

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190346

面向园区的光储型微电网设计与应用

刘练¹, 李林^{1,2}, 丁明¹, 虞海彪¹, 曹军²

(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: 为满足园区重要负荷在配电网失电后的可靠供电以及园区并网下的经济运行需求,设计了一种集光伏发电、储能装置、负荷等可控设备于一体的园区光储型微电网。开展了系统的容量配置和控制架构设计,研发了微电网中央控制器和园区能量管理系统等关键模块。园区微电网中央控制器提供的并离网下模式切换控制方法,在配电网发生故障时可快速切换运行模式,保障了园区重要负荷的稳定供电,最大化减小了配电网故障带来的影响。园区能量管理系统提供的经济调度模型,以最小运行费用为目标,通过商业软件 CPLEX 求解,给出了园区各设备在多场景下的最优运行结果。设计的系统已在某产业园成功应用,通过实测数据证明了所设计系统的合理性。

关键词: 光储型微电网; 微电网中央控制器; 能量管理系统; 经济调度; 模式切换

Design and application of photovoltaic and energy storage microgrid for the park

LIU Lian¹, LI Lin^{1,2}, DING Ming¹, YU Haibiao¹, CAO Jun²

(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: A kind of PV-energy storage microgrid in the park which includes distributed power generation, energy storage device, load and other controllable equipment is designed to meet the needs of reliable power supply of important loads when faults occur on distribution network and economic operation under grid-connected mode. This paper carries out the capacity allocation and control architecture design of PV-energy storage microgrid system, and develops key modules such as the microgrid central controller and the energy management system. The mode switching method provided by the central controller of the microgrid in the park under grid-connected mode or grid-disconnected mode can be used when faults occur on distribution network to ensure the stable power supply of important loads in the park and minimize the impact of distribution network faults. The economic dispatch model provided by the park's energy management system, aiming at the minimum operation cost, is solved by the commercial software CPLEX, and the optimal operation results of each equipment under many scenarios are given. The designed system has been successfully applied in industrial park and proved the rationality by the measured data.

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

Key words: PV-energy storage; microgrid central controller; energy management system; economic dispatch; mode switch

0 引言

近年来,随着大规模分布式可再生能源的蓬勃发展,微电网作为一种分布式电源的有效接入和管

理方式,已经成为现代电网的重要组成部分^[1-7]。园区光储型微电网由光伏电源、负荷、储能系统和控制装置构成,是一种能够实现保护控制和能量管理的自治系统。开展园区光储型微电网的设计与应用,综合考虑到园区面积、厂房布局、资源禀赋等诸多因素,贴近用户,易于推广,对于园区多能利用、可靠供电、经济运行具有积极意义^[8-12]。围绕园区

基金项目:国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900400)
“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”

微电网组成构架设计、关键设备研制、并离网模式切换方法、经济运行等关键技术问题，文献[13-14]给出了光储微网系统的组成构架设计和并/离网下运行控制的模式切换方法，提高了负荷供电可靠性，但未考虑系统设备的经济运行方式，缺乏对系统的经济性分析；文献[15-16]在研究综合能量管理平台技术和区域能量综合预测技术基础上，设计并开发了一种综合能量管理系统，但未涉及系统在并/离网下的灵活运行方式，难以满足配电网停电后对负荷的持续供电；文献[17-19]通过在用户侧建模，以一个调度周期的运行成本最低为目标函数，实现间歇式能源的消纳及优化，但其仅从价格和优化策略角度考虑系统优化运行，未考虑设备实际运行故障问题，涉及的实际应用场景不足。

针对上述问题，本文以某科技产业园区工程应用为背景，从系统的拓扑结构、分层控制架构设计、

关键设备的研发等方面对该工程应用的主要特点进行了研究，重点解决了配电网停电后园区办公等重要负荷的可靠供电以及园区微电网并网条件下多场景的经济运行问题。提出园区光储型微电网经济调度模型，通过园区微电网不同控制设备之间的配合，完成与配电网侧在多场景下的协调经济调度；给出并/离网模式切换方法，提高园区重要负荷供电稳定性，实现园区差异化服务。

1 园区光储型微电网拓扑结构及容量配置

1.1 拓扑结构

本文设计的园区光储型微电网采用共交流母线方式，其包括能量管理系统、微电网中央控制器、环境监测仪、园区屋顶光伏阵列、光伏逆变器、主/从储能电池、储能双向变流器 PCS、可控分级负荷单元等，其架构如图 1 所示。

