

# 某天然气分布式能源冷电联供节能计算与经济性分析

丁历威<sup>1</sup>, 应 鸿<sup>2</sup>, 刘 强<sup>3</sup>, 李 磊<sup>3</sup>, 梅丘梅<sup>2</sup>, 徐一剑<sup>2</sup>, 韩高岩<sup>1</sup>, 刘 虎<sup>4</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司 电力科学研究院, 杭州 310014; 2. 浙江华云清洁能源有限公司, 杭州 310000; 3. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310000; 4. 杭州意能电力技术有限公司, 杭州 310014)

## Energy saving calculation and economic analysis for combined cooling and power system of natural gas distributed energy

DING Liwei<sup>1</sup>, YING Hong<sup>2</sup>, LIU Qiang<sup>3</sup>, LI Lei<sup>3</sup>, MEI Qiumei<sup>2</sup>, XU Yijian<sup>2</sup>, HAN Gaoyan<sup>1</sup>, LIU Hu<sup>4</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 2. Zhejiang Huayun Clearn Energy Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 4. Hangzhou E. Energy Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

**摘要:**分布式能源联供系统与传统分供系统相比节能率高、环境污染少,是实现节能减排目标的重要途径之一。结合某天然气分布式冷电联供数据中心项目,计算分析了联供系统的一次能源利用效率、节能率、供电效率、供电煤耗、成本回收期,并与分供系统做了对比。结果表明天然气分布式冷电联供系统一次能源利用效率高,供电能耗明显低于发电厂,节能效果非常明显。根据回收期灵敏度分析,联供系统的经济收益和投资回收期受天然气价格影响较大,当超过一定阈值后,联供系统经济性不如分供系统,所以建造前需充分考虑当地的气价水平。

**关键词:**天然气;联供;分供;回收期

**Abstract:** Compared with traditional distributed system, the co-supply system has high energy saving rate and less environmental pollution, which is one of the important ways to achieve the goal of energy saving and emission reduction. The primary energy utilization efficiency, energy saving rate, power supply efficiency, power supply coal consumption and cost payback period of the combined cooling and power system are calculated and analyzed through a natural gas combined cooling and power project, and a comparison with other system is made. It states that the combined cooling and power system has higher primary energy utilization efficiency, and lower coal consumption than power plant, which shows an obvious energy saving effect. According to the sensitivity analysis of the payback period, the economic income and investment recovery period are greatly affected by the natural gas price. When the threshold is exceeded, the economy is not as good as that of the distributed system. So the local natural gas price and electricity price should be well considered.

**Key words:** natural gas; co-supply system; distributed system; payback period

## 0 引言

在当前全球经济迅猛发展的势头下,能源需求持续上升,经济发展与能源、环境之间的矛盾日益突出<sup>[1-2]</sup>。在保证经济增长的同时,如何减少能源消耗、提高一次能源利用率成为当下重要课题。

分布式能源系统是近年兴起的利用小型分散设备建设在靠近用户端(需求侧)提供能源的新型能源利用方式。冷、热、电三联供是分布式能源系统的主要形式<sup>[3-5]</sup>,它有利于优化电源结构,增加清洁能源发电比例;有利于提高能源综合利用率;有

利于改善环境,净化城市空气质量。

本文以某个天然气分布式能源冷电联供项目为例,计算其一次能源利用率、供电效率、供电煤耗,并与分供系统做经济性对比。

## 1 分布式能源三联供概念

三联供系统是一种建立在能量梯级利用基础上的综合产、用能系统,它分散在用户端附近,利用天然气驱动发电机供电,系统排出的废热通过余热锅炉或余热直燃机等设备向用户供热、供冷,最终实现更高的能源利用率、更低的能源成本。三联供以能源梯级利用为导向,其能源综合利用效率可高达80%以上<sup>[6-9]</sup>。

用于三联供系统的发电机形式主要有燃气轮机和燃气内燃机,大容量发电机组燃气轮机占有优

收稿日期:2020-03-11;修回日期:2020-07-06

基金项目:浙江省电力有限公司科技项目(5211DS180036)

This work is supported by Science and Technology Project of Zhejiang Electric Power Co., Ltd.(No.5211DS180036)

势,小容量发电机组燃气内燃机占有优势。燃气轮机发电效率低,小容量时发电效率衰减很大,但  $\text{NO}_x$  排放量低。燃气内燃机发电效率高,对节能和经济运行十分有利,但  $\text{NO}_x$  排放量高。由于发电效率高是最关键的数据,综合比较后冷热电三联供采用燃气内燃发电机组更具有优势<sup>[10-11]</sup>。

燃气内燃机的余热主要有2部分:烟气余热和缸套水余热。烟气余热可以有2种利用方式:一种是发电机的高温排气进入余热锅炉(可带补燃),产生蒸汽;另一种是燃气内燃机的高温烟气直接进入烟气型(可带补燃)溴化锂吸收式冷热水机组<sup>[12-14]</sup>。

