DOI: 10.7667/PSPC171173

考虑热电和大规模风电的电网调度研究综述

黄国栋，许 丹，丁 强，门德月

（中国电力科学研究院有限公司，北京 100192）

摘要：冬季供热期，为满足供热要求，热电联产机组采用“以热定电”方式运行，系统调峰能力差，在负荷低谷时段会造成大量弃风限电。针对该问题，分析热电机组电-热耦合特性，总结归纳国内外相关研究成果。从增设电热耦合设备和电网精益化调度两方面展开论述，对增加电锅炉、热泵、储热等方案进行综合分析。总结适用热电机组的电力系统精益化调度方法，并对国内外解耦电热约束的实际应用情况进行了阐述。最后指出了电源侧、电网调度侧下一步需要深入开展的工作。

关键词：热电联产机组；风电消纳；电网调度；电热耦合；调峰

Review of grid dispatching considering thermal power and large-scale wind power integration

HUANG Guodong, XU Dan, DING Qiang, MEN Deyue

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: During heating period in winter, in order to meet the heating requirements, Combined Heat and Power (CHP) units are operated in the mode of “power determined by heat”. The capacity of peak-load regulation is poor, and a large number of wind power is abandoned in the low load period. In order to study the problem, the characteristics of CHP units are analyzed, and the relevant research results at home and abroad are summarized. From the aspects of adding thermoelectric coupling equipment and grid lean dispatching, the schemes of increasing electric boiler, heat pump and heat storage are analyzed, the lean dispatching methods of the power grid for the CHP units are mentioned, and the practical application of the decoupling for thermoelectric coupling constraints at home and abroad is expatiated. Finally, the next step work that need carrying out in the power side and the grid scheduling side is pointed out.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902100).

Key words: CHP unit; wind power consumption; power grid dispatching; thermoelectric coupling; peak-load regulation

0 引言

在风电装机和并网规模逐年增大的同时，我国“三北”(东北、华北、西北)地区也面临严重的弃风现象。根据国家能源局最新发布的信息，2016 年弃风主要发生在东北、西北、华北，其中全国弃风较为严重的地区是甘肃、新疆、吉林和内蒙古，弃风率分别高达 43%、38%、30%、21%[1]。热电厂在供暖期因供暖而导致系统调峰能力急剧下降是导致限电弃风的一个主要原因[2]。弃风严重的“三北”地区，电源以热电联产机组为主，调峰能力差，在供热期为满足热负荷需求，热电联产机组采用“以热定电”的模式运行，发电出力可调节范围有限，加大了系统调峰能力不足的矛盾，产生大量停机弃风。

在保证电力系统安全稳定的前提下，如何突破电热耦合约束，制定科学、合理的含热电风电系统的经济调度，提高电力系统调峰能力，促进节能减排和风电规模化消纳，是需要重点解决的问题。为此，学者们开展了多方面研究。针对热电解耦，有学者通过增加电锅炉、储热等设备解耦“以热定电”约束[3]；针对含电能和热能的电网调度，有文献提出通过滚动调度提升电网调峰空间[4]，有学者认为电能与热能同时考虑的电热联合调度是经济效益最好的一种调度方式[5]；针对热电机组调峰能力计算，有研究通过数据分析、热力试验、热力计算等方法，

基金项目：国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902100)；国家电网公司科技项目资助“考虑安全与经济的热电联合优化调度关键技术研究与应用”

计及变工况、汽水损失等，建立考虑实际运行情况的大型热电机组调峰能力计算模型，分析不同供热抽汽量下机组调峰空间，挖掘现有热电机组调峰能力[6]；针对厂站级的电热负荷优化分配，有文献以总热耗最小作为电负荷分配指标，考虑热化作功系数的改变以及热电负荷调度范围的限制，提出热电优化分配方法[7]。

本文从电网调度层面对国内外相关解决策略和研究成果进行总结和概述，将主流研究成果归纳为两方面：一是从设备角度，通过增设电热耦合设备提升机组调峰能力[8-25]，二是从调度角度，通过电网精益化调度挖掘系统调峰潜力[26-33]，并分析了下一步需要继续开展的工作。

