

DOI: 10.7667/PSPC170760

基于流程组态的电力系统安全稳定分析并发计算

方勇杰^{1,2,3}, 王胜明^{1,2,3}, 徐泰山^{2,3}, 邵伟², 徐健², 郭剑²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;
3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘要: 针对电力系统安全稳定分析分布式计算的应用现状, 基于异步并发和工作流的思想, 提出了一种适应于粗粒度算例并行的电力系统安全稳定分析多层次并发计算框架。通过多数据断面并行和多应用功能并发, 在不改变安全稳定分析程序算法逻辑的前提下, 实现对不同断面下多个应用功能的计算任务异步并发调度管理, 有效提高了计算资源的利用率。基于过程定义方法对安全稳定分析应用功能进行统一封装, 满足不同运行场景下安全稳定分析计算流程的定制化需求。该技术已在多个省级及以上电网安全稳定综合防御系统中得到应用, 验证了该方法的有效性。

关键词: 异步并发管理; 流程组态; 多断面并行; 多应用并发; 粗粒度

Concurrent computing architecture for power system security stability analysis based on process configuration

FANG Yongjie^{1,2,3}, WANG Shengming^{1,2,3}, XU Taishan^{2,3}, SHAO Wei², XU Jian², GUO Jian²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;
3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to meet the distributed computing demands of the power system security stability analysis, the multi-layer asynchronous concurrent computing architecture for power system security stability analysis coarse granularity paralleling which is based on asynchronous concurrent and workflow technologies is proposed. Through with multi-scheme and multi-function asynchronous concurrent computing mechanism, multiple functions tasks of different periods data are unified dispatching management for improving the utilization of computing resources without modifying the algorithm of security and stability analysis program. In order to satisfy the custom requirements of calculation procedure in different scenarios, all functions are unified encapsulation based on the process definition method for the power system security stability analysis functions. The application in power system security and stability integrated and coordinated defense systems of provincial and above power grid demonstrate the validity of the method.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Online Risk Assessment and Decision-making Techniques for Power Network Load Reduction Measures".

Key words: asynchronous concurrent management; process configuration; multi-scheme concurrent computing; multi-function concurrent computing; coarse granularity

0 引言

随着跨区交直流混联大电网的不断建设以及电

行特性日益复杂多变, 调度运行精细化管理面临严峻技术挑战。在线安全稳定分析技术的逐步发展和成熟^[1-4], 有效提升了大电网的运行控制能力, 为构建和完善大电网综合防御体系提供了有力的技术支持^[5-8]。

为了实现电力系统安全稳定分析的快速计算,

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“电网减负荷措施在线风险评估和决策技术研究”

具体分为两类技术研究方向:一种是提升单个算例的计算速度,通过对大型稀疏线性方程组进行分块求解,缩短其计算时间^[9-12];另一种是提升批量算例的计算速度,基于集群技术实现多个算例的异步并发执行,由于这种实现方式不需要改动已有的离线计算程序算法逻辑,在实际中已得到广泛应用^[1-4]。通过采用工作域管理机制实现各个工作域的计算资源有效隔离,各个工作域独立进行计算数据组织、计算流程控制、计算任务调度以及计算结果管理,在提高计算可靠性的同时也有效避免了某些应用功能对计算资源的过多占用。

随着安全稳定分析功能应用场景的不断延伸,其运行模式已由实时分析模式扩展到研究分析模式和趋势分析模式^[13],还为调度计划等外部应用提供安全校核服务^[14],对安全稳定分析计算的快速性、计算流程定义的灵活性和应用功能的扩展性提出了更高要求。文献[15]基于并行计算和数据复用技术提升静态安全校核的计算速度;文献[16]基于智能电网调度控制系统基础平台实现了电网未来运行状态变化趋势的快速评估;文献[17]提出了一种针对状态估计、调度员潮流等应用的基于时、空、应用多维度的分布式并行计算管理机制,支持多用户、多控制中心、多应用并发启动计算。

基于粗粒度算例并行框架构建的电力系统分布式计算管理平台需满足多用户、多数据断面和多应用并发计算需求,目前在实际应用中存在下述问题:① 计算流程定义不够灵活。各个工作域的应用功能按照预设的次序执行,不能动态根据相关应用功能的计算结果自主选择相应的执行分支。② 计算资源共享程度不够。各个工作域的计算资源独立配置,计算资源不支持根据具体各个工作域的计算资源需求在多个工作域之间动态优化调整。③ 计算机群的利用率需进一步提升。需结合多用户和多数据断面的不同计算特征,实现多用户和多数据断面下各个应用功能的计算任务异步并发管理,进一步提高计算资源的利用率。

