

基于负载再分配的边缘计算任务均衡调度策略

谢欢, 杜书, 陈少磊, 马玫, 张秋铭, 邓冰妍
(国网四川省电力公司信息通信公司, 四川成都 610041)

摘要:目前5G异构网络的计算卸载机制在边缘节点资源方面和电力业务调度算法时延与负载均衡方面存在问题。综合考虑边缘服务器负载均衡和业务计算时延,针对min-min算法与max-min算法的不足,文中提出了基于电力业务优先级二次再分配的均衡调度算法。该算法根据业务的最大容忍时延划分业务的优先级,并且根据最小完成时间标准差确定长短业务比例,实现业务的预分配。基于各个边缘服务器的负载情况,该算法再将高负载边缘服务器上的业务分配给负载低的服务器,实现二次再分配。仿真结果表明,与典型的算法相比较,所提算法缓解了现有技术中存在的以上问题,降低了计算时延,实现负载均衡,提高了系统资源利用率。

关键词:边缘计算; 负载均衡; 二次再分配; 5G; 电力物联网

中图分类号: TN 929.5 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)03-0020-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230304

Balanced Scheduling Strategy for Edge Computing Tasks Based on Load Redistribution

XIE Huan, DU Shu, CHEN Shaolei, MA Mei, ZHANG Qiuming, DENG Bingyan
(State Grid Sichuan Information and Communication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The current computational offloading mechanism of 5G heterogeneous network has problems in terms of edge node resources and latency and load balancing of power service scheduling algorithm. The balanced scheduling algorithm based on secondary redistribution of power service priorities is proposed for the shortcomings of min-min algorithm and max-min algorithm, comprehensively considering the load balancing and service computation delay of edge server. The algorithm divides the priority of services according to the maximum tolerated delay of services, and determines the ratio of long and short services according to the standard deviation of minimum completion time to realize the pre-allocation of services. Based on the load of each edge server, the algorithm then allocates the services on the high-load edge servers to the low-load servers to achieve secondary redistribution. Simulation results show that, compared with typical algorithms, the proposed algorithm alleviates the above problems in the existing technologies, reduces computational latency, achieves load balancing, and improves system resource utilization.

Key words: edge calculation; load balancing; secondary redistribution; 5G; power Internet of things

0 引言

边缘计算是在第五代移动通信技术(5G技术)中,为附近终端设备提供云计算能力的一种有前途的范例。5G技术的通信特征与电力系统的特征和需求之间具有互补性,电力物联网将5G技术与电力系统相结合,进一步提高新型电力系统信息化水

平,全面提高资源利用率,为电力系统各部分提供强有力的技术支持^[1]。海量的电力业务给计算能力有限的终端设备带来了前所未有的挑战,因此,边缘计算技术应运而生。边缘计算被认为是一种有前途的提高卸载效率的方法。终端设备能够将其任务卸载到网络边缘的服务器,而不是利用核心网络中的服务器,也就是说将云计算下沉到电力终端设备近端执行。边缘计算在计算卸载过程中提供低延迟、

高带宽和计算敏捷性等性能,保证数据传输和计算的高效可靠^[2]。

文献[3]提出了 JCORA0 算法分配资源的方案,解决了 NP-hard 问题,有效降低能耗、任务完成时间和复杂度。文献[4]利用软件定义网络思想,旨在减少延迟,将卸载问题描述为混合整数非线性规划,将优化问题转化为两个子问题。文献[5]提出了一维搜索算法寻找计算卸载的最优策略。上述研究中计算任务之间的关系平等,但在实际中业务的优先级会有区分,计算顺序也有先后。文献[6]提出改进的离散粒子群优化算法,综合考虑用户费用和业务截止时间,实现云计算任务在短时间内的全局较优调度方案。文献[7]根据业务重要程度、CPU 的处理速度和业务数据量大小等因素,通过将业务的预期完成时间与业务的重要程度相结合来改进 min-min 算法和 max-min 算法负载不均衡的问题。文献[8]提出了一种面向业务优先级的业务调度算法,该算法在保证负载均衡的前提下,基于最小时延进行业务分配,同时适配业务优先级;当业务调度器中短任务比长任务多时,使用 max-min 算法会优先考虑调度长任务,同时,短任务会被分配给其他的边缘服务器去执行,所以使用 max-min 调度策略相对于 min-min 调度策略会得到更好的资源利用率,而且减少了时间复杂度并提高了资源利用率;当业务调度器中长任务较多而短任务较少时,则反之。

