

# 冷热电三联供系统运行策略研究

刘娇娇

上海电气分布式能源科技有限公司 上海 201100

**摘要:** 本文建立了冷热电三联供系统内关键设备的模型, 考虑了系统中电负荷和蒸汽符合的特性, 关键设备参数、能源价格等关键性影响因素, 以运行费用最小为优化目标, 在内部优化调度模型下, 应用了先行规划算法进行求解。对上海电气某冷热电三联供示范系统进行仿真分析, 获得了冬季典型工作日、冬季典型休息日最优运行策略。

**关键词:** 冷热电三联供; 运行策略; 线性规划

## Study on operation strategy of cold, heat and electricity triple supply system

Jiaojiao Liu

Shanghai Electric Distributed Energy Technology Co., Ltd, Shanghai, 201100

**Abstract:** In this paper, the model of the key equipment in the cold, heat, and electricity triple supply system is established, considering the characteristics of electrical load and steam in the system, key equipment parameters, energy prices, and other key influencing factors, with the minimum operation cost as the optimization goal. Under the internal optimal scheduling model, it applies the advanced planning algorithm to solve. In this paper, a demonstration system of triple power supply of Shanghai Electric was simulated and analyzed, and the optimization operation strategy of typical working days and typical rest days in winter was obtained.

**Keywords:** CCHP; Operation strategy; Linear programming

### 引言:

随着电力需求的不断增长以及全球范围内能源紧缺, 冷热电三联供供能系统符合时代发展要求的供热供电替代方案, 成为节能减排、保护环境的新能源。本论文对冷热电三联供供能系统的关键技术研究, 依托上海电气某示范工程, 建立一套以天然气为燃料的内燃发电机组+余热锅炉分布式能源系统, 为生产、生活提供电力、蒸汽, 并通过厂房内现有的蒸汽溴化锂机组制冷, 实现“冷热电三联供”。

### 1 系统组成

供能系统组成为: 冷热电三联供: 系统包括2台1500kW燃气内燃机发电机组、2台蒸汽流量为0.9t/h余热锅炉、3台蒸汽量为4t/h燃气锅炉、3台蒸汽型溴化锂制冷机组; 光伏发电系统: 系统包含800kW光伏电池及相应的光伏DC/AC逆变器, 并配备相应的电网接入装置; 储能电池系统: 系统由钛酸锂电池及相应的PCS系统组

成; 能量管理系统: 基于功率预测技术、实时优化技术、运行控制技术实现系统的优化运行与协调控制; 电能利用: 充电桩, 系统中配置充电站, 由光伏电池和储能电池系统优先给充电桩供电, 满足电动车充电需求。

### 2 典型日负荷特性

目前上海电气某示范工程能源负荷主要有三类: 为生产工艺加热所需的蒸汽热负荷、为生产机械设备运行以及生活所需的电力负荷、为少量热水负荷。负荷数据采用上海电气某示范工程冬季典型工作日、典型休息日电、蒸汽负荷特性数据。

### 3 关键设备特性模型

#### 3.1 内燃机

作为分布式能源系统中重要动力设备, 燃气内燃机在联供系统中的主要性能参数也有发电出力、相应的燃料量以及可回收热量。本项目中安装2台1500kW燃气内燃机, 特性函数如下:

$$\begin{cases} P_{ic} = a_{ic}E + b_{ic}\delta \\ Q_{ic} = c_{ic}E + d_{ic}\delta \\ W_{ic} = e_{ic}E + f_{ic}\delta \\ H_{ic} = g_{ic}E + h_{ic}\delta \end{cases} \quad P_{\min}\delta < P_{ic} < P_{\max}\delta \quad \delta \in (0,1)$$

式中:

$P_{ic}$ —燃气内燃机发电出力 (kW);  
 $E$ —进入燃气内燃机的燃料热值 (kW);  
 $Q_{ic}$ —燃气内燃机排出烟气的可利用热值 (kW);  
 $W_{ic}$ —缸套冷却水的可利用热值 (kW);  
 $H_{ic}$ —中冷水的可利用热值 (kW);  
 $P_{\min}$ 、 $P_{\max}$ —内燃机的最小、最大发电出力 (kW);  
 $\delta$ —内燃机的状态参数, 内燃机运行时为 1, 停机时为 0;

$a_{ic}, b_{ic}, c_{ic}, d_{ic}, e_{ic}, f_{ic}, g_{ic}, h_{ic}$ —为系数常数。

1500kW 内燃机拟合特性参数如下:  $a_{ic}=0.455$ ,  $b_{ic}=-113.123$ ,  $c_{ic}=0.1472$ ,  $d_{ic}=95.59$ ,  $e_{ic}=0.07185$ ,  $f_{ic}=193.74$ ,  $g_{ic}=0.195$ ,  $h_{ic}=-197.62$ 。

