

12-16-2020

Frequency Regulation Signal Reduction Methods for Aluminum Smelters

Zejian Feng

1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; ; 2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China; ;

Shengfei Li

3. Ningxia Zhongning Industrial Park Energy Management Service Co. Ltd., Zhongwei 755100, China; ;

Shouzhen Zhu

4. Beijing SmartChina Energy Co. Ltd. Beijing 100084, China;

Zhiyun Li

3. Ningxia Zhongning Industrial Park Energy Management Service Co. Ltd., Zhongwei 755100, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Frequency Regulation Signal Reduction Methods for Aluminum Smelters

Abstract

Abstract: The motion delay of tap changer of aluminum smelter rectifier downgrades frequency response precision in following high frequency regulation signals. *Aiming to improve the regulation performance of aluminum smelter loads based on adjusting dynamics, a fast regulation signal reduction technique is proposed, which is motion control threshold-based. A simulation-based decision technique of threshold values of the signal reduction algorithm's is devised to improve the performances of frequency response.* Simulation results verify the efficacy of the techniques in promoting the frequency response precision to a certain production level, and contribute a practical way to support aluminum smelter's provision of frequency regulation services as well.

Keywords

aluminum smelter, frequency regulation, signal reduction, threshold, demand response resources

Authors

Zejian Feng, Shengfei Li, Shouzhen Zhu, Zhiyun Li, and Xiaomin Bai

Recommended Citation

Feng Zejian, Li Shengfei, Zhu Shouzhen, Li Zhiyun, Bai Xiaomin. Frequency Regulation Signal Reduction Methods for Aluminum Smelters[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(12): 2332-2340.

电解铝负荷提供电力调频的信号缩减方法

冯泽健^{1,2*}, 李胜飞³, 朱守真⁴, 李志云³, 白晓民^{1,2}

(1. 清华大学电机系, 北京 100084; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

3. 宁夏中宁工业园区能源管理服务服务有限公司, 宁夏 中卫 755100; 4. 北京智中能源科技发展有限公司, 北京 100084)

摘要: 针对电解铝负荷在响应电力调频信号时存在整流器抽头运动延时造成响应精度低的问题, 提出了一种信号缩减方法——运动控制阈值法, 结合整流器抽头动特性对调度参考调频信号进行缩减, 缩减信号作为电解铝负荷控制的输入, 能够有效提高电解铝负荷参与调频的响应绩效。设计了一种基于仿真的控制阈值优选方法, 优选阈值参数用于电解铝调频容量决策, 仿真验证了缩减方法将电解铝调频绩效提升到生产水平的有效性和阈值优选方法对电解铝负荷调频决策的适用性。

关键词: 电解铝负荷; 调频; 信号缩减; 控制阈值; 需求响应资源

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 12-2332-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-FZ0430

Frequency Regulation Signal Reduction Methods for Aluminum Smelters

Feng Zejian^{1,2*}, Li Shengfei³, Zhu Shouzhen⁴, Li Zhiyun³, Bai Xiaomin^{1,2}

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China; 3. Ningxia Zhongning Industrial Park Energy Management Service Co. Ltd., Zhongwei 755100, China; 4. Beijing SmartChina Energy Co. Ltd. Beijing 100084, China)

Abstract: The motion delay of tap changer of aluminum smelter rectifier downgrades frequency response precision in following high frequency regulation signals. *Aiming to improve the regulation performance of aluminum smelter loads based on adjusting dynamics, a fast regulation signal reduction technique is proposed, which is motion control threshold-based. A simulation-based decision technique of threshold values of the signal reduction algorithm's is devised to improve the performances of frequency response.* Simulation results verify the efficacy of the techniques in promoting the frequency response precision to a certain production level, and contribute a practical way to support aluminum smelter's provision of frequency regulation services as well.

Keywords: aluminum smelter; frequency regulation; signal reduction; threshold; demand response resources

引言

高载能工业中, 电解铝负荷是优质需求响应资源(Demand Response Resources, DRR)^[1], 电解铝

生产过程表现出持续平稳、负荷波动小等特点, 电解槽的热平衡惯性使其拥有高达 10% 的负荷调节能力^[2], 能够给地区电网辅助服务提供相当可观的备用容量。经过调校, 可作为低成本、优质调频资源参与电力系统调频服务, 电解铝企业也能从服务中获得相应收益^[3]。

调频是电力市场上最贵的辅助服务, 要求调频资源(包括传统水火电机组、燃气轮机机组、储能



收稿日期: 2020-04-30 修回日期: 2020-06-30;
作者简介: 冯泽健(1973-), 男, 山东, 博士生, 高工, 研究方向为电力需求响应, 能量调度与交易, 综合能源分析等; 李胜飞(1973-), 男, 宁夏, 高工, 研究方向为电力交易, 调度, 需求侧管理; 朱守真(1950-), 女, 江苏, 博士, 教授, 研究方向为主动配电网, 负荷参数辨识。

