

园区型综合能源系统节能效果及优化运行分析

王 坤,王梓越,张 利,李国豪,甘智勇,赵 越

(1. 国网天津市电力公司 电力科学研究院,天津 300384)

Analysis of energy saving effect and optimal operation of park integrated energy system

WANG Kun, WANG Ziyue, ZHANG Li, LI Guohao, GAN Zhiyon, ZHAO Yue

(Tianjin Electric Power Science & Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China)

摘要:随着综合能源系统在国内的快速发展,对综合能源系统实际运行后的节能效果评价日趋重要。分析了园区型综合能源系统节能效果及其优化运行手段,该园区型综合能源系统包括光伏发电系统、地源热泵系统、太阳能空调系统、蓄热式电锅炉系统及太阳能热水系统等。建立了各子系统的节能效益计算模型,根据各子系统的运行历史数据,对各子系统的计算结果进行了分析。结果表明:太阳能光伏发电系统节能收益主要来自第二、第三季度,应在此期间注意光伏组件的维护保养,保证节能效益最大化;地源热泵系统夏节能效果并不显著,在夏季可与传统机组协同供冷;园区冬季供热是由地源热泵系统、蓄热式电锅炉系统和太阳能空调系统综合提供,节能效果显著,是园区节能收益的主要来源。

关键词:综合能源系统;太阳能光伏;地源热泵;节能效益;运行优化

Abstract: With the rapid development of integrated energy system in China, the evaluation of energy saving effect of integrated energy system after actual operation is becoming more and more important. The energy saving effect and optimal operation of the integrated park type energy system are analyzed. The park integrated energy system includes photovoltaic power generation system, ground source heat pump system, solar air conditioning system, regenerative electric boiler system and solar hot water system and so on. The energy saving benefit calculation model of each subsystem is established, and according to the operation history data of each subsystem, the calculation results of each subsystem are analyzed. The result shows that the main revenue comes from the second and third quarters, during which it should pay attention to the maintenance of photovoltaic modules to ensure the maximum energy saving benefit. The energy saving effect is not significant. It can cooperate with traditional units for cooling in summer. The heating in winter in the park is provided by ground source heat pump system, regenerative electric boiler system and solar energy air conditioning system. Its energy saving benefit is the main source of energy saving income in the park, with remarkable energy saving effect.

Key words: integrated energy system; solar photovoltaic; ground source heat pump; energy-saving benefit; operation optimization

0 引言

受能源转型以及互联网技术的驱动,能源互联网从以“电”为主的“智能电网”的研究逐渐转向“冷、热、电、气”的耦合研究。能源互联网与智能电网、多能互补、综合能源、冷热电联供、智慧能源等有着密切的关系^[1-2]。

近年来,以分布式能源为主要供能来源的综合能源系统在全国范围内得到了快速的发展。其中,在综合能源系统的规划建设、负荷预测、调度优化运行、能效分析、经济分析等方面都进行了系统的研究。例如,文献[3]在综合能源系统中进行分布

式能源站设备配置及站间管线规划研究,可以实现不同区域间能源的互联协同与互补互济。文献[4]—文献[5]通过构建区域综合能源系统多元负荷短期预测模型或者超短期负荷预测方法,有效提高了综合能源系统的负荷预测精度。

由于综合能源系统具有多种能源形式、多时间尺度工况的特点,综合能源系统各种负荷的优化调度,是达到能源供需平衡的必要前提。文献[6]建立考虑风电消纳的区域综合能源系统源荷协调优化调度模型,有效提高了系统的风电消纳能力;文献[7]建立电-热综合能源系统调度模型,可有效利用电力、热力系统的互补特性;文献[8]选取一种长时间尺度的调度层次对综合能源系统进行优化调度,有效降低了系统能耗。

综合能源系统的能效与经济性分析也是目前研究的重点。文献[9]基于层次分析法对综合能源系统能效评估方法进行了系统的研究,并验证了能

收稿日期:2020-05-26;修回日期:2020-06-27

基金项目:国网天津市电力公司科技项目(KJ20-1-12)

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Tianjin Electric Power Company(No. KJ20-1-12)

