼于运行参数的监控, 文献[14]具备电能计量与通信功能, 并未从整体考虑分布式光伏并网装置应具备的功能, 需要同其他二次装置配合使用; 并网装置与其他二次设备配合使用时存在接线繁琐、通信复杂、运行维护困难、成本投入高等问题; 已有并网装置中仅具备了检无压并网功能^[15], 在分布式光伏电站孤岛运行时无法实现分布式光伏电站的安全并网, 检测精度较低。

为了解决当前光伏并网装置存在的上述问题, 改善分布式光伏接入配电网后的运行环境, 本文对分布式光伏并网装置的定位是: 安装在分布式光伏电站和配电网间的 PCC 处, 集成测量、并网控制、继电保护、电能质量监测、上下通信、规约转换等功能, 减少 PCC 处二次设备的投入和接线; 目标是监控光伏电站的运行状态, 为分布式光伏电站提供保护功能, 提高光伏电站和配电网的运行可靠性; 支持规约转换, 作为分布式光伏电站及内部逆变器等智能设备和外部配电网的信息交互媒介, 使配电网能够实时掌握光伏电站的运行状态, 缓解光伏渗透率的提高给配电网带来的运行和保护压力; 实现分布式光伏电站与配电网之间安全并网的状态切换。

1 分布式光伏并网装置的 PCC

分布式光伏并网装置的 PCC 及其与配电网、分布式光伏电站间的关系如图 1 所示。

收稿日期: 2017-03-03; 修回日期: 2017-12-27

基金项目: 安徽省科技攻关重点项目(1704a0902004)

Project supported by the Science and Technology Research Project of Anhui Province(1704a0902004)

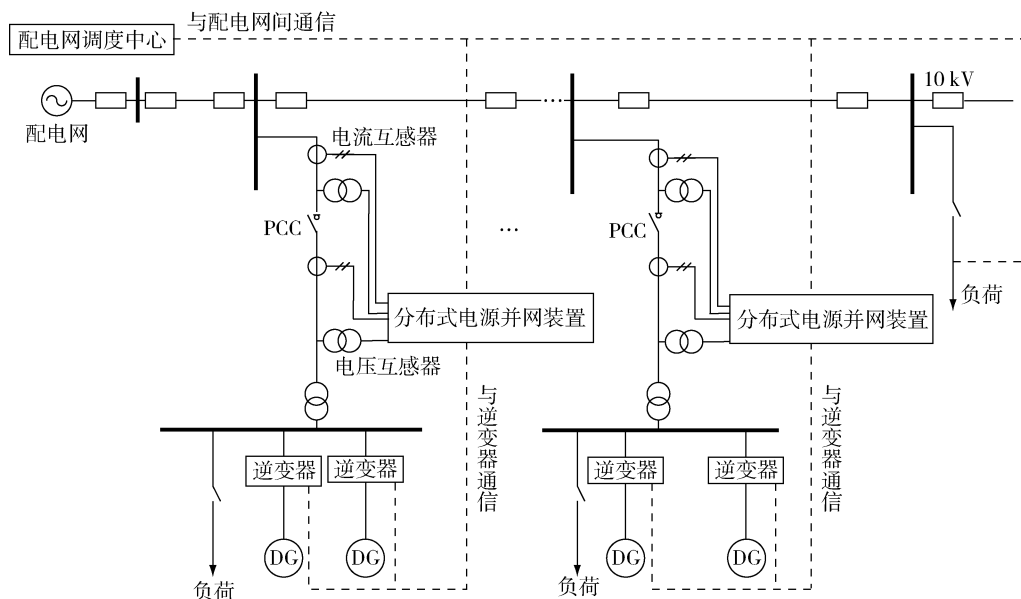


图 1 分布式光伏并网装置的 PCC

Fig.1 PCCs of distributed photovoltaic grid-connected devices

2 硬件系统设计

2.1 硬件电路组成

分布式光伏并网装置采用双 CPU 平台架构,硬件电路模块化设计,装置硬件由主控 CPU 模块、通信 CPU 模块、数据采样处理模块、人机接口模块、电源模块、开关量输入/输出模块等组成,如图 2 所示。

