

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.11.005

## 面向电网的负荷控制与新型节能调度分析

龙虹毓,刘正发,侯兴哲,徐瑞林,张晓勇

(国网重庆市电力公司电力科学研究院,401123 重庆)

**摘要:**中国电网内主要存在热电联产和纯凝式两种燃煤火电机组。笔者提出了经由用户侧的热泵进行负荷控制,在两种火电机组之间实现新型节能调度的方法。首先,将采暖负荷由位于终端用户侧的分布式热泵和热水式散热器共同承担。其次,分别考虑了采暖热水的传输距离和热泵的电力消费两个影响因素。然后,在原采暖总负荷和非采暖电力消费不变的情况下,但实际需要的计算边界条件却从两种火电机组的出口被外延到终端用户处,等效于建立了新的热水与电力负荷约束条件,进而获得了较好的节能效益。最后通过模拟计算,进一步分析比较了具有不同性能系数的分布式热泵和空间热负荷分布分别对节能调度效益的影响。

**关键词:**采暖负荷;智能电网;热电厂;凝汽火电厂;节能调度;热泵采暖负荷控制;智能热电联产;纯凝汽火电机组

中图分类号:TM761

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2013)11-027-06

## Grid-oriented load control and an innovative energy-conservation dispatch

LONG Hongyu, LIU Zhengfa, HOU Xingzhe, XU Ruilin, ZHANG Xiaoyong

(State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

**Abstract:** There are mainly two kinds of plants in China, i. e. coal-fired cogeneration and condensing plant. The authors propose an energy-conservation dispatch between them, which is realized through space heating load control based on mass introduction of electric heat pumps (EHPs) on the users' side. Firstly, space heating service can be shared by heating radiators and EHPs through heating water or electricity as energy carriers. Secondly, the transmission distance of heating water and electricity consumption of EHPs for space heating are considered as the new variables. In addition, though the original space heating load and non-heating electricity load are kept same, the practical boundary conditions of space heating load and non-heating electricity load is expanded from the plants to the end users' side, which develops new constraints equivalently and results in the potential energy conservation dispatched. Finally through numerical simulation, the energy conservation is revealed to be affected by EHPs with various coefficient of performance (COP) and spatial distribution of space heating load.

**Key words:** space heating load; smart power grids; cogeneration plants; condensing power plants; energy conservation dispatch; heat pump space heating load control; intellegent combined heat and power generation; heat pump systems

收稿日期:2013-07-05

基金项目:国家电网公司科技项目资助(2013 渝电科技自 25 号)

作者简介:龙虹毓(1980-),男,博士后,高级工程师,主要从事电力系统调度运行研究,(E-mail) h. y. long2008@hotmail.com。

《节能发电调度办法实施细则》正在中国部分电网调度工作中执行,规定了燃煤热电联产机组与纯凝式机组之间的调度原则,即保证热电联产机组按“以热定电”发电。然而在采暖需求很大的冬季,热电联产机组的运行工况<sup>[1-4]</sup>,由于受一定的采暖负荷约束,在实际调度中,热电联产机组发电出力可调节范围十分有限。电网的用电负荷往往存在较大的高峰低谷差异:在高峰负荷时间,热电联产机组即使以最大发电出力,也难以满足电力负荷高峰需求;而在电网负荷低谷时间,热电联产仍然按照“以热定电”安排发电出力,而高效节能的纯凝式机组却被安排低负载运行,这种状况对电网的节能减排是不利的<sup>[1,5,6]</sup>。

上述情况的出现,是因为现有的燃煤热电联产机组与纯凝式机组之间的节能调度原则存在缺陷。即“以热定电”原则人为首先限定了采暖负荷都由热水承担,其余节能调度工作就是对发电出力的经济调度,而与热电联产机组的采暖出力无关。现有文献[7-11]中提出通过引入热泵,承担采暖或制冷负荷的技术,据此笔者提出节能调度新思路:1)在终端用户侧,由热泵消耗电力提供采暖,可以部分分担采暖热水消耗。2)供暖管道的传输距离带来了采暖热水传输延时,可以对采暖热水负荷和采暖电力负荷进行综合管理。针对燃煤热电联产机组和纯凝式火电机组,新型节能调度方法具体如下。

