文章编号: 2096-5125 (2021) 02-0107-08 DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.02.001 中图分类号: TM617

文献标志码: A

# 含蒸汽蓄热器的工业蒸汽系统发电灵活性量化

单文亮<sup>1</sup>,徐宪东<sup>1\*</sup>,孙文强<sup>2</sup>,穆云飞<sup>1</sup>,吴建中<sup>3</sup>,贾宏杰<sup>1</sup>
(1.天津市智慧能源与信息技术重点实验室,天津市 南开区 300072;
2.东北大学热能工程系,辽宁省 沈阳市 110819;
3.卡迪夫大学工程学院,英国 卡迪夫市 CF24 3AA)

## Quantifying the Electricity Flexibility of Industrial Steam Systems with a Steam Accumulator

SHAN Wenliang<sup>1</sup>, XU Xiandong<sup>1\*</sup>, SUN Wenqiang<sup>2</sup>, MU Yunfei<sup>1</sup>, WU Jianzhong<sup>3</sup>, JIA Hongjie<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Energy & Information Technology of Tianjin Municipality, Tianjin, 300072, China;

2. Department of Thermal Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning Province, China;

3. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, UK)

Abstract: Industrial steam systems generally have turbine generators onsite to improve energy efficiency, which also enables the steam system to flexibly choose between the local electricity generation system and the public power grid. However, supporting the operation of the power grid would cause more fluctuations with regard to steam supply and demand and further reduce the energy efficiency and operational security of the steam system. To address this issue, we herein first discuss the configurations of industrial steam systems with a steam accumulator and the flexibility of this system. Subsequently, definition and metrics are used to evaluate the flexibility of the steam system. Finally, an optimal operational scheme was designed to evaluate the metrics. The impact of the steam accumulator on the steam system was analyzed using a real industrial system in Europe.

**Keywords:** flexibility; industrial steam system; power grid; steam accumulator

**摘 要:**工业蒸汽系统常配有透平发电系统以提高能源利用 率,让工业用户能够灵活选择本地发电或外部电网供电。因 响应电网需求而带来的发电调整可能会导致系统蒸汽供给和 需求的不平衡,造成蒸汽系统运行的大范围波动,进而影响 能源利用效率以及蒸汽系统运行安全。针对这一问题,讨论 了含有蒸汽蓄热器的工业蒸汽系统结构,给出了相应的模 型。进一步,提出了该系统发电灵活性的定义、关键性能指 标以及基于最优运行模型的量化方法。通过位于欧洲的某造 纸企业的实际工业蒸汽系统应用,评估了蒸汽蓄热器对于提 高系统灵活性和关键性能指标的作用。 关键词:灵活性;工业蒸汽系统;电网;蒸汽蓄热器

# 0 引言

随着间歇式可再生能源接入比例的提高以及传统 火电厂的逐渐退出,更多的不确定资源引入与减少的 灵活调节资源之间的矛盾在电力系统内不断凸显。近 年来,澳大利亚、阿根廷及英国相继出现少部分电厂 脱网造成的大范围停电事故,进而导致铁路、公路、 供水等基础设施受到影响。为保证高比例可再生能源 条件下发电和负荷的平衡,电力系统的灵活性受到了 各国的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。

传统电力系统一般以火电、水电厂等常规电源出 力调节来应对用户侧电力需求的变化,尽管可以通过 新建电厂以及建设储能电站从技术上能够解决这样的 矛盾,但也伴随着建设周期长、投资量大以及潜在的 环境影响等问题。另一方面,考虑到节能减排的压 力,可以预见未来传统火电厂会不断退出运行,在整 个发电系统中的比例不断降低,因此,有必要挖掘现 有系统各个环节的灵活性,避免重复投资造成的资源 浪费。研究表明,电力需求侧资源通过改变自身的行 为能够与现有发电厂和电网协同,提高电力系统的灵 活性,提高可再生能源的消纳能力<sup>[4-5]</sup>。

以高能耗行业为代表的工业用户是电力系统的主要负荷,通过调整自备电厂发电量,结合工业用电需求,工业用户能够实现发电和用电的双向调节<sup>[6]</sup>。在钢铁、化工、造纸等行业,蒸汽发电系统已有广泛的

基金项目: 国家自然科学基金中英联合基金(52061635103); EPSRC/NSFC CM2 (EP/T021969/1); 国家自然科学基金重点项 目 (51734004)。

