

DOI: 10.7667/PSPC160845

## 考虑电网调峰的热电联产热负荷动态调度模型

许丹, 丁强, 黄国栋, 戴赛

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 我国北方地区有丰富的风光可再生能源, 冬季热电联产机组为满足热负荷需求而限制了其调峰能力, 在一定程度上造成了风光与热能的结构性矛盾。针对上述问题, 提出以多个机组共同满足热负荷为前提, 通过构建考虑电网调峰的热电机组群热负荷动态调度模型, 实现对不同热电机性能机组的调峰潜力挖掘。仿真算例表明, 如果机组群内存在较为明显的热电关系个体差异, 热负荷动态调度可以较为明显地提升机组群的整体调峰性能, 有效增加风光清洁能源消纳。

**关键词:** 热电联产; 电网调峰; 热负荷分配; 风光消纳; 动态调度

### Cogeneration unit dynamic scheduling model considering peak-load regulation ability

XU Dan, DING Qiang, HUANG Guodong, DAI Sai

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

**Abstract:** Northern China has rich wind power and photovoltaic renewable resources. To meet the load demand, heat cogeneration units limit its peak load regulation capacity in winter, to a certain extent, resulting in structural problems of wind-solar power and thermo electric power. To solve those problems, this paper takes a plurality of units together to ensure the supply of heat load as the premise, by building a thermal load dynamic scheduling model of thermoelectric unit group considering power network peak regulation, to achieve the peak regulation potential excavation of different thermoelectric properties units. Simulation examples show, if the unit group exists obvious thermoelectric relationship individual differences, the thermal load dynamic scheduling can improve the overall peak regulation performance of unit group more significantly, and increase solar wind power consumption effectively.

**Key words:** cogeneration units; peak load regulation; thermal load distribution; solar wind power consumption; dynamic scheduling

## 0 引言

按规划目标预计, 到“十三五”末, 国家电网公司区域内的水电、风电、光伏发电装机将分别增至 2.7 亿 kW、2.2 亿 kW 和 1.1 亿 kW, 合计 6 亿 kW, 风光等新能源并网消纳问题将更为突出。风光的消纳难题, 一定程度上受困于这一间歇性可再生能源与传统能源系统集成方式的不协调。以我国“三北”地区为例, 冬季风光资源尤为丰富, 但可参与风光消纳的电网调峰资源却因为热电联产机组以热定电模式而被进一步压缩。另一方面, 热电联产相比热电分产具有明显的经济优势, 因此为进一步提

高能源利用效率热电联产机组的所占比例还会进一步增加。大量现有研究表明二者的大量共存会给电网调峰带来较大困难<sup>[1-10]</sup>。因此如何协调热电联产机组和风光并网之间的矛盾是近年来众多学者的研究热点。

文献[1-11]均是从调度运行的角度, 将热负荷与电负荷进行统一优化调度, 对现有的电网经济调度模型进行扩展, 新增热力运行约束, 在满足热负荷的前提下尽可能地实现清洁能源消纳。大多文献均提出解决该问题的一个核心思想都是增强电网侧的调峰能力。理论上热电联合调度是一种较好的解决热电与其他类型电源优化协调的技术手段, 但上述方法要求具备较为复杂的外部数据, 需要将电力供应与热力供应实现一体化调度, 在当前的调度模式下实现起来具有一定的难度。文献[12]根据制造厂

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“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”

提供的热电联产工况图求取机组的热电关系曲线,以机组总热耗最小为目标求解电负荷最佳分配方案,这种模式比较适合电网调度部门给出机组群的电力负荷,而由机组群自身完成电负荷分配,它类似于将优化目标改为热耗最小的经济调度,但文中不考虑电网侧的运行约束。文献[13]通过硬件投入的方式,提出了在大型抽汽式热电厂中通过配置储热来提高机组调峰能力的方案,对配置储热前、后热电厂的热电运行外特性进行了分析与建模,研究表明,在给定的供热中期的热负荷水平下,配置储热可使得机组的调峰容量得到明显提升。