<http://www.china-simulation.com>

• 2332 •

和 DRR)连续响应电力调度定时发出的自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)信号^[4], 实时调增或者调减负荷, 响应必须足够快和精准。前三类调频资源为源侧资源, DRR 则来源于居民、商业、工业等各类负荷, 其调频成本较源侧资源低。我国工业负荷占比超过 70%, 其中尤以高载能工业为能耗大户。随着风电、光伏等间歇性能源发电的渗透率快速提高, 调频需求也快速提升, 亟待高载能工业负荷释放出调频潜能。

美国地区电网 PJM (宾夕法尼亚-新泽西-马里兰联合电力系统的简称)设计和使用的 RegD 信号(Regulation-D)为业界实践最成功的调频信号。调频资源响应速度越快, 跟踪 AGC 信号就越精准, 从而能避免过调节^[5]。PJM 的一份报告针对不同调频资源的绩效进行了比较, DRR 的绩效评分低于气轮机和储能设备, 但是其成本比专用储能和气轮机要低得多。由此可见, 通过改进响应方法提高调频品质, 有助于挖掘我国众多高载能负荷的调频潜力, 有更多低成本 DRR 提供电力调频服务, 从而降低电力系统的调频费用。

与储能等标称功率和能量小且昂贵的调频资源相比, 调节容量大、对生产影响小的电解铝负荷参与电网调频, 能够显著降低系统调频成本。美国铝业公司率先利用其电解铝负荷参与美中西部电网的调频应用^[6], 获得了成功。但是该调频实践采用直接负荷控制模式, 由调度机构直接控制设备, 并非市场化机制。当前实践中以资源的调频响应绩效为考核依据、按绩效进行补偿的调频市场运作方式需要调频资源提供者做出符合自己利益的最优容量决策。文献[7]综述了美国 5 个主要电力市场的调频绩效补偿方法, 对比分析了这些市场的调频资源补偿机制、调频里程的计算算法等。PJM 调频市场发展较早, 业务运营相对成熟, 相当数量的文献采用 PJM 快速调频信号 RegD 来评价资源的调频品质, 以及验证所提出调频控制结构的适用性^[8-9]。

快速调频信号适合高载能工业 DRR 的调节特

性, 响应调频信号时还能维持稳定的生产水平。当前实践中, 电解铝负荷调节功率主要是通过为电解槽提供直流电的晶闸管整流装置抽头(有载开关)调节来实现的^[10], 每一次调节动作需要一定的时间。但是由于调频信号以 2~4 s 为周期发出一个信号, 高载能 DRR 如电解铝负荷的一次调节时间大于信号间隔, 难以精准实时跟踪调频信号, 不采用一定的技术手段优化调节方式, 调频绩效分数不理想, 难获得利润, 相应也没有激励参与调频。

问题的解决方法之一是考虑快速调频信号中大部分属微小调节, 组合这些微小变化, 缩减控制信号数量, 突破整流器抽头运动的技术条件限制。文献[11]提出了一种快速调频信号的缩减方法, 解决了抽头运动延迟问题, 并以此为基础, 研究了电解铝工艺的最优调频容量决策问题。文献提出的局部极值点缩减法, 能够满足基本的信号缩减需求, 但是通过仿真发现, 其缩减信号参考点采用极值点, 相邻参考点跨度大小不均匀, 采用这种缩减信号提供调频的绩效分数偏低, 不满足调频市场对绩效的要求, 在工程实践上并不可行。因此需要研究设计新的调频信号缩减方法, 一方面提高调频绩效分数, 满足市场要求, 另一方面优化抽头调节的运动过程, 降低对生产的影响。

1 调频信号与缩减方法

电解铝负荷在提供调频过程中首要考虑的是采用技术手段提高其绩效指标, 一方面通过改善其负荷调节的动特性, 另一方面则要考虑改进其动特性与跟踪对象之间的吻合程度。前者属于系统性技术革新问题, 本文围绕后者进行方法设计。

1.1 参考调频信号——PJM RegD

AGC 信号是电力系统二次调频主要参考信号。为了适配不同时间尺度的备用资源, PJM 将调频信号分为低频信号和高频信号 RegD。低频信号变化趋势较缓, 而高频信号则在 ± 1 之间按照当前平衡状态表现出震荡摆动特征, 如图 1 所示。

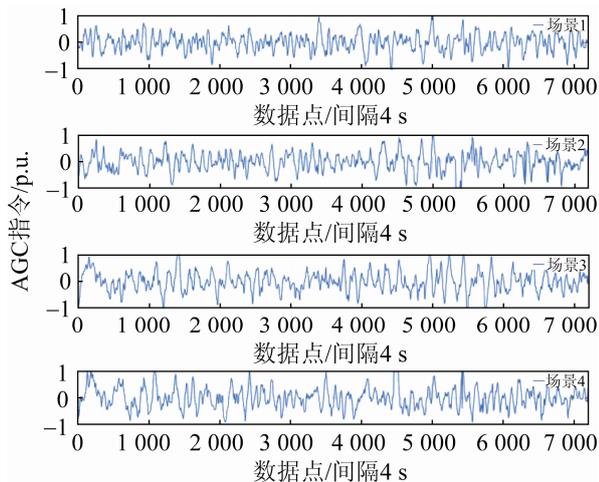


图1 连续4天相同时段 PJM 调频信号作为典型场景
Fig. 1 Regulation signals of 4 consecutive days as scenarios
数据来源: <http://www.pjm.com>