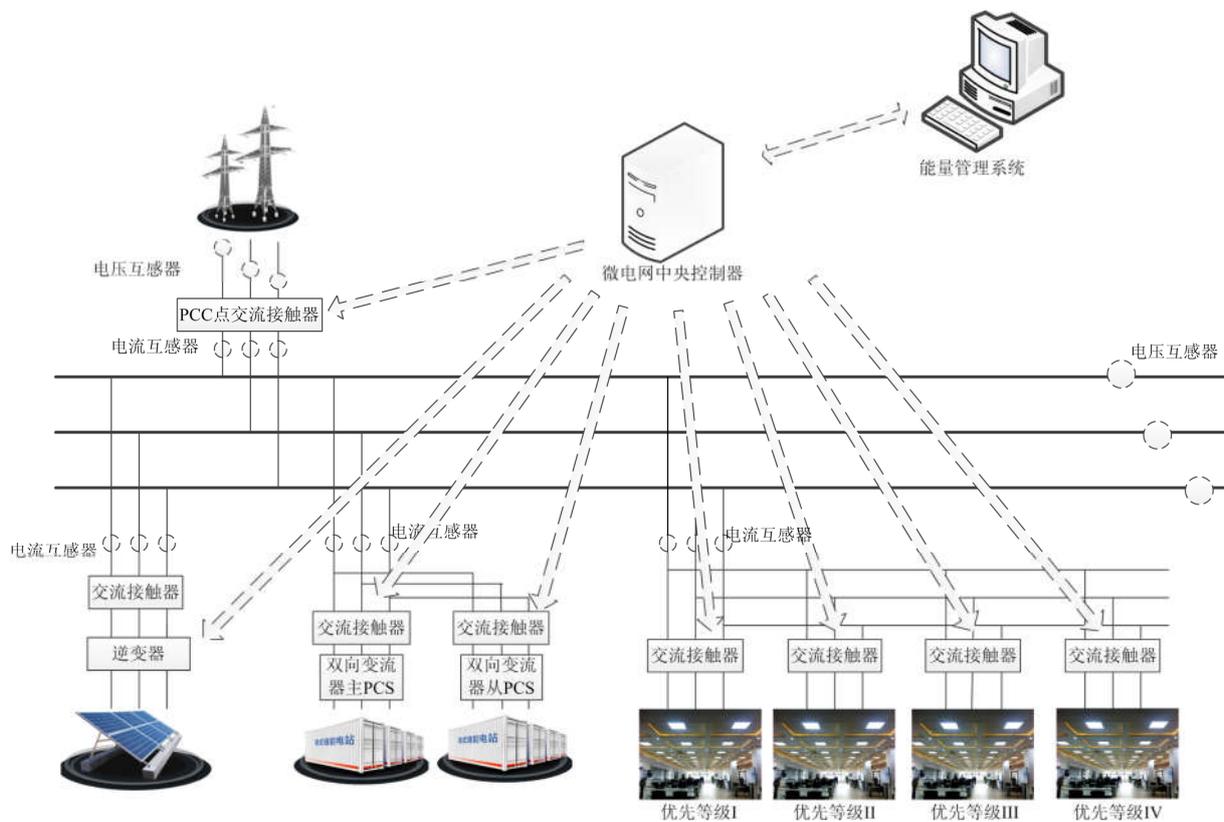


图 1 园区光储微电网拓扑结构

Fig. 1 Structure of PV-storage microgrid in the park

由图 1 可知，园区光储型微电网与配电网在 PCC 点通过进线开关相连，当配电网正常带电时，进线开关闭合，园区微电网能量管理系统以系统运行成本最低为目标，生成调度指令，完成对储能系统的充放电管理以及与配网侧交互电量管理，使园

区微电网运行于最优经济模式；当配电网故障断电时，园区微电网中央控制器控制断开进线开关，储能单元由并网下的 PQ 控制转为离网下的 VF 控制，为交流母线提供稳定的电压和频率，支撑整个系统运行，光伏发电单元运行于限功率模式；微电网能

量管理系统根据负荷的用电情况、储能单元电池状态和光伏发电能力, 计算出光伏单元和储能单元的出力分配, 控制系统在离网下可靠运行。

1.2 容量配置

园区建成有 180 kW 楼顶光伏板, 180 kW 的光伏逆变器, 光伏逆变器可运行于 MPPT 或限功率模式; 园区包含四路分级负荷, 且负荷多为办公照明负荷, 功率波动较小, 负荷总功率在 60~80 kW 波动, 四路负荷某日实测功率分别为 7.95 kW、22.38 kW、24.93 kW、10.06 kW, 优先级依次递减; 考虑到园区功率过剩或缺额时引起的电压频率波动以及电网停电后分级负荷的稳定供电, 园区配备 50 kW/100 kWh 主、从储能系统, 主、从储能系统最大充放电功率均为 50 kW。当系统功率过剩时, 主从储能系统吸收多余功率进行充电; 当系统功率缺额时, 主从储能系统放电释放功率补充功率缺额。

2 园区光储型微电网控制架构

园区光储型微电网控制架构采用集中管理和分层控制的思想^[20-22], 通过就地控制层、协调控制层和优化控制层之间的协调配合, 解决分布式光伏、储能及负荷的协调控制, 保证微网内功率自治平衡。三层控制结构如图 2 所示。

