

## 考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度

邹云阳<sup>1</sup>, 杨莉<sup>1</sup>, 冯丽<sup>2</sup>, 许昭<sup>3</sup>, 傅旭华<sup>4</sup>, 叶承晋<sup>4</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 国网重庆市电力公司, 重庆市 400014;

3. 香港理工大学电机工程学系, 香港; 4. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江省杭州市 310008)

**摘要:** 考虑到区域内用户的热、电需求, 近年来以微型燃气轮机为核心的热电联供系统在微网中得到广泛应用。如何协调调度微网的供热、供电, 是提高可再生能源吸纳率、降低微网热电联供成本的关键。文中从用户供热舒适度的模糊性、微网供热系统的热惯性角度考虑, 提出采用室内热舒适度指标将热负荷需求由传统的曲线转换为区间, 从而使热负荷在各时间点上具有弹性; 同时以自回归滑动平均(ARMA)模型描述供热系统多时段间的耦合关系, 使供热量在时间轴上具有一定的可调节性。文中将上述两个特性统称为热负荷的二维可控性。算例分析了考虑热负荷二维可控性后, 微网在孤网/并网运行时微型燃气轮机运行平稳性、弃风/光、购/售电量等方面, 结果显示所述方法可有效减少热-电刚性耦合, 为实现微网中热-电的时间平移和优化匹配提供了一种新思路。

**关键词:** 热电联供; 微网(微电网); 热舒适度; 热惯性; 不确定性; 协调调度

### 0 引言

微网是一种由负荷和微电源共同组成的系统, 通过集中管理控制, 可向用户进行冷热电联供, 满足用户多样化的需求, 对外部大电网来说可看做是一个受控单元<sup>[1-2]</sup>。将微型燃气轮机(简称微燃机)引入微网, 进行热电联供(combined heat and power, CHP), 通过能源的梯级利用, 热电联供总效率可达到90%<sup>[3]</sup>, 因此近年来以微燃机为核心的热电联供系统在微网中得到广泛的应用。

然而热电联产机组通常以“以热定电”模式运行, 热-电间的刚性耦合关系限制了其调度的灵活性。对于大电网而言, 如风电比例较高的东北、华北、西北(简称“三北”)地区, 富风期与供热期相重叠, 为满足冬季供热需要, 热电联产机组需优先运行, 导致大量风机被迫停转弃发<sup>[4-6]</sup>。对微网而言, 由于微电源数目少、容量小, 微燃机在发电容量中所占份额较大, “以热定电”的运行模式限制了微燃机的调峰能力, 导致风电、光伏等间歇性可再生能源更难以消纳。

目前已有一些学者针对微燃机热-电间的刚性耦合, 以及微网中间歇性可再生能源电源的随机性, 研究微网的热电联供协调调度, 其思路主要包括引

入热源作为灵活性资源<sup>[7-10]</sup>和优化匹配热电需求曲线<sup>[11-13]</sup>两种。文献[7-8]通过在用户侧布置分布式热泵, 承担热机组的部分采暖负荷, 降低热机组的强迫出力, 提高了风电消纳能力; 文献[9-10]则通过引入电制热、储热装置作为灵活热源, 将热-电关系解耦, 提高对风电的消纳。文献[11]考虑到可再生能源出力和热负荷需求的不确定性, 采用机会约束规划理论将微网与大电网的交换电功率、燃气锅炉的热功率约束转化为置信区间, 一定程度上减少了热-电间的耦合性。在文献[11]的基础上, 文献[12]进一步将供热约束设定为热能供应不小于热能需求, 即认为供热量大小可单向调节, 从而进一步减少了“以热定电”限制的刚性耦合。文献[13]对可再生能源功率随机性波动、热负荷变化、电负荷变化等事件的时间尺度进行了分析, 提出按时、分、秒多时间尺度的能量协调优化策略。其中特别指出热能变化缓慢, 具有一定的惯性, 因此热负荷不需要像电负荷一样维持绝对平衡, 其平衡约束可以在一定范围内松弛。

引入新热源可以提高热电联供系统的调度灵活性, 有助于提高间歇性可再生能源的吸纳率, 但是大量灵活性热源意味着增加投资。事实上, 用户供热舒适度具有模糊性, 因此用户的热负荷需求并非是一条固定曲线, 而是一个区间; 而供热系统的温度参数, 如热网供水、回水温度等也是多时段的耦合量, 利用供热网络管网的储热特性, 可以有效解除供热

