

基于电-热分时间尺度平衡的综合能源系统日前经济调度

朱承治¹, 陆 帅², 周金辉³, 张雪松³, 赵 波³, 顾 伟², 王 珺²

(1. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007; 2. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096;

3. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要:综合能源系统能够提高能源利用效率、促进可再生能源消纳,已成为能源领域的重点研究方向。如何实现多能源的联合规划、协同运行是综合能源系统运行的重要问题。在热电联供型综合能源系统中,电能可实现实时调度;而热能具有热惯性,其供需可能不满足实时平衡,可依据某一调度时段内的总量平衡进行调度。基于此,提出了考虑电-热分时间尺度平衡的综合能源系统优化模型,寻求最优热调度时间尺度以满足用户舒适度及系统运行经济性双重要求。所提模型中电能为实时平衡,热能为调度时间尺度内的总量平衡,通过电-热分时间尺度平衡提高了机组运行的灵活性。用户舒适度采用国际 ISO 标准热舒适模型,可更加人性化地反映供热效果。以某省某区域冬季典型日为例进行仿真分析,结果表明所提模型能够得到最优的热调度平衡时间尺度与调度计划,在满足用户舒适度的同时提高了系统的运行经济性。

关键词:综合能源系统;热电联合优化;电-热分时间尺度平衡;协同运行;最优时间尺度;热舒适度模型;经济调度

中图分类号: TM 734

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.06.020

0 引言

近年来,随着能源危机和环境问题的日益突出,人们对供能系统的环保、高效利用提出了更高的要求。综合能源系统可满足多种能量需求,实现能量的梯级利用,已得到国内外的广泛关注^[1-3]。在能源需求中,热能与电能是人类生产、生活的基本需求,也是综合能源系统的主要能源形式^[4-6]。

目前已有大量的针对热电联供型综合能源系统能量优化管理的研究。文献[7]综述了冷热电联供型微网中的建模、规划以及能量管理等基本问题。文献[8]提出了电热联合系统多时间尺度滚动调度策略,建立了日前、滚动、实时3个时间尺度的调度模型。文献[9]提出基于电热联合调度的区域并网型微电网运行优化模型,考虑了网内储存特性、分时电价、电热负荷及分布式电源的时序特征等。文献[10]针对含可再生能源的热电联供型微网,提出了多时间尺度的优化方法,通过“时”、“分”以及“秒”时间尺度完成混合微网运行优化。上述研究为综合能源系统的运行优化奠定了一定的基础。

然而,目前关于微网多时间尺度调度或分时间尺度调度,大多基于日前、日内2个时间尺度,或日前、日内、实时3个时间尺度,在各个调度周期内电

能与热能仍采用相同的能量平衡时间尺度。在微网中,电能的调度可在几秒内完成,热能的调度却存在较大的时间延迟,无法实时变化^[11]。因此,尽管在理论上电、热可采取同一时间尺度进行能量平衡与优化,但在实际运行中,需考虑电、热不同的传输特性及需求特性:一方面,微网中对电能供需平衡有着苛刻的要求,而热能的供需可在一定的范围内波动;另一方面,在调度中可充分利用热能供需差异这一特点,充分挖掘系统的运行经济性。由于热能具有热惯性,在传输与消费环节均有较大的延时,故可选择以某时段内供热总量平衡的方式(此时段即为热能平衡时间尺度)进行热能优化。热平衡时间尺度越长,机组灵活性越大,但对用户舒适度影响也较大;热平衡时间尺度越小,可以最大限度地保证用户舒适度,但系统的运行经济性受限。因此,选择最佳的热平衡时间尺度,在用户舒适度与系统运行经济性之间实现平衡,是电-热分时间尺度要解决的关键问题。

基于此,本文提出了考虑电-热分时间尺度平衡的综合能源系统运行优化模型。首先,采用国际 ISO 标准热舒适模型,建立了用户舒适度指标,可以科学合理地反映供热功率与用户舒适度的关系;然后,考虑用户舒适度指标,结合电能实时平衡和热能在调度时间尺度内总量平衡,建立了考虑电-热分时间尺度平衡的综合能源系统运行优化模型,求解最优热平衡时间尺度,在满足用户舒适度的前提下提高系统的运行经济性;最后,以吉林省某区域冬季典型日为例进行仿真,仿真结果表明所提模型可以确定系统最佳热平衡时间尺度,既可以满足用户舒适度要求,又可有效提高系统运行灵活性,改善系统运

收稿日期: 2017-06-21; **修回日期:** 2018-04-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477029); 国家科技支撑项目(2015BAA01B01); 国网浙江省电力公司科技项目(5211DS16002H)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477029), the National Key Technology R&D Program of China(2015BAA01B01) and the Technology Program of State Grid Zhejiang Electric Power Corporation(5211DS16002H)

