

基于多时间尺度的风电场无功补偿装置协调控制研究

王斌, 王栓虎, 张文慧

(北京京能清洁能源电力股份有限公司内蒙古分公司, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘要: 以提升电网供电质量为目的, 设计基于多时间尺度的风电场无功补偿装置协调控制方法。风电场功率预测模块利用神经网络预测风电功率, 并将预测结果传输至电网调度模块与无功补偿装置协调控制模块; 电网调度模块依据风电功率预测结果, 设置未来风电场的无功电压控制计划并传输至无功补偿装置协调控制模块; 无功补偿装置协调控制模块, 依据风电功率预测结果以及无功电压控制计划, 从日内与日前两个时间尺度构建无功电压优化控制模型, 从日前时间尺度(20 min), 利用电容/电抗器组等大幅控制风电场无功电压, 从日内时间尺度(15 ms), 利用静止无功补偿器(static var compensator, SVC)补偿无功电压小幅波动。实验结果显示, 该方法控制下, 风电场无功储量提升, 母线电压的稳定性与输出质量显著提升。

关键词: 多时间尺度; 风电场; 无功补偿装置; 协调控制; 无功电压; 电容/电抗器组

中图分类号: TP183 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)05-0052-05

Research on Coordinated Control of Reactive Power Compensator in Wind Farm Based on Multi Time Scales

WANG Bin, WANG Shuan-hu, ZHANG Wen-hui

(Inner Mongolia Branch of Beijing Jingneng Clean Energy Power Co., Ltd., Hohhot 010070 China)

Abstract: In order to improve the quality of power supply, the coordinated control method of reactive power compensation devices in wind farms based on multiple time scales is studied. The wind farm power prediction module uses neural network to predict the wind power, and transmits the prediction results to the grid dispatching module and the reactive power compensation device coordination control module. The power grid dispatching module sets the reactive power and voltage control plan of the future wind farm according to the wind power prediction results and transmits it to the reactive power compensation device coordination control module. The reactive power compensation device coordination control module, based on the wind power prediction results and the reactive voltage control plan, constructs the reactive power and voltage optimization control model from the intra day and pre day time scales. From the pre day time scale (20 min), it uses capacitors/reactor banks to significantly control the reactive voltage of the wind farm, and from the intra day time scale (15 ms), it uses static var compensator (SVC) to compensate the small fluctuations of reactive voltage. The experimental results show that under the control of this method, the reactive power reserve of the wind farm is increased, and the stability and output quality of the bus voltage are significantly improved.

Keywords: multiple time scales; wind farms; reactive compensation device; coordinated control; reactive voltage; capacitor/reactor bank

0 引言

在清洁能源高度发展的大环境下, 全球风电事业也随之发展, 高比例风电接入成为电力市场发展的全新趋势^[1], 同时风电的大范围接入对于电网的设计与应用也提出更高标准。在这一场景下, 风电场出力的不确定性特征也更为突出, 令风电场传输至电网内电压波动更为明显, 也更为频繁, 由此为电网无功电压控制带来更大困难。无功补偿装置是一种使用最为广泛的电压控制设备^[2], 因此研究一种有效的方法进行风电场无功补偿装置协调控制是提升电网内风电接入比例, 推动风电功率消纳的客

观需求。

朱宏超与沈轶君等人在研究风电场无功补偿装置协调控制方法过程中, 通过协调控制过程将两种不同类型的无功补偿装置响应频带区分开来, 最大限度利用静态无功补偿装置实现电压的稳定输出^[3]。该方法在实际应用过程中, 为设定装置补偿范围, 通过补偿装置抑制电压控制偏差的效果较差。王海军等人在研究风电场电压协调控制问题过程中, 依据并网点电压预测结果对其进行自适应调整, 确定风电场无功补偿过程中的无功容量并分配无功出力, 以此为基础优化电压控制误差, 由此实现电压的稳定控制^[4]。但该方法在实际应用过程中补偿装置响应过程存在时滞问题, 且离散电容/电抗器组无法消除高频电压波动。针对上述问题, 研究基于多时间尺度

*基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2019KG017)

