

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.010

基于热电互动的分布式能源系统优化研究

印佳敏¹, 王路¹, 夏文波¹, 梁沛权¹, 刘育权²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 广州供电局有限公司, 广州 510620)

摘要: [目的]为实现分布式能源系统经济、高效的为工业用户供能,基于工业园区电、热负荷的耦合特性,建立了分布式能源系统供能单元的性能模型,提出了优化运行策略。[方法]以广州某工业园区为研究对象,结合实际负荷数据,合理确定优化参数,计算了年发电量、年耗气量和一次能源利用效率,并对负荷增量的影响进行了研究。[结果]结果表明:机组启动热负荷对分布式能源系统的年发电量影响较大,采用优化运行策略,年发电量提升约18.7%,可以提高园区自供电比例,一次能源利用效率在85%以上。[结论]该优化运行策略是正确并有效的,可应用于热电耦合分布式能源系统的优化,有效提升分布式能源系统的供能,同时维持较高的一次能源综合利用效率。

关键词: 热电互动; 分布式能源; 优化运行

中图分类号: TK11

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)03-0059-05

Research on Optimization of Distributed Energy System Based on Thermo-electric Interaction

YIN Jiamin¹, WANG Lu¹, XIA Wenbo¹, LIANG Peiquan¹, LIU Yuquan²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Guangzhou Power Supply Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: [Introduction] To supply energy for industrial users in an economical and efficient way, an energy supply unit model in distributed energy system (DES) is established based on coupling characteristics of electric and thermal loads, and optimal operation strategy is proposed. [Method] Taking an industrial park in Guangzhou as the research object, combined with the actual load data, the optimum parameters were reasonably determined, annual power generation, gas consumption and energy efficiency were calculated, and the impact of load increment was studied. [Result] The results show that the start-up thermal load of unit has a great influence on the annual power generation of DES. With the optimized operation strategy, the annual power generation can be increased by 18.7%, and the self-power supply ratio of the park can be increased. The energy efficiency is more than 85%. [Conclusion] The optimal operation strategy is correct and effective. It can be applied to the optimization of thermo-electric coupled DES, effectively enhance the energy supply of DES with high energy efficiency.

Key words: thermo-electric interaction; distributed energy system; optimized operation

综合能源系统是最具代表性的“能源互联”系统,是能源互联网中实现能源转换、分配与有机协调的重要物理载体,可发挥不同能源系统的优势,协调运行^[1-2],有效解决传统能源系统中各类能源

之间相对独立的问题^[3]。以冷热电联产机组(CCHP)作为核心能源中枢的电热耦合综合能源系统应用最为广泛,是能源互联网的重要组成部分^[4]。

综合能源系统的典型应用场景之一是工业园区,企业用户对电力和热能均有较大需求,且热、电需求之间存在耦合特性^[5]。CCHP系统是工业园区综合能源系统中的重要供能单元,可实现能量的梯级利用。基于园区负荷优化CCHP系统,有助于

收稿日期: 2019-03-26 修回日期: 2019-04-11

基金项目: 国家重点研发计划项目“工业园区多元用户互动的配用电系统关键技术研究及示范”(2016YFB0901300)

提高园区自供电比例、提升园区的一次能源综合利用效率。目前,综合能源系统多能协同优化模型^[6-9]和经济运行调度模型^[10-12]的相关研究已较为完善,但均未充分考虑基于负荷条件下CCHP机组的电热耦合互动。

本文以广州某工业园区为研究对象,该工业园区中的CCHP系统为天然气分布式能源站。基于园区热负荷条件和热电互动,通过建立供能单元的性能模型,研究机组运行优化策略对能源站发电量和一次能源利用效率的影响。

1 研究对象运行现状

分布式能源站现有2套燃气轮机热电联产机组,按以热定电方式运行,燃气轮机、余热锅炉、燃气锅炉共同组成了能源站的供电、供热系统。

运行流程图如图1所示,来自门站的天然气进入分布式能源站后经过滤、调压分为三路,其中两路分别进入两台燃气轮机,在燃烧室内燃烧后带动燃气轮机做功,经由发电机转换为电力,对外输出电能。同时天然气燃烧产生的烟气温在550℃以上,进入余热锅炉用于加热给水,产生2.5 MPa.g/250℃左右的过热蒸汽;另一路天然气直接进入燃气锅炉,将水加热为2.5 MPa.g/250℃左右的蒸汽。三路蒸汽混合后,经由蒸汽母管输送给用热企业。部分企业在用户端设有热-冷转换装置,利用蒸汽制冷。

