

基于云计算的大电网在线分析计算模式研究

根据我国电网调度自动化系统广域分布、调度信息分层管理的特点及大电网在线分析软件的计算规模、计算性能等需求,以云计算技术及“调度云体系架构”为基础,提出大电网在线分析软件的广域多级分布式并行计算模式及其协调管理服务需求。为了适应云计算环境的可扩展性,简化大电网在线分析软件设计流程,提高软件开发效率,提出了基于面向服务架构(SOA)的大电网在线分析3层服务封装,满足不同用户对大电网在线分析软件的需求。最后以分解协调潮流计算为典型应用,提出了基于广域多级分布式并行计算模式的拓扑分析服务和潮流服务程序设计方案。

熊力 桂胜 凌智/北京中电普华信息技术有限公司
张大华/中国电力科学研究院



熊力/工程师

关键词/Keywords

云计算·
调度云·
分布式并行计算·
分解协调计算·

随着特高压互联大电网的建设,使得各大区域电网之间的联系越来越紧密,电网规模也越来越大,越来越需要跨区域、跨电压等级的协作。电力数据量的增加和电网计算规模的不断扩大,对电力调度系统的数据存储能力以及大电网在线分析的计算能力提出了更高的要求,需要各级调度机构共同构建电网的基础数据,完成各类分析计算任务。研发电力系统云计算中心,实现全网模型数据的统一管理和及时维护、分析计算的异地多人协作、资源的按需灵活分配,将成为未来电网计算模式发展的重要方向^[1]。

本文将基于“调度云体系架构”构建基于云计算技术的大电网在线分析计算模式,并提出支撑该计算模式的协调服务方案,为基于调度云平台的大电网在线分析软件设计和开发提供理论和技术支撑。

“调度云”体系架构

1. 调度云简介

调度云是将云计算理念应用于电力系统调度领域的一种新的IT基础架构管理和交付方式。通过调度数据网络将分布于各调度中心的应用、数据及IT资源整合形成一个抽象的、虚拟的和可动态扩展的调度资源池,以“需则可用”的方式为模型管理、方式计算、调度计划以及调度管理等业务应用快速提供所需的计算、存储等各类服务。根据目前国网省地等各级调度的实际情况,调度云系统将是“物理分布,逻辑统一”的。

“调度云体系架构”共分为4层:基础设施层(相当于IaaS层)、资源管理层(相当于PaaS层)、调度云服务层(相当于SaaS层)和调度应用层(对应调度技术支持系统的4类应用)^[2]。基础设施层主要包括各类调度基础设施;资源管理层实现各调度业务服务中心逻辑上的统一,从而满足调度系统越来越强烈的协调、高效、可靠以及控制成本等需求;调度云服务包括数据云服务、模型云服务、搜索云服务和计算云服务等,为调度应用层提供数据模型支持;调度应用层利用桌面云技术使原来独立的调度系统由统一的云终端替代。

2. 调度系统的计算机集群

在我国电网的5级调度机构中,电网运行涉及的大部分重要功能是在省、地两级调度机构实现的,大区级控制中心主要负责省间协调,国家级控制中心负

责大区电网之间的协调^[3]。我国智能电网调度技术支持系统根据调度机构分层建设,每个系统都拥有自己的计算机集群,且这些集群间由电力通信网连接,每级调度系统的计算机集群都是调度云的子集群,如图1所示。

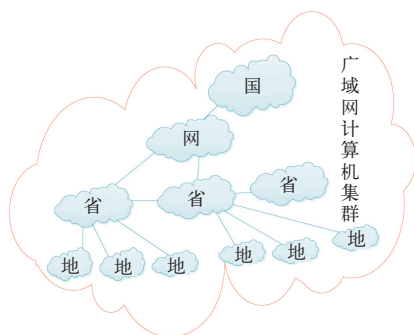


图1 计算机集群分布图

大电网在线分析软件计算模式

1. 分布式并行计算方法

通过对大电网在线分析分布式并行计算方法的调研,根据其功能和处理数据的不同特点,大致可以分为3类。

1) 大电网在线分析采用并行数学方法求解方程。代数方程组或微分方程组的求解是许多电力系统分析计算的核心问题,其并行求解方法可以分为两类:直接法和迭代法^[4]。直接法以矩阵分解、矩阵求逆等数学原理为基础。较典型的迭代法有雅可比和高斯-塞德尔法等,均可直接并行化。

