

基于容器的配网保护微服务建模与 计算资源调度方法

林志超, 钟红梅, 韦园清, 张桂玲

(广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516001)

摘要:随着智能配电网的发展,配电网的设备类型及数量呈现出海量接入的态势。异构多源的数据信息在爆发式增长的同时,也对智能配电网保护业务的实时性、可靠性提出了更高要求。为了更好的满足配网保护业务的实时性要求,提出了基于容器的配网保护微服务建模与计算资源调度方法。首先,将配网保护业务分解成多个微服务,建立了配网保护业务的微服务时序逻辑模型和基于容器的配网保护业务微服务架构;然后,建立了微服务的计算资源调度模型,并通过改进差分进化算法求得最小业务延时的微服务计算资源调度结果;最后,仿真算例比较了不同微服务计算资源调度策略的结果,并分析了 CPU 计算资源量对计算资源调度结果的影响,仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词:配网保护;容器技术;微服务;计算资源调度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.019 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2022)05-0174-07

Container-based microservice modeling and computing resource scheduling method for distribution network protection

LIN Zhichao, ZHONG Hongmei, WEI Yuanqing, ZHANG Guiling

(Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516001, China)

Abstract: With the development of intelligent distribution networks, the type and quantity of equipment in distribution networks show the trend of massive access. The explosive growth of heterogeneous and multi-source data information also puts forward higher requirements for the real-time and reliability of intelligent distribution network protection business. In order to better meet the delay requirements of distribution network protection services, this paper proposes a container-based distribution network protection microservice modeling and computing resource scheduling method. Firstly, the distribution network protection service is decomposed into multiple microservices, and the microservice timing logic model of the distribution network protection service and the container-based microservice architecture of the distribution network protection service are established. Furthermore, the computing resource scheduling model of microservice is established, and the microservice computing resource scheduling result with minimum service delay is obtained by improving the differential evolution algorithm. Finally, simulation examples compare the results of different microservice computing resource scheduling strategies and analyze the impact of CPU computing resources on computing resource scheduling results. The simulation results verify the effectiveness of this method.

收稿日期:2021-09-23;修回日期:2021-11-19

基金项目:广东电网有限责任公司科技项目(031300KK52180108)

通信作者:林志超(1973—),男,硕士,高级工程师,主要从事继电保护及配用电技术研究;E-mail:linzcdeyx@163.com

Key words: distribution network protection; container technology; microservices; computing resource scheduling

在中国积极推进智能配网建设的过程中,分布式电源和配用电智能设备呈现广泛接入态势,造成了配电网中的待处理数据量激增和多样异构,给配电终端的计算处理能力带来挑战^[1-3]。然而,传统配电终端存在软硬件强耦合、数据和应用强耦合的问题,不能适应海量终端设备泛在接入的态势^[4-6],需对配电网的保护技术体系进行改进和创新^[7]。

容器与微服务技术目前已在配网自动化、边缘计算等方面有所应用。将容器技术、微服务技术应用在配网保护终端亦能使其更好地适应配电网的新形态^[8-9]。在配网保护终端中引入配网保护业务微服务架构,考虑容器机制、配网保护业务的可分解性与微服务的时序逻辑,通过软件定义的方式实现软件与硬件的解耦、数据与应用解耦,计算资源灵活分配,终端功能灵活部署,从而能满足配网保护业务的实时性、安全性、可靠性需求,提高配网自动化系统的运行可靠性和运维效率^[10-12]。对配网保护终端容器的计算资源调度进行优化,能够减小保护业务的延时,更好的满足保护业务的实时性要求,进一步提高计算资源的利用率,实现对微服务计算资源调度的优化。因此,研究配网保护微服务建模与计算资源调度方法具有十分重要的意义。

目前,已有学者对容器和微服务在配电网中的应用进行了相关的研究。文献[13]提出了一种基于容器技术的边缘计算数据处理模型,设计了一种云边协同的边缘侧数据处理架构,实现了基于容器技术的边缘计算嵌入式数据库和云边数据同步的关键技术;文献[14]介绍了在设备上应用容器技术的方案,通过软件 APP 化以及使用 MQTT 消息总线进行 APP 间通信,使电力二次设备具备边缘计算能力;文献[15]基于微服务架构设计了一种电力设备温度在线监测系统的架构方案,以解决传统电力设备温度在线监测系统功能的重复以及架构复杂化的问题。目前,鲜有文献将容器与微服务技术应用到配网保护研究当中。关于计算资源调度问题,学者们也进行了一定的研究;文献[16]建立了容器与微服务的资源供需模型,并提出了一种考虑弹性伸缩机制的容器计算资源分配方法;文献[17]提出了一种边缘计算终端业务的时序逻辑与计算负荷建模方法,生成业务的计算负荷时序曲线从而对终

