

电解铜负荷参与需求侧响应功率控制方法

王曦^{1,2}, 陈保瑞^{1,2}, 谢濠聪³, 廖思阳³, 叶希⁴, 陈刚^{1,2}

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 4. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要:随着高比例新能源电力系统的建设, 电网调节灵活性面临着新的挑战。除电源侧、电网测外, 需求侧中高耗能工业负荷也具备提升电网调节灵活性的巨大潜力。然而, 目前高耗能工业负荷缺乏挖掘自身提升电网调节灵活性的手段, 其参与电网需求侧响应程度并不理想。因此, 以典型高耗能工业负荷电解铜负荷为例, 研究其工艺流程并建立工艺流程模型, 分析工艺流程中具备功率调控可行性生产设备, 基于其功率特性及工艺流程耦合关联建立功率控制模型。最后, 以电解铜负荷参与电网需求侧响应为例, 通过与仅投切负荷控制手段相对比, 验证了所提电解铜工业负荷参与需求侧响应功率控制方法的有效性, 为高耗能工业负荷参与电网需求侧响应提供了一种有效的功率控制方法。

关键词:功率控制模型; 需求侧响应; 高耗能工业负荷; 工艺流程建模; 功率控制方法

中图分类号: TM 714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)06-0061-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240609

Power Control Method for Electrolytic Copper Load Participating in Demand Side Response

WANG Xi^{1,2}, CHEN Baorui^{1,2}, XIE Haocong³, LIAO Siyang³, YE Xi⁴, CHEN Gang^{1,2}

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China; 4. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: With the construction of a high proportion of renewable energy power systems, the flexibility of power grid regulation is facing new challenges. In addition to power supply side and power grid side, high-energy-consuming industrial loads on demand side have great potential to improve the flexibility of power grid regulation. However, currently, high-energy-consuming industrial loads lack the means to explore and improve the flexibility of power grid regulation, so the degree of its participation in demand side response of power grid is not ideal. Taking electrolytic copper load which is a typical high-energy-consuming industrial load for example, its process flow is studied and a process flow model is established. The production equipment with power regulation feasibility in process flow is analyzed, and a power control model is established based on its power characteristics and process coupling correlation. Finally, taking the participation of electrolytic copper load in demand side response of power grid for example, the effectiveness of the proposed power control method for electrolytic copper industrial load participating in demand side response is verified by comparing it with only switching load control methods, which provides an effective power control method for high-energy-consuming industrial load participating in demand side response of power grid.

Key words: power control model; demand side response; high-energy-consuming industrial load; process flow modeling; power control method

0 引言

近年来为响应“绿色发展理念”^[1],高比例新能源的引入对电力系统的调节灵活性提出了新的要求^[2-4]。除电源侧、电网侧外,需求侧响应也能够有效地提升电网的调节灵活性^[5-8]。在需求侧中,高耗能工业负荷具有可控性强、负荷单体容量大、调节速度快等一系列优势^[9-11],能够有效地提升电网的调节灵活性。随着需求侧响应辅助服务政策的推出,高耗能工业负荷也有参与响应的意愿^[12],但其参与的程度却并不高,原因在于目前高耗能工业负荷缺乏有效的功率调控手段。常规功率调控手段仅有负荷的投切会严重影响工业负荷的正常生产秩序,即便能够连续功率调控,也可能对高耗能工业负荷正常生产秩序产生影响,增加工业负荷企业的运营成本。

关于高耗能工业负荷参与电网需求侧响应的研究中:文献[13]分析了高耗能工业负荷的工艺流程环节,对于高耗能工业负荷功率控制潜力进行了详细的分析,同时从功率调节的角度出发,建立了功率调控经济成本代价模型,实现了高耗能工业负荷功率调控成本代价的量化;文献[14]对钢铁负荷的生产工艺流程进行了分析,基于其负荷功率调控潜力最大的可调节生产设备建立了电气等效电路模型,提出其功率控制的方法,并通过实际电网算例验证了其参与需求侧响应的效果;文献[15]基于多晶硅的生产工艺流程的关键生产环节,建立描述多晶硅生产和电气特性的等效电路,给出功率调控范围及响应持续时间;文献[16]基于电解铝主要用电设备的功率特性,设计了晶闸管控制温流系统,提出了电解铝工业负荷功率调控的有效方法。然而,上述高耗能工业负荷功率调控方法对生产秩序的影响并未展开详细的研究。

