

# 基于热网与建筑物储热解耦的调峰能力提升方案

李平<sup>1</sup>, 赵适宜<sup>2</sup>, 金世军<sup>2</sup>, 唱友义<sup>2</sup>, 王漪<sup>2</sup>, 李卫东<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁省大连市 116024; 2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁省沈阳市 110006)

**摘要:** 针对中国“三北”地区供热期热电联产机组“以热定电”运行模式所形成的电热耦合运行约束造成系统调峰能力不足进而导致大量弃风的问题, 提出了利用热网与建筑物储热来解耦机组电热耦合运行约束的方案。通过对促进风电消纳的潜力估算以及与现有几种消纳弃风方案的投资对比, 分析了所提方案的技术可行性, 并通过构建热电联合调度模型给出了技术实现方法。以东北电力调峰辅助服务市场专项改革试点为背景, 结合市场运营规则的归纳与抽象, 分析了方案实施对市场各主体的出力和深度调峰辅助服务费用产生的影响, 在此基础上阐述了实施该方案给各主体个体和系统整体所带来的效益。通过算例进行的验证表明, 在个体层面热电联产机组有意愿利用所提方案主动参与调峰, 进而能够在整体层面实现系统稀缺调峰资源的优化配置。

**关键词:** 热网与建筑物储热; 电热耦合; 调峰; 辅助服务; 风电消纳; 效益分析

## 0 引言

在规模化风电和高比例热电联产(CHP)并存的中国“三北”地区, 供热期的热电联产机组运行在“以热定电”模式, 其热出力受到系统热负荷的制约而变化较小, 其电出力又因机组受到热出力的约束使得调节范围较小而始终处于较高水平, 形成电热耦合运行约束, 这将导致系统调峰能力不足。在风电高峰时段, 虽然其他纯凝火电等机组已经运行在最小出力状态, 但是风电并网空间仍然有限, 造成严重弃风。

解耦热电联产机组电热耦合运行约束, 以拓展机组调峰区间, 进而提升系统调峰能力是解决“三北”地区供热期弃风问题的关键所在。目前已有方案主要是通过包含电、热、冷、氢等能源的多能互补系统优化运行实现多种能源的相互转化和多种形式的能量存储<sup>[1-5]</sup>, 其中又以热电联合系统中引入灵活性装置(如蓄热罐等人工储热装置以及电锅炉和电热泵等电热转换装置)最为典型, 这些方案需要较大的额外投资和建设用地。考虑到热网蕴藏的热水热容量巨大以及建筑物围护结构的保温效果显著, 热网与建筑物可以被认为是一种天然储热装置, 并由于其拥有的巨大储热能力而备受关注<sup>[6-10]</sup>。受人工储热装置启发, 可以利用热网与建筑物的储热

能力解耦热电联产机组的电热耦合运行约束以提升系统调峰能力进而提高系统风电消纳水平, 该方案的最显著优势就是由于热网与建筑物已经存在于城镇集中供热基础设施中而无需较大额外投资, 因此具有巨大的应用潜力。

该方案的实施, 不仅需要在技术上可行, 还需要在经济上对方案中各主体进行一定的激励。因此有必要围绕实施方案在调峰辅助服务市场中产生的效益展开研究, 以明确该方案的经济激励作用, 而目前关于该方面的研究未见报道。这项研究需要在具体的调峰辅助服务市场为背景开展。由于各国电力市场的实际情况均不相同, 需根据自身特殊情况制定相应的市场机制。文献[11-12]对欧洲英格兰-威尔士、西班牙、希腊和北欧五国、美国加州、澳大利亚以及阿根廷的辅助服务市场进行了总结分析。国内的学者针对调峰辅助服务的有偿调峰界限划分和补偿模型改进等方面进行了大量研究。文献[13]提出了基于凸包重心法的有偿与无偿调峰划分方法和判断准则。文献[14]基于机组的调峰能力和平均调峰系数建立了深度调峰补偿方法。文献[15]通过引入调峰容量责任制建立了节能调度模式下调峰容量补偿新方法。文献[16]采用K-means聚类分析建立了有偿与无偿调峰划分界限, 并引入机组调峰能力实现系数建立了调峰辅助服务补偿模型。针对调峰辅助服务的研究颇多, 但国内目前仍没有完全建立起高效的调峰辅助服务市场, 其中东北电力调峰辅助服务市场专项改革试点<sup>[17]</sup>自运行以来取得了良好

收稿日期: 2018-01-26; 修回日期: 2018-04-21。

上网日期: 2018-06-04。

国家自然科学基金资助项目(51607021)。

的效果<sup>[18-19]</sup>。

本文针对供热期系统调峰困难进而导致严重弃风的问题,提出了基于热网与建筑物储热解耦提升系统调峰能力的方案。在对所提方案技术可行及实现进行研究的基础上,依托东北电力调峰辅助服务市场,对实施该方案的效益展开分析,旨在从个体层面激励热电联产机组主动参与调峰,进一步从整体层面实现系统稀缺调峰资源的优化配置,最终促进风电消纳。

## 1 所提方案技术可行及实现

### 1.1 技术可行性

#### 1.1.1 促进风电消纳潜力估算

以“三北”地区中气候寒冷、供热系统发达、弃风尤其严重的吉林省为例,通过对弃风时段热电联产机组在满足供热质量的前提下所能够降低的发电量,也就是风电可并网的额外电量进行计算,并与供热期的总弃风电量进行对比,来估算所提方案促进风电消纳的潜力。计算结果表明,采用所提方案可为风电提供的最大额外并网电量占供热期总弃风电量的比例达42.4%,潜力巨大。详细计算过程请参见附录A。

#### 1.1.2 几种消纳弃风方案投资对比

所提方案最明显的优势在于,在无需较大额外投资的条件下就可以解耦热电联产机组的电热耦合运行约束进而提升系统调峰能力。通过附录A中与基于蓄热罐、电锅炉、电热泵和抽水蓄能这几种消纳弃风方案的对比,凸显了所提方案在投资成本方面的显著优势。

综上所述,利用热网与建筑物的储热能力解耦热电联产机组电热耦合运行约束的方案,促进风电消纳的潜力巨大,同时无需较大规模的额外投资。

### 1.2 技术实现

本节在分别对热网与建筑物特性进行建模的基础上,构建了基于二者储热的热电联合调度模型,旨在通过电热协调控制打破热电联产机组的电热耦合运行约束,进而提升系统调峰能力,最终提高系统风电消纳水平并降低系统总运行成本。

#### 1.2.1 目标函数

该模型的目标函数是包含火电机组煤耗成本和弃风惩罚成本的系统总运行成本最小:

$$\min \sum_{t \in N} \left( \sum_{i \in S^{\text{chp}}} C_{i,t}^{\text{chp}} + \sum_{i \in S^{\text{con}}} C_{i,t}^{\text{con}} + \sum_{i \in S^{\text{wind}}} C_{i,t}^{\text{wind}} \right) \quad (1)$$