收稿日期: 2016-11-08; 修回日期: 2016-12-30。

上网日期: 2017-02-04。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901104)。

出力和热负荷需求之间的瞬时平衡约束,从而提高热电联供系统的灵活性<sup>[14]</sup>。

因此,本文一方面从用户供热舒适度的模糊性对热负荷需求的影响考虑,引入评价室内热舒适度的热感觉平均标度预测(predicted mean vote, PMV)指标将传统的热负荷曲线转换为一个需求区间,在室内环境保证良好满意度的基础上,增加了热负荷在各时间点上的弹性;另一方面从供热系统的热惯性角度考虑,采用供热系统温度自回归滑动平均(ARMA)模型来表征温度参数间多时段的耦合关系,实现供热量的时间平移。本文称以上两种特性为热负荷二维可控性,并介绍了用户热舒适度PMV指标和供热系统的热惯性,随后提出考虑以上特性的微网热电协调调度模型,最后以算例对模型进行验证。

## 1 用户热舒适度 PMV 指标

用户对温度舒适程度的感知具有一定的模糊性,在一定范围内降低或者提高温度,用户不易觉察,但利用这一点可以增加负荷的柔性调节能力。文献[15]指出温度负荷对电力系统来说是一种非常灵活的“电源”,住宅楼中使用可控电暖器的用户约为30%,将住宅加热器停用30 min后,隔热效果差的住宅理论上温度下降0.95℃,隔热效果中等的下降0.89℃,隔热效果好的下降0.83℃,因此对普通用户可接受的断电时间大约是1 h,这时的温度变化仍然可以满足用户的舒适度要求。江苏省对居民用户推广智能用电终端和智能红外插座,依托海尔、美的等家电厂商的智能空调设备和云平台,实现对家庭空调负荷的集中调控,目前已经具备监测和调控100 MW负荷的能力。美国SRP电力公司建议居民用户夏季在用电高峰来临前时段将空调温度设定为比平时降低4~5℃,进行预冷,高峰时温度设置比平时高2℃。

用户对热环境质量的要求一般用热舒适度来表征。热舒适度就是对室内热环境的主观评价和感受,温度、相对湿度、空气流速、平均辐射温度、新陈代谢率和服装热阻等均会对热舒适度产生影响<sup>[16]</sup>。热舒适度有很多评价指标,其中PMV指标是最常用的一种。

PMV指标表征了同一环境中多数人冷热感觉的平均值,以7级标尺对应人体的7种感觉,PMV为0对应室内热环境最佳热舒适状态,PMV为+1,+2,+3分别表示稍暖、暖与热,PMV为-1,-2,-3分别表示稍凉、凉与冷<sup>[17-18]</sup>。ISO7730推荐PMV值在±0.5之间,中国现有《采暖通风与空气

调节设计规范》规定PMV宜处于±1之间<sup>[19]</sup>。

PMV值可以通过下式得到<sup>[17]</sup>:

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

式中: $M$ 为人体能量代谢率; $W$ 为人体所作的机械功率; $f_{\text{cl}}$ 为人体覆盖服装面积与裸露面积之比; $h_c$ 为表面传热系数; $P_a$ 为人体周围空气的水蒸气分压力; $t_a, t_r, t_{\text{cl}}$ 分别为人体周围空气温度、平均辐射温度和服装外表面温度。本文关注的是供热量,且温度是人对于室内环境舒适度最直观的感受,因此假设除人体周围空气温度 $t_a$ 外,其他参数均为给定值。

本文使用用户舒适度PMV指标设置用户舒适度在可接受范围内,从而客观设置合适的温度值。

## 2 供热系统的热惯性

供热系统由热源、热网及采暖建筑物等组成,其中热网和采暖建筑物都具有很大的热惯性<sup>[20]</sup>。由于介质的比热容和质量,使得受热介质的温度变化在时间上总是滞后于传热介质的温度变化,这种现象称为热惯性。采暖建筑物具有热惯性,如地暖的房屋热惯性大,即使停止供电后仍然可以在很长时间内保持舒适的温度。供热管道的温度特性对供热性能具有显著的影响,从热源到用户的温度变化时滞通常为几分钟到几个小时,这种热惯性完全可以用于与电力系统运行相协调,供热管道可以通过储热达到柔性供热,进而可以将热电供应解耦,从而提高灵活消纳风电的能力和经济性<sup>[14]</sup>。供热系统的温度动态特性可以通过统计/数据挖掘或物理模型得到<sup>[14]</sup>。

本文采用文献[21-22]的模型,假设热网供水温度 $T_{g,t}$ 、热网回水温度 $T_{h,t}$ 、采暖建筑物室内温度 $T_{n,t}$ 和室外温度 $T_{w,t}$ 间关系为:

$$T_{h,t} = \sum_{j=0}^J \alpha_j T_{n,t-j} + \sum_{j=0}^J \beta_j T_{g,t-j} + \sum_{j=0}^J \gamma_j T_{w,t-j} \quad (2)$$

$$T_{n,t} = \sum_{j=0}^J \theta_j T_{n,t-j} + \sum_{j=0}^J \phi_j T_{g,t-j} + \sum_{j=0}^J \omega_j T_{w,t-j} \quad (3)$$