## 1 节能调度方法

### 1.1 新型节能调度控制方法

新型节能调度控制方法指出,需要增加两个优化变量,即热泵耗电和热水运输时间。这样不同用户的耗电、耗热量将随时间变化,最后在两种燃煤火电机组之间进行经济调度。这实际上是首先人为地优化了采暖热水和电力在热源和电源出口处的需求量,使他们成为随时间变化的量;为后续的经济调度提供了新的约束条件。相比较于现有的“以热定电”模式,为终端用户供暖的能量载体从过去的单一热水,变化到热水和电力联合服务,而热水负荷的将同时随时间空间变化。

### 1.2 数学模型

文中调度运行时间由式(1)转化为计算运行时间  $t$ 。热水管道距离被离散化为计算采暖热水传输距离  $l$ ,如式(2)所示。

$$t = \left[ \frac{D}{\tau} \right], \quad (1)$$

$$l = \left[ \frac{d}{v \cdot \tau} \right], \quad (2)$$

式中: $D$ 为调度运行时间,s; $\tau$ 为时间间隔,s; $d$ 为管道传输距离,m; $v$ 为水流动速率,m/s; $[\ ]$ 为取整符号。

基于采暖负荷调度模式,需要将采暖负荷从以热定电调度模式下的  $Q_{\text{CHP}}(t)$  减小到  $q_{\text{CHP}}(t)$ 。使得采暖负荷不再全部经由热电联产机组产出的采暖热水提供,仅有一部分由热电联产机组产出的热水提供,另外一部分则由分布式热泵提供。同时在采暖负荷调度模式下的新型节能调度中,总电力负荷变化到  $P_{\text{Load}}(t) + p_{\text{EHP}}^{\text{sum}}(t)$ 。其中  $p_{\text{EHP}}^{\text{sum}}(t)$  由式(3)表示,代表第  $t$  时段“受控点”处全部用户的热泵耗电量。前述各变量如式(3)~(8)所示。

$$p_{\text{EHP}}^{\text{sum}}(t) = \sum_{l=0}^L p_{\text{EHP}}(t, l), \quad (3)$$

$$q_{\text{EHP}}(t, l) = \text{COP}_{\text{EHP}} \cdot p_{\text{EHP}}(t, l), \quad (4)$$

$$0 \leq p_{\text{EHP}}(t, l) \leq \frac{Q_{\text{Load}}(l)}{\text{COP}_{\text{EHP}}}, \quad (5)$$

$$\Delta q_{\text{CHP}}(t) = Q_{\text{CHP}}(t) - q_{\text{CHP}}(t), \quad (6)$$

$$\Delta q_{\text{CHP}}(t) \cdot \eta_h = \sum_{l=0}^L q_{\text{EHP}}(t+l, l) \quad (t+l \leq T), \quad (7)$$

$$5 \leq q_{\text{CHP}}(t) \leq Q_{\text{CHP}}(t). \quad (8)$$

式中: $p_{\text{EHP}}(t, l)$ 是  $t$  时刻距离为  $l$  的用户的热泵负荷; $q_{\text{EHP}}(t, l)$ 是  $t$  时刻距离为  $l$  的用户的热泵供暖量,如果用户没有使用热泵采暖,或者在设定的调度运行时间  $T$  内热水无法传输到远端用户,  $q_{\text{EHP}}(t, l)$  取 0; $\text{COP}_{\text{EHP}}$ 为热泵的性能系数; $Q_{\text{Load}}(l)$ 为距离  $l$  的全体用户的热泵负荷; $\Delta q_{\text{CHP}}(t)$ 为第  $t$  时段热电联产机组热水出力变化; $\eta_h$ 为管道中热水的传输效率。

