

火电机组 AGC 调频综合性能指标参数研究

Research on the Comprehensive Performance Index Parameters of AGC Frequency Control in Thermal Power Units

李春峰¹ 满海滨¹ 陈芷君²

Chunfeng Li¹ Haibin Man¹ Chao Kong¹ Zhijun Chen² Leilei Zhu³

1. 上海电气电站服务公司 中国·上海 201199

2. 上海交通大学 中国·上海 200240

1. Shanghai Electric Power Generation Service Company, Shanghai, 201199, China

2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China

摘要: 近年来, 储能系统联合火电机组自动发电控制 (Automatic Generation Control) 调频技术发展迅速, 通过具体的辅助调频政策计算方式电厂企业能够灵活调整自身参与市场辅助的具体策略。论文基于《江苏电力辅助服务 (调频) 市场交易规则 (试行)》, 研究市场调频辅助服务的调频综合性能指标 (K 值) 计算方法, 确定电网对于机组与储能参与调频的调节策略过程, 设计有效的算法特征值, 评估调节策略的关键参数体系, 并基于机器学习评估机组调频综合性能指标算法, 设计与验证 K 值计算规则, 实现对电网 K 值设计和影响因素的精准定位。未来可结合实际有效里程及 AGC 投运情况, 更精准地调整计算模型。

Abstract: In recent years, the development of energy storage system combined with automatic generation control frequency regulation technology for thermal power units has been rapid. Through specific calculation methods of auxiliary frequency regulation policies, power plant enterprises can flexibly adjust their specific strategies for participating in market assistance. This paper is based on the *Trading Rules for Jiangsu Electric Power Auxiliary Services (Frequency Modulation) Market (Trial)*, and studies the calculation method of the frequency modulation comprehensive performance index (K value) for market frequency modulation auxiliary services. It determines the process of the power grid's regulation strategy for the participation of units and energy storage in frequency modulation, designs effective algorithm characteristic values, evaluates the key parameter system of the regulation strategy, and evaluates the unit frequency modulation comprehensive performance index algorithm based on machine learning, design and verify K value calculation rules to achieve precise positioning of grid K value design and influencing factors. In the future, the calculation model can be adjusted more accurately based on the actual effective mileage and AGC operation situation.

关键词: 调频; AGC 性能指标; AGC 指令

Keywords: frequency modulation; AGC performance indicators; AGC instruction

DOI: 10.12346/peti.v6i1.9094

1 引言

目前, 中国电力系统在区域电网中的调频任务主要由传统火电机组来完成。火电机组提供自动发电控制 (Automatic Generation Control, AGC) 调频功能, 通过 AGC 指令调节发电机组功率从而调整电网频率^[1]。

近年来各地也发布了基于本地区适用的关于参与电网辅

助服务的相关政策^[2], 以提高各电厂发电机组对于 AGC 辅助调频的参与度。由于火电机组惯性和延迟较大, 因而调节响应速度较慢储能。储能系统辅助火电 AGC 调频能够使机组调峰性能得到提高, 同时减小火电机组的调节负荷, 提高燃煤效率和发电负荷率, 减少频繁调节出力导致的设备疲劳与磨损。储能系统能帮助提高火电机组 AGC 补偿收入, 具

【作者简介】李春峰 (1983-), 男, 中国吉林人, 本科, 高级工程师, 从事“煤电+”领域 (储能调频、调峰、储热) 研究。

有良好的经济效益，在技术原则上也能够帮助纠正各类状态下发电量与需求量之间的偏差，能在更短时间内以更高精度跟随负荷指令。综合调频能力可以很好满足 AGC 的要求^[3]。经过多年的理论研究，同时期有储能联合 AGC 调频项目正逐步投入运行。

电网对于发电机组调频的调节性能具体要求正在不断提高^[4]。因此电厂企业需要基于具体的辅助调频政策计算方式，通过提升自身调频能力，积极参与电力辅助服务，从而争取服务补偿资金，实现煤电企业自身以及整个电力市场运行的“双赢”；通过调频服务的计算模型调整企业参与调频辅助市场的策略，提升自身调频竞争优势，同时辅助调频系统有利于电厂运行可靠性，增加设备使用寿命。在当今市场环境和政策条件下，研究储能联合 AGC 调频服务关键技术计算模型在技术和经济上均有一定价值。