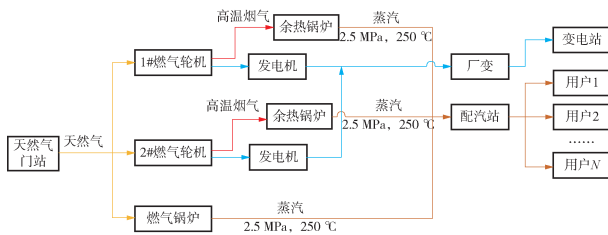


图1 分布式能源站流程图

Fig. 1 Flow diagram of distributed energy system

当蒸汽负荷变化时,通过调节两台燃气轮机的负荷率以及燃气锅炉,可以快速响应用户的用热需求。

目前由于工业园区热负荷未达到设计值,两台机组负荷率较低。根据2018年运行数据,分布式能源站年发电量9276.86万kWh,年天然气耗量3535.9万Nm³,配汽站年供蒸汽量27.95万t。分布式能源站两台机组目前利用小时数均处于相对较低

的水平,在一次能源综合利用效率较低的同时,分布式能源站发电能力也不能得以全面释放。

2 供能单元的性能模型

2.1 CCHP 机组

根据分布式能源站机组性能验收试验报告,在性能保证工况下,CCHP机组部分负荷性能数据如图2、图3所示。

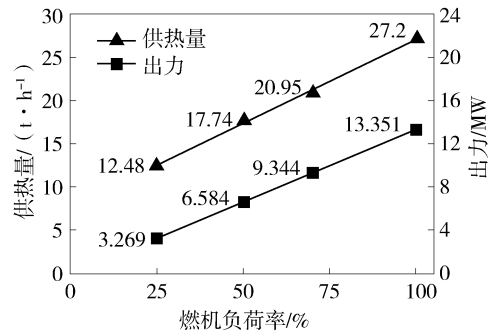


图2 不同负荷率下的机组出力 and 供热量曲线

Fig. 2 Curves of output and heat VS. GT load

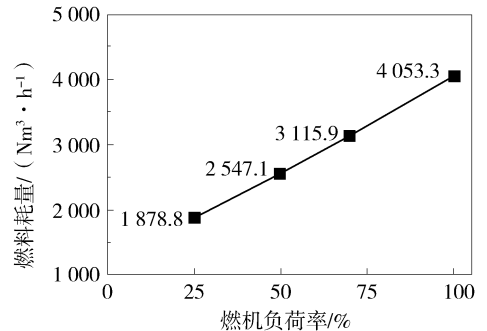


图3 不同负荷率下的燃料耗量曲线

Fig. 3 Curves of fuel consumption VS. GT load

燃机部分负荷率对CCHP机组影响较大。随着燃机负荷率增加,机组出力、耗气量和供热量几乎均成正比增加。

对性能数据进行二次曲线拟合,拟合结果如下:

$$m = 0.2759 \cdot K^2 + 19.043 \cdot K + 7.8043 \quad (1)$$

$$P = 0.0519 \cdot K^2 + 13.402 \cdot K - 0.0951 \quad (2)$$

$$b = 479.57 \cdot K^2 + 2297.8 \cdot K + 1275.3 \quad (3)$$

式中: K 为燃机负荷率,取值0%~100%; m 为机组供热量(t/h); P 为机组出力(MW); b 为燃机耗气量(Nm³/h)。

2.2 燃气锅炉

对于燃气锅炉,额定产汽量为25t/h,额定效

率 $\eta' = 92\%$, 实际运行时, 效率可近似看作不变。燃气锅炉耗气量可用如下公式计算:

$$b_3 = \frac{m_3 \cdot \Delta h_3}{Q_L \eta'} \quad (4)$$

$$\Delta h_3 = h_{gq3} - h_{gs3} \quad (5)$$

式中: b_3 为燃气锅炉耗气量 (Nm^3/h); m_3 为燃气锅炉蒸汽流量 (t/h); Δh_3 为燃气锅炉有效吸热量 (kJ/kg); Q_L 为燃料低位发热量 (MJ/Nm^3); h_{gq3} 和 h_{gs3} 分别为燃气锅炉过热蒸汽和给水焓值 (kJ/kg)。由于锅炉排污率一般低于 2%, 式中为了计算的简便, 忽略燃气锅炉排污水的热量。