应用,一方面满足生产过程中的机械能和热能等需 求,另一方面满足本地供电需求,增加系统供电可靠 性门。通过调节阀门、锅炉等设备的运行,工业用户 能够有效改变自备电厂出力,实现本地节能的同时, 支持外部电网运行<sup>[8]</sup>。尽管目前出于降低碳排放角度 考虑,部分企业关停了自备电厂,但从全球范围来 看,一方面,天然气作为燃料带来的碳排放相对低且 能源经济性较好,另一方面,对于一部分工业系统, 蒸汽透平发电机与生产系统紧密耦合,自备电厂退出 运行改造复杂,短期内自备电厂依然会在工业用户供 能系统中占有较高比例。目前实际系统中已有工业用 户使用少部分自备电厂容量给电网提供灵活性获取相 应的收益[9-10]。如何评估一个工业用户自备电厂出力 的可调节能力以实现提供灵活性给电力系统的同时保 证工业生产的能源需求[11],是利用工业系统灵活性前 必须回答的问题。

本文研究对象为工业用户自备电厂的运行灵活 性。传统热电厂灵活性研究侧重于发电设备的自身工 作范围、爬坡率、启动和关闭时间、最小启动和关闭 时间等特征<sup>[12]</sup>,以及发电机参与电网调度面对的线路 潮流约束等[13]。不同于一般热电厂,对于工业蒸汽发 电系统来说,主要工作目标是满足生产过程的蒸汽需 求。而由于蒸汽系统存在,发电系统与蒸汽系统、燃 料系统以及生产过程相互耦合,生产过程的进行会导 致用能和副产燃料的变化,进而影响整个供能系统 的运行[14]。针对这样一个工业蒸汽系统的运行优化问 题,目前已有广泛的研究,比较典型的有面向电力市 场和电价变化的发电量灵活调整<sup>[6,15]</sup>,以及参与频率 响应的经济性<sup>[9]</sup>和生产需求约束下参与频率响应的实 际能力<sup>[10]</sup>。尽管相关研究已经涉及自备电厂和蒸汽发 电系统的灵活性[16-17],但是考虑蒸汽蓄热器的工业蒸 汽系统灵活性分析方法目前则鲜有论述。

传统方法对于这类需求,主要是从响应速度、响 应能力、服务持续时间3个指标来描述<sup>[18]</sup>。对于一般 的工业蒸汽系统,服务持续时间一般只受发电机运行 策略以及服务投标容量限制<sup>[17,19]</sup>,而对于含有蒸汽蓄 热器的系统,一方面发电机的最优运行策略会发生变 化<sup>[20]</sup>,进而影响系统响应能力和服务可持续时间;另 一方面,蓄热器与外界交换蒸汽的过程中会受到其最 大可用容量的约束,蓄热器充满或放空之后系统可用 灵活性会缩减。这样的蒸汽系统,其灵活性评估还需 要进一步研究。

本文在已有研究的基础上,针对这两方面的问

题,做了以下工作:①构建含有蒸汽蓄热器的工业 蒸汽系统的最优运行模型;②给出了工业蒸汽系统 的关键性能指标,并给出了相应的性能评价方法; ③利用一个位于欧洲的造纸厂工业蒸汽系统,结合所 在地能源市场条件,评估了蒸汽蓄热器对于工业蒸汽 系统发电灵活性的提升作用。

## 1 系统结构及运行模式

## 1.1 系统结构

#### 1.1.1 热电联产

本文以一个典型的造纸厂蒸汽系统为例展开研 究,如图1所示。该系统包括蒸汽、燃料、发电3个子 系统。其中蒸汽系统包括高、中、低3个压力等级。 利用一台天然气锅炉和一台回收锅炉制备蒸汽,天然 气锅炉由外部燃气网获取燃料,回收锅炉利用造纸过 程副产原料(黑液)和天然气共同作燃料。高压蒸汽 通过蒸汽管网推动透平发电机发电,同时产生低压蒸 汽满足生产过程需求。透平发电机中间还包括了一个 抽气环节满足生产过程的中压蒸汽需求。当生产环节 发生扰动(如设备突然停机),蒸汽负荷变小,而蒸汽 供应来不及调整,多余的蒸汽将通过减压阀排放到外 部环境中。生产系统用电由透平-发电环节与电网共 同供应,保证供电可靠性的同时,让用户可以在一定 范围内灵活选择本地发电或外部电网供电。



Fig. 1 Schematic diagram of an industrial CHP with steam accumulator

#### 1.1.2 蒸汽蓄热器

参考已有系统结构<sup>[17]</sup>,本文选择一个接入在系统 中压和低压管网中间的蒸汽蓄热器(如图2所示),分 析该设备对于系统灵活性的提升作用等。该蓄热器从 中压系统获取蒸汽增加设备中蒸汽存量,根据系统需 求,可以控制蓄热器释放蒸汽到低压系统中,保证低 压侧蒸汽供给和需求的平衡。蒸汽在蓄热器内部分转 为液态,液面高度维持在一定范围内,该高度可以视 为蓄热器用作储能运行状态的一种表征。