基于 min-min 业务调度算法和 max-min 业务调度算法的不足,如时延大、资源利用率较低、负载不均衡、最大完成时间 (Makespan) 较高等,对其做出改进,根据不同优先级进行任务划分,设计了长短任务标准差匹配函数,提出基于标准差的改进算法。改进算法旨在结合 min-min 算法和 max-min 算法的优点,合理利用已有资源,同时在完成预分配之后加入二次分配机制,充分利用预分配阶段的空闲资源,提高算法的灵活性,进一步降低时延,使资源利用率最大化,实现负载均衡。

1 电力业务场景及调度模型

1.1 电力业务场景

在当前泛在电力物联网大规模推进和电力市场化改革的条件下,边缘计算技术应用存在于如表 1 所示的传统业务及新兴业务。

受无线网络中的带宽和边缘服务器计算资源的限制,调度模型直接影响系统的卸载时延和资源利用率。相对于边缘服务器,终端设备的计算能力和电池容量受限制的情况下,业务在终端设备本地执行不能够保证满足用户的服务质量 (quality of service, QoS) 需求。所以,终端设备决定将其业务卸载到边缘服务器以进行远程计算,并将结果返回给终端设备。因此,如何在边缘计算中通过卸载策略来合理地分配资源,提高资源利用率以达到更好的负载均衡并降低计算时延,是当前边缘计算中的一个重要问题^[9]。

表 1 业务分析

业务分类	业务需求	协同方式
提升配电网运行效率	1) 故障快速处置与精准主动抢修 2) 状态在线评价与设备预先检修 3) 台区能源自治与电能质量优化	云-边协同 边-边协同 边-端协同
现有业务	1) 规划系统科学与投资精准高效 2) 资产精益管理与设备全寿命管控 3) 线损实时分析与区域综合降损	云-边协同
提升客户服务水平	1) 供电方案优化与用电可视化 2) 停电准确定位与精准透明发布 3) 负荷特性识别与用电能效优化	云-边协同
新兴业务	1) 助推智能设备产业升级 2) 支持第三方应用开发 3) 共享配用电数据服务	云-边协同 边-边协同

在此列举电力物联网在 5G 边缘计算场景下的典型网络架构如图 1 所示。该场景下电力业务主要为无人机巡检、智能充电桩、光伏发电等,部署了多个边缘服务器,边缘服务器与电力终端通过无线通信进行数据交换。

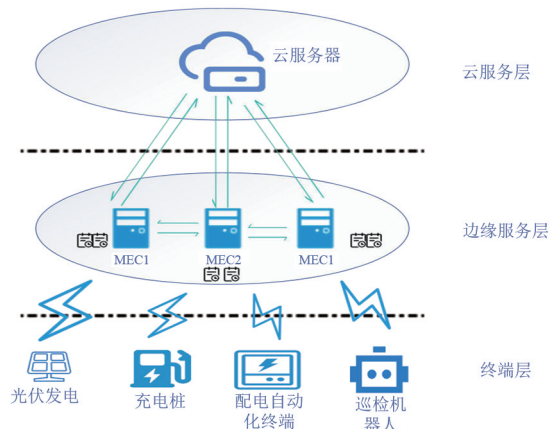


图 1 边缘服务器业务调度场景

1.2 系统模型

在多电力终端设备与多边缘服务器的场景下,

每一个终端设备都有一个要在一定延迟约束内完成的计算业务,根据不同业务的最大容忍时延要求,对队列中的业务进行优先级的划分。改进算法以业务的优先级、预期最小完成时间和等待队列中业务预期完成时间的标准差等参数作为依据进行任务调度,并根据各边缘服务器计算能力的不同,合理分配,从而达到降低业务处理时间、实现负载均衡的目的。针对业务优先级与传输过程中的资源调度和边缘服务器队列进行建模,主要分为如下部分:

1) 业务优先级模型:根据业务所能容忍的最大时延确定业务优先级。

2) 业务传输模型:设定边缘服务器的信道带宽和设备终端的数据传输功率,计算无线通信链路传输速率,得出传输时延。

3) 边缘服务器调度模型:设定边缘服务器中业务调度队列模式。由电力终端、无线通信传输和边缘服务器组成的系统,计算过程如图 2 所示。

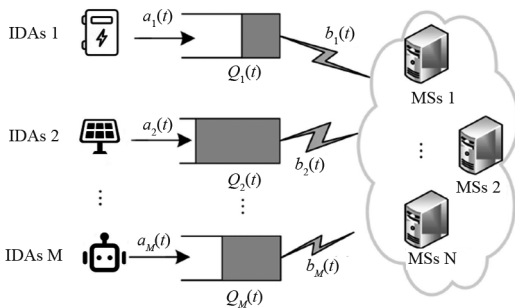


图 2 业务计算调度过程

1.2.1 业务优先级模型

在模型中假设有 n 个终端设备表示为 $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, 每个终端设备产生一个电力业务表示为 $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$, T_n 代表第 n 个电力业务, 每个计算业务 T_n 可以用术语描述为 $T_n = \{I_n, D_n, C_n, W_n, P_n, t_n^{\max}\}$, 其中: I_n 为业务的标志编号; D_n 为业务的数据量; C_n 为完成此业务所需的计算能力; W_n 为业务传输至边缘服务器后处于业务调度队列中的等待时间; P_n 为业务优先级; t_n^{\max} 为计算业务所需的最大容忍延迟, 与业务的优先级成反比。

1.2.2 业务传输模型

在 5G 异构网络中, 为了有效地重用频谱, 边缘服务器都在同一频带中工作。频谱被划分为 k 个信道, 表示为 $K = \{1, 2, 3, \dots, k\}$ 。每个信道的带宽都是相同的, 用 W 表示。5G 网络中的多用户 OFDMA

系统中的每个信道都与其他信道正交。当终端设备选择由边缘服务器计算其业务时, 输入数据通过无线通信链路传输到边缘服务器。在终端设备 i 访问边缘服务器下数据传输速率可以表示为

$$R_{Ti} = W \log_2 \left(1 + \frac{P_i g_i}{N_0} \right) \quad (1)$$

式中: W 为信道带宽; P_i 为终端设备 i 在信道中传输数据的功率; g_i 为终端设备 i 和边缘服务器之间的信道增益; N_0 为信道内噪声功率。

因为边缘服务器传输功率相较于终端设备的传输功率大得多, 而且计算结果数据量小于业务的数据量, 所以回传结果的时间可以忽略不计。

1.2.3 边缘服务器调度模型

所研究场景为电力系统中多设备、多边缘服务器的分布式计算。终端设备通过 5G 异构网络将其计算电力业务卸载到边缘服务器, 暂时存储在业务调度器中。业务调度器将业务按照优先级进行从大到小排序, 形成不同优先级的待处理任务调度队列 $D = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$ 。该场景下边缘服务器有 j 台, 边缘服务器集合用 $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_j\}$ 表示。集合 S 中的第 m 个服务器可以用 $S_m = \{I_m, F_m, P_m, W_m\}$ 表示该服务器的具体状态, 各项参数的具体含义如下: I_m 为边缘服务器的编号标志; F_m 为边缘服务器的计算能力; P_m 为边缘服务器的优先级; W_m 为边缘服务器的就绪时间^[10]。业务调度器中按照 P_m 排序所有边缘服务器, 形成边缘服务器调度队列, 便于后续待传输业务进行资源匹配。

2 边缘计算任务调度算法

2.1 基于最小完成时间标准差的预调度分配算法

所做研究场景中, 边缘服务器比电力设备终端的数量少, 将所有边缘服务器的状态初始化为空闲状态。从优先级最高的业务开始进行分配, 首先计算所有业务的最小完成时间和最小完成时间标准差, 第 i 个业务的最短完成时间为

$$E_i = W_m + t_m^c + t_m^r \quad (2)$$

式中: E_i 为第 i 个业务的最小完成时间; W_m 为第 m 个边缘计算服务器的就绪时间; $t_m^c = \frac{C_{T_n}}{F_m}$, 为第 m 个

边缘计算服务器计算业务 T_i 所消耗的时间; $t'_m = \frac{D_{T_i}}{R_{T_i}}$, 为终端设备将业务 T_i 传输到边缘服务器所消耗的时间。因此, 该业务集中所有业务的最小完成时间标准差 S_D 可表示为

$$S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^s E_i - \bar{E}}{n}} \quad (3)$$