下面以电解铜工业负荷为例,提出了一种考虑企业生产秩序的高耗能工业负荷参与电网需求侧响应的功率控制方法。首先,建立了电解铜负荷工艺

流程模型,为后续分析不同工艺流程环节用电设备功率特性提供了模型基础;然后,分析工艺流程中各环节的功率调控可行性,以及具备功率调控可行性生产环节的关键生产参数与功率之间的关系,并建立了电解铜工业负荷主要可调用设备的功率控制模型,为电解铜负荷参与电网需求侧响应提供了一种可行的功率调控方法;最后,以电解铜负荷参与电网需求侧响应为背景,将不具备功率调控能力的电解铜负荷与所提功率调控模型进行了对比,验证了所提电解铜负荷用电设备功率调控模型的有效性。

1 电解铜负荷工艺流程

电解铜工业负荷是典型的多工艺流程高耗能工业负荷,其工艺流程包含复杂的物料-化学过程,其中关键生产工艺流程包含备料环节、火法炼铜环节、制氧环节、强化熔炼环节、电解精炼环节、制酸环节。

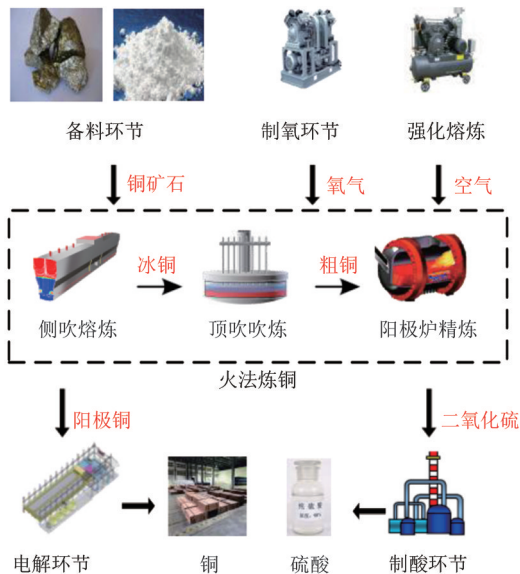


图 1 电解铜负荷工艺流程

备料环节为火法炼铜环节提供了铜矿石。火法炼铜中主要包括侧吹熔炼、顶吹吹炼和阳极炉熔炼,侧吹熔炼将铜矿石氧化为冰铜,顶吹吹炼将冰铜氧化为粗铜,阳极炉熔炼将粗铜氧化为阳极铜。在火法炼铜的工艺流程环节中还需要制氧环节和强化熔炼环节提供氧气和空气来辅助铜矿石中杂质的氧化

和熔炼。电解环节则是将阳极铜在一定浓度和温度的硫酸铜溶液环境中电解为阴极铜。同时,火法炼铜环节中产生的二氧化硫则是通过环保风机送往制酸塔,经过制酸环节后变为产品硫酸。

从图1可以看出,不同工艺流程环节之间存在生产物料或者中间产物的约束,因此电解铜等多工序高耗能工业负荷参与需求侧响应功率调控时需要考虑工艺流程耦合约束。

2 电解铜负荷工艺流程用电设备功率控制模型

2.1 电解铜负荷用电设备功率调控可行性

电解铜负荷工艺流程不同环节中用电设备功率特性各有不同,功率调控对工业负荷正常生产秩序的影响也不同,因此用电设备功率调控可行性应从功率特性和保证负荷生产安全的角度出发。

2.1.1 备料环节

在电解铜工艺流程中,备料环节的主要用电设备一般是由变频电机驱动的送料皮带。由于变频电机的功率特性与频率相关,因此备料环节功率可以通过改变驱动电机的频率来实现。同时,短暂地调节该环节功率对后续生产秩序影响较小,因此该环节具备功率调控的可行性。

2.1.2 火法炼铜环节

火法炼铜环节的主要用电设备是熔炼炉,然而火法炼铜环节涉及到铜、铁的氧化,对于温度要求较高,并且恢复温度需要消耗大量的煤炭。如果对该环节进行功率调控将会对负荷正常生产秩序造成较大影响,因此电解铜工艺流程中的火法炼铜环节被认为是不可调环节。