2 AGC 性能指标评定规则

江苏电力调频辅助服务市场补偿费分为基本补偿和调用补偿两部分。当基本服务补偿标准固定时，对于某一确定投运的机组，基本补偿值只与 K 值有关；调用补偿值与 K 值及机组的调频里程有关^[5]。因此， K 值的计算方式极大地影响电厂储能及机组出力的策略优化方向，推算出 K 值的具体计算方法，更有利于电网工作的开展。

2.1 机组 AGC 指令调频性能指标计算

机组对于第 j 个 AGC 指令的响应过程如图 1 所示。

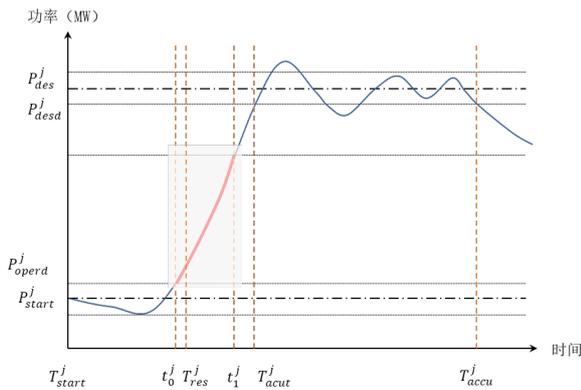


图 1 AGC 调节指令响应过程

在 T_{start}^j 时刻，机组接收到 AGC 调节指令，指令值为 P_{des}^j ，此时发电单元出力功率为 P_{start}^j 。经过响应出力过程后，在 t_0^j 时刻发电单元功率达到 P_{operd}^j ，首次大于发电单元动作死区值，且维持到有效响应动作时刻 T_{res}^j ，此时发电单元开始真实有效响应调节指令。 T_{acut}^j 时刻发电单元实际出力达到 P_{desd}^j ，第一次达到目标出力死区带，进入精度计算时间，直到 T_{accu}^j 时刻达到调节精度最大计算时长或下发新的调节指令^[6-9]。

对于单个指令，机组 i 的第 j 个 AGC 指令的调频性能指标计算方法为：

$$K_p^{i,j} = \max \left\{ \frac{V_{i,j}}{V_e} + \frac{3A_e - A_{i,j}}{A_e}, 0 \right\}$$

其中， $V_{i,j}$ 为实际调节速率（机组实际出力值 / 秒）， $A_{i,j}$ 为实际调节精度， V_e 为机组 AGC 的标准调节速率（取值为 1.5% 机组额定容量 / 分钟）， A_e 为机组 AGC 的标准调节精度（取值为 0.5% 机组额定容量）。

为方便表达，将机组调频过程分成调节速率计算时段和调节精度计算时段。参考《南方区域 AGC 发电单元调频指标计算规范（2019 版）》^[7]，建立实际调节速率和实际调节精度计算方法如下。

2.1.1 实际调节速率 $V_{i,j}$

调节速率计算时段由发电单元首次大于发电单元动作死区值 $P_{operd}^{i,j}$ 起始，机组出力达到本次调节 $B\%$ 时（ B 为调节速率计算门槛功率比例）终止。由此实际调节速率 $V_{i,j}$ 的计算方式为：

$$V_{i,j} = \frac{P_1^{i,j} - P_{operd}^{i,j}}{t_1^{i,j} - t_0^{i,j}}$$

其中， $t_0^{i,j}$ 为机组出力首次大于动作死区的时刻； $t_1^{i,j}$ 为机组出力达到目标出力 $B\%$ 的时刻，即调节速率计算终止时刻。对任意指令 j 而言， $P_{operd}^{i,j} - P_{start}^{i,j} = R_1\% \times$ 机组额定容量； R_1 为设定的动作死区比例值； $P_1^{i,j}$ 是计算终止时刻的机组出力值^[10]。