式中: $N$ ,  $S^{\text{chp}}$ ,  $S^{\text{con}}$ ,  $S^{\text{wind}}$  分别为调度时段及热电联产、纯凝火电、风电机组编号所构成的集合; $t$  为调度时段编号; $i$  为机组编号; $C_{i,t}^{\text{wind}}$  为风电机组的弃风

惩罚成本; $C_{i,t}^{\text{chp}}$  和  $C_{i,t}^{\text{con}}$  分别为热电联产和纯凝火电机组(CON)的煤耗成本,表示为其电、热出力的二次函数,即

$$C_{i,t}^{\text{chp}} = a_i P_{\text{chp},i,t}^2 + b_i H_{\text{chp},i,t}^2 + c_i P_{\text{chp},i,t} H_{\text{chp},i,t} + d_i P_{\text{chp},i,t} + e_i H_{\text{chp},i,t} + f_i \quad (2)$$

$$C_{i,t}^{\text{con}} = a_i P_{\text{con},i,t}^2 + b_i P_{\text{con},i,t} + c_i \quad (3)$$

$$C_{i,t}^{\text{wind}} = \sigma_i (P_{\text{wind},i,t}^{\text{fore}} - P_{\text{wind},i,t}) \quad (4)$$

式中: $P_{\text{chp},i,t}$  和  $H_{\text{chp},i,t}$  分别为热电联产机组的电和热出力; $P_{\text{con},i,t}$  为纯凝火电机组的电出力; $P_{\text{wind},i,t}$  为风电机组的出力; $P_{\text{wind},i,t}^{\text{fore}}$  为风电预测出力; $a_i \sim f_i$  为火电机组的煤耗系数; $\sigma_i$  为弃风惩罚系数。

#### 1.2.2 电力系统相关约束

电力系统相关约束包括系统有功平衡约束、各机组爬坡率约束和各机组有功出力约束等。其中系统有功平衡、各机组爬坡率以及纯凝火电和风电机组的有功出力这些约束条件与传统的不考虑热网与建筑物储热的调度模型无异<sup>[2,6-7,9-10]</sup>,这里不再列出。

本节重点分析热电联产机组电热运行特性所体现出来的电、热出力约束。东北电网普遍采用抽汽凝汽式热电联产机组,其可行运行区域如图1中多边形ABCD所示,边界AB、BC、CD和DA分别表示机组的最大进汽工况、最小凝汽工况(斜率为 $c_{m,i}$ ,近似于背压工况)、最小进汽工况和纯凝工况,斜平行线族(斜率为 $c_{v,i}$ )表示在不同进汽量工况下的电、热出力关系<sup>[2,20]</sup>。东北地区供热期气温较低,机组的热出力 $H_{\text{chp},i,t}$  始终维持在接近最大值 $H_{\text{chp},i,t}^{\text{max}}$  的水平,对应的电出力调节区间EF比较接近点B,调峰能力非常有限。

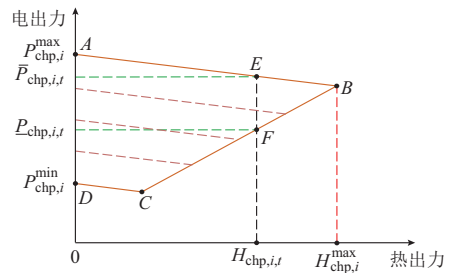


图1 热电联产机组可行运行区域  
Fig.1 Feasible operation area of combined heat and power units

该可行运行区域可以直观地反映出机组的电热运行特性,通过电、热出力约束描述为:

$$\begin{cases} P_{\text{chp},i,t} \geq \max\{P_{\text{chp},i,t}^{\text{min}} - c_{v,i} H_{\text{chp},i,t}, P_{\text{chp},i,t}^{\text{co}} + c_{m,i} H_{\text{chp},i,t}\} \\ P_{\text{chp},i,t} \leq P_{\text{chp},i,t}^{\text{max}} - c_{v,i} H_{\text{chp},i,t} \end{cases} \quad (5)$$

$$0 \leq H_{\text{chp},i,t} \leq H_{\text{chp},i,t}^{\text{max}} \quad (6)$$

式中:  $P_{\text{chp},i}^{\max}$  和  $P_{\text{chp},i}^{\min}$  分别为机组的最大和最小电出力;  $P_{\text{chp},i}^{\text{co}}$  为 BC 在纵轴上的截距。

### 1.2.3 热力系统相关约束

本节结合热力学基本原理和电力优化调度理论对热网与建筑物的储热特性进行抽象建模, 形成热力系统约束条件。其中, 热网的储热特性主要表现为管道中热水流动的时间延迟特性, 热水热量在管道入口处的变化要经过一定的延迟时间才能反映到出口处, 因此同一时段进入和流出管道的热水热量未必相等, 使得管道中热水储存的总热量升高(或降低), 对应储热(或放热)情形, 通过热水温度变化来体现; 建筑物的储热特性主要表现为室内温度的可调节特性, 进入建筑物的热量高于(或低于)耗散到室外空气中的热量, 使得建筑物围护结构和室内空气中储存的总热量升高(或降低), 对应储热(或放热)情形, 通过室内温度的升高(或降低)来体现。

#### 1.2.3.1 热网特性约束

集中供热的质调节方式指的是保持热网循环水的质量流率不变, 仅通过改变热源热电联产机组处的供水温度来适应室外环境温度的变化, 其水力工况稳定、控制管理方便。由于在用户侧缺少控制设备, 目前我国大部分集中供热系统都采用质调节方式<sup>[8]</sup>。鉴于此, 本文围绕集中供热质调节方式展开, 热网特性约束主要包括以下五个方面。

##### 1) 管道中热水温度损耗和时间延迟约束

热水在管道内流动过程中与外界土壤发生热交换, 同时受到流速的限制, 其在管道出口和入口处的温度之间存在一定的损耗和时间延迟:

$$T_{p,k,t+\lambda_{p,k}}^{\text{out}} = T_{p,k}^{\text{soil}} + (T_{p,k,t}^{\text{in}} - T_{p,k}^{\text{soil}}) \exp\left(-\frac{2\pi\mu_{p,k}L_{p,k}R_{p,k}}{c_w G_{p,k}}\right) \quad (7)$$

$$\lambda_{p,k} = \text{round}\left(\frac{\pi\rho_w L_{p,k} R_{p,k}^2}{G_{p,k} \Delta t}\right) \quad (8)$$

式中:  $k$  为管道编号;  $T_{p,k,t}^{\text{in}}$  和  $T_{p,k,t+\lambda_{p,k}}^{\text{out}}$  分别为管道入口和出口处的热水温度, 这里假设热水流入管道的一侧为入口, 流出管道的一侧为出口;  $T_{p,k}^{\text{soil}}$  为土壤温度;  $c_w, \rho_w, G_{p,k}$  分别为热水的比热容、密度和质量流率;  $\mu_{p,k}, L_{p,k}, R_{p,k}$  分别为管道的热损失系数、长度和半径;  $\lambda_{p,k}$  为热水流经管道的延迟时间对调度时段间隔  $\Delta t$  的倍数经过四舍五入处理的整数值。

