

DOI: 10.7667/PSPC180410

# 一种基于嵌入式系统的园区微电网中央控制器设计

丁明<sup>1</sup>, 程清<sup>1</sup>, 李林<sup>1,2</sup>, 毕锐<sup>1</sup>, 曹军<sup>2</sup>

(1. 安徽省新能源利用与节能实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009;

2. 科大智能(合肥)科技有限公司, 安徽 合肥 230080)

**摘要:** 针对目前微电网控制器成本较高、标准各异、集成度低和缺乏具有实际操作性的能量管理策略等问题, 设计了一种集计量监控和能量管理一体化的园区微电网中央控制器。采用基于 ARM 的嵌入式系统硬件平台, 模块化设计。考虑到园区企业用能需求, 开发了具有园区特色的能量管理策略, 给出一种基于三次指数平滑法的需量预测方法并利用储能系统来进行需量管理, 在不影响企业办公生产的同时降低用电成本。通过搭建物理实验平台对中央控制器的功能和能量管理策略进行了验证, 具有较好的实用性。

**关键词:** 园区微电网; 分层控制; 中央控制器; 能量管理; 需量管理

## A design of central controller of microgrid in the park based on embedded system

DING Ming<sup>1</sup>, CHENG Qing<sup>1</sup>, LI Lin<sup>1,2</sup>, BI Rui<sup>1</sup>, CAO Jun<sup>2</sup>

(1. Anhui New Energy Utilization and Energy Saving Laboratory (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China;

2. CSG Science & Technology Co. Ltd., Hefei 230080, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of higher cost, different standards, low integration, and lack of practical operational energy management strategies for microgrid controllers, a microgrid central controller integrating measurement, monitoring and energy management is designed. The controller utilizes ARM-based embedded system hardware platform and modular design. Considering the energy needs of enterprises in the park, some new energy management strategies according to the unique characteristics of the park are designed. The demand forecast based on the triple exponential smoothing method is proposed and the energy storage system is used for demand management to reduce the electricity cost of the enterprise without affecting the business and production. The function and energy management strategy of the central controller are also proved by establishing a physical experiment platform, showing its better practicality.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (Key Technologies and Demonstrative Application for the Integration and Consumption of Clustered Distributed Renewable Energy Generation) (No. 2016YFB0900400).

**Key words:** microgrid in the park; hierarchical control; central controller; energy management; demand management

## 0 引言

随着我国新一轮电力体制改革的推进, 微电网的建设与应用日臻重要<sup>[1-8]</sup>, 以园区微电网为落脚点建立新型能源生产与消费体系, 是当前和未来我国能源互联网建设的重要内容<sup>[9-12]</sup>。目前我国拥有国家级、省级等各类开发区数千个, 园区企业用能需求空间巨大, 园区微电网的建设也应由早期的试验

性和示范性向实用性和商业化运营过渡<sup>[13-14]</sup>。

园区微电网不同于偏远地区和海岛微电网, 城市工商业园区内没有广阔的闲置空间, 风力资源也往往较差, 可再生能源主要依靠容量有限的楼顶分布式光伏, 属于小型光储微电网。园区微电网直接向园区企业供电, 电压等级较低, 通常直接接入 10 kV 或 380/220 V 配电网, 更加接近用户, 监控管理设备集成度要求更高, 园区微电网所有者关注更多的是投入产出和经济效益, 研发适用的中央控制器对于建立可推广的园区微电网商业化运营模式有着重要意义。文献[15]提出的系统控制器承担了微电网

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助“分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及示范应用”(2016YFB0900400)

和大电网的联结控制作用, 需结合相应的二次设备完成并离网的平滑过渡; 文献[16]提出的能量管理装置通过通信建模, 对关键设备进行电气量采集, 借助微气象监测组件对风光出力超短期预测, 结合辅助系统进行滚动优化计算实现能量协调优化管理; 文献[17]研制了微电网模式控制器, 通过 GOOSE 通信等方式采集并网点、储能、分布式发电、负荷等微电网关键设备的三遥信息, 匹配微电网运行模式和检测指令信号以实现并离网切换控制; 文献[18]从用户侧角度出发, 采用多时间尺度控制策略, 研制了涵盖微电网接入关键技术的中央控制器。

针对目前微电网控制器存在的问题: 1) 没有采用一体化设计, 需要辅助设备, 集成度不高; 2) 多着眼于模式切换, 缺乏能量管理功能性模块或实际操作性不足; 3) 成本较高, 标准各异, 不适合大规模推广和商业化运营, 本文研制了基于嵌入式系统的集计量监控和能量管理一体化的园区微电网中央控制器, 更多地考虑到园区企业用能需求, 设计了丰富的园区特色能量管理策略, 给出一种基于三次指数平滑法的需量预测方法并利用储能系统为手段来进行需量管理。