2.1.3 制氧环节、强化熔炼环节、制酸环节

制氧环节、强化熔炼环节和制酸环节的主要用电设备是空气压缩机、鼓风机和环保风机,其消耗的功率取决于用电设备所处理的气体体积。基于此特性,通过改变进口导叶叶片的角度进而改变通风体

积可以对以上环节进行功率调控。同时,短暂地调节这些环节的功率对负荷整体生产秩序的影响较小,因此制氧环节、强化熔炼环节和制酸环节具备功率调控的可行性。

2.1.4 电解环节

电解环节的主要用电设备是电解槽,通过分析电解槽的功率特性,可以将电解槽视为如图2所示的等效电路。图2中: U_B 为直流侧电压; U_{CH} 为负荷母线高压侧电压; U_{CL} 为负荷母线低压侧电压; k 为电解铜工厂降压变压器的变比; I_d 为电解槽直流侧电流; U_{SR} 为饱和电抗器压降。可以看出通过改变等效电路中直流侧的电流可以实现对该环节的功率调控。同时,电解环节的热惯量较大,短暂地调控该环节功率对电解环境的温度影响不大。因此电解环节具备功率调控的可行性。

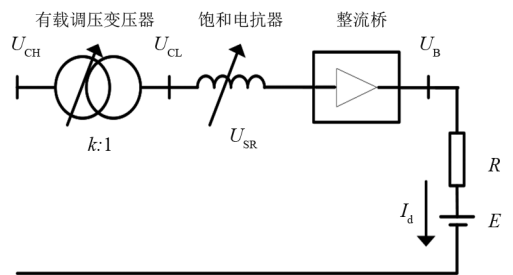


图2 电解槽等效电路模型

2.2 电解铜负荷用电设备功率控制模型

基于第2.1节的可行性分析,建立备料环节、制氧环节、强化熔炼环节、制酸环节以及电解环节中主要用电设备的功率控制模型。

2.2.1 备料环节

由变频电机功率特性可知,其功率与频率成正比,故备料环节主要用电设备功率 P_{set1} 可以表示为

$$P_{set1} \propto f_{set1} \quad (1)$$

式中, f_{set1} 为驱动送料皮带电机的频率。

值得注意的是,电解铜负荷工艺流程后续环节依赖备料环节提供的原料,因此若此环节驱动皮带的电机功率过低,会对后续生产环节产生较大影响,因此其频率调节量受到生产安全的约束,可表示为

$$f_{set1,min} \leq f_{set1} \leq f_{set1,max} \quad (2)$$

式中: $f_{\text{set1},\min}$ 为不影响后续生产环节的前提下驱动送料皮带电机的最低频率; $f_{\text{set1},\max}$ 为驱动送料皮带电机正常运行情况下最大频率。

2.2.2 制氧环节、强化熔炼环节、制酸环节

根据空气压缩机、鼓风机和环保风机的功率特性,可通过改变进口导叶的叶片角度 θ_{set2} 实现上述设备的功率控制。扇形叶片在改变角度时,垂直于气体流通方向的横截面积会发生改变。在电解铜负荷未参与需求侧响应时,上述设备不会调节进口导叶角度,此时叶片平行于气体流通方向,叶片角度 θ_{set2} 为 0° 。当进行功率调节时,叶片角度旋转了 θ_{set2} ,此时叶片面积投影到进口横截面积 S_{set2} 为

$$S_{\text{set2}} = S_N \cdot \sin \theta_{\text{set2}} \quad (3)$$

式中, S_N 为气体进口的横截面积。

叶片角度旋转 θ_{set2} 后,气体能够流通的面积 S_{gas} 可以表示为

$$S_{\text{gas}} = S_N \cdot (1 - \sin \theta_{\text{set2}}) \quad (4)$$

然而,上述可调节生产设备功率消耗与处理气体体积有关,其关系可表示为

$$P_{\text{set2}} \propto S_{\text{gas}} \quad (5)$$

由以上环节生产设备消耗功率特性可以得知,其生产设备的功率 P_{set2} 可以表示为

$$P_{\text{set2}} = P_{\text{set2},N} \cdot (1 - \sin \theta_{\text{set2}}) \quad (6)$$