##### 2) 热功率与水流温度的关系约束

管道入口和出口处的热水热功率  $H_{p,k,t}^{\text{in}}$  和  $H_{p,k,t}^{\text{out}}$  与其温度之间的关系分别为:

$$H_{p,k,t}^{\text{in}} = c_w G_{p,k} T_{p,k,t}^{\text{in}} \quad (9)$$

$$H_{p,k,t}^{\text{out}} = c_w G_{p,k} T_{p,k,t}^{\text{out}} \quad (10)$$

##### 3) 供回水温度限制约束

供回水管道中热水温度需限制在一定范围内:

$$T_p^{\min} \leq T_{p,k,t}^{\text{out}} < T_{p,k,t}^{\text{in}} \leq T_p^{\max} \quad (11)$$

式中:  $T_p^{\min}$  和  $T_p^{\max}$  分别为管道中允许热水温度的最小和最大值。

##### 4) 节点温度混合规律约束

流入同一个节点的所有管道的热水在该节点处充分混合, 流出该节点的所有管道的热水温度均等于该混合温度:

$$\begin{cases} \sum_{k \in S_n^{\text{pipe},\text{out}}} c_w G_{p,k} T_{p,k,t}^{\text{out}} = c_w T_{\text{mix},n,t} \sum_{k \in S_n^{\text{pipe},\text{out}}} G_{p,k} \\ T_{p,k,t}^{\text{in}} = T_{\text{mix},n,t} \quad \forall k \in S_n^{\text{pipe},\text{in}} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $n$  为管道交叉节点编号;  $T_{\text{mix},n,t}$  为节点混合温度;  $S_n^{\text{pipe},\text{in}}$  和  $S_n^{\text{pipe},\text{out}}$  分别为入口和出口与节点  $n$  相连的所有管道编号所构成的集合。

##### 5) 热源-热网的热量传递关系约束

在热源侧, 热电联产机组热出力通过换热器将与机组相连的回水管道中热水加热并送入供水管道, 热量从热源传递给热网, 其数学描述为:

$$H_{\text{chp},i,t} = \eta_{\text{chp},i} (H_{p,k_1,t}^{\text{in}} - H_{p,k_2,t}^{\text{out}}) \quad (13)$$

式中:  $\eta_{\text{chp},i}$  为热电联产机组向热网传热的换热器热效率;  $k_1$  和  $k_2$  分别为与热电联产机组  $i$  相连的供水和回水管道编号。

#### 1.2.3.2 建筑物特性约束

##### 1) 热网-建筑物热量传递关系约束

在热负荷侧, 热水通过与建筑物相连的供水管道进入建筑物散热器而后进入回水管道, 热网中热量通过散热器传递给室内空气, 以保证建筑物的热量供应, 相当于建筑物的热源, 其数学描述为:

$$H_{\text{hr},j,t} = \eta_{\text{hr},j} (H_{p,k_3,t}^{\text{out}} - H_{p,k_4,t}^{\text{in}}) \quad (14)$$

式中:  $j$  为建筑物编号;  $k_3$  和  $k_4$  分别为与建筑物  $j$  相连的供水和回水管道编号;  $H_{\text{hr},j,t}$  为建筑物散热器的散热功率;  $\eta_{\text{hr},j}$  为建筑物散热器的散热效率。

##### 2) 室内温度变化规律约束

建筑物室内温度在散热器散热、室内人员活动和照明等设备形成的内扰散热以及室内外空气热交换造成的热消耗的共同作用下, 变化规律为:

$$T_{b,j,t+1}^{\text{id}} = T_{b,j,t}^{\text{od}} + \frac{H_{\text{hr},j,t} + H_{\text{td},j}}{\chi_{\text{bt},j}} + \left( T_{b,j,t}^{\text{id}} - T_{b,j,t}^{\text{od}} - \frac{H_{\text{hr},j,t} + H_{\text{td},j}}{\chi_{\text{bt},j}} \right) \exp\left(-\frac{\Delta t}{t_{\text{bs},j}}\right) \quad (15)$$

式中:  $T_{b,j,t}^{\text{id}}$  和  $T_{b,j,t}^{\text{od}}$  分别为建筑物的室内和室外温度;  $H_{\text{td},j}$  为建筑物的内扰散热功率;  $\chi_{\text{bt},j}$  和  $t_{\text{bs},j}$  分别为建筑物的单位温差传热系数和热储备系数。

### 3) 室内温度波动范围约束

热电联产机组热出力的调整最终会引起建筑物室内温度的波动,为保证供热质量,室内温度要限制在一定范围之内:

$$T_{b,j}^{\text{id},\min} \leq T_{b,j,t}^{\text{id}} \leq T_{b,j}^{\text{id},\max} \quad (16)$$

式中:  $T_{b,j}^{\text{id},\min}$  和  $T_{b,j}^{\text{id},\max}$  分别为建筑物室内温度允许波动范围的最小和最大值。

以上建立了考虑热网与建筑物储热的热电联合调度模型(记为 CPB-CHPD 模型),对于不考虑二者储热的传统调度模型(记为 CED 模型),其目标函数和电力系统相关约束条件与前者相同,但热力系统相关约束条件不同,需用式(17)替换式(7)至式(16)。

$$\begin{cases} H_{\text{chp},i,t} = \sum_{j \in S_{\text{chp},i}^{\text{bui}}} H_{\text{hr},j,t} \\ H_{\text{hr},j,t} = \lambda_{\text{bt},j} (T_{b,j}^{\text{st}} - T_{b,j,t}^{\text{od}}) \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $T_{b,j}^{\text{st}}$  为建筑物室内最低标准供暖温度;  $S_{\text{chp},i}^{\text{bui}}$  为热电联产机组  $i$  所负责的供热区域内所有建筑物编号所构成的集合。

## 2 实施所提方案对调峰辅助服务各主体的影响分析

本节以东北电力调峰辅助服务市场专项改革试点为背景,围绕实施所提方案对调峰辅助服务各主体的影响展开对比分析。考虑到运营规则中的相关内容更多地以文字形式进行表述,概述性较强而不便于理解,为此首先对该运营规则中关于深度调峰辅助服务交易的定价、补偿与分摊机制等内容进行抽象与归纳,通过数学公式和图表的形式直观地展现出来,详细内容请参见附录 B。

