有源配电网下多能互补协调优化策略研究

首先以冷热电联供系统和有源配电网为基础，以经济调度为目的，建立了一种新型的综合系统。该综合系统加入了风力、光伏等分布式能源。研究了综合系统的协调优化调度方法，基于用户的冷－热－电负荷特性，利用以电运行和以热运行策略混合使用，结合联供系统的运行成本、配电网的网损最小为优化目标，建立了多目标联合优化模型，考虑了电网的分时电价与天然气的费用，对联供系统热电运行出力进行了综合优化。以山东省某示范园区的夏季负荷为例进行分析，验证所提方法能够有效提高联供系统的效率以及能源的利用率，显示了多种清洁能源互补发电的作用和经济优势。

王　宁　付　蓉　黄校娟　应益强／南京邮电大学自动化学院

王　宁／硕士研究生

关键词／Keywords
综合系统·
冷热电联供·
有源配电网·
分时电价·
天然气费率·

0　引言

在全球能源日益紧张的背景下，开发新能源成为世界各国共同重视的话题。目前分布式能源系统在世界上的各个国家得到了高度重视，并且积极地开发利用，其中冷热电联供就是一种重要的新型能源高效利用的形式[1]。冷热电联供系统是以燃气为能源，通过对其产生的热水和高温废气的利用，以达到冷－热－电需求的一个能源供应系统，通常由燃气发电机组、余热锅炉、吸收式制冷装置和热交换装置组成。CCHP系统可以利用不同的热值度，提供不同的需求，高温度时用于发电；中温度时用于供冷和供热；低温度时用于回收。冷热电联供系统不仅可以提高能源的利用率，而且和传统的发电系统相连，可以同时降低环境污染和发电成本。因此，发展CCHP技术具有重要的革新意义。

国家自然科学基金重点项目（61633016）。

目前，有关CCHP系统独立运行的研究已经取得了很大进展[3-4]，文献[5]建立了风能、太阳能、天然气和储能互补发电的冷热电联供优化协调模型，考虑了在不同的天然气费率下，不同的季节采用不同的协调策略。文献[6]冷热电联供系统的组成比较单一，仅仅考虑了负荷特性，而没有储能系统的优化。文献[7]给出了基于微燃机的冷热电联供系统的结构和数学模型以及微电网的经济模型，并分析比较了两种控制策略下的微电网经济运行成本。文献[8]以具体的CCHP系统为对象，提出了其能量管理优化模型，考虑了发电、购电和购气价格对联供系统经济性的影响。但上述研究仅仅考虑单独运行的CCHP系统，而没有考虑与有源配电网交互产生的影响，缺乏灵活性和通用性。

本文建立了一种新型的多能互补耦合系统，该系统包括风能、太阳能的配电网系统以及冷热电联供系统，有效地提高了系统的经济性。基于用户的冷热电负荷特性，利用以电运行和以热运行模式混合使用，结合联供系统的运行成本以及配电网的网损最小为优化目标，建立了多目标优化模型，考虑了综合的分时电价和天然气的不同费用，对系统设备容量和运行策略进行了优化[9]。

1　多能互补耦合系统结构

冷热电联供系统不仅能满足用户的电负荷需求，同时又能满足用户的冷、热负荷需求。其中，电负荷是由联供系统的燃气发电机以及电网提供；而热负

荷由燃气发电机的热回收系统和辅助锅炉提供；冷负荷由吸收制冷机供与电制冷机提供[10]。本文提出的有源配电网下多能耦合系统的模型如图1所示，考虑到联供系统的经济性以及稳定性，模型中添加了风力、光伏发电和储能装置[11]。