2) 大规模电力网络的分块计算^[5]。网络分块法的基本思想是把大电网分解成若干规模较小的子网, 对每个边界的子网分别进行等值计算, 然后在求解出分割边界的协调变量, 最后求解各个子网的内部变量, 得到合理全系统的解。网络分块法可以分为两类, 节点撕裂法和支路切割法。文献[6]介绍了分解协调潮流计算, 文献[7]介绍了分解协调状态估计, 文献[8]介绍了分解协调暂态稳定仿真计算。

3) 根据输入数据划分计算任务。例如静态安全分析的每个预想事故分析都是一次潮流计算,且预想故障间无直接关系,可分成 N 个扫描任务,由多个进程并行完成潮流计算。96点安全校核也

可采用类似方法。

根据大电网在线分析和调度系统分层分布的特点,结合云计算技术,以面向服务架构为基本思路,本文在调度云体系架构基础上,提出了一种适用于大电网在线分析软件的计算模式,即广域多级分布式并行计算模式。

2. 广域多级分布式并行计算模式

广域多级分布式并行计算模式的实现可以分为3个层次。

1) 单机并行计算模式。将任务分解成若干子任务,由单台计算机内部的多个CPU、多个核进行并行计算。

2) 调控中心内部的多级分布式并行计算模式。调控中心的计算机通过网络连接, 由调度云平台统一管理, 大电网在线分析软件通过调度云平台提供的管理服务, 将计算任务分配到不同计算机上执行, 由云平台的协调管理服务完成集群内分布式并行计算的作业管理。

3) 广域分布式并行计算模式。使用各级调度自动化系统提供的大电网在线分析计算服务, 将大型计算任务分配给不同的调度系统, 利用各级调度机构的电网模型和电网数据, 实现在广域调度数据网上的分布式并行计算。

此外，在线分析软件可以根据实时性要求，计算速度、准确度要求，结合数据和计算特点，采用多级调度系统协同计算的广域多级分布式并行计算的模式，完成大电网在线分析计算。例如，全网96点安全校核，以潮流计算服务为基础， $N-1$ 扫描服务为依托，将全国96点安全校核计算任务分布到各网省调度系统进行广域分布式并行协调计算。广域多级分布式并行计算模式架构如图2所示。

广域多级分布式并行计算模式以单机、集群内和集群间3层分布式并行计算为基础,基于数据云服务、模型云服务、计算云服务和搜索云服务等实现广域多级分布式并行计算模式。大电网在线分析软件根据其计算规模、计算性能、计算准确度和实时性要求等特点,选择合适的计算模式。

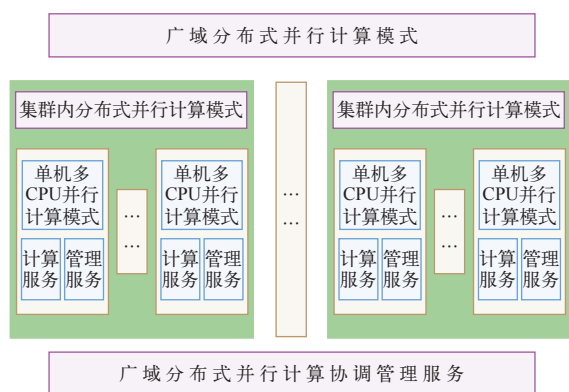


图2 广域多级分布式并行计算模式架构图

3. 广域多级分布式并行计算模式的特点

根据电力通信网的通信水平、调度系统的分层架构以及在线分析软件分布式计算通信频率和通信数据量，可以对广域多级分布式并行计算模式的特点总结如下。

1) 单机多CPU并行计算模式适用于计算量适中、并行任务颗粒度小和实时性要求高的大电网在线分析计算，如省网级的状态估计计算、调度员潮流计算和静态安全分析计算等。

2) 集群内分布式并行计算模式适用于计算量较大、计算任务多、并行任务颗粒度中等和实时性要求一般的大电网在线分析计算。如省级96点安全校核计算、全国电网的网络分析计算等。

3) 广域分布式并行计算模式适用于计算量超大、计算任务超多、并行任务颗粒度大和实时性要求低的大电网在线分析计算，如66/110 kV及以上等级的国家级96点安全校核等。

广域多级分布式并行计算模式采用分布式计算技术和并行计算技术，以服务形式为大电网在线分析软件提供支撑，能够降低分布式并行计算软件的设计开发难度，提高软件执行效率，充分利用调度云平台提供的全局共享数据，提高大电网在线分析的计算准确度，解决一体化电网分层分级调度带来的电网边界计算残差问题。