## 1.2 运行模型

工业蒸汽系统进行发电调整时需保证每一个压力 等级下蒸汽供给和需求的平衡,因此需满足如下约束 条件

$$\dot{m}_{\rm HP}^{\rm GB} + \dot{m}_{\rm HP}^{\rm RB} = \dot{m}_{\rm HP,MP}^{\rm by} + \dot{m}_{\rm HP,LP}^{\rm by} + \dot{m}_{\rm HP,MP}^{\rm tur} + \dot{m}_{\rm HP,LP}^{\rm tur}$$
(1)

$$\dot{m}_{\rm MP}^{\rm D} + \dot{m}_{\rm cha}^{\rm SA} = \dot{m}_{\rm HP,MP}^{\rm tur} + \dot{m}_{\rm HP,MP}^{\rm by} \tag{2}$$

$$\dot{m}_{\rm LP}^{\rm D} + \dot{m}_{\rm LP}^{\rm BF} = \dot{m}_{\rm HP, LP}^{\rm tur} + \dot{m}_{\rm HP, LP}^{\rm by} + \dot{m}_{\rm dis}^{\rm SA}$$
 (3)

式中:  $\dot{m}_{\rm HP}^{\rm GB}$ 和 $\dot{m}_{\rm HP}^{\rm RB}$ 分别表示燃气锅炉和回收锅炉的蒸汽 产量, t/h;  $\dot{m}_{\rm HP,MP}^{\rm by}$ 和 $\dot{m}_{\rm HP,LP}^{\rm by}$ 分别表示中压旁路和低压旁 路的蒸汽流量, t/h;  $\dot{m}_{\rm HP,MP}^{\rm tw}$ 和 $\dot{m}_{\rm HP,LP}^{\rm tw}$ 分别表示透平中压 抽气量和低压侧排气量, t/h;  $\dot{m}_{\rm MP}^{\rm D}$ 和 $\dot{m}_{\rm LP}^{\rm D}$ 分别表示生产 过程中压和低压蒸汽负荷;  $\dot{m}_{\rm cha}^{\rm SA}$ 和 $\dot{m}_{\rm dis}^{\rm SA}$ 分别表示蓄热器 的蒸汽存储和释放的流量;  $\dot{m}_{\rm LP}^{\rm BF}$ 表示经减压阀排放的 低压蒸汽流量, t/h。

蒸汽蓄热器中蒸汽储量Misi满足

$$M_{i}^{\rm SA} = M_{0}^{\rm SA} + \sum_{j=1}^{i} \left( \dot{m}_{{\rm cha},j}^{\rm SA} - \dot{m}_{{\rm dis},j}^{\rm SA} \right) dt$$
(4)

$$0 \le \dot{m}_{\rm cha}^{\rm SA} \le \dot{m}_{\rm cha,max}^{\rm SA} \tag{5}$$

$$0 \le \dot{m}_{\rm dis}^{\rm SA} \le \dot{m}_{\rm dis,max}^{\rm SA} \tag{6}$$

式中: $M_0^{SA}$ 为初始时刻蓄热器中蒸汽量,t;dt为时间 步长,s; $\dot{m}_{cha,j}^{SA}$ 和 $\dot{m}_{dis,j}^{SA}$ 分别表示第j个时段蓄热器存储 和释放蒸汽的流量,t/h; $\dot{m}_{cha,max}^{SA}$ 和 $\dot{m}_{dis,max}^{SA}$ 分别表示蓄热 器存储和释放蒸汽的最大流量, t/h。

工业蒸汽发电系统的调整常常需要锅炉出力的配合,因此也受到燃气供应的约束,具体可以表述为燃 气锅炉用气量*P*<sup>GB</sup>和回收锅炉用气量*P*<sup>KB</sup>两部分

$$P_{\rm NG}^{\rm GB} = \frac{\dot{m}_{\rm HP}^{\rm GB} \times (H_{\rm HP} - H_{\rm FW})}{\eta^{\rm GB} \times L_{\rm NG}^{\rm HV}}$$
(7)

$$P_{\rm NG}^{\rm RB} = \frac{\dot{m}_{\rm HP}^{\rm RB} \times \left(H_{\rm HP} - H_{\rm Fw}\right) - \dot{m}_{\rm BL}^{\rm RB} \times L_{\rm BL}^{\rm HV}}{\eta^{\rm RB} \times L_{\rm NG}^{\rm HV}}$$
(8)