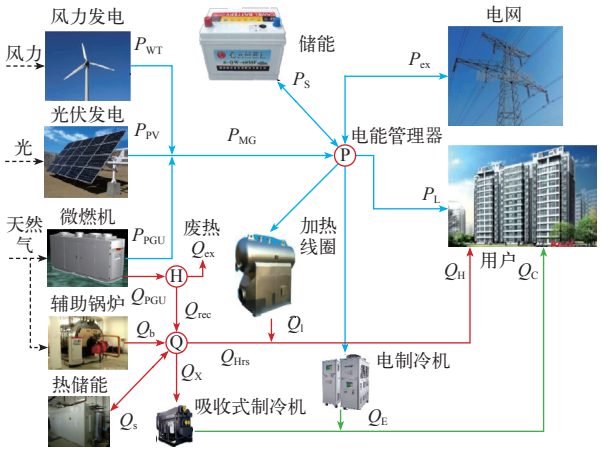

图1　有源配电网下多能耦合系统

1.1　冷热电联供系统的数学模型

CCHP 系统接入配电网运行时，不仅可以从配电网取电，而且还可以向配电网售电。联供系统中的风力和光伏属于清洁能源，本文中不考虑其发电成本。因此，以联供系统的运行成本为目标函数，包括联供发电机组的发电成本、燃料成本以及配电网的取电和售电成本，不考虑联供系统的设备成本、维护成本以及排放成本[12-13]。优化问题的目标函数为

$$f_1 = C_{ELC} + C_F \tag{1}$$

$$C_{ELC} = \sum_{t=1}^{T}(C_{s+}C_{grid+,t} - C_{s-}C_{grid-,t})\Delta t \tag{2}$$

$$C_F = C_f \sum_{t=1}^{T}(F_{PGU,t} + F_{b,t}) = C_f \sum_{t=1}^{T}\left(\frac{P_{PGU,t}}{\eta_g} + \frac{Q_{b,t}}{\eta_b}\right)\Delta t \tag{3}$$

式中，T为调度周期时段数；f_1为联供系统的运行费用；C_{ELC}为联供系统从配电网购电或售电费用；C_F为购买天然气的费用；$P_{grid+,t}$、$P_{grid-,t}$分别为时段$t=1,2,\cdots,T$与有源配电网交互的电功率；C_{s+}、C_{s-}为分别为从配电网购电的电价与向配电网售电的电价；$F_{PGU,t}$为第t时段联供系统燃气轮机消耗的燃气量；$F_{b,t}$为第t时段辅助锅炉消耗的燃气量；$P_{PGU,t}$为第t时段联供系统燃气轮机的发电功率；$Q_{b,t}$为第t时段辅助锅炉的产热功率；η_g、η_b分别为联供系统燃气轮机和辅助锅炉的效率；C_f为购买天然气的单位价格。

1.2　有源配电网的数学模型

（1）配电网的目标函数

将整个配电网系统的网损最小作为配电网优化的目标[14]，配电网网损优化的目标函数表述为

$$f_2 = C_{loss}\sum_{i=1}^{N} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \tag{4}$$

式中，N为系统支路总数；r_i为支路i的电阻；P_i、Q_i和V_i分别为支路i的有功功率、无功功率和节点电压幅值；C_{loss}为网损的电价。

（2）配电网电压偏移量函数

$$\Delta U = \sum_{j=1}^{m}\left|\frac{U_j - U_{jN}}{U_{jN}}\right| \tag{5}$$

式中，m为配电网节点数；j为配电网节点号；U_j、U_{jN}为节点j处的实际电压和额定电压，通常认为$U_{jN}=1$；在配电网系统中电压偏移量ΔU越小，说明配电网各节点实际电压与额定电压相差越小，即配电网电压质量越高。

1.3　新能源发电模型

新能源发电系统包括光伏和风力发电单元，由于新能源发电运行成本低，所以本文将其工作在最大功率输出状态，由于光伏和风力是间歇式能源，因此，新能源发电系统在文中不作为优化目标，仅作为一个负的“负荷”。