1　热电机组的电-热特性

国内常见热电机组包括背压式和抽汽式[4]，其典型电-热特性曲线如图 1 所示。

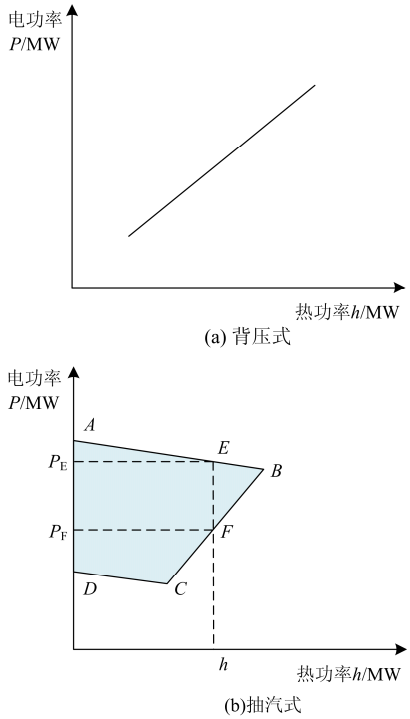

图 1　热电机组特性曲线

Fig. 1 Characteristic curve of CHP

背压式机组将做完功后的低压尾气直接用于供暖或是工业用汽，能量损失较少，效率高。其电-热特性曲线如图 1(a)所示，热功率和电功率呈线性关系，确定供热功率后，发电功率随之确定，没有调节能力。抽汽式机组是热电厂中的主要机型，把汽轮机中间级的一部分仍具有较高压力和温度的蒸汽抽出来供给热用户使用，其电-热特性曲线如图 1(b)所示，运行区间是 *ABCD* 所围区域。在给定热功率情况 *h* 下，发电功率在 P_E、P_F 之间，具有一定的调节能力，但热负荷越高，发电功率调节范围越小，调峰能力越差。

由于热电机组存在着电-热耦合特性，在我国北方地区，冬季热负荷高，热电机组发电出力大，机组调节能力有限，在负荷低谷时段电网剩余空间小，当风电出力较大时，往往会出现限电弃风。为了消纳大规模风电，需要突破“以热定电”的运行约束，提升机组调峰能力和风电消纳空间。

2　增设电热耦合设备解耦“以热定电”

目前，一般有两种途径实现热电机组调峰能力的提升：一是针对热电机组本身的灵活性改造，如旁路补偿供热、优化燃烧器及给水流量控制、优化磨煤机控制等补偿供热和深度调峰技术等[8]；二是增加电热耦合设备提高机组调峰能力，如电锅炉、蓄热、热泵等。前者的改造对电网调度方式影响较少，本文着重介绍后者。

2.1　增设电锅炉供热

在电源侧或者负荷侧，增设电锅炉，吸收电能产生热能，代替热电机组满足部分热力需求的同时增加了系统电负荷，为风电消纳提供空间，其电-热系统结构如图 2 所示。

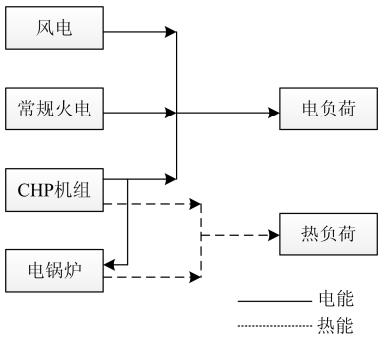

图 2　含电锅炉的电热系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of combined heat and power system with electric boiler

电锅炉通过电热负荷转换来降低热电机组夜间热负荷从而降低其“以热定电”的必发电功率，解耦“以热定电”约束。热电机组增加电锅炉后，其电-热运行特性发生变化，如图 3 所示。

热电机组等效出力可行域的扩大表征为两个方面：其一是等效最大供热出力得到提升；其二是相同供热量下，等效最低发电出力的下降。等效最低发电出力的下降来自于两个方面的作用：一方面是电锅炉自身消耗电量；另一方面则是在相同等效供

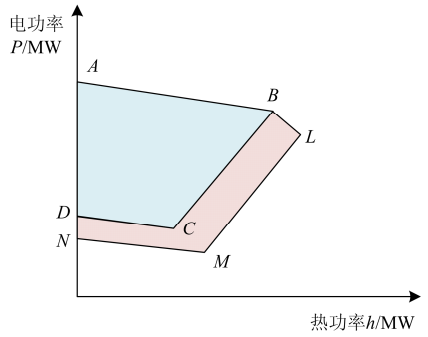

图 3 含电锅炉的热电机组特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of CHP with electric boiler

热量下，电锅炉替代了热电机组的部分供热量，使热电机组最低发电、供热量同时下降。

对于含电锅炉的电-热综合系统调度，国内外已开展了大量研究。国外将热电机组和电锅炉一体建模，增加电锅炉来解耦“以热定电”约束，建立经济调度模型，有效地降低发电成本[9]。文献[10]提出在二级热网增设调峰电锅炉的消纳弃风方案，建立调峰电锅炉的启停控制模型和一级、二级热网的热平衡方程，在降低热电机组热负荷峰值的同时增加电网负荷谷值，从而提高电网风电消纳能力。有学者还分别在电源侧、负荷侧建立电热锅炉供暖的联合调度模型，对比发现在负荷侧利用电锅炉替代小型燃煤锅炉供暖，只是相当于增加了系统各个时段的电力，效果不如电源侧电锅炉方案[11]。