### 2.1 对各主体出力的影响

运营规则中规定,电力调度机构在日内优先调用各主体的基本义务调峰辅助服务,待调峰容量不足时继续调用深度调峰辅助服务。

#### 2.1.1 基本义务调峰辅助服务范畴

考虑热网与建筑物储热前后,系统调用各主体的基本义务调峰辅助服务后的情形如图 2 所示。

##### 1) 非弃风时段

在非弃风时段,全网电负荷高、风电出力低,同时热负荷低,使得热电联产机组电、热出力低,对于 CED 和 CPB-CHPD 调度模式而言,通常风电都可以全部并网。但是,CPB-CHPD 调度模式中热电联产机组由于提前增加热出力向热网与建筑物中储热,使得机组的电、热出力高于 CED 调度模式。

##### 2) 弃风时段

在弃风时段,全网电负荷低、风电出力高,同时

热负荷高,使得热电联产机组电、热出力高,对于 CED 和 CPB-CHPD 调度模式而言,通常风电都不能全部并网。但是,CED 调度模式中热电联产机组的热出力受到热负荷的严格制约而与其逐时相等,机组的强迫电出力始终维持在较高水平,挤占了风电并网空间,造成较大弃风;CPB-CHPD 调度模式中热网与建筑物的储热作用使得机组的热出力可以降低到热负荷以下,热量不足部分由热网与建筑物放热进行适当补充,这样机组的强迫电出力得以在 CED 调度模式基础上大幅降低,增大了风电并网空间。

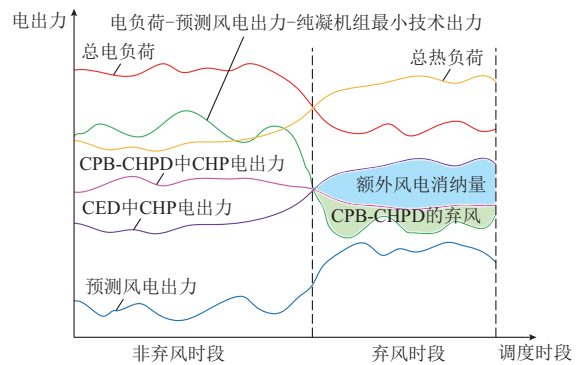


图 2 考虑热网与建筑物储热的基本义务调峰情形  
Fig.2 Basic peak regulation case considering heat storage of district heating network and buildings

因此,在基本义务调峰辅助服务范畴内,CPB-CHPD 与 CED 调度模式相比:在非弃风时段,热电联产机组的电、热出力升高,风电出力不变,纯凝火发电机组的电出力因系统有功平衡约束而降低;在弃风时段,热电联产机组的电、热出力降低,风电出力升高,纯凝火发电机组的电出力始终维持在基本义务调峰的最小机组出力不变。

#### 2.1.2 深度调峰辅助服务范畴

##### 1) 非弃风时段

在非弃风时段,系统无需火电机组深度调峰就可以使得风电全部并网,此时各机组出力情况与基本义务调峰情形相同。

##### 2) 弃风时段

在弃风时段,为了进一步减少弃风,需要火电机组提供深度调峰辅助服务。

对于 CED 调度模式而言,热电联产机组的电、热出力受到热负荷严格制约无法在基本义务调峰范围内降低电出力,更不能进行深度调峰。

对于 CPB-CHPD 调度模式而言,在“三北”地区供热期“风热冲突”的特殊背景下,为了最大化消纳风电,热电联产机组已尽可能地发挥基本义务调峰能力,大多数情况下为保证供热质量而不能继续进

行深度调峰。因此,通常系统深度调峰辅助服务由纯凝火电机组提供,由热电联产和风电机组使用。

针对弃风时段,在基本义务调峰和深度调峰辅助服务范畴内,CED 和 CPB-CHPD 调度模式的系统有功平衡分别表述如下:

$$\begin{cases} \sum P_{\text{chp},i,t}^{\text{CED}} + \sum P_{\text{con},i,t}^{\text{CED}} + \sum P_{\text{wind},i,t}^{\text{CED}} = \sum P_{\text{load},i,t} \\ \sum P_{\text{chp},i,t}^{\text{CED,deep}} + \sum P_{\text{con},i,t}^{\text{CED,deep}} + \sum P_{\text{wind},i,t}^{\text{CED,deep}} = \\ \sum P_{\text{load},i,t} \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \sum P_{\text{chp},i,t}^{\text{CPB}} + \sum P_{\text{con},i,t}^{\text{CPB}} + \sum P_{\text{wind},i,t}^{\text{CPB}} = \sum P_{\text{load},i,t} \\ \sum P_{\text{chp},i,t}^{\text{CPB,deep}} + \sum P_{\text{con},i,t}^{\text{CPB,deep}} + \sum P_{\text{wind},i,t}^{\text{CPB,deep}} = \\ \sum P_{\text{load},i,t} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $P_{\text{chp},i,t}^{\text{CED,deep}}$ ,  $P_{\text{con},i,t}^{\text{CED,deep}}$ ,  $P_{\text{wind},i,t}^{\text{CED,deep}}$  和  $P_{\text{chp},i,t}^{\text{CPB,deep}}$ ,  $P_{\text{con},i,t}^{\text{CPB,deep}}$ ,  $P_{\text{wind},i,t}^{\text{CPB,deep}}$  分别为 CED 和 CPB-CHPD 调度模式中热电联产、纯凝火电和风电机组在深度调峰辅助服务范畴内的电出力;  $P_{\text{load},i,t}$  为系统电负荷。

可知,CED 和 CPB-CHPD 调度模式中纯凝火电机组需要提供的深度调峰容量分别为:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{con},t}^{\text{CED,deep}} &= \sum P_{\text{con},i,t}^{\text{CED}} - \sum P_{\text{con},i,t}^{\text{CED,deep}} = \\ &\left( \sum P_{\text{wind},i,t}^{\text{CED,deep}} - \sum P_{\text{wind},i,t}^{\text{CED}} \right) + \\ &\left( \sum P_{\text{chp},i,t}^{\text{CED,deep}} - \sum P_{\text{chp},i,t}^{\text{CED}} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{con},t}^{\text{CPB,deep}} &= \sum P_{\text{con},i,t}^{\text{CPB}} - \sum P_{\text{con},i,t}^{\text{CPB,deep}} = \\ &\left( \sum P_{\text{wind},i,t}^{\text{CPB,deep}} - \sum P_{\text{wind},i,t}^{\text{CPB}} \right) + \\ &\left( \sum P_{\text{chp},i,t}^{\text{CPB,deep}} - \sum P_{\text{chp},i,t}^{\text{CPB}} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

式中:  $\Delta P_{\text{con},t}^{\text{CED,deep}}$  和  $\Delta P_{\text{con},t}^{\text{CPB,deep}}$  分别为 CED 和 CPB-CHPD 调度模式中纯凝火电机组的深度调峰容量。