### 3.2 余热锅炉

余热锅炉额定蒸发量 0.9t/h, 2 台, 产生 1MPa 饱和蒸汽。

特性函数:  $Q_{hrsg} = \eta Q_{ic}$

式中:

$Q_{hrsg}$ —余热锅炉供热量 (kW);  
 $\eta$ —余热锅炉效率。

### 3.3 燃气锅炉

燃气锅炉额定蒸发量 4t/h, 3 台, 2 台运行 1 台备用, 产生 1MPa 饱和蒸汽。额定效率 0.92。

$$\text{特性函数: } \begin{cases} Q_h = \eta Q_{bh} \\ \eta = \eta_{br}(0.0951 + 1.525\beta_b - 0.6249\beta_b^2) \\ Q_{h\_min}\delta < Q_h < Q_{h\_max}\delta \end{cases}$$

式中:

$Q_h$ —燃气锅炉供热量 (kW);  
 $Q_{bh}$ —输入燃料热量 (kW);  
 $\eta$ ,  $\eta_{br}$ —燃气锅炉效率, 额定效率;  
 $\beta_b$ —燃气锅炉负荷率;  
 $\delta$ —锅炉运行状态参数,  $\delta \in (0,1)$ 。

拟合后的燃气锅炉函数<sup>[1]</sup>如下所示:

$$\begin{cases} Q_h = 1.0825Q_{bh} - 539.76\delta \\ Q_{h\_min}\delta \leq Q_h \leq Q_{h\_max}\delta \\ \delta \in (0,1) \end{cases}$$

### 3.4 光伏电池

光伏电池容量为 800kW, 为便于工程应用, 光伏组

件的稳态功率输出可采用如下所述简化模型。光伏电池的功率输出模型如下所示。

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \frac{\overline{G}_T}{\overline{G}_{T,STC}} [1 + \alpha_P (T_c - T_{c,STC})]$$

式中:

$P_{PV}$ 为光伏电池的有功功率, 单位为 kW。  
 $Y_{PV}$ 为光伏阵列的额定容量, 是光伏电池在标准测试条件下的输出功率, 单位为 kW。  
 $f_{PV}$ 为光伏降额因子, 通常取 0.8。  
 $\overline{G}_T$ 为实际环境下, 当前时间步长的太阳辐照强度, 单位为  $\text{kW/m}^2$ 。

$\overline{G}_{T,STC}$ 为标准测试条件下的太阳辐照强度, 单位为  $\text{kW/m}^2$ , 通常取 1。

$\alpha_P$ 是光伏电池板的功率温度系数, 单位为  $\%/^\circ\text{C}$ , 通常取 0.0047。

$T_c$ 为当前时间步长的光伏电池温度, 单位为  $^\circ\text{C}$ 。

$T_{c,STC}$ 为标准测试条件下的光伏电池温度, 单位为  $^\circ\text{C}$ , 通常取 25。<sup>[2]</sup>

拟合后的光伏电池函数如下所示:

$$P_{pv} = 800 \text{kW} * \overline{G}_T / 1000 * [1 + 0.0047 * (-25)]$$

## 4 运行策略

通过对系统运行策略的优化可以合理安排内燃机、燃气锅炉等主要设备启、停, 运行出力, 光伏出力, 以及购电、售电量。提高系统运行的经济效益, 帮助企业降低燃料成本, 扩大利润。运行优化的目标: 使每一时段分布式供能系统运行燃料费用 (包括天然气、网购电、售电、余热锅炉、燃气锅炉给水费用) 最低。

$$\min e_{\text{exp en}} = (\sum_{i=1}^N (\delta_i G_i) + N_{\text{gas}}) P_{\text{gas}} + N_{\text{elec}} P_e + D_w P_w \quad (\text{内} \\ \text{燃机燃料费, 燃气锅炉燃料费, 网购电 (售电为负) 费} \\ \text{用, 水费})$$

式中:

$G_i$ —第  $i$  台内燃机消耗天然气量 ( $\text{m}^3$ );  
 $\delta_i$ —内燃机启停状态;  
 $N_{\text{gas}}$ —燃气锅炉消耗天然气量 ( $\text{m}^3$ );  
 $P_{\text{gas}}$ —天然气价格 ( $\text{m}^3/\text{元}$ );  
 $N_{\text{elec}}$ —购、售电量, 售电为负 (kWh);  
 $P_{\text{elec}}$ —购、售电价格 ( $\text{m}^3/\text{kWh}$ );  
 $D_w$ —消耗水量 (t);  
 $P_w$ —水价格 (元/t)。