行经济性。

1 用户舒适度指标

综合能源系统在保证运行经济性的同时,需要保证用户的舒适度。为此,需建立科学合理的用户舒适度模型,以衡量供能质量。根据 ISO7730《舒适热环境条件——表明热舒适程度的 PMV 和 PPD 指标》,人体对热的感知可以由预计热舒适 PMV (Predicted Mean Vote) 指标评定,该指标由丹麦的 Fanger 教授通过实验方法对大量参验人员的投票表决结果总结得出,可代表大部分人的热舒适度。PMV 取值随用户舒适度的变化在 $[-3, 3]$ 内变化,PMV 取 0 即为最舒适温度,偏离此温度越大则舒适度越低。PMV 指标对用户舒适度的描述如图 1 所示^[12]。

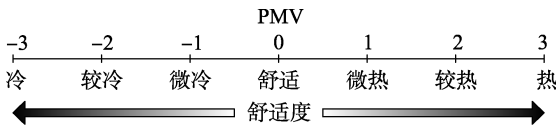


图 1 PMV 指标与用户舒适度的关系

Fig.1 Relationship between PMV index and users' comfort

1.1 PMV 模型

人对热的感知由身体的热平衡决定。影响人类身体热平衡的因素繁多,外部因素有空气的相对湿度、流动速度以及环境温度等;内部因素有个人的运动程度、衣着情况、体质强弱等^[13]。根据 ISO7730 标准,PMV 指标的计算如下:

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & (0.303e^{-0.036M} + 0.028)(M - W) - \\ & 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99(M - W) - p_a] - \\ & 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - p_a) - \\ & 0.0014M(34 - t_a) - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a) - \\ & 3.96 \times 10^{-8} f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \end{aligned} \quad (1)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl}\{f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a) + 3.96 \times 10^{-8} f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4]\} \quad (2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} & 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1 \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \sqrt{v_{ar}} & 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} \leq 12.1 \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 1.290I_{cl} & I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1.05 + 0.645I_{cl} & I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (4)$$

$$p_a = \varphi_a p_s = \varphi_a \times 610.6 e^{17.26 t_a / (273.3 + t_a)} \quad (5)$$

其中, M 为人体新陈代谢率,取值范围为 $40.74 \sim 116.4 \text{ W/m}^2$; W 为人体活动所产生的机械功,取值范围为 $0 \sim 2.0 \text{ W/m}^2$; I_{cl} 为衣着热阻,取值范围为 $0 \sim 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$; f_{cl} 为衣着系数,取值范围为 $1 \sim 1.15$; t_a 为环境空气温度,取值范围为 $10 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$; t_r 为平均辐射温度,取值范围为 $10 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$; v_{ar} 为相对空气流速,取值范围为 $0 \sim 1 \text{ m/s}$; p_a 为环境水蒸气压力,取值范

围为 $0 \sim 2700 \text{ Pa}$; φ_a 为空气相对湿度,取值范围为 $30\% \sim 60\%$; p_s 为标准环境的空气水蒸气压力; h_c 为空气对流热传递系数,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; t_{cl} 为着装人体表面温度,单位为 $^\circ\text{C}$ 。

式(1)为 PMV 指标的计算式,其涉及的内部因素有人体新陈代谢率 M 、人体活动所产生的机械功 W 、衣着系数 f_{cl} 、着装人体表面温度 t_{cl} ; 外部因素有环境水蒸气压力 p_a 、环境空气温度 t_a 、空气对流热传递系数 h_c 以及平均辐射温度 t_r 。其中,当人静坐时,人体新陈代谢率 M 为基准值 1 Met (58.2 W/m^2); 当人平躺时, $M = 0.7 \text{ Met}$; 当人步行时, $M = 2.0 \text{ Met}$ 。式(2)为正常着装人体表面温度 t_{cl} 的计算式^[13],其中,空气对流热传递系数 h_c 、衣着系数 f_{cl} 分别由式(3)、式(4)计算。式(3)中 v_{ar} 根据空调设计规范要求,一般冬季工况取 $v_{ar} = 0.15 \text{ m/s}$,夏季工况取 $v_{ar} = 0.25 \text{ m/s}$ 。式(4)中 I_{cl} 冬季取 0.9 clo ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$),夏季取 0.5 clo 。 t_{cl} 与 h_c 可迭代求出。式(5)为环境空气中的水蒸气压力 p_a 的计算式,其中 φ_a 一般夏季取 60% ,冬季取 40% ^[14-15]。

1.2 预测不满意度模型

PMV 的值描述用户对供热的感受,而预测不满意度 PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) 可描述用户对供热的不满意程度^[12,16],其为评价供热舒适度的最终指标,该指标可直接由 PMV 导出,具体计算式如下:

$$\text{PPD} = 100 - 95 \exp(-0.03353 \times \text{PMV}^4 - 0.2179 \times \text{PMV}^2) \quad (6)$$