式中, $P_{\text{set2},N}$ 为制氧环节、强化熔炼环节、制酸环节调整进口导叶情况下的额定运行功率。

由于火法炼铜是需要制氧环节提供的氧气和强化熔炼提供的空气,制酸环节的环保风机需要充分吸收火法炼铜产生的二氧化硫以免其对环境产生影响,因此其设备的功率调节受到安全生产的约束限制。约束限制采用制氧环节、强化熔炼环节、制酸环节的可调节生产设备进口导叶的角度 $\theta_{\text{set2},i}$ (i 表示其中某一环节)可表示为

$$\theta_{\text{set2},i,\min} \leq \theta_{\text{set2},i} \leq \theta_{\text{set2},i,\max} \quad (7)$$

式中, $\theta_{\text{set2},i,\min}$ 、 $\theta_{\text{set2},i,\max}$ 分别为制氧环节、强化熔炼环节、制酸环节在不影响电解铜负荷正常生产安全的前提下进口导叶角度调整的最小值和最大值。

2.2.3 电解环节

根据图 2 电解槽等效电路模型,可以得知电解

槽消耗功率 P_{set3} 取决于电解槽直流侧电流 I_d , I_d 与饱和电抗器的压降 U_{SR} 之间存在耦合关联,其函数关系式为^[17]:

$$P_{\text{set3}} = U_B \cdot I_d = I_d^2 \cdot R + I_d \cdot E \quad (8)$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi R} \left(\frac{U_{\text{CH}}}{k} - U_{\text{SR}} \right) - \frac{E}{R} \quad (9)$$

可以看出, P_{set3} 与 U_{SR} 之间存在关联。

值得注意的是,电解槽内电解溶液的温度需要保持在一定温度阈值,若功率调控较低会对产品阴极铜产生影响,因此饱和电抗器压降 U_{SR} 的调节范围存在安全约束,可表示为

$$U_{\text{SR},\min} \leq U_{\text{SR}} \leq U_{\text{SR},\max} \quad (10)$$

式中, $U_{\text{SR},\min}$ 与 $U_{\text{SR},\max}$ 分别为不影响电解环节生产安全前提下饱和电抗器压降的最小值和最大值。

3 电解铜负荷参与电网需求侧响应功率控制验证

下面以电解铜负荷参与电网需求侧响应为背景,设置了不具备功率调控能力的电解铜负荷作为对照组,以验证所提出的电解铜工业负荷用电设备功率调控模型的有效性。基于某电解铜负荷生产数据,通过 Matlab 计算软件进行仿真验证。

3.1 电解铜负荷参与需求侧响应场景设置

1) 所提电解铜工艺流程中备料环节、火法炼铜环节、制氧环节、强化熔炼环节、电解环节、制酸环节消耗功率分别为:9931、14 390、18 264、5356、21 689、10 273 kW。

2) 考虑到不同工艺流程环节功率调控对负荷生产秩序产生的影响,结合式(2)、式(7)、式(10)的约束条件,经过计算可以得到备料环节、制氧环节、强化熔炼环节、电解环节、制酸环节可调节容量比例依次为:10%、20%、15%、25%、15%。

3) 该电解铜负荷于某日参与电网需求侧响应,其响应时段为当日 15:00 至 19:00,共 4 h。每小时中标响应容量分别为:3240、3060、3210、3120 kWh。电解铜负荷功率调控周期为 15 min,在响应时段内每小时响应容量应不低于该响应时段对应的中标响应容量。响应时段则对应当日生产周期时段中 61

时段至76时段。

4)当电解铜负荷具备功率调控能力时的功率响应策略为:在不影响电解铜负荷工艺流程正常生产秩序的前提下,既可以选择切负荷,也可以选择对负荷功率进行调控;而不具备功率调控能力时,只能选择切负荷。

3.2 电解铜负荷功率调控情景下参与电网需求侧响应

针对确定的响应时段及中标响应容量,综合考虑电解铜负荷不同工艺流程环节中可调用电设备功率调控特性及调控边界,以不影响电解铜负荷正常生产秩序为前提,基于所提出的电解铜负荷用电设备功率调控模型,电解铜负荷参与电网需求侧响应时的负荷曲线计算结果如图3所示。