4. 广域多级分布式并行计算模式的协调管理

根据广域多级分布式并行计算模式在硬件资源、数据资源、程序作业和分布式并行算法4方面的需求，可将协调管理服务分成4部分。数据模

型管理服务即面向多级调度的大电网分布式并行计算数据维护、存储和共享服务；计算资源管理服务即面向多级调度的调度云平台计算资源的统一分配和管理服务；作业管理服务即面向多级调度的大电网分布式并行计算作业的运行与管控服务；分布式并行计算服务即基于SOA的面向多级调度的大电网分布式并行计算服务封装。

计算资源管理服务通过利用虚拟化技术将计算机、网络和存储设备等硬件通过虚拟化技术映射成虚拟资源，调度系统的资源可以被应用环境共享。该服务能够为大电网在线分析软件动态分配硬件资源，实现对调度云平台资源的按需分配和快速部署，并保证资源利用最大化。计算资源管理服务是作业管理的基础，为各级任务提供计算资源，是广域多级分布式并行计算模式的硬件基础。

数据模型管理服务将各调度机构提供的采集数据、电网模型和电网图形，按照“源端维护、全局共享”的原则，利用海量数据存储技术，进行全局统筹建设，实现电网模型和数据的全局一体化维护和管理。该服务为大电网在线分析软件提供所需的电网模型和运行方式数据，是广域多级分布式并行计算模式的数据基础。

作业管理服务是广域分布式并行计算协调管理的核心，可分为3项功能。

1) 作业分配。主要负责发起计算任务、任务负载均衡等方面问题。该功能以计算资源管理服务和数据模型管理服务为基础，根据软件计算需求，分配可用硬件及数据、调度进程作业。

2) 作业协调。主要负责作业调度和任务通信两方面问题。

3) 作业监视。负责检查点切取、进程迁移和容错性等方面的问题。利用多集群作业管理技术，一方面可以有效避免个别任务执行异常，通过任务转移及任务恢复策略提高系统的可用性；另一方面能够充分利用调度云平台系统资源，通过计算资源管理服务将作业分散到空闲的服务器上，提高资源的利用率和作业的执行效率。

分布式并行计算服务通过分析比较在线分析

软件各功能模块的特点,发现有许多功能是相同或类似的。例如电网拓扑分析、稀疏矩阵存储、潮流计算和矩阵运算等。利用分布式计算技术、并行计算技术,采用SOA的服务化理念对共有功能进行服务封装,以“服务包”的方式提供给大电网在线分析软件的开发者,将极大地提高软件开发升级的速度,降低分布式并行软件的开发难度,适应软件的在线扩展和升级,提升在线分析服务的灵活性。

5. 大电网在线分析软件计算模式的服务封装

面向服务架构(Service Oriented Architecture, SOA)是以服务为基本功能模块,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^[9]。大电网在线分析计算模式的服务封装可以分成以下3个层面。

1) 计算模式服务封装。通过对广域多级分布式并行计算模式的协调管理服务接口进行封装,为大电网在线分析服务提供开发基础。

2) 大电网在线分析服务封装。对大电网在线分析功能模块进行服务封装,例如对拓扑分析、稀疏矩阵存储和潮流计算等功能的服务封装,为用户提供大电网在线分析计算功能。

3) 面向用户的在线分析人机服务封装。通过可视化的人机界面为最终用户提供大电网在线分析计算服务与智能调度。

典型应用

大电网在线分析潮流计算程序按功能划分可以分为以下4大模块。

1) 数据读取。获取电网模型及电网运行方式。

2) 电网拓扑分析。根据电网结线连接关系和断路器/隔离开关的分/合状态,形成状态估计计算中使用的母线-支路计算模型。

3) 潮流计算。利用潮流分解协调算法进行分布式并行潮流计算。

4) 潮流计算结果输出。存储并展示潮流计算结果。根据程序的功能划分和数据划分,潮流程序4大功能模块可以采用分布式并行计算的方法。

以潮流计算为例,采用分解协调潮流算法,基于广域多级分布式并行计算模式,设计潮流程序,利用其协调管理服务,实现拓扑分析、潮流计算服务封装。

1. 潮流分解协调计算模型

潮流方程的残差形式可以表示为

$$\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2)$$

P-Q分解潮流计算修正方程一般可以简写为

$$\Delta P/U = -B'U\Delta\delta \quad (3)$$

$$\Delta Q/U = -B''\Delta U \quad (4)$$

式(3)、式(4)是线性方程组,可以采用节点分裂法进行分解协调计算^[10],式(3)、式(4)可以表示为 $Bx=b$ 。根据全网拓扑分析结果,按节点分裂法可将修正方程系数矩阵变换为

$$\begin{pmatrix} B_{11} & & & B_{1t} \\ & B_{22} & & B_{2t} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & B_{kk} & B_{kt} \\ B_{t2} & B_{t2} & \cdots & B_{tk} & B_{tt} \end{pmatrix}$$