PPD 与 PMV 的关系如图 2 所示,当 $\text{PMV} = 0$,即供热最舒适时,用户不满意度最低,随着 PMV 向两端靠近极值,用户不满意度急剧上升。

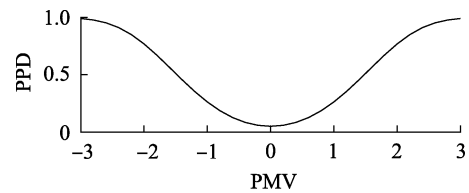


图 2 PMV 与 PPD 的关系

Fig.2 Relationship between PMV and PPD

在综合能源系统的运行优化中,首先设定最低 PPD,确定 PMV 的取值范围,结合 PMV 的范围与式(1),构成系统运行的热功率约束。

1.3 室内温度模型

室内温度是能够直接影响用户舒适度的因素,其与室外温度、散热器供热功率有关,具体计算式如下^[15]:

$$t_{a,t+1} = \begin{cases} (t_{out,t} + Q_{ra,t}/\eta_{air})(1 - e^{-\Delta t/T_c}) + t_{a,t}e^{-\Delta t/T_c} & U_{ra,t} = 1 \\ t_{out,t}(1 - e^{-\Delta t/T_c}) + t_{a,t}e^{-\Delta t/T_c} & U_{ra,t} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, $t_{a,t}$ 、 $t_{out,t}$ 分别为用户在 t 时段的室内、室外温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; $Q_{ra,t}$ 为 t 时段散热器功率, 单位为 kW ; η_{air} 为空气热传导系数, 单位为 $\text{kW}/^{\circ}\text{C}$; Δt 为调度时间段时长, 单位为 h ; T_c 为调度周期, 单位为 h ; $U_{ra,t}$ 为一个二维变量, 表示散热器在 t 时段的开关状态, $U_{ra,t}=1$ 表示 t 时段散热器开启, 则此时用户处于供暖状态, $U_{ra,t}=0$ 表示 t 时段散热器关停。

2 分时间尺度平衡调度模型

2.1 系统单元模型

本文以图 3 所示热电联供型综合能源系统为例, 其包含燃气轮机、燃气锅炉等主要设备。

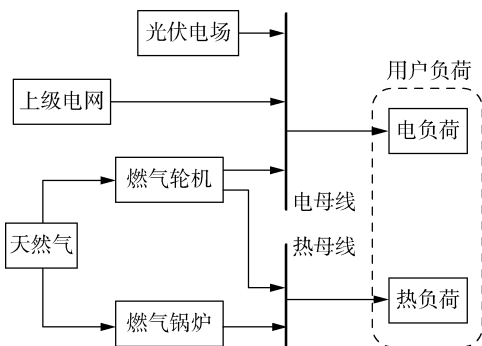


图 3 热电联供型综合能源系统结构图

Fig.3 Structure of integrated energy system combined heat and power

a. 燃气轮机。

天然气在燃气轮机燃烧室燃烧后, 热蒸汽推动涡轮机做功, 同时排出的热气可通过热回收器为用户提供热能, 实现能源综合利用, 有效提高能源利用效率^[8]。燃气轮机供电及供热的计算式如下:

$$P_{mt} = V_{mt} H_{ng} \eta_{mt} \quad (8)$$

$$Q_{mt} = V_{mt} H_{ng} (1 - \eta_{mt} - \eta_{loss}) \eta_{hr} \quad (9)$$

其中, P_{mt} 为燃气轮机的输出电功率; Q_{mt} 为经热回收器回收后的可利用热功率; η_{mt} 为燃气轮机的发电效率; η_{loss} 为能量损耗率; η_{hr} 为热回收器的效率; V_{mt} 为燃气轮机每小时的天然气消耗量; H_{ng} 为天然气热值。

b. 燃气锅炉。

在冬季供暖高峰时段, 燃气轮机供热不足时, 由燃气锅炉补充供热^[9]。燃气锅炉的发热计算式如下:

$$Q_{gb} = V_{gb} H_{ng} \eta_{gb} \quad (10)$$

其中, Q_{gb} 为燃气锅炉输出的热功率; V_{gb} 为燃气锅炉每小时消耗的天然气量; η_{gb} 为燃气锅炉的发热效率。

2.2 目标函数

以运行费用最低为日前优化目标。日运行费用包括购买燃料费用、购电费用以及运行维护费用。

$$\min C = \sum_{t=1}^T (C_{g,t} + C_{e,t} + C_{om,t}) \quad (11)$$

其中, C 为热电联供型综合能源系统的日运行总成本; $C_{g,t}$ 、 $C_{e,t}$ 分别为 t 时段购燃料费用、购电费用; $C_{om,t}$ 为 t 时段系统运行维护费用; T 为调度周期数。