通过上述分析,在利用深度调峰消纳相同风电量的情况下,从基本义务调峰到深度调峰的过渡过程中存在以下关系:

$$\begin{cases} \sum P_{\text{wind},i,t}^{\text{CED,deep}} = \sum P_{\text{wind},i,t}^{\text{CPB,deep}} \\ \sum P_{\text{wind},i,t}^{\text{CED}} < \sum P_{\text{wind},i,t}^{\text{CPB}} \\ \sum P_{\text{chp},i,t}^{\text{CED,deep}} = \sum P_{\text{chp},i,t}^{\text{CED}} \\ \sum P_{\text{chp},i,t}^{\text{CPB,deep}} \leq \sum P_{\text{chp},i,t}^{\text{CPB}} \end{cases} \quad (22)$$

由式(20)至式(22)可知:

$$\Delta P_{\text{con},t}^{\text{CPB,deep}} < \Delta P_{\text{con},t}^{\text{CED,deep}} \quad (23)$$

也就是说,CPB-CHPD 与 CED 调度模式相比,纯凝火电机组所需的深度调峰容量更低。

因此,在深度调峰辅助服务范畴内,风电并网量相同的前提下,CPB-CHPD 与 CED 调度模式相比:在非弃风时段,各主体的电、热出力与基本义务调峰相同。在弃风时段,风电消纳量相同,均高于基本义务调峰情形;热电联产机组电、热出力仍较低,并且 CPB-CHPD 调度模式中的电出力有可能在基本义务调峰基础上进一步降低;纯凝火电机组的深度调峰深度大幅降低,对应的深度调峰持续时间随之减少。

另外,在整个调度周期内 CPB-CHPD 与 CED 调度模式相比,热电联产机组需要提前升高热出力对热网与建筑物进行储热,使得建筑物室内温度整体上平均值较高,因此机组总发电量和供热量略有增大。

## 2.2 对各主体深度调峰辅助服务费用的影响

纯凝火电机组提供深度调峰辅助服务而获得费用补偿,热电联产和风电机组因需求服务而承担费用分摊。

### 2.2.1 非弃风时段

在非弃风时段,系统通常不存在深度调峰,因此不存在深度调峰辅助服务费用补偿与分摊。

### 2.2.2 弃风时段

#### 1) 纯凝火电机组

在弃风时段,CED 和 CPB-CHPD 调度模式中纯凝火电机组的深度调峰辅助服务补偿费用分别表述如下:

$$\begin{cases} C_{i,t}^{\text{CED,deep}} = \sum_{\zeta=1}^2 p_{\zeta} E_{i,\zeta,t}^{\text{CED,deep}} \\ C_{i,t}^{\text{CPB,deep}} = \sum_{\zeta=1}^2 p_{\zeta} E_{i,\zeta,t}^{\text{CPB,deep}} \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $C_{i,t}^{\text{CED,deep}}$  和  $C_{i,t}^{\text{CPB,deep}}$  分别为 CED 和 CPB-CHPD 调度模式中机组深度调峰补偿费用;  $E_{i,\zeta,t}^{\text{CED,deep}}$  和  $E_{i,\zeta,t}^{\text{CPB,deep}}$  分别为 CED 和 CPB-CHPD 调度模式中机组在对应的分档区间内平均负荷率低于有偿调峰基准形成的未发电量;  $p_{\zeta}$  为对应分档区间内的市场出清价格。

由式(23)可知 CPB-CHPD 调度模式中纯凝火电机组的深度调峰深度降低,低于有偿调峰基准的有偿调峰电量减少,使得:

$$C_{i,t}^{\text{CPB,deep}} < C_{i,t}^{\text{CED,deep}} \quad (25)$$

也就是说,CPB-CHPD 与 CED 调度模式相比,纯凝火电机组获得的补偿费用降低,该补偿费用即为热电联产和风电机组共同分摊的总费用。

#### 2) 热电联产机组

在弃风时段,CED 和 CPB-CHPD 调度模式中热电联产机组的深度调峰辅助服务分摊费用分别表述如下:

$$\begin{cases} C_{\text{thermal},j,t}^{\text{CED,share}} = \frac{E_{\text{thermal},j,t}^{\text{CED,modi}}}{E_{\text{total},t}^{\text{CED,modi}}} \sum_{i \in S_{\text{thermal}}^{\text{deep}}} C_{i,t}^{\text{CED,deep}} \\ C_{\text{thermal},j,t}^{\text{CPB,share}} = \frac{E_{\text{thermal},j,t}^{\text{CPB,modi}}}{E_{\text{total},t}^{\text{CPB,modi}}} \sum_{i \in S_{\text{thermal}}^{\text{deep}}} C_{i,t}^{\text{CPB,deep}} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $C_{\text{thermal},j,t}^{\text{CED,share}}$  和  $C_{\text{thermal},j,t}^{\text{CPB,share}}$  分别为 CED 和 CPB-CHPD 调度模式中机组的分摊金额;  $E_{\text{thermal},j,t}^{\text{CED,modi}}$  和  $E_{\text{thermal},j,t}^{\text{CPB,modi}}$  分别为 CED 和 CPB-CHPD 调度模式中机组的修正发电量;  $E_{\text{total},t}^{\text{CED,modi}}$  和  $E_{\text{total},t}^{\text{CPB,modi}}$  分别为 CED 和 CPB-CHPD 调度模式中总修正发电量;  $S_{\text{thermal}}^{\text{deep}}$  为获得深度调峰辅助服务补偿的火电机组编号所构成的集合。

在 CPB-CHPD 调度模式中,热电联产机组的电出力降低,超出有偿调峰基准的修正分摊电量减少,而系统中风电等其他主体的修正分摊电量不变,可知热电联产机组的分摊比例降低,同时由式(25)可知分摊总费用降低,所以式(26)右侧两项都减小,使得:

$$C_{\text{thermal},j,t}^{\text{CPB,share}} < C_{\text{thermal},j,t}^{\text{CED,share}} \quad (27)$$

也就是说,CPB-CHPD 与 CED 调度模式相比,热电联产机组深度调峰辅助服务分摊费用显著降低。

另外,对于热电联产和纯凝火电机组共同提供深度调峰辅助服务的情况而言,热电联产机组还能因获得一定的补偿费用而使得总分摊费用进一步降低。

### 3) 风电机组

在弃风时段,CED 和 CPB-CHPD 调度模式中风电机组的深度调峰辅助服务分摊费用分别为:

$$\begin{cases} C_{\text{wind},k,t}^{\text{CED,share}} = \frac{E_{\text{wind},k,t}^{\text{CED,modi}}}{E_{\text{total},t}^{\text{CED,modi}}} \sum_{i \in S_{\text{thermal}}^{\text{deep}}} C_{i,t}^{\text{CED,deep}} \\ C_{\text{wind},k,t}^{\text{CPB,share}} = \frac{E_{\text{wind},k,t}^{\text{CPB,modi}}}{E_{\text{total},t}^{\text{CPB,modi}}} \sum_{i \in S_{\text{thermal}}^{\text{deep}}} C_{i,t}^{\text{CPB,deep}} \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $C_{\text{wind},k,t}^{\text{CED,share}}$  和  $C_{\text{wind},k,t}^{\text{CPB,share}}$  分别为 CED 和 CPB-CHPD 调度模式中风电机组的分摊费用;  $E_{\text{wind},k,t}^{\text{CED,modi}}$  和  $E_{\text{wind},k,t}^{\text{CPB,modi}}$  分别为 CED 和 CPB-CHPD 调度模式中风电机组的修正发电量。