2　多目标优化模型

2.1　目标函数

冷热电联供系统接入配电网中进行协调优化，在系统约束条件下，以联供系统的最小运行成本以及配电网的网损最小为优化目标，联合优化的目标函数为

$$F = \min[\alpha F_1 + (1-\alpha)F_2] \tag{6}$$

式中，F_1、F_2分别为冷热电联的运行成本、配电网的网损最小；α为相应的权重，且$0 \leqslant \alpha \leqslant 1$。

2.2 约束条件

1）电负荷平衡方程为

$$P_{\text{grid},t}+P_{\text{PV},t}+P_{\text{WT},t}+P_{\text{PGU},t}=P_{\text{L},t}+P_{\text{s},t} \tag{7}$$

式中，$P_{\text{grid},t}$、$P_{\text{PV},t}$、$P_{\text{WT},t}$和$P_{\text{PGU},t}$分别为第t时段冷热电联供系统与有源配电网交互的功率、光伏机组的功率、风力发电机的功率和燃气轮机的功率；$P_{\text{L},t}$、$P_{\text{s},t}$分别为第t时段用户的电负荷需求、储能装置的功率。

2）热功率平衡方程为

$$Q_{\text{Hrs},t}+Q_{\text{b},t}+Q_{\text{l},t}=Q_{\text{H},t}+Q_{\text{ex},t} \tag{8}$$

式中，$Q_{\text{Hrs},t}$为第t时段余热回收装置提供的热功率；$Q_{\text{b},t}$为第t时段辅助锅炉的制热功率；$Q_{\text{l},t}$为第t时段加热线圈的制热功率；$Q_{\text{H},t}$、$Q_{\text{ex},t}$分别为第t时段用户的热负荷需求、联供系统排除的废热。

3）冷功率平衡方程为

$$Q_{\text{Ac},t}+Q_{\text{Ec},t}=Q_{\text{C},t} \tag{9}$$

式中，$Q_{\text{Ac},t}$、$Q_{\text{Ec},t}$和$Q_{\text{C},t}$分别为第t时段吸收式制冷机的制冷功率、电制冷机的制冷功率以及用户的冷负荷需求。

4）有源配电网的节点电压和支路电流约束为

$$U_{i,\min}\leqslant U_{i,t}\leqslant U_{i,\max} \tag{10}$$

$$I_{i,t}\leqslant I_{i,\max} \tag{11}$$

式中，$U_{i,t}$、$U_{i,\min}$和$U_{i,\max}$分别为第t时段第i个节点的电压及电压上、下限；$I_{i,t}$、$I_{i,\max}$分别为第t时段第i个支路的电流及其上限值。

5）冷热电与配电网之间的传输功率约束为

$$P_{\text{grid},\min}\leqslant P_{\text{grid},t}\leqslant P_{\text{grid},\max} \tag{12}$$

式中，$P_{\text{grid},\min}$、$P_{\text{grid},\max}$分别为与有源配电网的交互功率的最小和最大值；$P_{\text{grid},t}$为第t时段与有源配电网的交互功率。

