

冷热电联供系统能量流函数及运行策略

周任军, 康信文, 李绍金, 陈瑞先, 唐浩, 周胜瑜

(长沙理工大学 智能电网运行与控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 详细分析系统能量流特性, 提出刻画冷热电联供(CCHP)系统在“以热定电”和“以电定热”2种运行策略下的能量流函数。为提升 CCHP 系统的经济环保效益, 建立其经济环保调度优化模型, 目标函数包含燃料成本、购电成本及考虑污染气体排放需缴纳惩罚费用的环境成本, 能量流函数作为能量平衡等式约束。算例仿真结果表明, 所提能量流函数及模型可实现 CCHP 系统的优化调度, 从而降低生产成本, 改善环境效益, 提高能源利用水平。

关键词: 冷热电联供; 运行策略; 能量流函数; 以热定电; 以电定热; 优化; 模型

中图分类号: TM 611.3

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.01.001

0 引言

冷热电联供 CCHP(Combined Cooling, Heating and Power)系统可同时为用户提供冷能、热能及电能等多种形式的能量, 具有优越的能源梯级利用性、污染气体排放少的环保性等特点而得到广泛的关注^[1-3]。冷热电联供系统的运行策略决定了系统的经济和环保性^[4], “以热定电”的运行策略优先满足热负荷需求, 不足的电力由大网补充, 富余电力也可直接上网, 适用于联网运行; “以电定热”运行策略优先满足电负荷需求, 不足的热能由辅助锅炉提供, 该策略更适用于孤岛运行^[5-8]。

为充分发挥冷热电联供系统能源梯级利用的优势, 高效利用可再生能源, 文献[9]在以燃气内燃机为驱动的传统冷热电系统的基础上, 集成光伏的新型系统, 通过太阳能集热及光伏发电与冷热电系统供能的协调优化, 其能源和环境效益均得以改善。文献[10]在冷热电联供系统的基础上, 考虑生物质能发电、燃料电池、蓄电和蓄热等存储设备, 虽然系统的运行成本有所增加, 但供电可靠性、生物质能使用率均得以提升。针对系统的不同运行策略, 优化模型以一次能源利用率、运行成本和二氧化碳排放量为目标^[11-13], 冷、热、电的年负荷量为等式约束, 这些文献考虑的均是时间段累积的热、电平衡, 未能准确反映电能的实时平衡特性, 对冷热电联供系统的 2 种运行策略缺乏准确的实时热电能流函数刻画。

因此, 考虑随机的风电等新能源的接入^[14], 针对冷热电联供系统“以热定电”和“以电定热”运行策略的能量流特点, 刻画相应的实时冷、热、电能量流函

数, 并建立基于系统燃料成本、购电成本和环境成本的经济环保调度优化模型, 研究不同运行策略下系统经济环保优化调度。

1 冷热电联供系统及其能量流

冷热电联供系统由燃气轮机、辅助锅炉、余热锅炉、风电机组和吸收式制冷机等构成, 系统能量流如图 1 所示。图中 $F_{fuel}(m^3)$ 、 $f_{pgu}(m^3)$ 、 $f_b(m^3)$ 分别为联供系统天然气消耗总量、燃气轮机及辅助锅炉天然气消耗量。为了准确反映系统能量流的特性, 以能量流函数来刻画冷、热、电等各能量的平衡。

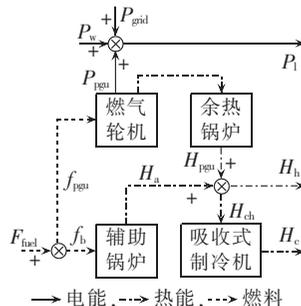


图 1 冷热电联供系统能量流
Fig.1 Energy flow of CCHP system

燃气轮机以天然气为驱动能源; 余热锅炉(热出力为 $H_{pgu}(kW)$); 风电机组发电功率为 $P_w(kW)$, 供给系统的电功率为 $P_{wc}(kW)$; 辅助锅炉为系统提供 $H_a(kW)$ 的热功率补充; 吸收式制冷机以系统热能 $H_{ch}(kW)$ 为驱动功率, 为用户提供 $H_c(kW)$ 的制冷功率。燃气轮机、风电机组和城市电网协调满足电负荷 $P_1(kW)$ 的需求。

