

# 基于云边协同的微电网自动控制系统

江伟<sup>1</sup>, 马光<sup>1</sup>, 涂卫平<sup>1</sup>, 彭超逸<sup>1</sup>, 陈州<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网有限责任公司, 广州 510000; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

**摘要:** 微电网及分布式能源的数量、规模快速发展, 当前系统无法满足海量相关数据采集、存储、分析计算需求; 为适应多微电网控制的高并发、高可靠性的处理要求, 提出了基于云边协同的微电网自动控制系统; 基于 Docker 容器技术优化配置云边计算资源; 设计了基于云边协同的微电网自动控制系统总体架构, 对云边协同功能及主要数据流进行了详细说明; 进一步分析了其中微电网控制及能量管理等核心功能及其数据处理需求, 提出了云边协同架构下的计算分析任务调度策略, 基于带宽资源对迁移任务数据流进行调度, 兼顾任务时限要求和服务器的负载均衡; 最后通过运行实例对提出的微电网自动控制系统功能及优越性进行有效性验证, 所提系统通过架构、功能和任务调度策略满足了多微电网的控制要求。

**关键词:** 云边协同; 微电网; Docker; 控制; 任务调度

## Microgrid Automatic Control System Based on Cloud Edge Collaboration

JIANG Wei<sup>1</sup>, MA Guang<sup>1</sup>, TU Weiping<sup>1</sup>, PENG Chaoyi<sup>1</sup>, CHEN Zhou<sup>2</sup>

(1. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

2. NR Electric Engineering, Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** With the rapid development of the number and scale of microgrid and distributed energy, the current system cannot satisfy the requirements of massive related data acquisition, storage, analysis and calculation. To meet the high concurrency and reliability processing requirements of multi-microgrid control, a microgrid automatic control system based on cloud edge collaboration is proposed. Cloud edge computing resources is optimized based on Docker container technology. The structure of the microgrid automatic control system is designed based on the cloud edge collaboration. And the cloud edge collaboration function and main data flow are described in detail. The key functions of the microgrid control, energy management and data processing requirements are further analyzed. A computational analysis task scheduling strategy under the cloud edge collaborative architecture is proposed. The migration task data flow is scheduled based on the bandwidth resources, which considers the requirement of the task time limit and the server load balance. Finally, the function and superiority of the proposed microgrid automatic control system are effectively verified by an operational example. The proposed system meets the control requirements of multi-microgrid through the structure, function and task scheduling strategy.

**Keywords:** cloud edge collaboration; microgrid; Docker; control; task scheduling

## 0 引言

微电网集合了风电、光伏等分布式能源、储能系统、本地负荷及对应的控制保护设备, 规模小而且独立的系统, 微电网的架构因其对分布式电源和就地负荷良好的平衡能力在当前电网中得到了广泛应用, 随着微电网的数量和规模的逐渐增加, 提高微电网的运行和控制水平是灵活利用多微电网促进分布式微电源的消纳以及提升电网运行水平的关键<sup>[1-5]</sup>。微电网的运行信息采集、存储、功率预测、智能调度、风险预警、决策辅助等方面的分析计算需求对应着海量数据的处理能力, 这也是微电网数量激增后给当前监控系统带来的最大挑战。

云一边缘计算可以很好地适应电力系统的海量信息存储及处理问题, 云边系统有丰富的存储和运算资源, 边缘

节点更靠近网络节点, 缩短了终端网关与云的通讯时间, 数据和计算分析任务也可以在云边系统中流畅迁移<sup>[6-10]</sup>, 使得整体信息的采集和处理都可以获得低延迟和高可靠性, 当前将云/边计算应用在电力系统中已有一定的研究, 文献 [11] 研究了电力系统云平台分析计算任务的调度策略, 文献 [12] 研究了应用于电力系统的云平台资源的调度, 文献 [13] 将云边协同技术应用到了功率预测方面, 文献 [14] 研究了云边系统的数据协同问题, 但将云边协同系统应用于多微电网自动控制的研究还较少; 对于云边协同系统, 高效、高可靠、低延时调配存储和计算资源完成系统任务是体现云边系统优势的关键, 也是研究的热点, 文献 [15-16] 研究了通过构建网络数据流图模型, 进而对网络图进行优化的方式任务调度及资源分配的方法, 文献 [17-18] 研究了通过机器学习的方式对任务和资源进行调度的

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-03-06。

基金项目: 南方电网公司科技项目(000000KK52200035)。

作者简介: 江伟(1983-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 江伟, 马光, 涂卫平, 等. 基于云边协同的微电网自动控制系统[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 117-122.