若在单个指令内，机组出力未跳出动作死区则认定其未响应 AGC 指令。若机组跳出动作死区，但未达到本次调节范围的 $B\%$ ，则认定未达成速率计算门槛，同时未进入调节精度时段，推定以 AGC 调节方向的最大调节量来计算实际调节速率。此时实际调节速率 $V_{i,j}$ 计算方式为：

$$V_{i,j} = \frac{\max \left\{ \left(P_t^{i,j} - P_{start}^{i,j} \right)^{+or-} \mid T_{start}^{i,j} \leq t \leq T_{end}^{i,j} \right\}}{T_{end}^{i,j} - T_{start}^{i,j}}$$

其中，分子部分为指令调节方向最大调节量，分母部分为 AGC 指令时长。 $P_t^{i,j}$ 为单个指令 j 时刻 t 的机组出力， $T_{start}^{i,j}$ 为单个指令 j 的开始时刻， $T_{end}^{i,j}$ 为单个指令 j 的结束时刻。

2.1.2 实际调节精度 $A_{i,j}$

当进入调节精度计算时段后，若机组出力进入目标死区，则认定进入目标死区时刻有效，随即认定开始累计调节精度。若调节精度计算时长达到最大门槛值或达到指令结束时刻，则终止调节精度累计。实际调节精度 $A_{i,j}$ 计算方式如下：

$$A_{i,j} = \frac{\int_{T_{acut}^{i,j}}^{T_{accu}^{i,j}} |P_t^{i,j} - P_{des}^{i,j}| dt}{T_{accu}^{i,j} - T_{acut}^{i,j}}$$

其中， $P_{des}^{i,j}$ 为 AGC 指令 j 目标出力值，对任意指令 j 而言， $P_{des}^{i,j} - P_{desd}^{i,j} = R_3\% \times$ 机组额定容量； $T_{acut}^{i,j}$ 为机组出力首次进入目标死区时刻； $T_{accu}^{i,j}$ 为机组出力进入目标死区时刻至达最大计算时长或达到指令结束时刻。

若在单个指令内，机组出力未跳出动作死区，即未响应

AGC 指令, 此时实际调节精度 A_{ij} 计算方式为:

$$A_{ij} = \left| P_{T_{end}^{ij}} - P_{des}^{ij} \right|$$

其中, $P_{T_{end}^{ij}}$ 为单个指令 j 结束时刻的机组出力功率, P_{des}^{ij} 为单个指令 j 的目标出力功率。

2.2 机组有效调频里程

结合上述实际调节速率与调节精度计算方法, 机组单次 AGC 指令有效调频里程计算方式如下:

①若响应动作时刻和进入目标死区时刻均有效, 则机组有效调频里程 D^{ij} 等于单个 AGC 指令目标出力 P_{des}^{ij} 与机组初始出力之差 P_{start}^{ij} 的绝对值。

$$D^{ij} = \left| P_{des}^{ij} - P_{start}^{ij} \right|$$

②若仅响应动作时刻有效, 则机组有效调频里程等于 AGC 指令目标出力相同方向上机组出力 P_t^{ij} 与起始出力 P_{start}^{ij} 之差的最大值。

$$D^{ij} = \max \left\{ \left(P_t^{ij} - P_{start}^{ij} \right)^{+or-} \mid T_{start}^{ij} \leq t \leq T_{end}^{ij} \right\}$$

③若响应动作时刻无效, 则认定机组未响应 AGC 指令, 有效调频里程为 0。

机组总有效调频里程计算方式为:

$$D^i = \sum_j D^{ij}$$

由此, 对于多个指令, 机组 i 的综合调频性能指标计算方法为:

$$K_p^i = \frac{\sum_{j=1}^n K_p^{ij} \times D^{ij}}{\sum_{j=1}^n D^{ij}}$$

其中, D^{ij} 为机组 i 第 j 次指令调节里程的绝对值。

3 AGC 指令响应合并规则

在实际运行中, 存在单一 AGC 指令高密度、多频次下发的情况, 此时机组接收到新指令时仍存在已响应上一 AGC 指令但未完成的情况。为方便、准确计算此类单一指令的调频指标, 采用多个单一指令合并为一个指令的方式进行计算。江苏省对于发电单元参与 AGC 辅助调频关键性能指标的计算方法在政策文件中未明确规定对于 AGC 指令的合并规则细则, 论文参考全国其他省份发电单元参与 AGC 辅助服务的考核和补偿方式, 推定合并规则为:

当同时满足以下三个条件时 AGC 指令合并:

- ①指令调节方向相同。
- ②机组出力未跳出动作死区。
- ③下发指令时刻与下发上一个指令时刻时间间隔小于 U_1 秒。

参数 U_1 表示指令合并的延时阈值。

论文对推定的合并规则进行了三种类型的模型构建, 并

设计实验对其分别进行了参数优化及数值验证。

所构建的模型被汇总在表 1 中。

表 1 指令合并模型分类

NO	名称	内容
1	简化模型	不作指令合并; 初始时刻起开始调节速率计算, 至进入目标死区时刻; 未进入目标死区时刻, 则按同向最大调节量计算调节速率; 进入目标死区时刻起开始调节精度计算, 至最大计算时长
2	基础模型	不作指令合并; 响应动作时刻起开始调节速率计算, 至进入目标死区时刻; 未进入目标死区时刻, 则按同向最大调节量计算调节速率; 进入目标死区时刻起开始调节精度计算, 至最大计算时长
3	复杂模型	指令合并; 响应动作时刻起开始调节速率计算, 至完成 B% 里程时刻; 未达到 B% 里程, 则按同向最大调节量计算调节速率; 进入目标死区时刻起开始调节精度计算, 至最大计算时长

4 计算模型参数优化

调频性能指标计算方法受到包括调剂速率计算门槛功率比例、调节幅度阈值、目标死区等多个指标的影响, 且江苏省政策文件中并不包含各参数的计算标准, 需要参考其他各区政策对各参数进行优化。

由于调频性能指标计算值没有数学显示表达式, 仅能通过仿真的方式获得计算值, 因此本报告以最小化均方误差 (Mean-Squared Error, MSE) 为目标函数, 采用网格搜索方法进行优化。假定 K 值计算模型含有 m 个参数, 为方便表述记参数向量为 θ , 其表达式为:

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)^T$$

MSE 的表达式如下:

$$MSE(\theta) = \frac{1}{N \times I} \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N [K_p^{n,i}(\theta) - \hat{K}_p^{n,i}]^2$$

其中, N 为样本总量, I 为机组数量, $\hat{K}_p^{n,i}$ 为机组 i 的样本调频性能指标值, $K_p^{n,i}(\theta)$ 为模型在参数取值为 θ 情况下机组 i 的调频性能指标计算值, 其表达式为:

$$K_p^{n,i}(\theta) = \sum_{j=1}^J K_p^{n,i,j}(\theta)$$

整体参数优化过程可以表述为: 第一步是根据工业界经

验值初始化参数向量 θ 。第二步是确定其中各参数元素的取值范围，并将其离散化。在此基础上，通过网格搜索方法遍历所有参数水平，确定使得 MSE 最小化的模型参数水平取值。重复以上确定参数元素取值、离散化和网格搜索寻优的过程，直到误差值 MSE 满足要求，得到最好的参数水平取值 θ^* 。

参数优化的框架被总结在表 2 伪代码中。

表 2 伪代码

算法 3-1 K 值模型参数网格搜索算法		
输入: 历史数据 $(\hat{R}_p^{1,i}, \hat{R}_p^{2,i}, \dots, \hat{R}_p^{N,i})$, $\forall i \in I$; 误差值 MSE 要求值 ϵ		
1:	$error := MSE(\theta);$	
2:	While $error > \epsilon$:	
3:	离散化参数列表 Θ ;	
4:	For θ in Θ :	
5:	$\theta' := \theta;$	
6:	$error' := MSE(\theta');$	
7:	If $error' < error$:	
8:	$error := error'$;	
9:	$\theta^* := \theta';$	
10:	End if	
11:	End for	
12:	End while	
输出: 最优 K 值模型参数 θ^*		

5 计算模型设计及数值实验分析

论文所进行的数值验证使用 Python 3.8 实现，图线使用 Matplotlib3.5.1 绘制，集成开发环境为 PyCharm 2021.1.3。所有数值验证实验均在一台 CPU 为双路 Intel @Xeon E5-2667 v4 3.2GHz，内存为 128G，操作系统为 Ubuntu 20.04 的工作站上运行。