约束包括: 满足每一时段系统电、蒸汽、热水负荷需求, 内燃机最小出力限制。

$$\sum_{i=1}^N Pg_i + Pe + Pv \geq L_{elec}$$
 (内燃机发电, 网购电、(售电为负), 光伏发电)

$$\sum_{i=1}^N Qg_i + Qb1 + Qb2 + q \geq L_{steam} h_{steam}$$
 (余热锅炉提供热量, 燃气锅炉提供热量, 给水预热提供热量, 满足蒸汽热量)

$$\sum_{i=1}^N (Wg_i + Hg_i) - q \geq L_{water}$$
 (缸套水、中冷水提供热量, 给水预热提供热量, 满足热水热量)

$$\begin{cases} \delta_i \cdot Pg_{i\_min} \leq Pg_i \leq \delta_i \cdot Pg_{i\_max} \\ \delta_i \in (0,1) \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,N)$$
 (内燃机出力约束)

$$\begin{cases} \delta_i \cdot Qb_{i\_min} \leq Qb_i \leq \delta_i \cdot Qb_{i\_max} \\ \delta_i \in (0,1) \end{cases} \quad (i=1,2)$$
 (燃气锅炉出力约束)

式中:

$Pg_i$ —第*i*台内燃机发电量 (kWh);

$Pe$ —购、售电量, 售电为负 (kWh);

$Pv$ —光伏发电量 (kWh);

$L_{elec}$ —电负荷 (kWh);

$Qg_i$ —第*i*台余热锅炉提供蒸汽热量 (kWh);

$Qb1, Qb2$ —1号, 2号燃气锅炉提供蒸汽热量 (kWh);

$q$ —锅炉给水预热热量 (kWh);

$L_{steam}$ —蒸汽负荷 (t);

$h_{steam}$ —蒸汽焓 (kJ/kg);

$Wg_i$ —第*i*台内燃机缸套水热量 (kWh);

$Hg_i$ —第*i*台内燃机中冷水热量 (kWh);

$L_{water}$ —热水负荷 (kWh);

$Pg_{i\_min}, Pg_{i\_max}$ —第*i*台内燃机出力上下限 (kWh);

$Qb_{i\_min}, Qb_{i\_max}$ —第*i*台燃气锅炉出力上下限 (kWh)。

运行策略流程如下:

(1) 输入如下参数: 24小时环境温度/℃、24小时实际太阳辐射强度/kW、24小时电负荷/kWh、24小时蒸汽负荷/t、24小时热水负荷/kWh、24小时购电价格/元/kWh、24小时售电价格/元/kWh、燃气热值/kJ/m<sup>3</sup>、燃气价格/元/m<sup>3</sup>、水价/元/t;

(2) 计算光伏出力;

(3) 计算第*i*时段(从第一时段开始)运行策略, 调用函数, 记录最优值;

(4) 返回第(3)步计算第*i*+1时段的最优值, 直到第24时段停止, 到第(5)步;

(5) 输出24时段运行策略及运行费用, 输出如下参数:

每一时段电力负荷: 1#内燃机发电量/kWh、2#内燃机发电量/kWh、购电/售电/kWh、光伏/kWh

每一时段蒸汽负荷: 1#余热锅炉产汽量/t、2#余热锅炉产汽量/t、1#燃气锅炉产汽量/t、2#燃气锅炉产汽量/t

每一时段蒸汽负荷: 1#内燃机缸套水+中冷水热量/kWh、2#内燃机缸套水+中冷水热量/kWh、给水预热消耗量/kWh

24时段运行燃料费用/元/天。(购电为正, 售电为负)

## 5 结果与讨论

### 5.1 冬季典型工作日算例仿真

冬季典型工作日费用: 18.548万元/天。

冬季典型工作日运行策略如图1-3所示:

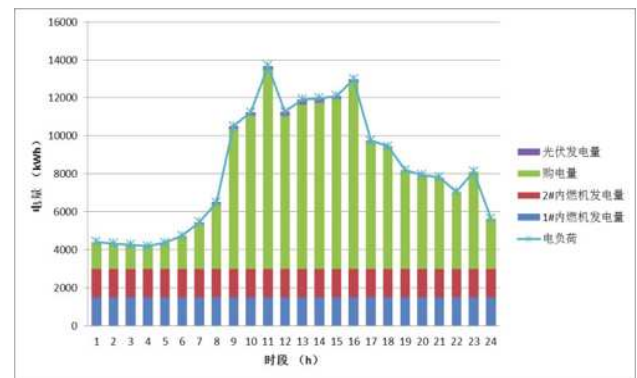


图1 冬季典型工作日电负荷供应图

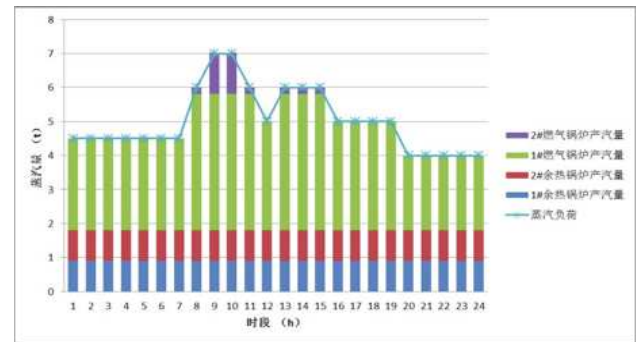


图2 冬季典型工作日蒸汽负荷供应图

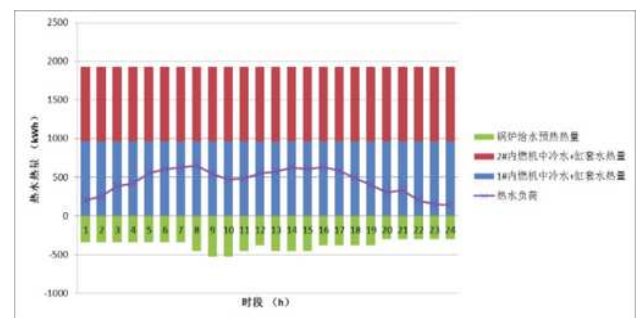


图3 冬季典型工作日热水负荷供应图

(1) 冬季典型工作日，两台内燃机满负荷工作，光伏发电根据环境变化出力发生变化，电量不足通过网购电满足。

(2) 两台余热锅炉满负荷出力，蒸汽不足部分通过燃气锅炉补充，在最高负荷处两台燃气锅炉运行。

(3) 缸套水和中冷水提供热量一部分预热锅炉给水，一部分满足热水需求。但是还有多余一部分热量，这部分热量可以供给其他热用户（如浴室、游泳馆等）。

### 5.2 冬季典型休息日算例仿真

冬季典型休息日费用：6.018万元/天。

冬季典型休息日运行策略如图4-5所示：

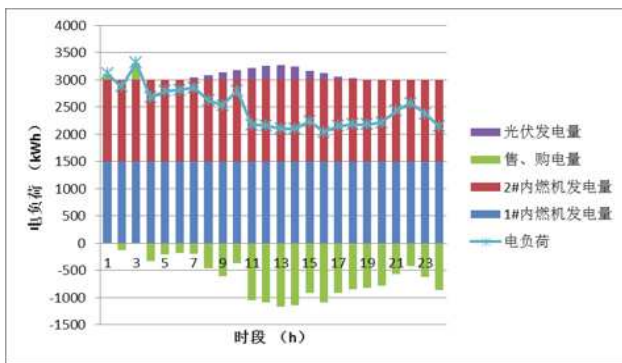


图4 冬季典型休息日电负荷供应图

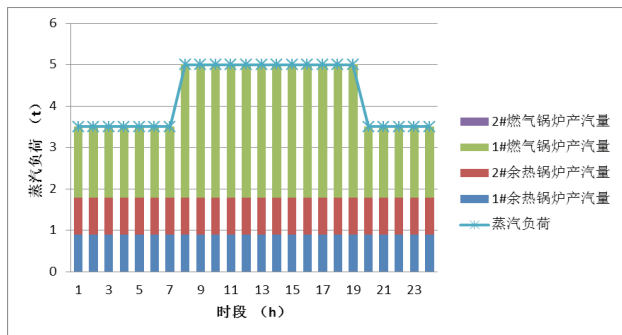


图5 冬季典型休息日蒸汽负荷供应图

(1) 冬季典型休息日，两台内燃机满负荷工作，光伏发电根据环境变化出力发生变化，由于电力负荷较低，在大部分时段向电网售电。

(2) 两台余热锅炉满负荷出力，蒸汽不足部分通过1台燃气锅炉补充。

(3) 缸套水和中冷水提供热量一部分预热锅炉给水，一部分满足热水需求。但是还有多余一部分热量，这部分热量可以供给其他热用户（如浴室、游泳馆等）。

### 6 结束语

本文综合考虑运营成本，采用线性规划的方法，给出了系统的优化运行方案，提高了含可再生能源的冷热电三联供分布式供能系统的安全性及可靠性，弥补了大电网在安全稳定性方面的不足，在电网崩溃和自然灾害等情况下，将仍可维持重要负荷的运转。

### 参考文献：

[1]刘伟，古云蛟.基于线性规划算法的燃气内燃机三联供系统运行策略优化[J].上海电气技术,2016,9(1):9-13.  
[2]刘娇娇.微电网能量管理系统优化调度研究[D].上海:上海电机学院,2015.