方法,文献 [19] 研究了基于能耗优化的边缘计算卸载策略;但对于将云边系统特点与微电网控制功能需求结合起来的高可靠高效调度方案还很少涉及。

基于以上分析,本文提出基于云边协同的微电网自动控制系统,将 Docker 容器技术作为云边系统计算资源进行优化配置方式;设计微电网自动控制系统的总体架构,对主要功能和数据流进行了说明;在分析微电网控制及能量管理等核心功能的数据处理需求基础上,提出了基于云边系统服务器的运行状态和负载均衡策略的计算分析任务调度策略,并通过容器镜像库进一步降低任务迁移数据量;通过基于云边协同的微电网自动控制系统架构、功能和任务调度策略方面的研究适应多微电网自动控制要求;最后通过实例对所提系统的功能和优越性进行验证。

### 1 基于 Docker 容器的云边协同资源配置

Docker 容器技术是一种轻量虚拟化应用技术,虚拟化技术是对服务器硬件资源,包括 CPU、硬盘、内存、带宽等的管理分配技术,应用最多的属于系统虚拟化,即在同一服务器中运行多个操作系统,每个操作系统可以运行不同的应用程序,依靠虚拟化技术可以对云边系统大量的服务器资源进行有效调配,整个云边系统的服务器可被视作资源池,以虚拟系统的方式完成数据分析计算。Docker 容器技术是一种面向应用的简化系统<sup>[20-22]</sup>,仅将应用程序所需的依赖库和系统软件配置成虚拟化系统,形成的容器对应特定的应用程序,相比虚拟机将整个操作系统进行虚拟化的方式,相同的硬件资源可以形成更多数量的容器进行分析计算,提高了整体资源的利用效率,对不同的应用程序可以针对性部署,容器的启动速度也较快,几乎没有启动消耗。

Docker 容器的工作流程涉及 Dockerfile、镜像、容器实例和镜像库。Dockerfile 用来构容器建镜像,镜像经 push 指令上传至镜像库,镜像库集中存放容器镜像。通过服务器中部署的 Docker Engine 搜索镜像库选中并下载对应的容器镜像,完整的镜像包含了应用运行的所有依赖(包括代码、环境变量、系统工具及依赖库等),因此不需要额外的依赖软件安装、环境变量配置,通过容器镜像生成容器实例进行分析计算工作,容器实例可以根据具体的运算需要被创建、开始、停止和释放。通过 Docker 容器的工作流程可以看出,容器镜像机制使得容器的部署、维护、控制较为便利,容器的按需创建和释放也提高了服务器资源的利用效率。

在云边协同系统中通过 Docker 容器进行计算资源的配置和进行系统分析计算任务,Docker 容器在云边协同系统中的工作流程如图 1 所示,将容器镜像库部署在云端服务器,客户端发起的任务需求时云端和边缘服务器卸载的任务通过网络发至指定的云端或边缘服务器,目标服务器依据计算需求根据容器镜像生成容器实例,进而完成计算并通过网络返回给任务发起者。针对微电网控制及能量管理相关的分析计算,按照其分析算法制作统一的容器镜像,当算法需要维护和变化时,只需更新容器镜像库即可,极大简便了应用程序的部署和更新。

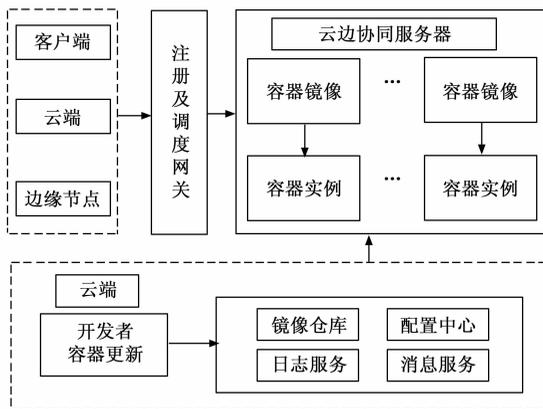


图 1 云边协同系统中 Docker 容器工作流程

### 2 基于云边协同的微电网自动控制系统架构

#### 2.1 总体架构

基于云边协同的微电网自动控制系统需要满足边端大量微电网接入、监视、预测、分析和协同控制的需求,并保证微电网数据及协同控制功能的实时性、精确性、可靠性,主要包括云端控制应用、边缘集群、微电网边缘网关等模块。总体架构如图 2 所示,其主要内容包括:

- 1) 云端控制应用部署在云端系统,负责根据电力市场出清结果或调度控制需求计算并发布微电网边缘网关的控制指令。
- 2) 边缘集群部署在各级调度主站,由云边协同交互、云边协同应用以及原有 OS2 主站系统共同组成,提供微电网边缘网关的安全接入以及微电网的监视、预测、分析和控制功能。
- 3) 虚拟边缘集群是在云端系统虚拟的边缘集群,由云边协同交互、云边协同应用组成。提供微电网边缘网关直接上云的安全接入,提供微电网的数据交互与监视功能。
- 4) 微电网能量管理系统负责微电网的监控和管理,具备信息采集与报送、控制分解、监视告警等功能,并通过标准化的边缘网关接入边缘集群或虚拟边缘集群,参与云端控制应用。

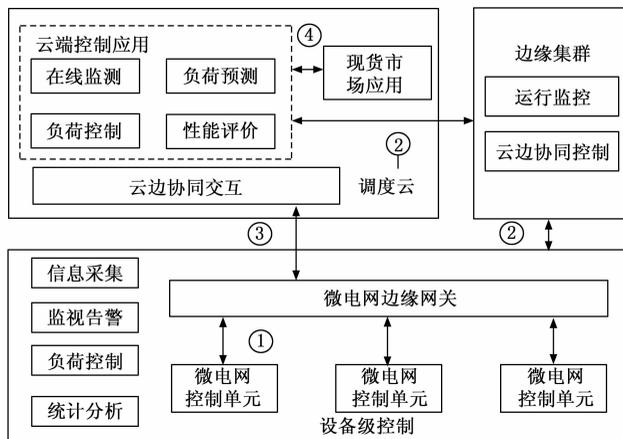


图 2 基于云边协同的微电网自动控制系统架构

5) 微电网边缘网关作为微电网与云端控制应用交互通道, 对上接入边缘集群, 对下为不同微电网控制单元接入云端提供入口, 边缘网关采用统一技术架构, 以标准化设计满足灵活接入和即插即用的使用需求, 实现大规模微电网的快速、便捷、安全接入。

微电网协同控制应用包含 4 类主要的数据流, 其数据流架构如图 2 所示, 包括:

1) 数据流①: 微电网边缘网关与微电网控制单元的数据流。微电网控制单元向边缘网关发送微电网的运行信息, 边缘网关向微电网控制单元转发云端控制应用或边缘集群的控制命令。

2) 数据流②: 云端控制应用通过边缘集群与微电网边缘网关纵向交互的数据流。云端控制应用通过边缘集群从边缘网关采集微电网运行数据, 向边缘网关下发控制指令。

3) 数据流③: 云端控制应用通过虚拟边缘集群与微电网边缘网关纵向交互的数据流。云端控制应用通过云端系统虚拟边缘集群从边缘网关采集微电网运行数据, 向边缘网关下发控制指令。

4) 数据流④: 云端控制应用与现货市场应用交互数据流。在非现货市场环境下, 云端控制应用从现货市场应用中获取市场主体申报信息; 现货市场环境下, 云端控制应用从现货市场应用中获取市场主体的出清结果。

## 2.2 主要功能设置

微电网的自动控制功能主要包括微电网的协调控制和微电网能量管理调度。

微电网的协调控制包括微电网并网运行、离网运行及其模式切换控制<sup>[23-25]</sup>, 微电网控制体系如图 3 所示, 其中 PQ 控制为有功—无功控制, VF 为电压—频率控制, 主要控制功能包括:

1) 并网运行控制: 微电网在并网状态下的电压和频率主要依靠电网维持, 分布式能源通常采用有功—无功控制方式; 柴油发电机等可控微电源通常采用下垂控制方式, 在频率和电压发生变化情况下, 通过分析计算确定并控制微电网内各电源的有功和无功出力, 对电网频率与电压提供支撑作用, 维持联络线功率在允许范围内, 提高微电网对电网的稳态支撑作用。

2) 离网运行控制: 离网模式下微电网需要维持自身的频率和电压稳定, 微电网内电源控制分为主从和对等控制, 主从控制模式是指微电网电源设置为可以支撑电压和频率的主电源以及输出功率为主的从电源, 主电源采用电压—频率控制策略, 从电源采用有功—无功控制策略; 对等控制的是指各微电源一般用有功—频率及无功—电压下垂控制, 自动参与功率分配; 微电网主电源的功率控制能力有限, 需要微电网自动控制系统制定对应算法依靠储能系统辅助保证微电网独立系统的频率和电压稳定。