燃气轮机能同时提供热电出力, 机组存在热电出力可行域^[15-16], 如图 2 所示。燃气轮机热电出力可行域可用如下线性不等式描述:

$$x_m H_{pgu} + y_m P_{pgu} \geq z_m \quad m = 1, 2, \dots, N_{lin} \quad (1)$$

其中, N_{lin} 为燃气轮机热电出力可行域边界线性约束的数量, x_m, y_m, z_m 为机组相应线性约束参数。燃气轮

收稿日期: 2013-08-28; 修回日期: 2013-11-21
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277016); 湖南省高校创新平台开放基金资助项目(12K074); 湖南省重点学科建设项目
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277016), the Innovation Platform Open Funds for Universities in Hunan Province(12K074) and the Construct Program of the Key Discipline in Hunan Province

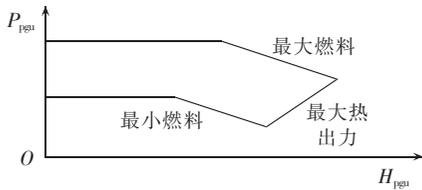


图 2 燃气轮机热电力可行域
Fig.2 Power-heat feasible operating region for PGU unit

机可行域的函数表述形式为 $P_{pgu}(H_{pgu})$ 和 $H_{pgu}(P_{pgu})$, 不同的运行策略, 函数对应不同的自变量。

2 “以热定电”运行策略及其经济环保调度优化模型

2.1 “以热定电”运行策略的能量流函数

“以热定电”运行策略是指联供系统各供热机组协调调度优先满足热负荷能量流的平衡, 因为燃气轮机热、电出力必须运行在其可行域内, 为了实现电功率的实时平衡, 因此存在系统与电网电功率实时交互的情况。当电负荷与系统各发电机组电功率出力之和的差大于 0 时, 电功率由城市电网流入系统, 小于 0 则相反。该策略包括以下 2 种运行情况。

(1) 当热负荷与吸收式制冷机功率之和小于余热锅炉最大出力 ($H_h + H_{ch} < H_{pgu}^{\max}$) 时, 系统热能由余热锅炉提供, 辅助锅炉停运。

$$H_{pgu} = H_h + H_{ch} \quad (2)$$

各机组电出力存在如下情形。

a. 若 $P_l < P_{pgu}^{\max}(H_h + H_{ch})$, 燃气轮机电出力为 P_l , 风电全部上网, 供给联供系统的电功率为:

$$P_{w.c} = 0 \quad (3)$$

b. 若 $P_{pgu}^{\max}(H_h + H_{ch}) \leq P_l < P_{pgu}^{\max}(H_h + H_{ch}) + P_w$, 燃气轮机电出力为 $P_{pgu}^{\max}(H_h + H_{ch})$, 风电供给联供系统的电功率为:

$$P_{w.c} = P_l - P_{pgu}^{\max}(H_h + H_{ch}) \quad (4)$$

c. 若 $P_l \geq P_{pgu}^{\max}(H_h + H_{ch}) + P_w$, 燃气轮机电出力为 $P_{pgu}^{\max}(H_h + H_{ch})$, 风电供给联供系统的电功率为:

$$P_{w.c} = P_w \quad (5)$$

电负荷不足由电网补充:

$$P_{grid} = P_l - [P_{pgu}^{\max}(H_h + H_{ch}) + P_w] \quad (6)$$

(2) 当热负荷与吸收式制冷机功率之和大于或等于余热锅炉最大出力时, 燃气轮机以最大热出力 H_{pgu}^{\max} 运行, 热负荷不足由辅助锅炉提供补充, 本文假设辅助锅炉能够满足最大热负荷需求。

$$H_a = H_h + H_{ch} - H_{pgu}^{\max} \quad (7)$$

各机组电出力存在如下情形。

a. 若 $P_l < P_{pgu}^{\max}(H_{pgu}^{\max})$, 燃气轮机电出力为 P_l , 风电全部上网, 供给联供系统的电功率为:

$$P_{w.c} = 0 \quad (8)$$

b. 若 $P_{pgu}^{\max}(H_{pgu}^{\max}) \leq P_l \leq P_w + P_{pgu}^{\max}(H_{pgu}^{\max})$, 燃气轮机电出力为 $P_{pgu}^{\max}(H_{pgu}^{\max})$, 风电供给联供系统的电功率为:

$$P_{w.c} = P_l - P_{pgu}^{\max}(H_{pgu}^{\max}) \quad (9)$$

c. 若 $P_l > P_w + P_{pgu}^{\max}(H_{pgu}^{\max})$, 燃气轮机的电出力为 $P_{pgu}^{\max}(H_{pgu}^{\max})$, 电负荷不足由电网提供补充:

$$P_{grid} = P_l - [P_{pgu}^{\max}(H_{pgu}^{\max}) + P_w] \quad (10)$$

风电供给联供系统的电功率为:

$$P_{w.c} = P_w \quad (11)$$

2.2 “以热定电”运行策略的经济环保调度优化模型

2.2.1 经济环保目标函数

目标函数由燃料成本 $F_{Fuel.C}$ 、购电成本 $F_{G.C}$ 和环境成本 $F_{E.C}$ 组成。

$$F = \min(F_{Fuel.C} + F_{G.C} + F_{E.C}) \quad (12)$$

a. 燃料成本。

$$F_{Fuel.C} = \sum_{t=1}^T [C_{pgu.F}(P_{pgu,i,t}, H_{pgu,i,t}) + C_{a.F}(H_{a,j,t})] \quad (13)$$

其中, $C_{pgu.F}(P_{pgu,i,t}, H_{pgu,i,t})$ 为 N_{pgu} 台燃气轮机热、电功率分别为 $H_{pgu,i,t}$ 、 $P_{pgu,i,t}$ ($i=1, 2, \dots, N_{pgu}$) 时的燃料成本总和 ($\$/h$), $C_{a.F}(H_{a,j,t})$ 为 N_a 台辅助锅炉热功率为 $H_{a,j,t}$ ($j=1, 2, \dots, N_a$) 时的燃料总成本, T 为调度周期内调度时段总数。

燃气轮机燃料成本:

$$C_{pgu.F}(P_{pgu,i,t}, H_{pgu,i,t}) = \sum_{i=1}^{N_{pgu}} (\alpha_i + \beta_i P_{pgu,i,t} + \gamma_i P_{pgu,i,t}^2 + \delta_i H_{pgu,i,t} + \varepsilon_i H_{pgu,i,t}^2 + \theta_i P_{pgu,i,t} H_{pgu,i,t}) \quad (14)$$

其中, N_{pgu} 为燃气轮机台数, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i, \varepsilon_i, \theta_i$ 为第 i 台燃气轮机的燃料成本系数。

辅助锅炉燃料成本:

$$C_{a.F}(H_{a,j,t}) = \sum_{j=1}^{N_a} (a_j + b_j H_{a,j,t} + c_j H_{a,j,t}^2) \quad (15)$$

其中, N_a 为锅炉台数, a_j, b_j, c_j 为第 j 台锅炉的燃料成本系数。

b. 购电成本。

联供系统为满足电负荷需求可能向城市电网购电, 联供系统电力富余时会向电网卖电。考虑分时电价, 购电成本为:

$$F_{G.C} = \sum_{t=1}^T [c_{sell,t} \min(P_{grid,t} \Delta t, 0) + c_{buy,t} \max(P_{grid,t} \Delta t, 0)] \quad (16)$$

其中, $c_{sell,t}, c_{buy,t}$ 为 t 时刻卖电和购电单价 ($\$/(\text{kW}\cdot\text{h})$); Δt 为最小调度周期时长 (h); $F_{G.C}$ 为正表示联供系统向电网购电, 为负表示联供系统向电网馈电。

c. 环境成本。

环境成本主要考虑了联供系统污染气体排放需缴纳的惩罚费用而带来的成本^[17]:

$$F_{E.C} = c_c \sum_{t=1}^T \left\{ \mu_c \max \left[\left(\sum_{i=1}^{N_{pgu}} P_{pgu,i,t} + \sum_{k=1}^{N_a} P_{w,k,t} - P_{l,t} \right) \Delta t, 0 \right] + \mu_f \left[\sum_{i=1}^{N_{pgu}} (P_{pgu,i,t} + H_{pgu,i,t}) + \sum_{j=1}^{N_a} H_{a,j,t} \right] \Delta t \right\} \quad (17)$$

