

DOI: 10.7667/PSPC180515

调控云环境下在线计算软件服务研究与应用分析

李静¹, 罗雅迪¹, 郭健¹, 李强¹, 刘君², 何明², 张国芳³

(1. 电力调度自动化技术研究与系统评价北京市重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192;
2. 国网辽宁省电力有限公司鞍山供电公司, 辽宁 鞍山 114002; 3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 为提高调控云体系下在线计算软件服务化水平, 分析了调控云环境下在线计算软件的服务场景, 设计了在线计算软件服务的层次结构。为适应这种“瘦客户端、胖服务器端”的类 B/S(Browser/Server)软件服务访问模式, 将在线计算流程进行分析拆解封装成计算服务单元。采用多代理机制设计了层次化的在线计算服务框架, 以积木组合排列的方式提供在线计算软件服务。最后在 JADE(Java Agent Development Framework)多代理框架下设计实现了调度员潮流计算软件服务, 进行了相关测试与分析。并对提供潮流计算软件服务的同时所引起的效率损失问题提出了进一步优化的技术措施。

关键词: 调控云; 在线计算软件服务; Web 服务; 多代理机制; 调度员潮流计算软件服务

On-line calculation software service and its application analysis under dispatching cloud

LI Jing¹, LUO Yadi¹, GUO Jian¹, LI Qiang¹, LIU Jun², HE Ming², ZHANG Guofang³

(1. Beijing Key Laboratory of Power Dispatching Automation Technology Research and System Evaluation (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China; 2. State Grid Anshan Electric Power Supply Company, Anshan 114002, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: First of all, online computing software service scene is analyzed and hierarchical structure is designed in order to improve service capabilities of the software under dispatching and control cloud. And in "skinny client, fat server" running and operation environment which is similar to browse/server mode, online computing processes are decomposed and encapsulated into computing service units. At the same time, online computation service framework is designed using multi-agent mechanism, and these units will be called and integrated in building blocks way to provide online computing software service. Finally, the dispatcher load flow software service is designed and implemented based on the JADE (Java Agent Development Framework) multi-agent framework, and related performance test and analysis are carried out in detail. The problem that in the meanwhile providing load flow software service will bring low efficiency is analyzed, and further optimization steps are proposed.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. DZB17201800023).

Key words: dispatching cloud; on-line computation software service; Web service; multi-agent; dispatcher load flow software service

0 引言

当前我国电网已形成了特高压交直流混联运行的基本特征, 跨区输送的电能占能源消费的比例越来越高。尤其是以风电、太阳能为主的新能源机组

大量投运以及电力电子设备并网, 使得针对电网的安全运行分析状况呈现全局化特点^[1], 迫切需要进一步提升电网调度的一体化水平。目前运行的智能电网调度控制系统大幅提升了电网可观测水平^[2], 为数据标准化、计算协同化和运行同构化打下了坚实的平台基础。

借鉴成熟的云计算技术实现电网运行的统一决策、分级控制和实时协同也已成为一个可行方案^[3]。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助 (DZB17201800023)
“面向全网统一分析的高性能网络分析关键计算服务研究”

文献[4]设计了“调控云”架构及交付模式，分析了在电网全模型数据下进一步提升在线分析协同计算能力的必要性；文献[5]设计了电力系统仿真云计算中心的层次化体系架构；文献[6]分析了基于数据云、模型云的在线协同计算关键技术，设计了在线服务实现模式；文献[7]设计了基于分解协调和多目标趋优控制的分布式应用架构。文献[8]则通过从公有云中租用虚拟计算硬件与存储资源实现了在线计算的动态配置；文献[9]测试验证了在企业私网中开展一体化计算模型传输与交互的性能。而对提升在线计算速度的研究主要从两方面来进行，一是提出更高效的并行计算方法或更优化的计算流程^[10-19]，二是应用高性能的计算架构与硬件^[20-22]，将两者结合起来则是目前提高在线计算性能的主要途径。未来在以标准化、层次化、虚拟化、服务化为特征的调控云运行体系下，如何实现在线计算应用的“软件即服务”化，同时进一步提升计算性能，还有待深入研究。

本文首先对调控云运行体系下在线计算服务场景进行分析，然后设计提供在线计算服务的层次结构，将在线计算流程进行组件服务化封装，应用多代理机制设计提供在线计算应用的服务框架；最后在 JADE 多代理框架下实现调度员潮流计算软件服务，并进行测试分析，验证服务效率。

