

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201104

云计算环境下的电力任务节能调度方法研究

张浩

(国网黄山供电公司, 安徽 屯溪 245000)

摘要: 随着电力行业数据的持续增长, 云环境下电力调度消耗的能量越来越多, 加剧了能源危机和环境污染。在电力云平台架构的基础上, 提出一种基于云计算的电力任务节能调度算法。将虚拟机分配给具有最优性能功率比的节点进行处理, 通过迁移虚拟机实现资源整合。通过仿真将该调度算法与节能虚拟机调度节点算法和改进型最佳拟合递减算法进行比较。仿真结果表明, 在不显著降低效率的情况下, 该方法可以节能 10% 以上。该研究为云环境下最优电力调度方法的发展提供了一定的参考和借鉴。

关键词: 云计算; 资源整合; 调度算法; 虚拟机; 电力数据

Research on power task energy saving scheduling method in cloud computing environment

ZHANG Hao

(State Grid Huangshan Power Supply Company, Tunxi 245000, China)

Abstract: With the continuous growth of power industry data, more and more energy is consumed by power dispatching in cloud environment, which aggravates the energy crisis and environmental pollution. Based on the power cloud platform architecture, this paper proposes a power task energy-saving scheduling algorithm based on cloud computing. The virtual machine is assigned to the node with the optimal performance power ratio, and the resource integration is realized by migrating the virtual machine. Through simulation, the scheduling algorithm is compared with the energy-saving virtual machine scheduling node algorithm and the improved best fit decline algorithm. The simulation results show that this method can save more than 10% energy without significantly reducing the efficiency. This study provides a reference for the development of optimal power dispatching method in cloud environment.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5212S0170002).

Key words: cloud computing; resource integration; scheduling algorithm; virtual machine; power data

0 引言

电力企业信息化作为新型工业化的重要推动力, 也是发展坚强智能电网的基础和保证。随着电力信息技术不断发展, 数据不断增长^[1]。云计算的出现, 使得大数据处理成为可能。随着全球云计算提供商服务器数量的不断增长, 由此带来的高能耗加剧了能源危机和环境污染, 越来越受到人们的关注^[2]。现有的资源调度算法几乎没有考虑云计算的能耗。因此, 对考虑云计算能耗的电力调度方法进行研究具有重要意义。

目前, 国内外科研人员对云环境下电力任务调

度方法进行了大量的研究, 但关于云环境下电力任务节能调度方法的研究很少。在文献[3]中, 将多目标粒子群算法用于虚拟机迁移, 完成云环境下的电力资源调度。不仅保证了服务质量, 同时兼顾了高资源利用率和低运行成本等。通过实验对该算法的可行性进行验证, 结果表明, 该算法在各项指标上都较为优越。在文献[4]中, 提出了一种结合遗传算法和蚁群算法用于云环境下的电力任务调度策略。蚁群算法的路径选择概率由遗传算法随机生成的二进制编码个体进行调整。在文献[5]中, 考虑到调度的公平和效率问题, 将最短任务延迟时间和蚁群算法相结合, 以最小化任务延迟时间。通过仿真将该算法与传统调度算法相比较。结果表明: 该算法在任务等待时间、效率上具有一定的优势。在文献[6]

中,提出一种基于云计算的成本约束下的高效调度算法。通过算例验证了算法的有效性和准确性。结果表明,该算法可以最大程度地减少任务集执行过程中的能耗,但必须符合预算成本约束。这些研究为云环境下电力任务节能调度技术研究提供了理论基础。

基于这些研究,文中提出一种基于云计算的电力任务节能调度算法(Energy Efficient Virtual machine Scheduling, EEVS)。将虚拟机分配给具有最优性能功率比的节点进行处理,通过迁移虚拟机实现资源整合。通过仿真将文中算法与其他算法进行比较分析。