效评估方法的实用性和有效性;文献[10]通过分析该用能对象的冷、热、电负荷特性,以目录电价和市场化交易电价形成的价格信号对选择的能源系统展开经济性评价。

随着这些技术的广泛应用,许多大规模综合能源示范工程得到了建设。其中,广东电网公司在珠海组织建设了“支持能源消费革命的城市-园区双级‘互联网+’智慧能源示范项目”。国家电网有限公司在天津建设了“国网客服中心北方园区绿色能源网示范项目”,实现了光、冷、热、储等多种能源协调的示范应用^[11]。

然而,目前研究主要集中在对综合能源系统负荷预测和能效分析等领域的理论研究层面,尚未有详细、全面的针对综合能源系统实际运行数据的分析。本文将根据综合能源系统的实际历史运行数据对系统的整体节能效益进行计算,并根据计算结果进行合理的节能评价,通过分析运行特点指导系统的高效、稳定运行。

1 绿色能源网示范工程简介

国网客服中心北方园区绿色能源网示范项目致力于打造生态型、环保型、节能型园区,规划建设由多种清洁能源组成的园区绿色复合型能源网,通过能源网调控平台,提高可再生能源利用效率,实现园区多种复合能源的高效、经济运行。

园区绿色复合型能源网设计范围包括光伏发电系统、光储微电网系统、地源热泵系统、冰蓄冷系统、太阳能空调系统、蓄热式电锅炉系统及太阳能热水系统。一方面通过冰蓄冷、地源热泵、蓄热式电热锅炉实现整个园区主体冷、热源调度供给;另一方面分布式光伏发电系统分散接入本地消纳,对于光伏发电系统冗余电能汇集神经末端,在自身负荷消纳的同时汇聚到电池储能系统,实现园区分布式发电的能量存储。

随着园区内综合能源系统的投入运行,为了评价各子系统运行后的节能效果,本文利用各子系统的历史运行数据,建立各子系统节能计算模型,并且进行了节能效益计算与分析。

2 各子系统简介及节能效益算法

根据各子系统的结构及功能,建立光伏发电系统、地源热泵系统、太阳能空调系统、蓄热式电锅炉系统及太阳能热水系统节能效益计算模型。由于光储微电网系统和冰蓄冷系统运行时间较短,不具

备分析条件,本文不进行计算及分析。

2.1 太阳能光伏发电系统

太阳能光伏发电系统分布在园区内8座建筑物及连廊的闲置屋顶,采用4 180块245 Wp多晶硅光伏组件,装机总容量为1.024 MWp。光伏发电系统发电量优先供给园区使用,因此节省了大量使用电网的电量,具体计算公式如下

$$X = 1.3141 E_f + 0.8686 E_p + 0.4431 E_g \quad (1)$$

式中: X 为太阳能光伏系统节能效益,元/年; E_f 、 E_p 、 E_g 分别为峰时段、平时段、谷时段发电量,kWh/年;1.3141、0.8686和0.4431分别为峰时段、平时段和谷时段电价,元/kWh。

2.2 太阳能热水系统

在园区内配置太阳能热水系统,与能源中心蓄热式电锅炉并联协调运行为园区集中提供生活热水。具体计算公式如下

$$X_{tr} = A \times N_{rs} \quad (2)$$

式中: X_{tr} 为太阳能热水系统节能效益,元/年; A 为电加热生活用水成本(电加热器加热生活用水成本),元/t; N_{rs} 太阳能热水累计流量,t/年。

2.3 地源热泵系统

园区内地源热泵系统配置3台螺杆式地源热泵机组。在制冷工况下,单台地源热泵机组的制冷量为1 195 kW;在制热工况下,单台地源热泵机组的制热量为1 267 kW。具体计算公式如下:

(1) 夏季制冷工况节能效益

地源热泵机组制冷成本如下

$$X_{LD} = A_1 \times E_{LD} \quad (3)$$

式中: A_1 为地源热泵机组制冷期间加权电价,元/kWh; E_{LD} 为地源热泵机组制冷耗电量,kWh/年。

传统制冷机组理论耗电量如下

$$E_{IJ} = \frac{Q_L}{COP_J} \quad (4)$$

式中: Q_L 为地源热泵机组制冷量,kWh/年; COP_J 为传统制冷机组能效比。

传统制冷机组制冷成本如下

$$X_{IJ} = A_1 \times E_{IJ} \quad (5)$$

夏季工况节能效益如下

$$X_L = X_{IJ} - X_{LD} \quad (6)$$

(2) 冬季供热工况节能效益

地源热泵机组制热耗电成本如下

$$X_{RD} = A_2 \times E_{RD} \quad (7)$$

式中: A_2 为机组制热期间加权电价(根据各时段耗电量占比计算得到),元/kWh; E_{RD} 为机组制热耗电量,kWh/年。

2.4 蓄热式电锅炉系统

冬季同时采用蓄热型电热锅炉供热系统供热,共配置6台2 070 kW电锅炉,并配套4组蓄热水箱。具体计算公式如下

$$X_{\text{XR}} = 0.4431 \times E_g \quad (8)$$

式中: X_{XR} 为蓄热式电锅炉供热成本,元/年; E_g 为蓄热式电锅炉电价谷段用电量,kWh/年;0.4431为谷时段电价,元/kWh。

2.5 太阳能空调系统

太阳能空调系统配置占地面积约1 350 m²的太阳能集热器,集热器从太阳光中获取能量,通过高温导热油输送至空调设备。具体计算公式如下

$$X_{\text{RTT}} = A \times E_{\text{RTT}} \quad (9)$$

式中: X_{RTT} 为太阳能空调冬季供热成本,元/年; E_{RTT} 太阳能空调为冬季供热耗电量,kWh/年; A 为太阳能空调运行期间加权电价,元/kWh。

2.6 园区冬季供暖综合经济效益

园区冬季供热期由地源热泵系统、蓄热式电锅炉系统和太阳能空调系统综合提供采暖,因此,本报告中采取整体测算的方式,即分别测算各分系统的供热成本(耗电成本),最后统一计算整个供热期的节能效益。园区冬季供暖综合经济效益具体计算公式如下

$$X_{\text{ZXY}} = A_{\text{SZ}} \times S - X_{\text{RD}} - X_{\text{XR}} - X_{\text{RTT}} \quad (10)$$

式中: A_{SZ} 为市政集中供暖价格,元/(m²·年); S 为市政供暖等效面积,m²。

3 各子系统节能效益计算结果及分析

3.1 太阳能光伏发电系统

选取2018年第一季度至2019年第二季度数据进行计算,其中2018年06月26日—2019年06月25日作为1个计算采集周期,得到计算结果如表1所示。可以看到,太阳能光伏发电系统在一个计量周期内,总计收益为734 238.11元,其中,谷时段收益为2 412.64元/年,平时段收益为447 833.22元/年,峰时段收益为283 992.25元/年。由此可知太阳能光伏发电系统在平段的收益最高。

表1 太阳能光伏发电系统1个计量周期计算结果

Table 1 Calculation results of one measurement period of solar photovoltaic power generation system

指标	谷段	平段	峰段	合计
光伏发电量/kWh	5 444.9	515 580.5	216 111.6	737 137.0
各段电价/(元·kWh ⁻¹)	0.4431	0.8686	1.3141	
年节能效益/元	2 412.64	447 833.22	283 992.25	734 238.11

此外,对太阳能光伏发电系统2018年每个季度的发电量进行了统计,如图1所示。由图1可以看到,太阳能光伏发电系统发电量主要集中在第二、第三季度,占全年发电量的65%。因此,每年第二季度、第三季度应格外注意光伏组件的维护保养,保证节能效益的最大化。

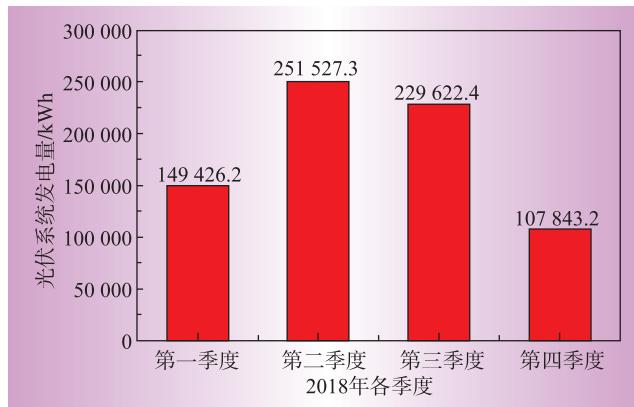


图1 太阳能光伏发电系统2018年各季度发电量

Fig. 1 The quarterly power generation of solar photovoltaic power generation system in 2018

