

# 云计算:构建未来电力系统的核心计算平台

赵俊华<sup>1</sup>, 文福拴<sup>1</sup>, 薛禹胜<sup>2</sup>, 林振智<sup>1</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

**摘要:** 针对传统电力系计算平台在计算、存储、信息集成和分析等方面的不足,提出建立基于云计算的电力系计算平台。首先概述了云计算的基本概念和主要特征,并比较了云计算和另一种大规模分布式计算模式——网格计算的不同。从物理组成、系统架构、软件技术等方面详细讨论了电力系云计算平台的实现。之后,展望了云计算在电力系安全分析、潮流与优化潮流计算、系恢复、监控、调度、可靠性分析等领域的应用前景。最后,讨论了电力系云计算研究中有待解决的几个重要问题。

**关键词:** 云计算; 电力系; 智能电网

## 0 引言

随着电力系互联程度的加强和远距离输电系的不发展,能覆盖一个甚至多个国家的超大规模电力系正在不断出现。电力系规模的不断扩大和结构的日趋复杂使得安全评估、安全与经济运行、系控制变得越发困难。此外,最近 2 年在世界范围内成为热潮的电力系“智能化”趋势也给现有的电力系分析计算和控制工具带来了极大挑战。根据美国能源部的定义<sup>[1]</sup>,智能电网应具有若干重要特征:有很强的自愈性,并能够抵御外来攻击;能有效支持大规模的间歇性可再生能源和分布式电源的接入;能保证供电的可靠性和电能质量;能促进电力市场的公平和有效运行;能促进用户参与等。要满足上述要求,未来的电力系调度中心应具有强大的计算能力和信息集、成、分析功能。现有的集中式电力系计算平台难以满足上述要求,这已经成为了实现智能电网的主要瓶颈之一。

电力系分析与计算的特点是计算任务种类繁多且对实时性要求很高。在很多情况下,为了实现在线计算,不得不对问题的数学模型作大量简化,这自然就牺牲了计算结果的准确性。对一些计算量很大的分析计算,如长过程动态仿真,通常只能进行离线计算,其结果是所产生的控制策略只对预先设定的工况有效,而难以应对各种突发事件。目前电力系的分析计算一般依赖于调度中心的集中式计算平台,对于大规模电力系,其计算能力受限,且

可扩展性差,升级成本高。未来的电力信息系统面临的另一个重大挑战是数据存储和分析能力的严重不足。现有的数据采集与监控(SCADA)系在采集数据时一般止于变电站级别,且数据采样频率较低。在未来的电力系中,不仅 SCADA 系的采样频率需要明显提高,电力系数据采集的范围也将大大扩展。相量测量单元(PMU)、智能电表,甚至各种智能家电的嵌入式系都可能向调度中心提供大量的实时系信息。由上述各种传感器所组成的数据采集网络所产生的数据量将是非常惊人的,以电力系现有的信息处理能力将不足以完成对海量数据流的存储和分析功能。总之,电力系现有的计算和信息处理平台不足以支持智能电网的实现,构建新的电力系计算平台就成为值得考虑的重要问题。

云计算(cloud computing)是近年来得到快速发展的一种崭新的计算模式,是若干新计算技术的统称。到目前为止,对于云计算,尚没有来自权威机构的标准定义。一般认为,云计算代表了一种基于 Internet 的大规模分布式的计算模式<sup>[2]</sup>。云计算首先利用 Internet 将各种广域异构计算资源整合,以形成一个抽象的、虚拟的和可动态扩展的计算资源池;再通过 Internet 向用户按需(on demand)提供计算能力、存储能力、软件平台和应用软件等服务。通过建立电力系云计算平台,可以有效整合系中现有的计算资源,为各种分析计算任务提供强大的计算与存储能力支持。云计算能支持各种异构计算资源,与集中式的超级计算机相比,其可扩展性很强,且可以在现有计算能力不足时方便地升级。此外,与传统的计算模式相比,云计算还具有便于信息集和分析,便于软件系的开发、维护和使用等优

收稿日期: 2010-06-19; 修回日期: 2010-07-16。

高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200805610020)。

点。总之,建立基于云计算的电力系统核心计算平台,可以有效解决前已述及的未来电力系统在计算和信息处理方面所遇到的一些重要挑战。本文下面将针对云计算的定义、特征、技术、体系结构、在电力系统中的研究和应用前景等问题进行详细讨论。

## 1 云计算概述

### 1.1 定义与主要特征

由于云计算仍处于其发展的早期阶段,其定义还在不断的发展和完善之中。文献[2]中所给出的定义如下:云计算是一种大规模分布式计算模式;通过云计算可以形成一个抽象的、虚拟的、可动态扩展的资源池,该资源池可以通过 Internet 向用户按需提供计算能力、存储能力、开发平台和软件等服务。