热电联产机组由于以热定电的生产方式,为确保热负荷供应从而限制了其调峰能力。对于电网调度运行而言,考虑热负荷需求后的热电联产机组的电功率区间成为了发电计划制定中经济调度的边界条件。在实际生产中由于某些原因,一方面热电厂的电功率上下限难以做到及时调整,另一方面一个区域内的热负荷在不同机组之间分配时并未考虑到机组的整体调峰能力,因此热电联产机组的实际调峰能力应该具有更大的挖掘潜力。由文献[12]可知,热和电的耦合关系可由机组电热关系曲线描述,不同的机组具有不同的关系曲线,多机组之间在满足总热负荷需求的前提下存在一个整体调峰性能最佳的热负荷分配方案。因此文中认为在保障热负荷需求的前提下,通过建立考虑电网调峰能力的热电联产机组群热负荷优化调度模型,可以进一步优化热电联产机组的电功率运行区间,如果能将该电功率区间定期传至电网调度运行部门则可提升风光清洁能源消纳能力。

## 1 热电联产机组运行性能分析

### 1.1 热电联产机组热电关系分析

热电关系曲线是分析机组热负荷供应与电功率调节的关键变量,因此研究机组的调峰性能需要从该关系入手。图1给出了一个较为典型的热电关系曲线示意图,曲线中横坐标为电功率 $P$ ,纵坐标为热负荷抽气量 $Q$ 。通过对该类型曲线的分析可知,在给定抽气量 $Q$ 后,电功率的极限值由两侧的边界曲线所决定,分别称之为满足热负荷的电功率下限值 $P_{\min}$ 和电功率上限值 $P_{\max}$ ,定义调整区间 $P_{\text{ran}}=P_{\max}-P_{\min}$ 。总体而言抽气量越大,调整区间 $P_{\text{ran}}$ 越小。

由于边界线一般都是系列不规则曲线,为方便后续模型构建,文中将边界曲线进行分段线性化,如在图1中则将边界曲线按照抽气量分为4个区间,分别对应图中箭头所示的1~8号边界曲线,每段斜

线均采用直线方程表示。假设曲线1和曲线8的方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} Q_1 = a_1 \cdot P_{1,\min} + b_1 \\ Q_1 = a_2 \cdot P_{1,\max} + b_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $a_1, a_2, b_1, b_2$ 为已知常数。

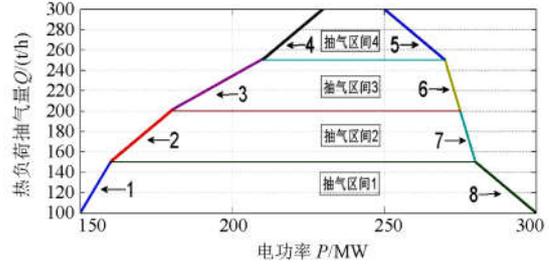


图1 热电关系曲线意图

Fig. 1 A sketch map of thermoelectric relationship

那么在抽气区间1中,当给定抽气量 $Q$ 时,极限调整区间的表达式 $P_{1,\text{ran}}$ 如式(2)所示。

$$P_{1,\text{ran}} = \frac{Q - b_2}{a_2} - \frac{Q - b_1}{a_1} \quad (2)$$

对传统火电机组进行热电联产改造时,由于传统火电机组性能各异,热电关系曲线也具有一定的差异性,且通过配备不同的储热装置还可以对曲线进行后续调整<sup>[5]</sup>。

### 1.2 热电联产机组运行费用分析

在传统火电的经济调度中,机组的煤耗(运行费用)通常表示为机组出力的二次曲线,而热电联产机组的运行费用则可表示为机组电功率和热功率的二次曲线<sup>[7]</sup>,如式(3)所示。

$$f = c + a_p \cdot P + b_p \cdot P^2 + a_q \cdot Q + b_q \cdot Q^2 + d_{qp} \cdot P \cdot Q \quad (3)$$

式中: $c$ 为常数项; $a_p$ 和 $b_p$ 为电功率一二次系数, $a_q$ 和 $b_q$ 为热功率一二次系数; $d_{qp}$ 为热电耦合项系数。对单台机组而言在热电解耦即优化目标仅包含供热或供电的情况下,通过对二次曲线的分析可知,热或电都运行在额定功率附近最为经济。但如果同时考虑供热和供电成本,最优值的确定则较为复杂。对式(3)的线性化或合理的解耦方式是问题求解的关键。