1 调控云环境下在线计算软件服务分析

1.1 在线计算服务场景

调控云环境下的在线计算应用，是一种“瘦客户端，胖服务器端”的一种计算模式，需要类似 B/S(浏览器/服务器)的请求访问模式，如图 1 所示。

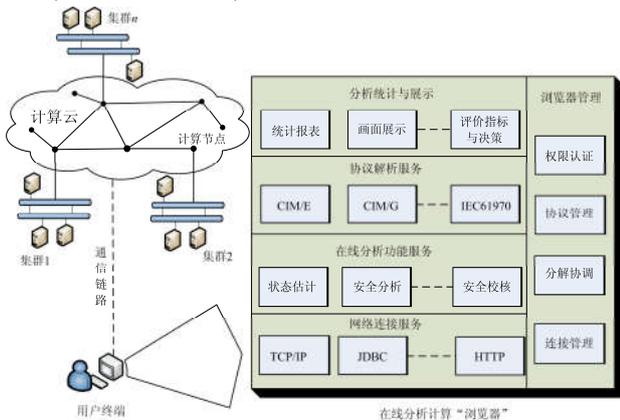


图 1 基于 B/S 架构的在线计算服务

Fig. 1 On-line analysis computation service under B/S architecture

在线计算浏览器分为用户端和服务端两种类型，用户端浏览器依据调控权限管理网络连接服务

以发起计算请求、执行在线分析功能服务以监控计算过程、解析专有协议、显示计算结果并作展示、分析、统计等功能；服务器端浏览器则是实现具体在线应用功能的计算服务代理，其中由在线计算服务引擎生成在线计算代理服务实例以响应用户终端请求，同时负责管理在线计算服务实例与数据云、模型云进行数据交互以执行在线计算，分布式/并行在线协同计算管理服务则从功能计算服务资源池中获取满足在线计算应用的功能计算服务，采用高效的计算模式完成计算服务实例。这种采用基于标准服务协议的王SDL、SOAP、UDDI 等 Web Service 技术，统一服务交互规范进而降低功能模块绑定的耦合度，提高程序开发的重用性。获取在线计算服务的流程见图 2 所示。

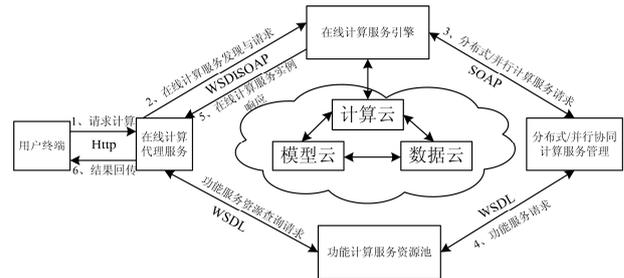


图 2 在线计算服务流程

Fig. 2 On-line computation service diagram

1.2 在线计算服务层次结构

集群资源虚拟化、运行平台和数据交互标准化、功能模块服务化是调控云能为终端用户提供便捷、可扩展的在线计算服务的前提。在基础设施层和资源管理层的基础上，在线计算软件即服务按执行顺序分为服务请求、角色实例和服务实例三部分，其服务层次结构见图 3 所示。

服务请求部分负责响应用户通过 PC 客户端发起的在线计算服务请求；角色实例部分则对用户的请求进行分析归类，根据实时运行态、研究仿真态、模拟培训态等不同应用角色生成用户实例，并管理用户实例执行服务实例的计算权限，监控服务实例的计算执行情况；服务实例部分则执行具体的在线计算业务，将它分为业务功能层、业务计算流程和计算服务实例三层，其中业务功能层描述用户实例要执行的线计算业务，业务计算流程描述具体业务功能的计算流程，并根据用户实例配置选择采取粗粒度或细粒度的分配映射机制，其基本组成单元是计算服务单元，计算服务实例层是在线计算业务功能的实现层，通过与数据云、模型云的数据交互，采用分布式或并行的计算模式完成在线计算业务。