图3中,蓝色曲线为电解铜负荷未参与电网需求侧响应情况下的负荷功率曲线,用于评估参与电网需求侧响应容量。非响应时段的基线负荷和响应时段负荷功率曲线存在差异,是由于电解铜负荷为在响应时段减少自身负荷功率,对生产周期可调节生产设备作业进行了调整,使其功率曲线相较于负荷基线发生了改变。

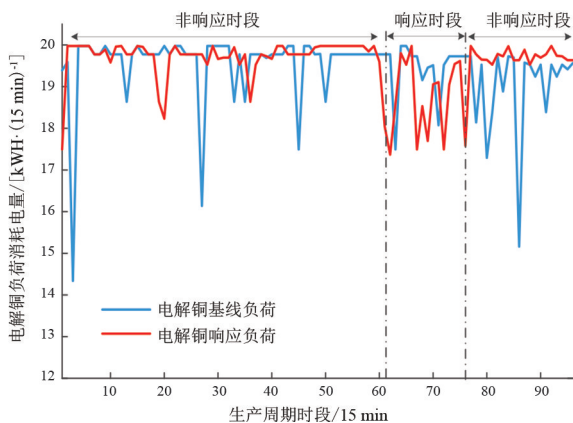


图3 电解铜负荷功率调控情景下参与电网需求侧响应功率曲线

电解铜负荷功率调控情景下,不同工艺流程环节可调节用电设备的功率曲线如图4所示。

根据图3及图4可以看出,电解铜负荷在功率调控情景下参与电网需求侧响应时能够根据负荷功率调控策略采取调控与投切相结合的方式改变负荷自身功率。

值得注意的是,根据图4可以看出电解环节和制酸环节并未参与功率调控,说明此情景下电解铜负荷参与电网需求侧响应功率调控潜力尚未充分挖掘。

3.3 电解铜负荷投切情景下参与电网需求侧响应

针对确定的响应时段及中标响应容量,以不影响电解铜负荷正常生产秩序为前提,制定电解铜负荷不同工艺流程用电设备投切控制策略,电解铜负荷参与电网需求侧响应时的负荷曲线计算结果如图5所示。图6为电解铜负荷投切情景下,不同工艺流程环节可调节用电设备的功率曲线。