## 2 某天然气分布式能源冷电项目介绍

某通信公司基于业务发展需要,需建设一个节能环保、可靠性高的数据中心。数据中心特点是全年不间断运行,电力负荷、冷负荷基本稳定,用电量和用冷量较大。

本项目拟采用2种设计方案:第一种是采用天然气分布式能源系统(联供系统),利用冷电联供方式为数据中心提供全部冷负荷,方案采用以冷(热)定电的方式设计燃气内燃机和溴化锂机组容量,燃气内燃机发电量按照垃圾发电价格全部并入市网,燃气内燃机排除的高温烟气和缸套热水作为热源驱动溴化锂机组制冷,制冷量满足机房的使用量要求。该方案配有9台4 300 kW级燃气内燃机,9台4 600 kW烟气-热水溴化锂机组;第二种是分供系统,采用9台4 600 kW电制冷冷水机组为机房提供冷负荷。现对这2种设计方案进行对比,表1为燃气内燃机设计参数,表2为烟气-热水溴化锂机组设计参数。

表1 燃气内燃机设计参数

Table 1 Design parameters of gas internal combustion engine

参数名称	数值
内燃机出力/kW	4 300
内燃机效率/%	44
排烟温度/°C	410
$\text{NO}_x$ 排放/( $\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ )	500
耗气量/( $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	1 026

表2 烟气-热水溴化锂机组设计参数

Table 2 Design parameters of lithium bromide unit

参数名称	数值
制冷量/kW	4 600
冷冻水流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	792
冷却水流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	1 049
电功率/kW	13
冷冻水额定出/入口/°C	12/7
冷却水额定出/入口/°C	37/32

本文采用能源站设备的设计参数,计算联供和分供系统的能耗和经济性。因为采用以冷、热定电方式,制冷负荷随季节波动,可以通过增加或者减少燃气内燃机、溴化锂机组和电制冷开机数量来实现,所以可以认为燃气内燃机、溴化锂机组和电制冷机组一直在额定负荷下运行,表3为电制冷机组设计参数。

表3 电制冷机组设计参数

Table 3 Design parameters of electric refrigeration unit

参数名称	数值
制冷量/kW	4 600
冷冻水流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	792
冷却水流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	936
电功率/kW	830
冷冻水额定出/入口/°C	12/7
冷却水额定出/入口/°C	37/32

## 3 联供与分供一次能源利用效率对比

将天然气分布式能源联供系统与冷电分供系统的一次能源综合利用率进行比较,求出节能率以测定节能的大小。

联供系统输入有2部分:内燃机的天然气输入功率与溴化锂机组输入的电功率,需要把电功率折算到一次能源输入功率。联供系统相关参数计算如下

$$\varepsilon_{lg} = \frac{W_{ld} + W_{ll}}{W_{ln} + W_{lskl}} \quad (1)$$

$$W_{ln} = \frac{W_{ld}}{\theta_{lnrj}} \quad (2)$$

$$W_{lskl} = \frac{W_{ldskhl}}{\theta_{dc} \cdot \theta_{sp}} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_{lg}$  为联供系统一次能源综合利用率,%;  $W_{ld}$  为供电功率, kW;  $W_{ll}$  为供冷功率, kW;  $W_{ln}$  为内燃机输入功率, kW;  $\theta_{lnrj}$  为内燃机发电效率,%;  $W_{lskl}$  为溴化锂折算到一次能源的输入功率, kW;  $W_{ldskhl}$  为溴化锂输入电功率, kW;  $\theta_{dc}$  为电厂效率,%,取2018年发电厂平均效率39.9%;  $\theta_{sp}$  为输配变效率,%,取2018年平均效率93.79%<sup>[15]</sup>。联供效率计算如表4所示。

表4 联供效率计算

Table 4 Co-supply efficiency calculation

参数名称	数值
供电功率/kW	4 300
供冷功率/kW	4 600
内燃机发电效率/%	44
内燃机输入功率/kW	9 768
溴化锂机组输入电功率/kW	13
折算到一次能源输入功率/kW	9 804
一次能源综合利用效率/%	90.8

分供系统输入只有电功率,需要把电折算到一次能源,分供系统相关参数计算如下

$$\varepsilon_{lg} = \frac{W_{fd} + W_{fl}}{W_{fn}} \quad (4)$$

$$W_{fn} = \frac{W_{fd} + W_{fdzl}}{\theta_{dc} \cdot \theta_{sp}} \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon_{lg}$  为一次能源利用率,%;  $W_{fd}$  为供电功率, kW;  $W_{fl}$  为供冷功率, kW;  $W_{fn}$  为折算到一次能源输入功率, kW;  $W_{fdzl}$  为电制冷机组输入电功率。分供效率计算如表5所示。