针对采暖能量载体的热水传输时间与电力传输时间存在时间差,热源热水不足的影响将经过时延才会传递到采暖终端用户,而这个时延随着采暖终端用户距离热源的远近而变化。因为终端用户即“受控点”对象之间的间隔距离为  $v \cdot \tau$ ,据此将终端用户离散化为  $0, 1, \dots, l, \dots, L$  个用户分组。如果  $\Delta q_{\text{CHP}}(t)$  是第 1 个用户的热泵消耗,热水输送到其所在地的时间消耗为一个时间间隔  $\tau$ ;因此,热水的不足会在第  $t+1$  时间影响到第 1 个用户组。同理,假设  $\Delta q_{\text{CHP}}(t)$  是第  $l$  个用户分组的热泵消耗,这些热水的不足将会在第  $t+l$  时间影响到第  $l$  用户。总体而言,第  $t$  时段热电联产机组采暖热水减少量将由  $0 \sim L$  用户的热泵来补充提供,具体来说是在  $t \sim t+L$  时段通过消耗电力负荷来补充供暖不足  $q_{\text{EHP}}(t, l)$ 。对于非 0 的  $q_{\text{EHP}}(t, l)$ ,是采用电力驱动热泵消耗电力来补充采暖的终端用户空间分布和利用时间分布。

在第  $t$  时段处在“源控点”的热电联产机组如果

减少热水输出,可以便于增加热电联产机组的发电出力调节范围,获得新的热电联产机组发电出力  $p_{\text{CHP}}(t)$ 。如式(9)、(10)所示在不同调度模式中,新型节能调度控制使得电力负荷发生了变化,但仍保持了不同调度模式下的发电、负荷平衡。

$$P_{\text{Load}}(t) = (P_{\text{CON}}(t) + P_{\text{CHP}}(t)) \cdot \eta_e, \quad (9)$$

$$P_{\text{Load}}(t) + p_{\text{EHP}}^{\text{sum}}(t) = (p_{\text{CON}}(t) + p_{\text{CHP}}(t)) \cdot \eta_e. \quad (10)$$

式中:  $\eta_e$  为供电效率。最后,设采暖负荷调度模式下的总能耗最小为优化目标:

$$f_{\text{sum}} = f_{\text{CHP}} + f_{\text{CHP}}^{\text{ramp}} + f_{\text{CON}} + f_{\text{CON}}^{\text{ramp}}, \quad (11)$$

式中:  $f_{\text{CHP}}$  和  $f_{\text{CON}}$  分别为热电机组和火电机组的负荷能耗,而  $f_{\text{CHP}}^{\text{ramp}}$  和  $f_{\text{CON}}^{\text{ramp}}$  则为机组爬坡能耗<sup>[12]</sup>。

笔者所提出的新型节能调度模式相对于现有的“以热定电”模式,节能效益如式(12)所示。其中,  $F_{\text{sum}}$  为“以热定电”模式下总能耗。

$$\Delta\eta = \frac{F_{\text{sum}} - f_{\text{sum}}}{F_{\text{sum}}} \times 100\%. \quad (12)$$

## 2 模拟计算

通过仿真模拟计算,可以显示笔者所提出的新型节能调度方法的合理性。模拟计算环境:CPU Intel Core 4 Duo 6.16GHz,内存 8G;软件 CPLEX。

