

分时电价引导电解铝负荷参与百色区域电网调峰研究

农有敏

(百色新铝电力有限公司,广西 百色 533000)

摘要: 随着并网风电装机容量越来越大,现有的调度模式难以应对风电出力的随机性,为提高区域电网调峰和消纳风电的能力,提出利用分时电价引导电解铝负荷参与火力发电机组调峰的联合优化调度模型,模型以系统总的发电成本最小为目标,以区域电网运行数据为算例进行仿真验证,结果表明所提模型能够提高系统运行经济性和风电消纳能力。

关键词: 调峰;联合调度;电解铝负荷;分时电价;风电消纳

中图分类号: TM 743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2023)02-0007-05

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2023.02.002>

Research on time-of-use pricing to guide electrolytic aluminum load to participate in the peak regulation of the Baise regional power grid

NONG Youmin

(Baise New Aluminum Power Co., Ltd., Baise Guangxi 533000, China)

Abstract: With the increasing installed capacity of grid-connected wind power, the existing scheduling model struggles to cope with the randomness of wind power output. To improve the ability of the regional power grid to regulate and consume wind power, a joint optimal scheduling model that adopts time-of-use pricing is proposed to guide electrolytic aluminum load to participate in the peak regulation of thermal power generating units. This model aims to minimize the total generation cost of the system and uses regional power grid operating data as an example for simulation verification. The results show that the proposed model can improve the economic operation of the system and wind power consumption capacity.

Keywords: peak regulation; joint scheduling; electrolytic aluminum load; time-of-use pricing; wind power consumption

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2023.02.002

0 引言

为实现碳达峰、碳中和的目标,未来电力系统的发展必然以可再生能源为发电主体^[1-5],但新能源发电具有随机性和反调峰特性,仅仅依靠传统发电机组的调节能力不足以应对大规模可再生能源并网带来的扰动,若不采取新的调度方式,必然会造成新能源消纳率的降低,同时给传统发电

机组带来巨大运行压力^[6-7]。随着计算机通信技术以及电力电子技术的进步,源-荷互动成为系统调峰和提高新能源消纳率的新手段,目前已取得一些研究成果:文献[8]建立温控集群负荷参与电网调频模型,有效提高系统频率稳定性;文献[9]提出电动汽车参与电网调峰的分布式需求算法,计算结果有效降低系统负荷峰值;文献[10]提出源-网-荷互动的概念,利用系统中可转移

负荷参与系统调峰调频,以达到提高新能源消纳率的目的;文献[11]分析了分时电价引导用户参与削峰填谷的效果。

利用分时电价引导电网中的高耗能负荷如电解铝负荷作为调峰资源参与系统调节具有明显的优势:首先,电解铝负荷容量大,调度潜力高;其次,电解铝负荷自动化程度高,可以实现毫秒级的控制^[12-13];因此,高耗能负荷参与系统调度优化具有较强的应用价值。本文通过研究电解铝负荷参与系统调峰机理,建立分时电价引导电解铝负荷参与系统调峰的源-荷协调优化调度模型,并利用区域电网实际数据仿真验证。

1 电解铝在电力系统调峰中的作用

1.1 电解铝工艺原理

如图1所示,电解铝工艺设备由整流变压器和晶闸管整流器组成,生产运行过程中当电网频率出现扰动时可以利用晶闸管快速调节设备从电网吸收的有功功率,目前可以实现0%~40%额定功率范围内快速调节,速度为80ms左右,是非常优秀的调峰调频资源^[14]。