在 CPB-CHPD 调度模式中,由附录 B 式(B3)可知风电机组的分摊比例由于热电联产机组分摊比例的下降而有所升高,但是考虑到总分摊费用的降低程度要远大于该分摊比例的升高程度,使得:

$$C_{\text{wind},k,t}^{\text{CPB,share}} < C_{\text{wind},k,t}^{\text{CED,share}} \quad (29)$$

也就是说,CPB-CHPD 与 CED 调度模式相比,风电机组深度调峰辅助服务分摊费用仍较低。

## 3 实施所提方案带来的效益分析

基于上述影响分析,实施所提方案给调峰辅助

服务各主体个体和系统整体带来的效益分析如下。

### 3.1 个体效益分析

#### 1) 纯凝火电机组

纯凝火电机组虽然深度调峰辅助服务补偿费用减少,但是其深度调峰压力降低,具体表现为深度调峰深度和持续时间减少,另外机组深度调峰情形下单位发电煤耗降低,运行安全性和经济性得到改善。

#### 2) 热电联产机组

热电联产机组的调峰区间得到有效拓展,在不影响供热质量的前提下,在总发电收益略有增加的同时深度调峰辅助服务分摊费用却降低,改变了由于强迫电、热出力较高而大多承担较多分摊费用的状态,其主动参与调峰的积极性得到提高。

#### 3) 风电机组

风电机组在保证消纳量的同时分摊费用降低,其收益得到提升,开发利用积极性得到提高。

### 3.2 整体效益分析

#### 3.2.1 经济效益方面

1) 利用热网与建筑物的储热作用拓展了热电联产机组在基本义务调峰范畴内的调峰区间,甚至能够发掘机组的深度调峰能力,降低了提供深度调峰辅助服务的纯凝火电机组的深度调峰深度,取代了仅通过大幅增加纯凝火电机组的深度调峰深度来提高风电消纳的方案,系统稀缺调峰资源得到合理配置,纯凝火电机组单位发电煤耗随调峰深度的减少而降低,最终使得系统总运行成本显著降低。

2) 热网与建筑物已经存在于城镇集中供热基础设施中,与引入蓄热罐、电锅炉和电热泵等提高系统风电消纳的方案相比,无需较大额外投资。

#### 3.2.2 社会效益方面

1) 利用热网与建筑物的储热作用,系统可在付出较小代价,如无需额外的设备建设用地以及所需运行和投资成本较小的情况下,保证风电消纳量,能够提高电网对风电等可再生能源的适应性,促进可再生能源的开发利用,减少温室气体排放,使得可再生能源并网效益增加。

2) 避免了纯凝火电等机组为增加深度调峰深度而长时间运行在较低出力的不稳定状态,能够提高系统的运行安全性,使得系统供电可靠性效益增加。

综上所述,实施所提方案能够有效提高各主体的个体效益和系统的整体效益。个体效益的提升,表明市场各主体尤其是热电联产机组有意愿利用所提方案主动参与系统调峰;系统整体效益的提升,表明市场运营和监管等机构有必要通过制定相应的规章制度来引导各主体利用所提方案主动参与调峰,以实现系统稀缺调峰资源的优化配置,有效解决弃风问题。

## 4 算例分析

### 4.1 算例系统

在所建立的热电联合系统算例中,电力系统部分由 2 台热电联产机组、2 台纯凝火电机组和 1 个风电机组构成,暂不涉及核电机组;热力系统部分由 2 台热电联产机组、20 条供热管道和 6 个建筑物构成。其中,2 台热电联产机组和 2 台纯凝火电机组的容量分别为 300 MW, 200 MW 和 400 MW, 150 MW。管道的长度、半径和质量流率以及建筑物供热面积等具体参数如附录 C 表 C1 和表 C2 所示,热网的网络拓扑结构如附录 C 图 C1 所示。为验证热网与建筑物的储热作用,设定 CED 调度模式中的建筑物室内温度始终维持在满足供热质量的最低供暖温度 18 °C,而考虑供热质量和舒适度等因素设定 CPB-CHPD 调度模式中的室内温度允许波动范围为 18~22 °C。

本文所构建的热电联合调度模型的调度时间间隔为 15 min,采用商业优化软件 CPLEX 12.6 对所提模型进行优化求解,并利用 MATLAB R2014a 对所得结果进行图形绘制。

利用所提热电联合调度模型得到基本义务调峰情形下的 CPB-CHPD 和 CED 两种调度模式中各火电机组的实际电、热出力和风电消纳情况如附录 C 图 C2 和图 C3 所示。CED 调度模式中热电联产机组的热出力与系统热负荷逐时相等,而 CPB-CHPD 调度模式中热电联产机组实现了电热耦合运行约束的解耦,其热出力不再与热负荷逐时相等,可根据风电出力进行调整,在风电高峰时段主动降低自身的电、热出力,调峰能力提高,风电消纳量增加 689.71 MW·h,总运行成本减少 46.88 万元。6 个建筑物的室内温度均控制在允许的 18~22 °C 范围内,不影响供热质量,如附录 C 图 C4 所示。然而,虽然火电机组的基本义务调峰能力已经全部投入,但是在风电高峰时段仍然存在一定数量的弃风,为了进一步增加风电消纳,需要系统进行深度调峰。

基于 2.1.2 节的分析,本算例选择代表性高的弃风时段仅通过纯凝火电机组深度调峰进一步消纳风电的情况,并假设纯凝火电机组的深度调峰分档报价及最大可调容量如附录 C 表 C3 所示,在这种条件下通过两种情形对系统中各主体的深度调峰辅助服务费用补偿与分摊情况进行研究,以验证前文分析。

### 4.2 风电全额消纳情形

该情形中 CPB-CHPD 与 CED 两种调度模式均采用深度调峰手段实现风电全额消纳,所对应的深度调峰辅助服务费用补偿与分摊情况如图 3 所示,

设定补偿费用为正,分摊费用为负。

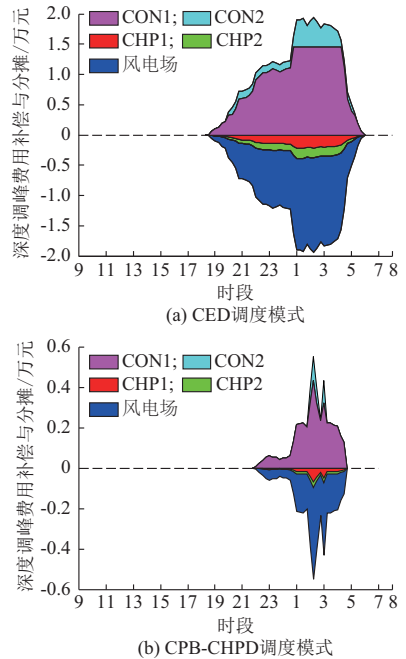


图3 情形1中两种调度模式下深度调峰费用补偿与分摊

Fig.3 Compensation and sharing of deep peak regulation cost in two dispatch modes in case 1