3) 模式切换控制: 并网微电网在故障情况下需要由并网状态迅速切换至离网状态, 网内负荷由微电源供电; 当故障恢复后, 微电网可重新进入并网状态。切换过程分基

于顺序控制的无缝切换和无缝切换方式, 自动系统需要为微电网运行状态切换提供预警及指令等信息, 对切换过程进行监控, 并依据一定的算法减小对电网的暂态冲击。

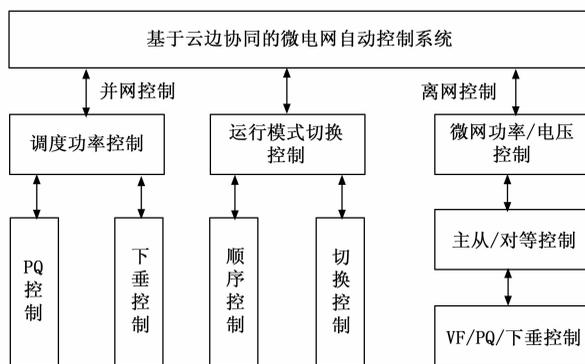


图 3 微电网控制体系

微电网能量管理调度系统目标是通过微电网的能量的多时间尺度的合理优化调度实现微电网经济运行、可靠供电等目标, 其中的关键算法是发电和负荷的功率预测能力、数据挖掘、交互决策等, 微电网能量管理调度系统控制体系如图 4 所示。

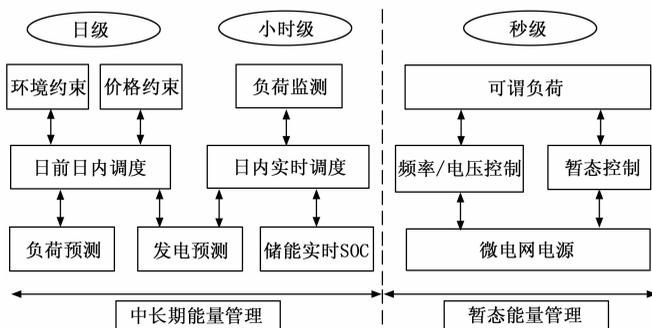


图 4 微电网能量管理调度系统控制体系

## 3 云边协同系统任务调度算法

### 3.1 微电网调度需求

云边系统中的服务器在运行负荷达到一定程度后, 需要将微电网自动控制系统的相关分析计算任务迁移至其他服务器, 这也是云边协同系统的优势, 对于大量微网的运行控制, 需要对数量众多的迁移计算任务进行调度, 在对云边计算资源有效利用的前提下使得计算任务可以顺利完成, 在基于云边协同的微电网自动控制系统中采用了 Docker 容器技术, 计算任务的应用程序已在容器中进行了配置, 对于迁移计算任务的调度的实质是对分析计算任务相关数据、参数等网络数据流的调度分配, 在大规模分析计算情况下云边系统的服务器之间有大量的数据传输需求, 网络资源是制约云边系统中分布式计算吞吐量的关键; 微电网相关的分析计算一般具有时效性, 对计算结果的返回时间有一定的要求, 由于大规模计算的高并发特性, 在网络负荷较重或计算资源紧张情况下, 极有可能导致计算结果无法满足时限要求, 也会加重后续计算任务阻塞的可能性。

通过以上分析可以得出云边协同系统中迁移任务调度的两个主要约束,并针对这两点约束设计迁移任务的调度策略。

1) 能够接受迁移计算分析任务的服务器必须具备能够完成计算任务对应的资源,包括存储、CPU 和内存,同时各个服务器的负荷需要保持相对平衡;

2) 对数据流任务序列的处理要考虑云边系统实时网络资源情况对计算分析任务时限要求的影响,避免任务的二次处理及可能造成的任务阻塞的情况。

### 3.2 迁移任务调度算法

在云边协同系统中,迁移任务的调度由云端进行统一决策,云或边缘集群系统需要将需要进行迁移的任务信息汇总至云端计算分析任务调度模块,调度模块根据云边协同服务器的运行信息和任务的具体信息给出具体的调度决策,待迁移任务服务器根据调度结果把任务对应的数据流发送至对应服务器,对应服务器根据任务类型创建或采用已有的容器实例进行计算,完成运算后将运算结果返回给云端或边缘服务器。