式中:  $H_{\rm HP}$ 和 $H_{\rm FW}$ 分别表示高压蒸汽和锅炉供水的焓值, kJ/kg;  $L_{\rm NG}^{\rm HV}$ 表示天然气低热值, MJ/m<sup>3</sup>;  $L_{\rm BL}^{\rm HV}$ 表示黑液 低热值, MJ/t;  $\dot{m}_{\rm BL}^{\rm RB}$ 表示黑液流量, t/h;  $\eta^{\rm GB}$ 和 $\eta^{\rm RB}$ 分别 表示燃气锅炉和回收锅炉的效率。

由蒸汽推动的抽背式发电机出力可表示为中压和 低压两个背压机组出力之和  $P_{e}^{tur} = \eta^{T} \left[ \dot{m}_{HP,MP}^{tur} \times (H_{HP} - H_{MP}) + \dot{m}_{HP,LP}^{tur} \times (H_{HP} - H_{LP}) \right] (9)$ 

式中: $H_{MP}$ 和 $H_{LP}$ 分别表示中压蒸汽和低压蒸汽的焓值, kJ/kg; $\eta^{T}$ 为透平发电效率。

## 2 蒸汽发电系统灵活性量化

## 2.1 灵活性定义及量化指标

本文所研究的灵活性是工业蒸汽发电系统在生产 过程用蒸汽约束下的可调度能力,其内涵在于针对给 定的外部调节信号激励,系统通过对阀门、发电机、 蒸汽蓄热器等可调度资源的统筹管理,在满足生产过 程需求的前提下,实现对发电机出力的调整。

从电力系统对灵活性的需求分析,提出的灵活性 指标应该满足如下要求<sup>[18]</sup>:①在辅助服务市场中提供 灵活性服务时,应明确投标可以提供的灵活性幅值; ②根据所研究的时间尺度,系统中电源侧和负荷侧的 变动较快,提供灵活性服务时需要在短时间内达到相 应的标准;③提供灵活性服务是一个持续的过程,在 规定的服务周期内应时刻满足服务需求。参考电力 系统辅助服务对于灵活性的需求(如英国二次调频 要求参与方30 s内达到最大响应,且维持该响应水平 30 min<sup>[21]</sup>),本文采用瞬时出力可调度幅值、响应速度 以及可调度时间3个关键性能指标对工业蒸汽系统发 电灵活性边界进行描述。

1)瞬时出力可调度幅值由发电机当前运行点P<sup>tur</sup> 以及蒸汽系统约束下的发电机最大出力P<sup>tur</sup><sub>e,max</sub>和最小出 力P<sup>tur</sup><sub>e,min</sub>共同决定,如图3所示。

2) 响应速度主要由蒸汽发电机自身特性决定, 该

指标与灵活性服务要求的响应时间及其他要求相关。

3)可调度时间主要由蒸汽蓄热器内部的储汽量决定,需要结合系统优化运行策略确定。





Fig. 3 Schematic diagram of flexibility boundaries of the steam turbine generator constraint by the steam system

## 2.2 运行优化模型

## 2.2.1 目标函数

本文研究的工业蒸汽系统正常运行状态目标为保 持用能成本最低,考虑到能源市场运行特性,以天为 区间对系统进行优化,其目标可表示为

$$\tilde{P}_{e,i}^{\text{tur}} = \arg\min_{x} \sum_{i=1}^{n_{d}} \left( c_{i}^{e} P_{i}^{e,\text{in}} + c_{i}^{g} P_{i}^{g,\text{in}} + c_{i}^{s} \dot{m}_{i}^{\text{bf}} \right)$$
(10)

式中: $n_{d}$ 为日仿真步数; $c_{i}^{e}$ 、 $c_{i}^{e}$ 及 $c_{i}^{s}$ 分别表示第i个时间步长购电、购气成本和蒸汽系统补水成本;  $P_{i}^{e,in}$ 、 $P_{i}^{g,in}$ 及 $\dot{m}_{i}^{bf}$ 分别表示第i个时间步长电网购电量、气网购气量和蒸汽排出量;x表示待求解变量,  $x = [\dot{m}_{HP,MP}^{by} \dot{m}_{HP,LP}^{bf} \dot{m}_{cha}^{SA} \dot{m}_{dis}^{SA}]$ 。