端的计算资源进行配置,并指出业务具有时序逻辑性,而现有的计算资源调度方法忽视了业务逻辑。本文所研究的配电网保护业务与目前配电网台区应用场景的相同点在于这些业务都可被分解为一系列微服务,对微服务进行时序逻辑的建模和计算资源的调度分配,不同点在于配电网保护业务的实时性要求更高,是刚性需求,本文正是契合保护的实时性刚性需求建立以延时最小化为目标的优化模型,提出配网保护终端的计算资源调度方法,将配网保护业务拆分成多个微服务,建立配网保护的微服务时序逻辑模型和微服务的计算资源调度模型,采用改进差分进化算法求解保护业务延时最小化的配网保护终端的计算资源调度策略,仿真结果验证本文方法的有效性。

1 基于时序逻辑的配电网保护业务微服务模型

1.1 配电网保护业务的微服务

根据配网保护业务流程和功能需求,将配网保护业务拆分为 11 个微服务,如表 1 所示。每个微服务需被部署在保护控制终端的容器中,并由容器提

表 1 配网保护业务的微服务

Table 1 Microservices of distribution network protection service

编号	微服务名称	微服务功能
1	接收 SV 报文	接收电压、电流的采样值的相关模型对象和服务
2	接收 goose 报文	接收跳合闸信号、开关状态值、档位、温度等
3	解析 SV 报文	解析电压、电流的采样值
4	解析 goose 报文	解析跳合闸信号、开关状态值、档位、温度等数据
5	数据存储	存储报文解析后的数据
6	重采样	重采样后数据保留有原信号的幅值和瞬时相位信息且满足整周期采样
7	矢量计算	对保护电压、保护电流进行矢量计算
8	频率计算	对电网频率进行计算
9	谐波计算	对电网谐波进行计算
10	逻辑判断	开入状态、定值、计算值等的实时获取及所有保护的逻辑判断
11	跳闸控制	根据判断结果做出跳闸控制保护动作

供计算资源完成微服务的执行。

1.2 微服务时序逻辑模型

建立配网保护业务的微服务时序逻辑如图1所示。该模型将微服务数据依赖关系转化为串联型、并联型和复合型3种连接支路。

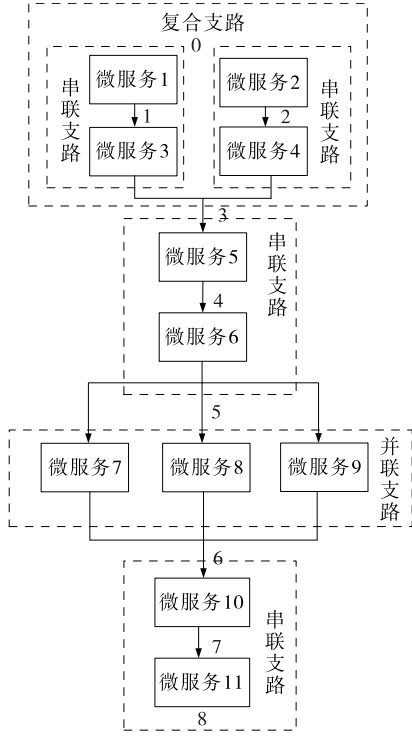


图1 配网保护业务的微服务时序逻辑

Figure 1 Sequential logic diagram of microservice of distribution network protection service

微服务1为接收SV报文,微服务3为解析SV报文,两者存在先接收后解析的顺序,故形成第1个串联支路。同理,微服务2为接收goose报文,微服务4为解析goose报文,形成第2个串联支路。由于分别接收与解析SV报文、goose报文互相独立,即第1个串联支路与第2个串联支路互不影响,故两者并联形成复合支路。微服务5为数据存储、微服务6为重采样,两者存在执行的先后顺序,故微服务5与微服务6形成第3个串联支路。微服务7为矢量计算、微服务8为频率计算、微服务9为谐波计算,三者互相独立,形成第1个并联支路,表示同时进行矢量计算、频率计算与谐波计算。微服务10为逻辑判断、微服务11为跳闸控制,两者存在执行的先后顺序,故形成第4个串联支路。

用连接矩阵模型 L 描述各微服务所处支路的

连接始末关系。矩阵 L 共2行元素,列数取决于业务的微服务个数,每列表示1个微服务。矩阵 L 的第1行元素表示各微服务的起始节点编号,第2行元素表示各微服务的终止节点编号。根据图1可得到连接矩阵模型为

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 5 & 5 & 6 & 7 \\ 1 & 2 & 3 & 3 & 4 & 5 & 6 & 6 & 6 & 7 & 8 \end{bmatrix} \quad (1)$$

用串并关系模型 X 描述各微服务所处的支路类型。矩阵 X 共2行元素,列数取决于业务的微服务个数,每列表示1个微服务。矩阵 X 的第1行元素为串联支路编号,第2行元素为并联支路编号,当其中1行元素不为零时,表示处于对应的类型支路。根据图1可得到串并关系模型为