a. 燃气费用。

$$C_{g,t} = (V_{mt} + V_{gb}) \Delta t K_g \quad (12)$$

其中, K_g 为燃气单价, 单位为 $\text{元}/\text{m}^3$ 。

b. 购电费用。

$$C_{e,t} = P_{ph,t} K_{e,t} \Delta t \quad (13)$$

其中, $P_{ph,t}$ 为 t 时段电网提供的电功率, 单位为 kW ; $K_{e,t}$ 为 t 时段电网售电单价, 单位为 $\text{元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

c. 运行维护费用。

$$C_{om,t} = [K_{mt,om} P_{mt,t} + K_{gb,om} Q_{gb,t} + K_{pv,om} P_{pv,t} + K_{bt,om} (P_{bt,ch,t} + P_{bt,dis,t})] \Delta t \quad (14)$$

其中, $K_{mt,om}$ 、 $K_{gb,om}$ 、 $K_{pv,om}$ 和 $K_{bt,om}$ 分别为燃气轮机、燃气锅炉、光伏电池和蓄电池的运行维护单价, 单位为 $\text{元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; $P_{mt,t}$ 、 $P_{pv,t}$ 分别为燃气轮机和光伏电池在 t 时段的发电功率, 单位为 kW ; $Q_{gb,t}$ 为燃气锅炉在 t 时段的产热功率, 单位为 kW ; $P_{bt,ch,t}$ 、 $P_{bt,dis,t}$ 分别为 t 时段蓄电池的充电功率和放电功率, 单位为 kW 。

2.3 约束条件

a. 功率平衡约束。

$$P_{mt,t} + P_{ph,t} + P_{pv,t} + P_{bt,dis,t} - P_{bt,ch,t} = P_{load,t} \quad (15)$$

式(15)为电功率平衡约束, 是实时约束, 其中, $P_{load,t}$ 为 t 时段电负荷。

$$\sum_{t=1}^{T_h} (Q_{mt,t} + Q_{gb,t}) = N \sum_{t=1}^{T_h} Q_{ra,t} = \sum_{t=1}^{T_h} Q_{load,t} \quad (16)$$

式(16)为热功率平衡约束, 在热平衡时间尺度 T_h 内总量平衡, 其中, $Q_{mt,t}$ 为 t 时段燃气轮机的产热功率; $Q_{load,t}$ 为 t 时段热负荷; N 为散热器总数。

b. 运行上下限约束。

$$\begin{cases} U_{mt,t} P_{mt}^{\min} \leq P_{mt,t} \leq U_{mt,t} P_{mt}^{\max} \\ Q_{gb}^{\min} \leq Q_{gb,t} \leq Q_{gb}^{\max} \\ P_{ph}^{\min} \leq P_{ph,t} \leq P_{ph}^{\max} \\ P_{pv}^{\min} \leq P_{pv,t} \leq P_{pv}^{\max} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $U_{mt,t}$ 为 t 时段燃气轮机的启停状态, $U_{mt,t}=1$ 表示此时燃气轮机正在运行, $U_{mt,t}=0$ 表示此时燃气轮机停运; $P_{mt}^{\max}$ 、 $P_{mt}^{\min}$ 分别为燃气轮机的运行上、下限; $Q_{gb}^{\max}$ 、 $Q_{gb}^{\min}$ 分别为燃气锅炉的运行上、下限; $P_{ph}^{\max}$ 、 $P_{ph}^{\min}$ 分别为系统从电网购电功率上、下限; $P_{pv}^{\max}$ 、 $P_{pv}^{\min}$ 分别为光伏出力上、下限。

c. 供热质量约束。

通常为了保证供热质量, 避免在优化时出现室

温总处于温度下限的情况,需要平均温度进行约束以保证优化过程不会造成供热质量的损失。

$$\sum_{t=1}^T T_{in,t}/T = T_{in}^d \quad (18)$$

其中, $T_{in,t}$ 为 t 时段的室内温度; T_{in}^d 为设计室内温度。

2.3 运行策略

本文所提出的电-热多时间尺度模型运行策略如图4所示,首先根据用户满意度要求计算 PMV 的取值范围,然后依次取热平衡时间尺度 T_h 为 24 h、12 h、8 h、6 h、4 h、3 h、2 h、1 h 求解模型直到 PMV 满足要求,输出调度计划,即为满足用户舒适度条件下的经济最优计划。若 T_h 取最小调度时间 1 h 时,依旧不满足 $|PMV| < PMV^{\max}$, 则需重新调整用户满意度要求。