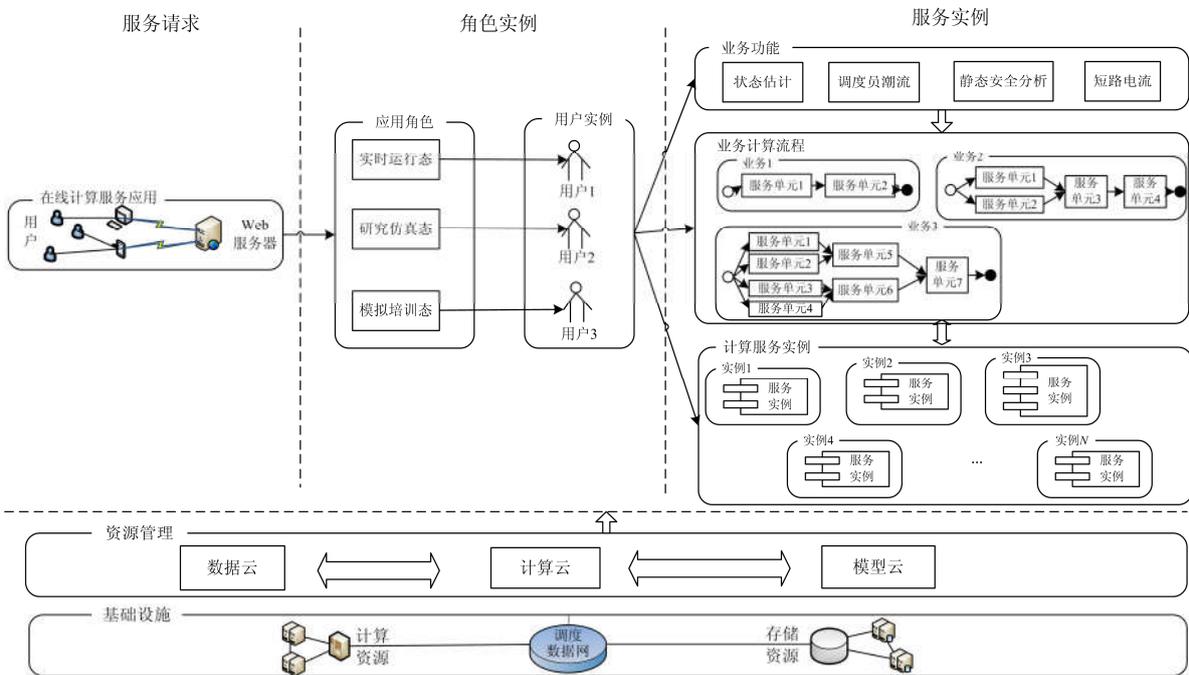


图 3 在线计算服务层次结构

Fig. 3 On-line computation services architecture

2 在线计算服务框架

通过分析在线应用各业务功能实现的计算流程^[23], 将计算流程进行拆分形成能完成独立特定功能并具有独立输入/输出的计算服务单元, 并将其封装成统一规范的接口, 作为原子级的计算服务单元, 与其他计算服务单元组合或作为子计算服务单元被父计算服务单元调用从而能完成某一特定的在线计算分析业务。计算服务单元封装层次结构如图4所示。

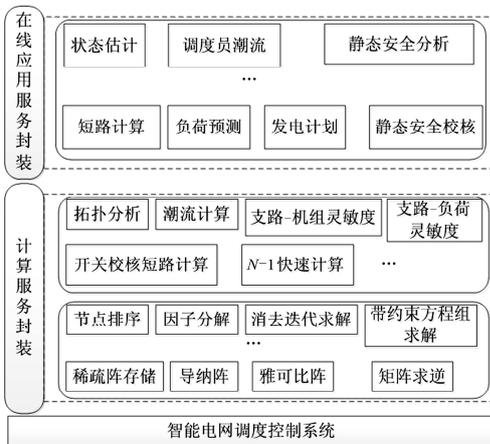


图 4 计算服务单元封装

Fig. 4 Computation service unit package

在线计算的原子级服务单元包括导纳矩阵、雅可比矩阵、矩阵求逆、因子分解、消去迭代求解方

程、带约束求解方程、拓扑分析、支路对机组灵敏度、 $N-1$ 安全分析等模块功能。在对以上计算服务封装的基础上, 根据在线计算分析应用需求, 组合设计实现包括状态估计服务、调度员潮流服务、静态安全分析服务、灵敏度计算服务、短路电流计算服务等在线分析计算服务。采用这种以“搭积木”方式构建的在线计算分析服务, 能够避免程序的重复开发, 提高效率。