对迁移任务的调度策略仍基于任务序列的方式,即将待迁移的任务按申请时间形成序列  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ ,其中  $n$  为任务数量,正常情况下按照先进先出模式进行分配,本文算法中考虑到任务的时限性要求,评估当前网络资源或服务器资源的状态能否满足任务时限要求,在不能完成的情况下,对调度序列进行调整,优先满足可以按时限完成的任务,直至整个序列任务的完成。

云端计算分析任务调度模块根据对云边协同系统的服务器运行状态的监控情况,对可调用服务器根据服务器资源情况进行排序,服务器资源评估计算如式 (1) 所示:

$$U_i = \frac{S_{i,1}}{S_{i,1,max}} + \frac{S_{i,2}}{S_{i,2,max}} + \frac{S_{i,3}}{S_{i,3,max}} \quad (1)$$

其中:  $U_i$  为服务器资源使用率;  $S_{i,1}$ 、 $S_{i,2}$ 、 $S_{i,3}$  分别为服务器  $i$  的存储、CPU、内存当前使用量;  $S_{i,1,max}$ 、 $S_{i,2,max}$ 、 $S_{i,3,max}$  分别为服务器存储、CPU、内存最大值。

根据资源使用率由小到大的顺序,形成服务器集合的序列  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ ,其中  $m$  为可分配的服务器的数目,集合根据各服务器上送的状态信息进行实时更新,资源利用率低的服务器将更有可能被优先调度。

在对服务器排序的基础上,进一步根据数据流及任务的时限要求对任务的完成情况进行评估来决定最终决策。云端计算分析任务调度模块有一定的调度周期,即两次调度之间存在一定的时间间隔,第  $j$  个端口在当前调度周期  $T$  内的待传输数据量  $Q_j(T)$  可根据式 (2) 进行计算:

$$Q_j(T) = \max \left\{ \sum_{t=1}^{T-1} A_j(t) - \sum_{t=1}^{T-1} b_j(t), 0 \right\} \quad (2)$$

其中:  $A_j(t)$  为调度周期  $t$  内需要传输至节点  $j$  的数据量;  $b_j(t)$  为节点  $j$  在调度周期  $t$  内的传输带宽。

通过  $Q_j(T)$  的计算可以对端口  $j$  在迁移任务前的网络资源进行评估,鉴于资源率利用低的服务器有可能已经安排了较大传输量的计算任务,在当前调度周期来临时仍未完成前次安排的传输任务,为尽可能减小任务的等待时间

以及避免特点端口传输量的积压量,因此待传输数据量  $Q_j(T)$  是迁移计算分析任务调度的关键信息。

微电网自动控制系统的计算分析任务一般都有一定的时限要求,即在任务请求到任务结果返回的时间间隔要在约束的范围内,设任务序列中第  $k$  个任务对应的时限要求为  $D_k$ ,  $D_k$  的大小与数据流等待时间、传输时间以及容器实例的计算时间相关,综合这 3 个因素与  $D_k$  之间的关系可由式 (3) 进行表示:

$$D_k > \frac{Q_j(T)}{b_j(t)} + \frac{P_k}{b_j(t)} + ET_{j,k} \quad (3)$$

其中:  $b_j(t)$  节点  $j$  在调度周期  $T$  内的传输带宽;  $P_k$  为第  $k$  个任务的数据传输量;  $ET_{j,k}$  为相同类型计算在第  $j$  个端口对应的计算时间,其值通过统计第  $j$  个端口上处理过的同类型任务的平均值得到。

依次对服务器集合  $E$  中的各个服务器进行式 (3) 对应的校验,直至符合式 (3) 的要求,即为选定任务迁移的目标服务器;若  $E$  中前  $N$  个服务器都不能满足任务  $k$  的时限要求,则将任务  $k$  与任务  $k+1$  调换次序,先对任务  $k+1$  进行分配。