1 电力云体系结构

云计算广泛应用于智能电网领域。云计算在电网构建、智能分析、安全访问、运营管理、实时监控和大容量存储中发挥着重要作用^[7]。适用于智能电网的发、输、变、配、调度等方面的运行。将云计算技术应用于电网数据中心可以显著提高资源利用率,并减少电力系统设备上的数据处理负荷^[8]。电力云系统是多个服务的集合,而不是单个服务层。图1所示为电力云体系结构模型。它主要由基础结构层、虚拟化层、系统管理层、应用程序接口层和服务访问层组成。



图1 电力云体系结构

Fig. 1 Power cloud architecture

2 调度策略

2.1 任务模型

在计算密集型的虚拟机任务时,只有工作状态的物理节点才会耗能,并且在虚拟机任务完成后,每个节点都会立即进入睡眠或关闭状态^[9]。因此,

工作中虚拟机处理所消耗的能量如式(1)所示。

$$E = \sum_{i=1}^n y(i) \left((P_{i,s} + P_{i,static}) \max_{j=1}^{nc_i} \{t_{i,j}\} + \frac{1}{nc_i} \sum_{j=1}^{nc_i} x(i,j) P_{i,dynamic}^{f(i,j)} t_{i,j} \right) \quad (1)$$

式中: $y(i)$ 和 $x(i,j)$ 均为 0 或 1 变量,如果节点 pm_i 处理任务,则 $y(i)=1$, 否则为 0, 如果节点 pm_i 的内核 j 在工作中,则 $x(i,j)=1$, 否则为 0; $P_{i,static}$ 、 $P_{i,dynamic}^{f(i,j)}$ 、 $t_{i,j}$ 分别为节点 pm_i 的静态功率及其内核 j 的动态功率和处理时间。

对计算密集的虚拟机任务进行研究,一个虚拟机一次只能分配一个内核,如忽略迁移时间和功耗,则以四元数的形式 $vm_i = (w, st, at, d)$ 表示虚拟机。其中 w 、 st 、 at 、 d 为虚拟机 vm_i 的计算量、执行时间、开始时间、截止时间。

提交每个虚拟机时,将确定其计算量、开始和截止时间。如果虚拟机无法在规定时间内完成,标记为失败^[10]。为了降低能耗,周期内不会对失败的虚拟机再分配,一周期为 1 s。物理节点的能耗为周期内消耗之和。

虚拟机所需的资源 rr 为剩余计算量与剩余时间的比值,如式(2)所示^[11]。

$$vm_i rr = \frac{vm_i w - vm_i wf}{vm_i d - t} \quad (2)$$

式中: $vm_i wf$ 为完成的计算量; t 为当前时刻。

2.2 调度算法

云环境中每个异构节点的计算资源和功耗都不同,如何选择物理节点和内核,如何确定内核的工作频率降低能耗^[12]。

对于物理节点 pm , 性能功率比 ppr (performance power ration, ppr) 为物理节点计算能力与峰值功率的比值,如式(3)所示^[13]。

$$pmppr = \frac{pm pc \cdot pmf_{max}}{pmp_s + pmp_{cpu}} \quad (3)$$

式中, pmp_{cpu} 和 pmp_s 分别为处理器和其他组件的峰值功率。 ppr 越高节点计算资源越多,优先分配。对于物理节点 pm 最优性能功率比 (optimal performance power ration, $oppr$) 为节点以最优频率运行时所提供的计算资源及消耗的功率之比,如式(4)所示^[14]。

$$pmoppr = \frac{pm pc * f_{opt}}{pm P_s + pm P_{static} + pm P_{dynamic}^{f_{opt}}} \quad (4)$$