该ARMA时间序列模型中,阶次 $J$ 体现了供热系统热惯性的大小, $\alpha, \beta, \gamma, \theta, \phi, \omega$ 为供热系统热惯性物理参数,可以通过实测数据进行参数辨识得到<sup>[21]</sup>。PMV指标中人体周围空气温度 $t_a$ 即采暖建

筑物室内温度  $T_a$ , 即有  $t_a = T_n$ 。

### 3 微网热电协调调度模型

#### 3.1 热电联供型微网的组成及运行原理

图 1 所示为一个热电联供型微网的基本架构, 包括风电、光伏、微燃机 3 个微电源, 与微燃机相连的余热锅炉、电锅炉向微网供热, 没有配置储能。

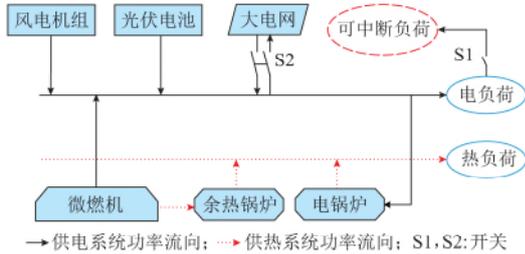


图 1 热电联供型微网的基本架构  
Fig. 1 Basic architecture of CHP microgrid

假设该微网主要目的是以最低成本满足内部用户热电需求, 而非通过向大电网售电或新能源发电补贴获利。孤网运行时, 内部功率平衡通过调整微电源出力, 包括弃风/弃光, 以及调用可中断负荷等手段实现; 并网运行时, 微网和大电网间采用变功率输入/输出控制模式, 按不平衡电价结算, 即微网向大电网出售的电量以低价结算, 购买的电量按高价结算。本文假设可中断负荷价格比向大电网购电价格高, 因此并网模式下不会调用可中断负荷, 该假设合理, 但并非强制约束。

图 2 所示为如何利用热负荷二维可控性实现热电协调调度的示意图。

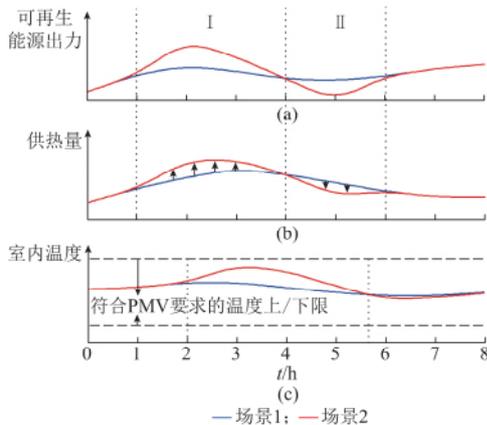


图 2 热电联供型微网运行示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of CHP microgrid operation

图 2(a) 中给出两种可再生能源出力场景, 场景 1 平稳, 场景 2 波动较大。时段 I, 场景 2 可再生能源出力较大, 图 2(b) 中场景 2 比场景 1 供热量多, 图 2(c) 中相应的室内温度曲线滞后于图 2(b) 供热

量曲线, 慢慢升高, 供热系统将可再生能源富余的出力以热能形式“存储”起来。时段 II, 场景 2 可再生能源出力有较大减少, 但室内温度由于供热系统此前“存储”的热能和室内较高的“余温”, 依旧维持在符合 PMV 指标要求的温度范围内。

#### 3.2 数学模型

风电、光伏等具有不确定性, 场景分析法由于能明确描述不确定性, 并且优化模型计算方便, 得到广泛的使用<sup>[23]</sup>。假设风光出力场景  $S$  个, 其中场景  $s$  的概率为  $p_s$ , 调度时段  $T$  个, 微网中微电源  $I$  个。为方便起见, 本文假设有风电、光伏、微燃机 3 个微电源, 分别以  $i=1, 2, 3$  表示, 则  $I=3$ 。取时间间隔  $\Delta t=1$  h。假设风电、光伏成本不计, 微网孤网运行时的费用包括微燃机发电成本、爬坡成本、临时调整惩罚性费用和调用可中断负荷成本 4 个部分, 其目标函数为:

$$\min C(P_{G3t}^0) = \sum_{s=1}^S p_s \sum_{t=1}^T \left[ c_{\text{gas}} \left( \frac{P_{G3t}^s}{\eta_{G3}} + \lambda | P_{G3t}^s - P_{G3(t-1)}^s | \right) + \rho_{\text{pen}} | P_{G3t}^s - P_{G3t}^0 | + \rho_{\text{IL}} \Delta P_{\text{IL}t}^s \right] \quad (4)$$