根据太阳能光伏发电系统的设计说明书,折算本系统在2018年的理论发电量应为95.24万kWh,而本系统1个计量周期内实际发电量为73.71万kWh,仅占理论发电量的77.39%,光伏发电效率较差。因此,太阳能光伏发电系统发电量低于理论值、光伏发电效率下降超过了相关标准、规范的数值,可能是光伏面板积尘造成的。天津市近年来雾霾天气较多,根据经验,由于积尘严重程度不同,清理光伏面板可提升光伏发电效率5%~20%。建议定期对光伏面板进行清理,特别是每年第二季度前对光伏板进行彻底清理,保障太阳能光伏发电系统发电效率与节能效益。

3.2 太阳能热水系统

取太阳能热水系统在2018年6月1日—2019年5月31日的运行数据作为1个采集周期的计算数据,对其进行节能效益计算,如表2所示。由表2可以看到,相比使用电加热生活用水,使用太阳能热水系统在一个周期内的节能效益为183.57万元/年,节能效果明显。

表2 太阳能热水系统节能效益

Table 2 Energy saving benefit of solar hot water system

参数	计算数据
电加热生活用水单价/(元·t ⁻¹)	73.2
太阳能热水累计流量/(t·年 ⁻¹)	25077
太阳能热水系统经济效益/(万元·年 ⁻¹)	183.57

3.3 地源热泵系统

取地源热泵系统在2018年6月1日—9月30日的运行数据作为夏季工况1个制冷周期的试验数据,对其进行节能效益计算,如表3所示。

表3 地源热泵夏季工况

Table 3 Ground source heat pump working conditions in summer

参数	计算数据
热泵夏季耗电量/(万kWh·年 ⁻¹)	64.65
加权电价/(元·kWh ⁻¹)	0.883 9
热泵制冷成本/(万元·年 ⁻¹)	57.15
制冷量/(万kWh·年 ⁻¹)	377.51
制冷能效比	4.6
传统机组耗电量(制备相同冷量)/(万kWh·年 ⁻¹)	82.07
传统机组制冷成本/(万元·年 ⁻¹)	72.54
夏季节电量/(万kWh·年 ⁻¹)	17.42
夏季工况节能效益/(万元·年 ⁻¹)	15.39

由表3可知,地源热泵系统在夏季的节能效益相比传统制冷机组并不显著,可根据地源热泵机组的实际运行情况与传统制冷机组协同运行,保障园区的充足供冷。

取地源热泵在2018年11月15日—2019年3月31日的运行数据作为冬季工况计算数据,对其进行耗电成本计算,其结果如表4所示。

表4 地源热泵冬季工况

Table 4 Ground source heat pump working conditions in winter

参数	计算数据
地源热泵冬季耗电量/(万kWh·年 ⁻¹)	129.51
加权电价/(元·kWh ⁻¹)	0.862 0
地源热泵制热成本/(万元·年 ⁻¹)	111.63

此外,还统计了地源热泵系统在夏季、冬季工况下的停机情况,如图2、图3所示。

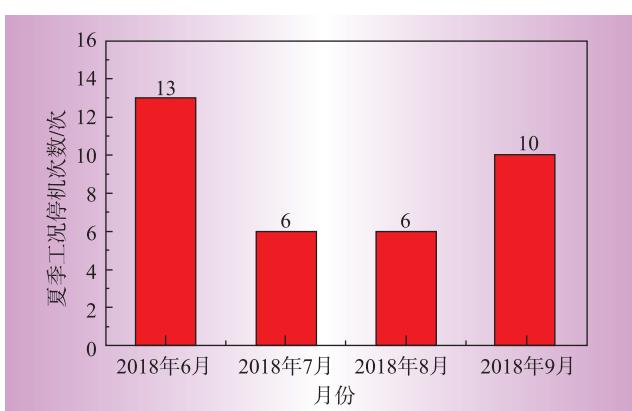


图2 地源热泵系统夏季工况停机次数

Fig. 2 Shut down times of ground source heat pump system in summer working conditions