与传统的计算模式相比,云计算有以下几个主要特征<sup>[2-5]</sup>:

#### 1)能够整合大规模异构计算资源

传统的分布式计算一般仅能应用于一个小范围的计算网络(如局域网),且对计算资源的同构性要求较高,难以处理在计算和存储能力、操作系统、开发平台等方面存在很大差异的计算资源。而通过云计算则可以整合分布在一个广阔地域内的、分属于若干个组织的计算资源,形成一个功能非常强大的计算和存储平台。另外,云计算并不要求计算设备在硬件或软件上具有很强的共性,绝大部分计算设备都可以被整合成为云计算平台的一部分。

#### 2)易于动态扩展

可扩展性是云计算与传统计算模式相比的最大优势之一。由于云计算能够集成硬件种类、网络类型、操作系统、软件平台等各不相同的各种计算设备,因此,在需要时云计算平台的计算和存储能力可以得到方便和快速的扩展。与传统计算平台需要几天甚至几个星期的系统升级时间相比,云计算平台的升级一般仅需要几分钟<sup>[4]</sup>,且可以在不影响系统整体运行的情况下动态进行。此外,云计算平台可以建立在现有的硬件基础上,在升级时也只需按照需求增添相应的设备,而不需要像升级传统计算平台那样将设备完全更换,从而可节省大量硬件购置成本。

#### 3)虚拟化与服务

虚拟化也是云计算的一个重要特征。无论一个云计算平台实际整合了多少计算设备,在用户看来其就是一个单一实体,也是获得计算服务的唯一接口。由于应用了虚拟化技术,云计算平台既可以将多个计算任务放在同一台功能强大的设备(如大型工作站)上运行,也可以将一个计算任务拆分成若干

部分,分别在多台设备上运行。这样,就可以最大限度地利用系统内的闲置计算资源。此外,通过利用虚拟化技术,云计算平台可以根据客户的需求动态分配计算资源和构造系统平台。此外,若干设备的故障不影响云计算平台整体运行,也不会中断向用户提供服务。

云计算可以利用虚拟化技术将各种不同类型的计算资源抽象成服务的形式向用户提供。一般将服务分为3个不同的层次,分别称为基础设施级服务(infrastructure as a service, IaaS)、平台级服务(platform as a service, PaaS)和软件级服务(software as a service, SaaS),统称为 XaaS<sup>[5]</sup>。IaaS 根据用户需求向用户动态分配计算和存储能力。通过 IaaS,用户相当于获得了一台计算和存储能力可以实时扩展的超级计算机。PaaS 在 IaaS 的基础上,还向用户提供了一个用于软件开发和测试的平台。用户可以通过 Internet 直接在 PaaS 提供的平台上开发应用软件,并可以很方便地将软件发布在云计算平台上供其他用户使用。SaaS 则是在 IaaS 的基础上,让用户可以通过 Internet 直接访问云计算平台上的应用软件,而不需要在本地计算机上安装该应用软件,这免去了用户安装、维护、升级本地应用软件的麻烦。在这方面,XaaS 带来的最大好处在于用户绝大部分的计算任务都将在云计算平台上完成。因此,用户终端不再需要有很强的计算和存储能力,只要能够接入 Internet,就可以方便地使用云计算平台上的各种软件。具体到电力系统,研究或系统运行人员可以基于云计算平台的 XaaS 功能,利用多种不同的终端,如台式计算机、便携式计算机甚至手机,在任意地点完成各种电力系统分析任务或实时监控整个电力系统的运行状况。

#### 4)以 Internet 为基础的通信平台

与传统分布式计算不同,云计算通过 Internet 进行各个设备之间的通信。由于 Internet 已经有了非常成熟的标准、体系和技术,这在很大程度上保证了云计算系统通信的可靠性和安全性。此外,由于云计算建立在国际通行的通信协议的基础上,这使得其易于与各种流行的软件开发技术集成。

#### 5)有很强的规模经济效益

经济效益是推动云计算研究与应用的重要动力。现代电力系统中存在大量闲置的计算和存储资源。利用云计算可以将闲置资源整合,减少在信息设备上的投入。前已述及,在需要升级时,云计算平台的投资一般也大大低于传统计算平台。此外,目前各省电力公司都有各自独立的计算平台,且功能非常相似。这造成了电力信息系统的重复建设和资

源浪费。未来可以考虑将各个独立的计算平台进行整合,形成区域性甚至全国性的电力系统云计算平台。这样做可以大大减少整个电力系统在信息系统方面的投资。另一方面,也有利于促进各省级电力系统之间的协作和信息共享,实现大范围内电力系统的安全与优化运行。