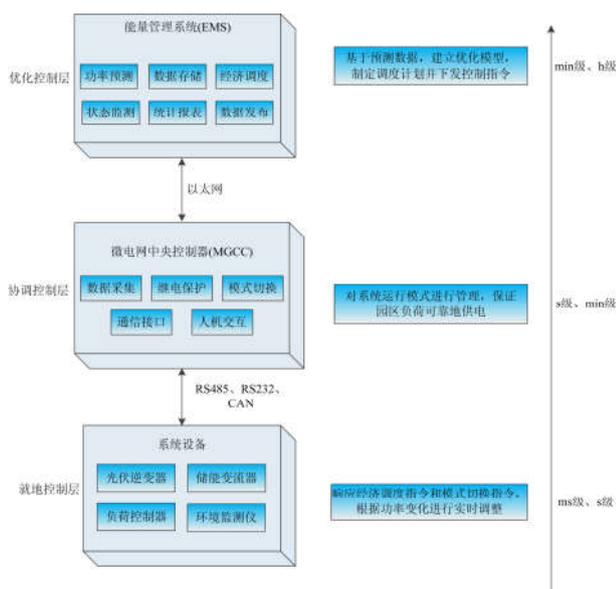


图 2 园区光储微电网三层架构

Fig. 2 Three-tier architecture of PV-storage microgrid

2.1 就地控制层

就地控制层主要包含储能变流器、光伏逆变器、负荷控制器以及各交流接触器和开关, 接受来自协调控制层的控制指令, 完成各逆变器工作模式切换

和负荷投切。就地控制层有以下技术特点: 1) 储能变流器支持恒功率(PQ)、恒压恒频(VF)模式, 满足园区微电网并/离网模式的切换要求; 2) 光伏逆变器可工作于 MPPT 或限功率模式; 3) 负荷侧按照重要等级分级, 实现重要负荷优先供电。

2.2 协调控制层

协调控制层由园区微电网中央控制器担任, 负责微电网的检测、控制和继电保护。协调控制层有以下技术特点: 1) 园区微电网中央控制器采用基于 ARM 的双 CPU 平台架构, 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; 2) 园区微电网中央控制器具有丰富的通信接口, 系统的可扩展性强; 3) 园区微电网中央控制器具有并/离网运行控制、自动同期、需量管理等多种功能, 满足园区用电多样性需求。

2.3 优化控制层

优化控制层由园区微电网能量管理系统担任, 其在数据采集、负荷预测等相关系统提供的数据库上, 实现特定应用下的数据分析、负荷管理和经济调度等功能。优化控制层有以下技术特点: 1) 园区微电网能量管理系统提供的经济调度模型, 可使园区在不同场景下运行于最优经济状态, 最大化实现园区经济效益; 2) 园区微电网能量管理系统实时感知微网态势, 快速响应源网荷变化, 确保微网随时处于高效、经济、安全、可靠运行状态。

3 园区微电网中央控制器设计

3.1 “三遥”子系统

遥测模块采用基于 STM32F407ZET6 芯片的 ADC+DMA 采样, 通过电压电流互感器将采集到的模拟信号通过 A/D 转换变成数字信号, 最后通过校准、计算, 得到配电网侧和交流母线上的电压、电流、频率、有功、无功等; 遥信模块负责状态信息的远程监视, 完成开关位置信号和保护动作信号的测量; 遥控模块作为远程控制手段, 接收并执行遥控命令, 包含各个开关的分合闸以及负荷的投切, 为自动并/离网切换提供了控制条件。

3.2 通信子系统

园区微电网中央控制器作为就地设备层和优化控制层的中间环节, 具有丰富的通信接口。园区微电网中央控制器通过以太网通信接口与优化控制层通信, 完成底层设备信息、保护动作状态、电气量参数的上送和调度指令、预测数据的获取; 通过 RS485 接口完成与光伏逆变器的通信, 完成对光伏组件的工作状态等信息的获取和控制指令的下发;

通过 CAN 通信接口与储能逆变器通信,完成对电池 SOC 值实时监测、充放电功率值设定和并/离网下工作模式切换指令的下发。同时,园区微电网中央控制器还配有 RS232 接口,丰富的通信接口增强了系统的可扩展性。

3.3 模式切换子系统

园区微电网中央控制器具备并/离网下的模式切换功能,保障了园区重要负荷的供电稳定性。模式切换子系统进行模式切换的流程如图 3 所示。

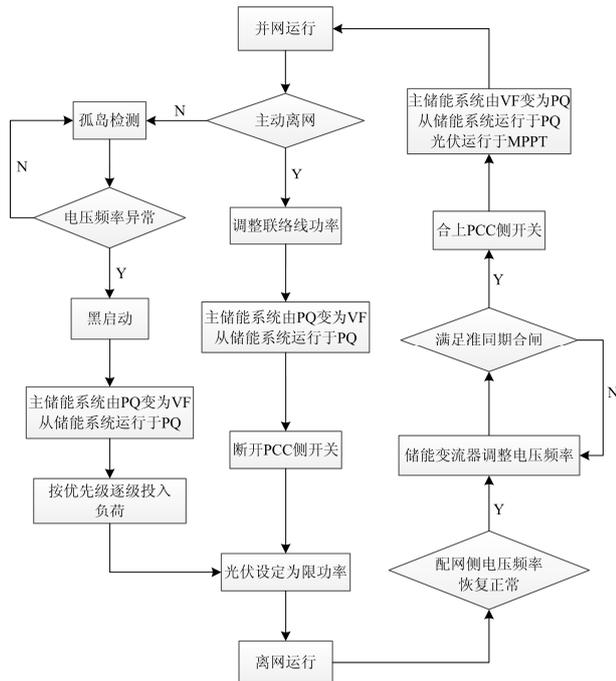


图 3 模式切换流程图

Fig. 3 Process of mode switching

园区微电网切换模式包括以下三种情况。

1) 主动离网

园区产生主动离网的需求时,园区微电网中央控制器协调控制源荷功率,调整联络线功率为零,主储能系统由并网下的 PQ 模式切换为 VF 模式,作为系统主电源提供电压频率支撑,从储能系统保持 PQ 模式,断开 PCC 点开关,设置光伏限功率运行,系统转为离网运行。