式中: n 为该业务的个数; \bar{E} 为所有业务最小完成时间的平均值。

计算出 S_D 后, 查找待分配业务中连续两个业务最小完成时间差值大于标准差的位置。找到之后, 如果该位置在业务集的前半段, 则说明该业务集中短业务少、长业务多, 则采用 min-min 算法完成预调度; 否则, 采用 max-min 算法完成预调度。

基于标准差的预调度资源分配算法描述如下:

输入: 任务 T_n , 边缘服务器 S_m , E 矩阵。

输出: 任务总完成时间, 各边缘服务器工作时间。

- 1) 计算每一个业务 E_i 。
- 2) 将所有业务的最小完成时间递增排序。
- 3) 计算 S_D , 在待完成分配的业务调度器中找到相邻业务之间的最小完成时间差值大于 S_D 的位置 p , 判断 p 是否处于业务集的前半段, 如果是跳转到步骤 4; 如果不是则跳转到步骤 5。
- 4) 采用 min-min 算法分配该业务, 并从待分配业务集中删除该业务。
- 5) 采用 max-min 算法分配该业务, 并从待分配业务集中删除该业务。
- 6) 判断所有业务是否完成分配, 如果是则结束; 如果不是跳转到步骤 1。

2.2 边缘计算服务器资源分配

在完成业务优先级排列及预调度后, 算法通过二次分配, 将执行时间最长的边缘服务器上的业务分配给执行时间最短的边缘服务器, 如果将业务分配出去使总体执行时间减少, 则分配出去实现负载均衡。二次再分配的流程如下:

算法将根据各个服务器执行时间来调整边缘服务器中的业务, 将执行时间最长的边缘服务器上的业务分配给执行时间最短的边缘服务器, 更新边缘服务器的完成时间^[11]。如果将此业务分配出去可以减少总体完成时间, 则将从该边缘服务器上删除此业务, 分配到执行时间最小的边缘服务器, 更新所

有边缘服务器的工作时间; 若不能减少总体完成时间则将需要调整的边缘服务器上的其他业务分配出去, 更新所有边缘服务器的工作时间^[12]。

重复上述操作, 直到该边缘服务器上的业务不能分配出去为止, 得到最终的完成时间。

边缘服务器二次再分配资源调度算法伪代码如下:

输入: 任务 T_n , 边缘服务器 S_m , E 矩阵

For $n = 1 : n \in E_{\max}$ in S_m

For $m = 1 : m-1$ in other S_m

IF Makespan' < Makespan

Reset T_n

Update M_n

END IF

END FOR

END FOR

输出: 任务完成时间, 各边缘服务器工作时间

在输出之后, 计算各边缘服务器工作时间标准差, 作为负载均衡的指标, 公式为

$$S_{Ds} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^j M_n - \bar{M}}{j}} \quad (4)$$

式中: j 为边缘服务器的总个数; M_m 为第 m 个边缘服务器的工作时间; \bar{M} 为所有边缘服务器的完成时间平均值。

2.3 策略描述

边缘服务器的业务调度和资源分配策略的流程如下: 设置业务的数据量、最大容忍时延、优先级以及服务器的优先级等参数。业务的调度和服务器分配是根据业务的优先级、服务器的工作状态以及匹配服务器后任务的预期完成时间来进行的^[13]。具体调度策略如下:

1) 根据业务优先级排序生成业务等待队列, 计算所有业务的最小完成时间标准差, 并找到连续两个业务最小完成时间差值大于标准的位置 p 。

2) 如果 p 位于业务组的前半部分, 则采用 min-min 算法进行业务调度分配; 否则采用 max-min 算法进行业务调度分配。

3) 每完成一个业务的调度分配, 更新剩余业务的最小完成时间, 重新计算剩余业务最小完成时间标准差。返回步骤 1, 直到完成所有业务的调度分配。

4) 在完成所有业务的预调度分配之后, 算法基

于二次分配的原则,将工作时间最长的服务器的业务按照预期最小完成时间递增排列,依次尝试分配给工作时间最短的服务器,若能降低最大完成时间,则分配过去。

3 仿真分析

3.1 仿真场景

通过 python 语言对提出的电力业务资源分配调度算法进行仿真并分析其性能。实验运行在 CPU 为 i5 8300H 2.3 GHz、物理内存 16 GB 的 PC 机上。根据不同的业务数量从 10 到 100 分为 10 组进行对比实验,参考相关文献设置并优化仿真平台相关参数^[8]。为模拟近似实际应用场景下所需要计算的电力业务相关数据,对其进行随机初始化。调度算法根据业务的优先级、最小完成时间标准差和待处理服务等数据为每个业务匹配对应计算能力的边缘服务器,推导出每个边缘计算服务器的计算延迟和负载均衡标准差^[14]。

