

# 综合能源微电网管理系统优化调度及能耗模式研究

黄海清<sup>1</sup>,周 健<sup>1</sup>,董亚文<sup>1</sup>,朱国义<sup>2</sup>

(1. 扬中市供电公司,江苏 扬中 212200;2. 扬中市路灯管理所,江苏 扬中 212200)

## Research on optimal dispatching and energy consumption mode of integrated energy microgrid management system

HUANG Haiqing<sup>1</sup>, ZHOU Jian<sup>1</sup>, DONG Yawen<sup>1</sup>, ZHU Guoyi<sup>2</sup>

(1. Yangzhong Power Supply Company, Yangzhong 212200, China;

2. Yangzhong Street Light Management Office, Yangzhong 212200, China)

**摘要:**综合能源微电网的高效运行不仅能提高能源利用率,同时也促进可再生清洁能源产业化和规模化发展,实现能源系统的多能互补与相互协同。以华北电力大学扬中智能电气研究中心的综合楼为实际应用实例,以当地的地理位置、气候条件及环境状况等因素作为根据,分析研究中心综合能源微电网管理系统结构、电气并网情况;建立光伏发电系统模型和能量优化调度模型;并通过综合能源微电网系统监测管理平台分析了研究中心的电力能耗模式和用户用电行为特征,以实现更好的能源管理。综合能源微电网管理系统可节约用户的日常购电成本,其电力能耗在线监测管理平台可建立科学规范的能耗统计工作体系,促进电力能耗监测管理的智能化。

**关键词:**综合能源微电网管理系统;能量优化调度;电力能耗;监测管理;用电行为

**Abstract:** The efficient operation of the integrated energy microgrid can not only improve energy utilization, but also promote the industrialization and large-scale development of renewable clean energy, and realize the multi-energy complementation and mutual coordination of energy systems. Taking the comprehensive building of the Yangzhong Intelligent Electric Research Center of North China Electric Power University as a practical application example, the structure of the integrated energy microgrid management system and electrical grid connection of the research center are analyzed on the basis of local geographic location, climatic conditions and environmental conditions; a photovoltaic power generation system model and an energy optimal dispatch model is established; and the power consumption pattern and user behavior characteristics of the research center is analyzed based on the integrated energy microgrid system monitoring and management platform to achieve better energy management. The integrated energy microgrid management system can save users' daily power purchase costs, and its power consumption online monitoring and management platform can establish a scientific and standardized energy consumption statistical work system, and promote the intelligent power consumption monitoring and management.

**Key words:** integrated energy microgrid management system; energy optimal dispatch; power consumption; monitoring management; electricity behavior

## 0 引言

随着全球能源危机和环境问题的日益突出,建立更加安全高效、可持续的能源开发利用模式已经成为未来能源系统的主要承载形式及重要发展方向<sup>[1-2]</sup>。基于当前能源供给侧与需求侧的内在联系,国内外著名学者提出多能源系统(multi energy system, MES)<sup>[3]</sup>、综合能源系统(integrated energy system, IES)<sup>[4]</sup>与能源互联网(energy Internet, EI)<sup>[5]</sup>等相关概念,并论述了电、气、热(冷)等各类能

源的协调互补机制,以及开发和应用模式的结构形态,力求科学地构建一个不同能源之间相互耦合及协调互补的多输入与多输出的能源网络<sup>[6]</sup>。

近10多年来,以电力系统为中心的能源互联网在全球范围内取得一定的发展,使得电力系统变得更加多元化、互联化和智能化,这对如何保障电网安全高效地运行方面提出了更高的要求。

基于中国能源生产以及高质量消费革命背景,2016年3月,我国发布的“十三五”规划中提出了以提升能源系统综合效率为目标,优化能源开发布局,推动能源生产供应集成优化,构建多能互补、供需协调的智慧型能源系统。

根据综合能源系统的发展背景,基于华北电力大学扬中智能电气研究中心的综合能源微电网管理系统结构及电气并网情况,分析了系统的光伏发电

收稿日期:2020-07-25;修回日期:2020-08-24

基金项目:江苏省科技项目(BE2018111)

This work is supported by Science and Technology Project of Jiangsu Province(No.BE2018111)

模型和能量优化调度模型。充分考虑其资源的地理和时间分布的随机特征,详细地对综合能源微电网系统监测管理平台所监测采集的能耗数据进行分析说明,为新能源智能化管理系统提供有效参考。