2) 被动离网及黑启动

当配电网侧出现电压或频率异常,超出电压和频率的安全范围,或者检测到 PCC 点开关断开,园区微电网由于缺少主电源而进入黑启动阶段。进入黑启动阶段后,启动主储能系统作为主电源并由并网下的 PQ 控制变为离网下的 VF 控制,负责离网下电压和频率的支撑;从储能系统启动并运行于 PQ 模式,负责调节负荷功率;负荷按照优先级逐级投

入。由于主储能系统工作于 VF 模式,具有快速的功率平衡响应,因此在负荷投入瞬间由主储能系统负责负荷功率平衡,待投入下级负荷前转至从储能系统负责,以此逐步投完。完成黑启动后,光伏系统设定为限功率模式,进入离网运行。所有操作自动完成无需人为介入。

3) 离网转并网

当配电网侧电压和频率恢复到正常水平时,微电网中央控制器发出并网指令,主储能系统通过快速调节输出的电压幅值、频率和相位,实现准同期并网。合上 PCC 开关后,主储能系统由离网下的 VF 模式切换为并网下的 PQ 控制,与从储能系统共同完成功率调节任务,光伏系统设置为 MPPT 模式运行。负荷功率在光伏系统投入前由配电网平衡,待光伏系统投入后转至光伏系统平衡。

4 园区能量管理系统设计

4.1 功率预测子系统

在微电网中,负荷预测以及光伏出力预测对微电网指导各种微源启停、制定经济运行策略、管理储能充放电具有重要意义。

光伏出力预测采用 BP 神经网络算法,以 T 为时间间隔(T 可取 15 min~1 h),以待预测日所处季节、日天气类型、日最高温度、日最低温度、湿度等气象因素筛选出历史数据中相似日样本,训练 BP 神经网络,最后输入待测日气象数据获得预测结果。

负荷预测采用 BP 神经网络算法,以 T 为时间间隔(T 可取 15 min~1 h),以待测日所处月份、星期类型、日最高温度、日最低温度筛选出历史数据中相似日样本,训练 BP 神经网络,最后输入待测日所处月份、星期类型和气象数据获得预测结果。

4.2 监测子系统

园区微电网的监测子系统包含状态监测、组件检测和系统告警,能够实时获取各逆变器工作状态、发电量、有功功率、组件温度和储能系统的 SOC 值、充放电功率等信息,并能够及时感知微网运行态势,发出告警信息,通知微网快速做出响应。

4.3 经济调度子系统

并网模式下,系统以整体运行费用最小为目标函数,结合峰谷电价信息,考虑功率平衡约束、储能充放电功率约束、联络线功率约束、储能电池荷电量状态 SOC 约束等,构建出经济调度的数学模型,运用 CPLEX 求解,得到调度结果,并将结果上传到优化控制层,控制各个设备按计划运行^[23]。

1) 建立园区微电网经济调度运行成本目标函数

$$\min C(X) = C_{\text{GRID}}(X) + C_{\text{ESS}}(X) \quad (1)$$

式中: $C_{\text{GRID}}(X)$ 表示园区光储微电网与大电网能量交换成本; $C_{\text{ESS}}(X)$ 为储能电池的运行成本; X 为优化变量。

2) 建立与电网交互成本数学模型

$$C_{\text{GRID}}(X) = \sum_{t=1}^{24} (P_b^t c_b^t - P_s^t c_s^t) \Delta T \quad (2)$$

式中: P_b^t 、 P_s^t 分别为 t 时段园区微电网向大电网购电和售电的功率, 即 PCC 点的交换功率; c_b^t 、 c_s^t 分别为 t 时段园区微电网向大电网购电和售电的电价; ΔT 为时间段的间隔, 为 1 h。

3) 建立储能运行维护成本数学模型

$$C_{\text{ESS}}(X) = \sum_{t=1}^{24} (P_{\text{ESSc}}^t c_{\text{ESSc}} + P_{\text{ESSd}}^t c_{\text{ESSd}}) \Delta T \quad (3)$$

式中: P_{ESSc}^t 、 P_{ESSd}^t 分别为储能电池的充放电功率; c_{ESSc} 、 c_{ESSd} 分别为储能电池的充放电成本系数; ΔT 为时间段间隔, 为 1 h。