选用 PJM 的 2004 年 5 月 6—9 日 10:00—18:00 时段的 RegD 信号作为快速调频参考信号进行研究。RegD 信号是每 4 s 一个参考点, 根据对上一参考点的位移表现为上调和下调, 位移的幅度大小表明对调频容量的需求数量, 也即是对参与调频的各类资源调增调减负荷的要求。

2012 年, PJM 按照美国联邦能源委员会 (FERC) 755 号令的要求重新设计了调频市场, 其“基于绩效的调频”^[12]就是考核资源动态跟踪参考信号的准确程度。调频资源的报价和结算都以测量得到的响应绩效为依据。进入 PJM 调频市场, DRR 必须能够达到市场可接受的运行性能绩效指标。PJM 的调频性能指标由三部分构成: 精确度、相关和延迟^[7]。参考其调频绩效分数相关说明^[13], 本文定义相应的分数来评估跟踪绩效: 每 5 min 调度周期的相关分数 S^{cor} 、延迟分数 S^{del} 和精度分数 S^{pre} , 具体定义参见附录 A。

1.2 电解铝负荷的调频信号缩减

本节首先分析文献[11]提出的局部极值点法, 指出该方法存在的不足, 结合电解铝生产实际, 提出改进的调频信号缩减方法用于调频实践。

1.2.1 调频信号缩减局部极值点方法

文献[11]提出了一种基于局部极值点的调频

信号缩减方法用于电解铝负荷的调频容量决策, 采用该方法的缩减信号效果如图 2 所示。

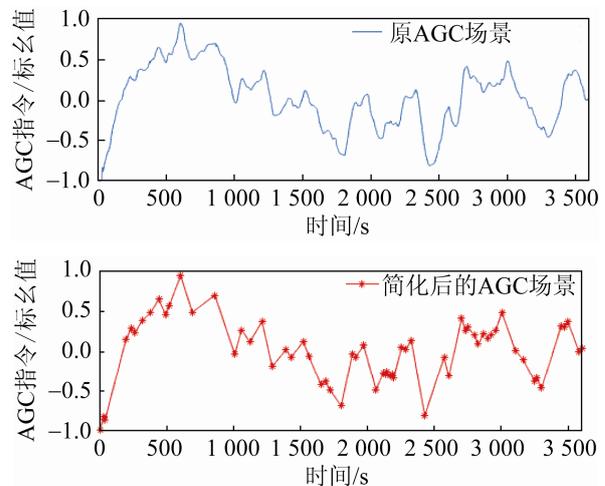


图2 采用局部极值点缩减调频信号
Fig. 2 Simplification of frequency regulation extreme points

该方法的数学本质是线性化近似, 保留局部极值点, 简化过渡点, 对于调节幅度较小的相邻局部极值点合并成一个虚拟极值点, 经缩减后的调频参考信号曲线就表现为锯齿状。电解槽整流器抽头控制输入信号采用缩减后的参考点, 会减少抽头动作次数, 降低调节成本。但是带来的问题是由于会出现长时间大跨度间隔, 会使得这个时间段内的抽头保持不动, 积累的抽头调整步长在下一极值点信号到达时一次动作时间过长, 表现为响应迟滞, 影响绩效评分。这样不仅减少调频收益, 还增大机械运动发热与磨损, 增加总运行成本。另外线性化带来的调频信号失真问题, 需要采用多场景技术来解决, 降低其不确定性, 但是多场景会带来“维数灾”, 优化计算代价大、时间长, 难以支持实时调频应用。

1.2.2 运动控制阈值方法

针对局部极值点法的不足, 本文考虑适度增加控制参考点, 提出一种新的缩减方法——运动控制阈值法。该方法以离散调节的工业负荷一次调节量为参考基准设计运动控制阈值, 合并 2 次信号差值落在阈值内的数据点, 其实现如算法图 3 所示。

方法的数学本质是采用低通滤波技术滤掉部分高频分量, 平滑调节步骤, 使得电解槽整流器的

抽头运动平缓。针对局部极值点法改进的地方在于能够降低抽头的一次调节量, 以多次平缓调节来取代一次大调节, 这样一方面可以提高跟踪调频信号的精度。另一方面能够减少调节过程的发热和磨损, 增加收益的同时降低成本。

