

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210718

# 省地一体化稳态分析服务弹性调度系统设计

孙超<sup>1</sup>, 夏晨<sup>1</sup>, 吕志强<sup>1</sup>, 杨铭<sup>2</sup>, 曹武<sup>2</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 针对现有电力系统稳态分析应用架构扩展能力弱、无法适应跨省地调度机构的大范围应用问题, 提出了一种基于云计算技术的跨区域并行电力系统稳态分析服务及弹性调度管理系统。详细介绍和分析了该系统的总体架构、容器化封装、资源隔离、服务弹性调度、运行监控等关键技术。采用微服务技术将分析服务模块化, 并通过容器技术实现分析服务的部署、隔离和动态扩展。同时采用基于随机高级 Petri 网模型的算法实现分析服务的弹性调度。通过多种稳态分析服务应用实例, 证明所设计的系统整体运行稳定, 系统架构具备良好的可扩展性, 能够满足跨省地调度机构大范围稳态分析计算的应用需求。

**关键词:** 云计算; 电力系统稳态分析计算; 微服务; 容器; 服务弹性调度

## Design of a service elastic scheduling system for steady state analysis across provincial and regional dispatching centers

SUN Chao<sup>1</sup>, XIA Chen<sup>1</sup>, LÜ Zhiqiang<sup>1</sup>, YANG Ming<sup>2</sup>, CAO Wu<sup>2</sup>

(1. NR Electric Engineering Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The existing steady state analysis of power system application architecture has poor scalability and cannot adapt to the large-scale application requirement across provincial and regional dispatching centers. To solve this problem, a cross regional parallel power system steady state analysis service elastic scheduling management system based on cloud computing technology is proposed. The key technologies of the system, such as overall architecture, container packaging, resource isolation, service elastic scheduling, operation monitoring and so on are introduced and analyzed in detail. Micro service technology is used to modularize analysis services. The container technology is used to realize the deployment, isolation and dynamic expansion of analysis services. An algorithm based on the stochastic high-level Petri net model is used to realize the elastic scheduling of analysis services. A variety of practical steady-state analysis service applications proves that the overall operation of the system is stable, the system architecture has good scalability, and the application requirement of the wide range steady-state analysis and calculation across provincial and regional dispatching centers can be met.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902600).

**Key words:** cloud computing; steady state analysis of power system; micro-service; container; service elastic scheduling

## 0 引言

特高压交直流跨区域电网的建设实现了电力资源在全国范围内的优化配置, 电力供需失衡的矛盾有所缓解。然而, 电动汽车、煤改电供暖等新型负荷的不断增多以及风电、光伏等新能源发电消纳程

度的不断提高使得供电网络中的源荷特性在发生根本性的变化, 对跨区互联大电网的运行机制提出了新的挑战。这就要求电力系统稳态分析计算在源荷联动性分析<sup>[1]</sup>、交直流大电网调度自动巡航<sup>[2]</sup>、主动配电网黑启动分区优化<sup>[3]</sup>、自然灾害下的电网运行控制<sup>[4]</sup>、互联电网一体化监视和故障协同处置<sup>[5]</sup>等领域发挥更大的作用。现有电力系统分析应用如状态估计<sup>[6-8]</sup>、潮流计算<sup>[9]</sup>、安全约束调度<sup>[10]</sup>、暂态稳定评估<sup>[11-15]</sup>等所采用的系统架构扩展能力不强, 面对

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902600)

“大电网智能调度与安全预警关键技术研究及应用”

跨区域、强关联条件下的大型并行稳态分析服务缺乏相应的计算分析能力,导致此类应用只能满足单个调度中心内部少数专业人员的使用需求,无法满足跨调度机构的大范围应用需求。

另一方面,云计算技术日益成熟<sup>[6]</sup>,其在电力领域的应用研究成为近期的热点,包括:(1)对电力调度控制系统的整体架构研究,比如文献[17]提出了基于云计算的“物理分布、逻辑统一”的大电网调度控制系统总体架构;文献[18]提出了新一代电力自动化系统架构方案,对系统的硬件架构、平台架构进行了论述,提出了电力运行数据池、大数据分析应用的技术思路;文献[19]提出了基于云计算的智能电网调度分布式计算框架,探讨了人工蜂群负载均衡策略;文献[20]提出了层次化分块设计方案,探讨了电网调度控制系统的节点资源弹性扩展方案。(2)分布式数据处理方案研究,如文献[21]提出结合遗传算法和 MapReduce 的并行计算方法,文献[22]提出分布式 SCADA 资源和任务管理策略,文献[23]提出基于演化博弈模型的实时数据处理任务调度策略,文献[24-25]提出基于云平台的量测数据验证、净化和处理策略。(3)云计算并行架构在电力系统计算中的应用研究,如文献[26]介绍基于 Google App Engine 的 InterPSS 软件实现电力系统潮流计算,文献[27]提出基于 Spark 内存计算框架的潮流优化算法,文献[28]提出基于容器的灾难恢复机制。

电力系统稳态分析应用有其自身的特点,包括:(1)有状态,即前后两次计算可能存在一定的继承性,需要暂存计算的结果为下次计算服务;(2)资源独占,计算耗时根据电网模型的规模在几秒到几十秒之间,此过程中计算实例不能为其他用户提供计算服务;(3)资源波动大,使用人员面向多级调度中心的业务人员,访问随机性高,资源使用波动大。云计算平台的海量存储、计算能力,以及容器及微服务技术对资源整合、应用部署维护的便捷性非常契合稳态分析计算本身的特点与跨区域大量复杂的计算需求。本文将云计算技术与跨区域大规模电力系统稳定分析服务相结合,设计了满足省地一体化业务需求的服务弹性调度方案,提出实现电力系统稳态分析服务的容器化封装、资源隔离和服务弹性调度方法,并通过项目实践和服务集群弹性扩展性能测试验证了方案的有效性。