修正方程 $Bx=b$ 可表示为

$$\begin{pmatrix} B_{11} & & & B_{1t} \\ & B_{22} & & B_{2t} \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & B_{kk} & B_{kt} \\ B_{t2} & B_{t2} & \cdots & B_{tk} & B_{tt} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \\ x_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \\ b_t \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, $B_{11}, \dots, B_{kk}$ 是子系统的系数矩阵; b_i 是协调矩阵, x_k 表示电压和相角修正量。

式(5)中,第*i*个系统的修正量 x_i 可以用下式求出

$$B_{tt}x_i = b_i - B_{it}x_t \quad i=1,2,\dots,k \quad (6)$$

而协调块矩阵所对应的方程组为

$$\sum_{i=1}^k B_{it}x_i + B_{tt}x_t = b_t \quad (7)$$

消去式(5)中第1~*k*个子系统所对应的网络,只保留分裂点*t*相对应的部分,得到协调系统方程组为

$$\tilde{B}_{ii}x_i = \tilde{b}_i \quad (8)$$

其中:
$$\begin{cases} \tilde{B}_{ii} = B_{ii} - \sum_{i=1}^k B_{ii}B_{ii}^{-1}B_{ii} \\ \tilde{b}_i = b_i - \sum_{i=1}^k B_{ii}B_{ii}^{-1}b_i \end{cases}$$

用式(8)求得分裂节点电压和相角修正量 b_i ,各个子网络的节点电压和相角修正量可用式(6)求得。由于各子系统被分裂点隔开,所以消去某一系统节点时不会对其他子系统产生影响,只会对边界点的系数矩阵产生影响。

2. 潮流计算程序

基于潮流分解协调分布式计算模型,利用协调管理服务,潮流程序流程设计如下。

调控中心用户发起全网潮流计算请求,调度云潮流计算服务根据各级调控中心的调度范围划分计算任务,并将计算任务下发给各集群。任务发起集群负责潮流协调层和其所辖子系统的计算任务。

1) 数据读取。各子系统接收到任务后,开始读取所辖电网模型和运行数据,并将各自的电网边界信息发送协调层,协调层利用数据模型管理服务,读取各子系统边界的电网模型和方式数据。

2) 拓扑分析。拓扑分析可以分为厂站母线分析和系统网络分析^[11],厂站母线分析根据站内设备静态连接关系和遥信状态,形成计算母线模型,每个厂站的母线拓扑分析是相对独立的,因此可以采用并行计算的方法。系统网络分析通过分析整个电网的母线由闭合支路连接成多少个子电网,而各个调控中心的电网相对独立,通过边界联络线连接,因此各个调控中心的系统网络分析也是相对独立的,可以采用广域分布式并行计算模式,在不同集群中完成全网拓扑分析。各子系统独立进行分布式并行拓扑分析,并通过协调层拓扑分析得到子系统边界的拓扑关系,形成全网拓扑分析结果。并根据拓扑关系,确定各子系统节点排序和边界节点排序。分布式并行拓扑分析程序框图如图3所示。

该拓扑分析经服务封装后,可以为其他大电网在线分析软件提供分布式并行拓扑分析服务。

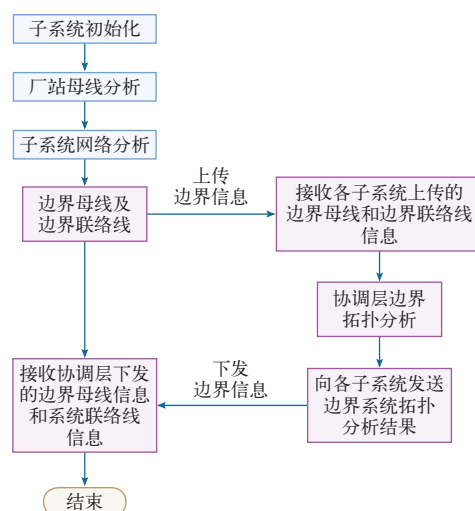


图3 分布式并行拓扑分析程序框图

3) 分解协调潮流计算。根据拓扑分析结果,形成各子系统系数矩阵和协调矩阵,潮流分解协调计算过程如图4所示。第一步,各个子系统初始化,设置节点类型,给定电压和相角初值,并根据节点排序得到各子系统的系数矩阵 B 的各部分 B_{ii} 、 B_{ii} 、 B_{ii} 和 B_{ii} ;第二步,根据给定初值,按式(1)、式(2)求有功无功残差,进一步求得 b_i 、 b_i ;第三步,根据式(8)求得 x_i ,将 x_i 下发给各个子系统;第四步,子系统接收协调层下发 x_i ,按式