6）风力发电机出力约束为

$$0\leqslant P_{\text{WT},t}\leqslant P_{\text{WT,on}} \tag{13}$$

式中，$P_{\text{WT,on}}$为风力发电机的额定功率；$P_{\text{WT},t}$为第t时段风力发电机的功率。

7）光伏机组出力约束为

$$0\leqslant P_{\text{PV},t}\leqslant P_{\text{PV,on}} \tag{14}$$

式中，$P_{\text{PV,on}}$为光伏机组的额定功率；$P_{\text{PV},t}$为第t时段光伏机组的功率。

8）燃气轮机出力约束为

$$0\leqslant P_{\text{PGU},t}\leqslant P_{\text{PGU,on}} \tag{15}$$

式中，$P_{\text{PGU,on}}$为燃气轮机的额定功率；$P_{\text{PGU},t}$为第t时段燃气轮机的功率。

9）辅助锅炉出力约束为

$$0\leqslant Q_{\text{b},t}\leqslant Q_{\text{b,on}} \tag{16}$$

式中，$Q_{\text{b,on}}$为辅助锅炉的额定功率；$Q_{\text{b},t}$为t时段辅助锅炉的功率。

10）电制冷机约束为

$$0\leqslant Q_{\text{Ec},t}\leqslant Q_{\text{Ec,on}} \tag{17}$$

式中，$Q_{\text{Ec,on}}$为电制冷机的额定功率；$Q_{\text{Ec},t}$为t时段电制冷机的功率。

12）加热线圈约束为

$$0\leqslant Q_{\text{l},t}\leqslant Q_{\text{l,on}} \tag{18}$$

式中，$Q_{\text{l,on}}$为加热线圈的额定功率；$Q_{\text{l},t}$为第t时段加热线圈的功率。

13）储能装置约束为

$$\left|P_{\text{s},t}\right|\leqslant P_{\text{s,on}} \tag{19}$$

$$\text{SOC}_{\min}\leqslant \text{SOC}_t\leqslant \text{SOC}_{\max} \tag{20}$$

式中，SOC_t为第t时段储能装置的荷电状态；$\text{SOC}_{\max}$、$\text{SOC}_{\min}$分别为储能装置荷电状态的上、下限；$P_{\text{s},t}$为第t时段用户储能装置的功率；$P_{\text{s,on}}$为储能装置的额定功率。

2.3 多目标优化的求解方法

所建立的优化模型和目标函数较为复杂，含有大量约束条件，且优化的问题包含离散和连续的变量，为求解该问题，本文采用粒子群优化算法对其进行求解[15]。粒子群算法的收敛性比普通算法快，而且搜索范围广，不容易陷入局部最优解[16]，因而被广泛的应用。粒子群算法的迭代公式为

$$v_{ij}^{(k+1)}=\omega^{(k)}v_{ij}^{(k)}+c_1\text{rand}(P_{\text{best}ij}^{(k)}-x_{ij}^{(k)})+c_2\text{rand}(G_{\text{best}j}^{(k)}-x_{ij}^{(k)}) \tag{21}$$

$$x_{ij}^{(k+1)}=x_{ij}^{(k)}+v_{ij}^{(k+1)} \tag{22}$$

式中，v_{ij}、x_{ij}分别为粒子i的第j维的飞行速度与位置；c_1、c_2为学习因子，取值为非负数；$P_{\text{best}ij}$为粒子i的第j维的局部最优位置；$G_{\text{best}j}$为第j维变量全局最优位置；rand为[0,1]间的随机数。

文中w为惯性权重，采用线性变化的权重，变化公式为

$$w = w_{\max} - \frac{t(w_{\max} - w_{\min})}{t_{\max}} \tag{23}$$

式中，$w_{\max}$、$w_{\min}$为w的最大和最小值，通常取$w_{\max}=0.9$，$w_{\min}=0.4$；t为当前的迭代步数；$t_{\max}$为最大的迭代步数。