从整体来看,无论两种调度模式的哪一种,深度调峰辅助服务费用补偿与分摊均发生在弃风时段。2 个纯凝火电机组因提供深度调峰辅助服务而获得补偿,热电联产和风电机组分摊深度调峰辅助服务费用。费用补偿方面,因 CON1 的两个有偿深度调峰分档报价均低于 CON2,因此按照优先调用低价有偿调峰辅助服务原则,电力调度机构调用有偿深度调峰的顺序依次是 CON1 第一档、CON2 第一档、CON1 第二档、CON2 第二档,每一档内调用到的最后一台机组的报价作为该档的出清价格,最终结果是 CON1 的深度调峰补偿费用大于 CON2 的补偿费用。费用分摊方面,风电因处于高峰而参与分摊的电量较多,分摊比例最高导致分摊费用最高;CHP1 的修正电量所占分摊比例大于 CHP2 的比例,因此 CHP1 的分摊费用也高于 CHP2 的分摊费用。某些时段,当 CON1 和 CON2 不提供深度调峰辅助服务时,若其出力高于有偿调峰基准则参与费用分摊。

从 CPB-CHPD 与 CED 两种调度模式对比来看,得益于考虑热网与建筑物储热在基本义务调峰情形下就能够增加风电消纳量,深度调峰辅助服务补偿费用总量由 48.85 万元大幅下降至 4.64 万元,从而热电联产与风电机组的分摊费用总量随之大幅降低。

情形1中两种调度模式的具体结果如表1所示。可以看出,CPB-CHPD与CED调度模式相比,基本义务调峰情形下,总运行成本降低,风电消纳量增加。深度调峰情形下,风电在相同消纳量的基础上,承担的深度调峰分摊费用减少;热电联产机组在总发电量略有增加的基础上,承担的深度调峰分摊费用减少;纯凝火电机组的深度调峰补偿费用虽然

减少,但是其深度调峰深度和持续时间大幅降低。因此对调峰辅助服务市场中实施所提方案可提高各主体个体效益和系统整体效益的分析进行了验证。对应的纯凝火电机组深度调峰后的电出力情况如图4所示,可以更加直观地看出,CPB-CHPD调度模式中的深度调峰深度和持续时间明显小于CED调度模式。

表1 情形1中两种调度模式的结果  
Table 1 Results of two dispatch modes in case 1

调度模式	基本义务调峰				深度调峰							
	总运行成本/万元	风电消纳量/(MW·h)	风电		热电联产				纯凝火电			
			总消纳量/(MW·h)	分摊费用/万元	总发电量/(MW·h)		分摊费用/万元		深调总量/(MW·h)		补偿费用/万元	
					CHP1	CHP2	CHP1	CHP2	CON1	CON2	CON1	CON2
CED	390.17	4 933.97	5 762.30	39.01	4 421.82	3 062.06	5.52	4.32	677.06	151.28	40.76	8.09
CPB-CHPD	343.29	5 623.68	5 762.30	3.95	4 529.40	3 121.04	0.44	0.25	128.88	9.75	4.25	0.39
变化量	-46.88	689.71	0	-35.06	107.58	58.98	-5.08	-4.07	-548.18	-141.53	-36.51	-7.70

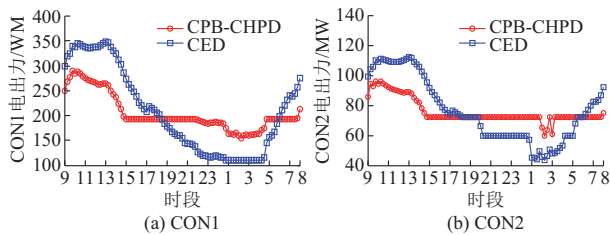


图4 情形1中纯凝火电机组深度调峰情形下电出力  
Fig.4 Electric power output of condensing power units in deep peak regulation in case 1

#### 4.3 风电非全额消纳情形

该情形中CED调度模式采用深度调峰手段的风电消纳量与CPB-CHPD调度模式采用基本义务调峰手段时的相同,此时后者不存在深度调峰辅助服务费用的补偿与分摊,CED调度模式中的费用补偿与分摊情况如附录C图C5所示,由于风电没有全额消纳,补偿费用总量要低于情形1中的CED调度模式,为34.58万元,其中CON1和CON2获得的补偿费用分别为30.16万元和4.42万元,2台热电联产机组和风电机组的分摊费用分别为4.10万元、3.21万元和27.27万元。

纯凝火电机组深度调峰后的电出力情况如附录C图C6所示,CPB-CHPD调度模式中没有深度调峰;CED调度模式中的深度调峰容量和深度小于情形1,根据机组调峰报价与调峰总容量需求,最终只调用到CON2机组的第一档有偿深度调峰,而调用到了CON1的两档有偿深度调峰。该情形的结果同样验证了实施所提方案对各主体个体效益和系统整体效益的提升作用。

## 5 结论

1)利用热网与建筑物的储热能力能够在具有较大潜力并且无需较大额外投资的前提下,拓展热电联产机组基本义务调峰范畴内的调峰区间,甚至挖掘深度调峰能力,解耦热电联产机组“以热定电”运行模式造成的电热耦合运行约束,进而提升系统调峰能力,提高系统风电消纳水平。

2)所提方案在技术上的可行性及实现并不能完全保证其实际应用。调峰辅助服务市场中的效益分析表明:对于实施个体而言,热电联产机组有意愿利用该方案主动参与调峰;对于系统整体而言,利用该方案所带来的经济效益和社会效益都较为显著。所提方案的应用潜力巨大。

后续将针对集中供热采用量调节甚至变温度变流量调节方式时需要综合考虑热网热力特性和水力特性的情形,热电联产机组提供深度调峰辅助服务而获得补偿费用,以及有偿调峰基准、报价和机组可深度调峰容量变化时对费用补偿与分摊所产生的影响等展开研究。另外,面向较大规模区域中应用的热网与建筑物特性简化模型及热电联合调度优化算法也需要进一步研究,以降低电力调度机构中设备的计算难度和通信压力及人员的认知负担。

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

## 参考文献

- [1] MATHIESEN B V, LUND H. Comparative analyses of seven technologies to facilitate the integration of fluctuating renewable energy sources[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(2): 190-204.
- [2] 吕泉,陈天佑,王海霞,等.配置储热后热电机组调峰能力分析