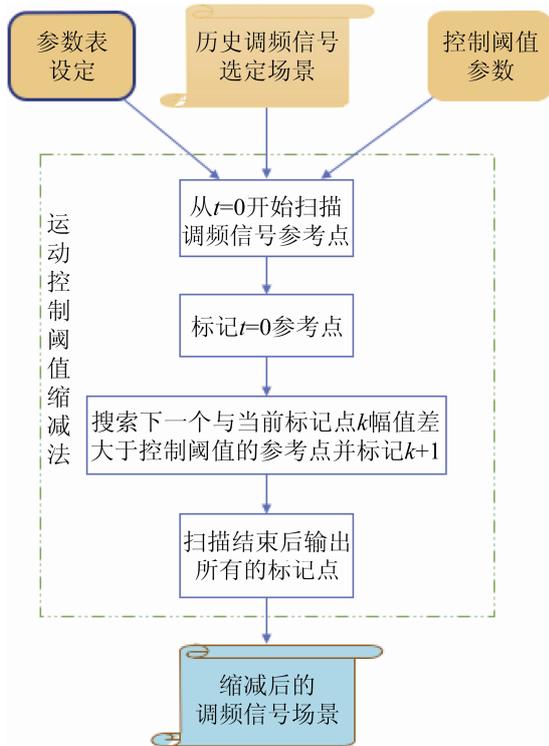


图 3 运动控制阈值缩减法算法流程

Fig. 3 Flowchart of operational threshold RegD reduction

采用对标的局部极值点法的同一样本数据, 所提出算法的算例实现如图 4 所示。

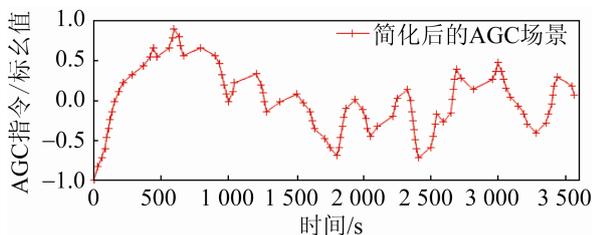


图 4 采用运动控制阈值法缩减的调频信号

Fig. 4 Reduction of fast regulation signals using threshold

在该算例中, 缩减后的信号在幅值上分布均匀, 缩减数据点有 98 个, 稍多于局部极值点法的 63 个, 但远小于原来的 901 个点。方法的有效性采用 2.1 和 3.2 的仿真方法来验证和比较。

2 运动控制阈值优选的仿真方法

可再生能源如风电出力的波动性和用户负荷不确定性与季节、工作日、节假日、时段相关, 且表现出不同的特征, 因此不同时段的调频需求也表现出不同特征。在极端场景下, 如调频需求表现幅值波动小, 频率高时, 如果选取较大的运动控制阈值, 则会导致电解铝负荷调频响应少, 绩效差, 从而收益低, 不利于激励电解铝负荷参与调频。因此适应不同调频需求场景应采用不同的运动控制阈值, 同时, 为了适应不同生产工况条件, 实现电解铝负荷调频最优容量决策, 也需要优化控制阈值。

2.1 电解铝负荷调频容量决策模型

仿真的容量决策采用文献[11]的电解铝最优调频容量模型(1~13)。以历史同期前后时段的调频信号数据作为调频需求数据, 选取不同的典型场景, 作为调频需求的预测, 使用 Matlab 对上述容量决策模型进行调频容量优化决策仿真。

2.2 阈值优选的评价指标设计

确定备选的控制阈值, 使用运动控制阈值法获得缩减后的调频信号场景, 将之应用于 2.1 调频容量优化决策仿真过程。仿真结果的调频容量、收益、成本、实时性等用作评价指标。具体到电解铝厂, 决策者关注的是调频收益、调节成本、计算时长(决定计算成本、决策成本及不满足实时约束带来的决策后果)。

为简化计算以及考虑实际工程运用, 3 个指标采用经过归一化后的效用函数来量化。

1) 与收益成正比关系的响应绩效分数 $score(sco)$ 选为收益指标:

$$U_1(sco) = \frac{1}{SH} \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^H sco_{ij} \quad (1)$$

绩效分数的效用函数取所有场景、所有时段的绩效分数均值, 调频绩效分数的计算参见附录 A。

2) 与调节成本成正比的整流器抽头调节次数 $tapcount(tap)$ 作为调节成本:

$$U_2(\text{tap}) = \frac{\text{tap} - \text{tap}_{\text{Max}}}{\text{tap}_{\text{Min}} - \text{tap}_{\text{Max}}} \quad (2)$$

成本的效用函数设计思路, 最小为 1, 最大为 0。

3) 容量决策仿真的计算时长(dur):

$$U_3(\text{dur}) = \frac{\text{dur} - \text{dur}_{\text{Max}}}{\text{dur}_{\text{Min}} - \text{dur}_{\text{Max}}} \quad (3)$$

计算用时在去掉 5 min 以上的数据后, 以最小时间映射到 1, 以最长时间映射到 0。因此计算时长范围归一化到[0,1]上。

2.3 运动控制阈值的优选步骤

控制阈值优选的步骤是: (1) 决策者根据工程经验, 给定一个阈值搜索范围; (2) 对于搜索范围内的每一个阈值候选值, 进行 2.1 的容量决策仿真过程; (3) 比较仿真结果的收益、成本和实时性等 2.2 中的评价指标, 对三个指标分别进行排序; (4) 由决策者按照排序判断选取一个备选的运动控制阈值作为下一小时投标容量决策的调频信号缩减阈值; (5) 下一小时投标容量决策采用上一小时和上周同日的下一小时调频历史数据作为决策场景。