其中, μ_e, μ_f 为天然气燃烧和电能生产过程中的污染气体排放系数 ($\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$), c_c 为污染气体惩罚系数 ($\$/\text{g}$), N_w 为风电机组台数。

2.2.2 “以热定电”运行策略的约束

a. 等式约束。

模型等式约束包括各机组在“以热定电”运行策略下的热能量流函数式(2)—(11)和功率平衡约束:

$$P_{L,t} = \sum_{i=1}^{N_{\text{gen}}} P_{\text{pgu},i,t} + \sum_{k=1}^{N_s} P_{w,k,t} + P_{\text{grid},t} \quad (18)$$

$$H_{\text{ht}} + H_{\text{cht}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{gen}}} H_{\text{pgu},i,t} + \sum_{j=1}^{N_s} H_{\text{aj},t} \quad (19)$$

式(18)为电功率平衡,式(19)为热功率平衡。联供系统的热、电、冷能损耗暂不考虑。

b. 不等式约束。

不等式约束包括辅助锅炉出力约束和在“以热定电”运行策略下燃气轮机热、电出力约束:

$$H_{\text{a},j}^{\min} \leq H_{\text{a},j,t} \leq H_{\text{a},j}^{\max} \quad (20)$$

$$H_{\text{pgu},i}^{\min} \leq H_{\text{pgu},i,t} \leq H_{\text{pgu},i}^{\max} \quad (21)$$

$$P_{\text{pgu},i}^{\min}(H_{\text{pgu},i,t}) \leq P_{\text{pgu},i,t} \leq P_{\text{pgu},i}^{\max}(H_{\text{pgu},i,t}) \quad (22)$$

3 “以电定热”运行策略及其经济环保调度优化模型

3.1 “以电定热”运行策略的能量流函数

“以电定热”运行策略是指燃气轮机、风电机组、城市电网协调调度优先满足电功率的实时平衡,然而燃气轮机固有的热、电出力可行域约束可能致使系统存在热能流出力大于负荷热能流的情况。本文暂不考虑蓄热装置,假设过剩热能直接排入大气,且燃气锅炉能保证系统的最大热能流需求。该策略包括以下 3 种运行情况。

(1) 当电力负荷小于燃气轮机最大电出力,即 $P_1 < P_{\text{pgu}}^{\max}$ 时,由燃气轮机出力 P_1 满足电力负荷需求。

风电供给联供系统的功率为:

$$P_{w,c} = 0 \quad (23)$$

各机组热出力存在如下情形。

a. 若 $H_h + H_{\text{ch}} < H_{\text{pgu}}^{\max}(P_1)$, 燃气轮机满足热负荷:

$$H_{\text{pgu}} = H_h + H_{\text{ch}} \quad (24)$$

b. 若 $H_{\text{pgu}}^{\max}(P_1) \leq H_h + H_{\text{ch}}$, 燃气轮机提供 $H_{\text{pgu}}^{\max}(P_1)$ 的热功率,辅助锅炉提供热补充:

$$H_a = H_h + H_{\text{ch}} - H_{\text{pgu}}^{\max}(P_{\text{pgu}}) \quad (25)$$

(2) 电力负荷大于等于燃气轮机最大电出力,且小于风电出力和燃气轮机最大电出力之和 ($P_{\text{pgu}}^{\max} \leq P_1 < P_{\text{pgu}}^{\max} + P_w$) 时,燃气轮机以最大电功率出力 P_{pgu}^{\max} 运行,风电供给联供系统的电功率为:

$$P_{w,c} = P_1 - P_{\text{pgu}}^{\max} \quad (26)$$

各机组热出力存在如下情形。

a. 若 $H_h + H_{\text{ch}} < H_{\text{pgu}}^{\max}(P_{\text{pgu}}^{\max})$, 则燃气轮机满足热能

$H_h + H_{\text{ch}}$ 需求:

$$H_{\text{pgu}} = H_h + H_{\text{ch}} \quad (27)$$

b. 若 $H_{\text{pgu}}^{\max}(P_{\text{pgu}}^{\max}) \leq H_h + H_{\text{ch}}$, 则燃气轮机热出力为 $H_{\text{pgu}}^{\max}(P_{\text{pgu}}^{\max})$, 辅助锅炉提供热补充:

$$H_a = H_h + H_{\text{ch}} - H_{\text{pgu}}^{\max}(P_{\text{pgu}}^{\max}) \quad (28)$$

