

DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2021.03.012

楼宇型分布式能源系统在数据中心的应用

Application of building-type distributed energy systems for data centers

陈卉¹, 刘颖², 赵龙生¹

CHEN Hui¹, LIU Ying², ZHAO Longsheng¹

(1. 东南大学建筑设计研究院有限公司, 南京 210096; 2. 南京工业职业技术大学, 南京 210096)

(1. Southeast University Architectural Design and Research Institute Company, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210096, China)

摘要: 数据中心的冷、电负荷需求量大, 全年负荷稳定, 且冷电比与天然气分布式能源系统的供电供冷比例接近, 适宜采用分布式能源系统。通过对某数据中心的用能需求进行分析, 在保证数据中心安全用能的基础上, 设计了规模合适的分布式能源站方案, 即内燃机+烟气-热水型溴化锂机组+离心式电制冷机+蓄冷罐模式, 实现了数据中心绿色低碳运行。评价结果显示: 天然气分布式供能方案是建立基于低碳能源的供能模型, 充分利用峰谷电价差, 降低运营成本, 提高经济性; 能源站总体经济性可行, 能耗低、碳排放量低、节能减排效果佳, 在数据中心周边有稳定可靠的廉价天然气气源、碳交易价格合适时, 该方案具有一定的推广意义。

关键词: 分布式能源系统; 数据中心; 自然冷却; 节能减排; 冷电比; 绿色低碳; 碳中和; 碳达峰

中图分类号: TK 4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2021)03-0076-06

Abstract: The demand for electricity and cooling load in data centers is large and steady. The cooling-to-power ratio of data centers is close to that of gas-fired distributed energy systems, which means distributed energy systems are suitable for data centers. Through the analysis on the power demand of a data center, a scheme of a distributed energy station with an appropriate scale which can ensure the safe power supply to the data center is designed. The scheme takes internal combustion engine, gas and hot water type LiBr-H₂O refrigerator, centrifugal electric refrigerator and cold storage tank, which can realize the green and low-carbon operation of the data center. The gas-fired distributed power supply scheme is made based on a low-carbon energy-supply model. The evaluation results show that this scheme makes full use of the off-peak electricity, reduces operating costs and improves the economy. The power station is economically feasible, with low energy consumption, decent energy saving and emission reduction effect. This scheme is practicable for the data centers wherever there are reasonable carbon trading prices and stable, reliable and cheap gas sources nearby.

Keywords: distributed energy system; data center; ambient cooling; energy saving and emission reduction; cooling-to-power ratio; green and low carbon; carbon neutrality; carbon emission peaking

0 引言

数据中心的电负荷、冷负荷需求量大, 且负荷全年波动范围小, 较为稳定。数据中心电负荷系统及空调系统需全年不间断运行, 以保证数据通信设备运行的可靠性和有效性。数据中心用能设备包括服务器、交换机等互联网技术 (Internet Technology, IT) 设备, 还包括空调、配电等辅助系统。目前在数据中心能效水平状况下, 数据中心 IT 设备大约占总能耗 50%, 空调系统能耗占总能耗约 40%, 其电负荷和冷负荷比例接近 1。用于数据中心的天然

气分布式能源站通常也能实现约 44% 的发电效率和约 46% 的余热利用效率, 当采用能效比 (COP) 在 1 左右的溴化锂吸收式制冷机组时, 其供电、供冷比例接近于 1。天然气分布式能源站的供电、供冷比例与数据中心的电负荷、冷负荷比例接近, 可保证能源利用的充分性和稳定性。其特殊的用能结构非常适宜采用分布式能源系统^[1-7]。

天然气作为一种清洁低碳化石能源, 在能源结构转型中发挥重要作用, 围绕国家提出的“30·60”碳排放目标特别是 2030 年前碳排放达峰的要求, 响应国家能源消费结构向清洁低碳加快转变, 本文搭建天然气分布式能源系统 (CCHP 系统), 使能源消费结构向更绿色、低碳方向发展。CCHP 系统以天