本次实验先结合电厂实测数据对 AGC 推定合并规则及计算参数进行验证分析，然后在江苏省沙洲电厂机组在 2023 年 9 月 21 日至 2023 年 10 月 6 日之间的每日 K_p 值及机组运行历史数据集上分别进行数值验证，通过第 3 节中表述的参数优化方法进行优化，得到数据验证结果并进行分析。

为了测试模型的泛化能力，论文按 2 : 1 的比例将机组的数据集分别分割为训练集和测试集。对表 3 所描述的简化模型、基础模型和复杂模型采用表 3 所示的参数取值在训练

集上进行优化，并统计 K 值训练偏差情况；然后使用得到的最好模型在测试集上进行测试，并统计 K 值预测偏差情况。

表 3 模型参数取值

符号	参数	简化模型	基础模型	复杂模型
U_1	指令合并最大时间间隔	—	—	[4,6,8,10], 默认取值 4
R_1	动作死区比例	—	0.005	0.005
R_2	调节速率计算最小里程比例	[0.001,0.005], 默认取值 0.005	[0.001,0.005], 默认取值 0.005	[0.001,0.005], 默认取值 0.005
R_3	目标死区比例	0.05	0.05	[0.5,0.9], 默认取值 0.7
L_1	调节精度计算最大时长	[20, 30, 40], 默认取值 30	[20, 30, 40], 默认取值 30	[20, 30, 40], 默认取值 30
B	调节速率计算完成比例	—	—	[0.5,0.9], 默认取值 0.5

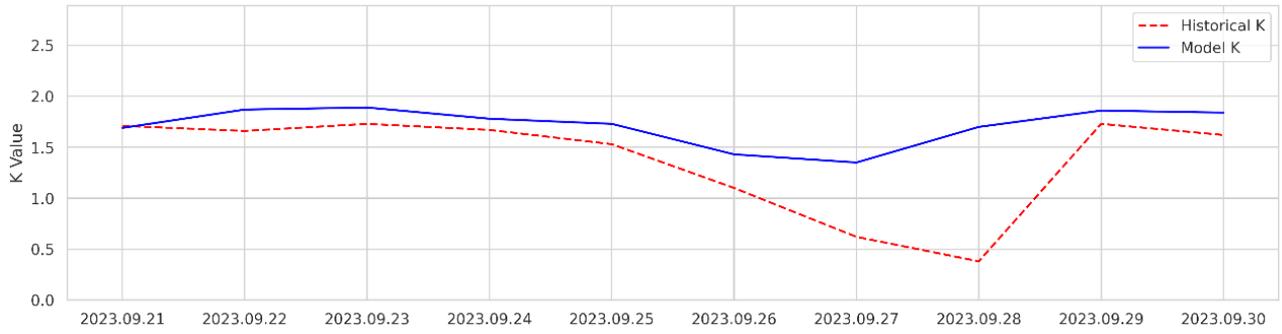
简化模型、基础模型和复杂模型在机组数据集上的训练结果被绘制在如图 2 和图 3 所示的图线中。

简化模型、基础模型和复杂模型在机组测试集上预测 K 值与真实 K 值的平均偏差分别为 24.39%、211.76% 和 18.70%。从以上数值验证结果来看，简化模型在机组数据集上的预测 K 值和真实 K 值偏差相对较小，由于模型的复杂度较低；基础模型在机组数据集上的模型预测 K 值和真实 K 值偏差相对较大，K 值预测能力表现为不足；复杂模型在机组数据集上的模型预测 K 值和真实 K 值偏差最小。

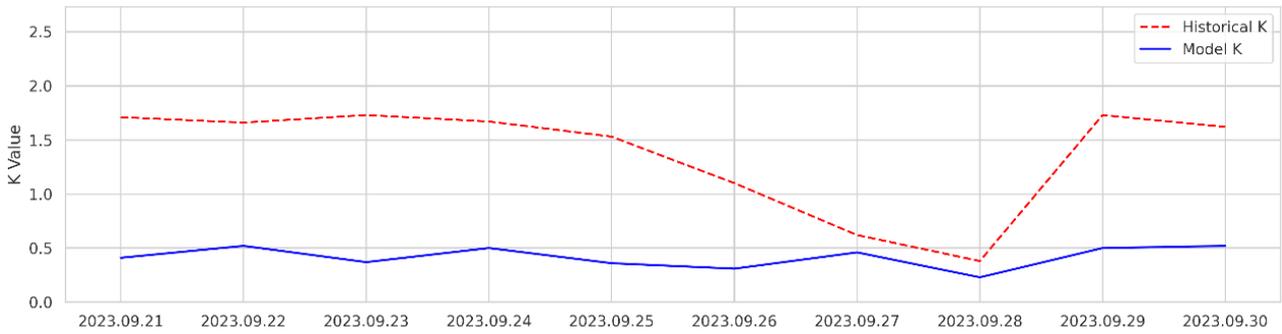
因此，综合复杂模型在训练集和测试集上的表现，复杂模型对于机组数据具有更好的表现。但是，复杂模型对于 K 值和里程预测的偏差仍较大，须进一步优化。