笔者算例中包含:一台 300MW 纯凝式机组,2 台 135MW 热电联产机组。式(13)~(15)描述了该型热电联产机组运行工况<sup>[1]</sup>,而火电机组的能耗公式如式(16)和(17)<sup>[13]</sup>。

$$P_{\text{CHP}}^{\text{max}} = -0.281Q_{\text{CHP}} + 153, 0 \leq Q_{\text{CHP}} \leq 177; \quad (13)$$

$$P_{\text{CHP}}^{\text{min}} = 0.0044Q_{\text{CHP}}^2 - 0.7219Q_{\text{CHP}} + 92.8, \quad 0 \leq Q_{\text{CHP}} \leq 177; \quad (14)$$

$$F_{\text{CHP}} = 0.72Q_{\text{CHP}} + 2.47P_{\text{CHP}} + 7.37, \quad 0 \leq Q_{\text{CHP}} \leq 177; \quad (15)$$

$$B_{\text{CON}}(t) = \frac{P_{\text{CON}}(t)}{0.003313105P_{\text{CON}}(t) - 0.082266676}; \quad (16)$$

$$F_{\text{CON}} = \sum_{t=0}^T \frac{29.271P_{\text{CON}}(t)B_{\text{CON}}(t)\sigma}{3600}. \quad (17)$$

设时间间隔  $\tau$  为 5 min,总运行时长 5 h,共 60 个时段,  $T = 59$ 。中国城市供暖热水流速  $v$  为 2.5 m/s<sup>[14]</sup>,则设每个用户组之间的距离为 750 m;抽凝式热电联产机组到采暖终端用户的最长管道距离 9 km<sup>[12]</sup>,该供暖管道距离内的采暖用户可分为 13 个用户组,  $L = 12$ 。采用 2 台抽凝式热电联产机组供热,总的热负荷应为 354MW,针对采暖负荷高

峰位置距离热源的远近,利用正态分布函数和威布尔分布函数<sup>[15]</sup>构造热负荷分布,如图 1 所示。单独比较  $COP$  的影响时,取  $COP = 1 \sim 5$ ,且热负荷为近端型热负荷。比较热负荷的影响时,则固定  $COP = 5$ 。

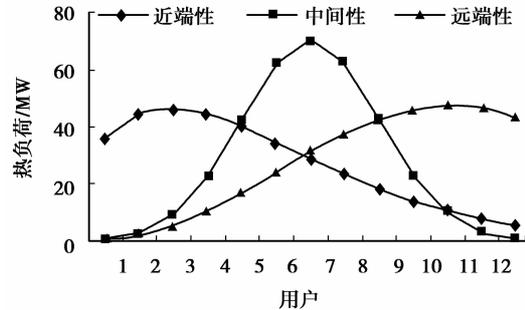


图 1 采暖负荷空间分布

## 3 结果与分析

### 3.1 热泵性能系数 $COP$ 的影响

图 2 为新节能调度方法的节能效益情况,可见新调度方法的节能效益最大可达 5%,证明笔者所提方法具有相当的节能潜力。

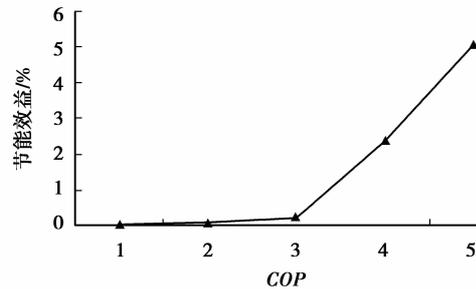
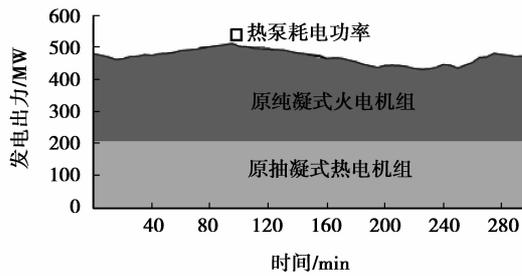