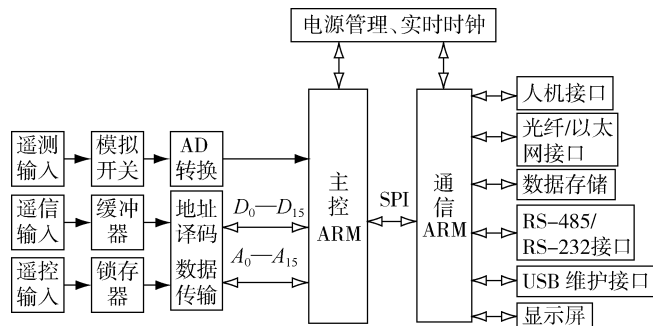


图2 分布式光伏并网装置硬件构成

Fig.2 Hardware structure of distributed photovoltaic grid-connected device

2.2 CPU 模块

并网装置的 CPU 模块包括主控 CPU 和通信 CPU,采用基于 ARM Cortex-M4 内核 32 位芯片,主频 168 MHz,具有较强的浮点运算和数字信号处理能力。主控 CPU 主要负责保护、控制等功能的实现和电源的模块化管理。通信 CPU 主要负责数据的传输、存储和信息的交互,通信 CPU 包括 USB 维护接口、以太网接口、RS-232/RS-485 接口以及与分布式光伏电站其他智能装置进行通信的扩展接口,以实现分布式光伏并网装置和上位机软件的远程连接以及与逆变器等智能设备间的通信。

2.3 数据采样处理模块

分布式光伏并网装置主要采集 PCC 处分布式

光伏电站侧三相电压、电流和零序电压、电流,配电网侧电压、电流,PCC 两侧的频率实时值。实际电压、电流经电流互感器并通过滤波后再通过 A/D 转换器获得数字信号,再通过软件计算和校准获得实时电流、电压数据,为装置进行保护和并网操作提供数据基础。PCC 两侧电压频率的测量通过硬件电路实现。

2.4 开关量输入/输出模块

开关量输入/输出板块包括外部电源接入端子 20 路开关量输入端子和 2 路遥控输出端子,可根据实际要求配置具体的开关量输出,遥控输出具备操作机构电源保护功能,一路遥控输出作为光伏电站并网/离网控制,另一路遥控作为备用,提高装置保护动作、并网控制的可靠性。

3 并网装置功能实现

3.1 保护功能

装置具备带记忆电压功能的方向和复压闭锁的三段式过流保护、带方向的零序过流保护、过负荷保护、被动式防孤岛保护、逆功率保护^[16],保护根据需求开放,保护整个分布式光伏电站。当光伏电站内部发生故障时,并网装置的保护及时动作使光伏电站迅速离网,在保护光伏电站安全的同时防止配电网保护误动作;接受配电网的离网信号主动离网,合理优化配电网的运行。

3.2 测量功能

装置由数据采集处理模块测量 PCC 两侧的电压、电流实时信息和实时频率,再通过软件算法计算分布式光伏电站侧的有功、无功、功率因数、电流谐波、电压不平衡度、电压偏差等值,为配电网监控光

光伏电站的运行提供数据支撑。

3.3 通信功能

装置内部主控板经 CAN 与其他模块进行通信,通信板固定配置了 IEC101 和 IEC104 规约,装置与配电网主站通过光纤连接,根据需求选择具体规约,并根据配电网调度中心的要求,主动上报保护、告警、变位信息;响应数据召唤,将电压、电流、频率、电能质量等信息上送给配电网调度中心。装置预留多个 RS-485/232 接口,可具体根据逆变器、智能电表等配置具体通信协议选择,如 Modbus 通信协议等。