## 1.2 云计算和网格计算的比较

云计算常常被与另一种分布式计算模式,即网格计算相互混淆。从计算模式发展历史的角度看,云计算是传统分布式计算和网格计算的进一步发展。虽然云计算与网格计算都涉及到利用虚拟化技术整合计算资源,但两者的抽象层次明显不同。网格计算主要关注基础计算设施,其目的仅限于将计算和存储资源整合以处理对计算资源要求很高的任务,这相当于云计算中的 IaaS 服务。云计算则将系统平台和软件也抽象成服务提供给用户。这除了能提供更强的计算能力,还能改变传统的软件开发、维护、升级和用户使用的模式,提高信息系统的总体使用效率,同时减少信息系统投资。具体地讲,云计算和网格计算还在下述几个方面存在显著区别:

### 1) 商用模式

现有网格计算的商用模式是面向项目的(project-oriented)。一个网格计算平台通常是为了某个特定的计算任务而建立的,其整合的计算资源一般也仅用于解决该特定任务。这样的模式较为适合非盈利性的科学计算任务<sup>[2]</sup>。与网格计算不同,在云计算中,由于提高了抽象程度,其成为一个通用的计算平台,这使得很多用户的应用软件都可以通过云计算平台这个单一的门户进行访问。云计算平台将在各个软件之间动态地分配计算资源,以实现资源的优化配置。

### 2) 数据本地性

对于云计算和网格计算这样的 Internet 级别的分布式计算,由于整合了众多的计算设备,计算能力已不再是制约计算速度的瓶颈。由于数据在 Internet 上的通信时间通常要大大超过数据在单机系统中的通信时间,因此,尽量缩短数据在 Internet 上的通信时间就成为了提高计算速度的关键。云计算在存储数据时,一般采用分块(chunk)存储方式<sup>[2,6]</sup>。在分配计算任务时,如果一个计算任务需要访问某特定数据块,云计算会将该任务尽量分配给和存储该数据块的节点最接近的节点。这就是所谓的数据本地性(data locality)原则。这样,云计算可以更好地解决数据通信时间问题。另一方面,现有的网格计算平台一般采用共享文件系统(shared file system)的形式存储数据<sup>[2]</sup>,这导致网格计算

平台难以根据数据本地性原则来分配任务,从而降低了计算速度。

### 3) 软件开发和使用的便利性

前已述及,云计算和网格计算的一个显著区别在于云计算的抽象层次更高。云计算将系统平台和应用软件也抽象成了服务。更通俗地讲,云计算为应用软件的开发者提供了统一的开发和发布软件平台。开发者在开发软件时,可以不用再顾及软件在不同硬件和操作系统上的兼容性问题。在发布软件时,只要发布到云计算平台上,所有用户就可以通过 Internet 使用软件。这样就大大降低了软件开发、维护和升级的难度。此外,SaaS 使用户可通过各种终端在任意地点随时使用云计算平台上的软件,这也为用户提供了很大的便利。而这些优点是网格计算所不具备的。

### 4) 安全机制

在网格计算中,资源和数据是所有用户共享的。用户可以通过凭证代理(credential delegation)的方式访问网格内的所有资源<sup>[7]</sup>。而云计算则通过分割(isolation)为每一个用户创造一个相互独立的虚拟环境,并完全屏蔽虚拟环境之间的相互访问。由于云计算仍处于发展阶段,其安全机制较网格计算相对简单。这样,云计算的安全问题也是未来云计算研究的重点之一。

## 2 电力系统云计算的实现

### 2.1 电力系统云计算平台的架构和技术实现

云计算平台是由通过 Internet 相互连接的多种设备和用户组成的一个复杂实体(见图 1)。从总体上讲,云计算平台可以分为 2 个主要部分,即云计算控制中心和被云计算平台整合的各种计算资源。云计算控制中心的主要功能是根据用户的请求,将用户的计算任务分成若干子任务,再动态地将各子任务通过 Internet 分配给被云计算平台整合的计算设备。各子任务完成后,其计算结果将通过 Internet 重新汇总到控制中心,最后再反馈给用户。此外,云计算控制中心还负责将各种需要存储的数据通过 Internet 分配给各数据存储设备,并在需要时重新将数据从存储设备中读取出来。利用虚拟化和分割技术,上述计算和数据存储任务的调度分配过程对用户而言是完全不可见的。云计算平台为每一个用户都创造了一个完全独立的虚拟系统环境,因此,在每一个用户看来,自己都是云计算平台唯一的用户。用户可以通过多种不同的终端,例如:台式计算机、便携式计算机、手机甚至智能家电接入云计算平台。这让云计算平台的使用非常方便。