天然气为原料,通过燃气发电机组发电,所发电力与市电共同满足用户端的电力需求,同时采用余热利用设备(溴化锂空调、换热器等)满足用户端的冷热负荷需求,实现能源的梯级利用,综合能源利用效率在 70% 以上,并在负荷中心就近实现现代能源供应方式,是天然气高效利用的重要方式^[7]。与传统集中式供能方式相比,天然气分布式能源具有低碳、清洁、环保、能效高、安全性好、削峰填谷、经济效益好等优点,是高碳模式向低碳模式的经济增长方式的转变方式。将天然气分布式能源系统应用到数据中心中,不但能够满足数据中心的电与冷负荷需求,减少能源费用,更可以与传统的数据中心供能方式互为补充以满足数据中心用能安全性的特殊需求。

1 数据中心项目概况

某数据中心项目位于常熟新规划的城铁片区内,占地面积 2.35 公顷,共设 2 座互联网数据中心(IDC)机房楼及其他建筑物,均按民用建筑设计,该数据中心依据《数据中心设计规范》A 级标准进行设计。#1 和 #2 IDC 机房楼机架数量均为 2 800 个,单机架面积 7.5 m²,电源使用效率(PUE)年平均值 1.35。

数据中心能源需求主要是电能和冷能。数据中心的主要用电是服务器、交换机等 IT 设备用电,且数据中心需要常年提供足量的空调冷负荷。

2 冷、电负荷分析

2.1 电负荷分析

数据中心用电负荷常年稳定运行,负荷波动较小。数据中心 IT 负载约 37 MW,数据中心引入 110 kV 变电站的最低容量为 20 MV·A(即必须用掉 20 MV·A 的电量)。因此,数据中心耗电量扣除该部分的输入电量即为能源站的供电负荷。能源站需供应的电负荷为 17 MW。数据中心用电系统采用双路电源,保证了供电安全性和可靠性。

2.2 冷负荷分析

数据中心设计方根据《采暖通风与空气调节设计规范》,查询国家气象标准中苏州的室外设计参考指标参数和室内设计参数,并由《计算机房空调设计》中的计算公式,估算出机房的冷负荷约 50 MW。所需冷冻水供回水温度暂定为 15/21℃,水流量为 7 200 m³/h。空调系统每天 24 h 运行,负荷常年波动不大。根据上述对数据中心冷、电负荷分析,能源站设计负荷见表 1。

3 能源站供能方案

通过比较分析,冷/电源采用 N+1 设计,得出该数据中心推荐配置方案:5 台单机装机容量为 4.5 MW 级燃气内燃机(4 用 1 备)+5 台 3 917 MW 烟气-热水型溴化锂冷水机组(4 用 1 备)+5 台 9 100 kW 离心式电制冷机组(4 用 1 备)+2 台 7 000 kW 电制冷机组^[8-11]。能源站系统流程如图 1 所示,系统配置如图 2 所示。