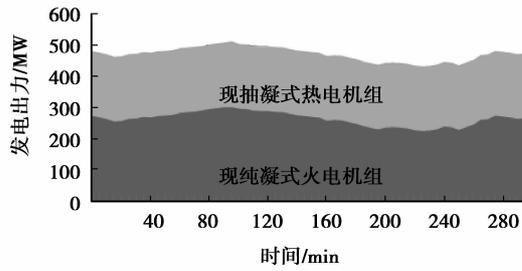
图 2 节能效益

前述节能效益会随着热泵性能系数  $COP$  的增大而增大。特别地,当  $COP > 3$  时,笔者所提方法才能获得可观的节能效益,节能效益超过 2%。

图 3 和图 4 分别代表了热泵性能系数  $COP$  较小和较大时两种典型的电力负荷分配结果。图(a)中,原有非采暖电力负荷由热电机组承担基荷及火电机组调峰运行承担,而热泵耗电功率则表示新增采暖电力负荷,二者构成新的电力负荷;图(b)中,在新的调度模式下,新的电力负荷在热电机组和火电机组之间重新分配。 $COP$  较小时,新调度模式下的电力负荷分配结果相比以热定电模式变化并不明显,新增采暖电力负荷很少;而  $COP$  较大时,新调度模式下的负荷分配形式发生了明显的改变:新增了大量的采暖电力负荷,且火电机组从原有的调峰运行状态转变为承担基荷,热电机组参与调峰任务,因而避免了火电机组运行在低负荷率的耗能状态,实现了较高的节能效益。

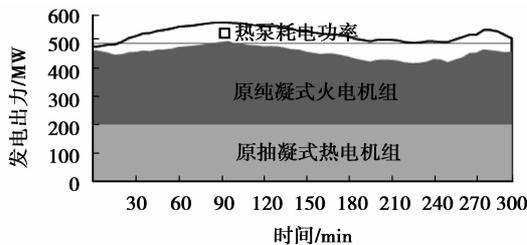


(a)以热定电模式

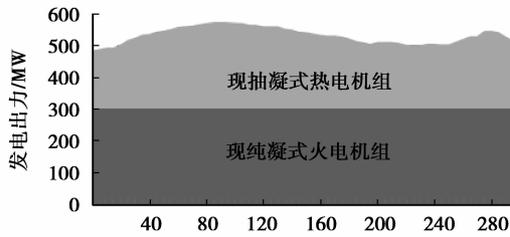


(b)新调度模式

图 3 COP=1 时电力负荷分配



(a)以热定电模式



(b)新调度模式

图 4 COP=5 时电力负荷分配

图 5 为热电联产热出力情况。COP 较小时,热电联产热出力变化很小,基本上满足全部的采暖负

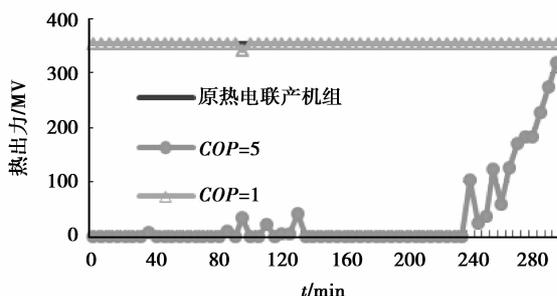


图 5 COP=1 和 5 时热电联产热出力

荷;而 COP 较大时,其热出力下降较多,剩余大部分采暖负荷则由热泵承担,由此带来节能效益及电力负荷分配形式的改变。

### 3.2 空间热负荷分布的影响

图 6 所示为 COP=5 时不同热负荷组合下的节能效益图,可见新的调度方式获得了很好的节能效益,高达 4.5%~5%,但随着热负荷高峰位置逐渐远离热源,节能效率会逐渐降低。