综上所述,迁移任务的调度算法流程如图 5 所示。

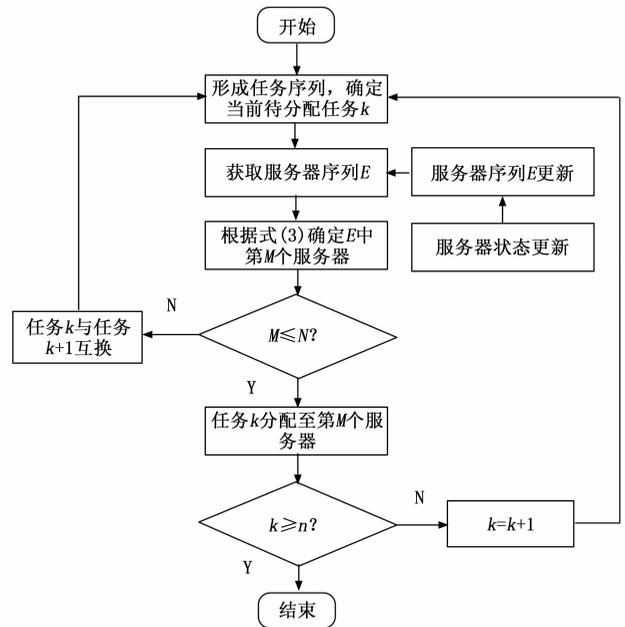


图 5 迁移任务的调度算法流程图

## 4 实例验证

本文提出的微电网自动控制系统包括云端和 3 个边缘集群,云端由 6 台服务器组成,边缘由 2 台服务器组成,单台服务器 8 核处理器,32 GB DDR4 内存。微电网自动控制系统实现了协调控制和微电网能量管理功能。在云边协同系统中应用容器技术完成微电网相关的设备控制、功率预测、调度控制、安全分析、状态预警等数据分析计算。

### 4.1 Docker 容器扩展能力分析

在当前的电力调度自动化系统中,若同时运行多个并

发计算或支持功能, 采用多个虚拟机的方式实现, 即开启多个虚拟机等待被调用, 虚拟机的开启需要服务器响应的计算资源, 例如内存、CPU 的使用, 显然单个服务器只能支持一定数目的虚拟机, 且多个服务器对虚拟机的支持数目呈线性增加, 在实际使用为保证系统正常运行中一般规定服务器中最大的虚拟机支持数量; Docker 容器技术的优势在于其轻量化以及快速的维护性能, 轻量化使得其可以更加精细的分配服务器资源, 多个服务器的并发数目呈非线性, 程序的更新、维护和发布只需对镜像进行操作, 以上两点使得其具有更好的扩展性。为体现 Docker 容器在资源配置方面的优势, 通过在单服务器和多服务器中运行的多并发的测试任务数量进行比较, 比较结果如表 1 所示, 在相同的 CPU 和内存使用情况下, Docker 容器的扩展能力更强。在实际使用中由于容器是根据分析计算请求动态地创建和释放, 也避免了大量的虚拟机空转应用, 也会进一步提高资源有效利用率。

表 1 Docker 容器与虚拟机扩展性能对比

服务器数目/个	配置方式	CPU 平均使用率/%	内存平均使用率/%	最大并发数/个
1	虚拟机	66.7	70.2	10
	容器	63.2	67.5	22
4	虚拟机	65.3	68.5	40
	容器	61.2	65.4	123

#### 4.2 迁移任务调度算法比较

将本文的迁移任务调度算法与以下 3 种典型算法进行比较:

算法 1: 带宽优先策略, 即针对迁移任务序列中的当前任务  $k$ , 分配至带宽资源最多的服务器;

算法 2: 时限优先策略, 即针对迁移任务序列, 在每个调度周期内, 按照其时限要求从大到小进行排序, 将时限要求最小的任务分配至当前带宽资源最大的服务器;

算法 3: 先进先出策略, 即按照迁移任务的加入时间顺序依次处理, 与当前资源利用率最低的服务器进行匹配。

将本文算法作为算法 4, 以同样的测试任务进行模拟, 任务的数据流等待时间、传输时间以及容器实例的计算时间已从单任务测试中获取, 云边协同系统每个服务器的待迁移计算任务相同, 对于不同任务数量 (600 和 960) 情况下针对 4 种算法在满足任务时限比例及资源利用率的标准差进行对比, 说明本文算法在满足任务时限和负荷均衡方面的优势, 对比结果如图 6 所示, 从图中对比看出, 算法 1 和 2 满足了任务的时限要求, 其足任务时限比例相对较高, 但对负荷均衡的考虑不周, 算法 3 没有考虑到任务的时限要求, 任务时限比例相对较低, 而本文算法兼顾了任务时限要求和服务器的负荷均衡, 取得了很好的效果。