表 1 楼宇式分布式能源站设计负荷

Tab. 1 Design load of the building distributed energy station

负荷种类	energy station		/kW
	电负荷	空调冷负荷	
设计负荷	17 000	50 000	

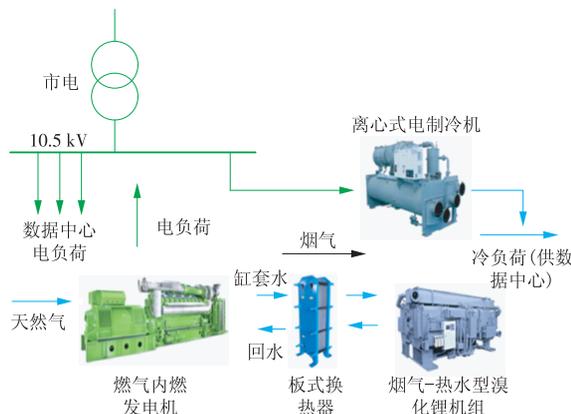


图 1 数据中心楼宇式分布式能源系统示意

Fig. 1 Building-type distributed energy system for a data center

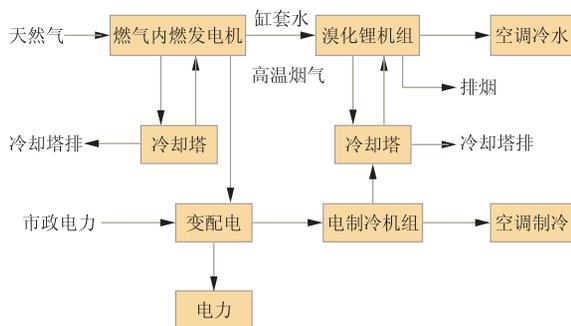


图 2 能源站系统配置

Fig. 2 Configuration of the energy station

为保证供冷可靠性,能源站空调冷冻水系统采用二级泵系统,一级泵冷冻水系统母管为双供双回环形管网系统,二级泵冷冻水系统为双管路系统,按管路系统 2N 冗余设计,供回水系统分别接入集、分水器;为提高数据中心 PUE,降低基础设备能耗成本,冷冻水供回水温度设定为 15/21℃。

能源站采用二路供冷水的系统,设置有 2 个蓄冷罐,蓄冷罐直径 9 m,体积为 595 m³。水蓄冷作为

应急冷源,满足系统运行 15 min 的冷量,可保证双冷源平稳切换^[12-13]。

数据中心制冷系统冷却水的设计方案是基于封闭式冷却塔自然冷却的形式,冷却水系统母管为环形管网系统,保证安全可靠,冷却水供/回水温度分别为 32/37℃。冷却水系统包括冷却塔 30 台(28 台运行,2 台备用)、冷冻水泵、冷却水泵、板式换热器等。为了更好地节约能源,降低数据中心 PUE,设计采用室外自然免费冷源,即冬季采用开式冷却塔+板式换热器提供自然冷却免费制冷方式^[14]。

为保证供电安全可靠,能源站拟以双回 10 kV 的电压等级接入数据中心 110 kV 开闭所的 10 kV 母线。能源站内建设一座 10 kV 配电间,10 kV 接线为单母线分段接线,能源站第一解列点为 10 kV 联络开关,后备解列点设置在发电机出口开关。第 1 并列点设在发电机出口开关处,第 2 并列点设在 10 kV 联络开关处。

另外,为了满足常熟地区 NO_x 的排放要求,推荐采用选择性催化还原(SCR)法脱硝工艺进行烟气脱硝,布置在内燃机尾部与烟气-热水型溴化锂机组之间,将 NO_x 排放质量浓度降至 50 mg/m³ 以下,实现达标排放,脱硝工艺流程如图 3 所示(图中 PLC 为可编程逻辑控制器)。

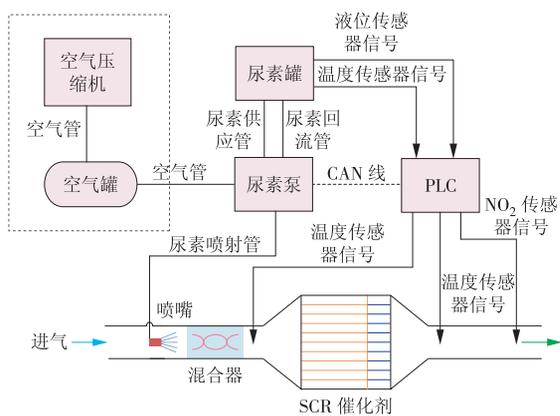


图 3 脱硝工艺流程

Fig. 3 Denitrification process

4 能源站供能运行方案

4.1 夏季/过渡季供冷运行方案

4 台燃气发电机 00:00—08:00 停机不运行;08:00—24:00 满负荷运行,所发电量满足高峰时段(08:00—12:00, 17:00—21:00)能源站内电制冷机组用电需求,富余电量满足数据中心部分电能需求,平价时段(12:00—17:00, 21:00—24:00)电制冷机组从电网购电,内燃机发电量用于满足数据中心部分用电需求,平