### 1 综合能源微电网管理系统

#### 1.1 综合能源系统

IES是能源互联网的重要载体,是在电力系统的规划、建设和运行等过程中,通过对能源的发电、传输、分配、转换、存储及消费等环节进行协调与优化后,形成的能源产供销一体化系统。综合能源优化系统组成部分如下:能源输入端(供给侧)、能源输出端(需求侧)、储能系统、能源转化系统(能源集线器)、负责优化调度的数据处理及能量优化管理系统以及需求侧管理系统,其基本构架如图1所示。

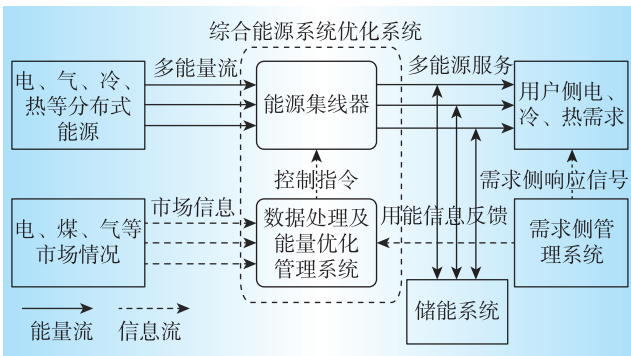


图1 综合能源优化系统基本框架  
Fig. 1 Basic framework of integrated energy optimized systems

#### 1.2 微电网能量优化管理

微电网中通常包含各种分布式电源发电装置、储能装置、各种不同的负荷以及相应的监控和保护装置。可看作是能够实现自我控制和管理的小型发电系统,可有效实现网内的能量优化。相比于大电网而言,微电网具有灵活的运行方式,能够在并网运行和离网孤岛运行2种模式间自由切换。通常情况下,微电网是一个包含冷、热、电的综合能源网,它能够通过冷、热、电联供系统,实现内部风、光、气、冷、热、电等不同形式能源的多途径和高效利用,进而降低供能费用、网损。

能量优化调度不仅是电力系统研究的核心问题,也是实现微电网优化管理的重要手段。与传统电力系统能量调度策略不同,微电网内风力发电、光伏发电等新能源发电形式易受到环境的影响导致其在预测发电功率输出时具有不精确性、波动性,不能像传统调度方式那样预先准确安排。因此,针对微电网的优化运行提出了一种智能的能量

管理系统(microgrid energy management system, MEMS)。图2给出了微电网能量管理系统的信息流示意图,MEMS根据负荷和可再生能源发电预测,结合电价等信息,实现微电网的能量优化调度。

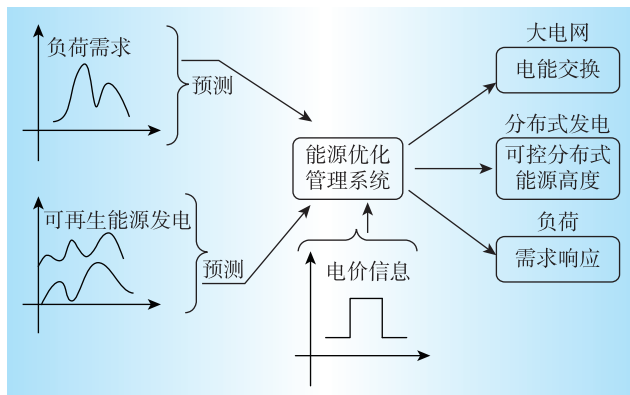


图2 微电网能量管理系统信息流  
Fig. 2 Information flow of MEMS

#### 1.3 综合能源微电网管理系统结构

以华北电力大学扬中智能电气研究中心的综合能源微电网管理系统为应用实例进行分析。

研究中心附近有丰富的自然资源,如水、风和阳光,因此中心建筑物可以通过光伏、风能和抽水蓄能构成综合能源系统的能源输入端。中心设置15 kW的超低速风力发电,其启动风速为1.6 m/s,蓄水池利用10 m左右的高差安装微型水轮机进行稳定发电供应园区电力。在综合楼楼上安装30 kW的光伏电站和冷热电三联供(CCHP)系统,同时在综合楼中安装30 kWh的电池储能系统。综合楼前面的停车场中有3个充电桩,用于电动汽车充电。此外,还安装了电池以调节电源与需求之间的关系。