工业蒸汽系统发电机运行过程中,其发电量受到 蒸汽系统约束,发电机最大/最小出力存在不能达到额 定容量和最小容量的情况,因此,本文将发电机出力 边界描述为如下优化问题的解

$$\overline{P}_{e,i}^{\text{tur}} = \arg\max_{x} \left[ P_{e,i}^{\text{tur}} \right] \tag{11}$$

$$\underline{P}_{e,i}^{tur} = \arg\min_{\mathbf{r}} \left[ P_{e,i}^{tur} \right]$$
(12)

式中: **P**<sup>tur</sup><sub>ei</sub>和**P**<sup>tur</sup><sub>ei</sub>分别表示发电机最大和最小出力。

#### 2.2.2 约束条件

工业蒸汽系统的运行主要依靠锅炉、阀门和蒸汽 蓄热器的调节实现,因此运行受如下约束

$$\dot{m}_{\rm HP,MP}^{\rm by} \leq \dot{m}_{\rm rated,HP,MP}^{\rm by} \tag{13}$$

$$\dot{m}_{\rm HP \ LP}^{\rm by} \leqslant \dot{m}_{\rm rated \ HP \ LP}^{\rm by} \tag{14}$$

$$0 \le \dot{m}_{\rm IP}^{\rm BF} \le \dot{m}_{\rm Rated}^{\rm BF} \tag{15}$$

$$0 \le \dot{m}_{\rm NG}^{\rm GB} \le \dot{m}_{\rm Rated}^{\rm GB} \tag{16}$$

$$\underline{M}^{\mathrm{SA}} \leqslant \underline{M}_{i}^{\mathrm{SA}} \leqslant \overline{\underline{M}}^{\mathrm{SA}} \tag{17}$$

式中: *m*<sup>by</sup><sub>rated,HP,MP</sub>、*m*<sup>by</sup><sub>rated,HP,LP</sub>、*m*<sup>BF</sup><sub>Rated</sub>和*m*<sup>GB</sup><sub>Rated</sub>分别表示中 压旁路阀门、低压旁路阀门、减压阀、燃气锅炉的额 定蒸汽容量,t/h; *M*<sup>SA</sup>和*M*<sup>SA</sup>分别表示蓄热器中的等 值蒸汽储量的上限和下限,t。

外网购电受最大反送电量以及购电容量约束

$$\underline{P}_{e}^{in} \leqslant P_{i}^{e,in} \leqslant \overline{P}_{e}^{in} \tag{18}$$

式中: *P*<sup>in</sup>表示购电容量; *P*<sup>in</sup>表示最大反送电量,考虑到运行经济性及用户需求,一般实际系统避免反送电,因此本文将此变量设为零。

锅炉总用气量受到气网供气最大容量(物理约束 或合同约束) *P*<sub>MG</sub>的限制为

$$P_{\rm NG}^{\rm GB} + P_{\rm NG}^{\rm RB} \leqslant \overline{P}_{\rm NG}^{\rm in} \tag{19}$$

## 2.3 灵活性指标求解方法

根据上文优化模型以及发电系统响应速度限制, 可以求解出系统可调度发电的上边界瞬时值P<sup>f</sup><sub>up,i</sub>和下 边界瞬时值P<sup>f</sup><sub>iow</sub>;

$$P_{\text{up},i}^{\text{f}} = \min_{\text{r}} \left[ \overline{P}_{\text{e},i}^{\text{tur}} - \widetilde{P}_{\text{e},i}^{\text{tur}}, R_{\text{up}}^{\text{gen}} T_{\text{r}} \right]$$
(20)

$$P_{\text{low},i}^{\text{f}} = \max_{x} \left[ \underline{P}_{\text{e},i}^{\text{tur}} - \tilde{P}_{\text{e},i}^{\text{tur}}, -R_{\text{down}}^{\text{gen}} T_{\text{r}} \right]$$
(21)

式中: R<sup>gen</sup>和R<sup>gen</sup>分别为发电机出力爬坡率上下限值; T<sub>r</sub>为给定灵活性服务允许的响应时间。

服务可持续时间主要由蒸汽蓄热器的存汽量和满 足给定灵活性需求所需要的蓄热器蒸汽交换量决定。 为保证蓄热器系统运行经济性和稳定性,这里假设蒸 汽的存储和释放不会同时进行,根据蓄热器运行状 态,灵活性服务可持续时间具体数值为