式中, f_{opt} 为工作内核的实际最优频率。虚拟机调

度流程如图 2 所示。

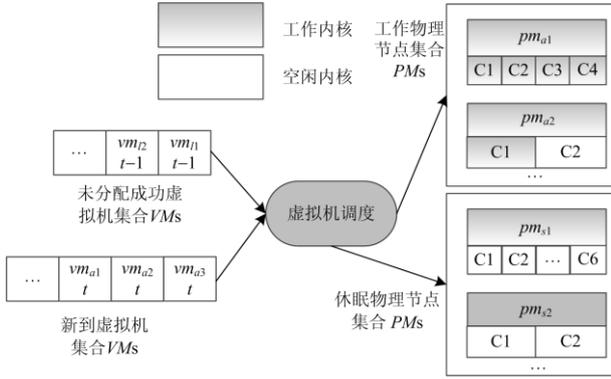


图 2 虚拟机调度流程

Fig. 2 Virtual machine scheduling process

在一个调度周期中，首先对虚拟机信息进行统计，这包括在上一个调度周期中未成功分配的虚拟机(如 vm_{t1} 和 vm_{t2})和新虚拟机(如 vm_{a1} 、 vm_{a2} 和 vm_{a3})，接着将各虚拟机分配给相应节点的内核^[15]。为了提高分配效率，以 $oppr$ 降序排列异构物理节点提高效率，如 $pm_{a1}oppr \geq pm_{a2}oppr \geq pm_{s1}oppr \geq pm_{s2}oppr$ 。由于资源问题而无法调度虚拟机，将保留在下一个调度周期内进行处理。后续处理中失败的虚拟机不再处理，调度操作由虚拟机的分配、虚拟机的处理和系统的重建组成。

分配是将各虚拟机分配给相应节点的内核，在处理期间，动态电压频率调节(Dynamic Voltage Frequency Scaling, DVFS)用于为每个工作内核设置最优频率，更新虚拟机和节点信息^[16]。在系统重建阶段，通过虚拟机的转移战略统一协作资源，达到降低能耗的目标。

文中提出一种基于云计算的电力任务高效调度算法 EEVS，将虚拟机分配给 $oppr$ 的节点。在调度周期 t 中，给虚拟机分配适当的物理节点和内核，并设置所有工作内核的最优频率，然后更新虚拟机信息^[17]。一些虚拟机在调度周期内完成，确定工作节点计算能力。周期结束时调整节点的虚拟机分配。

整合计算资源，降低系统能耗。下一个调度周期反复进行上述动作，直到处理完所有的虚拟机任务为止。该算法的流程如图 3 所示。

系统中各节点的总能源消耗是每个调度周期的能源消耗之和，如式(5)所示^[18]。

$$E_{total} = \sum_{t=1}^T E_t = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^n E_{i,t} = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^n (E_{i,t}(cpu) + E_{i,t}(s)) \quad (5)$$

式中： E_t 和 $E_{i,t}$ 分别为在调度周期 t 内系统和第 i 个节点的能耗； $E_{i,t}(cpu)$ 和 $E_{i,t}(s)$ 分别为调度周期内

各节点的处理器及其他组件的能耗。

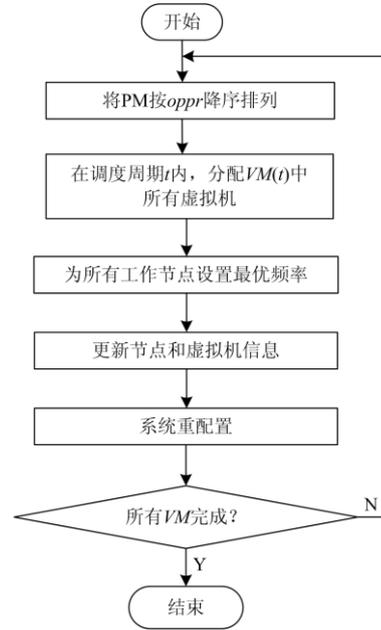


图 3 算法流程

Fig. 3 Algorithm flow

2.3 虚拟机分配

虚拟机分配流程如图 4 所示。给虚拟机分配一个合适的节点到内核，因为采用降序排列，所以对节点集 PM 进行顺序遍历。如节点中存在空闲内核，分配虚拟机到该内核。否则，分配给满足要求的工作内核。分配成功更新信息，不成功进入等待队列下一个周期优先调度^[19]。为避免由于等待时间过长导致资源超过节点最大计算资源，在分配过程中，内核可用的计算资源不少于虚拟机所需的计算资源。