本文综合考虑电力系统安全稳定分析功能实时分析模式下多应用功能、研究分析模式下多用户、趋势分析模式和安全校核应用下多数据断面等多种并发计算需求和特征,提出了一种适应于粗粒度算例并行的基于流程组态多层次并发计算框架,实现了多工作域、多运行方式(多数据断面)和多应用功能的计算任务异步并发调度管理,通过对安全稳定分析应用功能的统一封装,满足安全稳定分析不同运行场景下各自计算流程的定制化需求。

1 总体框架

基于流程组态的多层次并发计算框架采用工作域管理机制实现多个运行场景(包含多个运行模式、多个用户和多个计算请求)的并发运行和逻辑隔离,通过计算资源全局管理实现计算资源在多个工作域间的动态调整。通过多应用并发管理机制实现单个工作域内无数据依赖关系多个应用功能的计算任务异步并发运行,充分利用了本工作域的计算资源。基于面向安全稳定分析应用功能的过程定义方法对应用功能进行统一封装,实现安全稳定分析计算流程的组态定义。结合安全校核应用和趋势分析模式下多数据断面的同一计算流程的特征,通过多运行方式异步并发机制实现多个数据断面的计算流程异步并发执行,有效提高了本工作域计算资源的利用效率。具体框架如图1所示。

对于安全稳定分析应用在线周期运行的实时分析模式和趋势分析模式,由于其计算规模和计算周期确定,其工作域固定配置,其计算资源也预先设置,根据电网运行数据和相关计划或预测数据在线进行分析计算,只是在计算资源发生异常时为保证优先级高的工作域的计算周期才需要进行计算资源动态调整。对于安全校核等外部触发式应用和研究分析模式,由于其运行具有随机性特征,应采用动态分配机制对计算资源进行管理。

基于流程组态多层次并发计算框架构建的分布式计算管理平台,其功能主要包括用户计算请求管理、断面数据调度、计算资源优化分配、计算流程管理和异步并发调度五个部分。其中用户计算请求管理根据用户计算请求中执行模式的不同,分别执行不同的处理分支,针对调度计划等外部应用提交的安全校核计算请求,按照提交时间依次组织完成每个安全校核计算,并将校核结果返回给相应的调度计划应用;针对研究分析模式人工触发的并发计算请求,分别激活各个提交计算请求的研究分析模式对应的工作域,通知计算资源优化分配为该工作域分配相应的计算资源完成各类安全稳定分析计算。断面数据调度针对单个计算请求中包含多个断面数据依次调度到计算机群进行计算;计算资源优化分配根据各个工作域的激活状态和计算资源需求信息在多个工作域之间进行计算资源的动态调整;计算流程管理基于预先定义流程以及计算数据中包含相关应用功能的运行结果,动态识别执行分支并启动相关应用功能进程完成指定断面数据的分析计算;异步并发调度在管理节点上实现多个运行方式、每个运行方式下多个应用功能以及计算节点上多个