图3为研究中心电力并网示意图。如图3所示,可再生能源生产的能源已连接到电网。建筑物的负荷由电网和可再生能源发电提供,其中风能,抽水蓄能,PV和CCHP产生的功率分别为15 kW、10 kW、30 kW和25 kW,电池可以产生大约30 kW的能量。

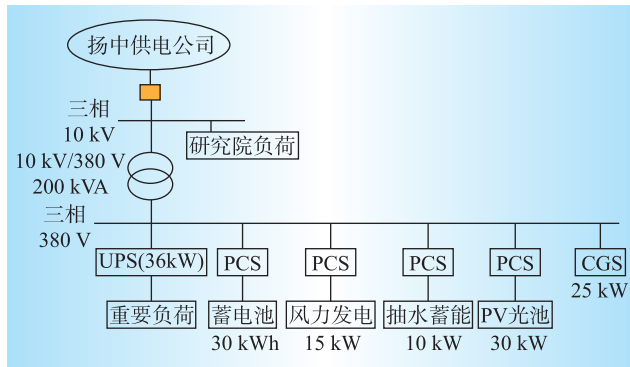


图3 综合能源系统电力并网示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of grid connection of integrated energy system

## 2 综合能源微电网管理系统主要模型

综合能源微电网管理系统内分布式设备的种类繁多,其发电供能原理各不相同,因此需要针对不同的分布式设备建立其相应的数学模型,分析系统各个单元的输出功率及其成本情况,以便于更好地满足不同类型的用户对于电、热、冷能的需求,提供多样化差异性的电能质量服务。对光伏发电系统模型和能量优化调度模型部分进行详细说明。

### 2.1 光伏发电系统模型

光伏发电技术是利用光伏电池板上半导体元件的光伏效应将太阳能转化为电能。利用光伏的外特性进行建模,采用 Matlab 仿真和马尔科夫链概率方法对模型参数或数据进行处理。考虑地理位置、时间、气象条件对光照的影响,根据时间推算地日距离和大气顶层垂直入射的光照强度,根据光伏阵列安装的经纬度、方位角和倾角推算光照入射角度,根据气象状况推算大气层对光照的反射和折射效果,并综合得到光伏阵列表面光照强度。

光伏发电系统的输出模型为

$$P_{PV} = f_{PV} P_{V, \text{cap}} \frac{I_T}{I_S} [1 + \alpha_p (T_{\text{cell}} - T_{\text{cell,STC}})] \quad (1)$$

式中:  $f_{PV}$  为光伏的功率降额因数,用以表征光伏表面尘垢和老化等因素引起输出功率下降,一般取 0.9;  $P_{V, \text{cap}}$  为光伏发电系统的额定容量;  $\alpha_p$  为功率温度系数;  $I_T$  为实际光照强度;  $I_S$  和  $T_{\text{cell,STC}}$  分别为 STC 条件下的光照强度(取值为  $1 \text{ kW/m}^2$ )和光伏电池温度(取值为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $T_{\text{cell}}$  为光伏电池温度。

通常情况下,室外环境温度越高,光伏发电系统的运行效率会越小,  $T_{\text{cell}}$  值可通过式(2)计算可得。

$$T_{\text{cell}} = \frac{T_a + (T_{\text{cell,NOCT}} - T_{a, \text{NOCT}}) \frac{I_T}{I_{T, \text{NOCT}}} \left[ 1 - \frac{\eta_{\text{mp,STC}} (1 - \alpha_p T_{\text{cell,STC}})}{\tau \alpha} \right]}{1 + (T_{\text{cell,NOCT}} - T_{a, \text{NOCT}}) \frac{I_T}{I_{T, \text{NOCT}}} \cdot \frac{\alpha \eta_{\text{mp,STC}}}{\tau \alpha}} \quad (2)$$

式中:  $T_a$  为环境温度;  $T_{a, \text{NOCT}}$  和  $T_{\text{cell,NOCT}}$  分别为在 NOCT 条件下,室外环境温度(取值为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )和光伏电池的表温(取值为  $45 \sim 48 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $I_{T, \text{NOCT}}$  为 NOCT 条件的光照强度和环境温度(取值为  $0.8 \text{ kW/m}^2$ );  $\eta_{\text{mp,STC}}$  为 SCT 条件下最大功率点效率;  $\tau$  和  $\alpha$  分别为系统的太阳能吸收率和系统遮盖物的太阳能透过率(默认值均为 90%)。