## 1 系统架构

根据电力系统稳态分析应用的运行特点,服务弹性调度系统首先需要为每个服务实例分配一个独立的容器运行环境,包括计算、存储和网络通信均

与其他实例隔离,多人操作的不同实例之间不会相互影响;其次,当业务人员并发访问时需要服务弹性调度模块管理访问请求,对已经分配容器资源的用户自动引导其访问请求到对应容器的网络端口;对初次访问的用户,需为其创建电力系统稳态分析服务的容器运行环境并引导访问请求;对于系统管理员,需提供可视化运行监控界面,实时掌握系统容器实例的资源占用信息、服务实例运行情况等系统运行工况;最后,以上功能构建在云平台之上,因此需要适配不同类型的云平台,提高系统对底层平台的兼容性。服务弹性调度系统结构如图 1 所示。

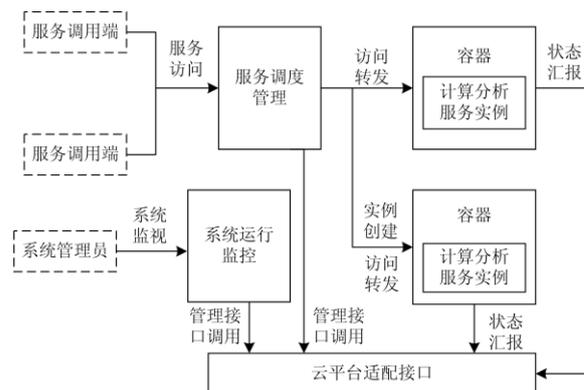


图 1 服务弹性调度系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of service scheduling management framework

电力系统稳态分析服务弹性调度系统是面向电网监控垂直领域的定制化任务调度解决方案,系统架构如图 2 所示。IaaS 层是基于虚拟化技术的计算、网络和存储资源池,实现了各类资源的灵活调配。PaaS 层分为基础组件和服务弹性调度组件,其中基础组件包括容器集群管理组件实现容器的组织和编排,微服务组件用于服务开发和状态追踪,内存数据库缓存实时数据,分布式数据库存储大量历史数据,分布式文件系统支撑容器数据持久化,对象存储用于模型和图形文件交互,用户身份鉴别对登录用户身份识别和鉴权,基于流式数据引擎对计算所需实时量测数据进行处理;以及服务弹性调度组件包括容器、资源隔离、服务弹性调度和运行监控。SaaS 层为容器化封装的各类电力系统稳态分析服务,比如调度员潮流计算、状态估计、安全核校等服务,以及面向各专业人员使用的电力系统稳态分析操作界面。

电力系统稳态分析服务弹性调度组件的功能如下:

### 1) 容器

容器是一种程序运行环境的隔离技术。本方案



图 2 系统架构图

Fig. 2 System architecture diagram

设计了电力系统稳态分析服务容器化封装方法，解决应用的状态持久化存储、运行生命周期管理、图模文件以及实时数据交互等方面问题。

2) 资源隔离

资源隔离模块通过容器和服务两个级别的资源隔离策略实现了容器资源的高效分配，其为电力系统稳态分析服务弹性调度的基础。

3) 服务弹性调度

服务弹性调度模块接收外部服务请求，完成服务定位、反向代理、将服务请求重定向到具体服务实例；同时可实现服务实例横向扩展、服务实例监视与回收等功能。

4) 运行监控

运行监控模块实现对服务集群、服务实例和外部请求对象的动态实时监控，为运维人员掌握电力系统稳态分析服务的状态提供可视化工具。

2 系统实现

2.1 容器化封装

电力系统稳态分析服务在容器中运行需要经历如图 3 所示的几个过程。首先是数据持久化存储提供计算所需的模型和断面数据，其次服务启动时完成数据初始化，当服务运行过程中需要监测健康状态，最后服务完成计算时保存数据。

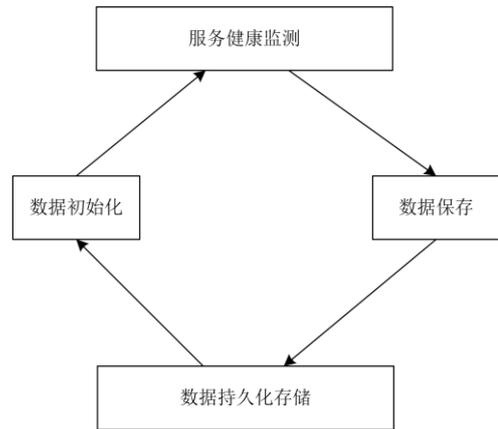


图 3 稳态分析服务容器化运行过程图

Fig. 3 Steady state analysis service running process in container

1) 数据持久化存储

以往电力系统稳态分析应用的计算结果按照固定格式存储在磁盘上的 Case 文件中，下次启动时可以根据调用者的要求加载上次分析结果 Case 文件中的数据继续分析。将电力系统稳态分析服务部署在容器中，就需要借助容器的 PVC (Persistent Volume Claim) 申请持久化存储 PV(Persistent Volume)，在本方案中采用云平台提供的分布式文件系统组件，比如 GlusterFS、CephFS 等，作为外部的持久化存储载体，将全局共享目录通过 PVC 技术映射到容器中服务的结果存储目录，当计算结果 Case 文件保存到结果目录中时，其实际上已经传输到云平台分布式文件系统管理的全局共享目录中，因此当容器退出或者重新初始化后此结果目录中的文件仍然存在，实现了持久化存储的目的。

2) 数据初始化

电力系统稳态分析服务计算前需要将 Case 文件数据加载到程序内存中，但不同的用户加载的 Case 文件不同，需要将实例当前调用者上次计算结果数据加载。通过在服务请求中解析出用户 ID，在服务保存数据的目录中建立此用户 ID 为目录名的子目录，并将用户数据保存在此目录下，下次加载时也通过用户 ID 作为索引找到带有此用户 ID 的子目录，加载其中的 Case 文件。由于采用数据持久化存储，此用户 ID 子目录创建后可以在调度员潮流服务容器实例停止后仍然保留，下次启动新的容器实例后还可以访问此用户的数据。