## 1 园区微电网中央控制器嵌入式系统设计

园区微电网中央控制器采用基于 ARM 的嵌入式系统硬件平台, 具有速度快、功耗低、控制能力强、外围接口丰富等优点。中央控制器硬件电路采用模块化设计, 由 CPU 模块、遥测模块、遥信遥控模块、数据通信接口模块、电源模块等硬件模块组成, 如图 1 所示。

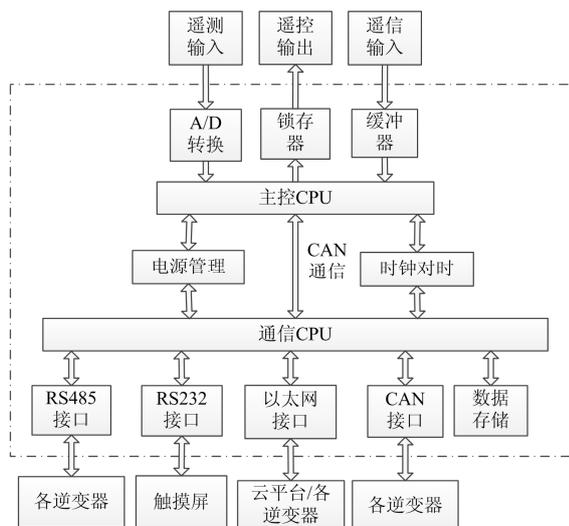


图 1 中央控制器硬件设计

Fig. 1 Hardware design of central controller

### 1) CPU 模块

CPU 模块采用双 CPU 平台架构, 使用 ST 公司的基于 ARM Cortex-M4 内核的 32 位芯片, 性能高功耗低。双 CPU 通过内部 CAN 总线通信, 主控 CPU 负责计算、分析与控制等功能; 通信 CPU 负责数据通信与存储, 具有丰富的外围通信接口扩展以实现信息交互。

### 2) 遥测模块

遥测模块可采集配电侧和微电网交流母线上的实时三相电压和频率, 以及微电网系统内各条线路上的实时电流等电气量。电压电流经过互感器采集, 滤波采样和 A/D 转换后得到数字信号, 再通过软件算法和校准得到实时电压电流数据, 继而计算各线路上的有功功率、无功功率、功率因数和电流各次谐波, 电压不平衡度等电能质量数据。

### 3) 遥信遥控模块

遥信模块包括各路开关量输入, 可采集系统内各处开关元件和负荷控制器的开合状态, 获知微电网运行状态和负荷投切状态。遥控模块包括各路开关量输出, 通过控制回路的通断来对各处开关元件和负荷控制器等进行远方遥控, 完成并离网切换和投切负荷动作。

### 4) 通信接口模块

具有丰富的数据通信接口, 保证了系统内各层设备间通信与控制的实时性和可靠性。通过以太网接口实现与云服务平台的远程连接; 通过 RS232 接口与触摸屏完成人机交互功能, 查看系统内各项运行参数, 设置各项功能的启停和相关参数。光伏逆变器、储能变流器与中央控制器之间若通信距离很长, 采用以太网通信; 若通信距离较短或就地通信, 可采用 485 通信或 CAN 通信。

## 2 园区微电网系统架构

### 2.1 拓扑结构

典型工商业园区光储微电网拓扑结构如图 2 所示, 微电网 380 V 交流母线通过微电网公共连接点 (PCC) 处的静态开关接入到配电网。

园区光储微电网由光伏系统、储能系统、负荷系统、中央控制器和云服务平台等单元构成, 通过中央控制器和云服务平台的协调控制, 使其成为一个实现自我监测、管理、保护的自治系统。在配电网正常运行时, PCC 开关闭合, 园区微电网处于并网工作状态, 光伏逆变器均工作在最大功率输出 (MPPT) 模式, 储能变流器 (PCS) 均工作在 PQ 控制模式。当配电网出现停电或故障时, PCC 开关断开, 园区微电网处于离网工作状态, 光伏逆变器工作于

限功率运行状态。此时若系统内只有单台储能变流器，工作于 VF 控制模式，以提供电压频率支撑；若有多台储能变流器并联，则一台工作于 VF 控制模式，其他仍工作在 PQ 控制模式。