### 2.2 能量优化调度模型

#### 2.2.1 调度对象

首先将一天时间平均分成 24 个  $T=1 \text{ h}$  的连续

相等时间段,再通过实时电价体系来获取第 2 天的每时段电价。将参与调度的所有家用电器用集合  $A$  来表示,为使数据展现的更为直观,将各用电设备的功率用平均功率  $W_i$  来表示。由于各用电器其特性不同,其需要工作的时段也会有所差异,因此规定某一用电器  $i$  在一天中需要工作的小时数为  $N_i$ ,在保证各个用电器正常工作前提下,所有用电器每天的工作时间段之和为  $N_i$ ,规定最低连续工作时长为  $L_i$ 。分别用二进制变量  $B_{ij}$ 、 $T_{ij}$  来表示在第  $j$  小时用电器  $i$  在执行启动、停止操作。用  $S_{ij}$  来表示第  $i$  个用电器在第  $j$  个时间段工作状态,其中  $S_{ij}=1$  时表示正在工作,  $S_{ij}=0$  表示停止工作。

#### 2.2.2 用电费用最省模型

假设在  $j$  小时内,必须运行的用电设备消耗的功率为  $M_j$ ,光伏发电系统其出力为  $G_j$ ,且该时段内电力公司规定的需求响应功率约束为  $D_j$ ,因此在  $j$  小时内,真正能调度使用的功率数值为  $G_j + D_j - M_j$ 。由于电力公司会提前告知用户每小时的电价,因此光伏发电系统的出力可以抵消部分原来需要从电网购买的电能,所以每小时的相对购电价格会根据出力的多少而进行变化。

现设定  $Pbg_j$  为每小时的相对购电价格,则每个时间段需要向电网公司的购电费用  $Q$  为

$$Q = Pbg_j \times \left( \sum_{i \in A} W_i \times S_{ij} - G_j + M_j \right) \times T \quad (3)$$

式中:  $Pbg_j$  为实时电价;  $\sum_{i \in A} W_i \times S_{ij} \times T_j$  为可进行调度的电器总用电量。

如果某一时段系统的出力大于参与调度的用电器用电功率,那么该时段内相对购买价格为零,否则相对购电价格为

$$Pbg_j = \frac{Q}{\sum_{i \in A} W_i \times S_{ij}} \quad (4)$$

如因此该系统的调度规划模型可表示为

$$\min \sum_{j=1}^{24} Pbg_j \times \sum_{i \in A} W_i \times S_{ij} \times T \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{24} S_{ij} = N_i \quad (6)$$

$$\sum_{i \in A} W_i \times S_{ij} - G_j + M_j \leq D_j \quad (7)$$

式(5)为最小化用电费用的目标函数,式(6)和(7)为其约束条件。式(6)表明每个用电器经过调度后的总的工作时长需要与用户预先设定的实际工作时间对等。式(7)表明在任意时间段,参与运行的用电器总功率不能高于电网公司规定的需求响应功率约束。

假设某一用电器在执行启动操作后,至少连续运行  $L_i$  个时间段,则电器的运行状态  $S_{ij}$  的约束条件为



如图5所示,能耗监测总界面中主要包括三相电表的电压和电流状态显示、光伏发电向市内供电电量等实时能耗信息、实时电力能耗显示以及建筑物各个楼层当日总电力能耗显示、当日中心总表用能情况与昨日对比情况4大部分。

以2020年7月8日工作日为例,当日天气为25℃~27℃,多云并且平均温度较高且稳定。系统监测的当日总电力能耗为737.24 kWh,平均功率为10.69 kW。图6展示出当天24h,综合楼各个楼层每一时段的实时用电情况和总能耗展示。

由图6可知,在大约11:30~12:00和17:30~18:30会有2个不同的功耗峰值,这是因为第一层综合服务区内食堂准备饭菜时会消耗大量的电能;对于第二层和第三层的办公模式而言,在8:00~11:30,13:00~17:30这2个工作时间段内电能逐渐爬升,在11:30~13:00和17:30~18:30这2个时段内较低,表明为工作人员的休息时间;在20:00~22:00之间有一个高峰时段,表明在这一天加班;第四层和第五层的住宿模式用电能耗与办公模式正好相反。