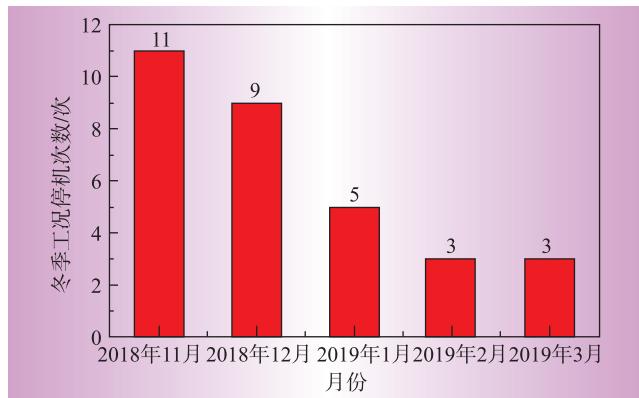


图3 地源热泵系统冬季工况停机次数

Fig. 3 Shut down times of ground source heat pump system in winter working conditions

由图2、图3可以看到,夏季工况地源热泵系统在6月停机次数最多,为13次,冬季工况地源热泵系统在11月停机次数最多,为11次。原因分析为6月和11月分别为夏季工况和冬季工况的第一个月,地源热泵系统首次在运行周期内运行,机组需要多次停机进行设备的检修与维护。

因此,建议运行人员在每年5月和10月(地源热泵系统夏季工况和冬季工况运行前1个月)对地源热泵系统内的地理管换热器、离心式冷水机组等重要设备进行检修与维护,避免在工况运行周期内的第一个月多次停机维护,延长系统安全稳定运行时间,提高经济效益;此外,运行人员在运行期间严格按照相关运行规程对系统进行运行操作,同时提高地源热泵系统的运行维护水平,减少每月地源热泵系统停机检修维护的次数与时间,确保地源热泵系统长时间安全稳定地运行,增加节能效益。

3.4 蓄热式电锅炉系统

取蓄热式电锅炉系统在2018年11月15日—2019年3月31日的运行数据作为冬季供暖工况计算数据,对该系统冬季供暖工况进行节能效益计算,如表5所示。

表5 蓄热式电锅炉系统节能效益

Table 5 Energy saving benefit of regenerative electric boiler system

参数	计算数据
蓄热式电锅炉耗电量/(万kWh·年 ⁻¹)	257.98
谷段电价/(元·kWh ⁻¹)	0.4431
蓄热式电锅炉供热成本/(万元·年 ⁻¹)	114.31

3.5 太阳能空调系统

取太阳能空调系统在2018年11月15日—2019年3月31日的运行数据作为冬季供暖工况计算数据,计算结果如表6所示。

表6 太阳能空调系统冬季供暖工况

Table 6 Solar air conditioning system in winter heating condition

参数	计算数据
太阳能空调冬季耗电量/(万 kWh·年 ⁻¹)	6.18
加权电价/(元·kWh ⁻¹)	0.875
太阳能空调冬季供热成本/(万元·年 ⁻¹)	5.41

3.6 园区冬季供暖综合节能效益

园区冬季供热期由地源热泵系统、蓄热式电锅炉系统和太阳能空调系统综合提供采暖。因此,本文中采取整体测算的方式,即分别测算各分系统的供热成本(耗电成本),最后统一计算整个供热期的节能效益,计算结果如表7所示。

表7 园区冬季供暖综合节能效益

Table 7 The comprehensive energy saving benefit of heating in winter in the park

参数	计算数据
市政集中供暖价格/(元·m ⁻²)	40
市政供暖等效面积/万 m ²	15.77
园区采用市政供暖成本/(万元·年 ⁻¹)	630.80
地源热泵系统供热成本/(万元·年 ⁻¹)	111.63
蓄热式电锅炉系统供热成本/(万元·年 ⁻¹)	114.31
太阳能空调系统供热成本/(万元·年 ⁻¹)	5.41
园区冬季供暖综合经济效益/(万元·年 ⁻¹)	399.45