本文中将两个冷热电联供系统和有源配电网的网损作为一个粒子，一天24 h中的每小时作为一个调度时间。算法流程图如图2所示。

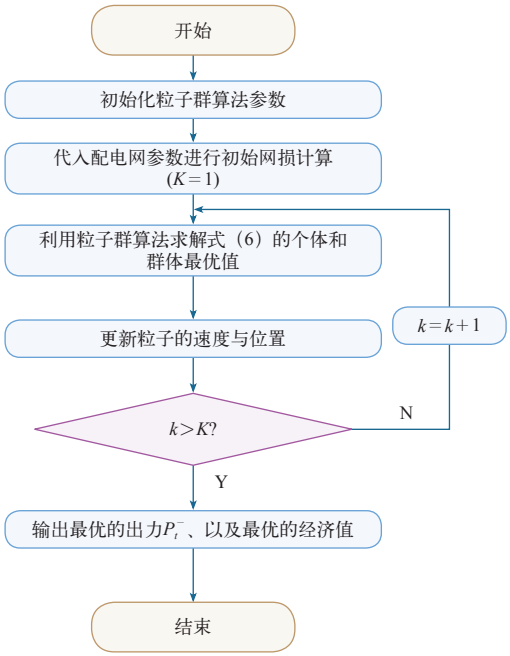

图2　算法流程图

3　算例分析

3.1　算例设计

本文中的有源配电网采用IEEE 33节点系统进行系统仿真[5]，如图3所示。该系统中总负荷：有功负荷为3 720 kW；无功负荷为2 000 kVar。节点1为变电站（电源点P_3），节点11和节点21分别接入两个冷热电系统（P_1和P_2）。节点3、节点4、节点6、节点9、节点14和节点31分别接入6个类型的负荷，其中两个为电负荷，其余为冷热负荷。山东省某示范园区冷热电系统的各设备参数及取值如下表所示。PSO算法中设置粒子数$N=50$；$c_1=$

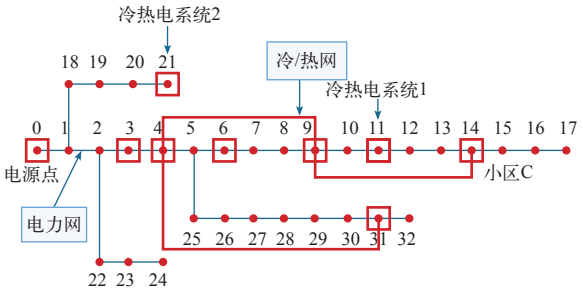

图3　IEEE 33节点系统示意图

$c_2=1.8$；迭代次数为200。

表　系统中各设备的参数

设备名称	参数/单位	数值
燃气机	$P_{PGU,on}$/kw	1 500
	η_g	0.63
风力发电机	$P_{PW,on}$/kw	100
光伏机组	$P_{PV,on}$/kw	50
储能装置	SOC/kW·h	200
	$P_{s,on}$/kw	50
电制冷机	$Q_{Ec,on}$/kW	200
吸收制冷机	$Q_{Ac,on}$/kW	400
辅助锅炉	$Q_{b,on}$/kW	800
	η_b	0.85
回收余热	$Q_{Hrs,on}$/kW	500
	η_{Hrs}	0.60
加热线圈	$Q_{l,on}$/kW	200
加热线圈	$Q_{l,on}$/kW	200
售电价	C_{s-}/(元/kW·h)	1.50
网损的电价	C_{loss}/(元/kW·h)	1.55