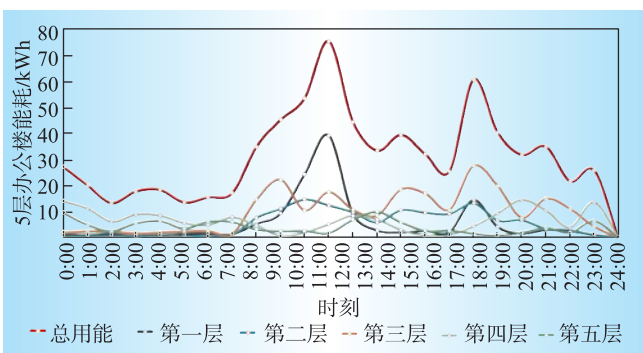


图6 各楼层电力能耗曲线图

Fig. 6 Power consumption curve of each floor

经过以上分析,符合用户的日常办公、综合、住宿的用电行为。因此根据能耗模式和用户行为特征,可以进行适当的能耗管理,以减少或消除多余的能耗。另外,在峰值的情况下,可以增加电池产生的电源。如果电力供应超过需求,则多余的能量可以传输到电网。

图7展示了综合楼各个楼层的分项用能详细情况。以第一层综合服务模式、第三层办公模式、第四层住宿模式为例,在能耗管理系统的分项用能概况菜单中可包括该楼层的日分项用能今日、昨日同比;通过柱状图显示的日分项用能排名;过去31天分项用能占比情况;以及过去31天分项用能趋势图。该分项用能详细情况可方便研究中心进行统一的科学管理,强化用能监督,编制节能规划,制定节能技改措施,完善内部节能考核指标。

通过图1—图3显示可知,第一层综合服务区过

去31天内每天的耗电量趋势相似,这表明每天的耗电量模式相似。第三层办公区的各个办公室能耗占比高,过去31天内,工作日与非工作日的耗电量趋势规律明显,且自6月27日以后的工作日时段功耗高于以往,这是因为天气逐渐炎热,空调使用率较高,因此能耗升高。第四层住宿区的每日能耗较为平均,符合用户日常住宿用电行为习惯,且在图7中可观测到,截止到2020年7月13日上午12:00,房间8409能耗是最高的,达到7.81 kWh,房间8405能耗次之,房间8425、8410、8412、8408等房间能耗相对较低,该楼层各个房间的能耗排行清晰地展示了当日高低能耗数据统计排行情况,根据相关制度可对实行相应的奖惩政策。



图7 各楼层分项用能概况图

Fig. 7 Overview of energy itemized consumption on each floor

如图8所示,展示了过去31天内综合楼3种模式的分项用能占比图,探究综合楼每个楼层的各项能耗所占比例。并进一步通过各楼层能耗的占比情况分析每项的能耗所占比重,找到耗能较大的分项进行重点分析。从图中可以看出,综合服务模式里厨房能耗占比接近50%,办公模式里占比最大的是公共照明和数据库机房、住宿模式的公用所消耗占比较低。