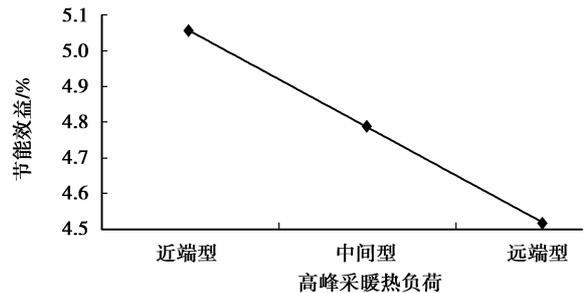
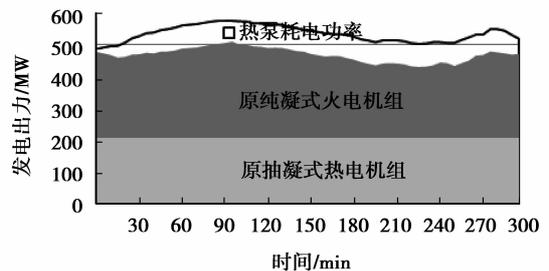
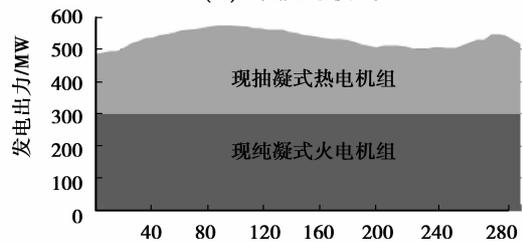


图 6 节能效益

图 7~图 9 分别为不同热负荷分布下的电力负荷分配情况,采用新调度模式后,如图 3(b)近端型热负荷分布下,火电机组出力完全平滑,负荷率 100%,而图 4(b)和图 5(b)中间型热负荷分布和远端型热负荷分布下,火电机组出力并没有达到完全平滑,在调度起始阶段,略有波动。对应于图 4(a)和图 5(a)可见,调度起始阶段,新增采暖电力负荷为 0,有别于图 3(a)所示的近端型热负荷分布下的热泵耗电情况。