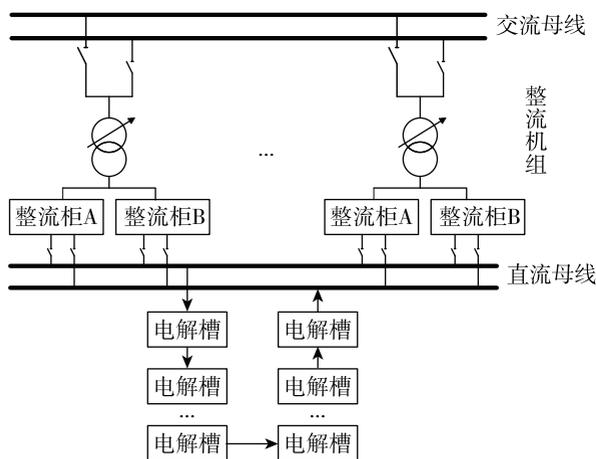


图1 电解铝负荷并网

1.2 电解铝负荷调节特性

电解铝负荷在参与电网调峰调频过程中受到生产工艺限制,向下调节量为总负荷的40%,可以分为10个档位,即每一个向下调节档位调节量为 $40\% \times P_e / 10$,其中 P_e 为电解铝总负荷量;向上调节量为总负荷的10%,可以分为6个档位,即每一个向上调节档位调节量为 $10\% \times P_e / 6$,故有如下的约束条件:

1) 负荷调节量限制。

$$P_L(t) = P_e + s_1 P_{up} - s_2 P_{down} \quad (1)$$

$$0 \leq s_1 \leq 6, 0 \leq s_2 \leq 10 \quad (2)$$

$$P_{up} = 10\% \times P_e / 6, P_{down} = 40\% \times P_e / 10 \quad (3)$$

式中: P_L 为 t 时刻电解铝负荷调节后的运行功率, s_1 为上调档位数量, s_2 为下调档位数量, P_{up} 为每一个上调档位调节量, P_{down} 为每一个下调档位调节量。

2) 调节参数限制。

电解铝整流装置在一个调度周期内的上调次数和下调次数总和不应该超过设定的最多调节次数,以免影响整流装置和电解槽使用寿命,具体表达式为

$$s_1 + s_2 \leq M \quad (4)$$

式中: M 为设定的最多允许调节次数。

3) 电解铝负荷调节时间限制。

电解铝整流装置不允许频繁地上调下调功率,具体表达式为

$$s_1^t - s_1^{t-1} \geq T_1^{\max} \quad (5)$$

$$s_2^t - s_2^{t-1} \geq T_2^{\max} \quad (6)$$

式中: $s_1^t - s_1^{t-1}$ 、 $s_2^t - s_2^{t-1}$ 分别表示两次调节的时间差, T_1^{\max} 、 T_2^{\max} 分别表示上调和系统时间差下限。

2 常规火电机组参与系统调峰模型

2.1 常规火电机组运行成本分析

当前火电机组基本完成灵活性改造,能够快速灵活地调节出力来平抑可再生能源的波动。完成灵活性改造的常规火电机组在参与电网调峰时可以分为正常运行阶段、常规调峰阶段和投油深度调峰阶段。在正常运行阶段,机组运行成本函数如式(7)所示:

$$C_i(P_{i,t}) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{T=24} a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (7)$$

式中: N 为区域电网火电机组数量, $T=24$ 表示将一天划分为24h; a_i 、 b_i 、 c_i 为机组 i 的煤耗系数, $P_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的出力。

在常规调峰阶段,除了考虑机组常规运行成本外,还需要考虑机组低出力运行时对其寿命的损害,机组寿命损耗可用Manson-Coffin公式表示^[15],具体如式(8)~式(9)所示:

$$C_s = \frac{\alpha p}{2N_s(P_{i,t})} \quad (8)$$

$$N(P_{i,t}) = 0.00577P_{i,t}^3 - 2.682P_{i,t}^2 + 484.8P_{i,t} - 8411 \quad (9)$$

式中: C_s 为机组损耗的折算成本, α 表示机组损耗系数, p 为机组购置成本, $N(P_{i,t})$ 为发电机转子致裂循环周次。

当机组进一步降低出力进行深度调峰时,由于投煤量减少,锅炉燃烧无法稳定,此时必须在投煤同时投油辅助燃烧以保证锅炉燃烧稳定性,该状态下机组运行成本进一步增加,增加部分为投油成本,如式(10)所示:

$$C_{oil} = m_{oil}p_{oil} \quad (10)$$

式中: C_{oil} 为投油成本, m_{oil} 为投油量, p_{oil} 为油价。

2.2 火电机组运行约束

1)发电机组的出力上下限约束、爬坡约束。

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (11)$$

$$-R_d \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq R_u \quad (12)$$

式中: $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ 为机组*i*的最大最小出力限制, R_d 、 R_u 为机组的下/上爬坡速率。