(3) 电负荷大于等于风电出力与燃气轮机最大出力之和 ($P_1 \geq P_{\text{pgu}}^{\max} + P_w$) 时,燃气轮机以最大电功率出力 P_{pgu}^{\max} 运行,风电机组出力全部供给联供系统:

$$P_{w,c} = P_w \quad (29)$$

电负荷缺额由电网补充:

$$P_{\text{grid}} = P_1 - (P_{\text{pgu}}^{\max} + P_w) \quad (30)$$

各机组热出力存在如下情形。

a. 若 $H_h + H_{\text{ch}} < H_{\text{pgu}}^{\max}(P_{\text{pgu}}^{\max})$, 则燃气轮机满足热能需求:

$$H_{\text{pgu}} = H_h + H_{\text{ch}} \quad (31)$$

b. 若 $H_h + H_{\text{ch}} \geq H_{\text{pgu}}^{\max}(P_{\text{pgu}}^{\max})$, 则燃气轮机热出力为 $H_{\text{pgu}}^{\max}(P_{\text{pgu}}^{\max})$, 热不足由辅助锅炉提供:

$$H_a = H_h + H_{\text{ch}} - H_{\text{pgu}}^{\max}(P_{\text{pgu}}^{\max}) \quad (32)$$

3.2 “以电定热”运行策略的经济环保调度优化模型

3.2.1 经济环保目标函数

“以电定热”运行策略下经济环保调度优化模型的目标函数同式(12)。

3.2.2 “以电定热”运行策略的约束

a. 等式约束。

模型等式约束包括热电功率平衡约束式(18)、(19)和各机组在“以电定热”运行策略下的能量流函数式(23)—(32)。

b. 不等式约束。

不等式约束包括辅助锅炉出力约束式(20)和在“以电定热”运行策略下燃气轮机热、电出力约束:

$$P_{\text{pgu},i}^{\min} \leq P_{\text{pgu},i,t} \leq P_{\text{pgu},i}^{\max} \quad (33)$$

$$H_{\text{pgu},i}^{\min}(P_{\text{pgu},i,t}) \leq H_{\text{pgu},i,t} \leq H_{\text{pgu},i}^{\max}(P_{\text{pgu},i,t}) \quad (34)$$

4 算例仿真及结果分析

4.1 算例及参数

以某小区典型日进行实例仿真分析,风电机组出力参照文献[18],冷、热、电典型日负荷曲线见图 3。

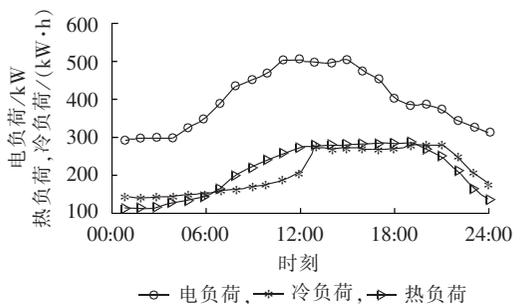


图 3 冷热电负荷需求曲线

Fig.3 Typical daily cool, heat and power load curves

分时电价^[19]为:06:00—21:00 买电、卖电价格分别为 0.13、0.10 $\$/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 21:00 至次日 06:00 买电、卖电价格分别为 0.09、0.05 $\$/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。天然气燃烧和电能生产过程中污染排放系数及相应的惩罚系数^[19] $\mu_f=220 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $\mu_c=960 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $c_c=0.000\ 003 \text{ \$/g}$ 。各电源机组参数参见文献[20]。