3 仿真设计与结果分析

算例仿真采用本文提出的运动阈值缩减法和 2.1 的容量决策模型(混合整数规划)的 Matlab 实现进行。仿真数据来源为 PJM 提供的 2004 年 5 月 6—9 日的调频样本数据。

3.1 仿真参数设定

为了简化计算, 将重点放在调频信号缩减方法和优化设计方案的对照上, 设定算例中电解铝工艺有一个电解槽, 每天参与 4 h 调频。这里为简便起见, 选择连续 4 h 的调频信号模拟 4 个相应时段(或 4 个随机场景)。

数学规划优化器采用 Gurobi, 仿真计算在 2.2 GHz 的 Intel i7 双核 CPU、8 GB 内存的 MacBook 电脑上运行完成。在有 2~10 条电解槽产线, 场景数少(生产、电源供电都平稳)的工厂决策条件下, 优化计算能够在 1~5 min 内完成, 能够支持 5 min

的调频决策。

使用电解铝调频容量决策模型, 需要提供相应的电解槽技术参数和相应的价格、成本设定。电解槽参数如表 1 所示。

表 1 电解槽参数

Tab. 1 Potline parameters

θ_l/MW	τ_l/s	z_l^{up}	z_l^{lo}	P_l^0/MW
0.8	5	10	-10	100

定义价格矢量: $\pi := (\lambda_h^E, \lambda_h^{Tap}, \lambda_h^P, \lambda_h^V)$ 。各价格参数分别为: λ_h^E 根据消耗电量正比例与电解铝产量计算的单位能耗利润, 单位为 RMB/MWh。 λ_h^{Tap} 整流器抽头移动一档的成本, 单位为 RMB。 λ_h^P 调频响应不达标时的单位惩罚价格, 单位为 RMB/MW。 λ_h^V 调频容量收益, 单位为 RMB/MW。

3.2 调频信号缩减方法仿真结果比较

采用 2 种缩减方法分别对仿真算例的绩效分数进行计算, 第 1、2、4 时的精确度分数和总体的平均分数分别如图 5~8 所示。图 5~7 这 3 个时段的仿真结果表明了局部极值点法的 3 种精确度: 低、极低和零。所有这 3 种结果都排在运动控制阈值法得到的精确度分数后面, 且差距相当大。

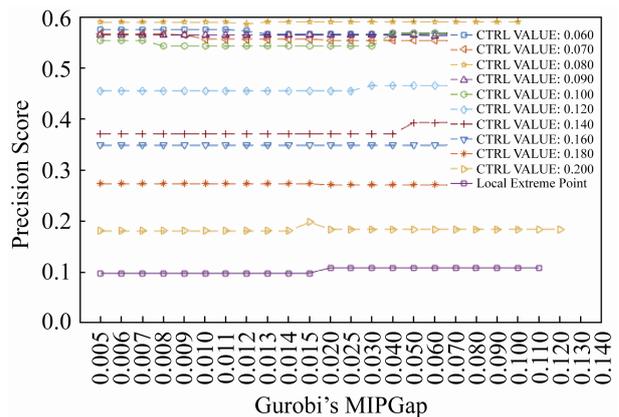


图 5 不同计算 Gap 时 2 种缩减方法精确度分数对比 1
Fig. 5 Comparison of precision scores of 2 methods

由图 5 中可以观察到随着控制阈值的增加, 缩减点数愈少, 精确度分数则越低, 但是当阈值低到一定程度, 如该结果中在 0.1 以内时, 则精确度相

差不多。采用阈值越低, 缩减后的调频信号点数越多, 优化计算的负担增长很快, 可得出控制阈值在 0.1 附近时对这种信号集场景是最优的。

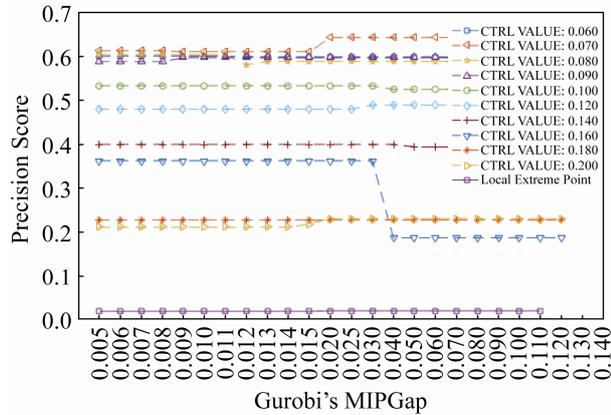


图 6 不同计算 Gap 时 2 种缩减方法精确度分数对比 2
Fig. 6 Comparison of precision scores of 2 methods

考察图 6, 除了当阈值为 0.16 时, 计算间隙 Gap 在 0.03 和 0.04 间有一个精确度分数的跳变之外, 其他精确度结果对于不同 Gap 设置表现一样。这在图 5 中也能得到相同的结果, 可以推断混合整数优化算法的 MIPGap 值设置可以充分高, 能够在减少计算时间的同时保持精确度分数不变。