收稿日期: 2024-01-18

的风电场无功补偿装置协调控制方法。

1 风电场无功补偿装置协调控制方法

1.1 风电场无功补偿装置协调控制架构

图1为基于多时间尺度的风电场无功补偿装置协调控制方法整体架构。风电场功率预测模块利用神经网络获取风电功率预测结果,并将该结果传输至电网调度模块与无功补偿装置协调控制模块;电网调度模块依据风电功率预测结果,制定未来相应时间段内的无功电压控制计划;无功补偿装置协调控制模块,依据风电功率预测结果与无功电压控制计划,制定多时间尺度的无功补偿装置控制策略。

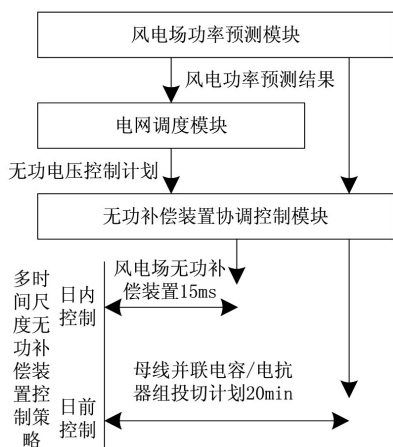


图1 基于多时间尺度的风电场无功补偿装置协调控制方法整体架构

1.2 风电功率预测

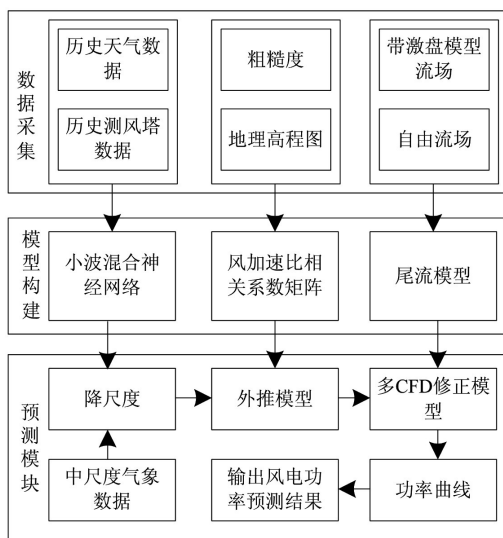


图2 风电功率预测流程

风电场功率预测模块通过风电数据采集、神经网络模型构建与风电功率预测三个环节获取风电功率预测结果,具体预测流程如图2所示。首先采集风电场功率预测相关数据,然后分别对各种数据进行处理,并建立相应的

预测模型,最后对模型进行结合,建立输出风电场风电功率预测模型。

1.3 风电场无功补偿装置设计

基于多时间尺度的风电场无功补偿装置协调控制方法所使用的无功补偿装置为静止无功补偿器(SVC),如图3所示。SVC调节手段为产生感性与容性无功功率,调节特性为连续控制^[5],通过并联形式将滤波器和动态控制的电抗器有机结合,由此不仅能够补偿风电场无功功率,优化功率因数,同时还能够抑制风电场内所产生的高次谐波。在风电场无功补偿过程中,SVC依照控制方式的差异化选用并联电抗器与并联电容器所组成的设备。一般情况下,SVC通常选用闭环控制策略输出容性或感性无功功率上限值 Q_{cmax} 或 Q_{Lmax} ,在发现风电场内存在电压偏差的条件下,传输 U_{svc} 至信号发生器,由此实现投切的电容器组数量与可控电抗器的触发角的控制。仅需确定负荷母线的理论电压,无功补偿装置协调控制模块即可依照母线电压实现SVC无功功率值的控制^[6],由此令所控电压值与理论值一致,实现闭环控制的目的。