(a)以热定电模式



(b)新调度模式

图 7 近端型热负荷下电力负荷分配

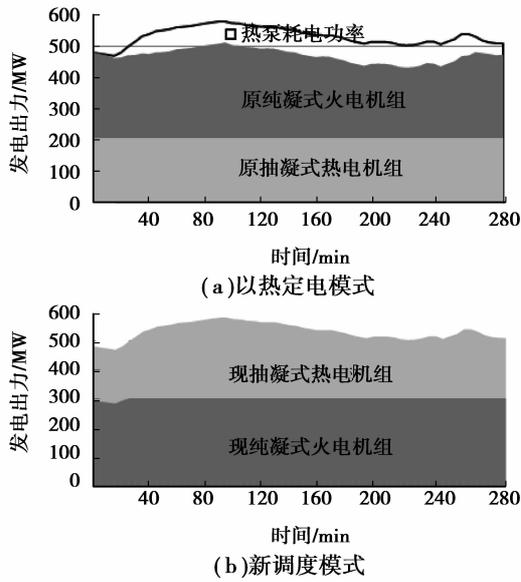


图 8 中间型热负荷下电力负荷分配

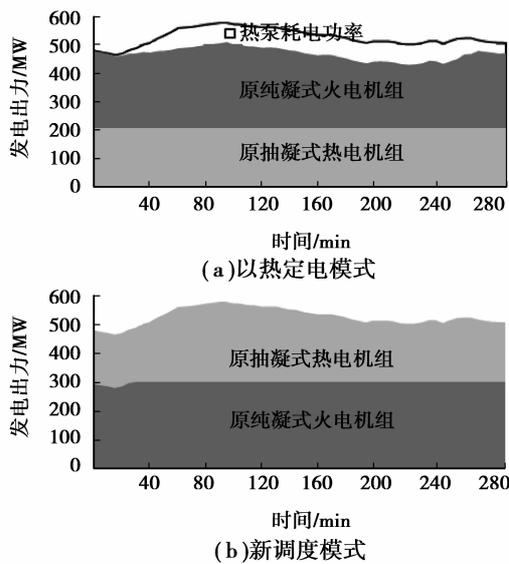


图 9 远端型热负荷下电力负荷分配

图 10~图 12 为不同空间热负荷分布下的采暖负荷时间空间分布情况,总的采暖负荷的空间分布制约了热泵采暖负荷在空间上的分布。这也可以用来解释上文中的电力负荷分配情况:由于新的调度模式引入了供暖距离为新的优化变量,由此带来了供暖的延时,而终端用户正是根据热水的延时时间,来确定开启热泵时间的。但是在调度开始阶段,远端用户延时时间较长,无法参与到新的负荷侧管理调度方式中,这样热负荷高峰距热源较远时,大量的供暖用户集中在距热源较远的地方,因此才出现了图 8 和图 9 中间型热负荷分布和远端型热负荷分布

下的电力负荷分配结果。

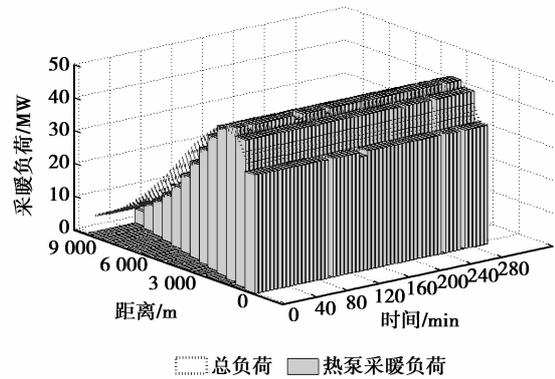


图 10 近端型采暖负荷时间空间分布

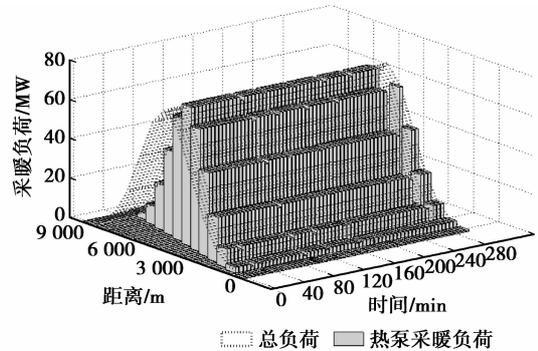


图 11 中间型采暖负荷时间空间分布

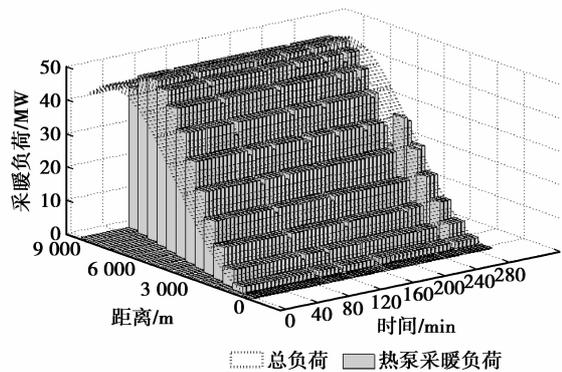


图 12 远端型采暖负荷时间空间分布

## 4 结 论

针对燃煤热电联产机组和纯凝式火电机组,笔者提出了一种新型节能调度方法。

1)在终端用户侧引入了热泵采暖技术,实现采暖能量载体从电力到热水的转化,将节能调度的对象从上述两种火电机组,外延到了终端用户,增加了调度控制的对象。另外在数学模型中,计入了热水传输时间和热泵耗电两个优化变量影响。

2) 由于采暖终端用户侧的分布式热泵的使用, 导致热电联产热水采暖负荷减少, 热泵耗电采暖负荷增加, 总的电力负荷增加, 从而改变了原来的电力负荷分配形式, 使得热电联产机组发电出力变化, 而火电机组出力变得平稳, 最终获得了节能效益。