电锅炉供热的优点体现在：一是电锅炉设备结构简单、价格低廉、能源转换效率高(普通电锅炉可达 95%以上，大型电极式电锅炉可达 99%)[12]；二是电锅炉运行灵活，可通过调整电流大小或者加热棒分组投切的方式调整其消耗的电功率；三是对于负荷侧或者二级热网的电锅炉来说，可随时启停和调节供热量，能很好适应热负荷的波动。电锅炉利用弃风来供热，降低系统煤耗，更适合在风电过剩的情况下，否则电锅炉需要消耗火电电量来供热，使系统煤耗增加。

2.2 增设热泵供热

热泵从低温热源(如地下水、海水、污水、自然空气等)中吸收热能，然后将其转化为高温热源在热力需求侧将热量释放。增设热泵的作用与电锅炉类似，都是将电出力转换为热出力，提高热电机组的调节能力，但热泵相对于电热锅炉具有更高的电热转换效率。集中式热泵可以配置在热电厂，分布式热泵主要在用户侧。

对于含有热泵的电-热联合调度系统，文献[13]建立热泵的数学模型，基于热泵和热电机组提出一种可计及热电负荷转换的电网节能调度方法，分析表明加入热泵能提高热电机组的效益，节约发电煤耗。还有学者把热电联产机组、集中式水源热泵和分布式热泵看成一个整体加以控制，在保证各用户原有热量供应的基础上，改变整体发电出力，从而实现对过剩风电的消纳[14]。文献[15]提出了利用水源热泵将火电厂冷却循环中的余热转化为高温热能进行供暖的方法。国外的分布式热泵应用较广， 德国将热电机组和住宅建筑中热泵联合，分析表明这种方式能平衡德国未来能源系统中可再生能源发电的波动[16]。

热泵供热的优点在于：在采暖期热泵能够取代热电机组来对取暖侧进行供暖，节约部分电能，降低系统煤耗，并且消耗的低温热源全部为清洁能源，具有较显著的节能效益，运行费用低。但是热泵较电锅炉投资费用高[17]，虽然热泵具有更高的性能系数，但当热泵容量达到一定程度时，相关联的热电机组基本已经不受“热电耦合”的制约，热泵高性能系数的优势被弱化，导致其促进风电消纳的效果与电锅炉接近。而且，对于分布式热泵，要进行远程调控和通信，需要对当前的智能电网调控系统进行软硬件技术改造升级。

2.3 增设储热装置供热

在电源侧应用大容量储热技术能打破“以热定电”的刚性约束，有效提高热电联产机组的调节能力，解决风电消纳问题。在负荷侧应用包含大容量储热的风电供热系统，利用弃风电量实现清洁供热，既能有效增加地区用电负荷，又能提高地区电力系统的调节能力，促进可再生能源的就地消纳。

应用大容量储热技术进行供热，类似抽水蓄能的削峰填谷作用，风电出力小且电负荷高峰时，利用电能储热，风电出力大且电负荷低谷时供热，减少热电机组出力。其电-热系统结构如图 4 所示。

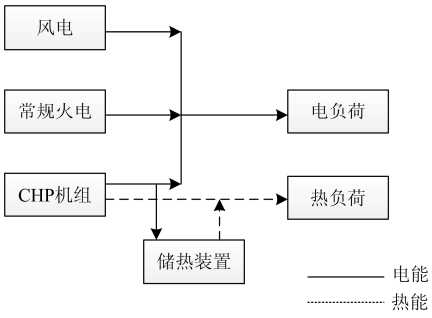

图 4 含储热的电-热系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of combined heat and power system with thermal energy storage

通过储热装置和热电机组的协调配合，能有效提高热电联产机组的调节能力，其联合电-热运行特性如图 5 所示。热电机组等效出力可行域的扩大表征为三个方面：一是等效最大供热能力的增加；二是相同供热量下，等效最低发电功率的下降，相比电锅炉供热，储热系统进行供热时自身并不消耗电力，因此等效最低发电出力降低幅度不如电锅炉；三是相同供热量下，等效最高发电功率的增加，储热系统在相同等效供热量下，可短时替代部分热力供应，使热电机组减少供热抽汽量，并提升发电出力。可见，储热装置能增加热电机组的正备用容量，有利于应对风电的波动性。

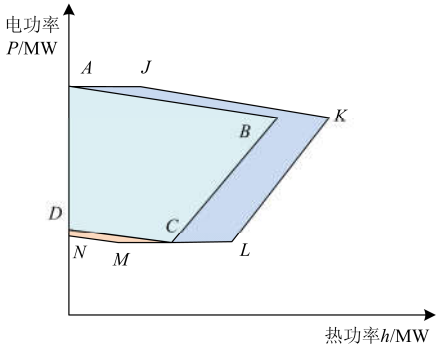

图 5 含储热的热电机组特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of CHP with thermal energy storage