4.2 仿真结果

冷热电联供系统在 2 种不同运行策略下调度周期总成本曲线如图 4 所示,环境成本曲线如图 5 所示。调度周期内各成本如表 1 所示。

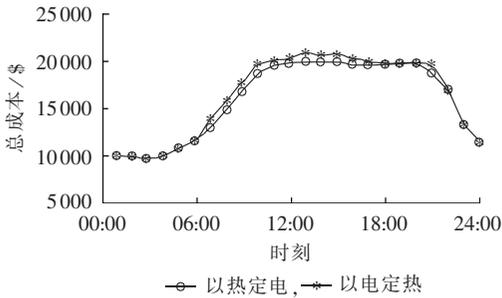


图 4 不同运行策略下总成本曲线

Fig.4 Total cost curves for different operational strategies

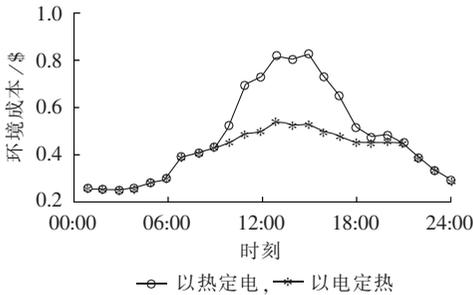


图 5 不同运行策略下环境成本曲线

Fig.5 Environmental cost curves for different operational strategies

表 1 不同运行策略下调度周期成本

Tab.1 Schedule-cycle cost for different operation strategies

运行策略	总成本	购电成本	环境成本	燃料成本
以热定电	365941.12	480.16	15.05	365445.91
以电定热	373132.76	253.78	13.09	372865.89

4.3 计算结果分析

由图 4 可知,运行策略对联供系统的经济性影响很大。07:00—22:00 时段内各调度时段“以电定热”运行策略的总成本明显高于“以热定电”。而 23:00 至次日 06:00 时段内 2 种调度策略的总成本基本相当,因为在该时段内 2 种运行策略的冷、热、电负荷均可由燃气轮机提供,且不存在热、电出力过剩的情况。

但从图 5 可知,09:00—21:00 时段内“以热定电”运行策略的环境成本更大,因为在该时段内热负荷的需求明显上升,且在该时段内购电价格达到

0.13 $\$/(\text{kW}\cdot\text{h})$,导致了环境成本的增加。

由表 1 中调度周期内 2 种运行策略下的各成本分析可知:“以热定电”运行策略下联供系统总成本比“以电定热”运行策略要低,经济性得到改善,但后者的购电成本更小,因为在“以电定热”运行策略下,燃气轮机首先满足电负荷能量流的平衡,因此降低了联供系统从电网的购电功率,从而降低了购电成本。电网购电成本的降低意味着对电网的依赖程度减小,对电网的影响也就越小。综合调度周期内“以热定电”的环境成本更高,因为采用该策略的时候优先满足热、冷负荷意味着联供系统对电网的依赖程度增加,使购电成本上升,而单位电能排放系数为 960 $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,明显高于燃气污染排放系数 220 $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,从而致使“以热定电”运行策略环境成本要更高。

5 结论

通过分析冷热电联供系统中冷、热、电能量流关系,准确刻画了反映系统各能量平衡的物理特性,考虑了能量流的实时平衡,提出了“以热定电”和“以电定热”运行策略的能量流函数,可作为冷热电联供系统优化调度的研究基础。

对 2 种不同运行策略,以所提出的能量流函数为等式约束,考虑燃料成本、购电成本和环境成本,建立了经济环保调度模型,提高系统的能源利用水平,降低生产成本,改善环境效益。

仿真结果表明,“以热定电”运行策略系统的经济效益突出,但购电成本更高,对电网的依赖程度更大、影响更严重。“以电定热”运行策略系统环境效益更显著。联供系统可根据所需运行策略选择相应的优化调度方案。

参考文献:

- [1] 冯志兵,金红光. 冷热电联产系统节能特性分析[J]. 工程热物理学报,2006,27(4):541-544.
FENG Zhibing, JIN Hongguang. Performance assessment of combined cooling, heating and power[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(4): 541-544.
- [2] MARANO V, RIZZO G, TIANO F A. Application of dynamic programming to the optimal management of a hybrid power plant with wind turbines, photovoltaic panels and compressed air energy storage[J]. Applied Energy, 2012, 97: 849-859.
- [3] 吴雄,王秀丽,别朝红,等. 含热电联供系统的微网经济运行[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):1-6.
WU Xiong, WANG Xiuli, BIE Zhaohong, et al. Economic operation of microgrid with combined heat and power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 1-6.
- [4] FANG Fang, WANG Q H, YANG Shi. A novel optimal operational strategy for the CCHP system based on two operating modes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1032-1041.