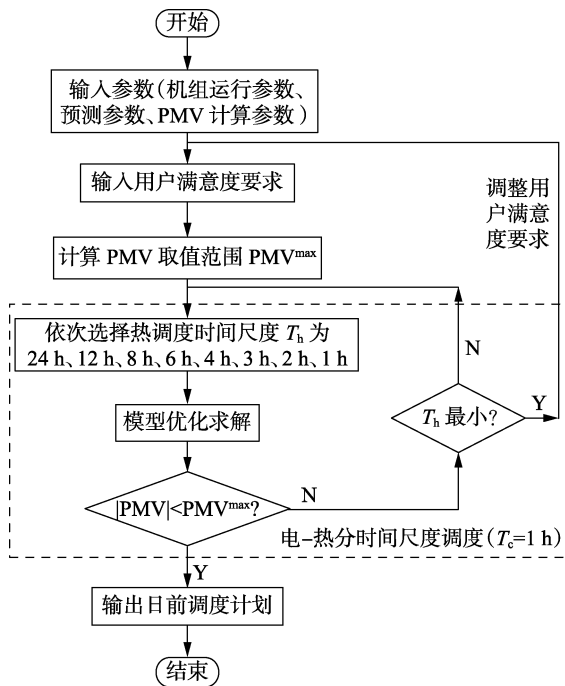


图4 模型运行流程图

Fig.4 Flowchart of operating proposed model

3 案例分析

3.1 仿真参数

以吉林省某一供热区域为例,该区域总电负荷、平均单户居民热负荷及光伏出力预测如图5所示。该区域分时电价如表1所示^[17]。系统运行参数及 PMV 计算参数为^[18]: $H_{ng} = 9.78 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, $\eta_{mt} = 0.3$, $\eta_{loss} = 0.02$, $\eta_{hr} = 0.75$, $P_{mt}^{\max} = 20 \text{ MW}$, $Q_{gb}^{\max} = 10 \text{ MW}$, $P_{ph}^{\max} = 5 \text{ MW}$, $C_{gas} = 2.3 \text{ 元}/\text{m}^3$, $C_{mt,om} = 0.015 \text{ 元}/\text{kW}$, $C_{gb,om} = 0.0162 \text{ 元}/\text{kW}$, $C_{pv,om} = 0.0123 \text{ 元}/\text{kW}$, $\eta_{air} = 0.18$, $M = 58.2 \text{ W}/\text{m}^2$, $W = 0$, $I_{cl} = 0.0775 \text{ M}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$, $\varphi_a = 0.4$, $t_r = 18 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_{ar} = 0.2 \text{ m}/\text{s}$ 。仿真平台采用 Windows 系统 Intel i7 CUP, 优化模型使用 LINGO 11.0 进

行求解。

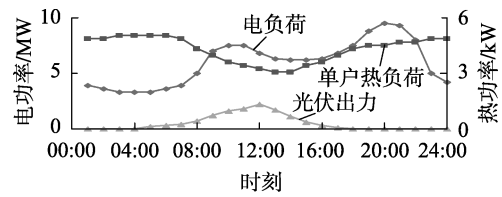


图5 电负荷、平均单户热负荷、光伏出力预测曲线

Fig.5 Prediction curves of power load, average single-family heat load and photovoltaic output

表1 分时电价

Table 1 Time-of-use electricity price

时段	时间区间	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
谷时	00:00—08:00, 23:00—24:00	0.315 3
平时	08:00—09:00, 12:00—17:00, 21:00—23:00	0.598 3
峰时	09:00—12:00, 17:00—21:00	0.798 0

3.2 结果分析

a. 优化结果。

设定用户 $PPD < 10\%$, 此时 PMV 的取值范围为 $[-0.5, 0.5]$ 。图6给出了热平衡时间尺度分别取 24 h、12 h、8 h、6 h、4 h、3 h、2 h、1 h 时 PMV 取值的变化。由图6可知,随着热平衡时间尺度的不断减小,PMV 的变化量越来越小,直到满足要求。取热平衡时间尺度为 24 h 时,PMV 的变化范围为 $[-1.36, 1.07]$, 而取热平衡时间尺度为 1 h 时,供热与热负荷预测逐时匹配,故 $PMV = 0$ 。热平衡时间尺度 $T_h = 4 \text{ h}$ 为满足 $PPD < 10\%$ 的最大热平衡时间尺度,小于此热平衡时间尺度均可满足要求。