目前，国内外针对增设储热装置消纳风电已经开展了大量研究。有学者研究了热电厂配置蓄热设备来消纳风电的可行性[18]。在德国，现货市场条件下，通过配置合适容量的储热和 CHP 装置，能实现利益最大化[19]。文献[20]分析了蓄热罐提升风电接纳量的机理，建立了包含风电、热电机组和蓄热罐的综合调度模型，并比较了热电联产与风电供热配置储热所取得的节煤效果。还有文献考虑风电的不确定性，以及储热罐蓄放热状态间的关系，提出了基于双线性模型的调度策略来解决电热综合调度问题[21]。

储热装置供热不仅可提高风电接纳量，还能提升热电机组供热期的最大出力，节煤效果和调峰效益好，而且不需对电网调度和通信方式进行大的调整，是促进风电消纳的理想方案之一。但是热电机组通过配置储热所提高的调峰容量存在一个上限，当机组所承担的热负荷过大或过小，配置储热增大调峰能力的效果就不明显；热电厂配置蓄热需要一定的投资和维护运行成本，限制了储热装置的应用；另外对于国内的大量集中供热，蓄热装置的规模能否满足寿命、造价和效率等要求还需进一步分析。

2.4 多设备联合供热

综合应用以上两种及以上的电热耦合设备可以极大提升热电机组的调节能力，如“电锅炉+储热”、“热泵+储热”等，或者在电厂侧和负荷侧同时增设某种电热耦合设备以更灵活的方式消纳风电，如电锅炉、热泵等。

以热电机组、电锅炉和储热的联合系统为例，其热电特性如图 6 所示，联合系统供热能力大幅提升，最低发电出力可以在更大的等效供热范围内达到，同时增加了最大发电出力，形成系统备用容量。

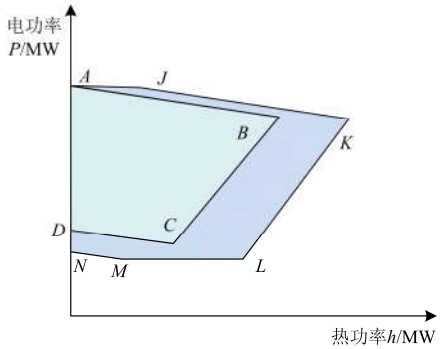

图 6 含电锅炉和储热的热电机组特性曲线

Fig. 6 Characteristic curve of CHP with electrical boiler and thermal energy storage

多设备联合供热，能消纳更多的弃风功率，同时降低系统的总调度成本。文献[22]提出储热、热电机组、电锅炉的协调调度模型，深入分析储热装置与电锅炉协调供热的弃风消纳效果，验证了上述结论。引进电锅炉在消纳风电方面更有效，而储热罐整体上更节约能源，联合系统可以有效提高热电机组的灵活性[23]。文献[24]在电源、负荷侧均增加热泵供热，通过热电联产机组、集中式热泵和分布式热泵的联合协调调度，降低系统调峰压力，提高系统运行的经济性。国外以丹麦为例，研究将热电机组、电泵、储热设备联合调度，实现电热解耦，能提高热电机组的调峰能力和系统经济效益[25]。

通过多电热耦合设备和热电机组协调配合，联合供热，能充分发挥各类设备的特点，更大范围提升热电机组调节空间，调峰效果显著。但是投资成本高、调控运行复杂，需要结合实际弃风情况而定。

3 电网精益化调度

为减少弃风，增加电网调峰空间，除了可以增设电热耦合设备提升热电机组的等效出力区间，还可以通过精益化调度促进电热协调，挖掘提升系统的调峰能力。基于调度系统设备的精细化建模，考虑电源、电网、负荷特性，通过统筹协调多类型电源、上下级调控机构、多时序调度周期等方式，实现电网精益化调度。

3.1 供热系统蓄热惯性

由于建筑物或热网有蓄热惯性，居民热需求是过去多个时段热网供热量共同作用的结果，供热量和热负荷不必完全实时平衡，可以有一定的偏差，这种特性称为供热系统的热迟滞性。

利用供热系统的热迟滞性，当风电过剩时，可以使热电机组减少热出力，降低机组的最小发电出力，为消纳风电提供空间；当风电出力较小时，热电机组增加热出力，以保证供暖质量。

有学者考虑热网的蓄热惯性，建立电力调度系统、协调电力系统和区域供热系统联合运行策略，解决电力和供热的紧密联系，提升了系统灵活性[26]，但为了保证居民供暖的质量，实际中减少弃风和节能减排效果相对不够显著[11]。还有文献考虑建筑物的热惯性，建立电-热调度模型，增加了供热供电的灵活性， 仿真结果表明，该方法可以将更多的风力发电和电力需求相结合，减少煤炭消耗[27]。文献[28]建立热力网络模型，进而建立了考虑热力网络约束及火电机组启停的电热能源集成系统运行优化模型，分析结果表明，考虑热迟滞性后，热电总发电量下降，风力发电总量上升，弃风量减小。

