

Comprehensive Optimal Dispatch of Combined Heat and Power System

Yulin Liu¹, Yangyang Song²

¹Production Operation Management Center of Sinopec Shengli Oilfield Bureau, Dongying Shandong

²China University of Petroleum, Qingdao Shandong

Email: liuyulin115.slyt@sinopec.com, 604765963@qq.com

Received: Nov. 6th, 2018; accepted: Nov. 17th, 2018; published: Nov. 29th, 2018

Abstract

The optimal scheduling of multi-energy systems with natural gas, geothermal and other clean energy sources can effectively improve energy efficiency and reduce environmental pollution. Based on the analysis of the distributed energy supply characteristic and comprehensive consideration of economy, environmental protection and safety, a multi-energy system dispatch mathematical model is established to maximize the comprehensive benefit with the constraint such as the balance of power and heat, the limit of distributed generation and the tie-line power. The three scheduling strategies are guided by electricity price, gas price and coordinated price. The result shows that the integrated optimization dispatch model is superior to the single-objective optimal dispatch model, and the scheme takes into consideration various indexes and achieves the overall optimal effect. The dispatch strategy guided by electricity price and cooperative price is better than that of gas price.

Keywords

Distributed Energy, Optimization Dispatch, Combined Heat and Power, Comprehensive Benefit

热电联供系统综合优化调度

刘玉林¹, 宋阳阳²

¹中国石化胜利油田局生产运行管理中心, 山东 东营

²中国石油大学(华东), 山东 青岛

Email: liuyulin115.slyt@sinopec.com, 604765963@qq.com

收稿日期: 2018年11月6日; 录用日期: 2018年11月17日; 发布日期: 2018年11月29日

摘要

以天然气、地热等清洁能源为燃料的热电联供系统优化调度能够有效提高能源利用率、减少环境污染。

文章引用: 刘玉林, 宋阳阳. 热电联供系统综合优化调度[J]. 智能电网, 2018, 8(6): 532-537.

DOI: 10.12677/sg.2018.86058

在分析各分布式能源出力特性的基础上, 计及电/热功率平衡约束、分布式能源设备出力约束、联络线功率约束, 综合考虑经济性、环保性、节能性, 以综合效益最大化为目标建立热电联供系统综合优化调度数学模型, 计及离并网模式, 分别以电价、燃气价格、协同价格为引导研究调度策略。通过算例分析表明, 综合优化调度模型兼顾了多方面指标, 达到了总体优化的效果, 以电价和协同价格为引导的调度策略优于燃气价格为引导的调度策略。

关键词

分布式能源, 优化调度, 热电联供, 综合效益

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着石油、煤炭等一次能源的大量消耗, 各种新能源和清洁能源的应用日益广泛[1] [2] [3]。为提高能源利用效率, CHP 系统得到广泛应用和发展, 它是一种将制热和发电一体化的多联供系统, 同时提供热、电三种能量, 在提高能源利用效率的同时, 文献[4] [5]综合考虑经济、环保、节能, 基于热电比可调, 构建了区域综合能源系统双层优化模型。文献[6]综合考虑一次能源利用率、碳排放以及运行成本, 提出了一种冷/热/电联供系统的三级协同优化方法, 建立了三级协同优化模型。文献[7]以经济性和环保性为目标, 针对采暖期和空调期建立综合能源系统调度模型。文献[8] [9]将太阳能发电与冷热单联产系统相结合, 实现了能源的综合利用, 提高能源利用率。文献[10]建立了含运行成本、环境价值成本、冷热电协调成本的多目标节能调度模型。文献[11] [12]建立了能源系统一体化经济调度模型, 并利用基于粒子维度熵的改进混沌粒子群算法进行求解。以上文献仅考虑了综合效益, 未采用不同调度策略。

本文综合考虑经济性、环保性、节能性, 以综合效益最大化建立热电联供系统综合优化调度模型和调度策略, 通过算例分析, 结果表明, 综合性多目标优化调度模型兼顾运行过程中的经济性、环保性、节能性, 所得方案优于单目标优化调度模型。

2. 热电联供系统综合优化调度数学模型

2.1. 分布式能源的出力数学模型

热电联供系统由 1 个分布式能源站与 N 个居民区负荷组成, 分布式能源站由 1 台 CHP 系统(1 台燃气发电机组 + 1 台余热锅炉), 3 台燃气锅炉, 2 台地源热泵组成。