式中:  $P_{G3t}^0$  为微燃机计划出力;  $P_{G3t}^s$  为微燃机在场景  $s$  下时段  $t$  的实际出力;  $c_{\text{gas}}$  为微燃机能耗成本;  $\eta_{G3}$  为微燃机发电效率;  $\lambda$  为爬坡能耗系数;  $\rho_{\text{pen}}$  为微燃机的临时调整惩罚系数, 用于表征微燃机希望按预定计划出力, 减少临时性调节的意向;  $\rho_{\text{IL}}$  和  $\Delta P_{\text{IL}t}^s$  分别为调用的可中断负荷价格和功率。

供电系统约束包括以下几类。

##### 1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^I P_{G_{it}}^s + \Delta P_{\text{IL}t}^s = P_{L_t} + P_{\text{GHR}}^s \quad (5)$$

$$0 \leq \Delta P_{\text{IL}t}^s \leq P_{L_t} \quad (6)$$

式中:  $P_{\text{GHR}}^s$  为电锅炉的用电量;  $P_{L_t}$  为用户用电负荷。

##### 2) 机组出力约束

$$P_{i\text{min}} \leq P_{G_{it}}^s \leq P_{i\text{max}} \quad i=1, 2, 3 \quad (7)$$

$$P_{G_{it}}^s \leq P_{it}^s \quad i=1, 2 \quad (8)$$

式中:  $P_{i\text{min}}$  和  $P_{i\text{max}}$  分别为机组  $i$  的最小和最大技术出力;  $P_{it}^s$  为在场景  $s$  下的风电、光伏可发电量。

微燃机处于较低负载时, 效率变差, 污染气体排放增大, 厂家建议微燃机在低于额定功率一半时, 停止运行<sup>[12]</sup>, 因此本文取  $P_{3\text{min}} = 50\% P_{3\text{max}}$ , 这在很大程度上限制了微燃机调节的灵活性。

##### 3) 弃风/弃光约束

$$\sum_{t=1}^T P_{it}^s - \sum_{t=1}^T P_{G_{it}}^s \leq \pi_i \sum_{t=1}^T P_{it}^s \quad i=1, 2 \quad (9)$$

式中:  $\pi_i$  为机组  $i$  的最大允许弃风率或弃光率。

供热系统约束包括以下几类。

## 1) 供热热网约束

$$H_{EH,t}^s + H_{EB,t}^s = \gamma(T_{g,t}^s - T_{h,t}^s) \quad (10)$$

$$T_{h,t}^s \leq T_{g,t}^s \leq T_{g,\max}^s \quad (11)$$

$$-\sigma \leq \lambda_{PMV,t}^s \leq +\sigma \quad (12)$$

式中:  $H_{EH,t}^s$  和  $H_{EB,t}^s$  分别为场景  $s$  下余热锅炉和电锅炉的热能出力;  $\gamma$  为锅炉供热量与热网供/回水温度差间的关系系数, 与热网水流量有关;  $T_{g,t}^s$  和  $T_{h,t}^s$  分别为场景  $s$  下的热网供水温度和热网回水温度;  $T_{g,\max}^s$  为热网最高供水温度;  $\sigma$  为 PMV 指标取值范围;  $\lambda_{PMV,t}^s$  为场景  $s$  下时段  $t$  的 PMV 指标。式(10)为锅炉供热量与热网供水/回水温度之间的关系, 与式(2)、式(3)一起描述了供热系统消耗的热能和建筑内温度间具有热惯性的多时段关系。

## 2) 锅炉出力约束

$$H_{EH,t}^s = P_{G3t}^s \frac{\eta_{G3H}}{\eta_{G3}} \eta_{EH} \quad (13)$$

$$H_{EH,\min} \leq H_{EH,t}^s \leq H_{EH,\max} \quad (14)$$

$$H_{EB,t}^s = P_{G3t}^s \eta_{EB} \quad (15)$$

$$H_{EB,\min} \leq H_{EB,t}^s \leq H_{EB,\max} \quad (16)$$

式中:  $\eta_{G3}$ ,  $\eta_{G3H}$ ,  $\eta_{EH}$ ,  $\eta_{EB}$  分别为微燃机的发电效率、制热效率、余热锅炉的废热回收效率和电锅炉的电热转换效率, 其中  $\eta_{G3H}/\eta_{G3}$  为微燃机的热电比值;  $H_{EH,\min}$ ,  $H_{EH,\max}$  和  $H_{EB,\min}$ ,  $H_{EB,\max}$  分别为余热锅炉和电锅炉的出力上下限。式(13)、式(15)分别为微燃机和电锅炉的电热转换关系。