数据初始化流程如图 4 所示，当用户第一次使用服务，数据初始化程序为此用户创建用户子目录，此时需要用户自己选择当前实时断面分析或者系统某个历史断面，而如果用户已经使用过此服务，则

会默认加载此用户上次分析的结果 Case 文件。

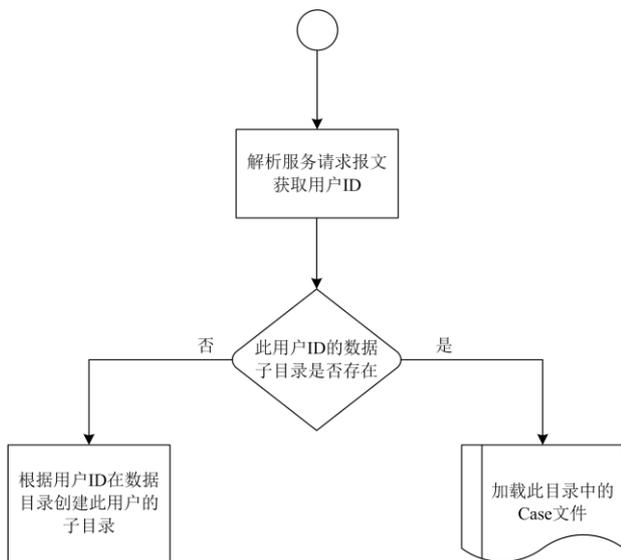


图4 数据初始化流程

Fig. 4 Data initialization flow chart

### 3) 服务健康监测

在服务运行过程中需要监测服务运行状态，从两个方面获取：第一，容器状态监测，通过调用容器集群管理组件的接口获取每个容器实例的状态，当处于运行状态(Running)时表示服务容器实例正常，当处于等待状态(Pending)表示容器还没有初始化完成，当处于正常终止状态(Succeeded)表示容器已经成功停止运行，当处于异常停止状态(Eailed)表示容器因内部运行状态异常而被系统停止；第二，采用心跳机制主动向服务弹性调度模块周期性汇报服务的运行状态，为此服务弹性调度模块可实现心跳报告接口，每个服务容器的实例调用此接口每 10 s 汇报一次状态，服务弹性调度模块在收到心跳报告后将状态和时标写入数据库，当连续三个周期无汇报时即可判定此服务容器已经异常并将异常状态写入数据库，流程图如图 5 所示。两种方法结合使用从容器实例和服务进程两个级别监视服务运行状态。

### 4) 数据保存

当电力系统稳态分析服务计算完毕或者收到服务弹性调度系统发来的停止信号后会立即将计算结果保存为 Case 文件，流程如图 6 所示。

## 2.2 资源隔离

电力系统稳态分析服务运行时基于独立的内存数据库计算，计算启动后占用内存、CPU 资源较高，因此需要资源隔离策略确保每个服务实例的运行不会影响到其他实例。

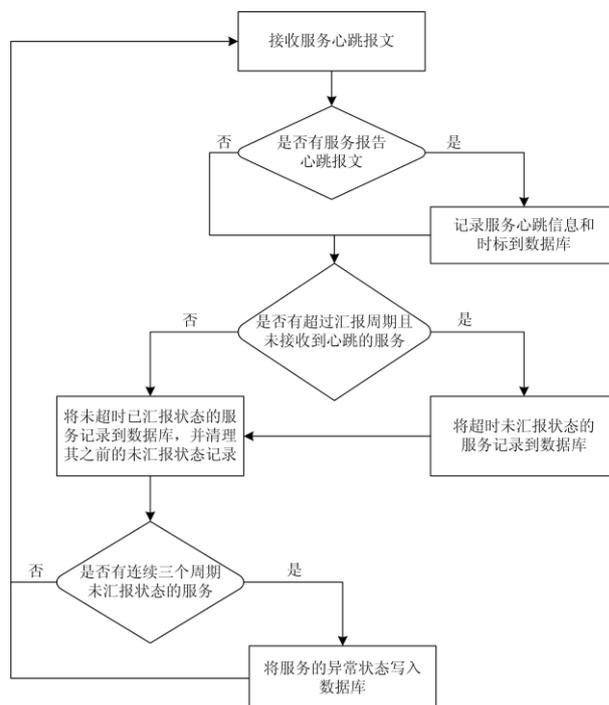


图5 服务健康监测数据流程图

Fig. 5 Service health monitoring flow chart

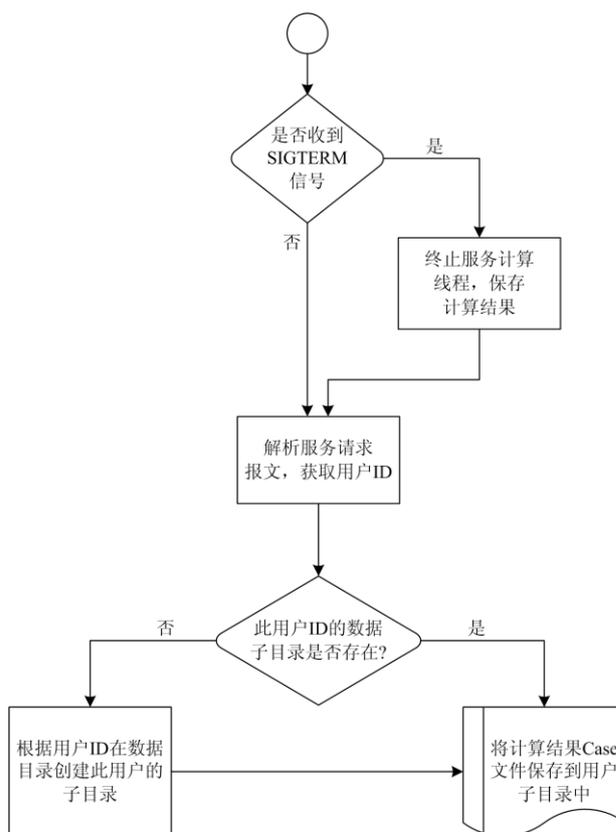


图6 数据保存流程

Fig. 6 Data saving flow chart

资源隔离的基础是容器运行环境，每个容器都可以通过设定 CPU、内存等的使用限制约束容器内程序的资源使用，不同容器间 CPU、内存资源不共用，当容器启动后按照初始值分配资源，随着程序的运行资源会占用的越来越多，当达到上限后容器将不再允许程序占用更多资源，从而达到资源隔离的目的。比如调度员潮流服务容器 CPU 资源设置的初始值为 0.25 个 CPU 内核，上限为 1 个 CPU 内核；省地一体化的潮流计算分析全省大模型，包含 3 513 个厂站、7 969 条线路的全省网络模型其实时库大概占用 3.5 GB 内存，容器内存资源设置的初始值为 0.4 GB，上限为 4 GB。