3 优化目标模型

考虑到仪表读数的精度问题, 机组蒸汽流量和天然气耗量均以最高精度的仪表进行修正。

1) 余热锅炉蒸汽流量

设 1#机组蒸汽流量为 m_1 , 2#机组蒸汽流量为 m_2 , 燃气锅炉蒸汽流量为 m_3 , 配汽站蒸汽流量为 m_0 , 则修正后的 1#机组蒸汽流量 m_1' 和 2#机组蒸汽流量 m_2' 分别用以下公式表示。

$$m_1' = \frac{m_1 \times m_0}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (6)$$

$$m_2' = \frac{m_2 \times m_0}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (7)$$

2) 天然气耗量

设 1#机组天然气流量为 b_1 , 2#机组天然气流量为 b_2 , 燃气锅炉天然气流量为 b_3 , 门站天然气流量为 b_0 , 则修正后的 1#机组天然气流量 b_1' 和 2#机组流量 b_2' 分别用以下公式表示。

$$b_1' = \frac{b_1 \times b_0}{b_1 + b_2 + b_3} \quad (8)$$

$$b_2' = \frac{b_2 \times b_0}{b_1 + b_2 + b_3} \quad (9)$$

一次能源综合利用效率 η 采用下式^[13]计算:

$$\eta = \frac{3.6W + Q_1 + Q_2}{B \times Q_L} \times 100\% \quad (10)$$

式中: W 为年净输出电量 (kWh); Q_1 为年有效余热供热总量 (MJ); Q_2 为年有效余热供冷总量 (MJ); B 为年燃气总耗量 (Nm^3)。本项目由于没有余热供冷, 故 $Q_2 = 0$ 。 Q_1 采用以下公式计算, 其中 h_{gq} 和 h_{gs} 分别为过热蒸汽和给水焓值 (kJ/kg), 下标 1 和 2 分别代表两台机组。

$$Q_1 = \int_0^T (m_1' \cdot \Delta h_1 + m_2' \cdot \Delta h_2) dt \quad (11)$$

$$\Delta h_1 = h_{gq1} - h_{gs1} \quad (12)$$

$$\Delta h_2 = h_{gq2} - h_{gs2} \quad (13)$$

$$W = \int_0^T (P_1 + P_2) \cdot dt \quad (14)$$

$$B = \int_0^T (b_1' + b_2') \cdot dt \quad (15)$$

4 优化运行策略

结合燃气轮机最小经济出力参数, 制定更加优化的能源站运行方式, 充分发挥 CCHP、燃气锅炉的优势, 将有利于提高园区自供电比例。

考虑到能源站“以热定电”模式, 如表 1 所示, 分布式能源站的机组运行采用以下模式, 其中 $Q_{S1}(t)$ 为第 1 套 CCHP 机组的启动热负荷, $Q_{S2}(t)$ 为第 2 套 CCHP 机组的启动热负荷 (t/h)。

表 1 机组运行模式

Tab. 1 Unit operation mode of distributed energy system		
运行模式类别	蒸汽负荷范围	运行模式
1	$0 \leq Q_H(t) < Q_{S1}(t)$	燃气锅炉
2	$Q_{S1}(t) \leq Q_H(t) \leq Q_{CCHP0}(t)$	1 套 CCHP 机组
3	$Q_{CCHP0}(t) < Q_H(t) < Q_{S2}(t)$	1 套 CCHP 机组 + 燃气锅炉
4	$Q_{S2}(t) \leq Q_H(t) \leq 2 \cdot Q_{CCHP0}(t)$	2 套 CCHP 机组
5	$2 \cdot Q_{CCHP0}(t) < Q_H(t) \leq 2 \cdot Q_{CCHP0}(t) + Q_{GB0}(t)$	2 套 CCHP + 燃气锅炉

分布式能源站运行时满足热平衡约束:

$$\begin{cases} Q_{CCHP}(t) + Q_{GB}(t) \leq Q_H(t) \\ 0 \leq Q_{CCHP}(t) \leq Q_{CCHP0}(t) \\ 0 \leq Q_{GB}(t) \leq Q_{GB0}(t) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $Q_H(t)$ 为逐时热负荷需求 (t/h); $Q_{CCHP0}(t)$ 、 $Q_{GB0}(t)$ 分别为 CCHP 机组和燃气锅炉机组额定供热量 (t/h)。

5 优化结果

基于分布式能源站全年热负荷, 机组采用优化后的运行策略, 优化结果如下:

1) 第 1 套机组启动热负荷 $Q_{S1}(t)$ 的影响

降低第 1 套 CCHP 机组的启动热负荷可以在一定程度上提升发电量水平, 具体如表 2 所示。可以看出, 当 CCHP 启动热负荷低于 17.3 t/h 以下时,

启动热负荷的降低对年发电量增加不明显。考虑到燃机负荷率在50%以下时,效率会急剧下降,因此,以17.3 t/h作为第1套CCHP机组启动热负荷,这也有利于延长CCHP机组寿命和提高机组效率。

表2 不同启动热负荷 $Q_{S1}(t)$ 的计算结果

Tab. 2 Results of annual energy output and $Q_{S1}(t)$

优化方案	$Q_{S1}(t) / (t \cdot h^{-1})$	年发电量/GWh
1	19.3	112.07
2	18.3	112.07
3	17.3	112.24
4	16.3	112.24
5	15.3	112.24
6	14.3	112.24

2) 第2套机组启动热负荷 $Q_{S2}(t)$ 的影响

考虑到燃机在50%负荷以下性能下降很快,且两套机组均维持50%负荷以下同时运行的可能性很小,因此基于实际热负荷,对不同 $Q_{S2}(t)$ 下的年发电量和一次能源利用效率进行计算。如图4所示,结果显示随着 $Q_{S2}(t)$ 的增加,年发电量先增后减,峰值出现在 $Q_{S2}(t) = 35$ t/h左右,而一次能源利用效率逐渐增加,前期增加较快,后期逐渐平缓。因此将35 t/h作为第2套CCHP机组启动热负荷,可以最大程度提高年发电量水平,同时保持较高的一次能源利用效率。