计算进程实例的计算任务的异步并发调度和计算结果的异步回收管理。其中用户计算请求管理、断面数据调度和计算资源优化分配三个模块运行在应用

服务器上，计算流程管理和异步并发调度两个模块运行在计算机群上。

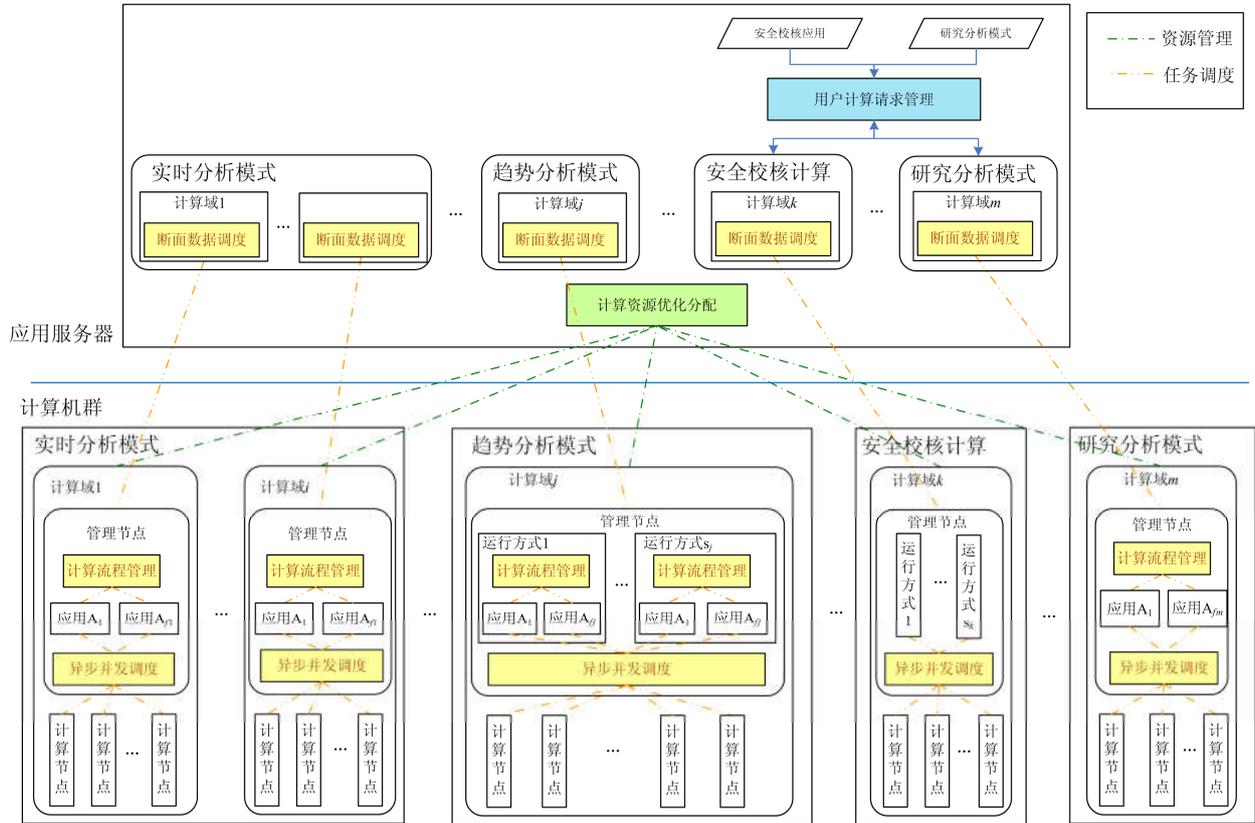


图 1 多层次并发计算模型框架

Fig. 1 Architecture of multi-level concurrent computing model

2 关键技术

2.1 异步并发管理

工作域管理机制可实现计算流程管理的自治，同时通过将计算资源按照工作域-计算节点-计算进程三级进行管理，一方面可以避免集中式调度的性能瓶颈，另一方面也可以防止基于可用计算资源制定计算方案的应用功能^[18]过多占用计算资源。其中面向计算节点和计算进程两级计算资源调度管理均在工作域内进行，一个应用功能最大可用计算资源是其所在工作域的全部计算资源。

为了提高计算资源的利用效率，避免由于计算任务调度和计算结果回收中同步机制带来的空闲等待时间，在分布式计算管理平台中采用异步并发管理机制实现计算任务的调度管理。从总体上分为运行方式-应用功能两个层次，通过异步并发管理机制使管理节点在进行相关数据处理时计算节点的计算能力仍能得到有效利用。其中：① 多运行方式并发

管理主要针对趋势分析模式下和调度计划安全校核运行场景下的多断面数据计算需求，各个运行方式在管理节点异步并发运行，实现各个运行方式的计算数据下载、计算流程管理和计算结果上传的异步运行，从而避免单个运行方式下管理节点在计算数据下载和计算结果上传时，计算节点处于空闲等待状态。② 多应用功能并发管理主要针对实时分析模式和研究分析模式下的单断面数据计算需求，对于计算流程中包含且不存在数据依赖关系的多个应用功能异步并发运行，实现多个应用功能的计算任务调度和计算结果回收处理异步并发运行，从而避免由于单个应用功能的计算节点没有同步完成计算或无法使用工作域内全部计算资源时造成的计算能力浪费。

此外，为了减少应用功能在计算任务调度时额外增加的数据传输和管理开销，分布式计算管理平台支持根据各个应用功能的计算任务数量及其预计执行时间确定各个应用功能的优化调度粒度^[19]，在充分利用计算资源的同时尽量减少调度轮次，缩短