4) 建立约束条件

a. 功率平衡约束

$$P_b^t + P_{\text{ESSd}}^t + P_{\text{pv}}^t = P_s^t + P_{\text{ESSc}}^t + P_l^t \quad (4)$$

b. 联络线交互功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_b^t \leq P_b^{\max} \\ 0 \leq P_s^t \leq P_s^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中, P_b^{\max} 、 P_s^{\max} 分别为微电网向大电网的最大购电功率和最大售电功率。

c. 储能电池充放电约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ESSc}}^t \leq P_{\text{ESSc}}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{ESSd}}^t \leq P_{\text{ESSd}}^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中, P_{ESSc}^{\max} 、 P_{ESSd}^{\max} 分别为储能电池的最大充电功率和最大放电功率。

d. 储能电池 SOC 约束

$$SOC_{\min} \leq SOC^t \leq SOC_{\max} \quad (7)$$

$$SOC^{t+1} = SOC^t + \frac{P_{\text{ESSc}}^t \Delta t}{E_n} - \frac{P_{\text{ESSd}}^t \Delta t}{E_n} \quad (8)$$

式中: SOC_{\max} 、 SOC_{\min} 分别为储能电池的最大和最小荷电状态; E_n 为储能电池的额定容量。

5) 模型求解

IBM 公司开发的 CPLEX 优化软件具备求解线性规划(LP)、二次规划(QP)、混合整数规划(MIP)等问题的功能, 除了采用自身 OPL 建模语言, 还与众多优化软件及语言兼容(与 C++、JAVA、Matlab 等都有接口), 其高级优化算法能够为特定的模型快速找到最优解决方案, 较仿生算法有较快的求解速度。鉴于此, 本文通过在 JAVA 环境中搭建上述模

型, 以各时段购售电功率 P_b^t 、 P_s^t 和储能充放电功率 P_{ESSc}^t 、 P_{ESSd}^t 为待优化变量, 调用 CPLEX12.6 优化软件, 完成本文优化调度求解。

5 工程应用

本文设计的园区微电网系统依托某科技产业园, 成功实现商用, 园区内配备了 180 kW 的光伏发电系统, 180 kW 的光伏逆变器, 50 kW/100 kWh 的主、从储能系统, 园区实时三相分级负荷, 气象仪, 配电柜, KD-MGCC001 园区微电网中央控制器。具体系统组成及设备情况如图 4 所示。



图 4 园区微电网物理实验平台

Fig. 4 Physics experiment platform of microgrid in the park

5.1 园区经济调度功能

5.1.1 调度方案设计

为比较分析不同场景的调度结果和微电网适用性, 本文设计了以下多个场景。

Case1: 基于经验人为设定储能定时充放电的调度方案;

Case2: 基于本文经济调度算法的灵活调度方案;

Case3: 考虑储能系统故障退出运行条件下采用本文优化模型的调度方案;

Case4: 考虑光伏系统故障退出运行条件下采用本文优化模型的调度方案。

本文所研究的时间间隔为 1 h, 从电网购电电价采用峰谷电价, 峰谷电价时段以及峰谷电价价格具体如表 1 所示, 光伏上网电价为 0.42 元/kW, 光伏发电的补贴价格为 0.37 元/kW, 储能运行维护价格为 0.15 元/kW, 储能系统 SOC 设定范围为 [0.2, 0.8], 光储系统倒送至电网功率上限为 100 kW, 购电功率上限为 200 kW。

5.1.2 调度结果比较分析

Case1: 针对典型晴天条件下, 光伏发电充足, 设备正常运行, 手动设定储能系统在电价谷时段充电至 SOC 上限, 在电价峰时段放电至 SOC 下限,

经济调度曲线如图 5 所示。

表 1 峰平谷电价表

Table 1 Peak level valley electricity price

| 时段 | 时刻 | 电价/(元/kWh) |
|----|------------------------|------------|
| 谷 | 23:00~次日 8:00 | 0.456 7 |
| 平 | 8:00~9:00、12:00~17:00 | 0.765 1 |
| 峰 | 9:00~12:00、17:00~22:00 | 1.115 6 |

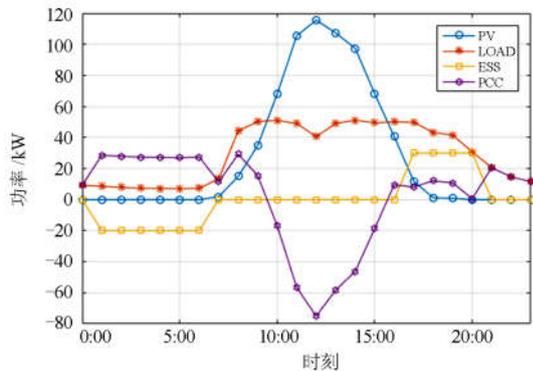


图 5 Case1 经济调度结果

Fig. 5 Economic dispatching results of Case1

由图 5 可知，在夜间电价低谷时段，负荷和电价水平较低，储能装置从 1:00 开始以 20 kW 的恒功率进行充电至早上 7:00 结束，电池处于充满状态。到达下午 17:00，此时电价处于峰时段，储能系统开始以 30 kW 的恒功率放电至晚上 21:00，储能系统的 SOC 达到最低水平，停止放电。光伏在凌晨至早上 7:00，发电功率基本为 0，负荷功率由电网满足，9:00 之后，随着光照强度的提高，光伏发电功率大于负荷，负荷功率完全由光伏满足，并且多余的光伏功率送至电网，获取经济效益，满足“自发自用，余电上网”的原则。