价时段和高峰时段数据中心不足电量均从网上购电。发电过程中所产生的烟气余热和高温缸套水通过 4 台余热溴冷机组吸收利用,产生 7℃ 的冷水。

4 台离心电制冷机以电为动力产生 15℃ 的冷水,高峰时段所耗电量由内燃发电机供,平段和谷段从电网购电。夏季/过渡季典型日制冷设备负荷分摊情况如图 4 所示。

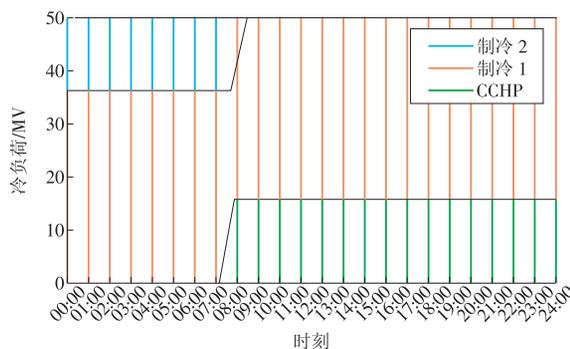


图 4 夏季/过渡季典型日制冷设备负荷分摊

Fig. 4 Load distribution of the refrigeration equipment on a typical day in summer / transition season

4.2 冬季供冷运行方案

结合当地气候特点,本项目冬季采用开式冷却塔+板式换热器提供自然冷却免费制冷方式,能源站免费制冷时间按 1 080 h 计,无需开启冷冻水机组,节省了运行费用。

5 技术经济性分析

5.1 约束条件

对于供、用电,其能量平衡公式如下

$$P = P_g - P_{es} + P_{ex} - P_u - \sum Q_{ec}$$

式中: P 为供应用户端电量; P_g 为内燃机发电量; P_{es} 为电网上网电量; P_{ex} 为电网下网电量; P_u 为电制冷机消耗电量; $\sum Q_{ec}$ 为制冷水泵及风机等消耗电量总和。

对于供冷设备,其能量平衡公式为

$$Q_c = Q_{yc} + Q_{ec}$$

式中: Q_c 为供用户端冷量; Q_{yc} 为烟气-热水型溴化锂机组供冷量; Q_{ec} 为电制冷机组供冷量。

能源站节能率公式如下

$$r = 1 - \frac{B \times Q_L}{\frac{3.6W}{\eta_{eo}} + \frac{Q_1}{\eta_o} + \frac{Q_2}{\eta_{eo} \times COP_o}}$$

式中: r 为节能率; B 为联供系统年燃气总耗量, m³; Q_L 为天然气低位发热量, $Q_L=34.8 \text{ MJ/m}^3$; W 为联供系统年净输出电量, kW·h; η_{eo} 为常规供电模式的平均供电效率,计算结果为 38.57%; Q_1 为联供系统余

热年供热总量, MJ, 本案例为 0; η_0 为常规供热模式的燃气锅炉平均热效率; Q_2 为供热系统余热年供热总量, MJ; COP_0 为常规供冷模式的电制冷机平均性能系数, 可按 5.0 取值。

5.2 算例分析

5.2.1 技术指标分析

江苏省 10 kV 及以下大工业用电高峰段(08:00—12:00, 17:00—21:00)电价为 1.0 697 元/(kW·h), 平段(12:00—17:00, 21:00—24:00)电价为 0.641 8 元/(kW·h), 谷段(12:00—17:00, 21:00—24:00)电价为 0.313 9 元/(kW·h), 能源站供数据中心电价为 0.80 元/(kW·h)。为充分利用峰谷电价差, 提高能源站经济效率, 能源站内燃机谷段(00:00—08:00)不运行, 数据中心从国家电网购电, 能源站内用电亦从电网购入谷价电; 能源站的内燃机(08:00—24:00)运行, 高峰段, 能源站用电设备由内燃机供, 剩余电量供数据中心; 平段, 能源站供数据中心电价高于从电网平段电价, 所以此时段能源站内燃机发电量全部供给数据中心, 能源站内用电设备从电网购入电量。数据中心冷负荷(00:00—08:00)全部由电制冷离心机承担; 数据中心冷负荷(08:00—24:00)由烟气-热水型溴化锂机组和离心式电制冷机组共同承担。