3.2 多电源联合调度

为了突破热电机组“以热定电”的限制，还可以综合考虑水电、火电、核电、抽蓄机组等电源与热电、风电统筹协调，通过火电机组启停、抽蓄机组调峰和水电机组的协调配合，在保障供热的前提下为风电消纳提供空间。

文献[28]考虑了火电、热电、风电、水电、核电以及电锅炉、燃煤锅炉等电、热源形式，通过多电源联合以及电力系统、热力系统的协调调度，提高风电消纳水平。文献[29]建立了包含光伏、风机、燃气轮机、燃料电池等分布式电源以及电热储能单元的热电联供经济优化模型，通过多电源联合调度，提升系统经济效益。文献[30]建立了包含燃气轮机、风电、光伏、热电机组、锅炉、电储能、电负荷和热负荷日前热电联合调度优化模型，通过鲁棒优化求解多电源联合调度问题，并分析了热电机组的运行曲线和各电源配合方式。

3.3 其他调度策略优化

由于风电预测、负荷预测的精度随预测时间的缩短而提高，通过多时段滚动调度，每隔一段时间根据最新的风电功率预测及负荷预测来滚动调整剩余时段的调度计划，能有效减少预测不确定性对日前计划造成的影响。文献[31]提出了考虑风电以及其他各类机组的联合优化滚动调度算法，考虑热电耦合约束的影响，以发电机的当前出力值作为优化问题的初始解，通过在每一个采样周期在线求解一个有限时长的开环最优控制问题来获得未来时段的出力计划，通过滚动调整，挖掘系统调峰潜力。文献[4]建立了含风电、热电机组、电锅炉的联合调度模型，在日前调度计划的基础上，增加滚动计划和实时计划，根据最新的预测数据逐级修正日前调度计划，通过实际算例验证所提策略对于电热联合调度的改善作用，可以达到较好的消纳弃风效果。

有研究考虑风电集中供热，如文献[32]，通过电锅炉消耗风电，实现风电集中供热，建立了含风电、热电、热负荷的联合调度模型，算例结果表明，风电集中供热提高了系统消纳风电的能力。但类似这种风电集中供热策略必须通过电锅炉、热泵等设备实现，本质上还是利用电热耦合设备进行调峰。还有研究只考虑了风电、热电和热负荷，没有考虑电锅炉、储热等设备，建立调度模型分析了热负荷、热电机组比重对风电消纳的影响[33]。

4 含热电和风电的经济调度求解算法

含热电联产机组和风电的发电经济调度问题是一个大规模、非线性、多约束的优化问题，考虑的目标函数除了发电成本外，还包括污染物排放、备用成本、弃风量等目标，以及单目标组成的多目标；而考虑的约束条件除了电力电量平衡、机组出力约束、备用约束、网络安全约束等基本约束外，还包括了热电机组电热特性约束、热力平衡、电热耦合元件运行约束等。

在经济调度的求解方法上，主要分为传统算法和启发式人工智能算法，前者包括拉格朗日松弛法、动态规划法、混合整数法等，后者有遗传算法、进化规划算法和粒子群优化算法等，但都还存在一些不足。如动态规划法计算量太大，须用近似方法加以简化；拉格朗日松弛法是局部最优，可能出现振荡或奇异现象；智能优化算法在解决优化调度问题中有很大的优势，但仍有需要改进的地方，如一些算法的参数设置一般是基于经验值或参考他人的取值，易陷入局部最优等。目前，基于各种算法的改进算法和组合算法成为主流算法。

传统算法上，使用较多的是拉格朗日松弛法和混合整数法。拉格朗日松弛法通过对原优化问题耦合约束的松弛，将原问题分解为主问题和子问题，通过主、子问题之间的迭代，逐渐逼近最优解。文献[34]较早在含热电机组的经济调度问题中使用拉格朗日松弛法，此后基于各种改进的拉格朗日松弛法被广泛使用。如文献[31]提出了基于拉格朗日松弛法的联合优化滚动调度算法及一种自适应的迭代

步长修正法，以提高算法收敛速度和寻优能力。混合整数规划法在物理模型上很适合求解机组组合、经济调度问题，其所寻找的解是全局最优解，能适应复杂逻辑的建模，目前常用大型商业软件如Cplex[20,29]、Gams[11,14]等进行求解。

启发式智能算法上，常用的有遗传算法、粒子群算法等。遗传算法作为一种全局搜索技术，可用于处理以非光滑或非凸函数为目标函数的优化问题。文献[22]采用改进遗传算法，并引入精英保留策略，提升寻优速度。文献[35-36]则分别采用基于乘法器更新的改进遗传算法、带精英策略的快速非支配排序遗传算法求解含热电机组的经济调度问题。粒子群算法通过个体间的协作来搜寻最优解，粒子群及其改进算法对于大规模、非凸、非线性、多约束的调度控制优化问题也是一类有效实用的计算方法，有混合粒子群算法(HPSO)、时变加速常数粒子群算法(TVAC-PSO)、时变加速常数迭代粒子群算法(IPSO-TVAC)等[37]，通过算法改进提高迭代过程中粒子收敛速度和计算精度，避免局部寻优。