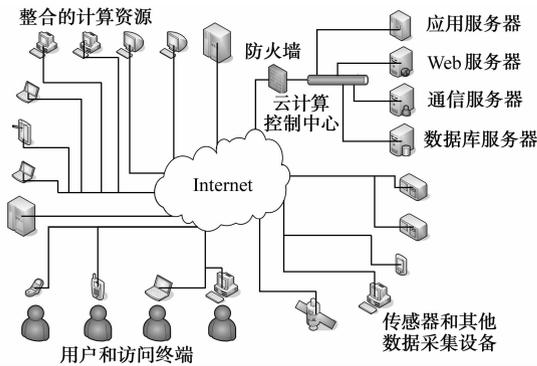


图1 云计算的组成

Fig. 1 Structure of cloud computing

云计算平台通过 Internet 与由大量传感器和其他数据采集设备组成的数据采集网络相连接。对电力系统而言,未来的数据采集网络既包括传统的 SCADA 系统的传感器,还可能包括 PMU 和安置在终端用户家中的智能电表,甚至是各种智能家电的嵌入式系统。这些装置能够提供全方位的系统信息。此外,电力系统云计算平台也可以和其他的数据源,例如:区域气象数据库相互连接,以获取温度、湿度、风速、日照等数据。由这样一个大规模的网络所采集的数据量将是惊人的,只有凭借云计算平台强大的计算能力才能进行存储和分析。考虑到很多电力系统分析任务对实时性要求较高,可以考虑构造专用高性能网络来连接云计算平台和数据采集网络,以提高数据传输的可靠性。

电力系统云计算平台的系统架构如图 2 所示。

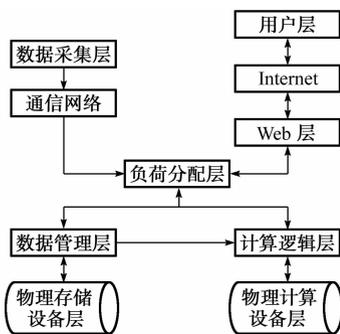


图2 电力系统云计算平台的系统架构

Fig. 2 System architecture of the cloud computing platform for power systems

从系统架构的角度看,云计算平台主要由 Web 层、负荷分配层(load balancer)、数据管理层、计算逻辑层(computing logic)、物理计算设备层和物理存储设备层组成。其中,Web 层负责实现云计算平台的 Web 站点,该站点是用户访问云计算平台的唯一接口。负荷分配层是云计算平台的核心部件。该层具有 4 个主要功能:①将用户的计算任务划分成

若干部分,并决定执行每一个任务的计算设备;②将待存储的数据划分成若干部分,并决定相应的存储设备;③将计算逻辑层返回的计算结果整合后,再反馈给用户;④根据数据读取请求,指令数据管理层读取数据,并将数据整合后输出。计算逻辑层负责根据负荷分配层确定的计算任务分配方式,控制具体的计算设备进行计算,并在计算完成后返回结果。数据管理层则主要控制数据存储设备进行数据读写操作。上述 4 层组成了云计算平台的软件部分。物理计算设备层和物理存储设备层代表了云计算平台所整合的所有物理设备,它们组成了云计算平台的硬件部分。

下面讨论几种可应用于实现电力系统云计算的重要软件技术。

#### 1) 面向服务架构

云计算的一个重要特点是可以在线扩展和升级,这就对软件的灵活性提出了更高的要求。面向服务架构(service oriented architecture, SOA)是近年来发展迅速的一种软件设计方法<sup>[5]</sup>。与在传统软件设计方法中以函数或类作为基本功能模块、以应用程序接口(application programming interface, API)作为程序间通信手段不同,SOA 以服务为基本功能模块。与函数相比,服务代表更高层次的应用需求(例如:从读取数据库到打印数据报表的整个流程可以抽象成一种服务,而数据库的读取操作则只能是函数)。SOA 根据用户需求,将每一种主要功能都包装成服务的形式,且各服务相互独立,仅以可扩展置标语言(extensive makeup language, XML)进行通信。当任何一种功能需要更新时,只需要更换相应的服务即可。此外,基于 SOA 架构,可以将若干服务自由组合,以快速形成新的系统。例如:可以将潮流计算包装成一个服务,这样对于任何需要进行潮流计算的任务,只需要将潮流计算服务和其他相关服务在线组合即可。可见,应用 SOA 可以极大地提高系统的灵活性和软件开发升级的速度。当然,提高软件的抽象层次一般是以牺牲通信效率为代价的。总结软件开发方法的发展历史可知,从面向过程到面向对象,再到面向服务,软件开发的总体发展趋势就是抽象层次的不断提高,这和软件本身的复杂性不断提高是相适应的。随着电力系统的不断发展,电力信息系统本身的功能不断增多,结构日趋复杂,这会利用传统开发方法的开发人员带来越来越大的困难。因此,提高软件开发的抽象层次是一个必然趋势。对于通信效率问题,可以通过适当定义服务的抽象层次以求得平衡。