## 2 考虑电网调峰的热负荷动态调度模型

### 2.1 热电联运常规优化调度模型

通常热电联运优化调度问题,是在满足机组运行及热网电网各项相关约束的前提下实现整体运行费用的最小化。如式(4)所示。

$$\min f = \sum_{i=1}^N f_i \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^N P_i = P_{\text{load}} \\ \sum_{i=1}^N Q_i = Q_{\text{load}} \\ P \leq F_p(\cdot) \\ Q \leq F_q(\cdot) \end{cases} \quad (5)$$

式(4)中,  $f_i$  为机组  $i$  的运行费用。式(5)的约束主要包含电平衡约束、热平衡约束及各类不等式约束。文献[1-10]中对该模型有较为详细的描述, 在此不再赘述。该模型对热电联产的优化调度描述较为完备, 但它需要较为完善的供热供电数据, 且需要热和电统一调度, 在模型计算效率<sup>[5]</sup>方面也有待进一步提升。为了能在热电解耦的状态下通过改善电网调峰能力提升风电消纳比例, 本文提出了考虑电网调峰的热电联产热负荷动态调度模型。

## 2.2 热负荷调度优化目标

本文的主要目标是通过合理分配热负荷改善电网调峰性能, 提升风光清洁能源的消纳能力。其中调峰性能可从两个角度进行考虑, 角度一是使整体热电联产机组具有最大的电功率调节区间, 角度二是使其具有最小压出力能力, 即在负荷低谷时期让出更多的发电空间。在电网调度计划编制中, 角度一和角度二均可影响电网调峰性能, 而对于电功率负荷需求低谷时段, 角度二对于风光并网具有更为直接的影响效果。由上节可知, 若系统中有多台热电边界曲线不一致的联产机组时, 在满足热负荷需求的前提下, 存在一个热负荷分配方案, 使得机组的整体电功率调整区间  $P_{\text{sum,ran}}$  最大化, 或整体电功率出力最小化。在电网调度中, 通常按照各时段负荷需求进行动态经济调度, 而热负荷由于调度周期内外界天气情况的变化各时段通常也不一样, 因此本文针对调度周期内的热负荷需求进行动态负荷分配建模, 优化目标可按照需求选择式(6)或式(7)。

$$\max P_{\text{sum,ran}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N P_{i,t,\text{ran}} \quad (6)$$

式中:  $P_{i,t,\text{ran}}$  为机组  $i$  在时刻  $t$  给定热负荷  $Q$  以后所对应的极限调节能力;  $N$  为热电机组总数;  $T$  为总的时段数。

$$\min P_{\text{sum,min}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N P_{i,t,\text{min}} \quad (7)$$

式中,  $P_{i,t,\text{min}}$  为机组  $i$  在时刻  $t$  给定机组热负荷  $Q$  以后所对应的最小电功率。

当然, 由于电网侧调峰压力通常在电负荷低谷时期, 为具有更强的针对性并适当简化模型, 优化目标可针对特定时段求取即可。

## 2.3 热负荷调度约束条件

### (1) 热负荷需求约束

热电联运机组首先需要满足热负荷需求。

$$Q_{\text{load},t} \leq \sum_{i=1}^N Q_{i,t} \quad (8)$$

式中:  $Q_{\text{load},t}$  为时刻  $t$  的热负荷总需求;  $Q_{i,t}$  为机组  $i$  在时刻  $t$  的热功率。

### (2) 电负荷需求约束

在做热负荷经济调度时, 无需获取电网的电负荷需求, 但不同的电负荷需求将直接影响热负荷供应, 因此电负荷约束将以负荷需求区间的形式得以考虑。

$$\begin{cases} P_{\text{load},t,\text{min}} \geq \sum_{i=1}^N P_{i,\text{min},t} \\ P_{\text{load},t,\text{max}} \leq \sum_{i=1}^N P_{i,\text{max},t} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{\text{load},t,\text{min}}$ ,  $P_{\text{load},t,\text{max}}$  为电负荷需求的上下限;  $P_{i,\text{min},t}$ ,  $P_{i,\text{max},t}$  为给定抽气量时对应的电功率上下限。该式的意义是, 所有机组的电功率总和要能够满足负荷的上下限约束。