组合算法上，通过算法组合，能避免单一算法的不足，提升求解效率和精度。文献[31]提出了一种免疫遗传拉格朗松弛混合算法，采用免疫遗传算法来求解机组组合题，而在热、电负荷经济分配问题中使用了拉格朗松弛算法，实现对含风电、热电优化问题求解。文献[38]将粒子群优化嵌入进化规划过程，提出进化规划粒子群算法求解经济调度问题，提升了计算效率和求解质量。

5　电热协调的实际应用

在国外，为了提升电网调峰能力，除了通过互联电网、灵活调峰机组外，主要策略还包括电力市场的引导、电热耦合设备的增加、分布式供热等。以丹麦、德国、芬兰等北欧国家为例，在实时电价的引导下，很多热电厂配置电锅炉、储热装置来解耦“以热定电”约束，通过提高热电机组灵活性和调峰能力而在电力市场中获利。在瑞典的斯德哥尔摩地区，利用热电厂和大型热泵组合平衡区域间歇能源波动，目前正在运行约 660 MW 的热泵和300 MW 的电锅炉，在保障供热前提下有力的促进了新能源消纳，而且通过电力市场，实现了整个供热区域的经济运行[39]。在丹麦，其电网中热电机组占火电机组的比例超过 90%，高于我国“三北”区域平均水平，丹麦当前风电占发电总量的比例达到了 20%，根据丹麦的电网规划，2020 年，总发电量的 40%要由风电承担，而到了 2050 年，这一比例将高达 60%~80%[40-42]。热电厂通过增设电热耦合设备等方式参与系统调峰，实现灵活运行，已经成为其未来消纳可再生能源的重要手段。另外，丹麦的风电都是分布式的，全国一半以上的电力都是分布式能源，在这种形式下丹麦的热电联产机组多数是小型热电冷三联供机组，在电力市场的调控下，这些电源调节相当灵活，而且丹麦在热交换站之后二次热网侧配置了大量无人值守的调峰锅炉，能够根据用户要求和室外气象变化实现自动调节和启停，进一步提升了对热负荷的调节能力。在美国、德国等地，对于热电机组和热泵联合系统(CHP-HP)的研究和应用比较广泛，与家用住宅供热紧密联系，实现了热负荷的就近平衡[43]。

在国内，虽然关于电热耦合设备和精益化调度的研究成果很多，但是在电力系统实际应用中的并不多。一是在增加电热耦合设备方面，虽然就社会整体效益而言，多消纳风电等清洁能源，减少化石燃料的使用，能节约能源，减少污染物排放，但是就火电厂而言，增加风电消纳，削减火力发电会影响电厂收益，同时增加储热、电锅炉等设备还会增加额外投入，由于现阶段缺乏有效的激励机制，火电厂缺乏参与风电调峰的主动性，因此相关技术在实际应用中较少。二是在精益化调度方面，部分地区电网开展了积极探索。河南电网开发了“热电联产机组在线监测与调度支持系统”,重点解决热电关系共性分析及建模规则、热电关系信息库结构设计、电负荷调度区间、次日发电出力计划预测方法等难题，系统投入后，在供暖期能使大部分机组月平均下限降低 10%以上，提升了电网的调峰空间[44]。冀北电网基于智能电网调控支持系统，开发了热电机组供热监测系统，对冀北电网直调的热电联产机组热负荷、供热抽气量等供热关键数据进行采集和实时监测，并根据机组实时电负荷、供热抽气量和机组热电关系理论曲线等数据计算出机组实时的最大、最小可调负荷，向调度人员提供了更加灵活的调峰依据，促进了冀北地区清洁能源的消纳[45]。

6　结论

针对供热期风电消纳困难的问题，本文从增设电热耦合设备和电网精益化调度两方面对提升系统调峰空间、减少限电弃风的研究成果进行了分类总结，并对国内外实际应用情况进行了概述。分析显示,增设电热耦合设备直接增加了系统了调峰空间，效果明显，但是需要增加投入，而精益化调度更侧重在当前的电源、电网结构下挖掘系统的调峰潜力，但效果不如前者明显。

在电源侧，国内电厂由于缺乏开展热电机组参

与调峰的积极性，未来需要构建合理的政策激励机制，加强价格引导。目前正在开展的火电厂灵活性改造也为电厂以后实施深度调峰提供了基础。在电网侧，则需要根据实际情况，构建科学、可行的电-热联合调度模型，通过多电源、多热源联合以及多周期滚动等方式进一步挖掘系统调峰潜力，提升电网调度精益化水平和新能源消纳水平。

参考文献

[1] 国家能源局. 2016 年风电并网运行情况[EB/OL]. [2017-01-26]. http://www.nea.gov.cn/2017-01/26/c_136014615.htm. National Energy Administration. 2016 wind power grid operation[EB/OL]. [2017-01-26]. http://www.nea.gov.cn/2017-01/26/c_136014615.htm.