## 2) Apache

Apache 是目前应用最广泛的 Web 服务器端软件,其支持所有主流的 Web 服务器功能,如网站内容管理、服务器端编程、流量管理、网址重写(URL rewriting)、安全传输层(transport layer security, TLS)和安全套接层(secure socket layer, SSL)加密等。由于 Apache 系开源软件,其源代码完全公开并可以免费使用,因此,可用于实现云计算平台的 Web 层功能。

## 3) MySQL

MySQL 是世界上应用最广泛的开源数据库引擎,具有高可靠性、高扩展性和完全免费等优点,因此,在超过数百万的网站和公司中得到了广泛应用。可用 MySQL 实现云计算平台的数据管理层功能。

## 4) 动态负荷分配

负荷分配算法是云计算的核心。动态负荷分配(dynamic load balancing)已经被证明是一类较为有效的分配计算任务的算法<sup>[8-9]</sup>。其基本原理是根据各个计算设备的计算速度快慢动态分配任务;计算速度快的设备分配的任务较大,速度慢的则分配的较小,以保证各计算设备基本上同时返还结果。对于大规模云计算平台,还可以考虑使用任务复制(job replication)的方法来提高可靠性,也即将每一个子任务复制若干份,发给多个计算设备同时执行,从而避免因某个设备发生故障而需要重新分配子任务所导致的整体计算效率被拖慢的情况。

除了上面讨论的内容外,目前还存在多种可用于实现云计算的商用或开源软件技术,如 Google MapReduce、Google File System (GFS)、微软的 Dryad/DryadLINQ、开源分布式计算框架 Hadoop 等。考虑到电力系统是国家重要基础设施,我们认为电力系统云计算平台的实现应尽量以开源软件技术为基础。

## 2.2 云计算在电力系统中应用的展望

如前所述,由于云计算具有计算和存储能力强、系统可动态扩展、便于计算资源共享和优化配置、便于软件开发和升级、便于用户使用等诸多优点,其在电力系统中有广阔的应用前景。下面讨论电力系统分析中可以应用云计算的几个重要领域。

### 1) 安全分析

时域仿真是电力系统暂态稳定分析的重要途径之一。然而,对于大规模电力系统而言,时域仿真的计算量很大,因此,目前尚只能应用于离线分析。到目前为止,已经提出了多种基于并行和分布式技术的暂态稳定时域仿真算法。例如,文献[10]应用功

能分解和域分解法(functional decomposition and domain decomposition)在集群机上进行暂态稳定分析;文献[11]应用网络分解法实现了小系统的实时仿真;文献[12]提出了一种考虑大规模网络特性和多个控制中心协作的分布式时域仿真算法。未来可望利用云计算进一步提高对大系统进行暂态稳定时域仿真的速度,以最终实现在线分析。

另一个适于应用云计算的是概率小干扰稳定分析。传统的小干扰稳定分析一般是确定性的,这与电力系统运行所固有的随机性是矛盾的。利用 Monte Carlo 仿真可以方便地处理小干扰稳定分析中的随机因素,但这种方法对计算平台的计算和存储能力要求很高。文献[13]提出了一种基于网格的概率小干扰稳定分析方法,其中的实验结果表明:分布式概率小干扰稳定分析较串行分析在计算速度方面有较大提高。在 Monte Carlo 仿真中,每一轮仿真是相互独立的,这使得问题可以分解为大量子问题,从而可以充分利用云计算平台的并行计算能力。

### 2) 潮流与最优潮流计算

云计算也可用于提高潮流和最优潮流计算的速度。文献[14]提出了一种基于牛顿法的并行潮流解法,主要适用于通信延迟较少的计算平台,如集群机。文献[15]提出了一种可以计及预想事故的最优潮流并行算法,将需要考虑的预想事故分为若干组,分别分配到多个处理器上作并行分析。文献[16]提出了基于微分进化(differential evolution)的并行最优无功潮流算法,利用分解与协调技术将问题划分为若干个子问题分别在多个处理器上并行求解。可以预期,在云计算环境下将现有方法改进可以进一步提高计算速度。例如:基于文献[15]的思想,在云计算平台上通过将需要考虑的预想事故进一步细分,可以大大提高计算速度和能够处理的预想事故数目。

概率潮流是考虑电力系统运行不确定性的重要工具<sup>[17]</sup>。和概率稳定问题相似, Monte Carlo 仿真也可以应用于概率潮流之中。考虑到应用于大系统时 Monte Carlo 仿真的计算量很大,概率潮流也是云计算可以应用的问题之一。

### 3) 系统恢复

大停电后的电力系统恢复是一个很复杂的非线性优化问题。电力工业的市场化运营、远距离互联电力系统的发展、大量分布式电源接入电力系统,这些都在某种意义上给电力系统恢复问题带来了新的挑战。文献[18]提出了基于网格的电力系统恢复方法,可以在电力系统恢复过程中促进不同参与者之