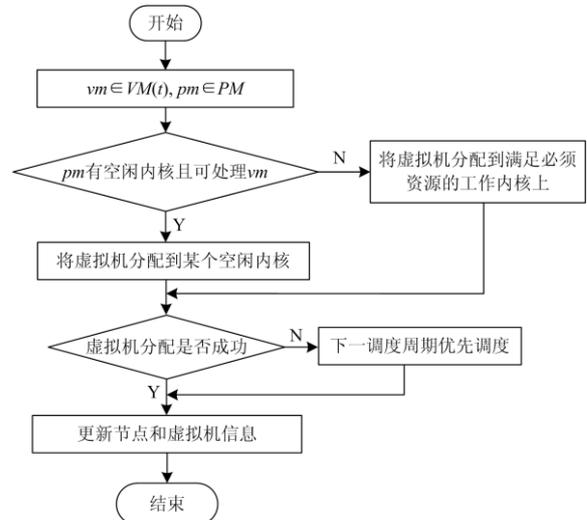


图 4 虚拟机分配流程

Fig. 4 Virtual machine allocation process

2.4 虚拟机处理

在一个周期内分配所有虚拟机时,需要计算和设置所有工作内核频率,以降低能耗。该阶段包括设置每个工作节点的工作频率、对节点和虚拟机信息进行更新^[20]。处理流程如图5所示。

关于各工作节点,首先统计核数,算出节点 f_{opt} 。如果虚拟机必须资源的总和大于 f_{opt} 。内核以满足必须资源的最低频率运行。否则,内核以 f_{opt} 执行。所有内核都以最优频率运行,各虚拟机都占据内核调度周期的一部分^[21]。计算机完成后,需要更新所有资源。当虚拟机在调度时段内完成时,从调度列表中删除,完成后进入空闲状态以降低能耗。

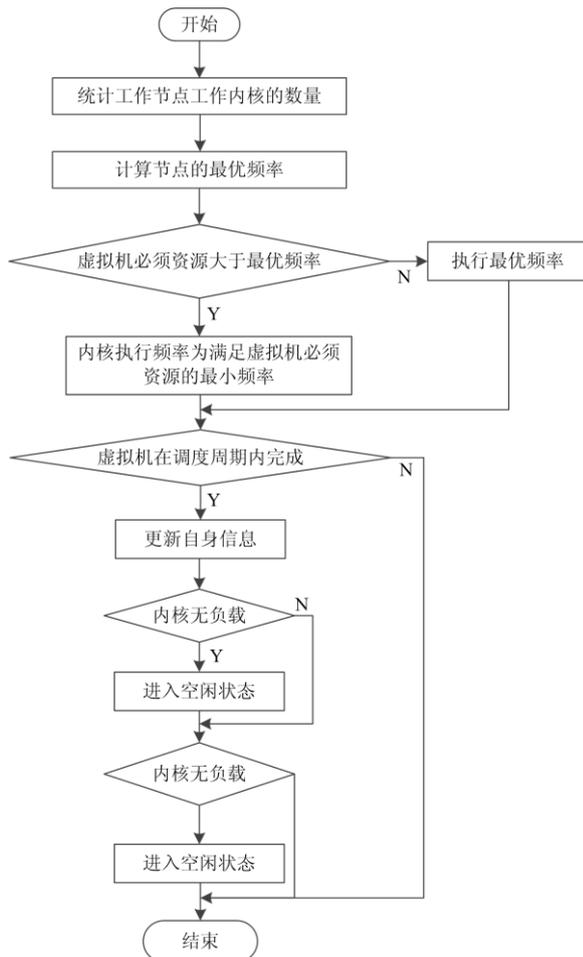


图5 虚拟机处理流程

Fig. 5 Virtual machine processing flow

3 实验结果与分析

3.1 实验参数

通过仿真进行算法验证。程序都由C++编写,并在Ubuntu 12.04系统中运行^[22]。实验硬件平台是联想M3900(A4-7210/4GB/500GB)。云环境采用