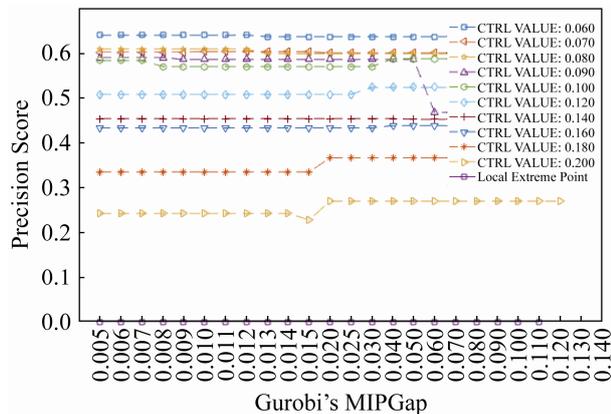


图 7 不同计算 Gap 时 2 种缩减方法精确度分数对比 4
Fig. 7 Comparison of precision scores of 2 methods

实际上, 图 7 得到的局部极值点法的精确度结果在不同的收敛条件均为 0 更多可见于其他时间调频信号使用该方法缩减后的结果。上述 3 个结果可以得出结论, 局部极值点法在工程上不适用于电解铝的调频投标容量决策。

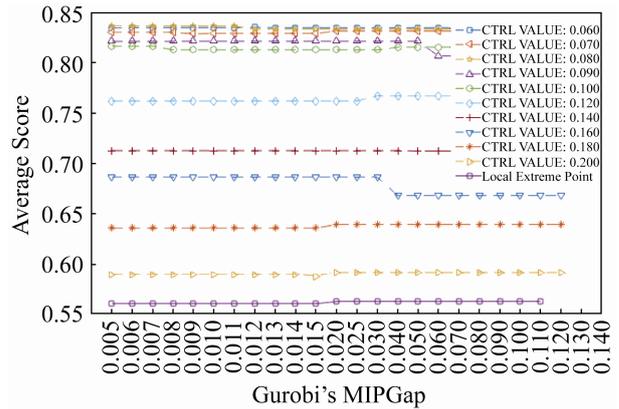


图 8 不同计算 Gap 时 2 种缩减方法绩效分数对比
Fig. 8 Comparison of Average Scores of 2 methods

图 8 所展示局部极值点法得到的总体绩效分数与运动控制阈值法比较也是最低的事实, 进一步佐证前述结论。由图 8 还可以获得的信息是运动控制阈值在 0.06~0.10 之间变动时, 总体绩效分数相差很小, 这是控制阈值的合理区间。

调频响应的绩效分数指标在收益分配中是决定性的, 局部极值点法在绩效分数方面不可行, 则没必要再进行其他指标的对比分析。

3.3 控制阈值参数优选的仿真结果分析

根据 3.2 的分析, 从收益的角度可以得出运动控制阈值应该作为主要的参数决策变量, 算法收敛控制值 MIPGap 可作为辅助决策变量, 其决定性程度, 还要看对计算时长和调节成本的影响。

3.3.1 决策参数对不同目标属性的影响

(1) 参数变化对绩效分数的影响

图 9 为不同的阈值和 Gap 参数设置对绩效分数的影响。由图中所示的仿真结果可以看出, 较小的控制阈值设置, 即在 0.1 以内的控制阈值可以获得较高的绩效分数, 但是这个阈值范围的分数的差别很小。较大的阈值设置, 表现出随着阈值越大, 分数越小, 而且差别明显的特征。但是对于不同的计算收敛 MIPGap, 0.011 以下的不同 MIPGap 值对绩效分数几乎没有影响, 0.011 以上得到的容量决策和响应模拟则无法得到合理的分数。

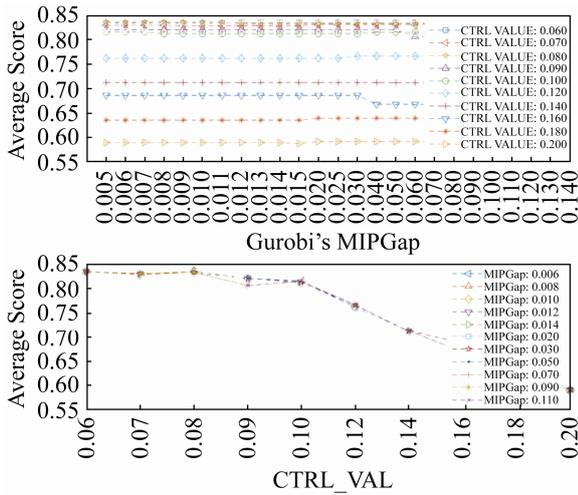


图 9 运动控制阈值和计算 Gap 对平均绩效分数的影响
Fig. 9 Average Score with Ctrl_Val or MIPGap

(2) 参数变化对计算时长的影响

图 10 为不同的阈值和 Gap 参数设置对计算时长的影响。较小的运动控制阈值(0.06)和计算收敛控制值 MIPGap (0.015 以下)对计算时长影响较大,但是随着提高控制阈值,计算时长相应减少,但是减少幅度较缓。