[2] 许丹, 丁强, 黄国栋, 等. 考虑电网调峰的热电联产热负荷动态调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 59-64.
XU Dan, DING Qiang, HUANG Guodong, et al. Cogeneration unit dynamic scheduling model considering peak-load regulation ability[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 59-64.

[3] CHRISTIDIS A, KOCH C, POTTEL L, et al. The contribution of heat storage to the profitable operation of combined heat and power plants in liberalized electricity markets[J]. Energy, 2012, 37(1): 75-82.

[4] 宋卓然, 赵琳, 张子信, 等. 热电联产与风电机组联合运行滚动优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 110-116.
SONG Zhuoran, ZHAO Lin, ZHANG Zixin, et al. Rolling optimal model for multiple heating source and wind turbine unit[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 110-116.

[5] MORADI H, MOGHADDAM M P, MOGHADDAM I G, et al. Opportunities to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions for a cogeneration plant[C] // Energy Conference and Exhibition, December 18-22, 2010, Manama, Bahrain: 785-790.

[6] 徐彤, 周云, 王新雷. 300 MW 级热电联产机组调峰能力研究[J]. 中国电力, 2014, 47(9): 35-41.
XU Tong, ZHOU Yun, WANG Xinlei. Research on peak regulation capability of 300 MW combined heat and power plant[J]. Electric Power, 2014, 47(9): 35-41.

[7] 吴龙, 袁奇, 刘昕. 供热机组热电负荷最佳分配方法分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(35): 6-12.
WU Long, YUAN Qi, LIU Xin. Research on the scheme of optimal load distribution for cogeneration units[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(35): 6-12.

[8] 解春林. 火力发电机组深度调峰下汽轮机系统特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
XIE Chunlin. The turbine system characteristics research of thermal power units in deep regulating load[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

[9] PIPERAGKAS G S, ANASTASIADIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Stochastic PSO-based heat and power dispatch under environmental constraints incorporating CHP and wind power units[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(1): 209-218.

[10] 李佳佳, 胡林献. 基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案研究[J]. 电网技术, 2015, 33(11): 3286-3291.
LI Jiajia, HU Linxian. Research on accommodation scheme of curtailed wind power based on peak-shaving electric boiler in secondary heat supply network[J]. Power System Technology, 2015, 33(11): 3286-3291.

[11] 戢伟. 基于电力供暖的促进风电消纳建模与仿真研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
JI Wei. Modeling and simulation of promoting wind accommodation based on electric heating[D]. Jinan: Shandong University, 2014.

[12] Danish Energy Agency. Technology data for energy plants[M]. Denmark: Energinet, 2010.

[13] 张冲. 计及热电负荷转换的电网节能调度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
ZHANG Chong. Research of the grid energy-saving scheduling based on thermoelectric load conversion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[14] 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[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.

[15] 李群英, 冯利民, 许宇辉, 等. 基于水源热泵技术的风电消纳模式[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 25-27.
LI Qunying, FENG Limin, XU Yuhui, et al. Accommodation mode of wind power based on water source heat pump technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 25-27.

[16] MUELLER S, TUTH R, FISCHER D, et al. Balancing fluctuating renewable energy generation using cogeneration and heat pump systems[J]. Energy Technology, 2014, 2(1): 83-89.

[17] 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.

[18] RINNE S, SYRI S. The possibilities of combined heat and Power production balance large amounts of wind power in Finland[J]. Energy, 2015, 40: 1034-1046.

[19] STRECKIENE G, MARTINAITIS V, ANDERSEN A N, et al. Feasibility of CHP-plants with thermal stores in the German spot market[J]. Applied Energy, 2009, 86(11): 2308-2316.

[20] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 含储热的电力系统电热综合调度模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 79-85.
LÜ Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Combined heat and power dispatch model for power system with heat accumulator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 79-85.

[21] 于炎娟, 陈红坤, 姜欣, 等. 促进风电消纳的蓄热罐运行策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 37-43.
YU Yanjuan, CHEN Hongkun, JIANG Xin, et al. Operation strategy for heat storage tank to improve wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 37-43.

[22] 崔杨, 陈志, 严干贵, 等. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 35(15): 4072-4080.
CUI Yang, CHEN Zhi, YAN Gangui, et al. Coordinated wind power accommodating dispatch model based on electric boiler and CHP with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 35(15): 4072-4080.

[23] 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 Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1848-1857.