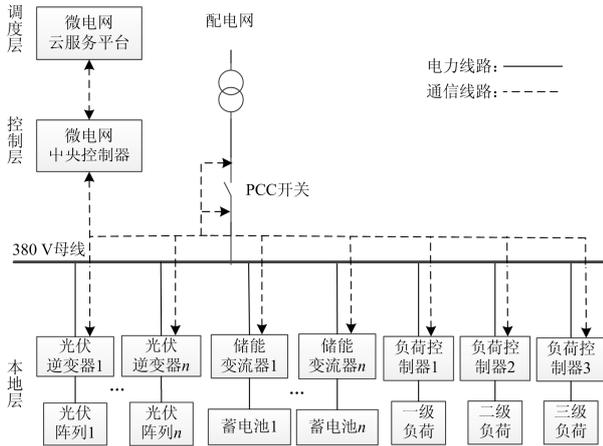


图 2 园区微电网系统结构

Fig. 2 Structure of microgrid system in the park

### 2.2 控制方式

为保障微电网的安全稳定和协调运行，目前的微电网控制架构中多采用分层控制结构<sup>[19-20]</sup>。本文将这种分层控制结构思想应用到园区微电网中，映射为本地层、控制层、调度层三层控制结构，如图 2 所示。

#### 1) 本地层

本地层由光伏逆变器、储能变流器、负荷控制器、开关元件等本地设备构成，负责各微电源和负荷自身的实时控制，同时接受控制层的指令，保证系统内各单元按计划运行。

#### 2) 控制层

控制层由微电网中央控制器担任，负责微电网的监视控制和能量管理，是本地层和调度层之间信息交互的枢纽。它可以实时采集本地层内各模拟量和开关量，可获取各条线路上的电气量和各逆变器、负荷控制器的运行状态与实时参数等信息；并接受调度层的指挥，通过分析计算控制本地层内各逆变器、负荷控制器与开关元件进行并网状态下的能量管理和在 PCC 进行并离网切换，以实现有效的协调控制。

#### 3) 调度层

调度层由微电网云平台担任，是微电网最上层的总监控总指挥。云平台可监测微电网系统各单元运行状态，并获得控制层内采集的各项实时数据，依托大数据计算能力对其进行统计分析存储。进行系统内各时段光伏发电统计、负荷曲线绘制；并进

行光伏发电预测、负荷用电预测，分析制定能量管理与日前智能调度方案以指挥控制层配合实现，在保障安全可靠用电的同时达到经济收益最大化。

## 3 园区微电网中央控制器控制策略设计

### 3.1 并网控制策略

当配电网正常运行时，微电网系统处于并网模式。依据目前工商业园区企业用电现状和需求，提出具有工程价值和园区特色的并网功能。并网模式下，光伏逆变器采用最大功率输出(MPPT)模式运行，储能变流器采用 PQ 控制模式运行。

为防止储能电池频繁出现过充过放，影响使用寿命，采用五段式的电量 SOC 约束，如图 3 所示。当电池即将进入电量过高状态( $SOC > SOC_{max2}$ )和电量过低状态( $SOC < SOC_{min2}$ )，中央控制器会下发待机指令给储能变流器以停止向其充放电。若有多台储能变流器并联工作时，当有放电需求时优先考虑处于电量略高状态的电池，当有充电需求时优先考虑处于电量略低状态的电池，尽可能使电池工作在电池健康状态，具有充足的可调裕量。

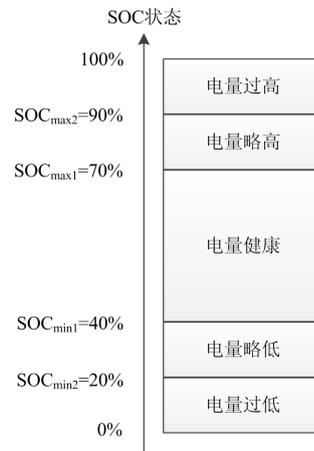


图 3 五段式 SOC 约束

Fig. 3 Five-segment constraint of SOC

#### 3.1.1 能量搬移

能量搬移的本质是利用储能系统进行能量的时域缓冲，利用峰谷时段用电电价差异以节省电费，亦有利于辅助配电网进行削峰填谷。

当用户所使用的电价是峰谷平分时电价，根据储能电池容量可分别设定合适的充电功率  $P_{ESS\_C}$  和放电功率  $P_{ESS\_D}$ ，峰时电价时段储能系统以  $P_{ESS\_D}$  放电，可少从配电网购电，余电上网；谷时以  $P_{ESS\_C}$  充电，低价存储电能；平时进行电池 SOC 的健康维持，当电池处于电量略低或电量略高状态时通过充放电操作进入电量健康状态。

### 3.1.2 联络线控制

联络线控制旨在接受配电网和云平台协调调度, 设定好一天内各时段 PCC 交换功率的大小和方向, 此时不再区分电价峰谷时段, 使微电网作为配电网中一个可调可控的单元, 友好并网。