由表7可以看到,如果园区使用市政集中供暖,其成本为630.80万元/周期,最终得到园区冬季供暖综合节能效益为399.45万元/周期,节能效果显著,是园区节能收益的主要来源。

4 结束语

本文研究了园区型综合能源系统节能效果分析及其优化运行。首先,介绍了国网客服中心北方园区绿色能源网示范项目综合能源系统,包括光伏发电系统、光储微电网系统、地源热泵系统、冰蓄冷系统、太阳能空调系统、蓄热式电锅炉系统及太阳能热水系统。然后,建立了各子系统的节能效益计算模型,各子系统的计算结果分析结论如下:

(1) 太阳能光伏发电系统节能收益为73.42万元/年,且集中在第二、第三季度,应格外注意光伏组件的维护保养,保证节能效益的最大化。

(2) 地源热泵系统夏季节能收益为15.59万元/年,节能效果并不显著。此外,建议在每年5月和10月对系统进行定期维护,减少机组停机次数,保障系统长时间稳定运行,增加节能效益。

(3) 园区冬季供热是由地源热泵系统、蓄热式电锅炉系统和太阳能空调系统综合提供,其节能效益为399.45万元/年,节能效果显著。**D**

参考文献:

- [1] 王永真,张宁,关永刚,等.当前能源互联网与智能电网研究选题的继承与拓展[J].电力系统自动化,2020,44(4):1-8.
WANG Yongzhen, ZHANG Ning, GUAN Yonggang, et al. Inheritance and expansion analysis of research topics between energy Internet and smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4):1-8.
- [2] 田世明,栾文鹏,张东霞,等.能源互联网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. Technical forms and key technologies on energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14):3 482-3 494.
- [3] 王丹,孟政吉,贾宏杰,等.考虑多区域互联协同的分布式能源站设备配置及站间管线规划[J/OL].电网技术,2020,44(10):3 734-3 746.
WANG Dan, MENG Zhengji, JIA Hongjie, et al. Distributed energy station equipment configuration and interconnected network planning considering multi-regional interconnection and coordination [J/OL]. Power System Technology, 2020, 44(10):3 734-3 746.
- [4] 田浩含,撖奥洋,于立涛,等.基于GRA-LSTM神经网络的区域综合能源系统多元负荷短期预测模型[J].广东电力,2020,33(5):44-51.
TIAN Haohan, HAN Aoyang, YUN Litao, et al. Research on multi-load short-term forecasting model of regional integrated energy system based on GRA-LSTM neural network [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(5):44-51.
- [5] 栗然,孙帆,丁星,等.考虑多能时空耦合的用户级综合能源系统超短期负荷预测方法[J/OL].电网技术,2020:1-14(2020-06-21)[2020-06-27].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0006a>.
LI Ran, SUN Fan, DING Xing, et al. Ultra short-term load forecasting method for user-level integrated energy system considering spatio-temporal coupling of multi-energy [J/OL]. Power System Technology, 2020:1-14(2020-06-21)[2020-06-27].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0006a>.
- [6] 崔杨,姜涛,仲悟之,等.考虑风电消纳的区域综合能源系统源荷协调经济调度[J].电网技术,2020,44(7):2 474-2 483.
CUI Yang, JIANG Tao, ZHONG Wuzhi, et al. Source-load coordination economic dispatch method for regional integrated energy system considering wind power consumption [J]. Power System Technology, 2020, 44(7):2 474-2 483.
- [7] 王婉璐,杨莉,王蕾,等.考虑供热网储热特性的电-热综合能源系统优化调度[J].电力系统自动化,2018,42(21):45-55.
WANG Wanlu, YANG Li, WANG Lei, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-heat energy system considering heat storage characteristics of heating network, 2018, 42(21):45-55.
- [8] 盛晏,杨锦成,马守达,等.基于需供互动的综合能源系统优化调度研究[J].电力需求侧管理,2019,21(6):48-54.

(下转第32页)