采用多代理机制设计在线计算服务框架, 同样将其分成应用层、业务层和功能计算层三层代理, 如图5所示。

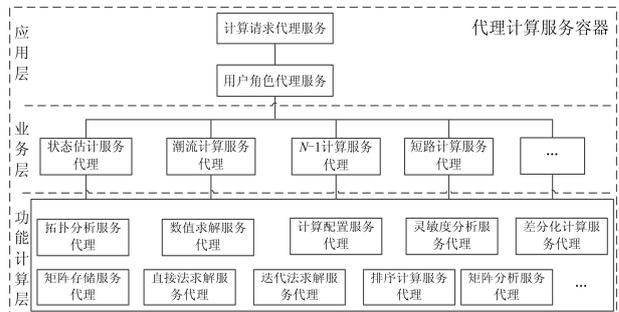


图 5 基于多代理机制的在线计算服务框架

Fig. 5 Multi-agent based on-line computation service framework

应用层代理对应的是计算请求服务和用户角色服务, 分别完成针对用户在在线计算请求和应用角色的形式化描述; 业务层代理对应的是状态估计、潮

流计算、 $N-1$ 计算和短路计算等各类在线计算业务，其具体实现则依靠功能计算层的各计算服务单元的组合排列来完成。

3 测试分析

3.1 基于 JADE 框架的调度员潮流计算软件服务

JADE(Java Agent Development Framework)是用于开发多代理系统的平台中间件^[24]，作为采用 JAVA 编程语言开发的开源软件，它完全遵循 FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents)规范，并为程序开发人员提供了便捷的访问接口，降低了多代理系统的开发难度。

根据调度员对潮流计算服务的应用需求，本文将调度员潮流计算服务分为模型参数、拓扑分析、计算模型、计算矩阵和数值求解等 5 个代理服务，其中模型参数服务代理负责接收本次潮流计算服务实例的各类配置信息，包括电网模型和拓扑关系、参数控制和算法选择等初始信息，由在线分析计算服务引擎读取后生成本次潮流计算的服务实例；拓扑分析服务代理根据用户针对本次计算的电网拓扑操作重新做本地局部或全局拓扑分析；计算模型服务代理则根据配置信息和拓扑结构生成电网计算模型，维持计算模型内部编号和电网物理模型外部编号之间的映射关系；计算矩阵服务代理服务根据配置信息中的算法生成计算矩阵；数值求解服务代理执行具体的求解过程。由此得调度员潮流计算软件服务的计算过程如图 6 所示。

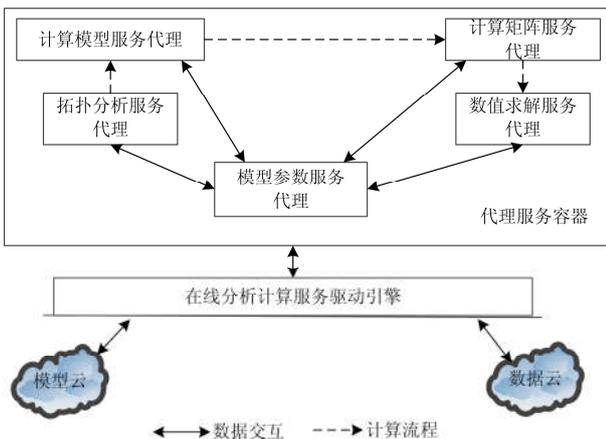


图 6 多代理服务机制下调度员潮流计算
Fig. 6 Multi-agent based cooperated dispatcher power flow computation

通过这种层次化的代理设计与松耦合的服务配置方式，屏蔽了因数据的分布式存储所可能带来的数据的复杂性和不一致性，最终由代理服务容器

托管实现调度员潮流的计算代理服务实例，这样一方面能够对代理服务进行集中管理，减小计算服务代理的依赖关系，另一方面也降低了计算代理的更新维护难度。

3.2 测试分析

在机器配置 Intel Core i5 2.6GHz、4G RAM，开发环境为 win7+Eclipse 下进行多代理计算测试，算例信息及其对应操作如表 1 所示。

表 1 算例操作信息

Table 1 AHP value of WET in different ordering methods			
节点名称	支路数	节点数	操作信息
case300	411	300	减少某发电机节点 50%出力
case3120	3 693	3 120	修改 PV 节点为 PQ 节点

分别构建两类测试环境，一是在单机系统上运行以上计算代理服务实例，二是采用 Vmware 虚拟化技术构造双机局域网运行环境，其中一台机器作为主机管理并监视计算代理的运行状态，另一台机器运行具体计算代理服务实例，网络通信带宽为 100 Mb/s。进行基于多代理机制的潮流协同计算，其计算时间如表 2 所示，统计生成代理服务实例时间、配置分发时间、代理间数据通信时间和具体计算时间等过程(其中具体潮流计算采用牛拉法求解)，各部分占总体计算时间的比率如图 7 所示。