表 2 数据范围及参数设定

仿真参数	仿真数值
终端设备个数	[10, 100]
上行链路带宽	[$10^8, 10^9$]
终端设备发射功率/W	0.25
边缘服务器计算能力/(bit · s ⁻¹)	[$10^9, 7 \times 10^9$]
移动端计算能力/(bit · s ⁻¹)	10^7
任务数据量/bit	[$10^6, 10^7$]

所提算法的对比算法为传统的 min-min 调度算法、max-min 调度算法和基于任务优先级的改进 min-min(task priority-based min-min, TPMM) 调度算法。传统的 min-min 和 max-min 算法是启发式算法中的一个具有代表性的算法,有总完成时间短、算法思路简单的优点,这两种经典算法依据它们特点和优点,在资源任务调度算法研究中备受关注,满足部分电力业务要求。TPMM 算法即为 min-min 调度算法的改进算法,其本质是根据业务优先级为业务分配资源,以此确保较高优先级的业务分配到更多的计算资源优先进行计算,对比 min-min 算法时延得到了改善,同时进行了一定程度上的负载均衡优化。基于这 4 种算法在业务数量相同的基础上进行仿真,采用不同调度策略得到计算时延和负载均衡标准差。

3.2 结果分析

为证明所提算法的优越性,以计算业务时延和边缘服务器负载均衡标准差作为评估依据,通过综合负载均衡与时延,考察资源分配的合理性。根据预分配与二次再分配策略,达到降低最大工作时间和时延、提高资源利用率的效果。仿真结果表明,所提算法在负载均衡与降低时延方面的性能有所提升。

在低异构性业务与服务器计算资源的前提下,4 种业务调度策略所消耗的时间以及负载均衡标准差如图 3、图 4 所示。通过对比可知,当业务数量从 10 增加至 100 的过程中,所提算法采用的调度策略消耗的时间最少;其次是 TPMM 算法,而 max-min 和 min-min 算法消耗的时间相差无几。在服务器负载均衡方面,TPMM 算法相较 min-min 和 max-min 算法表现优异。因为 TPMM 算法对任务进行合理的优先级划分,有效平衡了计算负载。而 min-min 和 max-min 算法资源分配缺少合理性,使得负载不均衡的缺点较明显。