### (3) 热电耦合约束

如图1所示的热电关系曲线, 本文所提的优化目标将使优化结果落在热电关系边界上, 即线性关系曲线上。运用式(1)即可实现热电耦合约束。

### (4) 热功率运行约束

由于受制于机组运行工况, 因此机组热功率需要满足热功率运行约束。

$$\begin{cases} Q_{i,\text{min}} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,\text{max}} \\ Q_{i,t} - Q_{i,t-1} \leq Q_{i,\text{up}} \\ Q_{i,t-1} - Q_{i,t} \leq Q_{i,\text{down}} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $Q_{i,\text{max}}$ ,  $Q_{i,\text{min}}$  为机组  $i$  的最大最小抽气量;  $Q_{i,\text{up}}$  为机组  $i$  在相邻时间段内的增抽气限额;  $Q_{i,\text{down}}$  为机组  $i$  在相邻时间段内的减抽气限额, 可理解为热功率爬坡约束。

### (5) 电功率运行约束

同样机组还需要满足电功率运行约束。

$$\begin{cases} P_{i,\text{min}} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\text{max}} \\ P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_{i,\text{up}} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq P_{i,\text{down}} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $P_{i,\text{max}}$ ,  $P_{i,\text{min}}$  为机组  $i$  出力上下限;  $P_{i,\text{up}}$ ,  $P_{i,\text{down}}$  为机组  $i$  电功率爬坡速率上下限。

## 2.4 分段热电关系曲线处理方式

实际中一台热电联产机组的热电关系曲线并非由一个抽气区间的两条线性曲线即可描述, 他通

常可能是一系列不规则曲线构成,如图1所示。此时,仅按照2.2节和2.3节所述的描述无法实现模型构建。因为对于如图1所示的机组当其处于不同的供热区间时,将对应不同的 $P-Q$ 关系,因此上述模型无法自动确定 $P-Q$ 之间所应采用的关系式。

为解决上述问题,则需要对模型进行改进。本文采用的方式是通过分段线性化将问题转变为0-1混合整数规划问题。构建策略如下。

(1) 首先根据计算精确度要求将热电关系曲线进行分段线性化,按照分段数拆分成对应的多个虚拟机组。如图1中所示的关系曲线则拆分为4台虚拟机组,其热电运行性能分别对应为抽气区间1~4。

(2) 对分拆的虚拟机组构建0-1变量 $S_{f,t}$ 。由于每一个时段抽气量只可能落在一个抽气区间,因此对分拆的机组需要满足以下虚拟开停约束。

$$\sum_{f \in I} S_{f,t} = 1 \quad (12)$$

式中: $S_{f,t}$ 表示分拆出来的虚拟机组 $f$ 的开停状态; $I$ 表示原有的实际物理机组 $I$ 。

(3) 对虚拟机组通过添加0-1变量改造2.1节和2.2节中的目标函数和约束条件。例如式(7)改为式(13)。

$$\min P_{\text{sum,min}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N'} S_{i,t} \cdot P_{i,t,\text{min}} \quad (13)$$

式中: $N'$ 是包含虚拟机组的机组总数;对于非虚拟机组,则 $S_{i,t}=1$ 。

对于约束条件,例如式(10)改为式(14)。

$$\begin{cases} Q_{i,\text{min}} \cdot S_{i,t} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,\text{max}} \cdot S_{i,t} \\ Q_{i,t} - Q_{i,t-1} \leq Q_{i,\text{up}} \\ Q_{i,t-1} - Q_{i,t} \leq Q_{i,\text{down}} \end{cases} \quad (14)$$

其他表达式也按照类似的方式修改即可完成模型构建。至于模型的求解,这是一个典型的混合整数规划问题,文中采用成熟的商业规划程序CPLEX进行求解。

### 3 算例及其分析

为了验证所提模型的正确性及本文模型对电网调峰能力的改善程度,文中构建了一个10机系统。其中机组1和2由两个抽气区间构成,机组3~8由一个抽气区间构成,机组9热电关系为单纯的线性关系,机组10由4个抽气区间构成(由于篇幅所限,具体的机组参数不再罗列)。根据文中所提的建模方式,共划分为包含虚拟机组在内的15台机组,模型在Xeon E7420 2.13 GHz服务器上求解,