3.4 控制功能

对装置中具备遥控条件的开关可进行远方遥控,发送配电网对光伏电站内部(如逆变器储能单元等)的控制指令。

3.5 同步合闸功能

装置同步并网功能可分为检无压并网、同频并网、差频并网^[17]3个逻辑模块,进入各逻辑模块的判断如下。

a. 检无压并网逻辑:配电网侧电压处于正常状态、分布式光伏电站侧没有电压,内部故障信号和电压互感器断线信号未告警。

b. 同频并网逻辑:配电网、分布式光伏电站电压处于正常状态,电压幅值差小于定值,相角差小于定值,滑差小于同频定值,内部故障和电压互感器断线信号未告警。

c. 差频并网逻辑:配电网、光伏电站电压处于正常状态,电压幅值差小于定值,滑差处于差频允许定值,相角差 $|\Delta\theta - \theta_{DQ}| < \delta$ ($\Delta\theta$ 为 PCC 两侧相角差, θ_{DQ} 为分布式光伏电站合闸导前角, δ 为合闸角误差),光伏电站内部故障和电压互感器断线信号未告警。

上述判断的具体值根据实际情况设置。

整个同步合闸逻辑如图3所示。

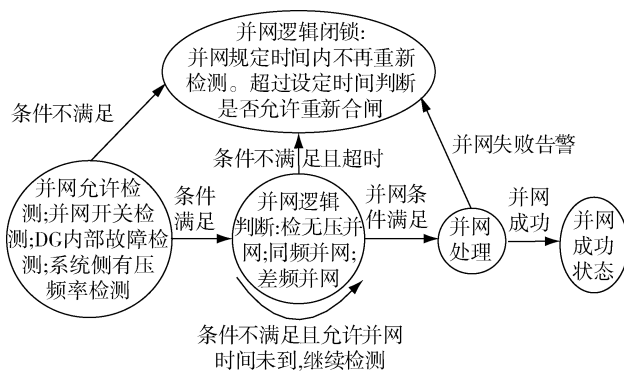


图3 分布式光伏并网逻辑

Fig.3 Grid-connected logic of distributed photovoltaic

3.6 基于采样点相角差预测捕捉合闸点算法

传统的准同期用于发电机组并入电网、捕捉合

闸点、降低机组并网造成的冲击。随着机组容量的提高,合闸误差角度 $\Delta\delta_{\max}$ 只允许在 2° 左右^[18]。分布式光伏电站没有机械转子因而缺少旋转惯性,抵抗并网产生的冲击能力较差,并网的要求更加严格。本装置的实测时间间隔为 $\Delta t = 20 \text{ ms}$,即每隔 20 ms 计算一次实时相角差,时间间隔较长。以最大同期并网允许的频率偏差 $|\Delta f|_{\max} = 0.5 \text{ Hz}$ 为例,忽略频率偏差变化的情况下2次实测间隔相角差的变化值为:

$$\Delta\varphi = 2\pi |\Delta f|_{\max} \Delta t = 3.6^\circ \quad (1)$$

通过导前角确定的合闸点通常落在2次实测结果之间,若仅根据实测相角差进行判定,很可能无法准确地捕捉合闸点,造成合闸误差较大,产生较大冲击电流损坏设备或无法满足并网条件导致并网失败。为了保证满足并网条件、减小相角测量误差、准确地捕捉合闸点,本文提出基于采样点相角差预测捕捉合闸点的算法,根据实测值预测采样周期内的相角差。假设 $t=0$ 时刻 PCC 两侧相角差为 φ_0 ,则任意 t 时刻的相角差为^[19]:

$$\Delta\varphi = \varphi_0 + 2\pi\Delta f t + \pi \frac{d\Delta f}{dt} t^2 \quad (2)$$

结合装置实际,设装置采样中断时间为 t_{interr} ,则第 k 个采样点的时刻为:

$$t_k = k t_{\text{interr}} \quad k = 0, 1, \dots \quad (3)$$

则 t_k 时刻的相角差为:

$$\Delta\varphi = \varphi_0 + 2\pi\Delta f t_k + \pi \frac{d\Delta f}{dt} t_k^2 \quad (4)$$