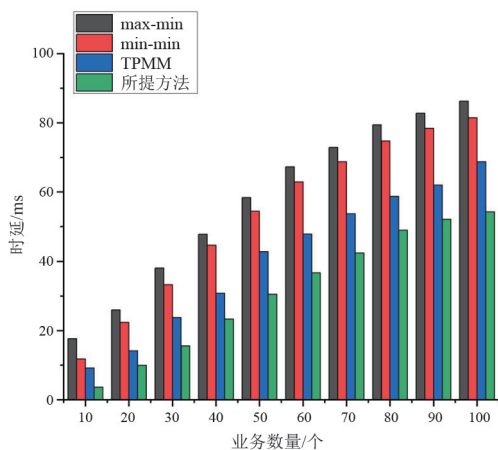


图 3 低异构性环境下时延的关系

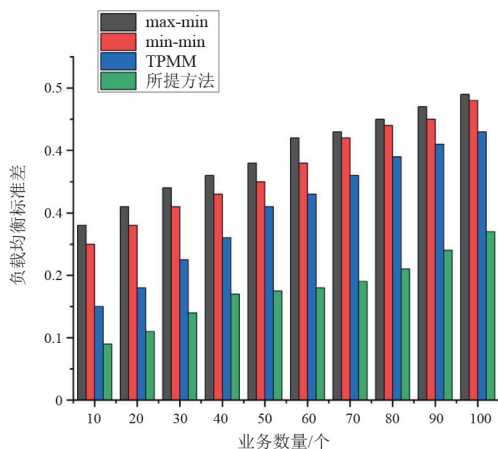


图 4 低异构性环境下负载均衡标准差的关系

在高异构性业务与服务器计算资源的前提下。4种业务调度策略所消耗的时间以及负载均衡标准差如图5、图6所示。高异构型环境中,各业务数据量之间相差较大,同时各服务器计算能力差异明显。在这种情况下, min-min 和 max-min 算法表现较差,负载均衡标准差升高,甚至会出现几个边缘计算服务器长时间空闲的情况,资源利用率严重降低,性能较差。TPMM 算法在时延这项指标上会有所减低,且得到了较低负载均衡标准差,边缘服务器组的负载分配较为合理。而所提出的算法,首先计算业务的最小完成时间标准差,进行预分配算法的动态选择,并搭配二次分配策略,前后两次优化业务集计算时间与服务器工作时间标准差,提升了资源利用率,降低了工作时间。

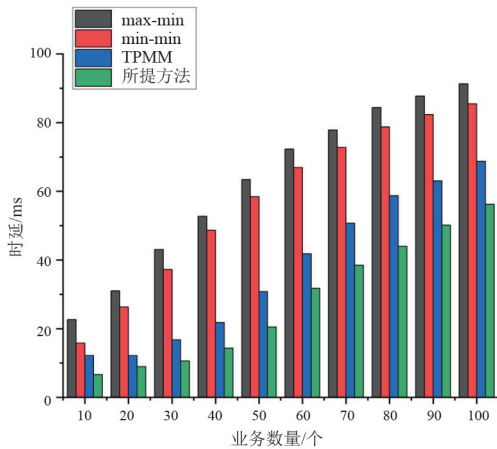


图5 高异构性环境下时延的关系

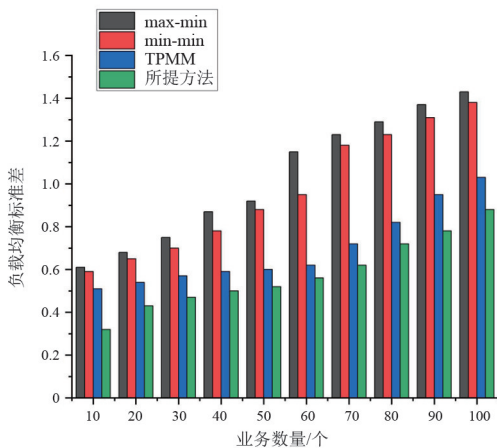


图6 高异构性环境下负载均衡标准差的关系

4 结论

5G 新型电力系统中,相关电力业务具有超低时

延和高可靠性的需求,并且不同的新型电力物联网业务需要差异化的通信和计算服务^[15]。上面针对 min-min 调度算法、max-min 调度算法和 TPMM 调度算法所存在的问题,在时延和负载均衡两个方面进行了改进,提出了二次分配的业务调度算法,并且从理论与实验两方面证明了所提算法的有效性。实验结果表明,该算法通过前后两次优化,达到了降低业务调度时延和服务器负载均衡标准差,提高资源利用率的目的。

国家电网有限公司针对电力控制类、采集类、视频类等典型业务,在实验室根据 5G 试验专网资源设置三类不同的端到端网络来承载验证,速率、空口时延、端到端时延、丢包率和时钟同步精度均满足要求。在外场测试中,速率和时钟同步精度满足要求,而端到端时延、丢包率不稳定需进一步查明。

所提算法虽然结合了 3 个算法的优点,而且考虑到了任务优先级和服务器的负载情况等因素,达到了一定改进效果,但仍存在不足。比如,不能动态地调整队列情况,没有与云服务器形成协同达到云-边-端协同的效果,这些也将是进一步研究的方向。

参考文献

- [1] 王毅,陈启鑫,张宁,等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
- [2] 叶万余. 面向电力物联网 URLLC 业务的智能网络切片管理方法[J]. 工业工程, 2022, 25(1): 129-135.
- [3] ZHANG J, XIA W W, YAN F, et al. Joint computation offloading and resource allocation optimization in heterogeneous networks with mobile edge computing[J]. IEEE Access, 2018, 6: 19324-19337.
- [4] CHEN M, HAO Y X. Task offloading for mobile edge computing in software defined ultra-dense network [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(3): 587-597.
- [5] LIU J, MAO Y Y, ZHANG J, et al. Delay-optimal computation task scheduling for mobile-edge computing systems[C]//2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Barcelona, IEEE, 2016: 1451-1455.
- [6] 蒲汛,杜嘉,卢显良. 基于用户优先级的云计算任务调度策略[J]. 计算机工程, 2013, 39(8): 64-68.