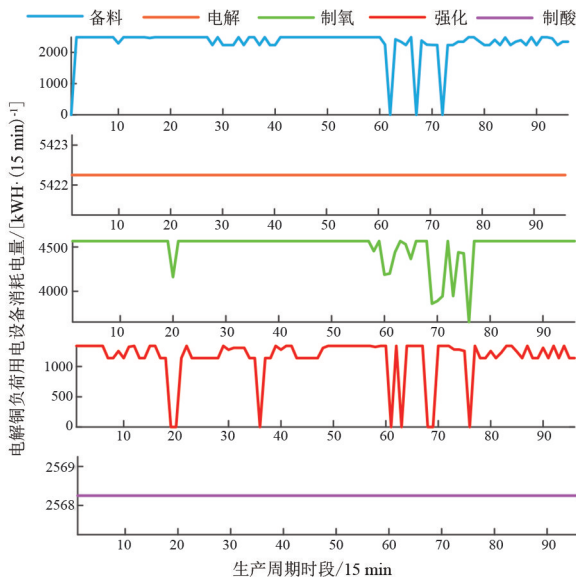


图4 电解铜负荷功率调控情景下可调用电设备功率曲线

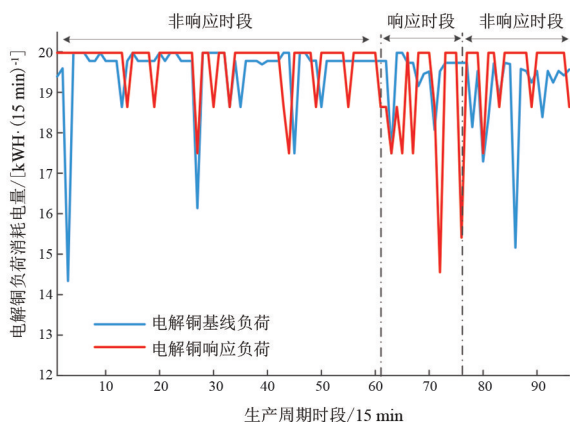


图5 电解铜负荷投切情景下参与电网需求侧响应功率曲线

根据图5及图6可以看出:在相同响应情况时,电解铜负荷投切情景下参与电网需求侧响应虽然能够满足电网需求侧响应,但负荷曲线波动更大,并且

备料环节,强化熔炼环节生产设备在较短时间内反复进行投切,不利于工艺流程高效生产,且对工艺流程环节生产设备的寿命也存在较大影响。

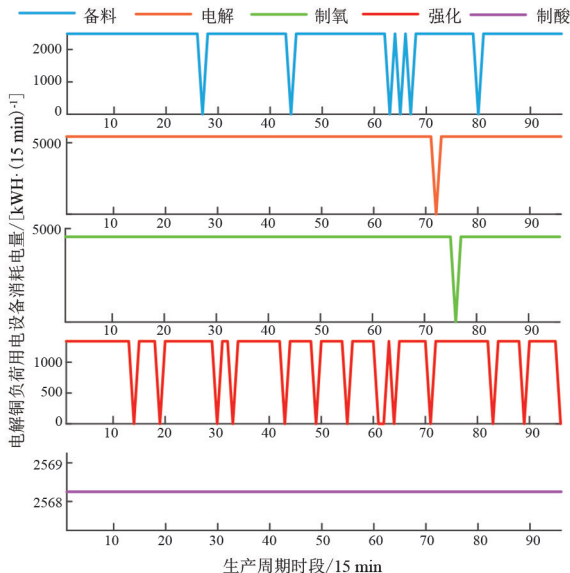


图 6 电解铜负荷投切情景下
可调用电设备功率曲线

3.4 电解铜负荷功率调控挖掘功率响应潜力

在电解铜具备功率调控能力的情景下,参与电网需求侧响应其他条件相同时,将响应时段(15:00至19:00)中标响应容量增加至5740、5610、5810、5670 kWh,电解铜负荷参与电网需求侧响应的功率曲线如图7所示。

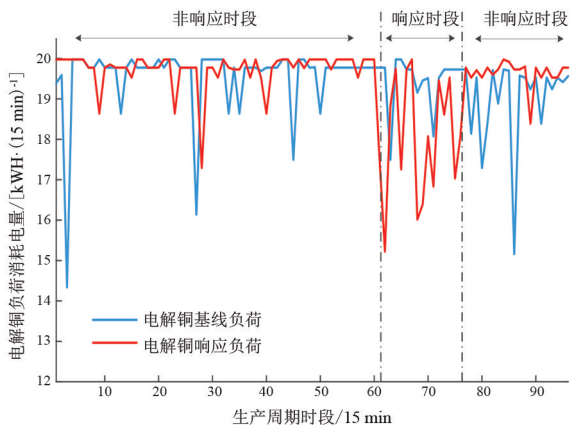


图 7 电解铜负荷功率调控情景下
响应较大中标响应容量功率曲线

在较大中标响应容量功率调控的情景下,不同工艺流程环节可调节用电设备的功率曲线如图8所示。

根据图7及图8可以看出:基于所提出的电解铜负荷可调用电设备功率控制方法,在中标响应容

量更大的情景下,也能够减少在较短时间内连续多次对负荷进行投切。相较于仅考虑负荷投切情景,电解铜负荷若具备功率调控能力,能够根据功率控制策略参与电网需求侧响应,实现电解铜负荷参与电网需求侧响应功率调控潜力的充分挖掘。