Hadoop 2.4,虚拟化技术广泛应用于云环境,是云服务“按需付费”的技术保障。在虚拟化层,降低云环境能耗的主要途径是虚拟机调度。调度是将虚拟机节点分配到物理节点上执行用户请求。为了反映节点的异构性,节点在云环境中使用的处理器由表1所示的8种处理器构成,由PC处理器和服务器处理器各4个组成,设每个周期为1s,虚拟机提交时间0~100s,在一个周期中虚拟机只能运行在一个内核,周期结束后可迁移。

表1 处理器和节点参数

Table 1 Processor and node parameters

型号	内核数	最大频率/GHz	CPU功率/W	空闲功率/W	峰值功率/W
AMD X2 250	2	3.0	65	56	101
AMD X6 1055T	6	2.8	95	79	164
Inter i7-970	6	3.2	130	79	198
Inter i5-2300	4	2.8	95	45	112
Inter X3200	4	2.4	105	79.8	132
Inter E3110	2	3.0	65	75.2	117
Inter E3-1265Lv3	4	2.5	45	19	58.5
Inter E3-1240V2	4	3.4	69	14.1	72.5

3.2 实验分析

为了验证所提出算法的优越性和可行性,与节能虚拟机调度节点(Energy Efficient Virtual machine Scheduling-Nodes, EEVS-N)算法和改进型最佳拟合递减(Modified Best Fit Decreasing, MBFD)算法比较,EEVS-N算法为EEVS算法未对物理节点排序和随机选择节点。MBFD算法是文献[23]提出的,虚拟机在迁移中使用随机选择策略。

图6和图7分别为轻负荷(100~1000个虚拟机)和重负荷(1000~5000个虚拟机)在100个节点处理时的能量消耗。从图6可以看出,EEVS算法的能耗一直最小,EEVS-N算法在虚拟机数量4000以下时,消耗最大,4000以上时MBFD算法损耗最大。因为EEVS算法选择的节点具有最优性能功率

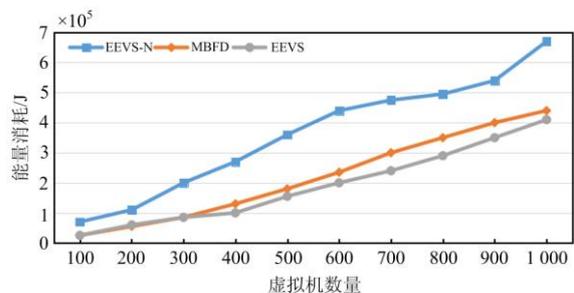


图6 100个节点处理不同虚拟机消耗能量1

Fig. 6 100 nodes working with different virtual machines energy consumption 1

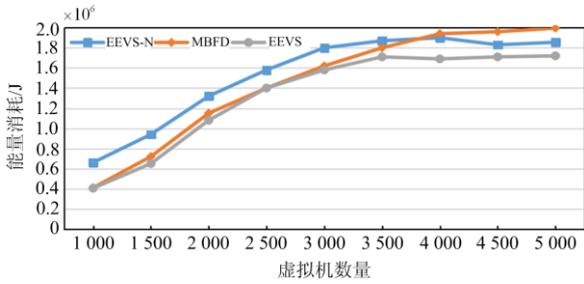


图 7 100 个节点处理不同虚拟机消耗能量 2
Fig. 7 100 nodes working with different virtual machines energy consumption 2