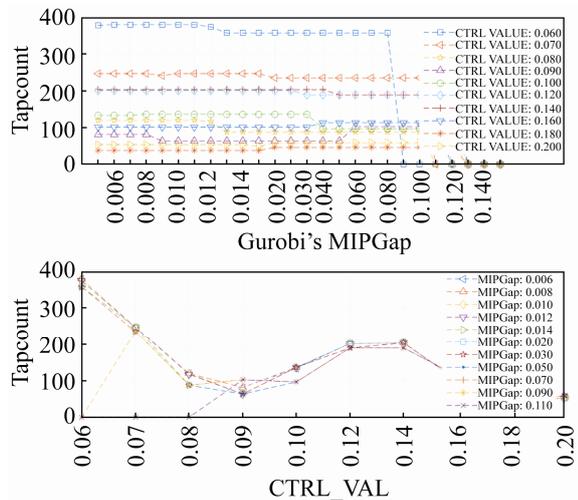


图 10 运动控制阈值和计算 Gap 对计算时间的影响
Fig. 10 Computing interval with Ctrl_Val or MIPGap

(3) 参数变化对调节成本的影响

调节成本与整流器触头调节次数 tapcount 成正比,因此这里用 tapcount 来指代调节成本。图 11 为不同的阈值和 Gap 参数设置对 tapcount 的影响。当控制阈值在 0.08~0.10 之间变化时, tapcount

最小, 该范围之外都会抬升调节成本。

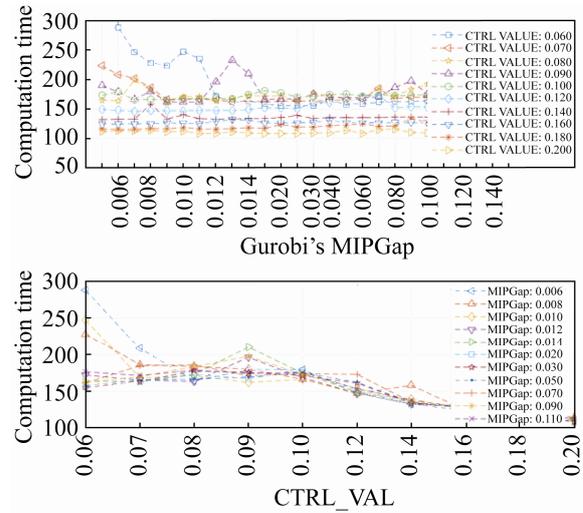


图 11 运动控制阈值和计算 Gap 对 Tapcount 的影响
Fig. 11 Tapcount with Ctrl_Val or MIPGap

综上, 对不同属性产生影响的最主要参数是运动控制阈值, 适应电解槽调频应用的最优阈值设置范围在 0.08~0.01 这个范围之内, 而 MIPGap 只要设置在一个合理范围内即可。具体参数设置的决策, 需要看决策者认可的各指标影响决策的重要程度。

3.3.2 优选控制阈值

仅以绩效分数为最优先指标来优选控制阈值为例, 如图 12 所示。可得出结论, 当控制阈值取值 0.09 时, 可获得最大绩效。

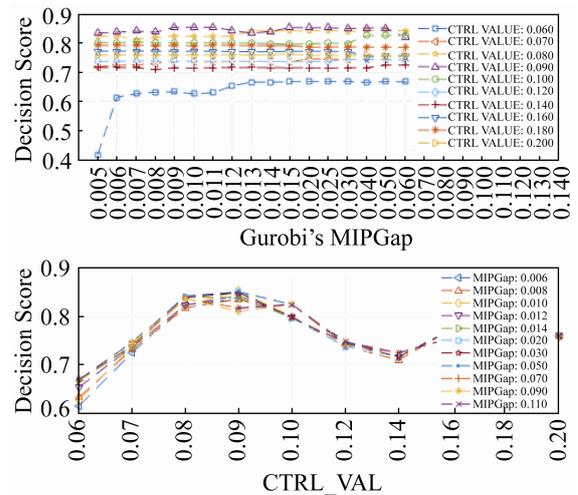


图 12 阈值参数优选决策
Fig. 12 Threshold Decision

4 结论

本文提出了一种改进的快速调频信号缩减方法, 方法充分考虑电解槽整流器抽头运动步长约束, 将平滑抽头动作作为设计原则, 以离散调节的电解铝负荷一次调节量为参考基准设计运动控制阈值, 合并两次信号差值落在阈值内的数据点, 方法可显著提升电解铝负荷对调频信号的响应绩效。通过对调频投标容量决策的仿真及其结果的比较分析, 使用本文提出的运动控制阈值法进行调频信号缩减进行控制, 解决了电解铝 DRR 采用局部极值点法难以提供合格调频响应的问题。另外本文设计了控制阈值优选的仿真方法, 适应未来实时调频市场的实时性要求, 能够形成工程化应用方法。