2)热备用约束。

热旋转备用是防止网内发电机组故障时系统出力不足导致频率快速下降的重要措施,具体约束表达式为

$$\sum_{i=1}^N (P_{i,\max} - P_{i,t}) \geq R^d \quad (13)$$

式中: R^d 为系统要求的热旋转备用下限。

3)系统发供电平衡约束。

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} + P_{wind,t} = P_{L,t} \quad (14)$$

式中: $P_{wind,t}$ 、 $P_{L,t}$ 分别为时段*t*的风电预测出力和负荷预测功率。

3 电解铝参与系统调峰的优化模型

电网的经济调度模型以系统总的运行成本最小为目标函数。系统的运行成本包括火电机组的发电成本和调峰成本,电解铝负荷调节成本、弃风成本的具体表达式如下:

$$\min C = C_{Pg} + C_{AL} + C_w \quad (15)$$

式中: C_{Pg} 为系统内运行的火电机组的发电成本和调峰成本, C_{AL} 为电解铝参与调峰的成本, C_w 为弃

风成本,具体表达式如式(16)所示:

$$C_w = \sum_{t=1}^T p_w P_{t,out} \quad (16)$$

式中: p_w 为弃风单位成本, $P_{t,out}$ 为*t*时刻弃风量。

由于参与调峰时需要调节电解铝整流装置从电网吸收的有功功率,造成流过电解槽的直流电流发生波动,对电解槽造成一定的损坏,并且影响电解铝产量,所以电解铝参与调峰产生一定的成本(下调时铝液产量下降,利润减少,成本增加;上调时铝液产量上升,利润升高,即成本减少),具体成本设置如表1所示。

表1 电解铝负荷调节参数

向上调	向下调	最大允许调节次数/次	电解铝下调负荷成本/(元·次 ⁻¹)	电解铝上调负荷成本/(元·次 ⁻¹)
2	2	6	30 000	-10 000

以上建立的电解铝负荷参与系统调峰的电网经济调度模型的约束条件包括式(1)~(6)、式(11)~(16)。至此,考虑电解铝负荷参与的电力系统经济调度建模完成。

4 电解铝参与系统经济调度仿真分析

4.1 区域电网分时电价的划分

分时电价是实现需求侧响应的重要措施,电网运营商通过在负荷高峰和低谷时段调整电价以引导用户用电方式,达到削峰填谷的目的。区域电网划分的峰、谷、平3个时段和电价如表2所示。

表2 分时电价时段划分

划分时段	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	时间
峰时段	0.75	08:00 ≤ <i>t</i> < 22:00
谷时段	0.40	00:00 ≤ <i>t</i> < 06:00
平时段	0.55	06:00 ≤ <i>t</i> < 08:00 22:00 ≤ <i>t</i> < 24:00

4.2 算例参数

本文选取百色区域电网运行数据对本文所建立的模型进行仿真验证,系统接线如图2所示,图中*G*表示电厂出力,*L*表示站点负荷,单位均为MW,350 MW机组为a、d、e、j电厂,150 MW为b、c电厂。