表 2 基于多代理服务机制的潮流协同计算时间

测试系统	Table 2 Multi-agent based cooperated power flow calculation time			
	单机系统		双机系统	
	case300	case3120	case300	case3120
生成服务实例	3	5	4	6
配置分发	10	20	18	32
数据通信	12	25	16	35
具体计算	16	102	25	115
迭代次数	5	6	5	6
整体时间	41	152	63	188

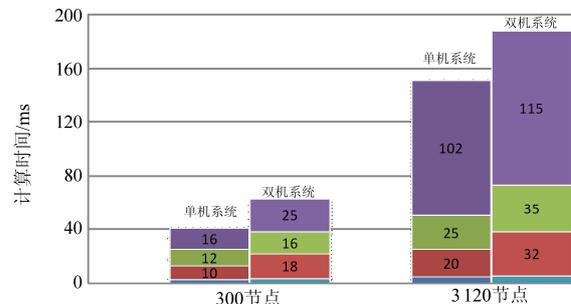


图 7 多代理潮流协同计算时间组成
Fig. 7 Multi-agent based cooperated power flow calculation time partition

与传统面向过程的潮流求解方式相比, 采用多代理服务的计算模式增加了计算时间, 以便于维护多代理计算运行环境、数据交互和计算过程监控, 节点规模越小其在总体计算时间中的占比越高。相对于单机运行系统, 双机运行系统下, 由于计算代理间网络通信带宽限制, 进一步增加了数据交互时间。采用多代理计算服务机制提供在线计算软件服务, 它的优势在于降低了用户获取在线计算应用的门槛, 只需要模块化的功能服务组合加上标准可配置的控制逻辑指令信息就能实现各类在线计算软件服务, 作为提供 Web 服务的一种实现机制, 减小了用户端的计算量。它是一种能满足软件即服务要求的高效服务供给模式。提供便捷服务的同时必然引起一定的计算效率损失, 因此采用这种计算服务模式需综合考虑对在线计算性能和权限要求。另外, 在调控云体系下, 一方面通过与模型云、数据云在数据存储、访问和管理方面的高效一体化协同; 另一方面采取高效的负载均衡策略, 才能进一步提升在线计算软件服务效率。

4 结论

在线计算软件服务化是调控云体系下的基本特征, 它是一种“瘦客户端, 胖服务器端”类 B/S 的计算访问模式。本文对在线计算软件服务的场景进行了分析和层次化结构设计, 对在线计算流程进行了服务化封装后设计了在线计算服务框架, 最后采用多代理机制设计实现调度员潮流计算软件服务, 并进行了相关性能测试与分析。这为在线计算软件即服务化提供了一个较全面的技术应用和解决方案。