由式(2)计算实时相角差是在频率偏差 Δf 和频率偏差变化率 $d\Delta f/dt$ 不变的前提下有效。在实际情况下,PCC 两侧的频率偏差是实时变化的,因此,采用式(2)计算相角差会造成较大误差,为了减小实测计算误差,装置每进行一次频率偏差的实测,就更新一次 φ_0 、 Δf 和 $d\Delta f/dt$,并令 $t=0$ 继续计算相角差值,实测时间间隔相较于 Δf 很短,可认为2次实测值间 Δf 和 $d\Delta f/dt$ 保持不变。

当装置处于差频并网逻辑时,分布式光伏侧在其控制器的调整控制下,PCC 两侧的频率偏差 Δf 是一个时变量,假设装置发送合闸命令到 PCC 处断路器合闸经过的导前时间为 t_D ,频率偏差 Δf 为一个时变量时的导前角的计算公式为^[19]:

$$\varphi_D = 2\pi\Delta f t_D + \pi \frac{d\Delta f}{dt} t_D^2 \quad (5)$$

与相角差预测计算过程一样,导前角每隔一次实测利用更新的 Δf 和 $d\Delta f/dt$ 计算一次,更新当前的导前角值。

获得相角差预测值和导前角的计算值后,当 $\Delta\varphi = \varphi_D$ 时即为合闸点。为了准确地捕捉合闸点,令 $\Delta\varphi = \varphi_D$ 时,联立式(3)、(4)可求出合闸点 k' , k' 一般不是整数,基于采样点的相角差预测捕捉合闸点算法中 k' 是整数,因此装置捕捉的合闸点为:

$$k_{hz} = \text{round}(k') \quad (6)$$

其中, $\text{round}(\cdot)$ 为四舍五入函数。装置捕捉到合闸点后,通过中断采样计数,并在第 k_{hz} 个采样点发送合闸命令,控制 PCC 处断路器合闸,实现分布式光伏电站安全并网。

基于采样点相角差预测捕捉合闸点算法的实现流程如图 4 所示。

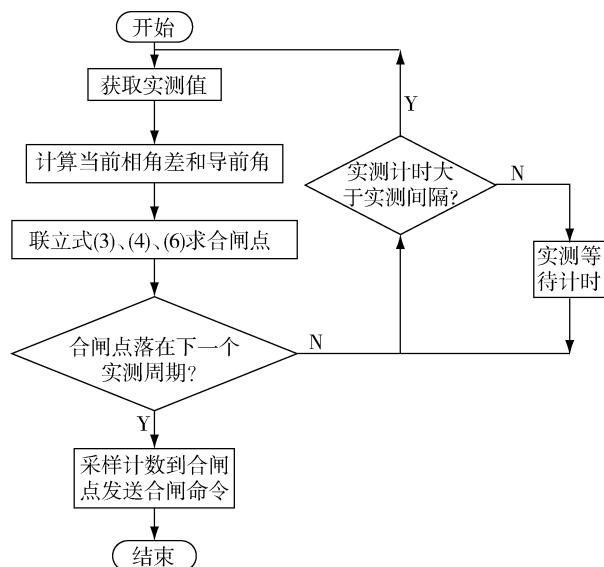


图 4 基于采样点相角差预测捕捉合闸点的流程

Fig.4 Flowchart of catching closing point based on phase-angle difference prediction of sampling point

4 并网装置实验测试

为了验证装置功能,采用昂立继保测试仪模拟

PCC 处的电压、电流,测试装置的各项功能。测试内容主要包括参数测量、通信测试、保护测试以及并网测试。

4.1 装置功能测试

装置功能测试主要测试了分布式光伏并网装置的保护、电能质量、通信、并网控制、显示等功能,并与传统并网装置进行了比较,具体测试比较内容如表 1 所示。

由表 1 可知,本文所设计的装置能够与逆变器智能设备通信,支持多种通信规约,拥有更加全面和可靠的保护功能和电能质量测量功能。

4.2 并网测试

并网测试主要包括检无压并网测试、同频并网测试、差频并网测试,装置额定电压设置为 $U_N = 57.735 \text{ V}$,额定频率设置为 $f_N = 50 \text{ Hz}$,配电网侧正常电压范围设置为 $(0.9U_N, 1.1U_N)$ 。