平台调度管理时间。

2.2 计算流程组态

基于 workflow 设计思想^[20], 将安全稳定分析计算的各个应用功能统一封装为过程, 各个应用功能之间相关的数据作为转移信息(包括启动条件), 通过标准化和规范化的方式将安全稳定分析计算的各种应用功能组织起来, 由计算流程管理引擎对预先定义的安全稳定分析业务流程进行解析, 再根据各个应用功能的实际计算状态选择相应的执行分支和运行相应应用功能的程序, 如图 2 所示。

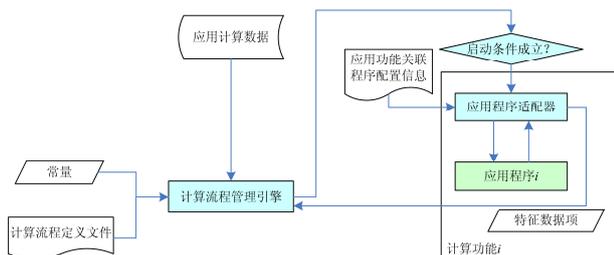


图 2 计算流程解析应用功能集成示意图

Fig. 2 Flow chart of computing procedure parses with application

为了支持应用功能的快捷扩展, 通过定义统一的应用功能程序数据交互机制和调用接口, 实现对其统一封装; 通过为不同应用功能程序添加适配器, 在不改变已有程序实现逻辑的基础上实现不同应用功能的快速集成和统一运行管理。

设计一种面向安全稳定分析应用功能的过程定义方法, 实现对计算流程包含各个应用功能及其启动条件的统一描述。一个计算流程由计算阶段、计算任务(或计算任务组)、启动条件等关键字以及各种操作数、算术运算符和逻辑运算符等操作符共同组成。一个计算流程包含若干计算阶段, 各个计算阶段串行顺序执行。其中一个计算任务对应一个应用功能, 多个计算任务可以组成一个计算任务组, 一个计算阶段包含若干个计算任务(或计算任务组), 每个计算阶段内所有计算任务(或计算任务组)支持并发执行。每个计算任务(或计算任务组)支持定义独立的启动条件, 其中启动条件由关键字、变量、常量等操作数以及各种算术运算符和逻辑运算符组成。一个计算任务完成计算后支持输出一些特征数据项, 其可作为其他应用功能启动条件的变量。

计算流程管理引擎基于各个计算任务的运行状态及其输出的特征数据项, 依次识别每个计算阶段内启动条件成立的各个计算任务, 并运行管理计算任务对应的程序, 在每个计算任务运行结束后, 对本计算阶段内未运行的计算任务重新识别其启动条件是否成立, 直到本计算阶段内启动条件成立的各个计算任务全部完成计算。

2.3 计算资源优化分配

实现计算资源在多个工作域之间的动态优化分配, 重点是解决计算机群计算性能的衡量和各个工作域计算量的预估。

由于各个工作域具有各自独立的计算流程, 为提高运行的可靠性, 单个计算节点在同一时刻只属于一个工作域。同时为了提高程序的可靠性, 一般不同类型不同厂商的安全稳定分析程序都采用独立的程序封装, 衡量计算机群的计算性能即是评估每个计算节点上能够并发运行的程序数量。根据各类安全稳定分析程序对 CPU、内存和磁盘 IO 等计算资源的不同需求, 对计算机群中不同硬件配置的计算节点进行计算性能统一度量, 确定每个计算节点可以同时并发运行的计算程序最大数量。

各个工作域需要计算的数据断面数量存在差异, 如实时分析模式和研究分析模式每次只计算一个数据断面, 趋势分析模式需计算未来多个数据断面, 日前安全校核应用需计算 96 个数据断面等。另外各个工作域的安全评估范围也不尽相同, 导致其运行的应用功能的数量及其计算任务数量也不同, 因此, 综合考虑各个工作域的数据断面数量、应用功能的数量及其运行的概率预估各个工作域总的计算任务数量。

各个工作域对计算周期也有不同的实时性要求, 此外各个工作域的重要性也不同, 因此, 基于给定的计算资源, 综合考虑各个工作域的优先级、计算周期、预估的计算任务总量, 实现计算节点在多个工作域之间的优化分配。同时在具体选择切换工作域的计算节点时, 还需要考虑对现有工作域的运行影响最小, 具体的流程如图 3 所示。