[24] 龙虹毓, 徐瑞林, 何国军, 等. 基于热电风电协调调度的系统日调峰能力分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 30-34.
LONG Hongyu, XU Ruilin, HE Guojun, et al. Analysis of peak-load regulation capability based on combined dispatch of wind power and thermal power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 30-34.

[25] LUND H, WOODROW C. Management of fluctuations in wind power and CHP comparing two possible Danish strategies[J]. Energy, 2002, 27(5): 471-483.

[26] 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, 2015, 7(1): 12-22.

[27] YANG Y, WU K, LONG H, et al. Integrated electricity and heating demand-side management for wind power integration in China[J]. Energy, 2014, 39: 235-246.

[28] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3596-3604.
GU Zepeng, KANG Chongqing, CHEN Xinyu, et al. Optimization of integrated power and heat energy Systems and the benefit on wind power accommodation having heating network constraints[J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(14): 3596-3604.

[29] 吴雄, 王秀丽, 别朝红, 等. 含热电联供系统的微网经济运行[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 1-6.
WU Xiong, WANG Xiuli, BIE Zhaohong, et al. Economic operation of microgrid with combined heat and power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 1-6.

[30] 孙国强, 周亦洲, 卫志农, 等. 能量和旋转备用市场下虚拟电厂热电联合调度鲁棒优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3118-3128.
SUN Guoqiang, ZHOU Yizhou, WEI Zhinong, et al. Thermal and electrical scheduling of a virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets based on robust optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3118-3128.

[31] 陈建华, 吴文传, 张伯明, 等. 消纳大规模风电的热电联产机组滚动调度策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24): 21-27.
CHEN Jianhua, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A rolling generation dispatch strategy for co-generation units domestic setting large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 21-27.

[32] 苏阔. 含风电集中供热的电力系统优化调度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
SU Kuo. Research on power system optimal dispatch with wind power central heating[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[33] 张冲, 胡林献, 胡佳. 热电机组比重及热负荷对风电消纳率影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 120-125.
ZHANG Chong, HU Linxian, HU Jia. Research on the impact of the proportion of thermal power generating units and heat load on the wind power accommodation rate[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 120-125.

[34] GUO T, HENWOOD M I, VAN OOIJEN M. An algorithm for combined heat and power economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1778-1784.

[35] SU C, CHIANG C. An incorporated algorithm for

combined heat and power economic dispatch[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 69(2): 187-195.

[36] BASU M. Combined heat and power economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 53(1): 135-141.

[37] 孟安波, 梅鹏, 卢海明. 基于纵横交叉算法的热电联产经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 90-97.
MENG Anbo, MEI Peng, LU Haiming. Crisscross optimization algorithm for combined heat and power economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 90-97.

[38] LEE T Y. Optimal spinning reserve for a wind-thermal power system using EIPSO[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1612-1621.

[39] LEVIHN F. CHP and heat pumps to balance renewable power production: lessons from the district heating network in Stockholm[J]. Energy, 2017, 42: 670-678.

[40] LUND H, MATHIESEN B V. Energy system analysis of 100% renewable energy systems-the case of Denmark in years 2030 and 2050[J]. Energy, 2009, 34(5): 524-531.

[41] STRECKIENE G, MARTINAITIS V, ANDERSEN A N, et al. Feasibility of CHP-plants with thermal stores in the German spot market[J]. Applied Energy, 2009, 86(11): 2308-2316.

[42] VITTORIO V, FRANCESCO C. Primary energy savings through thermal storage in district heating networks[J]. Energy, 2011, 36(7): 4278-4286.

[43] CHO H, SARWAR R, MAGO P J, et al. Design and feasibility study of combined heat and power systems integrated with heat pump[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 155-165.

[44] 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): 14-17.
MA Jianwei, GE Ting, JING Bailin, et al. Research and practice for energy-saving power generation and dispatching of cogeneration power unit[J]. Electric Power, 2009, 42(4): 14-17.

[45] 李刚, 贾文昭, 刘斌, 等. 基于D5000平台的冀北火电机组烟气排放及供热监测系统的开发与应用[J]. 华北电力技术, 2016(6): 6-11.
LI Gang, JIA Wenzhao, LIU Bin, et al. Development and application of Jibei thermal power unit flue gas emissions and heating unit on-line monitoring system on the D5000 platform[J]. North China Electric Power, 2016(6): 6-11.

收稿日期：2017-08-04； 修回日期：2017-11-08

作者简介：

黄国栋(1988—)，男，通信作者，硕士，工程师，研究方向为电力系统经济调度；E-mail: hgd2088@126.com

许 丹(1985—)，男，硕士，高级工程师，主要从事电力系统节能经济调度等方面的研究工作；

丁 强(1981—)，男，硕士，高级工程师，主要从事电力系统分析与优化等方面的研究工作。

(编辑 姜新丽)