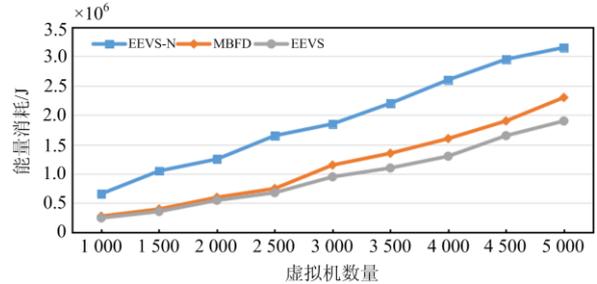


图 9 500 个节点处理不同虚拟机消耗能量 2
Fig. 9 500 nodes working with different virtual machines energy consumption 2

比，所以如果处理相同数量的虚拟机，则 EEVS 算法的能耗最小。在处理 800 个虚拟机的情况下，EEVS 和 MBFD 的能量能耗分别是 29 430.1J 和 35 874.9J。EEVS 算法比 MBFD 算法耗能低 18.0%。随着任务负载的增加，如图 7 所示，EEVS 算法能耗始终最小，这是因为整体调度可以充分利用计算资源。

图 8 和图 9 是轻负荷(100~1 000 个虚拟机)和重负荷(1 000~5 000 个虚拟机)在 500 个节点处理时的能量消耗。在 5 000 台虚拟机的处理中 500 节点能够按时完成，三种算法的能耗与虚拟机的数量成比例。EEVS 算法能耗最低，MBFD 算法次之，EEVS-N 算法最大。EEVS、EEVS-N 和 MBFD 算法分别对 100、1 000 和 5 000 虚拟机进行处理时，能耗分别为(24758.5j、61634.2j、22046.2j)、(266317j、637659j、298255j)、(1903450j、3143500j、2308540j)。数量为 1000 时，EEVS 比 MBFD 的能耗低 10.7%，比 EEVS-N 的能耗低 58.2%。这是因为整体调度可以充分利用计算资源，其他算法的调度器单元是内核，这导致一些内核中的计算资源“碎片”不能再利用^[24]。

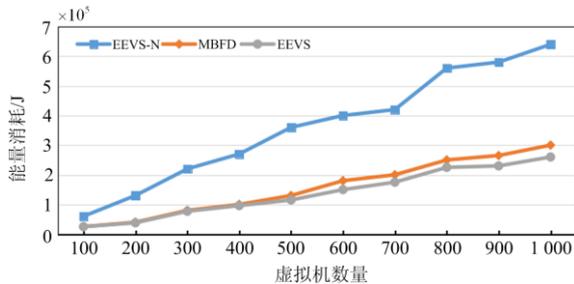


图 8 500 个节点处理不同虚拟机消耗能量 1
Fig. 8 500 nodes working with different virtual machines energy consumption 1

图 10 和图 11 分别为各算法在云环境中使用 100 个节点处理 500 和 5 000 个虚拟机时使用的工作节点数。在处理 500 个虚拟机时，EEVS 算法使用 21 个工作节点，MBFD 算法使用 24 个工作节点，EEVS-N 算法介于两者之间。这是因为 EEVS 算法充分利用了节点的计算资源、EEVS-N 算法随机选择节点、MBFD 选择功耗最低的节点。由于虚拟机的最迟到达时间为 100 s，因此 100 s 之后节点数开始减少^[25]。当处理 5 000 个虚拟机时，EEVS 和 EEVS-N 节点数基本相同。因为过载需要充分利用所有节点的计算能力。在大多数调度时段中，MBFD 算法具有比其他算法更多的操作节点。