根据能量守恒定律, PCC 交换功率  $P_{PCC}(t)$ 、光伏系统发电功率  $P_{PV}(t)$ 、负荷用电功率  $P_{load}(t)$  与储能系统充放电功率  $P_{ESS}(t)$  满足以下关系:

$$P_{ESS}(t) = P_{PV}(t) + P_{PCC}(t) - P_{load}(t) \quad (1)$$

当  $P_{PCC}(t) < 0$  时, 微电网向配电网售电。当  $P_{ESS}(t) > 0$  时, 储能系统充电; 当  $P_{ESS}(t) < 0$  时, 储能系统放电。

当给出一天内的 PCC 计划交换功率后, 监测光伏系统实时发电功率和负荷实时用电功率, 根据式 (1) 可在电池 SOC 约束的前提下可确定储能系统实时充放电功率, 中央控制器实时下发控制指令给储能系统。

### 3.1.3 需量管理

企业用电采用两部制电价, 把电费分成基本电费和电量电费两部分, 基本电费有按变压器容量计费 and 按最大需量计费两种方式。按最大需量计费时, 对最大需量进行有效地控制可以大大降低企业购电开支, 同时也减小其对配电网的负荷冲击。

#### 1) 需量

需量指的是 15 min 内的用电功率的平均值。最大需量指的是在规定结算时间(一般是一个月)内记录的需量的最大值。我国目前采用滑差法(滑差时间  $T_0=1$  min)来计算需量。最大需量需要与供电公司进行核定协议(一般一年内不可更改), 当客户实际用电的最大需量小于协议值时, 应按协议值计算当月基本电费; 当客户实际用电的最大需量超过协议值时, 超出协议值部分加倍收费<sup>[21]</sup>。

基本电费按最大需量计费时, 相对于按变压器容量计费更具有经济性, 但短时冲击性负荷易导致最大需量超出协议值, 而提高协议值亦会增加用电成本。

#### 2) 需量管理策略

目前在微电网的研究中没有涉及到需量管理, 而在关于企业需量管理的研究中, 控制最大需量的常见手段是通过降低负荷功率或切负荷, 这往往会影响企业的办公生产。在园区微电网中, 可采用一种控制最大需量的新手段, 即利用微电网的储能系统实现负荷的等效切除。

## 3.2 基于三次指数平滑法的需量管理控制策略

上文提到的园区微电网需量管理, 可采用三次指数平滑算法进行 PCC 功率预测进而预测需量, 在

需量具有越限趋势时控制储能系统放电进行超前控制, 在不影响企业办公生产的前提下进行需量的有效控制, 防止需量越限。

### 3.2.1 三次指数平滑法

指数平滑法是一种趋势外推型的时间序列预测方法, 通过近期的观察值可以很快计算出新的预测值, 模型较为简单, 计算也很方便, 对于在嵌入式系统平台上进行超短期的实时滚动预测尤为合适<sup>[22]</sup>。

三次指数平滑法算法如下所述。

#### 1) 平滑值的计算

$$\begin{cases} S_t^{(1)} = \alpha x_t + (1-\alpha)S_{t-1}^{(1)} \\ S_t^{(2)} = \alpha S_t^{(1)} + (1-\alpha)S_{t-1}^{(2)} \\ S_t^{(3)} = \alpha S_t^{(2)} + (1-\alpha)S_{t-1}^{(3)} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $x_t$  为  $t$  时刻的实际值;  $S_t^{(1)}$  为  $t$  时刻的一次平滑值;  $S_{t-1}^{(1)}$  为  $t-1$  时刻的一次平滑值;  $S_t^{(2)}$  为  $t$  时刻的二次平滑值;  $S_{t-1}^{(2)}$  为  $t-1$  时刻的二次平滑值;  $S_t^{(3)}$  为  $t$  时刻的三次平滑值;  $S_{t-1}^{(3)}$  为  $t-1$  时刻的三次平滑值;  $\alpha$  为平滑系数, 介于 0~1 之间。

#### 2) 关于平滑初值选取如下

$$S_1^{(1)} = S_1^{(2)} = S_1^{(3)} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \quad (3)$$

#### 3) 建立曲线预测模型

$$\hat{x}_{t+T} = a_t + b_t T + c_t T^2 \quad (4)$$

$$\begin{cases} a_t = 3S_t^{(1)} - 3S_t^{(2)} + S_t^{(3)} \\ b_t = \frac{\alpha}{2(1-\alpha)^2} [(6-5\alpha)S_t^{(1)} - 2(5-4\alpha)S_t^{(2)} + (4-3\alpha)S_t^{(3)}] \\ c_t = \frac{\alpha^2}{2(1-\alpha)^2} [S_t^{(1)} - 2S_t^{(2)} + S_t^{(3)}] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\hat{x}_{t+T}$  为  $t+T$  时刻的预测值;  $a_t$ 、 $b_t$ 、 $c_t$  为预测曲线参数。