6 结语

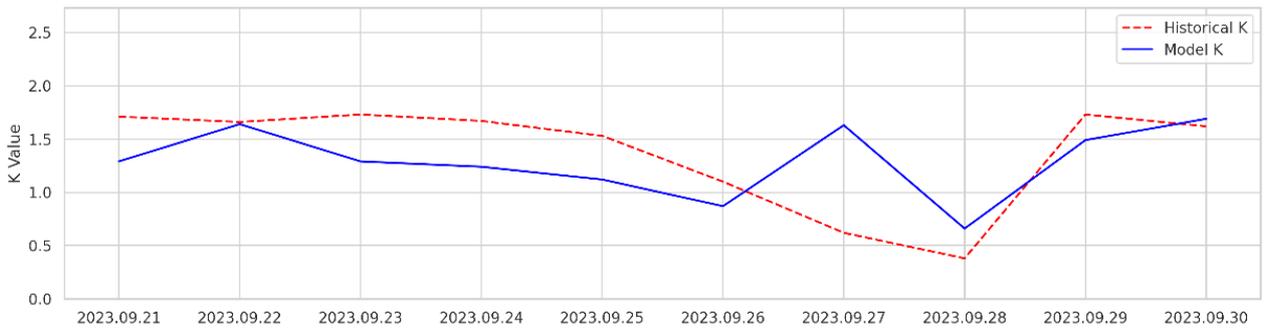
论文根据《江苏电力辅助服务（调频）市场交易规则（试行）》等相关条例，确定电网对于机组与储能参与调频的调节策略过程，分析 AGC 调频调节速率、响应时间、调节精度、综合性能指标的计算方法；对火电储能联合能源管理数据挖掘分析，掌握数据特性，设计有效的算法特征值，评估关键