#### 4.3 系统运行效果

图 7 为本文所提系统的功率预测功能展示, 系统中可以兼容不同边缘集群采用不同的设备厂家及其各自的预测算法, 并可以对调度所需的多个时间尺度的发电、负荷功

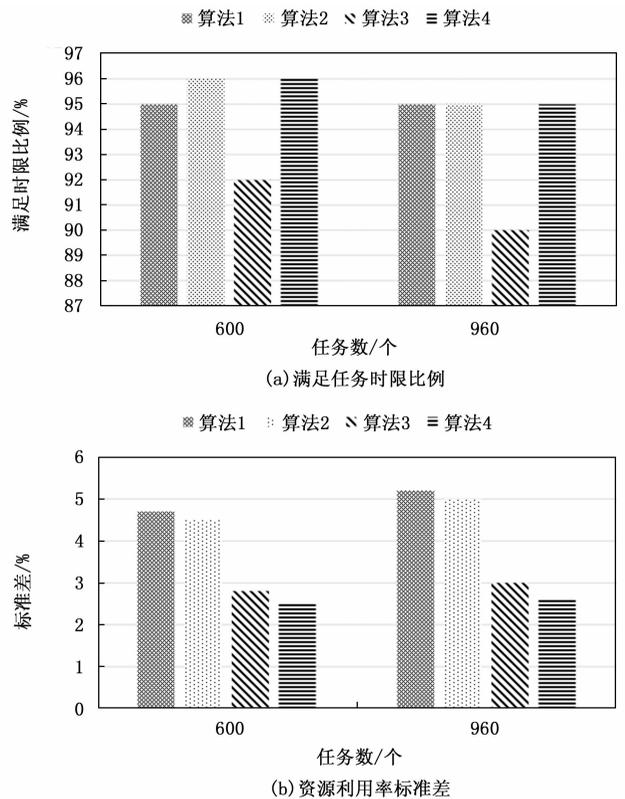


图 6 4 种算法对比

率进行预测。经测试, 所提系统的数据分析计算能力可以很好地应对多微电网的功率预测, 适应大量微电网的自动控制需求。



图 7 功率预测功能

图 8 为多微电网的调度控制功能展示, 对新能源的出力进行调度, 在测试系统中, 以发电、负荷等预测以及联络线功率约束为基础, 对负荷情况实现了较短时间尺度的跟踪, 依据容器技术和迁移调度算法提高了云边系统资源的利用率, 极大提高了系统功率调度的颗粒度, 同时也具备允许不同的边缘集群使用不同的调度策略的能力, 经测试, 所提系统可以很好地应对大量微电网接入场景下的精细化调度控制。

#### 5 结束语

针对当前监控系统数据信息处理能力有限与大量微电网自动控制需求之间的矛盾, 本文提出基于云边协同的微电网自动控制系统。利用云边协同系统强大的存储计算能力和流畅的通讯机制, 解决大量微电网控制产生的数据采

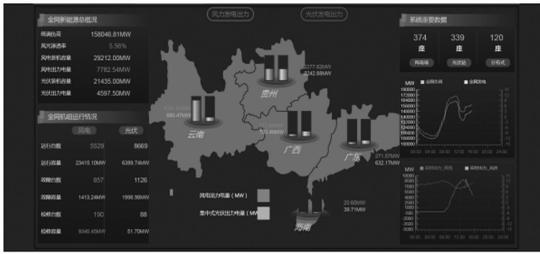


图 8 多微电网调度控制功能

集、处理和分析需求，提出了基于云边协同的微电网自动控制系统架构和主要数据流；采用 Docker 容器技术实现对云边系统的资源池管理；在分析其计算分析任务的基础上，提出了考虑任务时限需求和服务器负荷均衡的迁移任务调度策略；最后通过应用实例说明了所提系统通过架构、功能和任务调度策略满足了多微电网的控制要求。

参考文献:

[1] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23 (6): 1-14.

[2] 杨新法, 苏 剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (1): 57-70.

[3] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术 [J]. 高电压技术, 2021, 47 (9): 3036-3046.

[4] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (7): 1893-1904.

[5] 张运洲, 张 宁, 代红才, 等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较 [J]. 中国电力, 2021, 54 (3): 1-11.

[6] 薛美东, 赵 波, 张雪松, 等. 并网型微网的优化配置与评估 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (3): 6-13.

[7] 阮绵晖, 郑建平, 刘 尧, 等. 离网直流微网群混合储能容量优化配置方法 [J]. 电力工程技术, 2021, 40 (3): 99-105.