这里需要指出, 关于平滑系数  $\alpha$  需要结合微电网云平台 PCC 功率监控和预测, 分典型日分时段取值。通过对不同典型日 PCC 功率曲线的分析, 在变化平缓处取较小的值, 在变化波动大时取较大的值, 实时学习更新并下发到中央控制器。

### 3.2.2 需量管理控制策略

需量管理控制策略如图 4 所示。参考微电网云平台的 PCC 功率统计分析数据, 可确定合适的协议最大需量  $D_{max}$ 。在每一个控制周期里计算一次 PCC 平均功率(控制周期  $(T_s=T_0/3=20$  s) 并放入需量计算体中, 记作  $P_{PCC\_45}$ , 同时剔除最早的控制周期里的功率数据  $P_{PCC\_0}$  以进行计算体的更新, 则需量计算体里有滑动更新的 45 个连续控制周期里功率数据组成需量计算序列。利用需量计算体里的数据可算

出当前控制周期的前 15 min 内 PCC 点平均功率(即当前需量  $D_{current}$ )；利用需量计算体系的数据基于三次指数平滑法进行预测，得到下一个控制周期里的 PCC 平均功率  $P_{predict}$ ，并进一步计算出下一个控制周期的预测需量  $D_{predict}$ ，如图 5 所示。

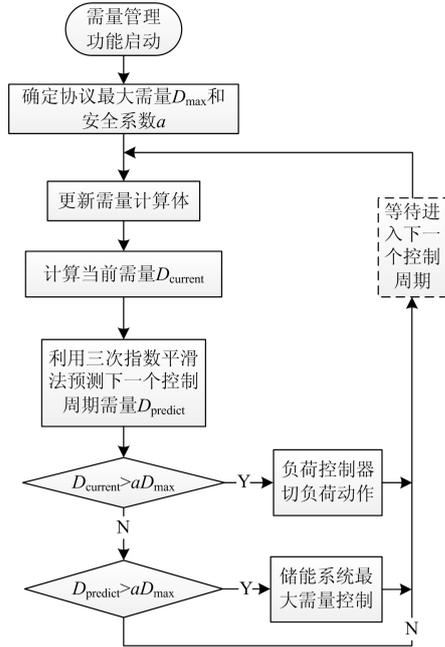


图 4 需量管理控制策略

Fig. 4 Control strategy of demand management

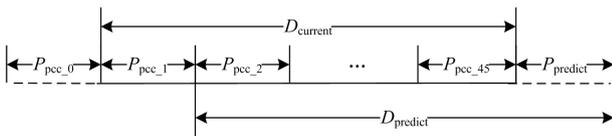


图 5 需量计算

Fig. 5 Calculation of demand

当冲击性负荷来临时，若预测需量超过警戒值时( $D_{predict} > aD_{max}$ )，进入储能系统最大需量控制过程，如图 6 所示。中央控制器给储能变流器下发放电指令，通过联络线控制功能确定储能系统实时放电功率，把 PCC 功率维持在安全值，在需量越限之前控制住需量，直到冲击性负荷过去，负荷侧功率下降到安全上限值以下，本次最大需量控制过程结束。

### 3.3 并网切换控制策略

#### 3.3.1 计划离网

当有计划离网需求时，微电网可切换到离网状态。在中央控制器监测到储能电池 SOC 满足约束的前提下，下发控制指令。通过联络线控制功能使 PCC 交换功率等于 0，储能变流器由 PQ 控制模式切换到 VF 控制模式(多台储能变流器运行时只切换一台到 VF 控制模式，其余保持 PQ 控制模式)，断

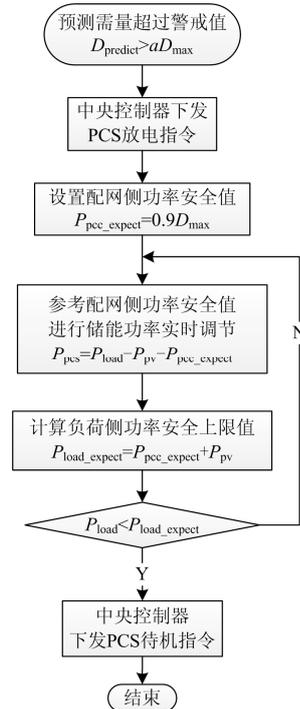


图 6 最大需量控制过程

Fig. 6 Process of maximum demand control

开 PCC 开关，微电网进入离网状态，同时光伏逆变器由 MPPT 模式切换到限功率运行模式。

#### 3.3.2 非计划离网及黑启动

当配电网出现电压频率异常或随机停电时，微电网可主动切换到离网状态。在储能电池 SOC 满足约束的前提下，中央控制器监测到配电网电压频率异常时，下发控制指令，同计划离网。配电网随机停电时，先切除所有逆变器和负荷，然后一台储能变流器黑启动并工作于 VF 模式，提供电压频率支撑建立微电网离网状态，再分级投入负荷，投入光伏逆变器使其工作于限功率运行模式(若有其余储能变流器，以 PQ 控制模式投入)。