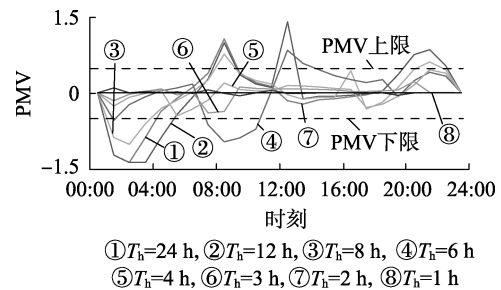


图6 不同热平衡时间尺度下 PMV 变化

Fig.6 PMVs under different time scales of heat balance

不同热平衡时间尺度下系统日运行费用如图7所示。由图7可知,随着热平衡时间尺度的变化,购电费用变化较大,而运行维护费用及燃气费用变化较小;改变热平衡时间尺度,可以在满足供热总量要求的前提下,调节每个时段出力,从而改变购电量;提高机组峰时出力,降低峰时购电量从而降低购电费用,提升系统的运行经济性。由图6可知,热平衡时间尺度 $T_h \leq 4 \text{ h}$ 时均可满足 $PPD < 10\%$ 的要求,而图7表明在 $T_h \leq 4 \text{ h}$ 范围内, $T_h = 4 \text{ h}$ 时的经济性最佳,故在本文算例中取热平衡时间尺度为

4 h。此外,在实际应用中,需结合实际的用户供热质量需求、系统运行经济性进行热平衡时间尺度的选取。

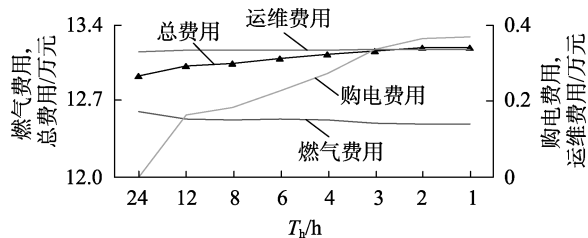


图7 不同热平衡时间尺度下系统日运行费用

Fig.7 Daily operating costs under different time scales of heat balance

b. 功率平衡分析。

为了验证电-热分时间尺度平衡策略的优势,对比 $T_h = 4$ h 与 $T_h = 1$ h 时的热、电功率平衡。电功率平衡如图8所示,热功率平衡如图9所示。当 $T_h = 1$ h 时,为了满足电负荷需求在峰时段 19:00—21:00 从电网购电;而当 $T_h = 4$ h 时,由于热能只需在 4 h 内满足总量平衡即可,所以在调度时段内,提升了 19:00—21:00 时段内的热电联供机组出力,减小了峰时购电量,提升了系统运行的经济性。

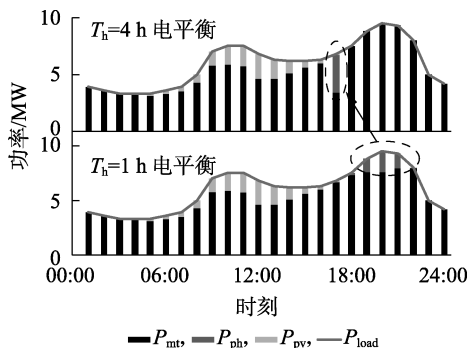


图8 $T_h = 4$ h 和 $T_h = 1$ h 时电功率平衡

Fig.8 Electrical power balance when $T_h = 4$ h and $T_h = 1$ h

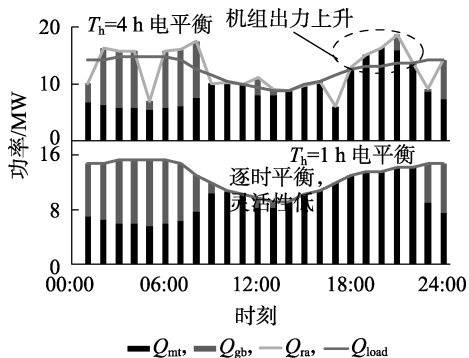


图9 $T_h = 4$ h 和 $T_h = 1$ h 时热功率平衡

Fig.9 Heat power balance when $T_h = 4$ h and $T_h = 1$ h

c. PMV 指标法与死区间约束法对比分析。

房屋温度约束通常采用死区间 DB (Dead Band)

约束法,即限定房屋温度处于一定区间内。为了证明 PMV 指标法更加科学合理,图10给出了 PMV 指标法与 DB 约束法下的室内温度及用户舒适度。DB 约束法的区间取为 $[23, 27]^\circ\text{C}$, PMV 取为 $[-0.5, 0.5]$ 。

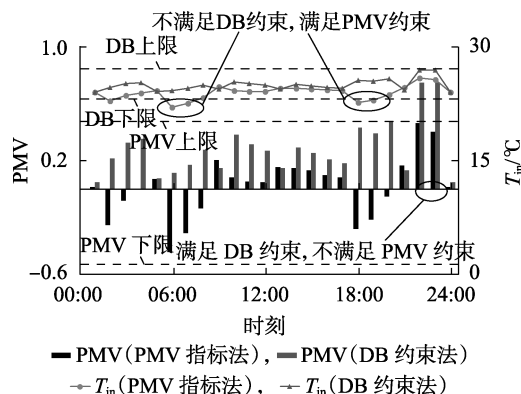


图10 PMV 指标法与 DB 约束法下的用户舒适度对比

Fig.10 Comparison of users' comfort between PMV index method and DB constraint method