4.2.1 检无压并网测试

装置投入检无压并网功能,设定检无压并网的相关定值,分布式光伏侧电压初始值给定后按 0.01 V 步长减小至 0,按表 2 给装置设置参数,测试装置能否正确动作,测试结果如表 2 所示。

由表 2 的测试结果可知,当配电网侧电压不在正常状态时装置不会合闸并网;当配电网侧电压处于正常状态时,若分布式光伏电站侧电压小于检无压并网定值则装置正确动作,若分布式光伏电站侧电压大于检无压并网定值则装置不动作,测试结果满足检无压并网理论。

4.2.2 同频并网测试

装置投入同频并网功能,设置同频并网的相关定值,电压幅值差定值设置为 $\Delta U = 3 \text{ V}$,相角差定值设置为 $\Delta\theta = 3^\circ$,频率偏差定值 $\Delta f = 0.05 \text{ Hz}$,由于同频并网整定参数较多,因此在测试过程中分别按照电压幅值差作为变量、相角差作为变量以及电压频率偏差作为变量进行测试。按表 3 所示参数给装

表 1 分布式光伏并网装置和传统并网装置功能测试结果

Table 1 Function test results of distributed photovoltaic grid-connected device and traditional grid-connected device

功能	具体功能	故障模拟	本文并网装置的操作	传统并网装置的操作
保护功能	过流保护	正方向过流	动作	动作
		反方向过流	不动作	动作
		反方向不满足复压闭锁过流	不动作	动作
	零序过流	正方向零序过流	动作	动作
		反方向零序过流	不动作	动作
	过欠压保护	过压、欠压	动作	动作
电能质量	过欠频保护	过频、欠频	结合分布式电源并网规范要求动作或者发送过欠频警告,等待配电网动作命令	动作
	孤岛保护	孤岛	动作	不具备该功能
	直流量	—	测量直流量	不具备该功能
	谐波	—	测量 2~13 次谐波	测量 2~13 次谐波
	三相电压不平衡度	—	测量电压不平衡度	测量电压不平衡度
通信	电压正负偏差	—	测量电压正负偏差	不具备该功能
	规约支持	—	支持 101、104、Modbus 规约,对上与配电网调度中心通信,对下与逆变器等智能设备通信	支持 101、104 规约

表2 检无压并网测试结果

Table 2 Result of no-voltage check grid-connection test

电压定值/V	配电网电压 测量值/V	动作结果	分布式光伏侧 电压动作值/V
2.89	57.735	合闸	2.88
	50	未合闸	—
5.77	57.735	合闸	5.76
	50	未合闸	—

置设置配电网侧和分布式光伏电站侧参数,测试装置的动作结果,测试结果如表3所示。

表3 同频并网测试结果

Table 3 Result of same-frequency grid-connection test

系统侧电 压值/V	分布式光伏侧 电压值/V	电压幅 值差/V	相角差/ (°)	频率偏 差/Hz	动作 结果
57.735	57.735	0	0	0	合闸
57.735	50	7.735	0	0	未合闸
50	57.735	-7.735	0	0	未合闸
50	50	0	0	0	未合闸
57.735	57.735	0	0	0	合闸
57.735	57.735	0	5	0	未合闸
50	50	0	0	0	未合闸
50	50	0	5	0	未合闸
57.735	57.735	0	0	0	合闸
57.735	57.735	0	0	0.1	未合闸
50	50	0	0	0	未合闸

分析表3中数据可知,当配电网侧电压处于不正常状态时,在满足同频并网条件下装置也不动作;在配电网侧电压正常情况下,电压幅值差、相角差、频率差只要有一项不满足同频并网条件则装置不动作;在配电网电压正常情况下,电压幅值差、相角差、频率差满足同频并网条件,装置正确动作。测试结果满足同频并网理论要求。