为了简化问题且不影响算法实现，算例中储能不参与调度。图4为日负荷、风力以及光伏出力预测曲线。

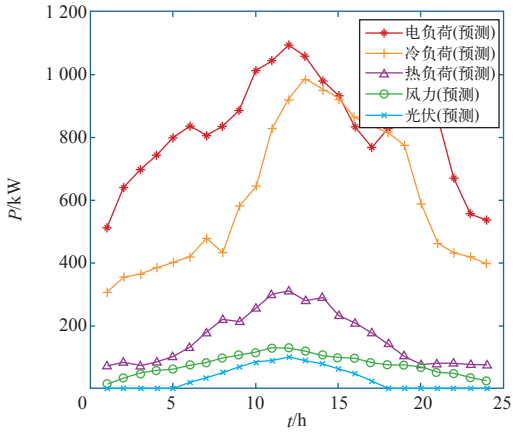

图4　夏季热、冷、电负荷及风、光出力预测值

由图4可以看出，用户的冷和电需求相对较大，而热负荷相对较小，因此本案例只考虑用户的冷和电需求。

3.2 配电网分时电价下的算例分析

考虑分时电价下，采用协调策略和未采用协调策略，对综合系统进行优化。分时电价如图5所示，优化结果如图6、图7所示。

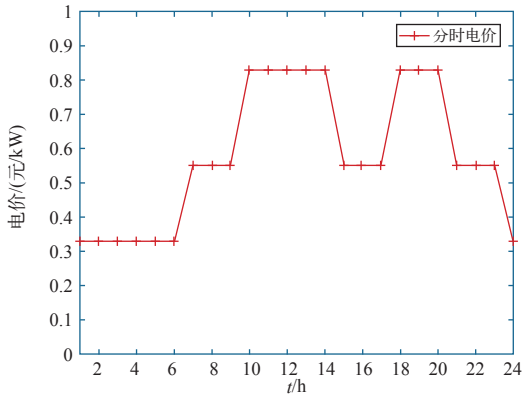

图5 分时电价

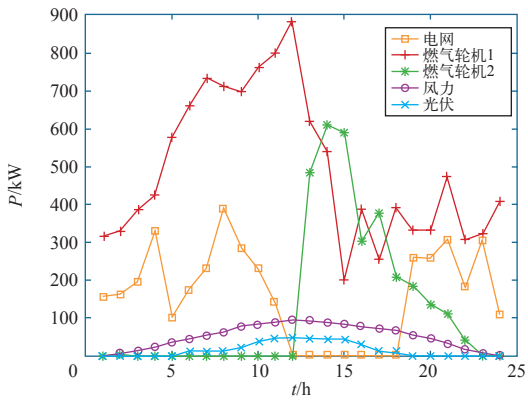

图6 协调策略下系统的出力

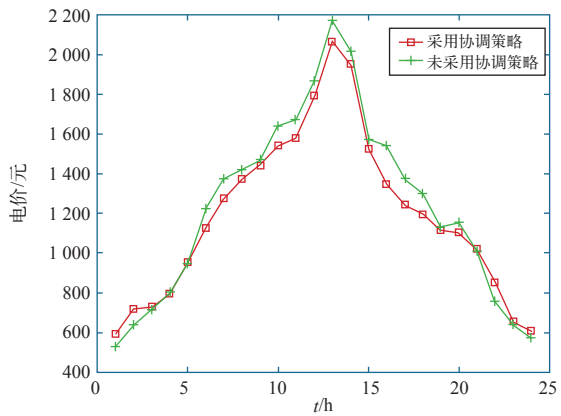

图7 不同电价下的优化结果

从图6中可以看出，在初始1:00～11:00内，主要由微型燃气轮机1和电网出力，而燃气轮机2基本上不出力，这是由于燃气轮机2的发电成本较高，而该时段电网的电价处于低谷，因此燃气轮机除了满足热负荷需求外，将不再运行；而该时段的电负荷由电价便宜的电网来满足。11:00～ 15:00时段，电网电价处于峰值，冷热负荷也较大，所以微型燃气轮机以最大出力的状态满足冷－热－电的需求。电网购电量降低0 kW，风能和光伏能提供的总功率为 142.93 kW，两台燃气发电机提供的总电功率为 1 120.26 kW，仍有 317.24 kW的备用容量。此时备用容量既能够满足电负荷的备用，也可以满足风能和太阳能由于预测误差产生的功率波动。15:00以后电网电价下降，考虑综合系统的经济性，所以发电成本较高的燃气轮机2出力减小，电网的出力增加。从图7中可以看出，在电网电价处于高峰期时，采用协调策略的综合系统比不采用协调策略的系统更为经济，这是因为电网高峰期时，电网的电价也处于高电价，协调策略下，冷热电联供系统与电网的交互更加频繁。考虑到全天的经济性后，因此采用分时电价的综合系统经济性更优。