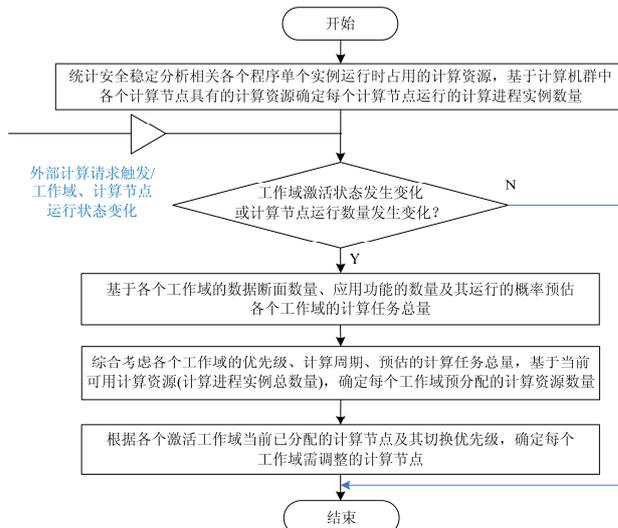


图 3 计算资源优化分配流程示意图

Fig. 3 Flow chart of computing resource optimal dispatch

3 应用情况

基于流程组态多层次并发计算框架设计的分布式计算管理平台已实际应用于电网安全稳定综合防御系统。在线子系统中根据计算周期不同划分不同的工作域,按照统一的接口规范对应用功能进行了统一封装,实现了应用功能的便捷接入和计算流程的组态定义。离线研究子系统根据活跃用户提交的计算请求动态分配计算资源,有效提升计算资源的利用效率。计划校核子系统通过多运行方式和多应用功能两个层次的异步并发管理有效缩短了计算周期。

3.1 计算流程组态

面向安全稳定分析应用功能的过程定义方法采用类似于脚本语言的表达方式,通过定义相关关键字和变量,实现安全稳定分析的计算流程统一描述。具体关键字如表 1 所示。

表 1 计算流程定义关键字表

| 关键字 | 含义说明 |
|-----------|-----------------------------------|
| [计算阶段开始] | 计算阶段定义开始标志 |
| [计算阶段结束] | 计算阶段定义结束标志 |
| var | var(): ()内定义变量数值 |
| sta | sta(): ()内定义变量状态值 |
| val | val(): ()内直接定义数值 |
| if | 定义条件开始标志 |
| then | 分支 1 定义条件结束标志,分支 1 开始标志(下一行为分支 1) |
| else | 分支 2 开始标志(下一行为分支 2), 可选项 |
| end if | 条件定义结束标志 |
| taskgroup | 计算任务组定义标志 |
| task | 计算任务定义标志 |

以预想故障下电网安全稳定分析流程为例,首先进行预想故障下安全稳定分析,具体包括静态安全分析(STAMARGIN)、短路电流分析(SCANA)、暂态稳定分析(MARGIN)、小扰动动态稳定分析(SSATANA)功能,这些功能之间相互独立,不存在关联关系,可以并发运行。若静态安全分析的评估结果为安全(静态安全裕度 ≥ 0)且暂态稳定分析的评估结果为稳定(暂态稳定裕度 ≥ 0),则进行稳定断面极限功率(LIMIT)计算;否则进行预想故障下辅助决策(PRCTRL)计算。采用面向安全稳定分析应用功能的过程定义方法可将上述安全稳定分析计算流程定义如表 2。

表 2 预想故障下安全稳定分析计算流程定义示例

Table 2 Security and stability analyzing procedure of contingency

```

[计算阶段开始]
    taskgroup = STAMARGIN,MARGIN,SCANA,SSATANA
[计算阶段结束]

[计算阶段开始]
if (sta[静态安全裕度]==var[计算正常]) && (var[静态安全裕度]>=val[0]) && (sta[暂态稳定裕度]==var[计算正常]) && (var[暂态稳定裕度]>=val[0])
then
    task = LIMIT
else
    task = PRCTRL
endif
[计算阶段结束]
    
```