微网并网运行目标函数为:

$$\min C(P_{G3t}^s) = \sum_{s=1}^S p_s \sum_{t=1}^T \left[ c_{gas} \left( \frac{P_{G3t}^s}{\eta_{G3}} + \lambda | P_{G3t}^s - P_{G3(t-1)}^s | \right) + \rho_{pen} | P_{G3t}^s - P_{G3t}^0 | + \rho_{buy} f(P_{grid,t}^s) - \rho_{sell} f(-P_{grid,t}^s) \right] \quad (17)$$

式中:  $\rho_{buy}$  和  $\rho_{sell}$  分别为微网向大电网的购、售电价格, 大电网负责微网不平衡电量的调节;  $P_{grid,t}^s$  为场景  $s$  下时段  $t$  微网与大电网的交互功率, 正值表示购电功率, 负值表示售电功率;  $f(x)$  为分段函数,  $x > 0$  时  $f(x) = x$ ,  $x \leq 0$  时  $f(x) = 0$ 。

假设该微网的主要目的是以最低成本满足自身内部用户的热电需求, 而非通过购售电获利, 因此设微网向大电网购买的电量以较高价格结算, 而出售的电量以较低价格结算。

功率平衡约束为:

$$\sum_{i=1}^I P_{Gi,t}^s + P_{grid,t}^s = P_{Lt} + P_{G3t}^s \quad (18)$$

其他约束与微网孤网运行时相同。

本文提出的微网热电协调调度流程图见附录 A 图 A1。

## 4 算例分析

本文算例数据基于某分布式电源示范工程项目, 其中微燃机 18 MW, 光伏发电 4.5 MW, 风电 6.5 MW, 其他基础数据见附录 A 表 A1。PMV 方程参数与供热系统的 ARMA 时间序列模型给定参数分别见附录 A 表 A2、表 A3, 其中取 PMV 值在  $\pm 1$  之间, 热惯性系数  $J = 2$ 。日电负荷曲线和室外温度曲线数据见附录 B 表 B1; 风电、光伏发电出力分布参数见附录 B 表 B2; 微网运行初值见附录 B 表 B3。假设日调度时段数  $T = 24$ , 经典场景数  $S = 10$ 。本文模型通过 CPLEX 12.4 求解。

## 4.1 热负荷二维可控性对孤网运行微网的影响

图 3 所示为微网孤网运行模式下, 改变热惯性系数  $J$  及 PMV 指标范围对微网运行的影响, 附录 C 表 C1 则为相应二维可控性参数下的微网运行指标。

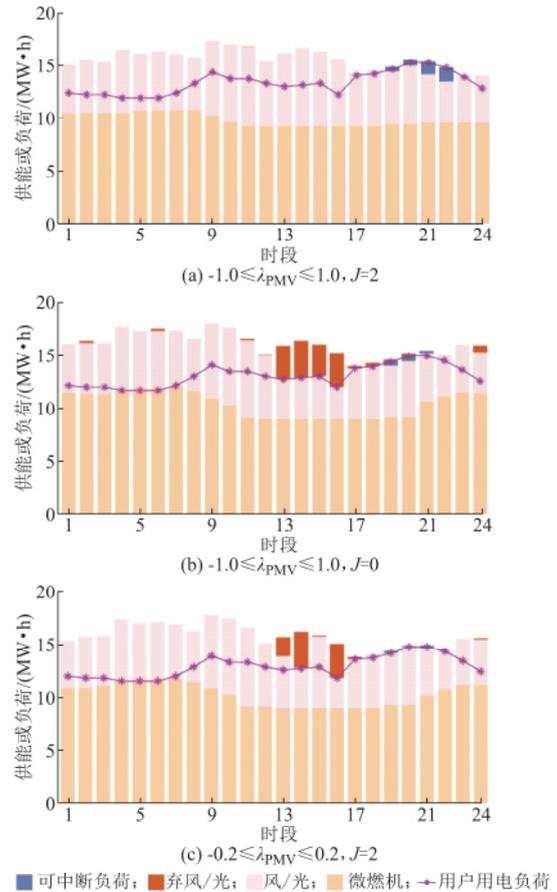


图 3 热负荷二维可控性对孤网运行微网的影响  
Fig. 3 Influence of two-dimensional controllability of heat loads on microgrid under islanded mode