4.2.3 差频并网测试

装置投入差频并网功能,由于装置加入了合闸点预测功能,因此测试过程中有必要比较基于采样点相角差预测捕捉合闸点预测算法和未加入预测算法装置动作合闸点与实际合闸点的误差。设置差频并网的相关定值,电压幅值差定值设置为 $\Delta U=3\text{ V}$,频率偏差设置为 $0.05\text{ Hz}<\Delta f<0.5\text{ Hz}$,导前时间设置为 100 ms ,2次实测之间采样32个点。按表4、5给装置设置配电网侧和分布式光伏电站侧参数,测试结果如表4、5所示。

比较表4、5可知,基于采样点相角差预测捕捉合闸点的差频并网算法和传统差频并网在配电网侧电压不处于正常状态、满足差频并网条件时装置不动作;电压幅值差、频率差超过定值,装置不动作;在不考虑采样延时以及导前时间等误差的前提下,基于采样点相角差预测捕捉合闸点的差频并网算法能够有效地降低动作合闸角与实际合闸角的误差,测试结果与差频并网理论相符。

表4 未加预测算法的差频并网测试结果

Table 4 Result of different-frequency grid-connection test without prediction algorithm

配电网侧 电压/V	电压幅 值差/V	频率偏 差/Hz	导前角/ (°)	合闸角/ (°)	动作 结果	误差/ (°)
50	0	0.5	17.98	—	未合闸	—
57.735	5	0.5	17.98	—	未合闸	—
57.735	0	0.5	17.98	15.17	合闸	2.810
57.735	0	0.4	14.47	17.042	合闸	2.572
57.735	0	0.3	10.90	10.126	合闸	0.774
57.735	0	0.2	7.21	9.682	合闸	2.472
57.735	0	0.1	3.59	2.725	合闸	0.865

表5 添加预测算法的差频并网测试结果

Table 5 Result of different-frequency grid-connection test with prediction algorithm

配电网侧 电压/V	电压 差/V	频率偏 差/Hz	导前角/ (°)	相角差/ (°)	合闸点	动作 结果	误差/ (°)
50	0	0.5	17.98	—	—	未合闸	—
57.735	5	0.5	17.98	—	—	未合闸	—
57.735	0	0.5	17.98	18.065	6	合闸	0.085
57.735	0	0.4	14.47	14.54	4	合闸	0.07
57.735	0	0.3	10.90	10.97	15	合闸	0.07
57.735	0	0.2	7.21	7.23	16	合闸	0.02
57.735	0	0.1	3.59	3.6	16	合闸	0.01

4.3 实际工程应用

为了验证所研制的分布式光伏并网装置功能,将研制的分布式光伏并网装置安装在科大智能公司10 kW光伏电站与配电网的PCC处,光伏电站的具体参数是:光伏阵列功率为10 kW,光伏逆变器功率为10 kW。研制的分布式光伏并网装置接入科大智能10 kW分布式光伏电站某时刻装置测量的数据如下:分布式光伏侧A相电压、电流分别为231.70 V、1.48 kA,B相电压、电流分别为231.76 V、1.46 kA,C相电压、电流分别为231.36 V、1.45 kA,频率为50.01 Hz;电网侧A相电压、电流分别为231.70 V、1.48 kA,B相电压、电流分别为231.76 V、1.46 kA,C相电压、电流分别为231.36 V、1.45 kA,频率为50.01 Hz。

5 结论

本文研制的分布式光伏并网装置具有以下特点:采用双CPU模块,集监控、保护、控制、通信、并网控制于一体,大幅减少了分布式光伏电站PCC处二次装置的投入,简化了PCC处二次设备回路接线,汇集光伏电站数据,方便配电网与光伏电站之间的通信和控制,有效地降低了设备投入成本;与传统装置相比,本文装置功能全面,保护动作可靠性高,满足相应的分布式光伏电站运行和并网的相关标准,可作为分布式光伏并网运行监控装置;采用了包含预测算法的并网逻辑,克服了传统并网装置在并网时精度较低、并网条件苛刻的缺陷,适应配电网对分布式光伏并网的高要求。实验测试结果表明,基于采样点相角差预测捕捉合闸点的预测算