Case2: 针对典型晴天条件下，光伏发电充足，设备正常运行，采用能量管理系统的经济调度算法，系统的经济调度曲线如图 6 所示。

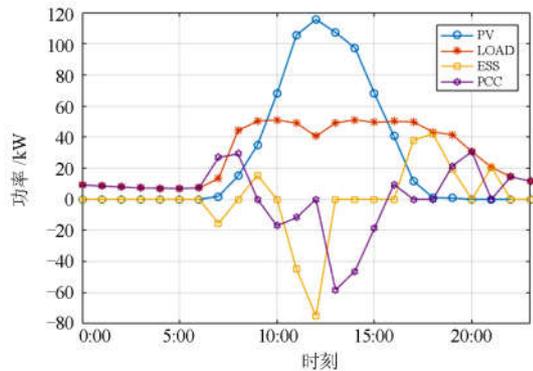


图 6 Case2 经济调度结果

Fig. 6 Economic dispatching results of Case2

由图 6 可知，储能系统多数在光伏发电充足、光伏功率大于负荷功率的午时段进行充电，在电价为峰时电价的 17:00 开始进行放电至 22:00 结束，此时储能系统的 SOC 达到最低水平，停止放电。光伏系统在光照充足、发电功率大于负荷功率的时段，其发电功率分为三个流向：一部分功率供给负荷，满足负荷供电需求；一部分功率给储能充电，使其在光照不足时代替光伏给负荷供电；最后一部分为光伏发电剩余的部分送至电网获取经济效益。

Case3: 晴天天气下，考虑到储能系统出现故障退出运行，光伏系统正常工作，采用能量管理系统的经济调度算法，系统的经济调度曲线如图 7 所示。

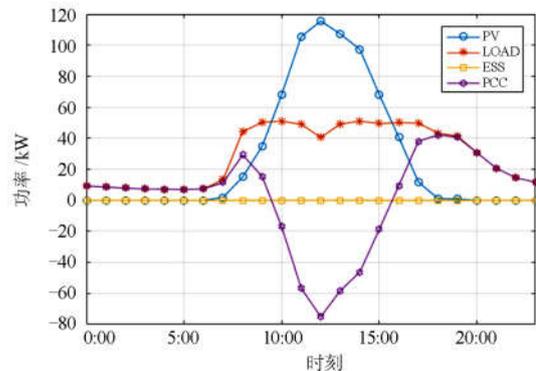


图 7 Case3 经济调度结果

Fig. 7 Economic dispatching results of Case3

由图 7 可知，储能系统因故障退出运行，此时只剩下光伏和电网给负荷供电，在光伏发电不足阶段，通过从电网侧购电满足负荷功率，随着光照强度的增强，光伏发电功率大于负荷，负荷功率由光伏发电满足并且多余的光伏功率送至电网，获取经济效益。

Case4: 晴天天气下，考虑到光伏系统出现故障退出运行，储能系统正常工作，系统的经济调度结果如图 8 所示。

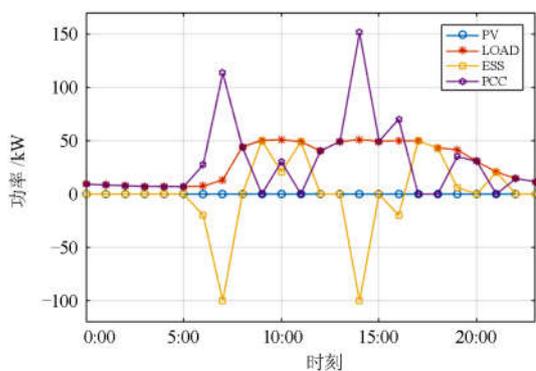


图 8 Case4 经济调度结果

Fig. 8 Economic dispatching results of Case4

由图 8 可知, 光伏系统因故障退出运行, 储能系统在 8:00 之前电价处于谷时充满, 从 9:00~12:00 时段电价到达峰时, 储能系统放出电量供给负荷直至 SOC 达到最低水平停止放电; 当电价来到平时, 储能系统开始充电至 17:00 之前充满, 在 17:00~22:00 时段, 电价处于峰时, 储能系统放电供给负荷直至 SOC 达到最低水平停止放电, 储能系统通过峰谷差价的存在实现峰谷套利。

5.1.3 经济性分析

Case1—Case4 的总收益、购电成本、售电收益、光伏补贴收益、储能运行成本和光伏消纳率如表 2 所示。

表 2 经济效益分析

Table 2 Economic benefit analysis

| | 购电成本/元 | 售电收益/元 | 光伏补贴收益/元 | 储能成本/元 | 总收益/元 | 光伏消纳率 |
|-------|--------|--------|----------|--------|---------|-------|
| Case1 | 205.94 | 114.16 | 247.10 | 36.00 | 119.32 | 0.59 |
| Case2 | 140.94 | 63.76 | 247.10 | 40.64 | 129.28 | 0.77 |
| Case3 | 285.01 | 114.16 | 247.10 | 0.00 | 76.25 | 0.59 |
| Case4 | 515.07 | 0.00 | 0.00 | 72.00 | -587.07 | 0.00 |

由表 2 可知, Case2 较 Case1 具有更好的经济性, Case1 售电收益较 Case2 更大, 但高额的购电费用使得 Case1 的总收益低于 Case2; Case2 的光伏