针对给定灵活性服务,需要的最大服务持续时间 是确定的,如果蒸汽系统灵活性服务可持续时间*T*<sup>max</sup> 小于电力系统灵活性需要的持续时间*T*<sup>grid</sup>,则应对系 统最大可调度发电量进行修正,以延长蒸汽蓄热器可 用时间。具体来说,可以基于式(22)和*T*<sup>grid</sup>修正发电 机出力边界优化问题约束条件,调整蓄热器存储和释 放蒸汽的边界,即*m*<sup>SA</sup><sub>cla,max</sub>和*m*<sup>SA</sup><sub>dis,max</sub>,保证在给定服务持 续时间*T*<sup>grid</sup>范围内,蒸汽蓄热器能够满足因发电调整 导致的蒸汽供需不平衡。 3

#### 3.1 设备参数

本文以欧洲某造纸厂蒸汽系统为研究对象,分析 蒸汽蓄热器对于工业蒸汽系统灵活性的影响。其中, 工业蒸汽系统设备参数如表1所示,透平发电机容量 为10.5 MW,蒸汽焓值转发电效率为0.9。假设蒸汽系 统各级温度压力水平保持恒定,蒸汽焓值通过查表获 取,设备效率保持恒定,具体参数如表2所示。

参考目前市场上可用产品型号及前期成本效益分 析结论,本文研究了将一台蒸汽蓄热器加装到工业蒸 汽系统后的系统性能,该蓄热器的容量为180 m<sup>3</sup>,蓄 热器中液面高度维持在最大高度的70%~82.5%,蒸汽 蓄热器与管网的最大交换流量为40 t/h。

 
 表
 1
 工业热电联产系统参数<sup>[17]</sup>

 Table 1
 System parameters of industrial CHP

 设备名称
 额定流量 局小流量 /t·h<sup>-1</sup>
 效率

 燃气锅炉
 40
 10
 0.93 (气转热)

燃气锅炉	40	10	0.93(气转热)
回收锅炉	26	6.5	0.93(黑液转热)
旁路阀门(高压→中压)	25	0	
旁路阀门(高压→低压)	40	0	
排气阀门	50	0	

表 2 蒸汽系统参数 Table 2 Parameters of steam system

ruble 2 - Furtheters of steam system			
蒸汽层级	压力/MPa	温度/℃	
高压	7.2	505	
中压	1.2	210	
低压	0.35	190	
供水	10	104	

#### 3.2 算例测试

本文以造纸厂所在区域能源价格为基础,在满足 生产过程用蒸汽和电力负荷的基础上,对其供能系统 运行进行优化,相关的数据如图4所示。

#### 3.3 结果分析

#### 3.3.1 可调度边界

由式(20)一式(21)可知,决定蒸汽发电系统可 调度上下边界的一个重要因素是系统当前发电运行水 平。图5给出了有无蓄热器情况下系统灵活性的上下



边界。可以看到,有蒸汽蓄热器的系统上下边界(红 色和蓝色边界)比无蒸汽蓄热器的系统上下边界(绿 色和紫色边界)覆盖的范围更大。从另一个角度来说, 加装蓄热器后,发电机能够在更大的运行范围内灵活 调整出力。此外,在给定设备容量配置下,系统的上 边界出力在有无蒸汽蓄热器的条件下并无明显不同。 这一现象的产生主要是由于增加发电量额外产生的蒸 汽一方面可以由蒸汽蓄热器吸收,另一方面可以由减 压阀排放到环境中。而正常设计工况下,为保证系统 安全运行,减压阀的设计容量一般较大,在发电机可 调节的范围内,额外产生的蒸汽都能够被有效处理。



図5 不同及电机由ガホー下的系统可同度及电量 Fig. 5 Dispatchable electricity generation at different levels of steam turbine generation

对于灵活性下边界,在发电机出力水平较低,即 低压蒸汽供应较少的条件下,低压侧的蒸汽负荷可由 旁路阀门转带,有无蒸汽蓄热器对于灵活性边界并无 明显影响。然而,在发电机出力水平较高的情况下, 超过了本文中使用的最大旁路阀门容量后,额外的蒸 汽供应可以由蒸汽蓄热器提供。因此,对于含蒸汽蓄 热器的系统来说,在发电机出力水平较高的情况下其 灵活性下边界可以有更大范围,如图5中黑色虚线框 所示。