(a) 简化模型训练集结果

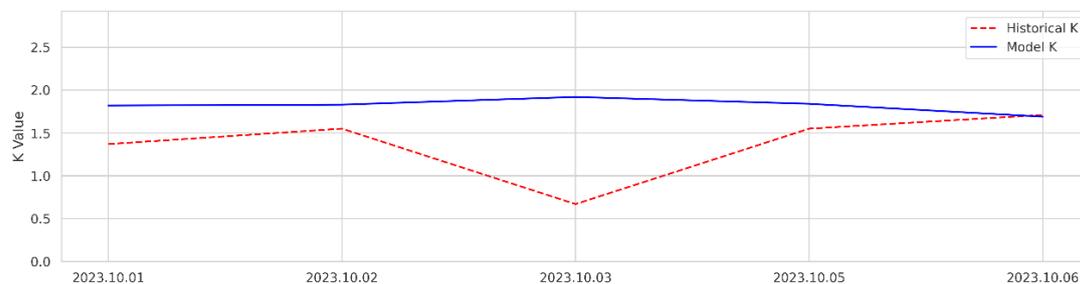


(b) 基础模型训练集结果

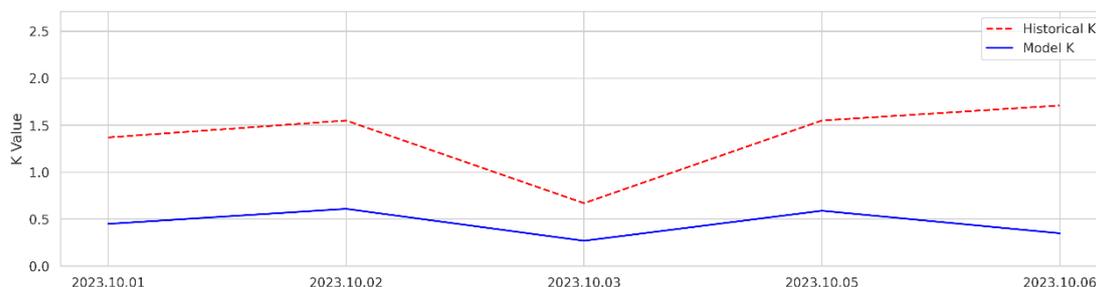


(c) 复杂模型训练集结果

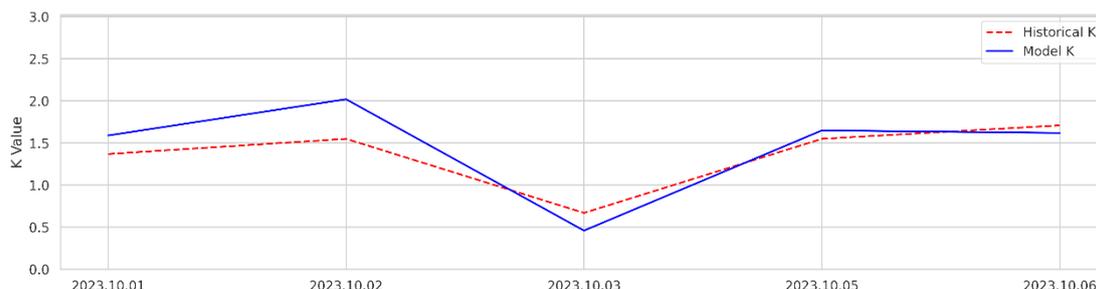
图 2 机组历史数据 K 值与模型 K 值对照情况 (训练集)



(a) 简化模型测试集结果



(b) 基础模型测试集结果



(c) 复杂模型测试集结果

图3 机组历史数据 K 值与模型 K 值对照情况 (测试集)

体系,实现对现有数据的分析,掌握数据之间的关联性,把核心关联的数据作为算法设计的核心特征数据,并基于机器学习对 K 值评估算法进行设计与验证,实现对 K 值设计和影响因素的精准定位。

当前模型对于现有机组数据集,当前模型偏差表现为计算值相比实际值偏小,需进一步增加模型的复杂度。具体来讲,可以从两个方向进行优化:一是增加更合理的 AGC 指令合并规则;二是对于 K 值计算调节精度部分做更细致的建模。未来可结合 AGC 实际投运情况,更精准地调整模型。同时,当前模型中没有考虑历史数据采样误差等系统误差,随着数据量的增加,应当考虑采用机器学习方法对这部分误差进行建模和预测。

参考文献

- [1] 黄棉,黄荣泽.储能参与百色区域电网AGC调频仿真分析[J].青海电力,2023,42(2):15-24.
- [2] 李波,孟凡凡.储能辅助电厂AGC调频前景分析[J].通信电源技术,2020,37(5):261-262.
- [3] 严晓辉,陈海生,张雪辉,等.国际储能产业政策及我国储能产业发展分析[J].中国能源,2011,33(11):28.
- [4] 丁丽媛,吴东,王洪伟,等.火电厂330MW机组一次调频控制策略

优化[J].机电工程技术,2023,52(7):194-197.

- [5] 王鹤,丁晨.基于AGC调频分区控制的光储联合系统参与市场投标策略[J].电力系统保护与控制,2021,51(2):121-131.
- [6] 国家能源局南方监管局文件.关于印发《广东调频辅助服务市场交易规则(试行)》的通知:南方监能市场〔2018〕272号[Z].2018-08-02.
- [7] 南方能源监管局.南方区域电化学储能电站并网运行管理及辅助服务管理实施细则(试行)[Z].广州:南方能源监管局,2018.
- [8] 肖春梅.电储能提升火电机组调频性能研究[J].热力发电,2021,50(6):98-105.
- [9] 国家能源局江苏监管办公室.江苏电力辅助服务(调频)市场交易规则(试行)[Z].2020
- [10] 高高,李军,等.提升火电机组一次调频性能的火电—储能一体化系统研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(21):116-125.