展望将来的工作, 一方面针对调频信号多场景集进行更全面的技术仿真, 找到可并行化的计算需求, 设计并行算法, 支撑电解铝调频工程应用。另一方面, 研究将电解铝这种大型调频资源与中小 DRR 结合, 实现更平滑的调频出力, 提高整体调频绩效, 为调频市场提供优质的聚合 DRR。

参考文献:

- [1] 姚明涛, 胡兆光, 张宁, 等. 工业负荷提供辅助服务的多智能体响应模拟[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4219-4226.
Yao Mingtao, Hu Zhaoguang, Zhang Ning, et al. Multiagent Response Simulation of Industrial Loads for Ancillary Services[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4219-4226.
- [2] Kirby B, Starke M, Adhikari S. NYISO Industrial Load Response Opportunities: Resource and Market Assessment - Task 2 Final Report[R]. Oak Ridge, Tennessee, US: Oak Ridge National Laboratory, 2009.
- [3] 王锡凡, 肖云鹏, 王秀丽. 新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5018-5028.
Wang Xifan, Xiao Yunpeng, Wang Xiuli. Study and Analysis on Supply-demand Interaction of Power Systems under New Circumstances[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028.
- [4] Zhou Z, Levin T, Conzelmann G. Survey of U.S. Ancillary Services Markets[R]. Argonne, IL: Argonne National Laboratory, 2016.
- [5] Beacon Power Corporation. Frequency Regulation Compensation in the ISO/RTO Markets[R]. 2010.
- [6] Todd D, Caufield M, Helms B, et al. Providing Reliability Services Through Demand Response: A Preliminary Evaluation of the Demand Response Capabilities of Alcoa Inc.[R]. Oak Ridge, Tennessee, US: Oak Ridge National Laboratory, 2009.
- [7] 陈达鹏, 荆朝霞. 美国调频辅助服务市场的调频补偿机制分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 1-9.
Chen Dapeng, Jing Zhaoxia. Analysis of FM Compensation Mechanism in FM Service Market[J]. Automation of Power Systems, 2017, 41(18): 1-9.
- [8] Lin Y, Barooah P, Meyn S, et al. Experimental Evaluation of Frequency Regulation From Commercial Building HVAC Systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 776-783.
- [9] 姚垚, 张沛超, 王永权. 温控负荷参与快速频率调整的双层控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 4987-4998.
Yao Yao, Zhang Peichao, Wang Yongquan. A Two-layer Control Method for Thermostatically Controlled Loads to Provide Fast Frequency Regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4987-4998.
- [10] 周鑫. 大功率晶闸管整流装置在电解铝行业的应用[J]. 世界有色金属, 2019(20): 64-65.
Zhou Xin. Application of High Power Thyristor Rectifier in Electrolytic Aluminum Industry[J]. World Nonferrous Metals, 2019(20): 64-65.
- [11] Zhang X, Hug G. Optimal Regulation Provision by Aluminum Smelters[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting. National Harbor, MD, USA: IEEE, 2014.
- [12] PJM Staff. Implementation and Rationale for PJM's Conditional Neutrality Regulation Signals[R]. 2017.
- [13] PJM. PJM Manual 12: Balancing Operations[M]. PJM, 2019.

附录 A 调频绩效的计算

1) 精度分数 S^{pre} : 调频需求与响应差值的函数:

$$S^{pre} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-1} \left| \frac{R_{t+1} - S_t}{V} \right|$$

一个调频周期由 n 个调频信号, S_t 为第 t 个调频信号, R_{t+1} 为资源在第 $t+1$ 时刻的出力, V 为一个调度周期调频信号的绝对值的平均值。精度(精确度)分数为 0 时意味着无响应或者响应品质极低。

2) 相关分数 S^{cor} : 用相关性函数计算调频信号与响应值之间的相关程度:

$$S^{cor} = \max_{\delta} \frac{\sum_{t=1}^n R_{t+\delta} S_t}{\sqrt{\sum_{t=1}^n R_{t+\delta}^2 \sum_{t=1}^n S_t^2}}$$

其中: δ 为延迟, 将 5 min 平均分成 10 s 等间隔时段, 取值为 0~30 的整数。

3) 延迟分数 S^{del} : 量化调频信号与响应之间的时间差:

$$S^{del} = \left| \frac{\delta - 30}{30} \right|$$

上述相关分数 S^{cor} 用来计算 5 min 区间内响应曲线与调频信号的相关性, 在最大相关性分数下确定延迟 δ 的值, 并由此计算延迟分数。 δ 的计算公式为:

$$\delta = \arg \max_{\delta} (S^{del} + S^{cor})$$

将 1 h 分为 12 个 5 min 时段, 每时段计算相关分数和延迟分数, 然后将 3 个分数加权平均, 形成绩效得分:

$$A = k_1 S^{pre} + k_2 S^{cor} + k_3 S^{del}$$

其中: $0 < k_1 < k_2 < k_3 < 1$, 且 $k_1 + k_2 + k_3 = 1$, 一般取 3 个权重相等, 均为 1/3。