## 3.3.2 灵活性服务成本

尽管大部分情况下,有无蒸汽蓄热器系统的可调 度发电容量范围接近,但是可以预见二者调度的边际 成本明显不同。对于灵活性上边界,即增加发电机出 力,需要额外产生蒸汽来驱动汽轮机发电,在无蒸汽 蓄热器的情况下,根据质量守恒定律,超过正常生产 需求的蒸汽只能通过减压阀排放到外部环境中造成 蒸汽浪费。以算例系统为例,1 MW发电需要消耗蒸 汽 5.6 t (1 MW/透平发电出入口蒸汽焓值差/透平发电 效率)。根据该工厂蒸汽用蒸馏水成本推算,发电上 调1 MW造成的蒸汽损失约为89.6欧元。采用蒸汽蓄 热器后,这部分蒸汽可以被储存起来,用于后续生产 过程,大大降低了由于蒸汽浪费造成的成本。对于灵 活性下边界,即减少发电机出力,可通过旁路阀门调 节经过透平发电机的流量,在不影响生产过程蒸汽供 应的条件下降低发电量,成本主要来自由于本地发电 减少导致的额外购电成本。在旁路阀门达到流量限制 时,可通过减少高压蒸汽的供应,由蒸汽蓄热器来满 足部分蒸汽负荷,利用增发电出力时存储的蒸汽,提 高能源利用率。因此,对于含蒸汽蓄热器的系统,一 方面蒸汽蓄热器的存在能够扩大发电机出力水平较高 场景下系统的灵活性边界;另一方面,蒸汽蓄热器能 够明显降低系统提供灵活性的边际成本,提高工业蒸 汽系统参与电力系统辅助服务市场的竞争力。

#### 3.3.3 面向电力系统特征的灵活性测试

1) 跟踪电价变化。

蒸汽系统发电出力调节范围受到生产用蒸汽负荷 的约束,在同样蒸汽负荷水平下,尽管电价的变化与 系统收益相关,发电机出力也只是在小范围变化。对 含蓄热器系统,蒸汽供应和使用的不平衡可以由蓄热 器来承担,如图6所示,发电机能够在满足蒸汽系统 负荷约束的同时,由更大的空间来调节本地发电以跟 踪外部电价变化。

2) 调频服务。

图7以造纸厂所在国的调频为例,评估了含有蒸 汽蓄热器的蒸汽系统发电灵活性。此服务需要参与设 备保持响应能力15 min<sup>[22]</sup>。选择15 min作为时间颗粒 度,选择1.5 MW作为该厂用于调频服务的容量,根 据图5中给出的可调度发电容量,可得蒸汽系统发电 上边界应限制在8.5 MW以下,如图7所示。结果表明, 通过蒸汽蓄热器存储蒸汽的调整能够辅助发电机处理 维持在约束范围内。









3) 短期备用服务。

参考英国短期备用(short term operating reserve)的需求<sup>[23]</sup>,测试上述造纸厂在蒸汽蓄热器支持下参与 短期备用服务的效果。根据市场要求,灵活性服务提 供方需能提供最小3 MW的增发电容量并维持2 h,根 据图5灵活性边界可知,对于3 MW的容量需求,需维

113

持发电量在6.7 MW以下。在此约束下,对造纸厂蒸汽 发电系统调度结果如图8所示。结果表明,通过与蒸 汽蓄热器的协同,可在满足生产用能需求的前提下调 整发电量为电力系统提供短期备用服务。



Fig. 8 Generation redispatch for short term operating reserve

## 4 结论

针对工业蒸汽系统给电网提供发电灵活性时受到 的生产过程约束问题,本文研究了基于蒸汽蓄热器的 工业蒸汽系统灵活性量化方法,并给出了该蓄热器对 于系统关键性能指标的影响。仿真结果表明,从长时 间运行的角度,蒸汽蓄热器能够有效提升工业蒸汽系 统的灵活性水平。然而,含有蒸汽蓄热器的蒸汽系统 在以成本最小为目标的最优运行状态,本地发电会随 着电价发生变化,导致发电波动范围更大。在发电机 最大/最小发电量没有调整的情况下,工业蒸汽系统的 灵活性边界会在更大的范围波动。

# 参考文献

- 王成山,李鹏,于浩.智能配电网的新形态及其灵活性特 征分析与应用[J].电力系统自动化,2018,42(10):13-21.
   WANG Chengshan, LI Peng, YU Hao. Development and characteristic analysis of flexibility in smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10):13-21(in Chinese).
- [2] Parliamentary Office of Science and Technology. Flexible electricity systems[EB/OL]. House of Parliament, 2018.

[2020-11-01]. https://researchbriefings.parliament.uk/ ResearchBriefing/Summary/POST-PN-0587.

[3] 鲁宗相,李昊,乔颖.从灵活性平衡视角的高比例可再生 能源电力系统形态演化分析[J].全球能源互联网,2021, 4(1): 12-18.

LU Zongxiang, LI Hao, QIAO Ying. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 12-18 (in Chinese).