#### 3.3.3 离网转并网

当配电网电压频率恢复正常或来电后，微电网可由离网状态切换到并网状态。储能变流器参照配电网参数进行微电网调压调频，使 PCC 两侧的压差频差均处于允许定值内，通过准同期算法捕获相角差处于允许值内时，合上 PCC 开关并切换储能变流器进入 PQ 模式，微网切换到并网状态。此时可设置光伏逆变器进入 MPPT 模式运行。

## 4 园区微电网物理实验平台测试

依据微电网拓扑结构和三层控制方式，在产业园区企业内搭建了微电网物理实验平台并稳定运行。微电网实验平台具体参数：光伏阵列 10 kW、

光伏逆变器 10 kW、储能变流器 10 kW、磷酸铁锂电池 30 kWh, 如图 7 所示。当微电网工作在并网工作模式下, 通过实验验证了并网时能量管理各策略的可行性。

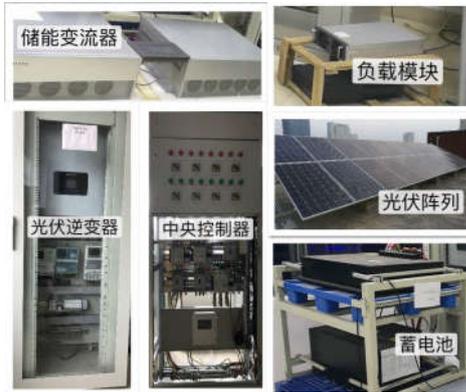


图 7 园区微电网物理实验平台

Fig. 7 Physics experiment platform of microgrid in the park

#### 4.1 能量搬移测试

启动能量搬移功能, 负荷侧接入某楼层照明办公负荷。峰谷平分时时段设置为: 谷时(0:00—9:00), 峰时(9:00—17:00), 平时(17:00—0:00)。根据蓄电池容量, 设置能量搬移功能下储能系统充电功率  $P_{ESS\_C}=1.5$  kW, 放电功率  $P_{ESS\_D}=2$  kW。一天内系统内各处功率曲线如图 8 所示。

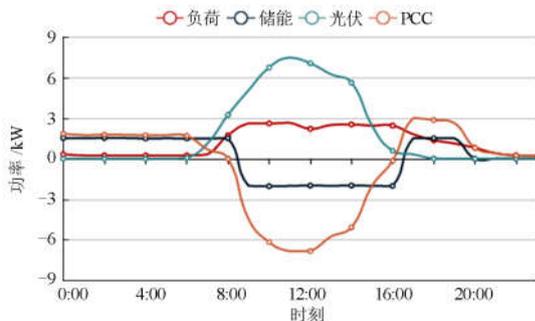


图 8 能量搬移测试结果

Fig. 8 Test result of energy transfer

0:00—9:00 处于谷时,  $P_{ESS}(t)>0$ (储能系统充电), 储能功率在 1.5 kW 上下浮动。其中 6:00 前光伏系统还未开始发电, 此时微电网内由配电网提供能量; 从 6:00 起光伏开始发电, 由配电网和光伏系统共同提供能量, PCC 功率开始下降; 到 8:00 后光伏发电功率过剩, PCC 功率反向, 能量完全由光伏系统提供, 并将多余电能输送到配电网。9:00—17:00 处于峰时,  $P_{ESS}(t)<0$ (储能系统放电), 功率在 2 kW 上下浮动。光伏发电功率先升高后降低, PCC 功率随之变化, 此时微电网内由储能系统和光伏系

统共同提供能量, 余电上网。17:00—23:00 处于平时, 但在 17:00 时监测到电池 SOC 处于电量略低状态, 需充电直至电量健康状态后储能系统进入待机。此时光伏发电功率继续下降直至停止发电, 由配电网提供能量。通过能量搬移, 电价谷时充电存储电能并在峰时释放, 产生可观的差价利润。