容器通过限值隔离资源是粗矿的管理方式，容易造成资源的浪费，实际每次稳态计算服务分析模型的范围不同所需要的资源差异很大，比如一个地调用户分析本地区的潮流就不需要加载全省模型，只需要地调调管区域内的模型和相关联区域联络线模型。为了更高效地使用资源，按照调管区域和联络线将模型数据分别存储于不同的内存库分区文件中，每个分区文件对应一个调管区域，联络线信息单独存储在一个分区文件中，服务启动时的数据初始化过程根据用户分析的范围决定加载哪些分区文件到内存中，从而减少实时库内存的占用量。以省地一体化潮流计算为例，如果用户分析一个地调范围的潮流，仅涉及 310 个厂站，几十条联络线，实时库加载相关分区内存占用量在 0.4 GB 以内，则服务运算过程中占用的内存将大幅减少近 90%，基于稳态服务级别的资源分配策略有效提升了资源的利用率，与容器级别的资源隔离策略相结合互为补充。

### 2.3 服务弹性调度

#### 2.3.1 调度算法

服务弹性调度模块是整个系统的核心，其负责从服务网关处接收服务请求，并根据请求的类型和用户信息将请求重定向到指定的服务实例中，其数据流图如图 7 所示。

Zuul 网关负责接收客户端发起的请求并将其转发给服务弹性调度模块，其判断此请求是否能够分配给已有的电力系统稳态分析服务实例还是需要新扩展一个容器实例，如果需要扩展则会调用容器集群管理组件的接口启动一个新的分析服务容器实例，设置容器资源初始值和上限值，服务数据初始化程序按照分析范围加载内存库分区实现资源集约分配，并将最终的请求分配信息写入到数据库中，同时将服务请求重定向到容器实例的服务端口，从而建立调用端到服务实例的链路。服务分发的具体流程如图 8 所示。

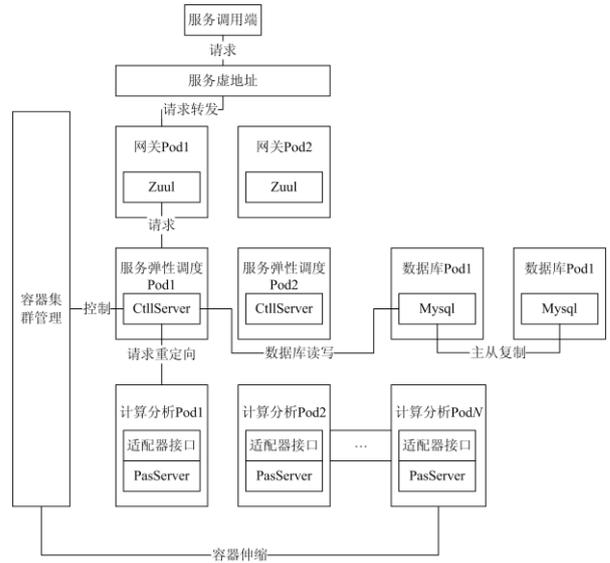


图 7 服务弹性调度数据流图

Fig. 7 Service elastic scheduling data flow chart

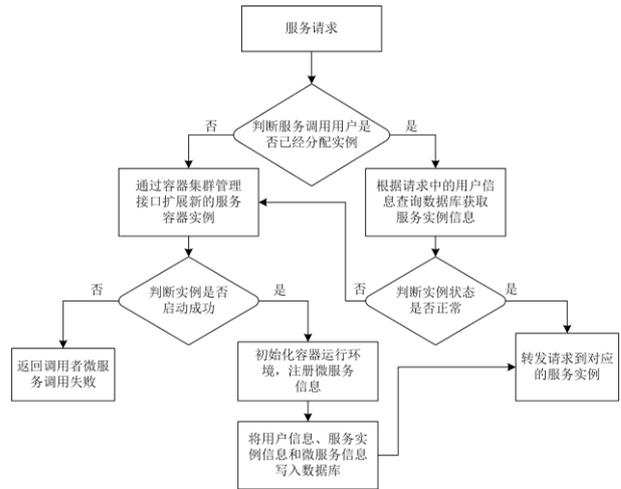


图 8 服务分发流程

Fig. 8 Service distribution flow chart

首先外部请求从微服务网关负载均衡分配到各个容器集群调度管理服务，再由容器集群调度管理服务负责将其分配到具体的计算节点，当新请求来到时，会通过基于随机高级 Petri 网计算适合启动新的容器服务的服务器。基于随机高级 Petri 网的模型如图 9 所示。

其中由于网关部分的负载均衡仅负责将请求分发到多个集群调度服务中，其耗时较短，且主要影响后续服务计算响应时间的为容器的调度策略，而每个集群调度服务都基于全局信息对所有计算节点进行容器调度，因此可以将此调度模型简化为如图 10 所示的简化模型。