白天烟气-热水型溴化锂机组承担 15 668 kW 冷负荷, 其余 34 332 kW 冷负荷由离心式电制冷机组承担; 夜间 50 MW 冷负荷全部由离心式电制冷机组承担。能源站典型日供冷量如图 5 所示。

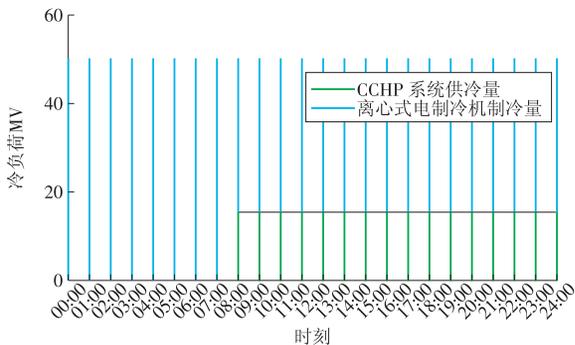


图 5 能源站典型日供冷量

Fig. 5 Cooling capacity of the power station on a typical day

能源站内燃机夜间停运, 白天发电功率为 18 000 kW; 能源站夜间用电负荷为 9 064 kW, 白天用电负荷 7 430 kW; 能源站平/峰段供数据中心电负荷 17 100/9 670 kW; 能源站谷段从电网购入电负荷 9 064 kW, 峰段不从电网购电, 由内燃机供应, 平段从电网购电负荷 7 430 kW。

能源站典型日内燃机发电量、制冷相关设备耗电量、下网电量及供数据中心电量如图 6

所示。

通过分析计算^[15], 得出主要技术数据, 能源站内燃机年耗天然气量 2 453 万 m³/a, 年供电量 104.71 GW·h, 综合能源利用效率 79%, 热电比 91.6%, 内燃机标准工况主要技术指标见表 2。

5.2.2 经济指标分析

(1) 边界条件。能源站财务评价需在特定边界条件下评估, 设定的边界数据见表 3。

(2) 经济指标。能源站静态投资 25 396 万元, 税后内部收益率 9.43%, 投资回收期 9.73 年, 经济上是可行的, 能源站主要经济指标见表 4。

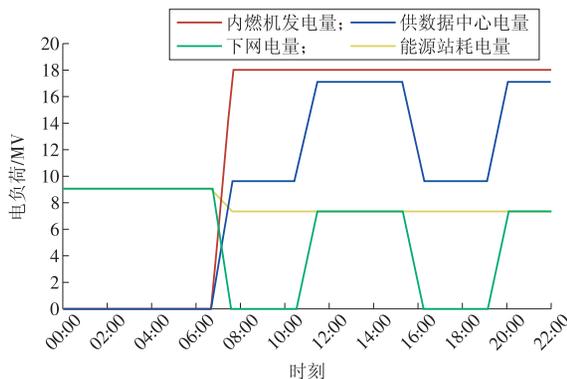


图 6 能源站典型日相关电量

Fig. 6 Electricity consumption of the power station on a typical day

表 2 内燃机标准工况主要技术指标

Tab. 2 Main technical indicators of the internal-combustion engine

指标	数值
年发电量/(GW·h)	104.71
年供电量/(GW·h)	78.17
年供空调冷量/(GW·h)	438.00
CCHP 系统等效利用小时/h	5 840
电制冷机组制冷利用小时/h	8 760
内燃机年耗天然气量/(万 m ³ ·a ⁻¹)	2 453
发电天然气气耗率 ^① /[m ³ ·(MW·h) ⁻¹]	142.4
供电天然气气耗率 ^① /[m ³ ·(MW·h) ⁻¹]	149.9
供冷天然气气耗率 ^① /[m ³ ·GJ]	29.03
发电厂用电率 ^① /%	5
综合能源利用效率 ^① /%	79
热电比 ^① /%	91.6
用电网平段电量/(GW·h)	20.062 4
用电网低谷电量/(GW·h)	24.316 8
年耗水量/万 t	196.3