表5 分供效率计算

Table 5 Distribution efficiency calculation

参数名称	数值
供电功率/kW	4 300
供冷功率/kW	4 600
电制冷机组输入电功率/kW	830
总输入电功率/kW	5 130
折算到一次能源输入功率/kW	13 708
一次能源综合利用效率/%	64.9

对比表4和表5发现,冷电联供系统一次能源利用效率为90.8%,而分供系统一次能源利用效率为64.92%,联供效率远高于分供系统。为了更好地对比联供和分供系统的节能情况,本文引入节能率的概念如下

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{W_{fn} - W_{ln}}{W_{fn}} = 1 - \frac{W_{ln}}{W_{fn}} = 1 - \frac{W_{fd} + W_{fl}}{W_{fn}} \\ &= 1 - \frac{\varepsilon_{lg}}{\varepsilon_{lg}} = \frac{\varepsilon_{lg} - \varepsilon_{lg}}{\varepsilon_{lg}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\phi$  为节能率,可以用来当作判定联供系统与分供系统是否节能的判据。当提供相同的电负荷和制冷负荷时,  $\phi > 0$  时,联供系统是节能的;  $\phi < 0$  时,联供不如分供系统节能。 $\phi$  的大小反映了相对节能能力的大小。本项目节能率  $\phi$  为

$$\phi = \frac{90.8\% - 64.9\%}{90.8\%} = 28.5\%$$

通过计算所知,本项目联供系统节能率较高,节能效果明显。

#### 4 联供系统供电效率和供电煤耗计算

联供系统相关参数计算公式如下

$$\theta_{lgl} = \frac{W_{ld}}{W_{ln} - W_{lrshl}} \quad (7)$$

$$W_{lrshl} = W_{llqs} - W_{llds} - W_{ldshl} \quad (8)$$

$$W_{llqs} = C_{水} \cdot m_{llqs} \cdot \Delta t_{llqs} \quad (9)$$

$$W_{llds} = C_{水} \cdot m_{llds} \cdot \Delta t_{llds} \quad (10)$$

式中:  $\theta_{lgl}$  为联供系统供电效率,%;  $W_{ld}$  为供电功率, kW;  $W_{ln}$  为内燃机输入功率, kW;  $W_{lrshl}$  为溴化锂净输入热功率, kW;  $W_{ldshl}$  为溴化锂输入电功率, kW;  $W_{llqs}$  为冷却水的输入热功率, kW;  $W_{llds}$  为冷冻水的输出热功率, kW;  $C_{水}$  为水的比热,取4.187 kJ/(kg·°C);  $m_{llqs}$  为冷却水流量, kg/s;  $\Delta t_{llqs}$  为冷却水进出口温差, °C;  $m_{llds}$  为冷冻水流量, kg/s;  $\Delta t_{llds}$  为冷冻水进出口温差, °C。

供电煤耗计算公式如下

$$B_{lg} = 3.6 \cdot \frac{W_{ln} - W_{lrshl}}{D_{lg} \cdot Q_{bm}} \cdot 1\ 000 \quad (11)$$

式中:  $B_{lg}$  为联供系统供电煤耗, g;  $D_{lg}$  为每小时的发电量, kWh;  $Q_{bm}$  为标煤的低位发热量,取29.3 MJ/kg。供电煤耗计算如表6所示。

表6 供电煤耗计算

Table 6 Calculation of power supply coal consumption

参数名称	数值
内燃机输入功率/kW	9 768
供电功率/kW	4 300
水的比热/(kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	4.187
冷冻水输出热功率/kW	4 600
冷却水输入热功率/kW	6 090
溴化锂机组输入电功率/kW	13
溴化锂机组输入热功率/kW	1 477
供电效率/%	51.8
供电煤耗/g	237

通过计算供电效率为51.8%,超过2018年发电厂平均供电效率39.9%。供电煤耗237克标煤/kWh,低于2018年发电厂供电煤耗为308克标煤/kWh,联供系统的供电效率和供电煤耗均优于发电厂。

#### 5 经济性计算与投资回收期分析

数据中心24 h运行,全天逐时负荷大致相同,而且天然气分布式能源产生的电按照垃圾发电价格0.65元/kWh全部并入市网。因为数据中心机房用电都来源于市网,所以联供和分供系统机房用电成本一样,故只需分别计算联供和分供系统产生1 kWh制冷量的能源成本即可比较其经济性,计算投资回收期。

联供系统输入成本是天然气的用气费用,输出获利是机组发电上网的获利,二者差值就是制冷量的能源成本;分供系统输入成本是电制冷机组的用电成本,无获利收益,用电成本即是制冷量的能源成本。