- [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 34-41. DOI: 10.7500/AEPS20130724002.
- LYU Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 34-41. DOI: 10.7500/AEPS20130724002.
- [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] ZHANG N, LU X, MCELROY M B, et al. Reducing curtailment of wind electricity in China by employing electric boilers for heat and pumped hydro for energy storage[J]. Applied Energy, 2016, 184: 987-994.
- [5] YE J, YUAN R. Integrated natural gas, heat, and power dispatch considering wind power and power-to-gas[J]. Sustainability, 2017, 9(4): 602.
- [6] YANG Y, WU K, LONG H, et al. Integrated electricity and heating demand-side management for wind power integration in China[J]. Energy, 2014, 78: 235-246.
- [7] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 12-22.
- [8] PAN Z, GUO Q, SUN H. Feasible region method based integrated heat and electricity dispatch considering building thermal inertia[J]. Applied Energy, 2017, 192: 395-407.
- [9] 李平, 王海霞, 王漪, 等. 利用建筑物与热网热动态特性提高热电联产机组调峰能力[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 26-33. DOI: 10.7500/AEPS20161117003.
- LI Ping, WANG Haixia, WANG Yi, et al. Improvement of peak load regulation capacity of combined heat and power units considering dynamic thermal performance of buildings and district heating pipelines network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 26-33. DOI: 10.7500/AEPS20161117003.
- [10] LI P, WANG H, LÜ Q, et al. Combined heat and power dispatch considering heat storage of both buildings and pipelines in district heating system for wind power integration[J]. Energies, 2017, 10(7): 893.
- [11] RAINERI R, RÍOS S, SCHIELE D. Technical and economic aspects of ancillary services markets in the electric power industry: an international comparison[J]. Energy Policy, 2006, 34(13): 1540-1555.
- [12] ANDRIANESIS P, BISKAS P, LIBEROPOULOS G. An overview of Greece's wholesale electricity market with emphasis on ancillary services[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(8): 1631-1642.
- [13] 王鹏, 张灵凌, 梁琳, 等. 火电机组有偿调峰与无偿调峰划分方法探讨[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 87-90.
- WANG Peng, ZHANG Lingling, LIANG Lin, et al. A method for division of paid peak-regulation and free peak-regulation for thermal power units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 87-90.
- [14] 张健, 曹志东, 许洪强, 等. 发电侧电力市场辅助服务付费新模型[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(10): 9-12.
- ZHANG Jian, CAO Zhidong, XU Hongqiang, et al. A novel model for ancillary service payment in generation market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10): 9-12.
- [15] 胡建军, 胡飞雄. 节能发电调度模式下有偿调峰补偿新机制[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 16-18.
- HU Jianjun, HU Feixiong. A novel compensation mechanism of remunerative peak load regulation under energy-saving dispatch framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 16-18.
- [16] 刘海波. 东北电网风电调峰辅助服务机制完善及交易优化模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- LIU Haibo. The study on mechanism improvement and transaction optimization model of peak-regulation ancillary service of wind power for northeast power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [17] 国家能源局东北监管局. 关于印发《东北电力辅助服务市场运营规则(试行)》的通知: 东北监管市场〔2016〕252号[Z]. 沈阳: 国家能源局东北监管局, 2016.
- Northeast China Energy Regulatory Bureau of National Energy Administration. Notice on the issue of the operation rules of northeast electric auxiliary services market (trial implementation): No. 252[Z]. Shenyang: Northeast China Energy Regulatory Bureau of National Energy Administration, 2016.
- [18] 刘永奇, 张弘鹏, 李群, 等. 东北电网电力调峰辅助服务市场设计与实践[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 148-154. DOI: 10.7500/AEPS20160706001.
- LIU Yongqi, ZHANG Hongpeng, LI Qun, et al. Design and practice of peak regulation ancillary service market for Northeast China power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 148-154. DOI: 10.7500/AEPS20160706001.
- [19] 高重晖, 吴希, 范国英, 等. 调峰辅助服务在吉林电网的实施效果分析[J]. 吉林电力, 2015, 43(5): 1-4.
- GAO Chonghui, WU Xi, FAN Guoying, et al. Effect analysis on peak-regulating auxiliary service of Jilin power grid[J]. Jilin Electric Power, 2015, 43(5): 1-4.
- [20] 王漪, 薛永锋, 邓楠. 供热机组以热定电调峰范围的研究[J]. 中国电力, 2013, 46(3): 59-62.
- WANG Yi, XUE Yongfeng, DENG Nan. Research on power dispatch scope of heat-supply turbine units on basis of ordering power by heat[J]. Electric Power, 2013, 46(3): 59-62.

李平(1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 热电联合系统协调运行在风电消纳中的应用研究问题。E-mail: liping2014@mail.dlut.edu.cn

赵适宜(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电网经济运行与节能调度。E-mail: zhaoshy882@sohu.com

金世军(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电网调度运行与管理。E-mail: JSJ0411028@126.com

李卫东(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统调度自动化与电力市场方面的理论与应用, 特别是新能源(风能、太阳能等)并网后电力系统能量平衡调度、智能电网运行分析与控制理论。E-mail: wdli@dlut.edu.cn

(编辑 张焱)

(下转第 42 页 continued on page 42)

## Promotion Method of Peak Regulation Capacity by Power and Heat Decoupling Based on Heat Storage of District Heating Network and Buildings

*LI Ping*<sup>1</sup>, *ZHAO Shiyi*<sup>2</sup>, *JIN Shijun*<sup>2</sup>, *CHANG Youyi*<sup>2</sup>, *WANG Yi*<sup>2</sup>, *LI Weidong*<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co. Ltd., Shenyang 110006, China)

**Abstract:** The combined heat and power (CHP) units are operating in the mode of power determined by heat during the heating seasons in the “Three North” areas of China, which forms power and heat coupling operation constraints. This makes the system peak regulation capacity insufficient, which results in heavy wind power curtailment. A method is proposed which can decouple the power and heat operation constraint of CHP units based on heat storage of district heating network and buildings. The technical feasibility of the proposed method is analyzed by the estimation of the potential to enhance wind power integration and the comparison of the investment for several existing methods, and the technical implementation is given by constructing CHP dispatch model. The effects of power output and deep peak regulation ancillary service cost of each main entity are analyzed by applying the proposed method, with summarization and abstraction of the operation rules for the deep peak regulation ancillary service market, in the background of the pilot reform for the Northeast China peak regulation ancillary service market. Furthermore, the individual benefit of each main entity and overall benefits of the system by applying the proposed method are elaborated. The analysis above is verified by simulation cases, and the results show that CHP units are willing to actively participate in system peak regulation by utilizing the proposed method at the individual level, and optimal allocation of the scarce peak regulation resources can be realized at the overall level.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607021).

**Key words:** heat storage of district heating network and buildings; power and heat coupling; peak regulation; ancillary service; wind power accomandation; benefit analysis