- [7] 张霞, 杜丽敏. 仿真网格中一种基于匹配度的改进 Min-Min 调度算法[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2016, 39(2):223-228.
- [8] 董思岐, 李海龙, 屈毓铤, 等. 面向优先级用户的移动边缘计算任务调度策略[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(9): 2701-2705.
- [9] MUNOZ O, PASCUAL-ISERTE A, VIDAI J. Joint allocation of radio and computational resources in wireless application offloading[C]// 2013 Future Network & Mobile Summit, Lisboa, IEEE, 2013:1-10.
- [10] LIU C F, BENNIS M, POOR HV. Latency and reliability-aware task offloading and resource allocation for mobile edge computing[C]. 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Singapore, IEEE, 2017:1-7.
- [11] KOKILAVANI T, George AMALARETHINAM D I. Load balanced min-min algorithm for static meta-task scheduling in grid computing[J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 20(2):43-49.
- [12] MORENO R, ALONSO-CONDE A B. Job scheduling and resource management techniques in economic grid environments[M] //Grid Computing, Lecture Notes in Computer Science, 2010:25-32.
- [13] SARDELLITTI S, SCUTARI G, BARBAROSSA S. Joint optimization of radio and computational resources for multicell mobile-edge computing[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2015, 1(2):89-103.
- [14] MAO Y Y, ZHANG J, LETAICH K B. Dynamic computation offloading for mobile-edge computing with energy harvesting devices[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(12): 3590-3605.
- [15] 陈俊, 黄飞宇, 黎作明. 基于 DQN 的电力物联网 5G 边缘切片资源管理研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1):155-161.

作者简介:

- 谢欢(1994),男,硕士,工程师,从事电力通信工作;
 杜书(1983),男,博士,高级工程师,从事电力通信工作;
 陈少磊(1985),男,博士,高级工程师,从事电力通信工作;
 马玫(1982),女,硕士,高级工程师,从事电力通信工作;
 张秋铭(1995),女,硕士,工程师,从事电力信息工作;
 邓冰妍(1996),女,硕士,工程师,从事电力大数据工作。

(收稿日期:2022-09-13)

(上接第 8 页)

- [13] LIU W L, CHAI Y X, XIANG Y, et al. Investment model and its multi-year rolling deduction based on a data-driven method for distribution network[C] // 2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), 2020:560-564.
- [14] XU B H, XIANG Y, PAN L, et al. Agent-based optimal cooperative operation of multi-energy system[C] //2021 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), 2021: 520-525.
- [15] 廖文龙. 基于数据驱动的配电网动态最优潮流算法[D].天津:天津大学,2020.
- [16] WANG S Y, DUAN J J, SHI D, et al. A data-driven multi-agent autonomous voltage control framework using deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4644-4654.
- [17] VARMA R, SIAVASHI E. PV-STATCOM - a new smart inverter for voltage control in distribution systems[C] // 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2018:1-1.
- [18] 王静. 含分布式能源的配电网优化运行策略研究[D]. 武汉:武汉大学,2019.
- [19] LIU Y B, XIANG Y, TANG Z, et al. Sizing approach of distributed energy storage system in the presence of aggregators [C] // IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2019:3256-3261.
- [20] UCI Machine Learning Repository. ElectricityLoadDiagrams20112014 Data Set [EB/OL].[2022-04-24]. <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/ElectricityLoadDiagrams20112014>.
- [21] Elia. The data of Solar and wind power generation [EB/OL].[2022-04-24]. <https://www.elia.be/en/grid-data/power-generation>.

作者简介:

- 卢宇(1999),男,硕士研究生,研究方向为新型配电系统优化运行;
 向月(1987),男,博士,副教授,研究方向为配电系统优化运行与规划等;
 刘俊勇(1963),男,博士,教授,从事电力系统分析、智能电网等工作;
 曾平良(1962),男,博士,教授,从事电力系统分析与规划等工作。

(收稿日期:2022-08-24)