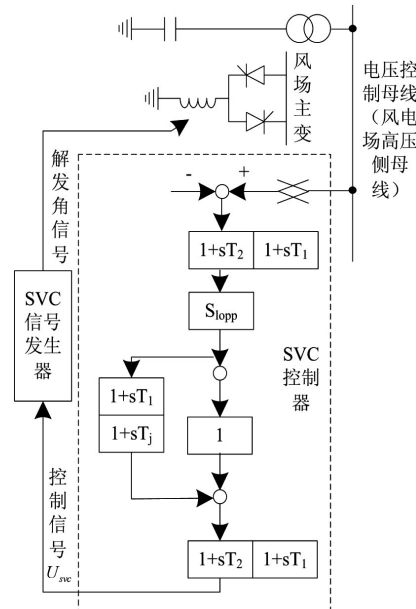


图3 风电场无功补偿装置

1.4 多时间尺度的无功补偿装置控制策略

无功补偿装置控制过程中,从日内控制与日前控制两个时间尺度进行控制。由于SVC在实际运行过程中表现出连续性、补偿容量小以及运行效率快等特征^[7],在日内时间尺度控制过程中,以15 ms为时间尺度,快速、大量的微弱电压波动,实现精细的电压调节功能。日前时间尺度控制过程中,设定时间尺度为20 min,通过电容/电抗器组的投切计划消除风电场内显著电压波动。

1.4.1 日前时间尺度无功电压优化控制

(1) 目标函数

令节点电压控制偏差平方和 $\Delta V_{\Sigma, r, q}$ 达到下限,公式如下:

$$\min \Delta V_{\Sigma, r, q} = \sum_{t=1}^{96} \sum_{i=1}^M (V_{i,t} - V_{i,t}^r)^2 \quad (1)$$

式中, M 表示电网中枢节点数量; $V_{i,t}$ 和 $V_{i,t}^r$ 分别表示 t 时刻节点 i 的电压实际值和参考值。

(2) 约束条件

日前时间尺度风电场无功电压优化控制模型的约束条件包括潮流和电容/电抗器组的约束。 S_{ij} 和 X_{ij} 为电网导纳节点实和虚部,第一约束条件为:

$$\begin{cases} P_{i,t} = V_{i,t} \sum_{j \in i} V_{j,t} (S_{ij} \cos \delta_{ij,t} + X_{ij} \sin \delta_{ij,t}) \\ Q_{i,t} = V_{i,t} \sum_{j \in i} V_{j,t} (S_{ij} \sin \delta_{ij,t} + X_{ij} \cos \delta_{ij,t}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_{i,t}$ 和 $V_{j,t}$ 为有功功率和电压值; $\delta_{ij,t}$ 和 $Q_{i,t}$ 为电压相角差和无功功率。 $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 的计算公式分别描述为:

$$P_{i,t} = P_{wi,t} \quad (3)$$

式中, $P_{wi,t}$ 表示风电有功功率。

$$Q_{i,t} = g_{i,t} Q_{ic} \quad (4)$$

式中, $g_{i,t}$ 和 Q_{ic} 分别电容/电抗器的组数和额定无功容量。

第二约束可分为两方面描述,分别是投入组数的约束与单日常调节次数的约束,公式描述分别如下:

$$g_{i,\min} \leq g_{i,t} \leq g_{i,\max} \quad (5)$$

式中, $g_{i,\min}$ 和 $g_{i,\max}$ 为电容/电抗器组的可投入组的最小和最大值。

$$\sum_{t=1}^{95} |g_{i,t+1} - g_{i,t}| \leq G_{ic,\max} \quad (6)$$

式中, $G_{ic,\max}$ 为电容/电抗器组的单日常调节数量。

1.4.2 日内时间尺度无功电压优化控制

当前,电容/电抗器组日前投切计划的可用性,受实际风电场无功补偿装置协调控制过程中风电功率预测的准确性的直接影响,通过提升风电功率预测的准确性能够降低SVC日内调节的压力。但以往所普遍使用的控制方法中,不仅忽略了后期电压受前期无功计划的影响,同时也无法做到实时优化外界原因所导致的电压控制偏差,无法针对性地控制风电场日内电压高速、频繁波动问题。

(1) 目标函数

以 k 时刻电压状态信息的未来 N 个时刻的电压预测控制偏差下限,公式描述如下:

$$\begin{aligned} \min J &= \sum_{i=1}^N \|V(k+i|k) - V_0(k+i|k)\| \\ &= (V - V_0)^T (V - V_0) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $V=[V(k+1|k), V(k+2|k), \dots, V(k+N|k)]^T$ 和 $V_0=[V_0(k+1|k), V_0(k+2|k), \dots, V_0(k+N|k)]^T$ 分别表示以 k 时

刻风电场电压状态信息为基础的预测的未来 N 个时刻的风电场低压值,和未来 N 个时刻的风电场电压参考值。

(2) 约束条件

日内时间尺度无功电压优化控制过程中的约束条件可概括为两方面,分别是风电场节点电压幅值约束与SVC的无功出力范围约束。风电场节点电压幅值约束公式描述如下:

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \quad (8)$$

式中, V_{\min} 和 V_{\max} 为电压幅值的最小值和最大值。

SVC的调节范围约束公式描述如下:

$$Q^{\min} \leq Q(k|k) + \sum_{i=0}^{N-1} \Delta Q(k+i|k) \leq Q^{\max} \quad (9)$$

式中, Q^{\min} 和 $Q(k|k)$ 为SVC的无功出力最小值和初始状态量; $\Delta Q(k+1|k)$ 和 Q^{\max} 为SVC无功调整值和最大值。

在实际求解式(7)过程中可选用对偶单纯形法,由此获取未来 N 个时刻SVC无功计划校正量共同组成的校正控制指令集合 $\{\Delta Q(k|k), \Delta Q(k+i|k), \dots, \Delta Q(k+N-1|k)\}$,同时在 k 时刻下只传输执行第一个控制指令 $\Delta Q(k|k)$ 。在第二个优化控制周期来临后,循环上述过程即可实现风电场日内时间尺度无功电压优化控制。

2 实验结果与分析

为验证本文所研究的基于多时间尺度的风电场无功补偿装置协调控制方法的实际应用性能,选取我国某省内的实际风电场集群为研究对象,采用本文方法对其无功补偿装置进行协调控制测试,测试结果如下。

2.1 研究对象概况

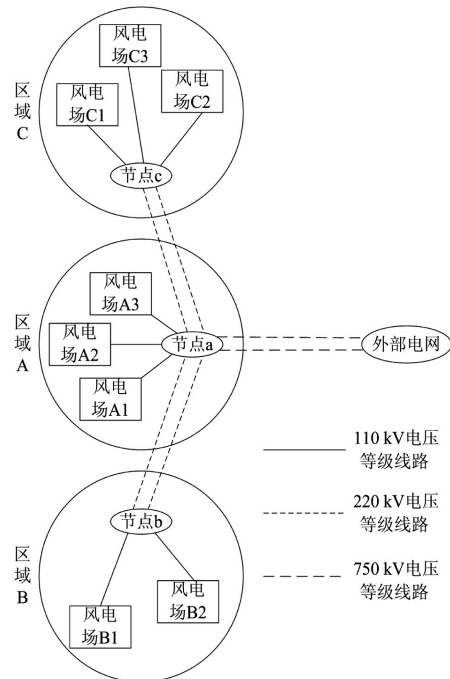


图4 研究对象结构示意图

研究对象的整体装机容量达到1 230 MW,其中包含三座变电站与8座呈直线状的风电场,如图4所示。将变电站作为汇集站,风电场所产生的电能汇聚至三座变电站后,再由变电站连接传输至大电网内。表1所示为不同区域内风电机组的装机容量与无功补偿设备情况。

表1 风电机组装机容量与无功补偿装置参数

参数	区域		
	A	B	C
风电机组装机容量/MW	620	400	210
离散无功补偿装置组数/组	10	5	5
离散无功补偿装置总容量/Mvar	-50±200	-30±90	-20±60

2.2 日前/日内优化目标值

将研究对象2022年8月份某日的日负荷特性曲线划分为四个时段,分别是低谷时段、上升时段、高峰时段和下降时段。表2所示为本文方法控制下,研究对象不同时段的日前与日内优化结果的对比情况。分析表2能够得到,采用本文方法进行控制后,不管是日前优化控制还是日内优化控制,不同时段内的网损与采用本文方法前相比均产生不同程度的下降。同时,研究对象的无功储量显著提升,这也令研究对象的经济性稳定性显著增强。

表2 日前与日内优化结果的对比情况

优化目标	控制尺度	时段			
		低谷时段	上升时段	高峰时段	下降时段
网损	日前时间尺度	0.865 0	0.777 0	0.725 3	0.487 0
	日内时间尺度	0.865 3	0.708 6	0.724 6	0.499 2
电压稳定值	日前时间尺度	-	0.093 8	0.153 7	-
	日内时间尺度	-	0.094 2	0.153 9	-
无功备用量	日前时间尺度	-	-	-	0.649 6
	日内时间尺度	-	-	-	0.550 9
整体目标	日前时间尺度	0.863 2	0.871 3	0.868 7	-0.150 8
	日内时间尺度	0.865 4	0.796 2	0.868 0	-0.050 0