#### 4.2 联络线控制测试

启动联络线控制功能, 负荷侧接入某楼层照明办公负荷。设定 PCC 交换功率恒为 0, 一天内系统各处功率曲线如图 9 所示。

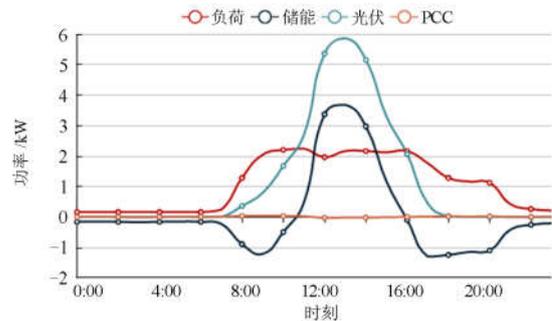


图 9 联络线控制测试结果

Fig. 9 Test result of tie line control

中央控制器监测光伏发电功率和负荷用电功率的波动, 根据式(1)计算出储能系统充放电功率并实时下发, 可看出一天内 PCC 功率保持在 0 上下微小浮动。7:00—10:40 和 16:00—23:00, 负荷用电功率大于光伏发电功率( $P_{load}(t) > P_{pv}(t)$ ),  $P_{ESS}(t) < 0$ (储能系统放电); 10:40—16:00 时, 负荷用电功率小于光伏发电功率( $P_{load}(t) < P_{pv}(t)$ ),  $P_{ESS}(t) > 0$ (储能系统充电)。

#### 4.3 需量管理测试

启动需量管理功能, 为了配合测试需要, 负荷侧接入可调测试负载模块。取平滑系数  $\alpha=0.2$ , 设置协议最大需量  $D_{max}=7$  kW, 安全系数  $a=0.98$ , 则警戒值  $aD_{max}=6.86$  kW。测试结果如表 1 所示。

表 1 需量管理测试结果

Table 1 Test result of demand management

采集序号	PCS 状态	$P_{ESS}/$ kW	$P_{pv}/$ kW	$P_{load}/$ kW	$P_{PCC}/$ kW	$D_{current}/$ kW	$D_{predict}/$ kW
1	待机	0.00	1.33	7.35	6.02	6.05	6.07
1+	待机	0.00	1.33	11.53	10.20	6.05	6.07
2	待机	0.00	1.16	11.54	10.38	6.59	6.65
3	待机	0.00	1.18	11.53	10.35	6.83	6.88
3+	放电	4.04	1.18	11.53	6.31	6.83	6.88
4	放电	4.12	1.09	11.52	6.31	6.53	6.49
5	放电	4.16	1.05	11.53	6.32	6.38	6.36
5+	待机	0.00	1.05	7.19	6.14	6.38	6.36

负载随机变化直至 1 时刻,此时 PCC 实时功率为 6.02 kW,当前需量为 6.05 kW,预测的下一个控制周期需量为 6.07 kW,储能系统处于待机状态;此时突加负载并保持不变,PCC 实时功率升到 10.20 kW。此后需量一直攀升,到 2 时刻,当前需量为 6.59 kW,预测需量为 6.65 kW。到 3 时刻,预测需量为 6.88 kW,表明在 20 s 后需量或超过警戒值,此时中央控制器下发放电指令给储能系统,并进行实时功率调节,需量被控制下来,到 4 时刻,需量已降到 6.53 kW。到 5 时刻,减小负载,此时负荷侧实时功率小于安全上限值,储能系统进入待机状态。整个过程,实际需量均没有到达警戒值,没有进行切负荷动作。

由测试结果分析可知,启动需量管理后,当出现冲击性负荷时,通过需量预测,在不影响负荷工作的情况下控制储能系统放电,提前进行需量控制,以防最大需量越限,并在负荷下降到安全值时结束控制,储能系统进入待机状态。需要说明的是,冲击性负荷持续时间若不长,没有导致需量超过警戒值时,不需要控制,所以没有在冲击性负荷出现时立刻投入需量控制操作。

## 5 结论

本文提出了一种适用于工商业园区的小型光储微电网系统设计方案,并研发了集计量监控和能量管理一体化的低成本、高集成的园区微电网中央控制器。该控制器采用模块化硬件设计,具有数据采集与存储,设备通信与人机交互等功能;考虑园区企业用能需求,开发具有园区特色的微电网能量管理策略和软件算法。通过搭建物理实验平台进行测试,验证了园区微电网系统设计方案的可信性与中央控制器的可靠性。后期将进一步利用微电网云平台,配合中央控制器开发更加具备实际操作性的能量管理策略,充分发挥在工商业园区建设微电网所带来的经济利益和社会价值,以推动园区微电网的大规模商业化应用。