经过计算,在较大中标响应容量的情景下,若电解铜负荷不具备功率调控能力,则无法在不影响负荷正常生产秩序的前提下满足电网需求侧响应的容量需求。

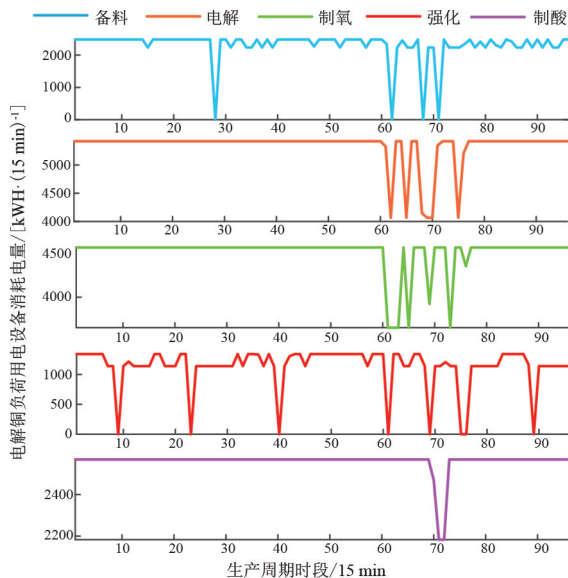


图 8 较大中标响应容量功率调控情景下
用电设备功率曲线

4 结 论

上面针对目前高耗能工业负荷缺乏挖掘其参与电网需求侧响应的手段,以典型多工序高耗能工业负荷电解铜负荷为例,分析其工艺流程中存在的可调节生产设备,根据可调节生产设备的功率特性及与工艺流程环节耦合关联,建立功率控制模型及关键参数调控边界,提出了电解铜负荷参与电网需求侧响应功率控制方法。最后,在不同情景中仿真验证了所提功率控制方法相较传统负荷投切的优势。

值得注意的是,上面尚未研究以电解铜负荷为例的典型高耗能工业负荷功率控制策略,也并未指出不同工艺流程环节之间功率控制的配合方法。

综上所述,所提出的电解铜负荷参与电网需求侧响应功率控制方法能够有效地根据电网需求侧响应需求控制不同工艺流程环节用电设备功率,为电解铜负荷参与需求侧响应提供了一种可行的功率控制方式,可以充分挖掘其参与电网需求侧响应的潜力。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会. 电力发展“十三五”规划(2016—2020)[R/OL].(2016-12-22) [2023-04-09]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=398>.
- [2] PONCELET K, HOSCHLE H, DELARUE E, et al. Selecting representative days for capturing the implications of integrating intermittent renewables in generation expansion planning problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3):1936-1948.
- [3] Global Wind Energy Council. Global wind report annual market update 2013 [EB/OL].[2023-04-09].http://www.gwec.net/wpcontent/uploads/2014/04/GWEC-Global-Wind-Report_9-April-2014.pdf.
- [4] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1):1-9.
- [5] YU M M, HONG S H, DING Y M, et al. An incentive-based demand response (DR) model considering composited DR resources[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2):1488-1498.
- [6] SIANO P, SARNO D. Assessing the benefits of residential demand response in a real time distribution energy market[J]. Applied Energy, 2016, 161:533-551.
- [7] SIANO P. Demand response and smart grids—A survey[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 30:461-478.
- [8] NEKOU EI E, ALPCAN T, CHATTOPADHYAY D. Game theoretic frameworks for demand response in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2):748-758.
- [9] DING Y M, HONG S H, LI X H, et al. A demand response energy management scheme for industrial facilities in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4):2257-2269.

- [10] SAMAD T, KILICCOTE S. Smart grid technologies and applications for the industrial sector[J]. Computers & Chemical Engineering, 2012, 47:76-84.
- [11] SHOREH M H, SIANO P, SHAFIE-KHAH M, et al. A survey of industrial applications of demand response[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 141:31-49.
- [12] LIAO S Y, XU J, SUN Y Z, et al. Control of energy-intensive load for power smoothing in wind power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6):6142-6154.
- [13] PAULUS M, BORGGREFE F. The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany [J]. Applied Energy, 2011, 88(2):432-441.
- [14] 涂夏哲.基于矿热炉负荷调节的钢铁工业局域网频率控制研究[D].武汉:武汉大学,2018.
- [15] 陈元峰.基于多晶硅负荷控制的含高渗透率风电孤立电网频率控制策略研究[D].武汉:武汉大学,2018.
- [16] 刘陇平,邢沛.直供电系统中电解铝负荷参与调频的方法[J].甘肃冶金, 2015, 37(5):34-37.
- [17] JIANG H, LIN J, SONG Y H, et al. Demand side frequency control scheme in an isolated wind power system for industrial aluminum smelting production[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2):844-853.

作者简介:

王 曦(1988),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统运行控制;

陈保瑞(1996),男,博士,研究方向为电力系统优化运行;

谢濠聪(2000),男,博士研究生,研究方向为电力系统运行控制;

廖思阳(1989),男,博士,副教授,研究方向为电力系统运行控制;

叶 希(1987),女,博士,高级工程师,研究方向为电力系统调度运行;

陈 刚(1985),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统运行控制。

(收稿日期:2024-01-18)