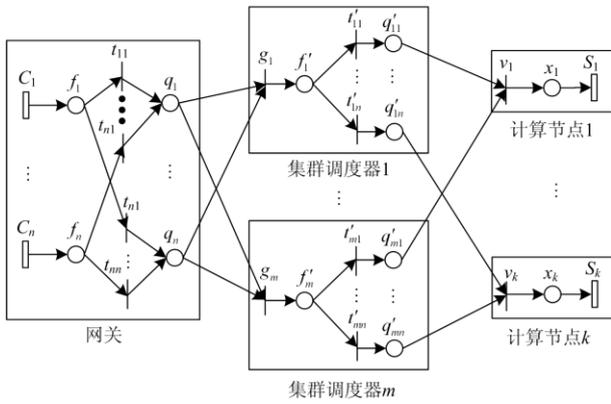


图 9 基于随机高级 Petri 网的模型

Fig. 9 Modeling based on stochastic high level Petri nets

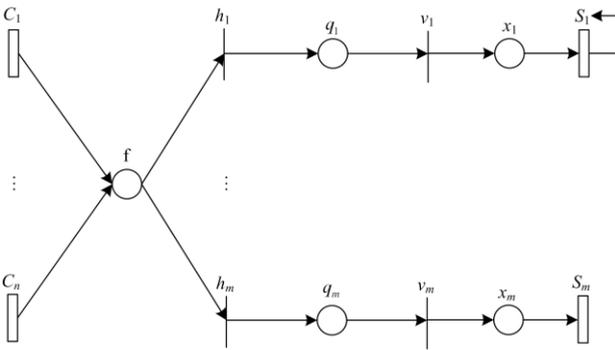


图 10 调度简化模型

Fig. 10 Simplified scheduling model

变迁  $h_i$  的可实施谓词  $g_i$  决定了外部请求进入的计算节点的任务队列  $q_m$ 。此谓词逻辑的基于动态反馈算法可表达如式(1)所示,其含义为将请求分配给平均负载小于负载容量且平均负载与主机动态权值之比最小的服务器。

$$\begin{cases} g_i : (L(m_i) < b_i) \cap (L(m_i) / w_i \leq L(m_j)) \\ L(m_i) = \frac{\sum_{j=1}^n Load(m_j)}{n} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $L(m_i)$  为  $m_i$  主机的平均负载;  $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$  且  $i$  与  $j$  不相等;  $Load(m_i)$  为主机  $m_i$  的瞬时负载采样。

变迁  $h_i$  的实施概率如式(2)所示。

$$P(h_i) = \begin{cases} \frac{1}{\|Q\|}, i \in Q \\ Q = \{k \mid L(m_k) = \min(\frac{L(m_1)}{w_1}, \frac{L(m_2)}{w_2}, \dots, \frac{L(m_n)}{w_n}) \text{ and } L(m_k) < b_k\} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $b_k$  为主机  $k$  的负载容量上限;  $w_n$  为主机  $n$  的动态权值,其计算方法如式(3)所示。

$$w_i = 100 / U_i \quad (3)$$

式中,  $U_i$  为主机  $i$  的当前活跃用户数,即活跃用户数越多的主机其权值越低。

### 2.3.2 监视与回收

在服务运行的过程中服务弹性调度模块周期性监测容器实例的状态和服务进程运行状态,当一个服务的两种状态均为正常时才能判定服务正常,否则启动服务异常回收流程。当服务调用完成后,将服务状态置为待回收。服务监视与回收流程如图 11 所示。

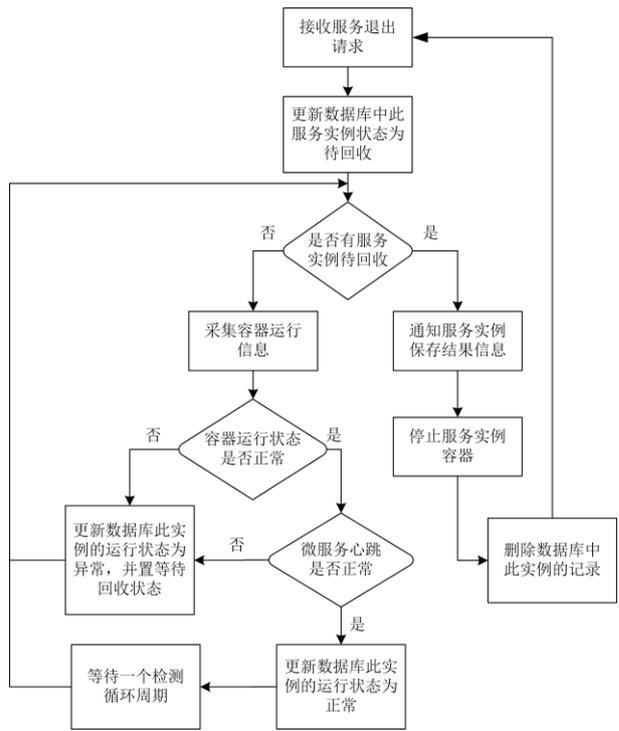


图 11 服务监视与回收流程

Fig. 11 Service monitoring and recycling flow chart

### 2.4 运行监控

运行监控模块提供当前部署的电力系统稳态分析服务集群、容器实例和调用关系的状态监视。通过调用容器运行状态监视接口获取容器集群节点、容器集群和容器实例的运行状态,通过数据库交互接口获取在线用户与服务实例调用关联信息。其中,在线用户监控界面如图 12 所示。

在线用户监视提供用户与服务实例间的调用关系信息,包括用户名、外部访问的 IP、分配的容器实例、登录的时间、当前的操作和操作时间等。它监视外部服务调用者跟服务实例之间的分配关系,并且随着外部请求的变化而实时更新。