计算时间小于1s。预测的热负荷需求如图2所示。预测的电负荷需求如图3所示。

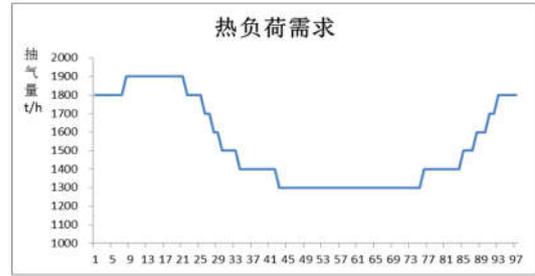


图2 热负荷预测值

Fig. 2 Thermal load forecast value

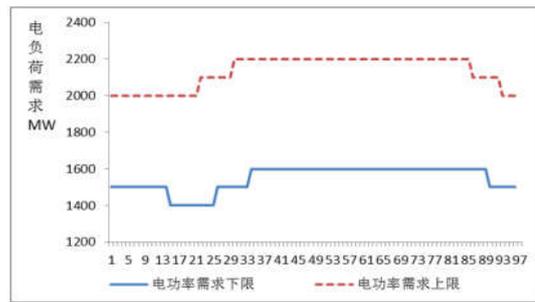


图3 电负荷预测值

Fig. 3 Load forecast value

#### 3.1 对电网调峰性能的影响分析

为了验证对电网调峰性能的影响,算例以整体电功率出力最小化为优化目标,第一个时间断面的计算结果如表1所示。

表1 热负荷优化结果

Table 1 Optimization results of thermal load

机组名称	电功率下限/MW	电功率上限/MW	抽气量/(t/h)
热电1	75	142	60
热电2	80	136	100
热电3	112	126	190
热电4	150	300	100
热电5	150	250	300
热电6	180	280	300
热电7	180	250	300
热电8	150	300	100
热电9	100	100	200
热电10	160	280	150

此时10台机组的电功率下限为1337 MW。

如果将热负荷按照机组可供热容量进行抽气量分配,再根据分配的热负荷求取每台机组的电功率调节区间,其结果如表2所示。

表2 热负荷容量分配结果

Table 2 Capacity allocation results of thermal load

机组名称	电功率下限/MW	电功率上限/MW	抽气量/(t/h)
热电 1	84	130	128
热电 2	87	130	128
热电 3	100	134	140
热电 4	178	289	210
热电 5	173	273	210
热电 6	166	289	210
热电 7	166	272	210
热电 8	177	272	210
热电 9	141	141	142
热电 10	187	274	212

此时 10 台机组的电功率下限为 1459 MW, 对比两种方式, 本文所提的优化模式可使电功率下降 122 MW, 可提升调峰深度 8.36%。在风电大发时期, 如果出现大量弃风, 通过该方式则可提升 122 MW 的风电消纳空间。当热电联产机组规模较大时该模式可带来较为可观的调峰能力提升。

### 3.2 对系统经济性的影响分析

实际中, 按照式(4)、式(5)的模式进行热负荷分配是最经济的选择, 本文将对按调峰模式和按热容量模式两种方式进行经济性对比, 测算调峰模式所带来的经济代价。式(3)中的系数采用文献[7]中的数据。假设两种模式中电功率是一致的, 仅考虑由热功率分配不同所带来的经济差异。结果如表 3 所示。其中调峰模式的总成本比热容量模式的总成本上升了 2.3%。由于热电厂在风电消纳过程中并未获取额外利益, 却付出了额外成本, 因此如何对此时的热电厂给予经济补贴是一个需要进一步研究的问题。