对比图 3(a)与图 3(b):图 3(a)中,由于考虑了热负荷二维可控性,超过用户用电负荷的富余电量,被转化为热能“存储”起来,在随后时段被利用,风/光全部被消纳,微燃机在整个调度过程中出力相对比较平稳;图 3(b)中,由于没有考虑热惯性,在风/光资源充裕、供热需求较小的时段 13-16 出现弃风/弃光,此后热电需求较大时段,微燃机出力明显比图 3(a)高,在某些时段还调用了可中断负荷。对比图 3(c)与图 3(a)可见:PMV 限制严格,即热负荷在幅值轴上的弹性减小,导致允许供热系统“储热”容量减小,在某些风/光资源充裕时段出现弃风/弃光,此后时段微燃机出力也明显比图 3(a)高。附录 C 表 C1 中数据也表明:考虑热惯性、放宽 PMV 限制,微网均能增大对风/光的消纳水平,使微燃机发电总量减少,微网运行成本降低。

#### 4.2 热负荷二维可控性对并网运行微网的影响

图 4 显示了热惯性对并网运行微网的影响,由图可见, $J=0$  情况与  $J=1, J=2$  情况相比,室内温度比后者波动小,但微燃机出力、微网售电量、运行总成本明显增加,这是因为考虑热惯性情况下,对供热量进行了多时段优化,使得供热量与微网中多个微电源出力更匹配。例如时段 13-16 时,不考虑热惯性,即  $J=0$  时,图 4(b)显示微网向大电网出售了大量富余电能,图 4(a)则显示该时段为减少售电量,微燃机有明显的先压出力、后快速调整出力过程,而  $J=1$  和  $J=2$  时微燃机出力要平稳得多。由图 4(c)可见,考虑热惯性后,供热系统便能在电能富余时段将电能转换为供热系统中的热能,优化多个时段的供热量,为随后供热需求增加的时段预先提升了室内温度,实现了包括热负荷、电负荷的“荷”和包括电源和热源的“源”的优化匹配。在减少对大电网的依赖下,为风电/光伏消纳提供了一种新思路。

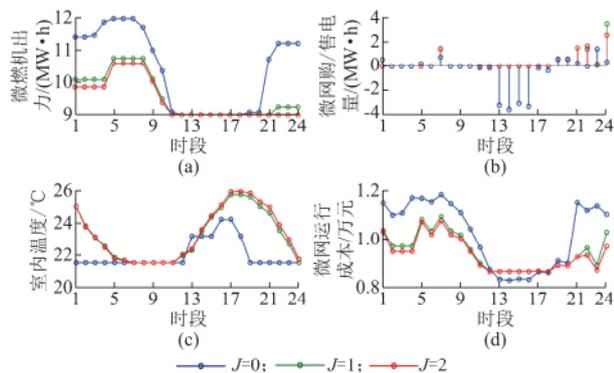


图 4 热惯性系数  $J$  对并网运行微网的影响  
Fig. 4 Influence of thermal inertia parameter  $J$  on microgrid under grid-connected mode

值得指出的是,热惯性系数  $J=1$  和  $J=2$  对微网运行效果并没有太大区别,这是由于供热系统有重近轻远的特性,即时段  $i$  供热量对时段  $i+1$  室内温度影响较大,对随后的时段  $i+2, i+3, \dots$  的影响减小,并且时间间隔取得越大,重近轻远的特性越明显。

图 5 显示了 PMV 指标对微网运行的影响,图 5(c)中虚线为对应 PMV 指标下室内温度的波动范围,实线为各 PMV 指标下实际室内温度。由图 5(b), (c)可知,PMV 指标越小,即热舒适度要求越严格,室内温度相对于最舒适温度的允许偏差越小,意味着供热系统热能“存储”容量越小,热负荷在各时间点上的弹性越小,当室内温度达到上限、微网电量还有富余时,只能以低价格向大电网售电。由图 5(a), (d)可见,在 PMV 指标减小时,微燃机出力增大、调整量增多,导致微网运行成本增加,这与微网孤网运行模式下所得结论相类似。

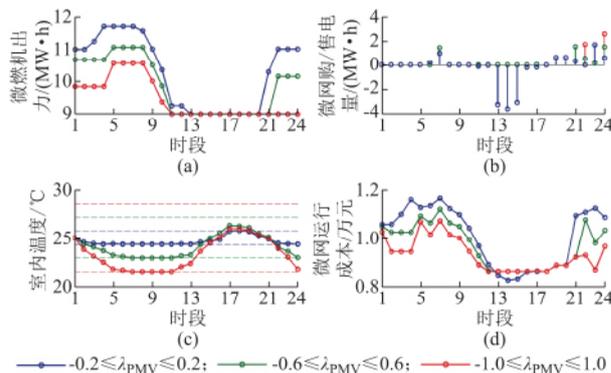


图 5 PMV 指标对并网运行微网的影响  
Fig. 5 Influence of PMV index on microgrid under grid-connected mode