注: ①表示 CCHP 系统。

5.2.3 敏感性分析

为分析能源站抗风险的能力, 将总投资、发电量、天然气价格和供电价格作为敏感性因素, 分析

表 3 财务评价计算边界条件

Tab. 3 Boundary conditions for the financial evaluation

名称	数值
天然气价格/(元·m ⁻³)	2.60
冷价/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.16
水价/(元·t ⁻¹)	4.20
平段电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.641 8
低谷电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.313 9
能源站供数据中心电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.80

结果如图 7 所示。由敏感性分析可知,税后内部收益率对天然气价格和供电价格变化十分敏感^[16]。

表 4 主要经济指标

Tab. 4 Main economic indicators

项目名称	指标
静态投资/万元	25 396
总投资收益率/%	7.70
资本金净利润率/%	24.07
内部收益率(税前)/%	12.27
投资回收期(税前)/a	8.34
内部收益率(税后)/%	9.43
投资回收期(税后)/a	9.73

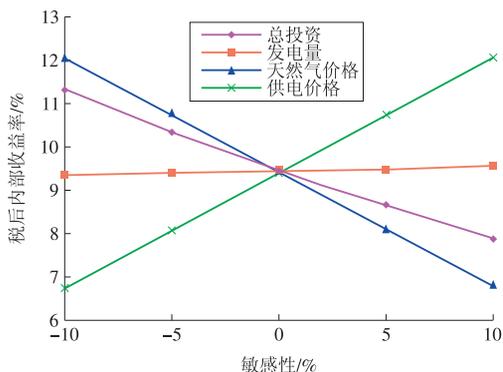


图 7 敏感性分析

Fig. 7 Sensibility analysis

6 节能及环境效益分析

6.1 节标煤量及节能率

天然气分布式能源系统梯级利用,提高了天然气能源使用效率,起到节能减排目的,减少碳排放量。经分析计算,该能源站节约标准煤量为 12 564 t/a。CCHP 系统节能率 22.6%,满足并高于国家标准《燃气冷热电联供工程技术规范》(GB 51131—2016)中节能率大于 15%的要求。

6.2 环境效益

天然气分布式能源系统可有效降低碳排放量,使能源站获得碳排放收益,能源站投运后,具有年减排烟尘 2.2 t,二氧化硫 20.63 t,氮氧化物减排量 37.27 t,二氧化碳减排量 10 200 t,碳排放及相关污

染物减排效果较明显,低碳环保^[17-18],污染物减排情况见表 5。

表 5 CCHP 系统污染物减排一览表

Tab. 5 Reduced pollutant list of the CCHP system / (t·a⁻¹)

项目	烟尘	SO ₂	NO _x	CO ₂
CCHP 系统	0	2.94	29.10	47 200
国家电网供电排放量	2.20	23.57	66.37	57 400
减排量	2.20	20.63	37.27	10 200

7 结论

数据中心常年负荷大且稳定,使得其配套的能源站综合能源利用效率高,接近 80%。能源站利用峰谷电价差提高其经济效益,投资税后内部收益率 9.43%,经济性可行,具有一定的抗风险能力。能源站运营成本主要受天然气价格制约,综合考虑节能减排、低碳经济等因素,笔者认为在未来天然气价格进一步下降的情况下,降低运行成本后,该方案具有一定的推广意义。

参考文献:

[1]彭刚平,康慧.数据中心供能设计标准分析[J].华电技术,2020,42(12):88-93.
 PENG Gangping, KANG Hui. Analysis on standards for data center energy supply design [J]. Huadian Technology, 2020, 42(12):88-93.

[2]徐君强.分布式能源系统在数据中心的应用[J].科技展望,2014(12):92-93.

[3]肖蔚然,孙锦余,陈钢,等.天然气分布式能源在数据中心能源供应的应用研究[J].节能,2014(2):4-7.

[4]王强,夏成军,唐智文.分布式能源在数据中心应用的可行性探析[J].电网与清洁能源,2013(9):87-90.
 WANG Qiang, XIA Chengjun, TANG Zhiwen. Discussion on the feasibility for distributed energy in internet data center [J]. Power System and Clean Energy, 2013(9):87-90.