根据数据中心所在地的气候条件,数据中心机房全年冷负荷需求如表7所示。

表7 冷负荷需求

Table 7 Cooling load demand

季节	春秋季	夏季	冬季
天数/d	150	120	90
冷负荷需求/kW	27 200	31 087	23 315

数据中心采购燃气内燃机、溴化锂机组以及电制冷的设备费用如表8所示。

表8 设备费用

Table 8 Equipment cost

方式	联供		分供
	燃气内燃机	溴化锂机组	电制冷
设备名称			
设备成本费	14 900	4 320	3 330
设备成本费合计	19 220		3 330
设备成本差	15 890		

现采用不同的天然气价格和电价,做投资回收期的分析预测,如表9所示。

表9 回收期灵敏度分析

Table 11 Payback period sensitivity analysis

电价/ (元· kWh <sup>-1</sup> )	天然气 价格/ (元·m <sup>-3</sup> )	联供每 年节约 能源成 本/万元	投资 回收 期/年	电价/ 元	天然气 价格/ (元·m <sup>-3</sup> )	联供每 年节约 能源成 本/万元	投资 回收 期/年
0.665 6	2.58	3 620	4.38	0.6	3.00	1 111	14.29
0.665 6	2.80	2 453	6.47	0.7	3.00	1 540	10.31
0.665 6	3.00	1 392	11.41	0.8	3.00	1 969	8.07
0.665 6	3.3	-200	0.9	3.00	3.00	2 398	6.62

从表9可知,随着天然气价格增加,投资回收期不断变长。按照电价0.665 6元/kWh计算,天然气价格超过3.3元/Nm<sup>3</sup>,联供系统的能源成本超过分供系统,设备费用无法回收,为保证10年以内的回收期,天然气价格要在3.0元/Nm<sup>3</sup>以内。随着电价的增加,投资回收期不断缩短,按照天然气价格3元/Nm<sup>3</sup>计算,为保证10年以内的回收期,电价要在0.7元/kWh以上。所以该数据中心建造天然气分布式冷电联供系统需要充分考虑当地的天然气价格和电价。

## 7 结束语

本文首先介绍了天然气分布式能源的定义,并结合某天然气冷电联供数据中心项目,计算分析了联供系统的一次能源利用效率、节能率、供电效率、供电煤耗、投资成本回收期等,并与分供系统做了对比。计算结果表明:

(1) 联供系统一次能源利用效率为90.8%,分供系统则为64.9%,节能率为28.5%,联供系统一次能源利用率高,节能效果明显。

(2) 联供系统供电效率为51.8%,超过2018年发电厂平均供电效率39.9%;供电煤耗237克标煤/kWh,低于2018年发电厂平均供电煤耗308克标煤/kWh,联供系统的供电效率和供电煤耗均优于发电厂。

(3) 根据回收期灵敏度分析,在浙江省当前的供电价格下,电价为0.665 6元/kWh,天然气价格超过3.3元/Nm<sup>3</sup>以上,从经济性角度而言建设联供系统不太适宜。数据中心建造天然气分布式冷电联供系统需要充分考虑当地的气价和电价。

综上所述,分布式能源与传统的分供系统相比节能率高、环境污染少,是实现节能减排目标的重要途径之一,也是电力工业的发展方向之一。

## 参考文献:

- [1] 袁永莉,周翔,赵浩亮,等.上海市某热电厂三联供系统运行效益研究[J].制冷学报,2015,36(3):48-55.  
YUAN Yongli, ZHOU Xiang, ZHAO Haoliang, et al. Environmental and economic benefits evaluation for the CCHP system of a thermal power plant in Shanghai [J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(3):48-55.
- [2] 李旭.内燃机与直燃机联合的冷热电三联供系统优化设计研究[D].天津:天津大学,2012.  
LI Xu. Research of the optimized design of an inner combustion engine and direct combustion engine cooling, heating and power cogeneration system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [3] 黄保民,朱建章.北京南站冷热电三联供系统探讨[J].暖通空调,2010,40(5):15-19.  
HUANG baoming, ZHU Jianzhang. Discussion of CCHP system in Beijing South Railway Station [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2010, 40(5):15-19.
- [4] FANG F, QING H W, YANG S. A novel optimal operational strategy for the CCHP system based on two operating modes [J]. IEEE Transaction on Power System, 2011, 27(2):1 032-1 041.
- [5] 沈欣炜,郭庆来,许银亮,等.考虑多能负荷不确定性的区域综合能源系统鲁棒规划[J].电力系统自动化,2019(7):34-41.  
SHEN Xinwei, GUO Qinglai, XU Yinliang, et al. Robust planning method for regional integrated energy system considering multi-energy load uncertainties [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019(7):34-41.
- [6] WANG J, JING Y Y, ZHANG C F. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm. Applied Energy, 2010(87):1 325-1 335.

(下转第82页)