## 参考文献

- [1] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids: An overview of ongoing research, development, and demonstration projects[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [2] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 6-11.  
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power Systems Technology, 2009, 33(11): 6-11.
- [3] 袁越, 李振杰, 冯宇, 等. 中国发展微网的目的方向前景[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 59-63.  
YUAN Yue, LI Zhenjie, FENG Yu, et al. Development purposes, orientations and prospects of microgrid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 59-63.
- [4] LI H, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [5] 马宇辉, 刘念. 用户侧微电网的能量管理方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 158-168.  
MA Yuhui, LIU Nian. Survey on energy management method of community micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 158-168.
- [6] 李江, 张永利, 刘强, 等. 分布式光储微电网系统并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 90-97.  
LI Jiang, ZHANG Yongli, LIU Qiang, et al. Research on grid-connected control strategy of distributed PV-storage microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 90-97.
- [7] 李保恩, 李献伟, 毋炳鑫. 基于储能 SOC 状态的微电网能量优化调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 108-114.  
LI Baoen, LI Xianwei, WU Bingxin. Research on energy optimal dispatching strategy for microgrid based on battery SOC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 108-114.
- [8] 韩中合, 祁超, 向鹏, 等. 分布式能源系统效益分析及综合评价[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 31-36.  
HAN Zhonghe, QI Chao, XIANG Peng, et al. Benefit analysis and comprehensive evaluation for distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 31-36.
- [9] 国家发改委, 国家能源局. 关于印发《推进并网型微电网建设试行办法》的通知[EB/OL]. [2016-07-17]. [http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201707/t20170724\\_855213.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201707/t20170724_855213.html).
- [10] 刘敦楠, 徐尔丰, 许小峰. 面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 681-689.  
LIU Dunnan, XU Erfeng, XU Xiaofeng. “Source-network-load-storage” integrated operation model for microgrid in park[J]. Power Systems Technology, 2018, 42(3): 681-689.
- [11] 任德江, 吴杰康. “源-网-荷-储”协同的园区微电网优

- 化调度[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 16-23.  
REN Dejiang, WU Jiekang. Optimized dispatching for park microgrid considering source-grid-load-storage coordination[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 16-23.
- [12] IQBAL F, SIDDIQUI A S. Optimal configuration analysis for a campus microgrid—a case study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 245-256. DOI: 10.1186/s41601-017-0055-z.
- [13] 张丹, 王杰. 国内微电网项目建设及发展趋势研究[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 451-458.  
ZHANG Dan, WANG Jie. Research on construction and development trend of micro-grid in China[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 451-458.
- [14] 徐少华. 光储微网: 园区智慧能源系统[N]. 国家电网报, 2017-8-15(5).
- [15] 杨恢宏, 余高旺, 樊占峰, 等. 微电网系统控制器的研发及实际应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 126-129.  
YANG Huihong, YU Gaowang, FAN Zhanfeng, et al. The development and application of microgrid system controller[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 126-129.
- [16] 查申森, 窦晓波, 王李东, 等. 微电网监控与能量管理装置的设计与研发[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 232-239.  
ZHA Shensen, DOU Xiaobo, WANG Lidong, et al. Design and research of microgrid monitoring and energy management device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 232-239.
- [17] 陈娜, 王劲松. 微电网模式控制器研制与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 115-120.  
CHEN Na, WANG Jingsong. Development and application of microgrid's connect and off-grid device[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 115-120.
- [18] 许志荣, 杨苹, 郑成立, 等. 用户侧光储型微电网中央控制器研制[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 426-433.  
XU Zhirong, YANG Ping, ZHENG Chengli, et al. Control device development of user-side PV-ESS microgrid[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 426-433.
- [19] DIMEAS A L, HATZIARGYRIOU N D. A MAS architecture for microgrids control[C] // Proceeding of the International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems, November 6-10, 2005, Arlington, VA, USA: 402-406.
- [20] 陈赋. 基于分层控制的微电网能量优化方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.  
CHEN Fu. Research on microgrid energy optimization based on hierarchical coordination control strategy[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [21] 叶蓉宣. 电能需求模型及其控制策略研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.  
YE Rongxuan. Research on electric power demand model and control strategy[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [22] 陈娟, 吉培荣, 卢丰. 指数平滑法及其在负荷预测中的应用[J]. 三峡大学学报, 2010, 32(3): 37-41.  
CHEN Juan, JI Peirong, LU Feng. Exponential smoothing method and its application to load forecasting[J]. Journal of China Three Gorges University, 2010, 32(3): 37-41.

收稿日期: 2018-04-12; 修回日期: 2018-09-30

作者简介:

丁明(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划及其可靠性、新能源技术及其应用; E-mail: mingding56@126.com

程清(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源与分布式发电技术; E-mail: 516663170@qq.com

李林(1979—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 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

(编辑 姜新丽)