消纳率由 0.59 提高到 0.77, 更好地实现光伏发电就地消纳, 联络线峰值由 75.05 kW 下降至 58.19 kW, 减小了联络线的功率波动, 实现了“削峰填谷”和更友好的并网, 充分体现了本文提供的经济调度算法对于园区微电网系统经济运行具有良好的适用性。

Case2、Case3、Case4 给出了不同场景下的调度方案, 通过对比 Case2 和 Case3 可以看出, Case2 由于储能系统的存在, 其能量搬移作用把午间过剩的光伏存储起来, 在晚上电价高峰时释放, 降低了系统成本, 增加了园区收益; 通过对比 Case3 和 Case4 可以看出, 光伏设备出现故障带来的经济损失比储能设备出现故障带来的经济损失更高, 这是由于光伏的退出使光伏补贴收益为零, 同时没有多余的电量售至电网来获取收益, 因此带来的经济损失更大。经济调度算法给出不同场景下的调度方案, 在相应场景下皆可达到最优的经济性, 符合园区实际运行情况, 使园区微电网系统的运行方式更具有灵活性。

5.2 模式切换功能

5.2.1 并网转离网

针对某日园区配电网突然停电, 园区微电网系统孤岛检测模块检测到配电网侧电压频率异常, 园区微电网中央控制器下发并网转离网的模式切换指令, 并网转离网实测数据如表 3 所示。

表 3 并网转离网数据

Table 3 Data of grid-connected to grid-disconnected

| | 交流母线电压/V | 交流母线频率/Hz | PCC 开关状态 | 主储能工作模式 | 从储能工作模式 | 光伏工作模式 | 负荷功率/kW | PCC 点功率/kW | 主储能功率/kW | 从储能功率/kW | 光伏功率/kW |
|------------------|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|---------|------------|----------|----------|---------|
| 并网运行 | 380 | 50 | 闭合 | PQ | PQ | MPPT | 65.32 | -16.94 | 0 | 0 | 82.26 |
| 黑启动 ¹ | 380 | 50 | 断开 | VF | PQ | 待机 | 7.95 | 0 | 7.95 | 0 | 0 |
| 黑启动 ² | 380 | 50 | 断开 | VF | PQ | 待机 | 30.33 | 0 | 22.38 | 7.95 | 0 |
| 黑启动 ³ | 380 | 50 | 断开 | VF | PQ | 待机 | 55.26 | 0 | 24.93 | 30.33 | 0 |
| 黑启动 ⁴ | 380 | 50 | 断开 | VF | PQ | 待机 | 65.32 | 0 | 15.32 | 50 | 0 |
| 离网运行 | 380 | 50 | 断开 | VF | PQ | 限功率 | 65.32 | 0 | 0 | 15.32 | 50.00 |

由表 3 可知, 并网模式下, 母线电压频率由电网侧建立, 实测园区四路负荷总功率为 65.32 kW, 每个楼层实际负荷功率分别为 7.95 kW、22.38 kW、24.93 kW、10.06 kW, 优先级依次递减, 光伏输出功率为 82.26 kW, 园区负荷功率由光伏系统承担, 并且多余的功率售至电网获取收益。进入黑启动阶段, 主储能系统启动并由 PQ 控制模式切换为 VF 控制模式, 在交流母线上建立起三相电压和频率, 待母线电压和频率稳定后, 按优先级逐级投入负荷。主储能系统在负荷投入瞬间负责负荷功率平衡, 待投入下级负荷前转至从储能系统负责, 以此逐步投

完。从储能系统充放电功率上限为 50 kW, 因此四路负荷投入后从储能系统以最大功率放电, 剩余负荷功率缺额由主储能系统承担。负荷投入完成后, 进入离网运行模式, 此时启动光伏系统并以 50 kW 的限功率模式运行, 从储能系统承担剩余的负荷功率缺额。自此完成并网到离网的切换, 实现分级重要负荷的稳定持续供电。

5.2.2 离网转并网

当配电网来电后, 园区微电网中央控制器下发并网转离网的模式切换指令, 并网转离网实测数据如表 4 所示。

表 4 离网转并网数据

Table 4 Data of grid-disconnected to grid-connected

| | 交流母线 电压/V | 交流母线 频率/Hz | PCC 开关 状态 | 主储能工 作模式 | 从储能工 作模式 | 光伏工作 模式 | 负荷功 率/kW | PCC 点 功率/kW | 主储能 功率/kW | 从储能 功率/kW | 光伏 功率/kW |
|------|--------------|---------------|--------------|-------------|-------------|------------|-------------|----------------|--------------|--------------|-------------|
| 离网运行 | 380 | 50 | 断开 | VF | PQ | 限功率 | 62.10 | 0 | 0 | 12.10 | 50.00 |
| 并网启动 | 380 | 50 | 闭合 | PQ | PQ | 待机 | 62.10 | 62.10 | 0 | 0 | 0 |
| 并网运行 | 380 | 50 | 闭合 | PQ | PQ | MPPT | 62.10 | 0 | 0 | -17.90 | 80.00 |