表3 两种模式的经济对比

Table 3 Economic comparison of the two models

机组编号	电负荷需求/MW	调峰模式热负荷/(t/h)	热容量模式热负荷/(t/h)	调峰模式成本/元	热容量模式成本/元
1	84	60	128	4628	5474
2	87	100	128	5162	5547
3	100	190	140	6915	6055
4	178	100	210	7596	9688
5	173	300	210	11 760	9522
6	166	300	210	11 511	9293
7	166	300	210	11 511	9293
8	177	100	210	7566	9655
9	141	200	142	8295	7202
10	187	150	212	8742	10 036

### 3.3 热负荷灵敏性分析

当在周期内按照图 2 所示的热负荷需求进行整个周期的热负荷分配时, 一定会有机组参与热负荷

调整。按照文中各机组的热电关系曲线进行仿真计算, 结果表明机组 1, 2, 5, 9, 10 均未参与调整即以恒定抽气量运行, 而机组 3, 4, 6, 7, 8 则负责平抑热负荷波动。

经过分析可知其负荷分配的原则取决于热电关系的斜率  $a$ , 当  $a$  越大则表明少量的电功率限额波动即可实现较大的热负荷改变, 当以本文所提调峰能力最强为优化目标时, 斜率  $a$  越小越适合承担基值热负荷。

如果想做到更为精细化的热负荷分配, 按照本文所提模型, 只需要增加热电联产机组抽气区间的划分数即可。当所有机组的热电关系曲线划分到足够多的分段线性函数时, 即可获得较高精度的优化结果, 当然该措施也会同时增加模型的计算量。

### 3.4 电负荷灵敏性分析

由于电负荷需求会直接影响机组的热负荷供应, 因此有必要分析电负荷变化时对热负荷优化分配的影响。对于图 3 中的电负荷需求曲线, 首先假设系统需要机组进一步降低有功出力, 将电功率需求下限下调 100 MW, 此时模型无解。因为此时的负荷低谷需求已经小于热电机组在保障热负荷需求前提下能够提供的最小总有功 1300 MW。当把电功率上下限都提高 100 MW 时, 系统能够得到与之前数据同样的结果。然而如果将电功率提高 200 MW 时, 此时必须同时提高热负荷需求, 增加供热量, 否则模型同样无解。算例仿真表明, 在保障热负荷供应的前提下, 模型所求得电功率边界已接近于极限边界, 此时对电功率区间的边界数据较为敏感, 但同时也说明, 本文所提的模型可以用于获得较为准确的电功率区间。

## 4 结论

针对热电联产机组为确保热负荷供应而限制了机组调峰能力, 造成风光消纳不足的问题, 本文提出了以多个机组共同确保热负荷供应, 充分发挥不同热电性能机组的调峰潜力的运行策略。文中构建了考虑电网调峰的热电联产机组群热负荷动态调度模型, 并对不规则热电关系曲线提出了解决办法。仿真算例表明, 如果机组群内部个体之间存在较为明显的热电关系差异, 多机组的热负荷动态调度方法可以在确保负荷需求的前提下有效地提高热电联产机组的调峰能力。当然由于考虑电网调峰而牺牲的购热效益是一个需要进一步研究的经济性问题。

### 参考文献

[1] 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.
- [2] 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.
- [3] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 基于遗传算法的热电联产型微网经济运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 7-15.  
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Genetic algorithm based economic operation optimization of a combined heat and power microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 7-15.
- [4] 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. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3596-3604.
- [5] SHAN Huanhuang, PEI Chunlin. A harmony-genetic based heuristic approach toward economic dispatching combined heat and power[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 53: 482-487.
- [6] 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 accommodating large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 21-27.
- [7] 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.  
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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 曾德良, 简一帆. 火电厂负荷分配的多目标优化算法[J]. 热力发电, 2017, 46(5): 98-102.  
ZENG Deliang, JIAN Yifan. Multi-objective optimization algorithm for load distribution in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(5): 98-102.
- [12] 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.
- [13] 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.  
LÜ 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.

收稿日期: 2016-06-12; 修回日期: 2016-09-12

作者简介:

许丹(1985—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统节能经济调度; E-mail: xudan@epri.sgcc.com.cn

丁强(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统节能经济调度; E-mail: dingqiang@epri.sgcc.com.cn

黄国栋(1988—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统节能经济调度。E-mail: huangguodong@epri.sgcc.com.cn

(编辑 周金梅)