[5]印佳敏,陈泽韩.天然气分布式能源系统在大型数据中心的应用研究[J].南方能源建设,2015(2):52-56.
 YIN Jiamin, CHEN Zehan. Application research of natural gas distributed energy system in large data center [J]. Southern Energy Construction, 2015(2):52-56.

[6]余莉,张珍.楼宇式天然气分布式能源系统年均综合能源利用效率提升方案[J].华电技术,2018,40(7):74-76.
 YU Li, ZHANG Zhen. Annual energy utilization efficiency improvement scheme for building-type natural gas distributed energy system [J]. Huadian Technology, 2018, 40(7):74-76.

[7]金红光,郑丹星,徐建中.分布式冷热电联产系统装置及应用[M].北京:中国电力出版社,2010.

- [8]张军,孙依帆,陈伟,等.楼宇型分布式能源主要设备选型及经济性分析[J].发电设备,2020,34(1):24-26.
ZHANG Jun, SUN Yifan, CHEN Wei, et al. Main equipment selection and economic analysis of building-type distributed energy systems[J]. Power Equipment, 2020, 34(1): 24-26.
- [9]林世平.燃气冷热电分布式能源技术应用手册[M].北京:中国电力出版社,2014.
- [10]徐静静,和彬彬,杨玲,等.楼宇式燃气分布式能源站噪声防治措施[J].华电技术,2016,38(9):74-76,80.
XU Jingjing, HE Binbin, YANG Ling, et al. Noise control measures of buildingtype natural gas distributed energy station[J]. Huadian Technology, 2016, 38(9): 74-76, 80.
- [11]秦渊,常丽,李晨.楼宇型分布式能源站内燃机的选择[J].中国电机(技术版),2014(10):102-104.
- [12]黄庆河,曹连华,蔡宇.水蓄冷技术在数据中心的应用研究[J].暖通空调,2016,46(10):13-17.
HUANG Qinghe, CAO Lianhua, CAI Yu. Research on application of chilled water storage technology to data centers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2016, 46(10): 13-17.
- [13]孙铁.水蓄能在空调系统节能中的应用[D].重庆:重庆大学,2018.
- [14]周小清,柳建华,徐小进,等.大型数据中心制冷系统设计[J].建筑节能,2016(12):26-30.
ZHOU Xiaoqing, LIU Jianhua, XU Xiaojin, et al. Design of refrigeration system for large data center [J]. Building Energy Efficiency, 2016(12): 26-30.
- [15]刘青荣,阮应君,朱群志,等.分布式能源系统及其运行特性分析[J].上海电力学院学报,2009,25(5):427-432.
LIU Qingrong, RUAN Yingjun, ZHU Qunzhi, et al. Analysis of operating characteristics in a distributed energy system [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2009, 25(5): 427-432.
- [16]王智,尹楠,杨佳霖.楼宇型分布式能源系统优化设计与敏感性分析[J].热力发电,2020,49(3):45-52.
WANG Zhi, YIN Nan, YANG Jialin. Optimization design and sensitivity analysis of building-type distributed energy system [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 45-52.
- [17]张晓辉,梁军雪,赵翠妹,等.基于碳交易的含燃气机组的低碳电源规划[J].太阳能学报,2020,41(7):92-98.
ZHANG Xiaohui, LIANG Jjunxue, ZHAO Cuimei, et al. Research on low-carbon power planning with gas turbine units based on carbon transactions [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(7): 92-98.
- [18]王为伟,朱本刚,杨家强.天然气发电对碳减排的贡献[J].燃气轮机技术,2016,29(1):9-11.
WANG Weiwei, ZHU Bengang, YANG Jiaqiang. Contribution of natural gas generation on carbon emission reduction[J]. Gas Turbine Technology, 2016, 29(1): 9-11.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

陈卉(1987—),女,江苏南京人,工程师,硕士研究生,从事电厂相关设计等方面的工作(E-mail: 15950532429@163.com)。

刘颖(1980—),女,江苏南京人,副教授,硕士研究生,从事分布式发电专业等方面的工作(E-mail: 123167135@qq.com)。

赵龙生(1965—),男,江苏南京人,高级工程师,硕士研究生,从事电厂相关设计等方面的工作(E-mail: njzls@163.com)。