- [4] WANG J X, ZHONG H W, MA Z M, et al. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system[J]. Applied Energy, 2017, 202: 772-782.
- [5] AN Q, WANG J X, LI G Y, et al. Role of optimal transmission switching in accommodating renewable energy in deep peak regulation-enabled power systems[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 577-584.
- [6] COATALEM M, MAZAURIC V, DE LE PAPE-GARDEUX C, et al. Optimizing industries' power generation assets on the electricity markets[J]. Applied Energy, 2017, 185: 1744-1756.
- [7] EINSTEIN D, WORRELL E, KHRUSHCH M. Steam systems in industry: Energy use and energy efficiency improvement potentials[R]. Lawrence Berkeley National Lab (LBNL), Berkeley, CA 2001.
- [8] QIAN J Y, WEI L, ZHANG M, et al. Flow rate analysis of compressible superheated steam through pressure reducing valves[J]. Energy, 2017, 135: 650-658.
- [9] DOWLING A W, ZAVALA V M. Economic opportunities for industrial systems from frequency regulation markets[J]. Computers & Chemical Engineering, 2018, 114: 254-264.
- [10] HULT P. The potential for frequency control in paper mills[M]. Gothenburg, Sweden: Department of Heat and Power, Chalmers University of Technology, 2015.
- [11] SUN W Q, WANG Q, ZHOU Y, et al. Material and energy flows of the iron and steel industry: Status quo, challenges and perspectives[J]. Applied Energy, 2020, 268: 114946.
- [12] OREE V, SAYED HASSEN S Z. A composite metric for assessing flexibility available in conventional generators of power systems[J]. Applied Energy, 2016, 177: 683-691.
- [13] 周光东. 电力系统运行灵活性评价及优化调度研究[D]. 北 京:华北电力大学, 2019.
- [14] SUN W Q, WANG Z H, WANG Q. Hybrid event-, mechanism- and data-driven prediction of blast furnace gas generation[J]. Energy, 2020, 199: 117497.
- [15] MITRA S, SUN L G, GROSSMANN I E. Optimal scheduling of industrial combined heat and power plants under timesensitive electricity prices[J]. Energy, 2013, 54: 194-211.
- [16] SHEN F F, ZHAO L, DU W L, et al. Large-scale industrial energy systems optimization under uncertainty: a data-driven robust optimization approach[J]. Applied Energy, 2020, 259: 114199.
- [17] XU X D, ABEYSEKERA M, GUTSCHI C, et al. Quantifying

flexibility of industrial steam systems for ancillary services: a case study of an integrated pulp and paper mill[J]. IET Energy Systems Integration, 2020, 2(2): 124-132.

- [18] ULBIG A, ANDERSSON G. Analyzing operational flexibility of electric power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 72: 155-164.
- [19] XU X D, SUN W Q, ABEYSEKERA M, et al. Quantifying the flexibility from industrial steam systems for supporting the power grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 313-322.
- [20] SUN W Q, HONG Y H, WANG Y H. Operation optimization of steam accumulators as thermal energy storage and buffer units[J]. Energies, 2016, 10(1): 17.
- [21] National Grid. Firm frequency response (FFR) [EB/OL]. (2019-07-22) [2020-10-13]. https://www.nationalgrideso.com/ document/103306/download.
- [22] Austrian Power Grid. Tenders for mFRR in the APG control area[EB/OL]. [2020-10-13]. https://www.apg.at/en/markt/ netzregelung/tertiaerregelung/ausschreibungen.
- [23] National Grid. Short Term Operating Reserve (STOR) [EB/ OL]. (2018-02-24) [2021-01-20]. https://www.nationalgrideso. com/document/115786/download.

#### 收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-02-20。

作者简介:



单文亮 (1997), 男, 硕士研究 生, 研究方向为综合能源系统灵活性 分析, E-mail: wlshan@tju.edu.cn。

徐宪东(1987),男,副教授,研究方向为综合能源系统建模与灵活性分析。通信作者,E-mail: xuxiandong@tju.edu.cn。

单文亮

孙文强(1986),男,教授,研

究方向为工业综合能源系统、能效提升与储能技术, E-mail: sunwq@mail.neu.edu.cn。

穆云飞 (1984),男,教授,研究方向为电力系统安 全性与稳定性、综合能源系统集成与应用、电动汽车并 网规划与运行控制,E-mail: yunfeimu@tju.edu.cn。

吴建中(1976),男,教授,研究方向为智能电网与能源基础设施,E-mail: wuj5@cardiff.ac.uk。

贾宏杰 (1973), 男, 教授, 研究方向为电力系统安 全性与稳定性、综合能源系统、分布式发电微网、负荷 需求响应技术, E-mail: hjjia@tju.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)