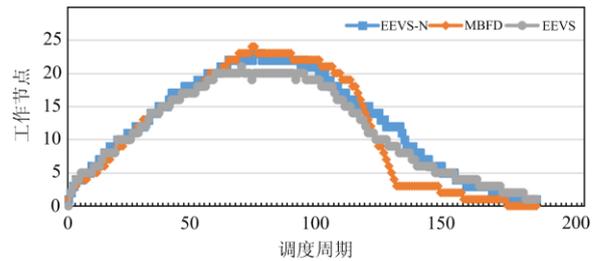


图 10 100 个节点处理 500 虚拟机时工作节点数量
Fig.10 100 nodes when processing 500 virtual machines number of work nodes

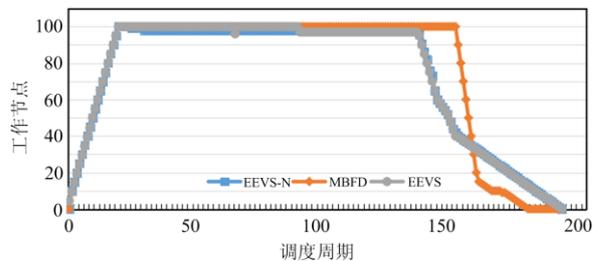


图 11 100 个节点处理 5000 虚拟机时工作节点数量
Fig.11 100 nodes when processing 5000 virtual machines number of work nodes

4 结论

文中提出一种基于云计算的电力任务节能调度算法 EEVS。将虚拟机分配给具有最优性能功率比的节点进行处理,通过迁移虚拟机实现资源整合。通过仿真将文中算法与 EEVS-N 算法、MBFD 算法进行比较。结果表明,在没有显著降低效率的情况下,文中方法可以节能 10% 以上。后续针对电力任务数量和规模不断增加,将不断完善和改进基于云计算的电力任务高效调度方法。

参考文献

- [1] 王月月, 陈民铀, 姜振超, 等. 基于云理论的智能变电站二次设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 71-77.
WANG Yueyue, CHEN Minyou, JIANG Zhenchao, et al. A state assessment method for secondary equipment in intelligent substation based on cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 71-77.
- [2] 彭丽苹, 吕晓丹, 蒋朝惠, 等. 基于 Docker 的云资源弹性调度策略[J]. 计算机应用, 2018, 38(2): 557-562.
PENG Liping, LÜ Xiaodan, JIANG Chaohui, et al. Flexible scheduling strategy of cloud resources based on Docker[J]. Computer Application, 2018, 38(2): 557-562.
- [3] 王德文, 刘晓萌. 基于虚拟机动态迁移的电力仿真云计算平台资源调度策略[J]. 计算机科学, 2015, 39(12): 97-105.
WANG Dewen, LIU Xiaomeng. Resource scheduling strategy of power simulation cloud computing platform based on virtual machine dynamic migration[J]. Computer Science, 2015, 39(12): 97-105.
- [4] 王波, 张晓磊. 基于粒子群遗传算法的云计算任务调度研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(6): 84-88.
WANG Bo, ZHANG Xiaolei. Research on cloud computing task scheduling based on particle swarm genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Application, 2015, 51(6): 84-88.
- [5] 魏贇, 陈元元. 基于改进蚁群算法的云计算任务调度模型[J]. 计算机工程, 2015, 41(2): 12-16.
WEI Fu, CHEN Yuanyuan. Cloud computing task scheduling model based on improved ant colony algorithm[J]. Computer Engineering, 2015, 41(2): 12-16.
- [6] 张龙信, 周立前, 文鸿, 等. 基于异构云计算的成本约束下的工作流能量高效调度算法[J]. 计算机科学, 2020, 47(8): 112-118.
ZHANG Longxin, ZHOU Liqian, WEN Hong, et al. Energy efficient scheduling algorithm of workflow under cost constraint based on heterogeneous cloud computing[J]. Computer Science, 2020, 47(8): 112-118.
- [7] 任金霞, 黄艺培, 钟小康. 基于遗传算法的云任务调度改进算法[J]. 江西理工大学学报, 2018, 39(6): 90-94.
REN Jinxia, HUANG Yipei, ZHONG Xiaokang. Improved cloud task scheduling algorithm based on genetic algorithm[J]. Journal of Jiangxi University of Technology, 2018, 39(6): 90-94.
- [8] NAHMAN J, SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 41(12): 151-156.
- [9] 叶波. 基于负载均衡度的云计算任务调度算法[J]. 东北电力大学学报, 2019, 39(1): 88-95.
YE Bo. Cloud computing task scheduling algorithm based on load balancing degree[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2019, 39(1): 88-95.
- [10] 谢黎, 周华良, 于同伟, 等. 一种智能变电站新型双网冗余设备及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 151-156.
XIE Li, ZHOU Hualiang, YU Tongwei, et al. A new dual network redundant equipment and its implementation for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 151-156.
- [11] 傅质馨, 李满逸, 袁越. 泛在电力物联网关键技术探讨[J]. 电力建设, 2019, 40(5): 1-12.
FU Zhixin, LI Xiaoyi, YUAN Yue. Discussion on key technologies of ubiquitous power internet of things[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(5): 1-12.
- [12] 顾志祥, 孙思宇, 孔飞, 等. 燃气冷热电分布式能源系统设计优化综述[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 8-13, 42.
GU Zhixiang, SUN Siyu, KONG Fei, et al. Design optimization of gas cooling, heating and power distributed energy system[J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 8-13, 42.
- [13] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 92-99.
ZHANG Jie, ZENG Guohui, ZHAO Jinbin, et al. Capacitor voltage equalization strategy for modular multilevel converter based on improved bubble sorting[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 92-99.
- [14] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional order control for battery/superconducting hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.