用户名	用户ID	IP	分配宿群	宿群IP	登陆时间	当前操作	当前操作时间
lzu	f91fb7c1-2c7c-4635-901c-c9135d2ac26c	172.16.14.69	pas-msserver-0	10.0.61.3-8090	2020-03-10 13:20:15	UserLogin	2020-03-10 13:20:30
test1	c6483f6d-7786-450c-bf93-1a27fec6150	198.87.104.1	pas-msserver-0	10.0.61.3-8090	2020-03-04 23:26:13	UserLogin	2020-03-10 13:20:30
test10	9a49edfc-5855-463c-a6fa-63c80e272a33	198.87.104.10	pas-msserver-14	10.0.61.8-8090	2020-03-04 23:26:00	UserLogin	2020-03-04 23:26:02
test11	48ba63e6-b563-40a0-be77-c20136e73299	198.87.104.11	pas-msserver-2	10.0.61.4-8090	2020-03-04 23:26:05	UserLogin	2020-03-04 23:26:11
test12	c7474971-ce63-405f-8a94-561c5aca7f6e	198.87.104.12	pas-msserver-1	10.0.90.5-8090	2020-03-04 23:26:07	UserLogin	2020-03-04 23:26:13
test13	c71d9f1-587a-4f5d-861e-67b38dc0a78b	198.87.104.13	pas-msserver-2	10.0.61.4-8090	2020-03-04 23:26:01	UserLogin	2020-03-04 23:26:11
test14	5c3ca14b-c99a-4af0-b211-7a95a0b0c914	198.87.104.14	pas-msserver-19	10.0.90.13-8090	2020-03-04 23:26:00	UserLogin	2020-03-04 23:26:02
test15	a3e454a-67e2-4ca1-879e-28ca282d0641	198.87.104.15	pas-msserver-1	10.0.90.5-8090	2020-03-04 23:26:06	UserLogin	2020-03-04 23:26:13

图 12 在线用户监视

Fig. 12 Online users information

### 3 系统应用

#### 3.1 项目实践

本文描述的电力系统稳态分析服务弹性调度系统部署在一个由 7 台服务器组成的云计算环境中，单台服务器配置 4 颗 Xeon E7-4850v4 16 核处理器，256 GB DDR4 内存，在其上部部署基于 OpenStack 技术的 IaaS 虚拟化平台，在虚拟机中安装 CentOS7.4 操作系统以及 PaaS 层云组件。系统实现了状态估计、调度员潮流等电力系统稳态分析服务，通过服务弹性调度系统在虚拟机节点间实现按加权平均负载率的动态服务调度。服务面向调度中心各专业用户开放，业务人员通过 WEB 客户端远程使用云平台上的系统分析服务。以 1 个省级调度中心与 10 个地级调度中心的使用场景为例，本方案采用 7 台服务器搭建 IaaS 层虚拟化运行环境，其中 3 台节点为控制与存储节点，4 台节点为计算与存储节点，在计算与存储节点上部部署微服务集群为省调和地调提供电力系统稳态分析服务，服务器和后端资源同步与管理网络互连，实现云平台管理和数据存储的同步，与前端业务网络互连实现各个调度中心的用户终端对服务的访问，其物理部署图如图 13 所示。

传统方案与本方案对比如表 1 所示。

系统投入运行后提升了各级调度中心在面对电网运行动态特性越来越复杂情况下迅速调整电网运行策略的能力，保证电网公司为社会经济发展提供安全、经济、环保的电力供应服务。系统调度员潮流计算结果界面如图 14 所示。

#### 3.2 性能测试

通过并发测试程序在单虚拟机纵向扩展和多虚拟机横向扩展两个维度测试了离线调度员潮流服务并发访问情况下的扩展性能。虚拟机配置有 16 个 CPU 核，64 G 内存。单虚拟机扩展性能如图 15 所

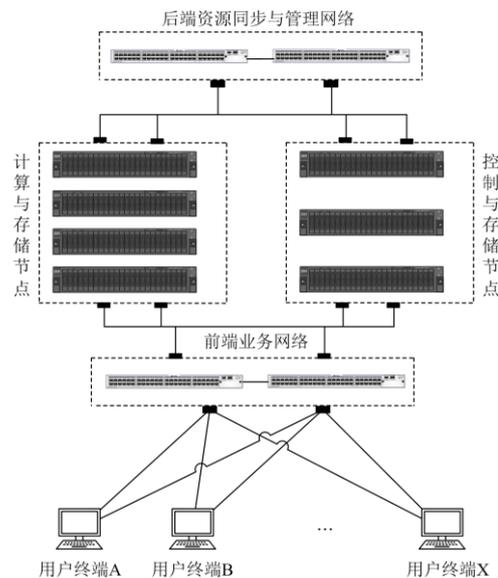


图 13 物理部署图

Fig. 13 Physical deployment diagram

表 1 传统方案与本方案的对比

Table 1 Comparison of traditional method and this method

比较项	传统方案	本方案
部署方式	每个调度中心单独部署，部署 11 套	集中在调控云部署一套系统
硬件资源	22 台服务器	7 台服务器
使用方式	需安装客户端软件，在本地局域网内使用	Web 访问，各级调度用户通过纵向网络访问调控云系统
远程访问	不支持	通过 VPN 访问
开放程度	专用接口开放程度低	微服务架构，方便第三方系统交互
可靠性	软件实现主备机制，缺乏底层支撑	云平台底层支撑高可用
扩展性	主备机模式，数据处理集中在值班节点，无法横向扩展	服务并发处理数据，借助于云平台水平扩展能力强



图 14 调度员潮流计算结果

Fig. 14 Dispatcher power flow calculation result

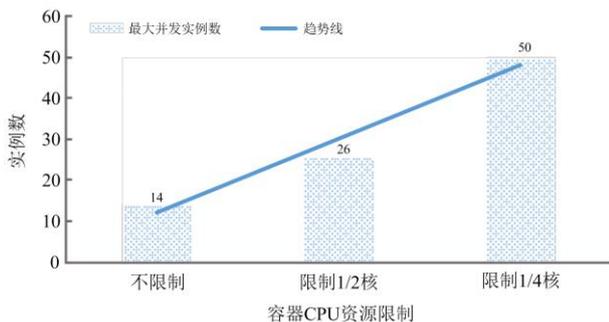


图 15 单虚拟机服务实例扩展性能

Fig. 15 Service instance extending performance of single virtual machine

示。在服务实例 CPU 占用率不限制的情况下,单机扩展极限到 14 个服务容器实例;当限制容器 CPU 占用不超过二分之一 CPU 核时,可将扩展极限提升到 26 个服务容器实例;当限制四分之一 CPU 核时,可扩展到 50 个服务容器实例。考虑到 PaaS 平台组件也要占用 CPU,基本上达到单机 CPU 性能极限。