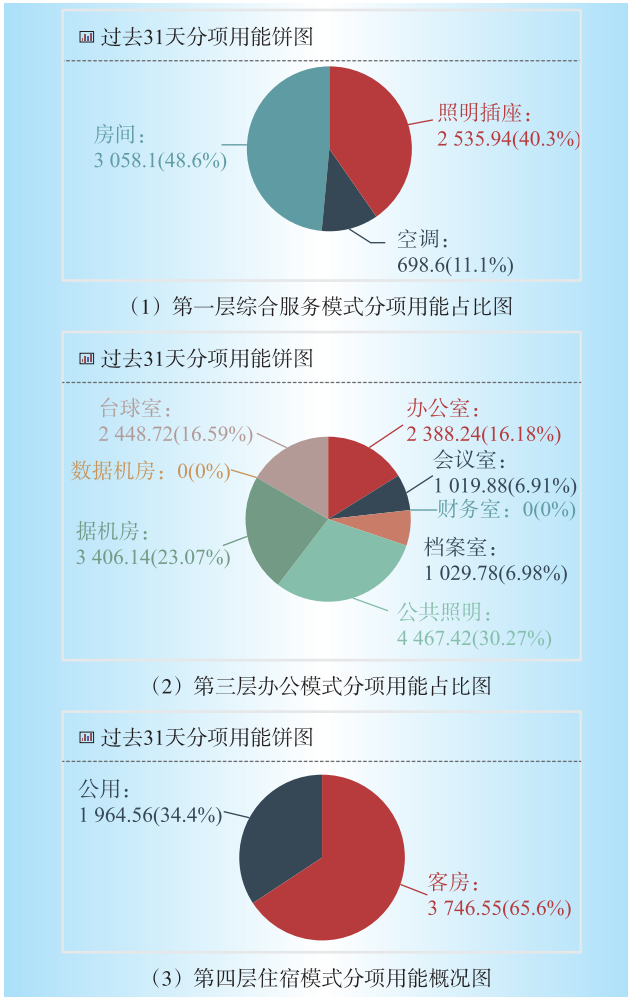


图8 各楼层分项用能占比图

Fig. 8 Energy consumption proportion chart of each floor

#### 4 结束语

本文以华北电力大学扬中智能电气研究中心的综合楼为实际应用实例,以当地的地理位置、气候条件、环境状况等因素作为根据,分析研究中心综合能源微电网管理系统结构、电气并网情况,建立光伏发

电系统模型和能量优化调度模型。根据光伏发电系统的数据采集模块,可统计出研究中心每日发电量可达约892 kWh,利用能量优化调度模型每天节省电费约500元左右,此外,本文还根据通过智能电表测得的真实数据分析了研究中心的能耗模式和用户用电行为特征,以实现更好地能源管理。本文的综合能源微电网管理系统可节约用户的日常购电成本,其电力能耗监测管理平台可建立科学规范的能耗统计工作体系,促进电力能耗监测管理的智能化。D

#### 参考文献:

- [1] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11. DONG Chaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy Internet: basic concepts and research framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [2] UNSIHUAY C, LIMA J W M, DE SOUZA A C Z. Modeling the integrated natural gas and electricity optimal power flow [J]. Power Engineering Society General Meeting IEEE, 2007: 1-7.
- [3] GEIDL M, ANDERESSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 145-155.
- [4] LUND H, MÜNSTER E. Integrated energy systems and local energy markets [J]. Energy Policy, 2004, 34(10): 1 152-1 160.
- [5] 田世明,栾文鹏,张东霞,等.能源互联技术形态与关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3 482-3 494. TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Forms and key technologies of energy interconnection technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3 482-3 494.
- [6] TIAN X, ZHAO R. Energy network flow model and optimization based on energy hub for big harbor industrial park [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 73:298-303.

#### 作者简介:

黄海清(1982),男,宁夏中宁人,工程师,研究方向为电网建设与运维,电力需求响应。

(责任编辑 柴明哲)

(上接第6页)

DU Xing. Research on optimization of distributed photovoltaic energy storage system considering demand response technology [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.

[16] 郎伊紫禾. 计及源荷互动的多能源系统价格机制研究 [D]. 南京:东南大学,2018. LANG Yizihe. Study on price mechanism of multi energy system considering interaction between source and load [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

[17] 田世明,栾文鹏,张东霞,等.能源互联技术形态与关键技术[J].中国电机工程学报,2015,(14):3 482-3 494. TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, (14): 3 482-3 494.

[18] 孙涵洁.融合区块链技术和智能合约的能源互联网需求侧响应分析[J].机电信息,2017(9):64-65. SUN Hanjie. Demand response analysis of energy Inter-

net combining blockchain technology and smart contracts [J]. Mechanical and Electrical Information, 2017(9): 64-65.

#### 作者简介:

黄豫(1978),男,广西柳州人,高级工程师,从事电力系统规划、分析研究工作;

邵冲(1990),男,山东潍坊人,工程师,从事电力系统规划、分析研究工作;

郝洁(1989),女,江苏南京人,硕士研究生,助理工程师,主要从事需求侧管理与电力市场等研究;

柴明哲(1994),女,河南焦作人,硕士研究生,主要从事需求响应与电力市场等研究;

高赐威(1977),男,江苏南京人,博士,教授,博士生导师,主要从事电力需求侧管理、电力规划、电力市场等研究;

陈涛(1989),男,安徽铜陵人,博士,讲师,主要从事电力市场,需求响应,机器学习应用等研究。

(责任编辑 孙晶)