3.2 计算性能分析

以某区域电网的日计划安全校核子系统为例,其电网规模约为 3 000 个节点,应用服务器由 2 台 HP 安腾服务器(CPU 为 2 颗 Itanium 2,共 16 核,主频为 1.6 GHz,内存为 16 G)组成,计算机群由 24 个计算节点(CPU 为 4 颗 E5520,共 16 核,主频为 2.27 GHz,内存为 8 G)组成,管理节点并发运行 4 个运行方式,每个计算节点均运行 8 个计算进程实例。安全稳定评估包括暂态稳定分析和静态安全分析,其中每个计划断面的暂态预想故障数量为 232 个,静态预想故障数量为 225 个。安全稳定评估并行加速比定义为在单个运行方式场景下完成 96 个计划断面安全稳定评估的时间与在 4 个运行方式并发场景下完成相同计算任务的时间比值。在单个运行方式场景下,完成单个计划断面安全稳定评估其计算时间约为 44 s。选取 5 个实际 96 时段计划断面的安全校核案例,具体安全稳定评估计算时间(不包含 96 计划断面数据整合时间)统计如表 3 所示。

表 3 4 个运行方式并发计算时间统计

Table 3 Statistics of computing time four schemes

| concurrent mode | | |
|---------------------|--------|-------|
| 计算时刻 | 计算耗时/s | 并行加速比 |
| 2017/03/15 19:21:10 | 2 382 | 1.77 |
| 2017/03/16 19:22:18 | 2 326 | 1.82 |
| 2017/03/17 19:21:35 | 2 309 | 1.83 |
| 2017/03/18 19:22:32 | 2 257 | 1.87 |
| 2017/03/19 19:21:51 | 2 365 | 1.79 |
| 平均值 | 2 328 | 1.82 |

由于暂态稳定分析计算任务数(232 个)和静态安全分析计算任务数(225 个)不是计算进程数(192 个)的整数倍,在一个计划断面安全稳定分析计算周

期内, 每个计算节点调度的计算任务数量不同, 部分计算节点在计算周期内会处于空闲状态。将管理节点并发运行方式数目设置为 4 时, 空闲的计算节点可以调度到其他运行方式下提交的计算任务, 避免了计算过程中部分计算节点在某些时段处于空闲状态, 从而提高计算资源的利用效率。由表 3 可以看出, 在不改变硬件资源配置的情况下, 4 个运行方式并发场景下 96 时段计划断面的安全稳定评估(暂态稳定分析和静态安全分析)的平均加速比为 1.82, 可显著缩短其计算时间。

4 结语

分布式计算是提升大电网安全稳定分析计算速度的关键技术。基于流程组态的多层次并发计算框架提供了一种面向电力系统安全稳定分析计算的统一流程定义和交互接口, 在保持现有的应用功能核心算法程序逻辑不变的前提下: 通过对应用功能程序外部接口进行改造, 可实现应用功能的便捷集成和灵活组态; 通过多工作域、多方式和多应用功能不同层次的并发管理机制, 可提升不同运行模式下计算资源利用效率, 有效缩短安全稳定分析计算时间, 为提升安全稳定分析应用的实用化水平提供技术支撑。未来需进一步结合云计算技术研究构建分析决策中心的安全稳定分析全局服务的各项关键技术, 实现计算资源的弹性扩展和运行环境的自动管理。

参考文献

- [1] 李碧君, 许剑冰, 徐泰山, 等. 大电网安全稳定综合协调防御的工程应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 25-30.
LI Bijun, XU Jianbing, XU Taishan, et al. Engineering application of integrated and coordinated defense technology of large power system security and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 25-30.
- [2] 严剑峰, 于之虹, 田芳, 等. 电力系统在线动态安全评估和预警系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 87-93.
YAN Jianfeng, YU Zhihong, TIAN Fang, et al. Dynamic security assessment & early warning system of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 87-93.
- [3] 金学成, 陈堂龙, 邹根华, 等. 自适应外部环境的电网安全稳定智能防御系统应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 137-142.
JIN Xuecheng, CHEN Tanglong, ZOU Genhua, et al. Application of power grid security and stability intelligent defense system self-adapting the external environment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 137-142.
- [4] 乔亮, 杨丽, 郑亮, 等. 地区电网在线安全稳定预警与辅助决策系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 164-169.
QIAO Liang, YANG Li, ZHENG Liang, et al. On-line security and stability analysis with pre-alarm and decision-making supporting system for regional power grids[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 164-169.
- [5] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 2-8.
XIN Yaozhong, SHI Junjie, ZHOU Jingyang, et al. Technology development trends of smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 2-8.
- [6] 姚建国, 杨胜春, 单茂华. 面向未来互联网的调度技术支持系统架构思考[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 52-59.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, SHAN Maohua. Reflections on operation supporting system architecture for future interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 52-59.
- [7] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [8] 方勇杰, 王胜明. 适应多级调度安全稳定分析资源共享的分布式计算管理平台[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 1-8.
FANG Yongjie, WANG Shengming. Distributed computing management platform for sharing resource of multi-level dispatch security and stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 1-8.
- [9] 张宁宇, 高山, 赵欣. 基于 GPU 的机电暂态仿真细粒度并行算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 54-59.
ZHANG Ningyu, GAO Shan, ZHAO Xin. A fine granularity parallel algorithm for electromechanical transient stability simulation based on graphic processing unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 54-59.
- [10] 宋新立, 陈英时, 王成山, 等. 全过程动态仿真中大型线性方程组的分块求解算法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 2-8.