2.1.1. CHP 系统数学模型

CHP 系统包括微型燃气轮机和余热锅炉, 微型燃气轮机利用天然气发电, 余热锅炉利用微型燃气轮机发电后排气的余热, 提供制热量。CHP 系统的数学模式如式(1)~(3)。

$$Q_{MT}(t) = P_{MT}(t)(1 - \eta_{CHP} - \eta_h) / \eta_{CHP} \quad (1)$$

$$Q_{CHP.hot}(t) = Q_{MT}(t) \times \eta_{rec} \times COP_{CHP.hot} \quad (2)$$

$$\eta_{rec} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0} \quad (3)$$

式中, $Q_{MT}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机排气余热量, kW; $P_{MT}(t)$ 为 t 时刻 CHP 发出的电功率, kW; η_{CHP} 为燃气轮机发电效率, kW; η_1 为燃气轮机散热损失系数, 本模型中取 0.03; $Q_{CHP.hot}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机烟气余热提供的制热量, kW; $COP_{CHP.hot}$ 为制热系数, 本模型中分别取 1.2; η_{rec} 为余热回收效率; T_0 为环境温度; T_1, T_2 分别为余热烟气进出溴冷机的温度, K, 本模型中取 573.15 K 和 423.15 K。

2.1.2. 燃气锅炉数学模型

燃气锅炉指的是燃料为燃气的锅炉, 燃气锅炉和燃油锅炉、电锅炉比较起来最经济, 燃气锅炉数学模型如式(4)。

$$Q_{GB}(t) = P_{GB}(t) \times \eta_{GB} \quad (4)$$

式中: $Q_{GB}(t)$ 为 t 时刻燃气锅炉的产热量, kW; $P_{GB}(t)$ 为 t 时刻输入燃气锅炉的天然气功率, kW; η_{GB} 为燃气锅炉转换成热的效率。

2.1.3. 地源热泵数学模型

地源热泵是陆地浅层能源通过输入少量的高品位能源(如电能)实现由低品位热能向高品位热能转移。地源热泵技术属可再生能源利用技术。地源热泵属经济有效的节能技术。其地源热泵的 COP 值达到了 4 以上, 也就是说消耗 1 kWh 的能量, 用户可得到 4 kWh 以上的热量或冷量。地源热泵数学模型如式(5)。

$$Q_{HP.hot}(t) = COP_{HP.hot} \times P_{HP}(t) \quad (5)$$

式中: $Q_{HP.hot}(t)$ 为 t 时刻地源热泵的产热功率, kW; $P_{HP}(t)$ 为 t 时刻地源热泵消耗的电功率, kW; $COP_{HP.hot}$ 为地源热泵的制热系数, 取 4.4。

2.2. 热电联供系统综合优化调度模型的建立

综合考虑热电联供系统的运营收益、运行过程中直接或间接造成的环境代价、能源消耗量, 以综合效益最高建立目标函数如式(6)~(10), 综合考虑热/电功率平衡约束、设备出力约束、联络线功率约束, 建立多能源综合优化调度模型, 如式(11)~(15)。

$$\min F = -\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \alpha_3 F_3 \quad (6)$$

$$F_1 = \sum_{t=1}^{24} [C_1(t) - C_2(t)] = \sum_{t=1}^{24} \left\{ [C_e(t) \times L_e(t) + C_h \times L_h(t)] - \left[\frac{P_{gas}}{LHV_{ng}} \times C_n + P_{grid}(t) \times C_{grid} \right] \right\} \quad (7)$$

$$F_2 = \sum_{t=1}^{24} C_3(t) = \sum_{t=1}^{24} [P_{CHP}(t) \times \sum \lambda_{CHP,i} + Q_{GB}(t) \times \sum \lambda_{GB,i} + Q_{HP}(t) \times \sum \lambda_{HP,i} + P_{grid} \times \sum \lambda_{grid,i}] \quad (8)$$

$$F_3 = \sum_{t=1}^{24} C_4(t) = \sum_{t=1}^{24} P_{gas}(t) + P_{grid}(t) \quad (9)$$

其中:

$$P_{gas}(t) = \frac{P_{MT}(t)}{\eta_{CHP}} + P_{GB}(t) \quad (10)$$

s.t.

$$Q_{CHP.hot}(t) + Q_{GB}(t) + Q_{HP.hot}(t) = L_h(t) \quad (11)$$

$$P_{MT}(t) + P_{grid}(t) \geq P_{HP}(t) \quad (12)$$

$$0 \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid,max} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{CHP}(t) \leq P_{CHP.max} \quad (14)$$