间的信息共享和协作,并利用分布式计算提高计算效率。云计算作为电力系统所有成员共享的计算平台,可以更好地促进信息共享和协作,其计算能力也有助于找到复杂互联系统的最优恢复方案。

#### 4) 监控和调度

随着电力工业市场化改革的深化和分布式电源不断引入电力系统,未来电力系统可能从集中式控制向分布式控制逐渐转变<sup>[19]</sup>。通过统一的电力系统云计算平台可以促进各分布式控制中心的信息共享和协作。对大量的小容量分布式电源的监视和控制将成为未来电力系统面临的一个难题。由于未来电力系统中分布式电源的数量可能很大,系统调度和运行控制的计算量将会明显增加,利用云计算则可以较好地解决计算能力不足的问题。云计算很强的可扩展性也有利于随时根据电力系统的规模动态增强计算能力。此外,目前已经提出了基于网格计算的大规模电力监控系统<sup>[20]</sup>。利用云计算的信息处理能力有助于实现包括配电系统在内的大范围实时监控和信息采集。

#### 5) 可靠性评估

传统的电力系统可靠性评估一般采用确定性方法,且通常考虑系统最坏的情况,这就导致较为保守的评估结果和偏高的运行成本。为了计及电力系统运行中的不确定性,到目前为止已经提出了多种概率可靠性分析方法<sup>[21-22]</sup>。然而,与概率稳定性分析类似,计算效率也是制约概率可靠性分析的瓶颈。文献<sup>[23]</sup>提出了基于网格计算的概率可靠性分析方法,其实验结果表明分布式计算方法可以大大提高 Monte Carlo 仿真过程的计算速度。利用云计算可望进一步提高概率可靠性分析的计算速度,以适应系统规模不断扩大所带来的挑战。

上面讨论了云计算技术可望在电力系统中获得应用的几个领域。事实上,由于云计算是一个通用的计算工具,很多电力系统分析软件都可以发布到云计算平台上。如前所述,这将给软件的开发、升级、维护和使用带来很大的便利。此外,云计算也有利于电力系统的各类成员共享信息和协作。总之,构建统一的计算平台将是未来电力系统计算的一个重要发展方向。

### 2.3 电力系统云计算研究的挑战

目前,云计算仍然处于发展之中,还存在一些没有得到很好解决的技术问题。为了实现云计算在电力系统中的成功应用,下面一些问题有待深入研究。

#### 1) 与云计算相适应的电力系统分析并行算法

与传统的集群或小规模分布式计算平台不同,云计算平台可以集成在物理上分布极广的大量计算

设备。此外,集群和小规模分布式计算以集中式数据存储和内部网络为基础,这和云计算主要采取分布式存储和利用 Internet 通信也有显著不同。上述云计算的几个特点决定了现有的并行和分布式电力系统分析算法无法有效发挥云计算平台的计算能力。新的并行算法应针对云计算的特点来设计。例如:新算法应将问题划分为尽量小的子问题,因为组成云计算平台的部分设备计算能力较低,可能无法处理较大的子问题而长时间遭到闲置。还有,由于云计算利用 Internet 进行通信,其通信延迟较高,因此,新算法应尽量减少各设备间的通信。需要指出,减少设备间通信与对新算法的细粒度要求并不矛盾。云计算应首先估计每个计算设备的计算能力,在此基础上确定分配给每个设备的计算任务量,计算能力强的设备应分配较多的子任务计算量,这样也可以减少设备间的通信。此外,由于云计算采取分布式数据存储方式,为了减少数据传输,新算法应尽量采取“就近处理”方式。需要强调的是,与分布式计算和网格计算类似,云计算针对特定计算任务的效能也受到算法能否并行化的制约,因此,在提高算法并行度的同时应尽量减少网络通信是设计云计算算法时应该遵循的原则。

#### 2) 云计算负荷分配算法研究

集群或小规模分布式计算平台一般由性能接近的计算设备组成,这使得它们可以较为简单地处理负荷分配问题。与此相反,组成云计算平台的计算设备可能在计算和存储能力、操作系统、软件平台等方面差别极大。为此,云计算平台就需要对各个设备的计算能力进行监视和预测,并根据其计算能力按比例分配子任务,以使分配到不同设备的子任务的计算时间尽量接近。此外,云计算的负荷分配算法还必须适当考虑 Internet 通信延迟和数据分布式存储的特点。