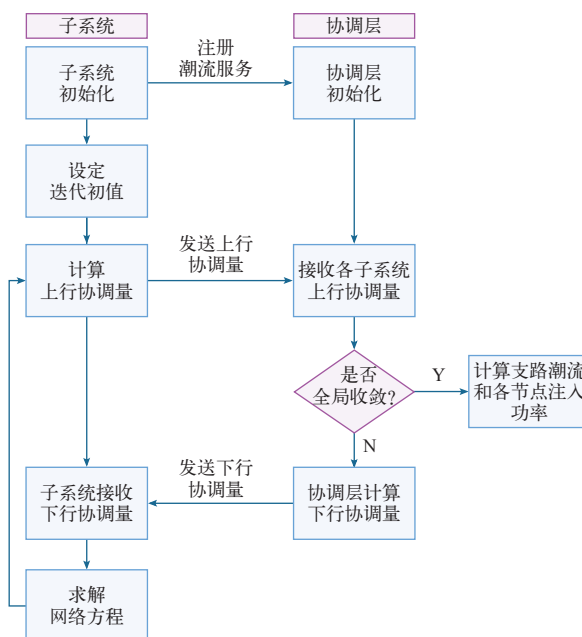


图4 潮流分解协调计算流程图

(6) 求解 x_i , 对电压和相角进行修正后, 重新求得 b_i , b_i 值, 判断子系统是否收敛, 并将 b_i , b_i 上传到协调层; 第五步, 判断是否全局收敛, 收敛则结束迭代, 不收敛则返回第三步。该方法由于在计算过程中的通信较为频繁, 需要计算资源管理服务提供可靠且高速的通信网络。

4) 将潮流结果保存到分布式数据库中, 用户通过桌面云服务, 可方便调阅全网潮流计算结果。

该潮流计算方案采用广域分布式并行计算模式, 利用调度云平台的协调管理服务, 获取潮流计算所需的数据资源、计算资源、作业管理和计算服务, 完成大电网全网潮流分解协调计算。与传统潮流计算方法相比, 保证了电网边界潮流计算的准确性, 同时分布式计算技术和并行计算技术的应用在一定程度上加快了软件的计算速度。

结束语

研究了基于云计算技术在大电网在线分析中的应用, 研究了大电网在线分析的常用分布式并行计算方法, 根据我国多级调度系统架构体系, 提出了一种基于调度云平台的面向服务架构的广域多级分布式并行计算模式, 以分解协调潮流计算服务为典型应用, 设计了基于广域多级分布式并行计算模式的潮流计算软件, 实现由调度云提供潮流计算服务来完成大电网潮流的广域分布式并行计算。对典型应用的研究结果表明, 面向服务架构的广域分布式并行计算模式能够简化大电网在线分析软件的程序设计, 提高系统的灵活性和软件开发升级的速度。同时, 分布式计算技术和并行计算技术的应用, 提高了大电网在线分析软件的计算速度和准确度。

参考文献

- [1] 沐连顺, 崔立忠, 安宁. 电力系统云计算中心的研究与实践 [J]. 电网技术, 2011, 35 (6): 171-175.
- [2] 曹阳, 高志远, 杨胜春, 等. 云计算模式在电力调度系统中的应用 [J]. 中国电力, 2012, 45 (6): 14-17.
- [3] 张伯明, 孙宏斌, 吴文传, 等. 智能电网控制中心的未来发展 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (17): 21-28.
- [4] 吉兴全, 王成山. 电力系统并行计算方法比较研究 [J]. 电网技术, 2003, 27 (4): 22-26.
- [5] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [6] 张步涵, 王凯, 方华亮, 等. 基于网络分割的电力系统潮流分解协调计算 [J]. 高电压技术, 2007, 33 (7): 173-176.
- [7] 王永, 郭志忠, 彭茂君, 等. 基于分解协调算法的互联电力系统状态估计 [J]. 电网技术, 2008, 32 (10): 79-83.
- [8] 张伯明, 王刚, 孙宏斌. 暂态稳定仿真计算的分解协调计算模式 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (20): 24-28.
- [9] 赵俊华, 文福栓, 薛禹胜, 等. 云计算: 构建未来电力系统的核心计算平台 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (15): 1-8.
- [10] 张伯明, 张海波. 多控制中心之间分解协调计算模式研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (22): 1-5.
- [11] 于尔铿, 刘广一, 周京阳. 能量管理系统 (EMS) [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

(收稿日期: 2014-05-26) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告