横向扩展的性能测试结果如图 16 所示。在 1 到 10 台虚拟机参与测试的情况下,面对外部并发访问请求,服务容器的横向扩容能力基本上都达到了虚拟机 CPU 资源的上限。

在虚拟机环境中本方案与传统架构的性能比较如图 17 所示。由于传统方案采用主备机冗余模式,无法横向扩展,本方案多机并发最大实例数相较于传统架构有 8.5 倍的提升(此结果受测试环境限制,如果资源不断增加横向扩展的优势更加明显);单机情况下本方案采用容器资源隔离机制,对资源的调度更加精细化,并发实例数比传统方案高 2.3 倍。

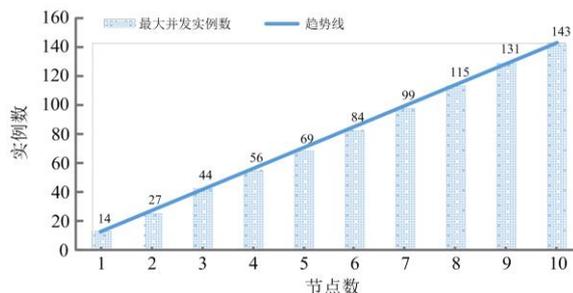


图 16 多虚拟机服务实例扩展性能

Fig. 16 Service instance extending performance of multi-virtual machines

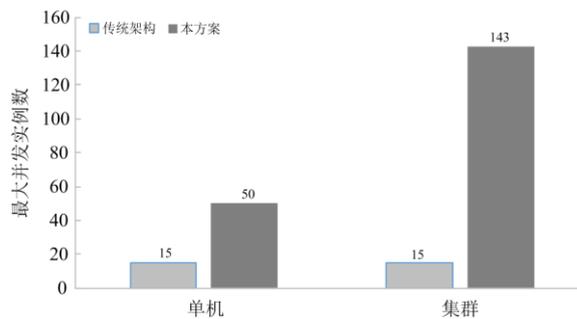


图 17 传统架构与本方案性能对比

Fig. 17 Performance comparison between traditional architecture and this method

## 4 结论

本文介绍的电力系统稳态分析服务弹性调度系统提供了面向稳态分析服务的有状态应用容器化封装模板,实现了基于容器集群的服务弹性调度以及服务运行状态的监控。系统在项目中得到验证,节省了大量的硬件资源并提升了各级调度中心的专业

分析能力,使用过程中系统稳定可靠运行。同时,在性能测试中服务弹性调度能够在并发情况下从纵向和横向扩展性方面达到硬件资源的极限,充分发挥了硬件资源的潜力,验证了系统架构良好的可扩展性。

### 参考文献

- [1] 张延,唐昊,王珂,等.考虑源荷随机性的跨区互联电网直流联络线调度学习优化[J].控制理论与应用,2019,36(7):1047-1056.  
ZHANG Yan, TANG Hao, WANG Ke, et al. Learning-based optimization of direct current tie-line dispatch for inter-regional power grid considering the stochasticity of source-load[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(7): 1047-1056.
- [2] 赵晋泉,张逸康,苏大威,等.交直流大电网调度自动巡航架构及关键技术[J].电力系统自动化,2019,43(22):187-193,216.  
ZHAO Jinquan, ZHANG Yikang, SU Dawei, et al. Architecture and key technologies of automatic cruise for AC/DC bulk power grid dispatching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 187-193, 216.
- [3] 赵晋泉,张强,方嵩,等.最小化用户停电损失的主动配电网黑启动分区优化策略[J].中国电力,2020,53(7):114-121.  
ZHAO Jinquan, ZHANG Qiang, FANG Song, et al. Optimization strategy for black-start partitioning of active distribution network to minimize customer outage cost[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 114-121.
- [4] 常康,徐泰山,郁琛,等.自然灾害下电网运行风险控制策略探讨[J].电力系统保护与控制,2019,47(10):73-81.  
CHANG Kang, XU Taishan, YU Chen, et al. Discussion of power system operation risk control strategy in natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 73-81.
- [5] 闪鑫,王轶禹,金一丁,等.特高压互联电网一体化监视和故障协同处置方案及应用[J].电力系统自动化,2018,42(2):84-91.  
SHAN Xin, WANG Yiyu, JIN Yiding, et al. Scheme and application of integrated monitoring and fault codisposal technology of UHV interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 84-91.
- [6] LI Lijuan, CHEN Yongdong, ZHOU Bin, et al. Linearization threshold condition and stability analysis of a stochastic dynamic model of one-machine infinite-bus (OMIB) power systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 242-252.
- [7] 唐成虹,李淑锋,陈永华,等.计及分布式电源的主动配电系统状态估计[J].广东电力,2021,34(3):60-67.  
TANG Chenghong, LI Shufeng, CHEN Yonghua, et al. State estimation of active distribution system considering DGs[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(3): 60-67.
- [8] 李静,李幸芝,韩蓓,等.考虑分布式电源不确定性与相关性的配电网状态估计[J].全球能源互联网,2020,15(3):231-237.  
LI Jing, LI Xingzhi, HAN Bei, et al. State estimation in distribution systems considering distributed generation uncertainties with correlations[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 15(3): 231-237.
- [9] 许丹,丁强,林星宇,等.基于离散傅里叶变换矩阵的概率最优潮流计算方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):9-16.  
XU Dan, DING Qiang, LIN Xingyu, et al. Probabilistic optimal power flow calculation method based on a discrete Fourier transformation matrix[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 9-16.
- [10] 刘峰.EMS高级应用软件实用化探讨—调度员潮流与安全约束调度[J].电力信息化,2007,5(11):55-58.  
LIU Feng. Discussion on the practicability of EMS advanced application software: dispatcher power flow and safety constrained scheduling[J]. Electric Power Information Technology, 2007, 5(11): 55-58.
- [11] 张浩.云计算环境下的电力任务节能调度方法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(13):128-134.  
ZHANG Hao. Research on power task energy saving scheduling method in cloud computing environment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 128-134.
- [12] 蒋越梅,卢敏,周浩涵,等.大电网事故预案推演系统的设计与实现[J].电力系统保护与控制,2021,49(3):142-149.  
JIANG Yuemei, LU Min, ZHOU Haohan, et al. Design and realization of an anticipated accident plan simulation system for a bulk power system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 142-149.
- [13] 康卓然,张谦,陈民权,等.适用于电力系统暂态稳定分析的网络电压解析算法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(3):32-38.  
KANG Zhuoran, ZHANG Qian, CHEN Minquan, et al. Research on network voltage analysis algorithm suitable for power system transient stability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 32-38.
- [14] 曲锐,王世荣,辛文龙.基于半监督MPSVM的电力系统暂态稳定评估[J].广东电力,2020,33(4):74-81.  
QU Rui, WANG Shirong, XIN Wenlong. Power system