3) 分布式热泵的性能系数  $COP$  影响节能调度的节能效果,  $COP$  越大, 节能效益越好, 当  $COP > 3$  时, 笔者所提方法才能获得可观的节能效益。

4) 采暖终端用户的热负荷分布影响了新型节能调度的节能效益, 热负荷高峰位置距离热源越近, 节能效益越好, 最高可达 5% 以上。

#### 参考文献:

- [1] 马建伟, 葛挺, 荆百林, 等. 热电联产机组的节能发电调度技术研究与实践[J]. 中国电力, 2009, 42(4): 14-19.  
MA Jianwei, GE Ting, JING Bailin, et al. The research and practice for energy conservation and emissions reduction dispatch of cogeneration unit [J]. Electric Power, 2009, 42(4): 14-19.
- [2] TOMASZ M, MROZ. Planning of community heating systems modernization and development [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28 (14/15): 1844-1852.
- [3] THORIN E, BRAND H, WEBER C. Long-term optimization of cogeneration systems in a competitive market environment[J]. Applied Energy, 2005, 81(2): 152-169.
- [4] UMMELS B C, GIBESCU M, PELGRUM E, et al. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 44-51.
- [5] 叶世杰, 肖智, 钟波, 等. 电力经济环境负荷调度的模糊多目标模型[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(9): 62-68.  
YE Shijie, XIAO Zhi, ZHONG Bo, et al. Fuzzy multi-objective model for Environmental/Economic Power Dispatch [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(9): 62-68.
- [6] 张谦, 俞集辉, 李春燕. 计及输电阻塞的发电公司最优竞价模型[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(12): 1461-1465.  
ZHANG Qian, YU Jihui, LI Chunyan. Optimal bidding models of power plants considering transmission congestion [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(12): 1461-1465.
- [7] CHUA K J, CHOU S K, YANG W M. Advances in heat pump systems: A review [J]. Applied Energy, 2010, 87 (12): 3611-3624.
- [8] BLARKE M B, LUND H. Large-scale heat pumps in sustainable energy systems: system and project perspectives[C] // Proceedings of the 3rd Dubrovnik Conference, June 5-10, 2005, Dubrovnik, Croatia. [S. l.]: Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 2005: 69-78.
- [9] PIERLUIGI M. Cogeneration systems with electric heat pumps: energy-shifting properties and equivalent plant modelling [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50 (8): 1991-1999.
- [10] 龙虹毓, 马建伟, 吴锴, 等. 含热电联产和风电机组的电网节能调度研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 18-22.  
LONG Hongyu, MA Jianwei, WU Kai, et al. Energy conservation dispatch of power grid with mass cogeneration and wind turbines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 18-22.
- [11] 孙纯武, 胡彦辉, 丁勇, 等. 地源热泵户型蓄冰中央空调的探讨[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2002, 25(8): 125-127.  
SUN Chunwu, HU Yanhui, DING Yong, et al. Discussion on ice-Storage centralized-air-conditioner with ground-source-heat-pump [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002, 25(8): 125-127.
- [12] WANG C, SHAHIDEHPOUR S M. Optimal generation scheduling with ramping costs [C] // Proceedings of 1993 Power Industry Computer Application Conference, May 4-7, 1993, Scottsdale, AZ. Piscataway: IEEE Press, 1993, 11-17.
- [13] 李今朝. 国产 300MW 火电调峰机组调峰方式的研究[D]. 河北: 华北电力大学, 2004.
- [14] 吕太, 王正. 热电厂供热范围的研究[J]. 沈阳工程学院学报: 自然科学版, 2008, 4(4): 306-309.  
Lü Tai, WANG Zheng. Discussion on heating range of thermal power plant [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering; Natural Science, 2008, 4(4): 306-309.
- [15] ZOBECK T M, GILL T E, POPHAM T W. A two parameter Weibull function to describe airborne particle size distributions [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(10): 943-955.

(编辑 王维朗)