[8] 孙运志, 蒋德玉, 张盛林, 等. 计及电池寿命损耗的多能源微电网储能优化配置 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33 (5): 128-133.

[9] 孙建军, 张世泽, 曾梦迪, 等. 考虑分时电价的主动配电网柔性负荷多目标优化控制 [J]. 电工技术学报, 2018, 33 (2): 401-412.

[10] 王蓓蓓, 李雅超, 赵盛楠, 等. 基于区块链的分布式能源交易关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (14): 53-64.

[19] 王谱宇, 王 松, 张静怡, 等. 含多线路直流潮流控制器的多端直流环网非瞬态短路故障特征及控制保护策略 [J]. 电网技术, 2022, 46 (1): 90-102.

[20] 赵 玲, 龚加兴, 黄大荣, 等. 基于 Fisher Score 与最大信息系数的齿轮箱故障特征选择方法 [J]. 控制与决策, 2021, 36 (9): 2234-2240.

[21] 刘 赫, 雷雨秋, 张心怡, 等. 基于阶跃激励稳态响应的感应电机匝间短路故障诊断方法研究 [J]. 电气传动, 2021,

[11] 曹 伟, 何伊妮, 唐羿轩, 等. 基于 Docker 与微服务的电力云分析计算服务系统 [J]. 供用电, 2020, 37 (8): 34-38, 46.

[12] 何伊妮, 曹 伟, 韦昌福, 等. 基于膜计算和蚁群算法的电网云平台资源配置方法 [J]. 电力工程技术, 2020, 39 (1): 103-109.

[13] 郭祥富, 刘 昊, 毛万登, 等. 面向云边协同的配变短期负荷集群预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (9): 84-92.

[14] 黄 杰, 肖志清, 毛 冬. 面向电力物联网的云边数据协同方法 [J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20 (1): 35-42.

[15] HAGHIGHI V, MOAYEDIAN N S. An offloading strategy in mobile cloud computing considering energy and delay constraints [J]. IEEE Access, 2018, 6: 11849-11861.

[16] ZHANG W, WEN Y. Energy-efficient task execution for application as a general topology in mobile cloud computing [J]. IEEE Trans. Cloud Comput., 2018, 6 (3): 708-719.

[17] 詹文翰, 王 瑾, 朱清新, 等. 移动边缘计算中基于深度强化学习的计算卸载调度方法 [J]. 计算机应用研究, 2021, 38 (1): 241-245, 263.

[18] HAN D, CHEN W, FANG Y G. Joint channel and queue aware scheduling for latency sensitive mobile edge computing with power constraints [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19 (6): 3938-3951.

[19] WANG S, ZHANG X, YAN Z, et al. Cooperative edge computing with sleep control under nonuniform traffic in mobile edge networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6 (3): 114-123.

[20] 黄 凯, 孟庆永, 谢雨来, 等. 基于 Docker swarm 集群的动态加权调度策略 [J]. 计算机应用, 2018, 38 (5): 1399-1403.

[21] 杨少布道, 陈乐乐, 李 波. 集中式储能下微电网控制策略研究 [J]. 供用电, 2021, 38 (6): 21-28.

[22] MERKEL D. Docker: lightweight linux containers for consistent development and deployment [J]. Linux Journal, 2014, 2014 (239): 2-5.

[23] 丁 涛, 柏 瑞, 孙宏斌, 等. 基于鲁棒均值-方差优化的发电自调度算法及鲁棒代价分析 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (2): 319-326.

[24] 胡晓通, 刘天琪, 何 川, 等. 计及 BAT 损耗特性的微网多目标优化运行 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (10): 2674-2681.

[25] 李晓文, 王 旭, 齐志远. 氢电综合能源供应微电网的优化调度 [J]. 供用电, 2022, 39 (1): 40-46.

[22] 袁 敏, 茆美琴, 程德健, 等. 主电路参数对 MMC-HVDC 电网直流短路故障电流综合影响分析 [J]. 中国电力, 2021, 54 (10): 11-19.

[23] 赵晓雨, 孙 伟, 姚学玲, 等. 基于 ANSYS Maxwell 通信基站铁塔电感参数仿真研究与验证 [J]. 电瓷避雷器, 2021 (5): 16-24.

[24] 翟小飞, 李鑫航, 刘金利, 等. 谐振频率法测量高频变压器短路电感参数 [J]. 海军工程大学学报, 2022, 34 (3): 13-19.

(上接第 63 页)