- transient stability assessment based on semi-supervised and manifold proximal support vector machine[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(4): 74-81.
- [15] 蔡国伟, 张启蒙, 杨德友, 等. 基于改进深度置信网络的电力系统暂态稳定评估研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(3): 61-68.  
CAI Guowei, ZHANG Qimeng, YANG Deyou, et al. Research on power system transient stability assessment based on improved deep belief network[J]. *Smart Power*, 2020, 48(3): 61-68.
- [16] 张晶, 黄小锋. 一种基于微服务的应用框架[J]. *计算机系统应用*, 2016, 25(9): 265-270.  
ZHANG Jing, HUANG Xiaofeng. Application framework based on micro-service[J]. *Computer Systems & Applications*, 2016, 25(9): 265-270.
- [17] 许洪强, 姚建国, 於益军, 等. 支撑一体化大电网的调度控制系统架构及关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(6): 1-8.  
XU Hongqiang, YAO Jianguo, YU Yijun, et al. Architecture and key technologies of dispatch and control system supporting integrated bulk power grids[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(6): 1-8.
- [18] 梁寿愚, 胡荣, 周华锋, 等. 基于云计算架构的新一代调度自动化系统[J]. *南方电网技术*, 2016, 10(6): 8-14.  
LIANG Shouyu, HU Rong, ZHOU Huafeng, et al. A new generation of power dispatching automation system based on cloud computing architecture[J]. *Southern Power System Technology*, 2016, 10(6): 8-14.
- [19] 马斌, 袁龙, 刘文宗, 等. 基于云雾计算的智能电网调度机制[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(24): 67-72.  
MA Bin, YUAN Long, LIU Wenzong, et al. Distribution mechanism for smart grid based on cloud-fog computing[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(24): 67-72.
- [20] 谭军光, 于全喜, 孔海斌, 等. 城市电网调度控制云系统总体架构设计[J]. *自动化技术与应用*, 2019, 38(5): 67-69, 86.  
TAN Junguang, YU Quanxi, KONG Haibin, et al. Overall architecture design of urban power network dispatching control cloud system[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2019, 38(5): 67-69, 86.
- [21] 党晓婧, 邓世聪, 吕启深, 等. 基于云计算的全维度设备状态维护系统研究[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(5): 8-13.  
DANG Xiaojing, DENG Shicong, LÜ Qishen, et al. Research on full-dimensional device status maintenance system based on cloud computing[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(5): 8-13.
- [22] 郑宗强, 翟明玉, 彭晖, 等. 电网调控分布式 SCADA 系统体系架构与关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(5): 71-77.  
ZHENG Zongqiang, ZHAI Mingyu, PENG Hui, et al. Architecture and key technologies of distributed SCADA system for power dispatching and control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(5): 71-77.
- [23] 熊文, 于全喜, 吴任博, 等. 基于演化博弈的弹性调控平台任务调度研究[J]. *计算机工程*, 2019, 45(7): 86-94.  
XIONG Wen, YU Quanxi, WU Renbo, et al. Research on task scheduling of flexible regulation and control platform based on evolutionary game[J]. *Computer Engineering*, 2019, 45(7): 86-94.
- [24] WANG P, DONG L, XU Y, et al. Clustering-based emotion recognition micro-service cloud framework for mobile computing[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 49695-49704.
- [25] 王纪军, 张斌, 顾永生, 等. 云环境中 Web 应用的微服务架构评估[J]. *计算机系统应用*, 2017, 26(5): 9-15.  
WANG Jijun, ZHANG Bin, GU Yongsheng, et al. Evaluation of micro-service architecture for web application in the cloud[J]. *Computer Systems & Applications*, 2017, 26(5): 9-15.
- [26] 李祥瑞. 利用云计算进行电力系统潮流计算[J]. *智慧城市*, 2019, 5(4): 5-7.  
LI Xiangrui. Power flow calculation of power system using cloud computing[J]. *Intelligent City*, 2019, 5(4): 5-7.
- [27] 化振谦, 卢世祥, 阙华坤, 等. 基于弹性分布数据集和有向无环图的潮流优化云计算系统设计研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(23): 161-166.  
HUA Zhenqian, LU Shixiang, QUE Huakun, et al. Design and research of power flow optimization cloud computing system based on elastic distribution data set and directed acyclic graph[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(23): 161-166.
- [28] 刘伟佳, 李博权. 容器技术在 DRaaS 中的应用研究[J]. *微电子学与计算机*, 2018, 35(6): 52-55.  
LIU Weijia, LI Boquan. Application research on container technology in DRaaS[J]. *Microelectronics and Computer*, 2018, 35(6): 52-55.

收稿日期: 2021-06-17; 修回日期: 2021-07-26

作者简介:

孙超(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事分布式计算与实时数据处理领域的研究工作。E-mail: sunch\_2002@hotmail.com

(编辑 魏小丽)