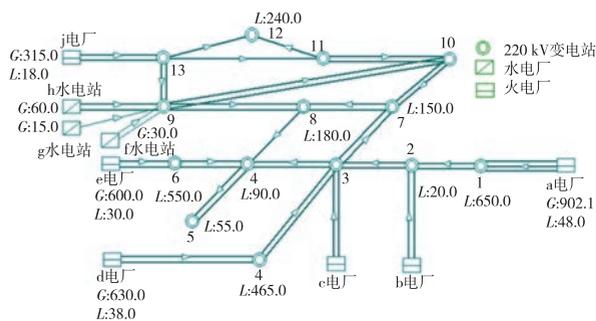


图2 区域电网系统接线

风电预测曲线如图3所示,弃风成本设置为0.1元/kW·h,机组参数^[2]见表3。

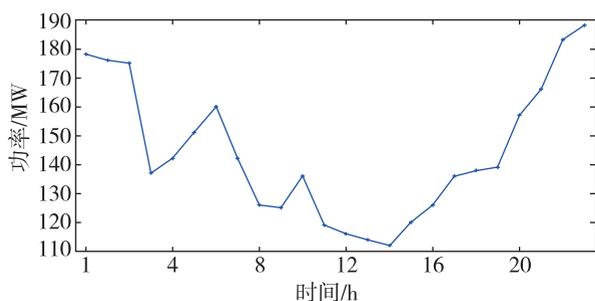


图3 风电出力预测曲线

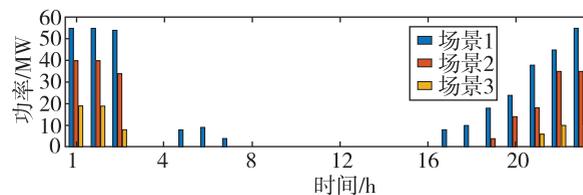
4.3 算例结果分析

为验证本文所建立的分时电价引导电解铝负荷参与区域电网调峰的优化调度模型的有效性,设置以下3个场景进行对比分析:

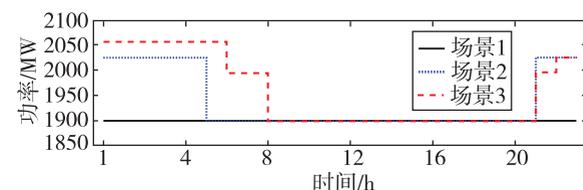
- 1) 场景1,系统中只有常规火电机组参与调峰;
- 2) 场景2,系统中常规火电机组和电解铝负荷联合调峰;
- 3) 场景3,系统中分时电价引导电解铝负荷联合常规火电机组调峰。

图4为3个场景下弃风量、电解铝负荷调节情况。从图4(a)可以看出,各场景的弃风量关系为场景3 < 场景2 < 场景1。从图4(b)可以看出,电解铝负荷参与系统调峰时,在场景1中弃风量较大时段电解铝负荷上调参与风电消纳,达到减少弃风量的目的(区域电网负荷绝大部分为电解铝负荷,约1900 MW,负荷平稳,所以场景1负荷

曲线为直线)。当利用分时电价引导电解铝负荷参与调峰后,在便宜电价的引导下,电解铝负荷参与调峰更加灵活,在电价谷时段或平时段上调负荷量进行生产,既达到提高产量的目的,又可以提高风电消纳。



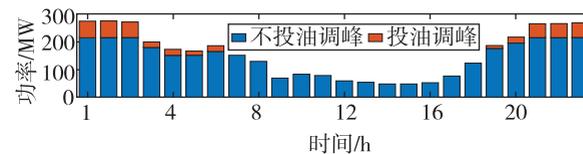
(a) 不同场景下弃风量



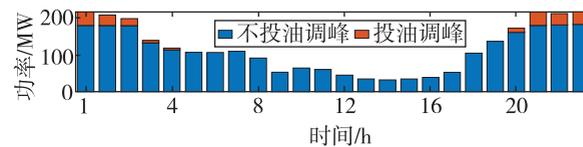
(b) 电解铝负荷曲线

图4 优化后弃风情况和负荷曲线

图5为3个场景下火电机组调峰出力情况。从图中可以看出,在夜间风电出力较大时段,当系统中仅火电机组进行调峰时(场景1),机组会降低出力进行更大程度的调峰,为风电上网提供更大空间;当利用分时电价引导电解铝负荷参与调峰后,随着电解铝负荷上调负荷量,弃风量和火电机组调峰深度明显减少。由此可知,分时电价引导电解铝负荷参与系统调峰进一步提高系统调峰的灵活性,使得系统运行成本和弃风量进一步降低。



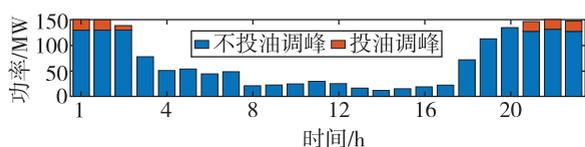
(a) 场景1



(b) 场景2

表3 区域电网机组参数

机组容量/ MW	有功出力上限 约束/MW	有功出力下限 约束/MW	机组上爬坡约束/ (MW·min ⁻¹)	机组下爬坡约束/ (MW·min ⁻¹)	机组煤耗系数		
					a	b	c
350	320	140	5	10	4.33×10^{-4}	0.19	40.62
150	140	70	5	10	1.02×10^{-3}	-6.56×10^{-2}	84.02