- [5] 张小晖,陈钟顺. 热电冷联产系统的能耗特性[J]. 中国电机工程学报,2007,27(5):93-98.
ZHANG Xiaohui, CHEN Zhongqi. Energy consumption performance of combined heat cooling and power system[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(5):93-98.
- [6] MAGO P J, SMITH A D. Evaluation of the potential emissions reductions from the use of CHP systems in different commercial buildings[J]. Building and Environment,2012,53:74-82.
- [7] LI Yajun, XIA Yan. DES/CCHP: the best utilization mode of natural gas for China's low carbon economy[J]. Energy Policy, 2013, 53:477-483.
- [8] SMITH A, LUCK R, MAGO P J. Analysis of a combined cooling, heating, and power system model under different operating strategies with input and model data uncertainty[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(11):2231-2240.
- [9] 荆有印,白鹤,张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(20):82-87.
JING Youyin, BAI He, ZHANG Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20):82-87.
- [10] GIEDRE S. Feasibility of CHP-plants with thermal stores in the German spot market[J]. Applied Energy,2009,86(11):2308-2316.
- [11] MAGON F, CHAMRA L M. Performance analysis of CCHP and CHP systems operating following the thermal and electric load [J]. Energy Reserves,2009,33(9):852-864.
- [12] FUMO N. Analysis of combined cooling, heating, and power systems based on source primary energy consumption[J]. Applied Energy,2010,87(6):2023-2030.
- [13] FUMO N, MAGO P J, CHAMRA L. Emission operational strategy for combined cooling, heating, and power systems [J]. Applied Energy,2009,86(11):2344-2350.
- [14] 龙虹毓,徐瑞林,何国军,等. 基于热风电协调调度的系统日调峰能力分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):30-34.
LONG Hongyu, XU Ruilin, HE Guojun, et al. SHAPP model based on LADRC and its current tracking control [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):30-34.
- [15] NIKNAM T, AZIZIPANAH-ABARGHOEE R. A new multi-objective reserve constrained combined heat and power dynamic economic emission dispatch[J]. Energy,2012,42(1):530-545.
- [16] EHYAEI M, AHMADI P. Feasibility study of applying internal combustion engines in residential buildings by energy, economic and environmental analysis[J]. Energy and Buildings,2012,55:405-413.
- [17] 洪博文,郭力,王成山,等. 微电网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):100-107.
HONG Bowen, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Model and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):100-107.
- [18] 王爽心,李朝霞. 基于小世界优化的变桨距风电机组神经网络预测控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(30):105-111.
WANG Shuangxin, LI Zhaoxia. Neural network predictive control of variable-pitch wind turbines based on small-world optimization algorithm [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(30):105-111.
- [19] 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.
ZHOU Renjun, RAN Xiaohong, MAO Falong, et al. Energy saving coordinated optimal dispatch of distributed combined cool heat and power supply[J]. Power System Technology,2012,36(6):8-14.
- [20] LATIFY M A, SEIFI H, MASHHADI H R. An integrated model for generation maintenance coordination in a restructured power system involving gas network constraints and uncertainties[J]. Electrical Power and Energy Systems,2013,46:425-440.

作者简介:



周任军

周任军(1964-),女,吉林集安人,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化、电网规划与运行、新能源接入系统、风险及条件风险、分布式电源规划(E-mail:zrj0731@163.com);

康信文(1986-),男,湖南新化人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与规划、冷热电联供系统优化(E-mail:csus1988@qq.com)。

Energy flow function and operational strategy of CCHP system

ZHOU Renjun, KANG Xinwen, LI Shaojin, CHEN Ruixian, TANG Hao, ZHOU Shengyu
(Smart Grids Operation and Control Key Laboratory of Hunan Province, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The energy flow characteristics of CCHP(Combined Cooling, Heating and Power) system are analyzed in detail and the energy flow function is proposed for its two operational strategies: thermal load dominant mode and electric load dominant mode. In order to improve its economic and environmental efficiency, an optimal economic and environmental dispatch model is built, which includes the fuel cost, power purchase cost and pollution emission penalty as environmental cost in its objective function and takes the energy flow function as its energy balance equality constraint. Case simulation shows that, the proposed energy flow function and model optimizes the dispatch of CCHP system, reduces the productive cost, improves the environmental efficiency and enhances the energy utilization level.

Key words: CCHP; operational strategy; energy flow function; thermal load dominant mode; electric load dominant mode; optimization; models