附录 C 图 C1 为微网采用跟随固定热负荷曲线供热的运行情况与考虑热负荷二维可控性后的运行情况对比。其中微网采用跟随给定热负荷曲线方式运行时的供热负荷曲线数据见附录 B 表 B1,而考虑热负荷二维可控性时取 PMV 指标为  $\pm 1$  之间,  $J=2$ 。由附录 C 图 C1 可知,微网在综合考虑热负荷二维可控性后,室内温度在满足热舒适度要求的一定范围内变化,供热量不再跟随固定的热负荷曲线,变得更加平稳、调整减小,微网运行成本降低,同时向大电网售电量减少。

由附录 C 图 C1(b), (c)可知,时段 13 至 16 时,在跟随固定热负荷曲线运行时难以消纳的富余电能,被低价出售给大电网;而在考虑热负荷二维可控性运行时,富余电能则能通过室内温度升高而被“存储”起来,并在之后供热不足时得到“利用”,实现了微网中热-电的时间平移和优化匹配。

## 5 结语

本文从用户对供热舒适程度具有模糊性和供热系统具有热惯性的特点出发,提出采用 PMV 指标将传统热负荷曲线转换为一个区间,使热负荷在各时间点上具有弹性;以供热系统温度参数的 ARMA 时间序列模型表征供热系统多时段耦合关系,使供热量在时间轴上具有可调节性,从而使热电联供型微网中热负荷和供热系统成为灵活性资源,为实现微网中热-电的时间平移和优化匹配提供了一种新思路。

本文模型还可以在下列情况下进一步研究:

①采用更精细的热电联供运行模型,考虑热电联供机组的多种工况;②供热系统的热惯性在更小时间尺度上考虑,从而与风电预测时间尺度相匹配;③分析具有冷热电联供、电转气功能的微网中,除了热负荷、热源以外,如何将其他温度负荷和“源”作为灵活性资源,以提高微网效率。

本文研究工作得到了国网浙江省电力公司科技项目(5211JY15001Q)的资助,在此表示感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] HATZIARGYRIOU N, ASAND H, IRAVANI R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [2] KATIRAEI F, IRAVANI R, HATZIARGYRIOU N, et al. Microgrids management[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.
- [3] 郭宇航,胡博,万凌云,等.含热泵的热电联产型微电网短期最优经济运行[J].电力系统自动化,2015,39(14):16-22. DOI: 10.7500/AEPS20141127011. GUO Yuhang, HU Bo, WAN Lingyun, et al. Optimal economic short-term scheduling of CHP microgrid incorporating heat pump[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 16-22. DOI: 10.7500/AEPS20141127011.
- [4] 夏叶,康重庆,陈天恩,等.电力用户参与风电消纳的日前市场模式[J].电力系统自动化,2015,39(17):120-126. DOI:10.7500/AEPS20150317009. XIA Ye, KANG Chongqing, CHEN Tianen, et al. Day-ahead market mode with power consumers participation in wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 120-126. DOI: 10.7500/AEPS20150317009.
- [5] 李俊峰.2013 中国风电发展报告[M].北京:中国环境科学出版社,2013:28-48.
- [6] 王晓海,乔颖,鲁宗相,等.供暖季风电电量消纳能力的评估新方法[J].中国电机工程学报,2015,35(9):2112-2119. WANG Xiaohai, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. A novel method to assess wind energy usage in the heat-supplied season [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2112-2119.
- [7] PAPAETHYMIU G, HASCHE B, NABE C. Potential of heat pumps for demand side management and wind power integration in the German electricity market[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2012, 3(4): 636-642.
- [8] 龙虹毓,何国军,徐瑞林,等.计及分布式电源热泵的热电联产协调优化调度与能效分析[J].电力系统自动化,2013,37(14): 38-42. LONG Hongyu, HE Guojun, XU Ruilin, et al. Cogeneration coordination optimal dispatch and energy efficiency analysis containing distributed electric heat pumps[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 38-42.
- [9] CHEN X, KANG C, O' MALLEY M, et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: modeling and implications[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2015, 30(4): 1848-1857.
- [10] LUND H, CLARK W W. Management of fluctuations in wind power and CHP comparing two possible Danish strategies[J]. Energy, 2002, 27(5): 471-483.
- [11] 王锐,顾伟,吴志.含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J].电力系统自动化,2011,35(8):22-27. WANG Rui, GU Wei, WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 22-27.
- [12] 顾伟,吴志,王锐.考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化[J].电力系统自动化,2012,36(14):177-185. GU Wei, WU Zhi, WANG Rui. Multi-objective optimization of combined heat and power microgrid considering pollutant emission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 177-185.
- [13] 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. DOI: 10.7500/AEPS20130903010. 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. DOI: 10.7500/AEPS20130903010.
- [14] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network [J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 12-22.
- [15] NOUREDINE H.有源智能配电网[M].陶顺,肖湘宁,彭骋,译.北京:中国电力出版社,2012.
- [16] 张华一,文福拴,张璨,等.计及舒适度的家庭能源中心运行优化模型[J].电力系统自动化,2016,40(20):32-39. DOI: 10.7500/AEPS20160503002.