3.3 冷热电联供系统采用不同燃气费率的算例分析

在采用配电网分时电价的基础上，考虑到不同的燃气费率结构下对综合系统的优化。天然气的费率结构如图8所示，系统的优化结果如图9、图10所示。

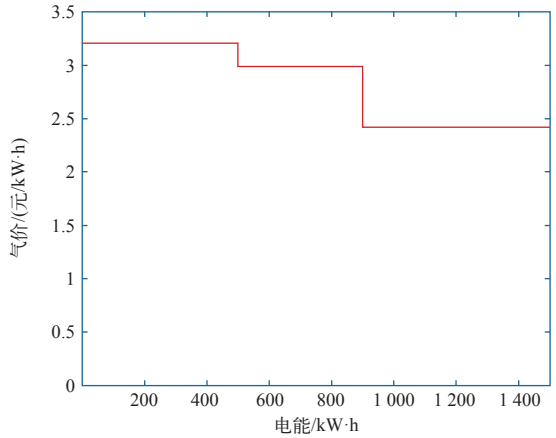

图8 天然气的费率结构

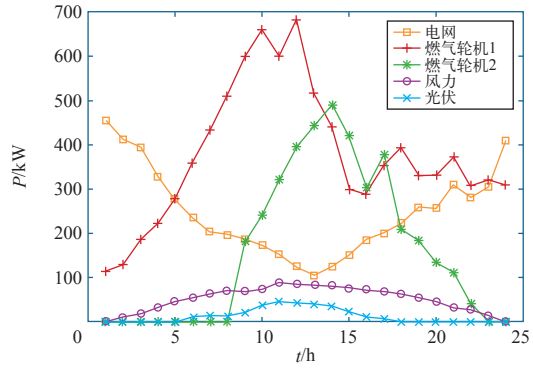

图9 不同费率下的系统出力

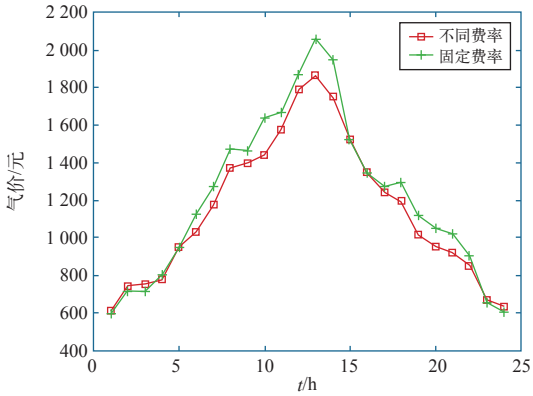

图10 不同天然气费率下的优化结果

从图9、图10中可以看出，1:00～9:00，由于电网的电价处于低谷，而天然气的价格较高，所以综合系统的电负荷主要由电网提供，而在这个过程中为了满足冷热负荷，只有发电成本较低的燃气轮机1出力，而燃气轮机2不出力。10:00～15:00，电网电价处于高峰期，根据天然气的费率，两台燃气轮机同时出力，发电成本相对较小，因此电网出力减少。此时两台燃气发电机提供的总电功率为910.25 kW，仍有178.84 kW的备用。15:00以后电网电价下降，考虑到天然气的费用，所以两台燃气轮机的出力都减小，而电网的出力增加。从图10中可以看出，除了在电网电价处于低谷时，采用不同天然气费率的综合系统的经济高于固定费率之外，其他时刻尤其是负荷高峰期时，经济性更低。考虑到全天的经济性后，因此采用不同天然气费率的综合系统经济性更优。

4 结束语

在有源配电网环境下，考虑多能源互补协调优化，建立了一种新型的综合系统优化调度模型。研究了综合系统的协调优化调度方法，基于用户的冷热电负荷特性，利用以电运行和以热运行策略混合使用，结合联供系统的运行成本、配电网的网损最小为优化目标，建立了多目标优化模型，考虑了电网的分时电价与天然气的费用，对综合系统的设备容量进行了优化。以山东省某示范园区的夏季负荷为例进行分析，算例仿真验证了模型和策略的有效性。根据仿真结果分析得出如下结论。

1）冷热电联供系统单独发电或者直接接入电网，而不采用优化策略，会导致系统的发电运行成本升高，并不利于经济调度。

2）提出的协调优化的策略能有效降低综合系统发电成本和配电网网损，从而加深配电网与冷热电联供系统之间的互动，对冷热电联供系统的经济调度、节能减排以及提高能源利用率都具有重要意义。

参考文献

[1] 吴昊轩．浅谈燃气热电冷联供技术及应用 [J]．科技创新与应用，2015 (23)：146-146.

[2] 王凌云，徐嘉阳，丁梦．基于自然选择－杂交PSO算法的微电网并网多目标优化调度 [J]．电气应用，2017，36 (16)：50-56.