图10中,以 PMV 指标法计算用户舒适度时,06:00—07:00 及 18:00—19:00 时段内,室内温度虽然不满足 DB 约束,但用户舒适度依旧保持在 $[-0.5, 0.5]$ 内;采用 DB 约束法时,22:00—23:00 虽满足 DB 约束,但用户舒适度已高于 0.5,即此时用户已感觉微热。可见,由于 PMV 指标法所考虑的因素较多,可较好地反映用户舒适度,而 DB 约束法仅考虑室内温度这一要素,在某些情况下并不能满足用户舒适度的要求。应该说明的是,PMV 指标法的参数选择会给结果带来一定的影响,在实际应用中应结合具体情况确定合理的参数。上述仿真结果表明,在综合能源系统调度中单纯采用 DB 约束进行供热建模并不能保证供热质量,有必要采用 PMV 指标法综合考虑多种因素对供热质量的影响。

4 结论

考虑到综合能源系统中不同类型能源的特性不同(例如电能可实现实时调度;而热能具有热惯性,传输存在延时,无法实现实时调度),因此在调度时需充分考虑不同能源在调度时间尺度上的协同。基于此,本文提出了考虑电-热分时间尺度平衡的综合能源系统优化模型。首先,所提模型修正了功率平衡约束,其中电能为实时平衡,热能为某一时间尺度内的总量平衡,因此在一定程度上提升了机组的运行灵活性;然后,采用的热舒适度模型为 PMV-PPD 模型,该模型考虑了人体因素(人体新陈代谢率、服装热阻)与环境因素(湿度、风速、环境温度、辐射温度),可更加人性化地描述用户热舒适度;最后,以吉林省某一供热区域为例进行仿真,仿真结果表明热平衡时间尺度越长,系统灵活性越大、经济效益越好,用户舒适度较差;热平衡时间尺度越短,系统可

调节范围越小,用户热舒适度得到保障,但经济效益较差。综上所述,本文所提模型可求解最优热平衡时间尺度,以在满足用户热舒适度的前提下,提升峰时机组出力,降低峰时购电量,提升系统运行经济性。

参考文献:

- [1] 王璟,王利利,林济铿,等. 能源互联网结构形态及技术支撑体系研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):1-10.
WANG Jing, WANG Lili, LIN Jikeng, et al. Energy internet morphology and its technical support system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 1-10.
- [2] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 1-5.
DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 1-5.
- [3] 顾伟,陆帅,王珺,等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1316.
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305-1316.
- [4] 周任军,晁岱旭,李新军,等. 空间耦合粒子群优化算法及峰谷电价下 IES-CCHP 区域联合调度[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 11-17.
ZHOU Renjun, CHAO Daixu, LI Xinjun, et al. SC-PSO algorithm and IES-CCHP regional joint dispatch with TOU price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 11-17.
- [5] AMERI M, BESHARATI Z. Optimal design and operation of district heating and cooling networks with CCHP systems in a residential complex[J]. Energy and Buildings, 2016, 110: 135-148.
- [6] GU W, WANG Z H, WU Z, et al. An online optimal dispatch schedule for CCHP microgrids based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 8(5): 2332-2342.
- [7] GU W, WU Z, BO R, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: a review[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54(1): 26-37.
- [8] 邓佳乐,胡林献,邵世圻,等. 电热联合系统多时间尺度滚动调度策略[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3796-3802.
DENG Jiale, HU Linxian, SHAO Shiqi, et al. Multi-time scale rolling scheduling method for combined heat and power system[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3796-3802.
- [9] 李正茂,张峰,梁军,等. 含电热联合系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3569-3576.
LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3576.
- [10] 裴玮,邓卫,沈子奇,等. 可再生能源与热电联供混合微网能量协调优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 9-15.
PEI Wei, DENG Wei, SHEN Ziqi, et al. Energy coordination and optimization of hybrid microgrid based on renewable energy and CHP supply[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 9-15.
- [11] 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.
WANG Jun, GU Wei, LU Shuai, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 17-24.
- [12] STANDARDS B. Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria[J]. International Standard ISO, 2005, 11(5-6): 501.
- [13] 刘向龙. 室内热舒适性指标 PMV 影响因素分析与研究[J]. 制冷与空调(四川), 2006, 20(4): 19-24.
LIU Xianglong. The study about the effect factor of thermal comfort index PMV[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2006, 20(4): 19-24.
- [14] 李武刚,赵安军,康燕妮,等. 冬季室内环境因素对 PMV 的影响[J]. 建筑工程技术与设计, 2015(14): 1756-1757, 1761.
LI Wugang, ZHAO Anjun, KANG Yanni, et al. Effects of winter indoor environmental factors on PMV[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2015(14): 1756-1757, 1761.
- [15] 苏蕤. PMV 热舒适指标预测及空调末端控制策略研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.
SU Rui. Prediction of thermal comfort index of PMV and control strategy of air conditioning terminal[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture And Technology, 2014.
- [16] LUO F, ZHAO J, DONG Z Y, et al. Optimal dispatch of air conditioner loads in Southern China region by direct load control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 7(1): 439-450.
- [17] 陆伟. 城市能源环境中分布式供能系统优化配置研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2007.
LU Wei. Study on optimal allocation of distributed energy supply system in urban energy environment[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Engineering Thermophysics), 2007.
- [18] 王珺,顾伟,张成龙,等. 智能社区综合能源优化管理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 89-97.
WANG Jun, GU Wei, ZHANG Chenlong, et al. Research on integrated energy management for smart community[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 89-97.