参考文献

- [1] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3095-3103.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103.
- [2] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统研究现状与技术展望[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.
- [3] LITVINOV E, MA Feng, ZHANG Qiang, et al. Cloud-based next-generation IT paradigm for the operations of future power systems[C] // Power Systems Computation Conference, June 20-24, 2016, Genoa, Italy: 1-7.
- [4] 许洪强. 调控云架构及应用展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3103-3011.
XU Hongqiang. Architecture of dispatching and control cloud and its application prospect[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3103-3011.
- [5] 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.
MU Lianshun, CUI Lizhong, AN Ning. Research and practice of cloud computing center for power system[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 171-175.
- [6] 郭健, 周京阳, 李强, 等. 高性能在线分析计算现状与协同计算关键技术[J]. 电力系统自动化, 2017, 42(3): 149-159.
GUO Jian, ZHOU Jingyang, LI Qiang, et al. Current status of high-performance on-line analysis computation and key technologies for cooperating computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 42(3): 149-159.
- [7] 常乃超, 张智刚, 卢强, 等. 智能电网控制系统新型应用架构设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 53-59.
CHANG Naichao, ZHANG Zhigang, LU Qiang, et al. A novel application architecture design for smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 53-59.
- [8] MA Feng, LUO Xiaochuan, LITVIONV E. Cloud computation for power system simulations at ISO new England—experiences and challenges[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2596-2603.
- [9] 李静, 罗雅迪, 郎燕生, 等. 面向统一计算分析的互联大电网一体化节点支路计算模型服务[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1468-1475.
LI Jing, LUO Yadi, LANG Yansheng, et al. Integrated node-branch computing model service of large power grid for unified analysis[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1468-1475.
- [10] 徐得超, 李亚楼, 郭剑, 等. 消去树理论及其在潮流计算中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 13-16.
XU Dechao, LI Yalou, GUO Jian, et al. Elimination tree theory and its application in power flow calculation[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 13-16.
- [11] 陈得扬, 李亚楼, 江涵, 等. 基于道路树分层的大电网潮流并行算法及其GPU优化实现[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 63-69.
CHEN Deyang, LI Yalou, JIANG Han, et al. A parallel power flow algorithm for large-scale grid based on stratified path trees and its implementation on GPU[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 63-69.
- [12] 郎燕生, 李静, 罗雅迪, 等. 基于图划分的大电网拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 108-115.
LANG Yansheng, LI Jing, LUO Yadi, et al. Large power grid topology analysis based on graph partitioning[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 108-115.
- [13] 王健, 陈威, 汤卫东, 等. 分布式并行网络拓扑计算关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 117-122.
WANG Jian, CHEN Wei, TANG Weidong, et al. Research on the key technologies of distributed parallel network topology computing[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 117-122.
- [14] 张国芳, 罗雅迪, 李静, 等. 大电网潮流修正方程并行求解实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 117-122.
ZHANG Guofang, LUO Yadi, LI Jing, et al. Parallel solution method of power flow correction equation for large-scale power grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 117-122.
- [15] 郭健, 周京阳, 李强, 等. 加权消去树建模方法及其在电网计算矩阵排序性能评价中的应用[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1316-1321.
GUO Jian, ZHOU Jingyang, LI Qiang, et al. Weighted elimination tree modeling method and its application in power grid matrix ordering performance evaluation[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1316-1321.
- [16] 王家融, 艾欣, 王坤宇, 等. 基于增广雅可比矩阵的交直流解耦潮流新算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1382-1389.
WANG Jiarong, AI Xin, WANG Kunyu, et al. A novel ac-dc decoupled power flow calculation method based on the augmented jacobian matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1382-1389.
- [17] 廖小兵, 刘开培, 张亚超, 等. 基于区间泰勒展开的不确定性潮流分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 750-758.
LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, ZHANG Yachao, et al. Uncertain power flow analysis based on interval Taylor expansion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 750-758.
- [18] 张涛, 张东方, 王凌云, 等. 基于改进小生境粒子群算法的主动配电网优化重构[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2018, 31(3): 473-478.
ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, et al. Optimal reconfiguration of the active distribution network based on improved niche multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 31(3): 473-478.
- [19] DHARMAPANDIT O, PATNAIK R K, DASH P K. A fast time-frequency response based differential spectral energy protection of AC microgrids including fault location[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 331-358. DOI: 10.1186/s41601-017-0062-0.
- [20] 李亚楼, 周孝信, 吴中习. 基于PC机群的电力系统机电暂态仿真并行算法[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 7-12.
LI Yalou, ZHOU Xiaoxin, WU Zhongxi. Personal computer cluster based parallel algorithm for power system electromechanical transient stability simulation[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 7-12.
- [21] LI Zhao, DONDE V D, TOURNIEL J C, et al. On limitation of traditional multi-core and potential of many-core processing architectures for sparse linear solvers used in large-scale power system applications[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, Detroit, MI, USA: 1-8.
- [22] TOURNIER J C, DONDE V, LI Zhao. Potential of general purpose graphic processing unit for energy management system[C] // 6th International Symposium on Parallel Computing in Electrical Engineering, April 3-7, 2011, Luton, UK: 50-55.
- [23] 于尔铿, 刘广一, 周京阳. 能量管理系统[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [24] BELLIFEMINE F, CAIRE G, GREENWOOD D. Developing multi-agent systems with JADE[M]. John Wiley & Sons, 2007.

收稿日期: 2018-05-03; 修回日期: 2018-06-15

作者简介:

李静(1983—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力调度自动化高级应用; E-mail: lijing2010@epri.sgcc.com.cn

罗雅迪(1986—), 男, 学士, 工程师, 研究方向为电力调度自动化高级应用; E-mail: luoyadi@epri.sgcc.com.cn

郭健(1987—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统高性能计算, 电网调度自动化. E-mail: guojian_715@126.com

(编辑 周金梅)