法能有效地降低并网误差,实现分布式光伏电站安全并网。

该装置已经通过了南京国网实验验证中心的功能测试,具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] CARPINELLI G, CELLI G, PILO F, et al. Distributed generation siting and sizing under uncertainty[C]//2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings. Porto, Portugal; IEEE, 2001: 7.
- [3] 章杜锡,徐祥海,杨莉,等. 分布式电源对配电网过电压的影响[J]. 电力系统自动化,2007,31(12):50-54,85.
ZHANG Duxi, XU Xianghai, YANG Li, et al. The impact of distributed generators on distributed network over-voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(12): 50-54, 85.
- [4] 余琼,余胜,李晓晖. 含分布式电源的配电网自适应保护方案[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(5):110-115.
YU Qiong, YU Sheng, LI Xiaohui. An adaptive protection scheme for meshed distribution system with DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 110-115.
- [5] 张艳霞,代凤仙. 含分布式电源配电网的馈线保护新方案[J]. 电力系统自动化,2009,33(12):71-74.
ZHANG Yanxia, DAI Fengxian. New schemes of feeder protection for distribution networks including distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 71-74.
- [6] 吴兴龙. 光伏并网对配电网的影响[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
WU Xinglong. Impacts of grid-connected photovoltaic generation on distribution system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems: IEEE Std 1547-2003[S]. New York, USA: [s.n.], 2003.
- [8] Energy Networks Association. Recommendations for the connection of embedded generating plant to public distribution systems above 20 kV or with outputs over 5 MW; EA-ER-G75-1[S]. London, UK: [s.n.], 2007.
- [9] BDEW. Technical guideline: generating plants connected to the medium-voltage network[S]. Berlin, Germany: [s.n.], 2008.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 光伏发电系统接入配电网技术规定: GB/T 29319—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [11] 丁明,李林,陶维青,等. 基于 IEC61850 光伏监控装置硬件和模型设计[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):170-175.
DING Ming, LI Lin, TAO Weiqing, et al. Hardware and model design based on IEC61850 for PV monitoring device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 170-175.
- [12] 杨阳,孙侃,王建华. 分布式电源接入的同期并网装置的设计[J]. 科学技术与工程,2011,11(28):6850-6854.
YANG Yang, SUN Kan, WANG Jianhua. The equipment of distributed power in synchronized grid-connected[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(28): 6850-6854.
- [13] 吴闻婧. 分布式电源并网运行的参数监控装置的研究与开发[D]. 秦皇岛:燕山大学,2009.
WU Wenjing. The research and development of parameters monitoring device for distributed generation connecting electric grid[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2009.
- [14] 郑敦骏. 分布式电源智能接入装置设计[D]. 成都:电子科技大学,2015.
ZHENG Shuangjun. The design of distributed generation intelligent access device[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [15] 孙献春,徐光福,黄宏盛,等. 分布式光伏发电并网接口装置研制与应用[J]. 华东电力,2014,42(1):124-127.
SUN Xianchun, XU Guangfu, HUANG Hongsheng, et al. Development and application of grid-connected interface device for distributed PV power[J]. East China Electric Power, 2014, 42(1): 124-127.
- [16] 杨珮鑫,张沛超. 分布式电源并网保护研究综述[J]. 电网技术,2016,40(6):1888-1895.
YANG Peixin, ZHANG Peichao. A survey on interconnection protection of distributed resource[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1888-1895.
- [17] 徐玉琴,聂暘,高原,等. 10 kV 线路保护测控装置的同期合闸功能实现[J]. 电力自动化设备,2016,36(5):96-101.
XU Yuqin, NIE Yang, GAO Yuan, et al. Implementation of synchronous closing for protection measuring & control device of 10 kV line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 96-101.
- [18] 杨冠城. 电力系统自动装置原理[M]. 3版. 北京:中国电力出版社,2005:36-38.
- [19] 李瑾鸿. 应用模糊控制原理在差频并网下的自动准同期算法研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(2):96-105.
LI Jinhong. Algorithm research of the automatic synchronization under difference frequency power grid using fuzzy control principle[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 96-105.