- 2014, 38(4): 19-24.
SONG Xinli, CHEN Yingshi, WANG Chengshan, et al. An algorithm of large linear equations based on block matrix for whole process dynamic simulations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 19-24.
- [11] 周挺辉, 赵文恺, 严正, 等. 基于图形处理器的电力系统稀疏线性方程组求解方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 70-76.
ZHOU Tinghui, ZHAO Wenkai, YAN Zheng, et al. A method for solving sparse linear equations of power systems based on GPU[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 70-76.
- [12] 廖小兵, 汪芳宗, 杨萌. 基于高斯方法及 Sherman-Morrison 公式的暂态稳定性并行计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 1-8.
LIAO Xiaobing, WANG Fangzong, YANG Meng. Parallel algorithm for transient stability simulation using Gauss method and Sherman-Morrison formula[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 1-8.
- [13] 智能电网调度控制系统 第 4-5 部分: 实时监控与预警类应用 在线安全分析与运行控制辅助决策: Q/GDW1680.45—2014[S].
Smart grid operation and control system-part 4-5: real-time supervisory control & early warning online dynamic security analysis and assistant decision-making: Q/GDW1680.45—2014[S].
- [14] 吕颖, 鲁广明, 杨军峰, 等. 智能电网调度控制系统的安全校核服务及实用化关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 171-176.
LÜ Ying, LU Guangming, YANG Junfeng, et al. Security check service and practical technique based on smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 171-176.
- [15] 李峰, 李虎成, 於益军, 等. 基于并行计算和数据复用的快速静态安全校核技术[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 75-80.
LI Feng, LI Hucheng, YU Yijun, et al. Fast computing technologies for static security checking based on parallel computation and data reuse[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 75-80.
- [16] 严剑峰, 冯长有, 鲁广明, 等. 考虑运行方式安排的大电网在线趋势分析技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 111-116.
YAN Jianfeng, FENG Changyou, LU Guangming, et al. On-line trend analysis technology of large power grid considering operation mode arrangement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 111-116.
- [17] 张海波, 朱存浩. 考虑时空及应用维度的分布式并行计算管理机制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 106-112.
ZHANG Haibo, ZHU Cunhao. Distributed parallel calculation management mechanism considering time-space and application dimensions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 106-112.
- [18] 鲍颜红, 徐泰山, 许立雄, 等. 暂态稳定预防控制及极限功率集群计算[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 32-35.
BAO Yanhong, XU Taishan, XU Lixiong, et al. Cluster computing mode for transient stability-constrained preventive control implementation and total transfer capability calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 32-35.
- [19] WANG Shengming, XU Taishan, XU Jianbing, et al. Research and implementation of asynchronous concurrent scheduling model for online system[C] // ICHCC High Performance Networking, Computing, and Communication Systems Second International Conference, May 5-6, 2011, Singapore: 592-599.
- [20] 徐亮, 张莉, 樊志强. 一种基于 UML 的实时工作流建模方法研究[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(7): 1184-1191.
XU Liang, ZHANG Li, FAN Zhiqiang. An approach of real-time workflow modeling based on UML[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(7): 1184-1191.

收稿日期: 2017-05-21; 修回日期: 2017-07-13

作者简介:

方勇杰(1964—), 男, 研究员级高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全稳定与控制; E-mail: fangyongjie@sgepri.sgcc.com.cn

王胜明(1979—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: wangshengming@sgepri.sgcc.com.cn

徐泰山(1968—), 男, 研究员级高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: xutaishan@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)