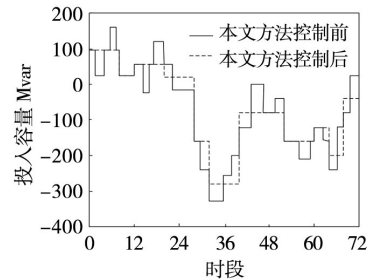
2.3 本文方法控制后的协调计划

采用本文方法对研究对象内的无功补偿装置进行协调控制前后,研究对象内部日前时间尺度无功电压优化控制过程中电容电抗器组协调计划,与日内时间尺度无功电压优化控制过程中SVC协调计划分别如图5所示。分析图5能够得到,采用本文方法进行控制前,研究对象内离散电容/电抗器组投切次数较高,同时SVC的无功出力波动较为显著。而采用本文方法进行控制后,研究对象内离散电容/电抗器组的投切次数与采用本文方法前相比显著下降,同时SVC的感性与容性无功出力上限与采用本文方法前相比均显著下降,同时无功出力波动相对平缓,由此验证了本文方法的应用性能。

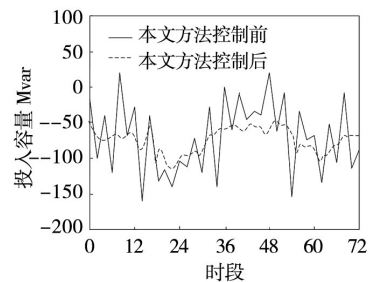
2.4 本文方法控制后的外部电网母线电压

图6为采用本文方法控制前后的研究对象外部电网母线电压波动情况。分析图6能够得到,相较于参考电

压,本文方法控制前的研究对象外部电网母线电压与其差异显著、波动幅大。而采用本文方法控制后的研究对象外部电网母线电压大致维持在参考电压周边,且波动幅度较为微弱。以上结论充分说明采用本文方法控制后,研究对象外部电网母线电压的控制偏差与波动幅度均能够被有效抑制,提升外部电网母线电压的稳定性与输出质量。



(a) 电容、电抗器组



(b) SVC

图5 风电集群内的投入容量

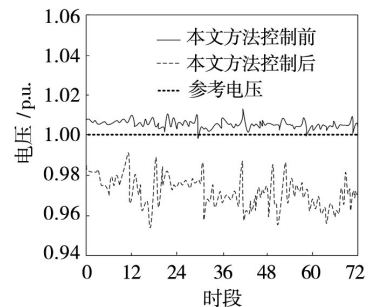


图6 研究对象外部电网母线电压波动情况

3 结束语

本文研究基于多时间尺度的风电场无功补偿装置协调控制方法,通过本文方法的应用令研究对象的网损有所下降,同时无功出力波动相对平缓,外部电网母线电压的稳定性与输出质量均显著提升。由于本文方法研究过程中是假定无功补偿能力充足,因此在后续研究过程中,将主要针对受外部环境因素影响,导致电网无功补偿不充足的协调控制进行研究。

参考文献:

[1] 林安妮,黄永章,林伟芳,等.不同动态无功补偿装置对直流

系统故障引发送端暂态过电压的抑制效果对比[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 116-122.

[2] 王鹏, 李方媛, 胡阳, 等. 储能型双馈风电场联合STATCOM的无功协调控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(2): 64-70, 75.

[3] 朱宏超, 沈轶君, 熊鸿韬, 等. 调相机与静态无功补偿装置的容量配置和协调控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 47-55.

[4] 王海军, 王磊. 基于分层MPC的风电场电压协调控制策略研究[J]. 电气传动, 2022, 52(1): 60-67, 80.

[5] 王建平, 吕晨旭, 周哲民, 等. 多时间尺度的无功优化控制方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(3): 1-7.

[6] 崔浩, 王伟, 郑涛, 等. 电网对称跌落故障时双馈风力发电机

的改进控制策略研究[J]. 能源与环保, 2022, 44(9): 246-251.