由表 4 可知，园区微电网系统运行于离网模式时，交流母线电压频率由主储能系统建立，此时的负荷总功率为 62.10 kW，光伏以 50 kW 工作于限功率模式，负荷功率由光伏和储能系统共同承担。当配电网来电后，进入并网启动阶段，此时主储能系统参照配电网电压和频率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值内，合上 PCC 开关并切换主储能系统进入 PQ 模式，微网切换到并网状态，母线的电压频率由配电网建立，待母线电压频率稳定后投入全部负荷并由配电网完成功率平衡。负荷投入完后，进入并网运行模式，光伏系统运行于 MPPT 模式，负荷功率全部由光伏承担，剩余的光伏功率用于从储能系统的充电，自此完成由离网转为并网运行。

6 结论

为提高园区微电网系统的安全稳定运行能力和经济效益，本文设计了适用于工业园区的光储型微电网，并对系统的构成、系统的三层架构、系统关键设备和主要功能进行了详细的说明和分析。

该微电网已经在合肥高新区成功应用，系统的运行效果达到了预期目标，实现了光伏发电的最大化就地消纳，降低了园区的用电费用，提高了园区重要负荷的供电可靠性，验证了所设计系统的合理性和有效性。

参考文献

[1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.

[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 System Technology, 2009, 33(11): 6-11.

[3] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.

WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.

[4] 吴雄, 王秀丽, 刘世民, 等. 微电网能量管理系统研究综述[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 7-14.
WU Xiong, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Summary of research on microgrid energy management system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 7-14.

[5] SU W C, WANG J H. Energy management systems in microgrid operations[J]. The Electricity Journal, 2012, 25(8): 45-60.

[6] KATIRAEI F, IRAVANI R, HATZIARGYRIOU N D, et al. Microgrids management[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.

[7] 杨秋霞, 刘同心, 高辰, 等. 计及光伏电站功率预测的电力系统优化分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 117-123.
YANG Qiuxia, LIU Tongxin, GAO Chen, et al. Power system optimization analysis considering power prediction of PV power station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 117-123.

[8] 谢桦, 腾晓斐, 张艳杰, 等. 风/光/储微网规划经济性影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 70-76.
XIE Hua, TENG Xiaofei, ZHANG Yanjie, et al. Analysis of economic influence factors in wind-photovoltaic-storage microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 70-76.

[9] 戴璐平, 吴薇, 黄蓓雯. 考虑不确定性的分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化能量调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 48-55.
DAI Luping, WU Wei, HUANG Beiwen. Optimal energy scheduling for family grid-connected photovoltaic systems considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 48-55.

[10] 王成山, 洪博文, 郭力. 不同场景下的光蓄微电网调度策略[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1775-1782.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li. Dispatch strategies of PV-Battery microgrid in different scenarios[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1775-1782.

- [11] 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.
- [12] LI J L, XUE Y S, TIAN L T, et al. Research on optimal configuration strategy of energy storage capacity in grid-connected microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 389-396. DOI: 10.1186/s41601-017-0067-8.
- [13] 王晓华, 孙德亮, 李维华, 等. 光储微网系统设计与应用[J]. 合肥工业大学学报, 2016, 39(1): 79-83.
WANG Xiaohua, SUN Deliang, LI Weihua, et al. Design and application of photovoltaic and energy-storage micro-grid system[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2016, 39(1): 79-83.
- [14] 冯恽彬, 汪科, 葛晓慧, 等. 交直流混合微电网系统设计与控制架构分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 144-150.
FENG Yibin, WANG Ke, GE Xiaohui, et al. System design and control framework analysis of hybrid AC-DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 144-150.
- [15] 鲁文, 李卫星, 杜红卫, 等. 主动配电网综合能量管理系统设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 133-139.
LU Wen, LI Weixing, DU Hongwei, et al. Design and application of integrated energy management system in active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 133-139.
- [16] 田军, 刘征宇, 舒军, 等. 适用于工业园区的微电网系统能量管理[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 45-50.
TIAN Jun, LIU Zhengyu, SHU Jun, et al. Energy management for microgrid system of industrial park[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 45-50.
- [17] 胡勇. 主动配电网用户侧能量管理系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 149-155.
HU Yong. Design and implementation of user energy management system on active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 149-155.
- [18] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 177-183.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on optimal schedule strategy for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 177-183.
- [19] 马霖, 张世荣. 分时电价/阶梯电价下家庭并网光伏发电系统运行优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 820-825.
MA Lin, ZHANG Shirong. Optimal operation scheduling of family grid-connected photovoltaic systems under time-of-use and ladder tariffs[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 820-825.
- [20] 丁明, 姚宇亮, 李林, 等. 分布式光伏并网装置的研制[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 1-15.
DING Ming, YAO Yuliang, LI Lin, et al. Development of distributed photovoltaic grid-connection device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 1-15.
- [21] 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.
- [22] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 微电网监控系统技术规范: GB/T 36270—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [23] 柳溪. 光伏微电网的发电和负荷预测方法及调度策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
LIU Xi. Research on the method of power generation and load forecasting as well as scheduling strategy of photovoltaic microgrid[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016.

收稿日期: 2019-03-28; 修回日期: 2019-05-10

作者简介:

刘 练(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源与分布式发电技术; E-mail: liulian0928@126.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

丁 明(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划及可靠性与安全防御、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

(编辑 魏小丽)