[3] 王丽彬，李春晖，王佳伟，等．分布式电源及微网对中压配电网接线模式影响 [J]．电网与清洁能源，2015，31 (12)：106-113.

[4] Kanchev H，Lu D，Colas F，et al．Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2011，58 (10)：4583-4592.

[5] 熊焰，吴杰康，王强，等．风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法 [J]．中国电机工程学报，2015，35 (14)：16-24.

[6] 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．

[7] 芦思为，黄彦全，沈金锁，等．含冷热电联产的微电网经济运行控制策略的研究 [J]．电气应用，2017，36 (6)：26-31．

[8] 柳川，王宇拓，王林川，等．含冷热电联供系统微电网优化运行研究 [J]．电测与仪表，2015，52 (2)：31-37．

[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，2015，32 (20)：82-87．

[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]．中国电机工程学报，2012，33 (6)：8-14．

[11] 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．

[12] Liu Mingxi，Shi Yang，Fang Fang．A new operation strategy for CCHP systems with hybrid chillers [J]．Applied Energy，2012，95：164-173．

[13] 王成山，洪博文，郭力，等．冷热电联供微网优化调度通用建模方法 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (31)：26-33．

[14] 游大宁，夏滨，殷红旭，等．含不同类型分布式电源的配电网潮流计算 [J]．电气应用，2017，36 (11)：18-23．

[15] Gua Qunyin，Ren Hongbo，Gao Weijun，et al．Integrated assessment of combined cooling heating and power systems under different design and management options for residential buildings in Shanghai [J]．Energy and Buildings，2012，51：143-152．

[16] 杨佩佩，艾欣，崔明勇，等．基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分 [J]．电网技术，2009，33 (20)：39-40．

（收稿日期：2017－11－21）EA

(上接第17页)

[7] 李黎．分布式发电技术及其并网后的问题研究 [J]．电网与清洁能源，2010，26 (2)：55-59．

[8] Xu Xiaoyan，Huang Yuehui．Impact of dispersed PV generation on voltage rise of distribution grid [C]．International Conference on Power System Technology，2010：1-6．

[9] 裴玮，盛鹏，孔力，等．分布式电源对配电网供电电压质量的影响和改善 [J]．中国电机工程学报，2008，28 (13)：152-157．

[10] 何昌奇，邵龙，高杨，等．分布式电源并网后对电压分布影响的研究 [J]．中国电力，2014，47 (5)：88-92．

[11] 陈洪安琪．分布式电源对配电网的影响及解决措施研究 [D]．北京：华北电力大学，2015．

[12] Teng J H，Luor T S，Liu Y H．Strategic distributed generator placements for service reliability improvements [C]．IEEE Power Engineering Society Summer Meeting，21-25 July，2002：719-724．

[13] Brown R E，Pan Jiuping，Feng Xiaoming，et al．Sitting distributed generation to defer T&D expansion [C]．Transmission and Distribution Conference and Exposition，28 Oct-2 Nov，2001：622-627．

[14] 张曦，张宁，龙飞，等．分布式电源接入配网对其静态电压稳定性影响多角度研究 [J]．电力系统保护与控制，2017，45 (6)：120-125．

[15] 祖友华．分布式电源并网及其对电网的影响 [D]．北京：华北电力大学，2010．

[16] 李斌，刘天琪，李兴源．分布式电源接入对系统电压稳定性的影响 [J]．电网技术，2009，33 (3)：84-88．

[17] 方恒福，朱军，王金丽，等．功率因数对电压质量的影响 [J]．农村电气化，2012 (7)：5-7．

[18] 孟庭如．含有分布式电源的配电网调压方案研究 [D]．济南：山东大学，2016．

[19] 王以笑，张新昌，路进升，等．基于DIgSILENT的并网光伏发电系统的建模与仿真 [J]．电力系统保护与控制，2014，42 (3)：49-55．

（收稿日期：2017－08－24）EA