[7] 鲍金雨, 徐龙, 马炯, 等. 基于模型预测控制的风电场无功电压协调控制策略[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2021, 24(1): 49-56.

作者简介: 王斌(1972-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 模式识别, 主变保护自动测试。

(上接第32页)

任务调度问题开展研究, 针对多个任务之间存在执行先后的依赖关系, 将待调度任务之间的依赖关系用有向无环图表示, 根据任务的前驱任务完成情况决定当前任务能否被调度, 每个任务调度完成后, 及时更新其后继节点的已完成前驱任务集合, 确保任务第一时间达到能够被调度的条件。为提高任务调度效率, 首先根据边缘计算网络节点的算力资源空闲情况对边缘计算网络节点排序, 然后对异构边缘算力网络中多个任务之间的依赖关系对任务进行排序, 以最小化任务执行总时间开销为目标, 基于任务的资源需求与边缘计算设备的算力匹配情况对任务进行调度, 有效减少了任务计算响应时间并提升了计算设备的计算及存储资源利用率。基于仿真环境对论文所提出的具有依赖关系的多任务调度方法进行了实验验证, 实验结果表明, 与随机调度方法相比, 本文所提出的多任务调度方法在不同场景下在任务调度延迟方面优势明显。利用所提出的存在依赖关系的边缘计算多任务调度策略来指导生产应用, 可以在电力行业实际应用中根据多任务之间的依赖关系, 以最小化任务执行总时间开销为目标, 排序边缘计算网络节点, 确定任务的执行顺序, 从而提高任务调度的执行效率。下一步考虑对异构边缘计算场景多任务调度公平性方面开展研究。

参考文献:

[1] 周银萍, 王跟成. 移动互联网敏感信息安全结构检索仿真研究[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 451-455.

[2] 邝祝芳, 陈清林, 李林峰, 等. 基于深度强化学习的多用户边缘计算任务卸载调度与资源分配算法[J]. 计算机学报, 2022, 45(4): 812-824.

[3] Zhang M, Cao J, Yang L, et al. ENTS: An Edge-native Task Scheduling System for Collaborative Edge Computing[C]. 2022 IEEE/ACM 7th Symposium on Edge Computing(SEC). IEEE, 2022: 149-161.

[4] Ma T, Wang M, Zhao W. Task scheduling considering multiple constraints in mobile edge computing[C]. 2021 International Conference on Intelligent Computing, Automation and

Systems (ICICAS). IEEE, 2021: 43-47.

[5] Wang T, Mou X, Hu J, et al. Two-stage Scheduling of Stream Computing for Industrial Cloud-edge Collaboration[C]. 2022 IEEE International Conference on Joint Cloud Computing(JCC). IEEE, 2022: 57-64.

[6] Wang H, Li C, Wang T, et al. A Job Scheduling Algorithm for Edge Computing Based on Modified Monte Carlo Tree Search[C]. 2021 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing(ICSP). IEEE, 2021: 5-9.

[7] Mokhtari A, Hossen M A, Jamshidi P, et al. FELARE: Fair Scheduling of Machine Learning Tasks on Heterogeneous Edge Systems[C]. 2022 IEEE 15th International Conference on Cloud Computing(CLOUD). IEEE, 2022: 459-468.

[8] Lan D, Taherkordi A, Eliassen F, et al. Task partitioning and orchestration on heterogeneous edge platforms: The case of vision applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(10): 7418-7432.

[9] Han J, Wang H, Wu S, et al. Task scheduling of high dynamic edge cluster in satellite edge computing[C]. 2020 IEEE World Congress on Services(SERVICES). IEEE, 2020: 287-293.

[10] Tang Q, Xie R, Yu F R, et al. Distributed task scheduling in serverless edge computing networks for the internet of things: A learning approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(20): 19634-19648.

[11] 郑竣杰, 岑伯维, 蔡泽祥, 等. 基于EdgeCloudSim的配电网边缘计算终端建模与性能分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 51-58.

[12] 郑守建, 彭晓晖, 王一帆, 等. 一种基于综合匹配度的边缘计算系统任务调度方法[J]. 计算机学报, 2022, 45(3): 485-499.

作者简介: 王晓辉(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 电力人工智能应用、电力系统及自动化。

通信作者: 季知祥(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 电力人工智能应用、电网调度自动化。