(c) 场景 3

图 5 火电机组调峰情况

3 种不同场景的运行成本计算结果如表 4 所示。

表 4 不同场景下区域电网运行总成本计算结果

场景	总成本/ 万元	火电机组 正常运行 成本/万元	火电机组 调峰成本/ 万元	电解铝 负荷调峰 成本/万元	弃风 成本/ 万元
1	2 896.66	2 594.65	298.43	—	3.58
2	2 835.38	2 670.49	171.35	-8	1.53
3	2 791.52	2 695.45	106.22	-11	0.84

从表 4 的计算结果可以看出,仅依靠火电机组进行调峰时弃风成本最严重,总运行成本最高。电解铝负荷参与系统调峰后,系统运行成本、火电机组调峰成本、弃风成本有所下降。利用分时电价引导电解铝负荷参与系统调峰后,系统运行成本、火电机组调峰成本、弃风量下降幅度更大;因此,本文所建立的分时电价引导电解铝负荷参与系统联合调峰能够降低系统运行成本,缓解火电机组调峰压力,提高风电消纳水平。

5 结 论

本文提出分时电价引导电解铝负荷参与系统调峰的区域电网经济调度方法,通过仿真验证得到以下结论:

1) 通过讨论电解铝负荷参与系统调峰的可行性和分时电价的作用,从理论上揭示分时电价引导电解铝负荷参与系统调峰的可行性;

2) 通过算例结果分析可知,分时电价引导电解铝负荷参与系统调峰后,系统总运行成本、弃风量都有所下降;

3) 本文提出的经济调度方法使调峰主体更加灵活响应系统调峰需求,为区域电网调度和电解铝生产企业的生产规划提供决策信息。

参考文献

[1] 梁海锋,李丽.大容量分布式电源接入配电网仿真研究[J].广西电力,2021,44(6):29-34.
[2] 黄荣泽.源-网-荷-储协调的区域电网日前优化

运行[J].广西电力,2022,45(2):7-12.

[3] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
[4] 黄丽娟,甘涌泉,周恒旺.广西构建以新能源为主体的新型电力系统的建议[J].广西电力,2021,44(4):1-5.
[5] 韦远康,吕翔.考虑多种电源参与电力市场机制设计及应用[J].广西电力,2020,43(4):24-29.
[6] 李军徽,张嘉辉,穆钢,等.计及负荷峰谷特性的储能调峰日前优化调度策略[J].电力自动化设备,2020,40(7):128-133.
[7] 文晶,刘文颖,谢昶,等.计及风电消纳效益的电力系统源荷协调二层优化模型[J].电工技术学报,2015,30(8):247-256.
[8] 杨婕,李泽辉,马锴,等.基于小脑模型神经网络的温控负荷优化调度方法[J].电力系统自动化,2022,46(10):199-208.
[9] 杨镜司,秦文萍,史文龙,等.基于电动汽车参与调峰定价策略的区域电网两阶段优化调度[J].电工技术学报,2022,37(1):58-71.
[10] 崔杨,修志坚,刘闯,等.计及需求响应与火-储深度调峰定价策略的电力系统双层优化调度[J].中国电机工程学报,2021,41(13):4403-4414.
[11] 蔡可天,钱玉良.风电接入时考虑储能和分时电价的电力系统经济调度[J].南方电网技术,2022,16(7):116-127.
[12] 王健,鲁宗相,乔颖,等.高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究[J].电网技术,2017,41(7):2115-2124.
[13] 王彩霞,时智勇,梁志峰,等.新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术[J].电力系统自动化,2021,36(4):10-22.
[14] 卢学良,黄荣泽.机组一次调频参数对百色区域电网频率特性的影响分析[J].广西水利水电,2022(4):90-93.
[15] 刘闯,孙傲,王艺博,等.计及电熔镁负荷与储能联合调峰的电力系统日前-日内联合经济调度方法[J].电力自动化设备,2022,42(2):8-15.

收稿日期:2022-12-14 修回日期:2023-01-11

作者简介:农有敏(1986),男,工程师,从事变电检修维护工作,E-mail:1670585681@qq.com.