#### 3) 适用于电力系统的云计算平台物理结构设计

云计算平台的物理结构对其运行性能会有很大的影响。这样,在设计电力系统云计算平台时就必须认真考虑电力系统的特点。例如:电力系统的大量数据来自变电站和配电系统,考虑到 Internet 的通信延迟,为了减少数据传输,应就近设置数据存储设备,并基于数据本地性原则,为数据存储设备配置相应的计算设备。为了解决通信延迟问题,可以为云计算平台的核心部分(如控制中心)建立专用的高性能网络。此外,在设计云计算平台时,还需要考虑怎样布置区域云计算数据中心和中央云计算调度中心,以更好地满足对数据吞吐量、计算精度和拓扑广阔度的需求。出于上述考虑,应改变目前电力系

统规划和电力信息系统规划相互孤立的模式,将2种规划统一进行,以提高计算系统的效率。

#### 4) 电力系统云计算的安全性

安全性是云计算理论研究和实践中需要解决的重要问题。由于电力系统是重要基础设施,保障电力信息系统的安全性就显得尤为重要。此外,由于电力系统云计算平台可能包括电网公司、发电公司、市场监管机构、投资者、用户等在内的众多不同类型的用户,如何在促进信息共享的同时保障信息安全是电力系统云计算必须解决的重要问题。另一方面,云计算利用 Internet 将计算资源互联,并通过标准化接口进一步弱化了硬件与操作系统对软件的约束。这虽然为软件开发和使用提供了便利,却也造成了数据在 Internet 上的频繁流动,进而对数据的安全性问题提出了更高的要求。

### 3 结语

云计算是近年来发展迅速的超大规模分布式计算技术。通过集成大量异构的分布式计算资源,云计算平台具有强大的计算和存储能力。建立电力系统云计算平台对解决电力系统各种复杂的计算问题提供了新的途径,有助于实现电力系统在线运行分析与优化控制。

云计算平台除了能为电力系统分析提供计算和存储能力支持外,还具有可扩展性强、硬件投资少、便于软件开发和升级、便于用户使用等诸多优点。这使得云计算有望取代现有的集中式计算成为未来电力系统核心计算技术。

云计算在电力系统分析中的潜在应用领域包括安全分析、潮流和最优潮流计算、系统恢复、监控、调度、可靠性分析等很多方面。此外,利用 SaaS 技术,很多电力系统分析软件都可以发布到云计算平台上,从而有望建立基于云计算的电力系统统一计算平台。

云计算技术还在不断发展之中,而其在电力系统中的应用则刚刚起步。与云计算相适应的电力系统分析并行算法、云计算的负荷分配、云计算平台的设计和云计算的安全性等将是未来电力系统云计算研究需要重点解决的核心问题。

### 参考文献

[1] National Energy Technology Laboratory, United States Department of Energy. A vision for the modern grid [R/OL]. [2010-05-25]. [http://www.bpa.gov/energy/N/smart\\_grid/docs/Vision\\_for\\_theModernGrid\\_Final.pdf](http://www.bpa.gov/energy/N/smart_grid/docs/Vision_for_theModernGrid_Final.pdf).

[2] FOSTER I, ZHAO Y, RAICU I, et al. Cloud computing and grid computing 360-degree compared// Proceedings of Grid

Computing Environments Workshop, November 12-16, 2008, Austin, TX, USA: 1-10.

[3] VAQUERO L M, RODERO-MERINO L, CACERES J, et al. A break in the clouds: towards a cloud definition. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2009, 39(1): 50-55.

[4] GEELAN J. Twenty one experts define cloud computing, virtualization [J/OL]. [2010-05-20]. <http://virtualization.system.com/node/612375>.

[5] RITTINGHOUSE J W, RANSOME J F. Cloud computing: implementation, management, and security. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.

[6] DEAN J, GHEMAWAT S. MapReduce: simplified data processing on large clusters. Communications of the ACM, 2008, 51(1): 1958-2008.

[7] Members of EGEE-II. An EGEE comparative study: grids and clouds-evolution or revolution [R/OL]. [2010-05-20]. <https://edms.cern.ch/document/925013/>.

[8] ATTIYA H, HAMAM Y. Two phase algorithm for load balancing in heterogeneous distributed systems// Proceedings of the 12th Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing: PDP'04, February 11-13, Noisy-Le-Grand, France: 434-439.

[9] DOBBER A M, KOOLE G M, VAN DER MEI R D. Dynamic load balancing for a grid application// Proceedings of International Conference on High Performance Computing: HiPC'04, December 19-22, 2004, Bangalore, India: 342-352.

[10] ALOISIO G, BOCHICCHIO M A, LA SCALA M, et al. A distributed computing approach for real-time transient stability analysis. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 981-987.

[11] HOLLMAN J A, MART J R. Real time network simulation with PC-cluster. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 563-569.

[12] CHEN Y, SHEN C, WANG J. Distributed transient stability simulation of power systems based on a Jacobian-free Newton-GMRES method. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(1): 146-156.