$$0 \leq Q_i(t) \leq Q_{i.max} \quad (15)$$

式中, F_1, F_2, F_3 分别为经济性指标、环保性指标、节能性指标; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为各子目标所占比重; $C_1(t), C_2(t), C_3(t), C_4(t)$ 分别为售电和售热收益、购能成本、环境价值成本、能源站自身消耗电能; $C_e(t), C_h(t)$ 为售电价格、售热价格; $L_e(t), L_h(t)$ 为电负荷、热负荷, kW; V 为消耗的天然气功率, kW; LHV_{ng} 为天然气低热值, 取 9.7 kW/m^3 ; C_n 为天然气价格, 元/ m^3 ; $P_{grid}(t)$ 为 t 时刻从大电网购买电量, 当离网运行时为 0 kW ; C_{grid} 为大电网电价; $\lambda_{CHP,i}, \lambda_{GB,i}, \lambda_{HP,i}, \lambda_{grid,i}$ 分别为 CHP、燃气锅炉、地源热泵、大电网生产 1 kWh 能量排放污染物 i 的环境价值, 元/kWh; i 表示污染物种类, 包括 $\text{CO}_2, \text{NO}_x, \text{SO}_2, \text{CO}$ 。

3. 热电联供系统综合优化调度策略

为充分利用可再生能源, 提高分布式能源站产能的经济性、环保性、节能性, 计及离并网模式, 以不同价格为引导制定以下三种调度策略。

3.1. 电价引导(策略 1)

1) 当分布式能源站离网运行时: 电价高峰时段 CHP 按其出力上限发电, 满足能源站自身用电和部分电负荷; 电价低谷时段 CHP 发电量只用来满足自身用电; 电价平时段 CHP 参与调度;

2) 当分布式能源站并网运行时: 电价高峰时段 CHP 按其出力上限发电, 满足能源站自身用电和部分电负荷; 电价低谷时段通过 CHP 发电和大电网买电只满足能源站自身用电; 电价平时段 CHP 参与调度。

3.2. 燃气价格引导(策略 2)

1) 当分布式能源站离网运行时: 燃气价格高峰时段 CHP 发电量只用来满足能源站自身用电; 燃气价格低谷时段 CHP 按其出力上限发电; 燃气价格平时段 CHP 参与调度;

2) 当分布式能源站并网运行时: 燃气价格高峰时段 CHP 按其出力下限发电, 通过大电网买电来满足能源站自身用电; 燃气价格低谷时段 CHP 按其出力上限发电; 燃气价格平时段 CHP 参与调度。

3.3. 电价与燃气价格协同引导(策略 3)

1) 当分布式能源站离网运行时: 电价高峰且燃气价格非高峰时段 CHP 按其出力上限发电, 满足能源站自身用电和部分电负荷; 电价低谷且燃气价格非低谷时段 CHP 发电量只用来满足自身用电; 电价平时段 CHP 参与调度;

2) 当分布式能源站并网运行时: 电价高峰且燃气价格非高峰时段 CHP 按其出力上限发电, 满足能源站自身用电和部分电负荷; 电价低谷且燃气价格非低谷时段通过 CHP 发电和大电网买电只满足能源站自身用电; 电价平时段 CHP 参与调度。

4. 算例分析

某分布式能源站为附近 N 个居民区供热供电, 居民区的热负荷曲线及电负荷曲线见图 1, 能源站由 1 台 CHP 系统(1 台燃气发电机组 + 1 台余热锅炉), 3 台燃气锅炉, 2 台地源热泵组成, 能源站可以满足小区热需求和部分电需求, 不足部分由市电供给。各分布式能源设备参数见表 1, 燃气、供电、供热的分时价格见图 2, 各设备污染物排放系数及污染物环境价值见表 2。

Table 1. Parameters of distributed energy resource
表 1. 分布式能源设备参数

设备	额定容量/kW	效率	制热系数	额定容量/kW
微燃机	100	35%	-	100
余热锅炉	120	60%	-	120
燃气锅炉	100	90%	-	100
地源热泵	100	-	4.4	100

Table 2. Equipment pollutant emission factor and environmental value
表 2. 设备污染物排放系数及污染物环境价值

污染物	环境价值元/kg	CHP 排放系数 kg/MWh	火电排放系数 kg/MWh	燃气锅炉排放系数 kg/MWh	地源热泵排放系数 kg/MWh
NO _x	8	0.2	6.46	0.148	-
SO ₂	6	0.0036	9.93	0.0011	-
CO ₂	0.023	724	1070	-	-
CO	1	0.094	1.55	0.037	-