- ZHANG Huayi, WEN Fushuan, ZHANG Can, et al. Operation optimization model of home energy hubs considering comfort level of customers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 32-39. DOI: 10.7500/AEPS20160503002.
- [17] FANGER P O. Thermal comfort [M]. New York, USA: McGraw-Hill Company, 1970.
- [18] FANGER P O. Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering[M]. New York, USA: McGraw-Hill Company, 1972.
- [19] 许景峰. 浅谈 PMV 方程的适用范围[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(3): 13-18.
- XU Jingfeng. Discussion on the application range of the PMV equation[J]. Journal of Chongqing Architecture University, 2005, 27(3): 13-18.
- [20] 刘鑫屏, 田亮, 王琪. 补偿风电扰动的供热机组快速变负荷控制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 26-32. DOI: 10.7500/AEPS20130701001.
- LIU Xinpeng, TIAN Liang, WANG Qi. A control method of rapid load change for heat supply units compensating wind power disturbance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 26-32. DOI: 10.7500/AEPS20130701001.
- [21] FU L, JIANG Y. Optimal operation of a CHP plant for space heating as a peak load regulating plant[J]. Energy, 2000, 25(3): 283-298.
- [22] 付林, 江亿. 承担采暖负荷的背压机组电力调峰优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 80-83.
- FU Lin, JIANG Yi. Optimal operation of back-pressure units for space heating[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 80-83.
- [23] 邹云阳, 杨莉. 基于经典场景集的风光水虚拟电厂协同调度模型[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1855-1859.
- ZOU Yunyang, YANG Li. Synergetic dispatch models of a wind/PV/hydro virtual power plant based on representative scenario set [J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1855-1859.

邹云阳(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向:分布式发电、多能源系统。E-mail: eezouyy@zju.edu.cn

杨莉(1974—),女,通信作者,副教授,主要研究方向:电力系统调度、规划。E-mail: eeyangli@zju.edu.cn

冯丽(1975—),女,博士,高级工程师,主要研究方向:电力负荷预测、电力市场分析。E-mail: fengli@cq.sgcc.com.cn

(编辑 章黎)

## Coordinated Heat and Power Dispatch of Microgrid Considering Two-dimensional Controllability of Heat Loads

ZOU Yunyang<sup>1</sup>, YANG Li<sup>1</sup>, FENG Li<sup>2</sup>, XU Zhao<sup>3</sup>, FU Xuhua<sup>4</sup>, YE Chengjin<sup>4</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China ;

2. State Grid Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400014, China ;

3. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China ;

4. Economic Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310008, China)

**Abstract :** By taking into account the heat and power demands of users in a microgrid, in recent years, the combined heat and power (CHP) system in which micro gas turbines are the core has been widely used. How to coordinate the heat and power supplies of a microgrid is the key to improving the accommodation of renewable energy source (RES) and reducing the CHP cost. The fuzzy character of thermal comfort and thermal inertia of heating system in CHP microgrid are considered. The predicted mean vote (PMV) index for evaluating the indoor thermal comfort is used to convert the traditional heat load curve to an interval, enabling the heat loads to possess elasticity at each moment. In addition, an auto-regressive and moving average (ARMA) model is used to characterize the multi-period coupling of the multiple temperature parameters in the heating system, i. e. thermal inertia, thereby making heat supply adjustable on the time axis. The above two characteristics together are called two-dimensional controllability of heat loads. In the simulation, considering two-dimensional controllability of heat loads, the operation stability of the micro gas turbine, wind/photovoltaic curtailment, electricity purchase/sales etc in the islanded/grid-connected mode are analyzed. And the results show that the proposed method can effectively weaken rigid coupling of electric power generation and heat supply, providing a new idea to the realization of the time shift and optimal matching of heat and power in a microgrid.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901104).

**Key words :** combined heat and power (CHP); microgrid; thermal comfort; thermal inertia; uncertainty; coordinated dispatch