- [15] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [16] PATEL G K, DABHI V K, PRAJAPATI H B. Clustering using a combination of particle swarm optimization and K-means[J]. Journal of Intelligent Systems, 2017, 12(3): 457-469.
- [17] 陈思宇, 柴庆宣, 李延松, 等. 综合能源系统潮流及最优潮流计算模型与方法综述[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 1-12, 20.
CHEN Siyu, CHAI Qingxuan, LI Yansong, et al. Overview of power flow and optimal power flow calculation models and methods for integrated energy systems[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 1-12, 20.
- [18] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 46(5): 159-162.
- [19] 马骏, 江锐, 丁倩, 等. 基于多元宇宙优化支持向量机的短期光伏发电功率预测[J]. 热力发电, 2020, 49(4): 87-92.
MA Jun, JIANG Rui, DING Qian, et al. Short term photovoltaic power prediction based on multi universe optimization support vector machine[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(4): 87-92.
- [20] JIA Zhiwei, WANG Lijun, ZHANG Jinchuan, et al. High efficiency, low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 88-95.
- [21] AZUMAYA C M, DAYS E L, VINSON P N, et al. Screening for AMPA receptor auxiliary subunit specific modulators[J]. PLOS ONE, 2017, 12(3): 1523-1538.
- [22] FAN Chengli. Hybrid artificial bee colony algorithm with variable neighborhood search and memory mechanism[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(2): 405-414.
- [23] 裴善鹏, 朱春萍. 高可再生能源比例下的山东电力系统储能需求分析及省级政策研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 29-35.
PEI Shanpeng, ZHU Chunping. Energy storage demand analysis and provincial policy research of Shandong power system under high renewable energy ratio[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 29-35.
- [24] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联网的二次设备运维技术研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 177-184.
WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of secondary equipment operation and maintenance technology based on Internet of things and mobile interconnection[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 177-184.
- [25] 唐耀华, 郭为民, 崔杨. 水-火发电机组频率控制策略研究[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 153-161.
TANG Yaohua, GUO Weimin, CUI Yang. Study on frequency control strategy of water thermal power unit[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 153-161.

收稿日期: 2020-09-09; 修回日期: 2020-10-29

作者简介:

张浩(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统调度自动化以及网络信息安全方面工作。E-mail: zhangh1972@163.com

(编辑 张爱琴)