作者简介:



丁明

丁明(1956—),男,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统规划及可靠性与安全防护、可再生能源与分布式发电系统、电力电子技术在电力系统中的应用等(E-mail: mingding56@126.com);

姚宇亮(1992—),男,安徽绩溪人,硕士研究生,主要研究方向为新能源利用与分布式发电系统(E-mail: yaoyuliang012@126.com);

李林(1979—)男,安徽合肥人,高级工程师,博士研究生,研究方向为配电网自动化及新能源接入技术(E-mail: lilin@csg.com.cn)。

(下转第15页 continued on page 15)

作者简介:



郭志忠

郭志忠(1961—),男,河北张家口人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、光电互感器、可再生能源发电并网等(E-mail: zhizhongg@bjxj-xjgc.com);

叶瑞丽(1986—),女,河南许昌人,工程师,博士,研究方向为可再生能源发电系

统及并网(E-mail: yeruili_hit@163.com);

刘瑞叶(1963—),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制和分布式发电系统并网(E-mail: liuruiye@hit.edu.cn);

刘建楠(1986—),男,吉林长春人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统分析与控制、输变电工程建设管理(E-mail: andyliujiannan@126.com)。

Optimal scheduling strategy for renewable energy system with pumped storage station

GUO Zhizhong¹, YE Ruili¹, LIU Ruiye¹, LIU Jiannan²

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. State Grid AC Engineering Construction Company, Beijing 100052, China)

Abstract: Since the uncertainty of power generation in renewable energy system is very prominent, the dispatch and control of power grid which takes power balance as its primary task must adopt targeted countermeasures. The mathematical model for day-ahead scheduling and real-time scheduling of pumped storage power station is built based on the operation mechanism of energy storage. The grid power supply are mutually complementary to realize the power balance of which their reserves are classified into two types: the fluctuation reserve, whose reserve capacity mainly undertaken by the thermal unit is for balancing the fluctuation power, while the uncertainty reserve mainly undertaken by the pumped storage power station is for balancing the uncertainty of forecasting error. An index for evaluating the power stability of grid-connected wind power is proposed, which can measure the goodness of different scheduling strategies for compensating the unbalanced power. Study case analyses verify the feasibility of the proposed scheduling strategy.

Key words: renewable energy system; uncertainty renewable energy; pumped storage station; unbalanced power; optimal scheduling; wind power

(上接第6页 continued from page 6)

Development of distributed photovoltaic grid-connection device

DING Ming¹, YAO Yuliang¹, LI Lin^{1,2}, BI Rui¹, CAO Jun²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. CSG Smart Grid Electrical Technology Co., Ltd., Hefei 230080, China)

Abstract: The distributed photovoltaic grid-connected device with dual-CPU is designed based on ARM Cortex-M4 core 32 bit chip, including master control CPU and communication CPU. By modular design and sampling of integrated data, the device can realize information interaction with dispatch center of distribution network, inverters and other intelligent devices, and has the functions of direction and compound voltage blocking overcurrent protection, reverse power protection, zero sequence current protection, overload protection, passive anti-islanding protection, synchronization grid-connection, and so on. Considering the high requirement of distributed photovoltaic plant on synchronization grid-connection, the different-frequency grid-connection algorithm based on catching closing point based on phase-angle difference prediction of sampling point. Test results of microcomputer relay protection system show that, the designed device can collect data correctly and the protection can act reliably. Compared with the traditional different-frequency grid-connection algorithm, the proposed algorithm can improve the grid-connection accuracy effectively.

Key words: distributed photovoltaic power generation; grid-connection device; hardware; relay protection; prediction algorithm; synchronization grid-connection