[13] XU Z, ALI M, DONG Z Y, et al. A novel grid computing approach for probabilistic small signal analysis// Proceedings of IEEE PES General Meeting, June 19, 2006, Montreal, Canada: 18-22.

[14] FENG T, FLUECK A J. A message-passing distributed-memory parallel power flow algorithm// Proceedings of IEEE PES Winter Meeting, January 27-31, 2002, New York, NY, USA: 211-216.

[15] WEI Q, FLUECK A J, FENG T. A new parallel algorithm for security constrained optimal power flow with a nonlinear interior point method// Proceedings of IEEE PES General Meeting, July 12-15, 2005, San Francisco, CA, USA: 447-453.

[16] LIANG C H, CHUNG C Y, WONG K P, et al. Parallel optimal reactive power flow based on cooperative co-evolutionary differential evolution and power system decomposition. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1):

249-257.

- [17] ALI M, DONG Z Y, LI X, et al. A grid computing based approach for probabilistic load flow analysis// Proceedings of IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, October 30-November 2, 2006, Hong Kong, China.
- [18] WANG H, LIU Y. Power system restoration collaborative grid based on grid computing environment// Proceedings of IEEE PES General Meeting, July 12-16, 2005, San Francisco, CA, USA; 644-649.
- [19] ZHOU H F, WU F F, NI Y X. Design for grid service-based future power system control centers// Proceedings of IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, October 30-November 2, 2006, Hong Kong, China.
- [20] TAYLOR G A, IRVING M R, HOBSON P R, et al. Distributed monitoring and control of future power systems via grid computing// Proceedings of IEEE PES General Meeting, June 17-23, 2006, Montreal, Canada.
- [21] ZHANG P, LEE T, SOBAJIC D. Moving toward probabilistic reliability assessment methods// Proceedings of Eighth International Conference on Probabilistic Methods Applied to

Power Systems, September 12-14, 2004, Ames, IA, USA; 906-913.

- [22] BILLINTON R, LI W. Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods. New York, NY, USA: Plenum Press, 1994.
- [23] ALI M, DONG Z Y, LI X, et al. RSA-grid: a grid computing based framework for power system reliability and security analysis// Proceedings of IEEE PES General Meeting, June 17-23, 2006, Montreal, Canada.

赵俊华(1980—),男,博士,现在博士后流动站从事研究工作,主要研究方向:电力系统分析与计算、智能电网、随机方法在电力系统中的应用、电力经济与电力市场。E-mail: fuxiharp@gmail.com

文福拴(1965—),男,通信作者,特聘教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统故障诊断、系统恢复和电力市场。E-mail: fushuan.wen@gmail.com

薛禹胜(1941—),男,中国工程院院士,国网电力科学研究院名誉院长,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: xueyusheng@sgepri.sgcc.com.cn

## Cloud Computing: Implementing an Essential Computing Platform for Future Power Systems

ZHAO Junhua<sup>1</sup>, WEN Fushuan<sup>1</sup>, XUE Yusheng<sup>2</sup>, LIN Zhenzhi<sup>1</sup>

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Because of the continuous expansion of modern power systems, ever increasing computation and data processing capabilities are demanded for power system analysis. The existing computing platform of power systems, however, cannot meet these computational requirements. Given this background, an advanced power system computing platform based on cloud computing is developed. The basic concepts and main technical characteristics of cloud computing are introduced first. The cloud computing is then comprehensively compared with another large-scale distributed computing technology, namely grid computing. From aspects of the hardware components, system architecture and software technology, the implementation of power system cloud computing is presented in details. The potential applications of cloud computing in a number of areas, including power system security assessment, power flow and optimal power flow computation, system restoration, system monitoring and control, scheduling and reliability assessment, are clarified. Several important research problems to be resolved are finally discussed.

This work is supported by the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (No. 200805610020).

**Key words:** cloud computing; power systems; smart grid

## 江苏智能电网产业联盟在南京成立

江苏智能电网产业联盟于2010年7月12日在江苏省南京市成立,江苏省委副书记、省长罗志军为智能电网产业联盟揭牌。在智能电网产业成立大会上,副省长史和平、国家电网公司总信息师吴玉生、国网电力科学研究院院长/南京南瑞集团公司总经理肖世杰讲话。国家电网公司智能电网部主任王益民作“智能电网产业发展展望”专题报告,中国工程院院士、国网电力科学研究院名誉院长薛禹胜作“智能电网为保障我国能源安全及环境安全提供重要支撑”专题报告。大会表决通过《江苏智能电网产业联盟章程》,南瑞集团当选秘书长单位,南瑞集团总经理肖世杰当选秘书长。智能电网产业联盟将发挥江苏在有关领域的研发和制造能力,在智能电网发电、输电、变电、配电、用电、调度及通信信息各环节形成的先发优势,大力发展江苏战略性新兴产业,推动江苏产业结构调整和优化升级。