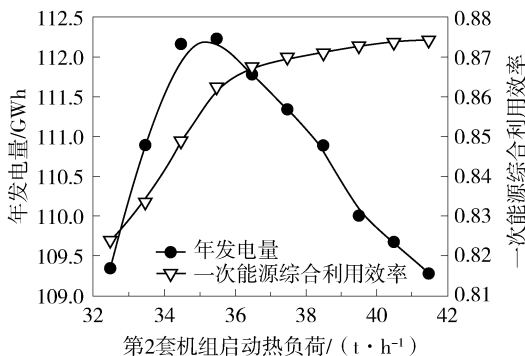


图4 不同启动热负荷 $Q_{S2}(t)$ 下的年发电量和一次能源利用效率曲线

Fig. 4 Curves of annual energy output and efficiency VS. $Q_{S2}(t)$

3) 发电量

在现有热负荷不变的情况下,机组采用优化后的运行策略,以17.3 t/h作为第1套CCHP机组启

动热负荷,35 t/h作为第2套CCHP机组启动热负荷,经优化模拟计算,分布式能源站年发电量可达到约112.3 GWh,全年出力曲线如图5所示。

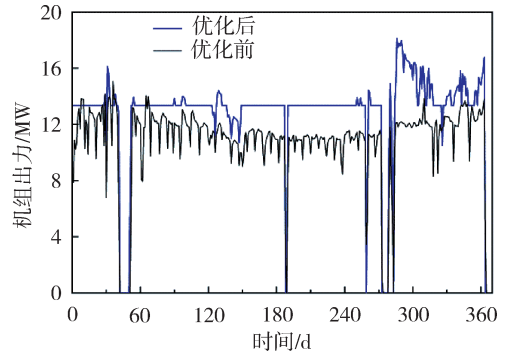


图5 分布式能源站全年出力曲线

Fig. 5 Curves of annual output of Distributed Energy System

4) 天然气耗量

采用优化运行策略,在提高发电量的同时,天然气耗气量也相应增加。年天然气总耗量为3 903万 Nm^3 ,年天然气耗量曲线如图6所示。

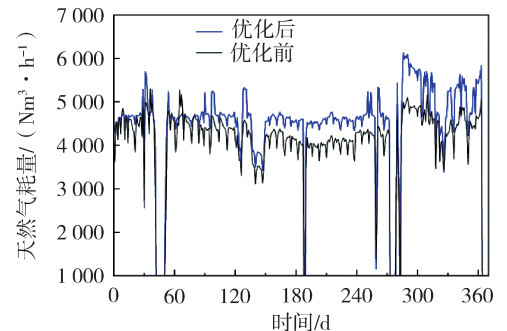


图6 分布式能源站全年天然气耗量曲线

Fig. 6 Curves of fuel consumption of Distributed Energy System

5) 一次能源综合利用效率

经计算,一次能源综合利用效率为86.27%,满足一次能源综合利用效率 $\geq 80\%$ 的要求。

6) 热负荷增量的影响

采用优化运行策略,考虑到园区新增企业热需求的不确定性,对热负荷增量的影响进行分析,如图7所示。

随着热负荷的增加,分布式能源站的年发电量几乎成正比例增长。若热负荷每小时增至13~20 t/h,年发电量将达到(179 GWh~218 GWh)。

增加蒸汽负荷后,一次能源综合利用效率出现先降后升的趋势,分析主要是因为现有热负荷的条件下,不考虑热负荷增量时,基本由单套CCHP

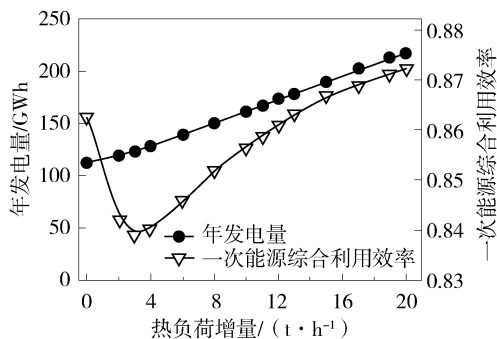


图7 不同热负荷增量下的年发电量和一次能源利用效率曲线

Fig. 7 Curves of annual energy output and efficiency VS. heat load increment

机组+燃气锅炉满足用热需求, 燃气轮机负荷率较高; 而热负荷增加很少时, 多数情况下由两套CCHP机组满足用热需求, 单套机组的负荷率相对较低, 因此一次能源综合利用效率不升反降; 当热负荷增量继续增加时, 燃机负荷率提高, 一次能源综合利用效率也随之增加。若热负荷每小时增至13~20 t/h, 其一次能源综合利用效率将达到0.863 1~0.872 3。

6 结论

本文建立了基于热电互动的分布式能源系统供能模型和优化目标模型, 提出了机组优化运行策略。结合广州某工业园区的实际运行数据进行了算例分析, 结果表明:

1) 机组启动热负荷对分布式能源站的年发电量影响较大。建议第1套CCHP机组启动热负荷为17.3 t/h, 第2套CCHP机组启动热负荷为35 t/h。

2) 基于现有的热负荷, 分布式能源站采用优化运行策略后年发电量提升约18.7%, 在一定程度上可以提高园区自供电比例, 同时一次能源综合利用效率在85%以上。

研究成果可以应用于热电耦合分布式能源系统的优化, 通过基于实际热、电负荷的优化模拟, 能够得到兼顾年发电量与综合能效的运行优化策略, 充分挖掘分布式能源系统的供能潜力, 提升系统的利用率和能效水平。

参考文献:

[1] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.

JIA H J, WANG D, XU X D, et al. Research on some key problems related to integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.

[2] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.

SUN H B, GUO Q L, PAN Z G. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.

[3] 李媛, 杨秀, 凌梓, 等. 区域综合能源系统中考虑季节负荷特性的多能流耦合运行研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(22): 78-86.

LI Y, YANG X, LING Z, et al. Study on coupling operation of multi-energy flow for integrated community energy system considering seasonal load characteristics [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(22): 78-86.

[4] 张义勇, 王小君, 和敬涵, 等. 考虑供热系统建模的综合能源系统最优能流计算方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 562-570.

[5] 姜子卿, 刘育权, 艾芊, 等. 面向多主体的工业园区综合能源系统互动机制[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 18-26.

[6] 徐航, 董树峰, 何仲潇, 等. 考虑能量梯级利用的工厂综合能源系统多能协同优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 123-130.

[7] 朱旭, 杨军, 刘源, 等. 新型园区综合能源系统规划方法[J]. 可再生能源, 2018, 36(10): 1479-1485.

[8] 王进, 李欣然, 杨洪明, 等. 与电力系统协同区域型分布式冷热电联供能源系统集成方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 16-21.

[9] 王珺, 顾伟, 陆帅, 等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 17-24.

[10] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 581-591.

[11] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 9-16.

[12] 华煌圣, 刘育权, 熊文, 等. 考虑综合能效水平的能源系统多目标优化运行[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 81-84.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 燃气冷热电联供工程技术规范: GB 51131—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

作者简介:



印佳敏(通信作者)

1982-, 女, 江苏南通人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司高级工程师, 清华大学动力工程及工程热物理博士, 主要从事综合能源、热力系统技术研究及咨询设计(e-mail) yin-jiamin@gedi.com.cn。

YIN J M

(责任编辑 郑文棠)