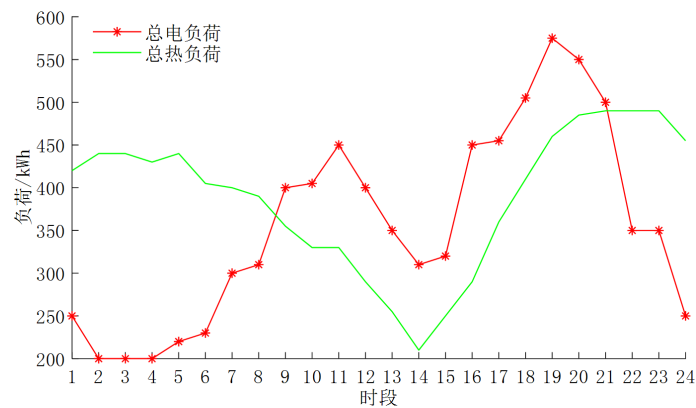


Figure 1. Daily heating and electrical load
图 1. 用户总电/热需求

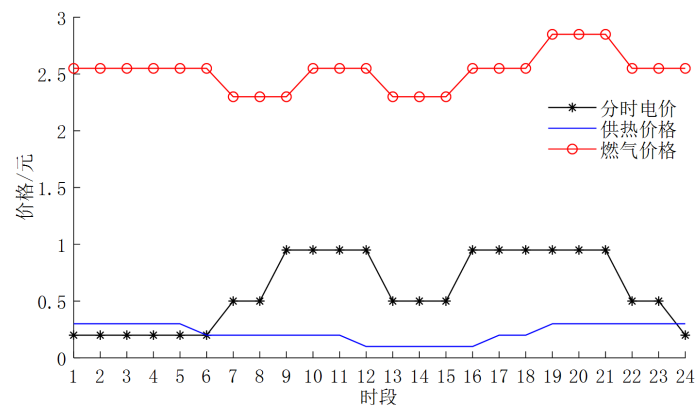


Figure 2. Time-of-use energy price
图 2. 供能分时价格

分别以电价、燃气价格、协同价格(电价 + 燃气价格)引导, 制定调度策略 1、策略 2、策略 3。采用不同调度策略求解热电联供系统综合优化调度模型, 得出不同调度方案, 各方案的指标对比如表 3 所示。

Table 3. The comparisons between the optimal projects of different scheduling strategy
表 3. 不同调度策略下优化方案对比

策略		运营收益/元	环境代价/元	能源消耗/kW
策略 1	离网	693.9456	35.5033	7957.7
	并网	692.6941	46.2101	7549.3
策略 2	离网	603.4726	37.0755	8282.2
	并网	440.0763	81.8499	7968.3
策略 3	离网	693.0969	35.5856	7965.9
	并网	692.5507	46.2666	7553.3

由表 3 可以看出, 采用调度策略 2 得出优化方案的经济性、环保性、节能性整体劣于策略 1 和策略 3, 策略 1 与策略 3 所得方案的各指标相近, 综上所述, 采用以电价为引导或以电价和燃气价格协同引导的调度策略, 所得方案更加经济、环保、节能。

5. 结论

以综合效益最高为目标函数, 建立计及离并网状态的热电联供系统综合优化调度模型, 得到的综合优化方案权衡了运行过程中的经济性、环保性、节能性, 达到了整体优化的效果。

以电价或协同价格引导的调度策略均优于以燃气价格为引导的调度策略, 配合综合优化模型所得方案更加经济、环保、节能。

参考文献

- [1] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源 - 网 - 荷 - 储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(01): 114-124.
- [2] Jin, H., Hong, H., Wang, B., et al. (2005) A New Principle of Synthetic Cascade Utilization of Chemical Energy and Physical Energy. *Science in China Series E: Technological Sciences*, **48**, 163-179.
- [3] 徐建中. 分布式供电和冷热电联产的前景[J]. 节能与环保, 2002, 10(3): 10-14.
- [4] 吴利辉, 杨洪海, 吴植华. 三联供系统配置及运行策略的多目标优化分析[J]. 建筑热能通风调, 2012, 31(1): 16-18.
- [5] 施锦月, 许健, 曾博, 等. 基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2959-2966.
- [6] 赵峰, 张承慧, 孙波, 等. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3785-3793.
- [7] 于波, 吴亮, 卢欣, 等. 区域综合能源系统优化调度方法[J]. 电力建设, 2016, 37(1): 70-76.
- [8] 刘星月, 吴红斌. 太阳能综合利用的冷热电联供系统控制策略和运行优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 1-6.
- [9] 段绍辉, 汪伟, 刘中胜, 等. 含光伏的冷热电联供微网系统优化调度方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 150-155.
- [10] 周任军, 冉晓洪, 毛发龙, 等. 分布式冷热电三联供系统节能协调优化调度[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 8-14.
- [11] 刘洪, 陈星屹, 李吉峰, 等. 基于改进 CPSO 算法的区域电热综合能源系统经济调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 193-200.
- [12] 王艳松, 宋阳阳, 吴昊, 等. 基于禁忌搜索算法的微电网源/荷安全经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 21-27.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8763，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：sg@hanspub.org