作者简介:



朱承治

朱承治(1977—),男,浙江杭州人,高级工程师,博士,研究方向为智能信息处理技术及其在电力系统中的应用(E-mail: chengzhi_zhu@163.com);

陆帅(1993—),男,江苏徐州人,博士研究生,主要研究方向为综合能源系统的建模与优化(E-mail: lushuai1004@outlook.com);

顾伟(1981—),男,江苏徐州人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为分布式电源与微电网和主动配电网(E-mail: wgu@seu.edu.cn)。

(下转第151页 continued on page 151)

- [18] 潘学萍,刘良,杜春雷,等. 选择合适的观测量提取电力系统的振荡特征[J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(2):51-56.
PAN Xueping, LIU Liang, DU Chunlei, et al. Measurement selection for estimating oscillation characteristics in power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2015, 27(2): 51-56.

作者简介:

蔡国伟(1968—),男,吉林吉林人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统运行分析方面的教学与科研工作;



蔡国伟

王丽馨(1991—),女,吉林吉林人,助理教师,硕士,通信作者,研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail: 530519657@qq.com);

杨德友(1983—),男,吉林吉林人,副教授,博士,研究方向为电力系统稳定分析与控制。

Disturbance source location method based on frequency-domain characterization with environmental excitation

CAI Guowei, WANG Lixin, YANG Deyou

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: Small periodic disturbance under environmental excitation is easy to be drowned in noise-like signals and it is hard to detect the small periodic disturbance and locate the disturbance source from the view of time-domain. Based on the analysis of frequency-domain characteristics of noise-like signals in the power system with environmental excitation, a detection and location method of small periodic disturbance based on frequency-domain characteristics is proposed. The periodic disturbance under environmental excitation is represented as an oscillation mode with constant oscillation and damping ratio approximating to zero, and the mode phase of the generator where the disturbance source belongs to in the mode is ahead of other generators. The noise-like signals under environmental excitation are analyzed by stochastic subspace identification algorithm, the oscillation modes and parameters are extracted, and then the small periodic disturbance is detected according to the quantity of modes and characteristic parameters. Based on this, the generator where the disturbance source belongs to can be located according to the modal phase relationship of periodic oscillation mode whose damping ratio is approximately zero. Simulative results of IEEE 4-generator 2-area system and IEEE 16-generator 68-bus system verify the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: random excitation; periodic disturbance; frequency-domain characterization; stochastic subspace identification algorithm; disturbance source location; mode parameters

(上接第143页 continued from page 143)

Day-ahead economic dispatch of integrated energy system based on electricity and heat balance in different time scales

ZHU Chengzhi¹, LU Shuai², ZHOU Jinhui³, ZHANG Xuesong³, ZHAO Bo³, GU Wei², WANG Jun²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The IES(Integrated Energy System) can improve energy efficiency and promote renewable energy consumption, and has become a key research focus in the field of energy. How to realize the joint planning and coordinated operation among multiple energy sources is the main problem of IES operation. In the IES combined with heat and power, the electric energy can be dispatched real-time, while the supply and demand of thermal energy may not meet the real-time balance due to the thermal inertia, which can be dispatched according to the total energy balance in a dispatch interval. Based on this, an optimal operation model of IES is proposed considering the electricity and heat balance in different time scales, which seeks the optimal dispatch time scale of thermal energy to meet the dual requirements of users' comfort and system operation economics. In the proposed model, the power balance is real-time and the heat balance is a total balance in the dispatch time scale, by which the operation flexibility of the units is improved. The ISO international standard thermal comfort model is adopted to describe the users' comfort, which can reflect the heating effect more humanely. A typical winter day in a region of a province is simulated and analyzed, and results show that, the proposed model can get the optimal dispatch time scale of heat balance and the optimal dispatch plan, improving the operation economy of the system while satisfying the users' comfort.

Key words: integrated energy system; joint optimization of heat and power; electricity and heat balance in different time scales; coordinated operation; optimal time scale; thermal comfort model; economic dispatch