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 2 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 微服务1、3为第1个串联支路,因此微服务编号对应列的元素为1、0;微服务2、4为第2个串联支路,因此微服务编号对应列的元素为2、0;微服务5、6为第3个串联支路,因此微服务编号对应列的元素为3、0;微服务10、11为第4个串联支路,因此微服务编号对应列的元素为4、0。微服务7、8、9处于同一个并联支路,且为第1个并联支路,因此微服务编号对应列的元素为0、1。

1.3 基于容器的微服务架构

基于容器的配网保护微服务架构如图2所示,分为了数据平台、应用2个部分,配网保护业务通过调用这2个部分中的微服务来实现,各类微服务部署于相对应的容器中。其中数据平台中的微服务可为应用部分中的微服务提供数据支撑。

图2中,1-1、1-2表示一个微服务接收数据、完成计算、传递计算结果到下一个微服务的完整过程。1-1(1)、1-1(2)表示容器1、容器2中的微服务同时执行但分别传输给微服务3、微服务4,微服务3、微服务4执行完后再分别传输给微服务5。图2中1-1(1)表示当微服务1完成计算后,将计算结果传递到共享内存上,1-2(1)表示容器3需要从共享内存上接收容器1的计算结果,然后开始容器3的微服务计算。其余过程同理类推可得。

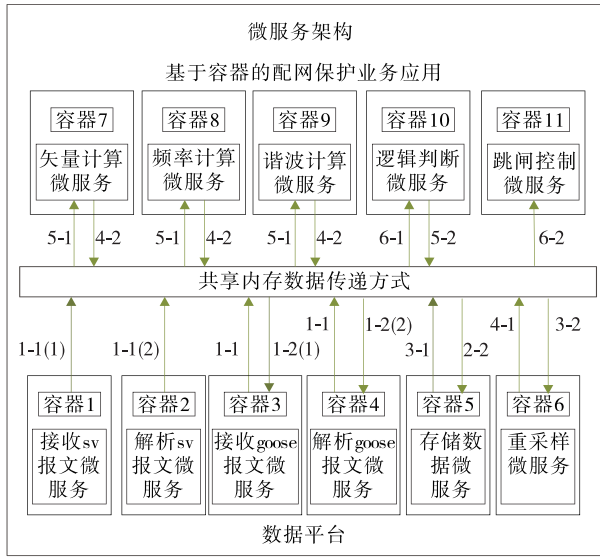


图 2 基于容器的配网保护业务微服务架构

Figure 2 Microservice architecture diagram of distribution network protection service based on container

2 配电网保护微服务的计算资源调度方法

本文的配网保护终端是采用微服务和容器技术实现保护业务,将各微服务部署到不同的容器中,并通过保护终端中的 CPU 分配合理的计算资源,以满足配网保护业务的实时性要求。并且,不同容器通过共享内存的方式进行数据交互。

2.1 决策变量和目标函数

本文建立的优化模型的决策变量为表示第 i 个微服务调度到保护终端的第 j 个 CPU 核的 0-1 变量 $s_{p_i,j}$ 和表示第 i 个微服务获得第 j 个 CPU 核的计算资源量的连续变量 $c_{p_i,j}$ 。

本文以最小业务延时为微服务计算资源调度模型的目标函数:

$$\min T = \sum_{k_1=1}^{N_1} t_{k_1,ser} + \sum_{k_2=1}^{N_2} t_{k_2,par} + \sum_{k_3=1}^{N_3} t_{k_3,com} \quad (3)$$

式中 $t_{k_1,ser}$ 、 $t_{k_2,par}$ 、 $t_{k_3,com}$ 分别为串联支路延时、并联支路延时和复合支路延时; N_1 、 N_2 、 N_3 分别为串联支路总数、并联支路总数和复合支路总数。

第 i 个微服务延时 t_{p_i} 为该微服务从共享内存获取数据的延时、计算延时、将数据存储到共享内存的延时之和,即

$$t_{p_i} = t_{p_i,rec} + t_{p_i,cal} + t_{p_i,sav} \quad (4)$$

$$t_{p_i,rec} = \alpha \cdot D_{p_i,rec} \quad (5)$$

$$t_{p_i,cal} = \frac{\beta_{p_i,cal}}{c_{p_i,j}} \quad (6)$$

$$t_{p_i,sav} = \alpha \cdot D_{p_i,sav} \quad (7)$$

式中 p_i 为第 i 个微服务; $t_{p_i,rec}$ 、 $t_{p_i,cal}$ 、 $t_{p_i,sav}$ 分别为第 i 个微服务为从共享内存接收数据的延时、计算延时、将数据存储到共享内存的延时; α 为单位数据量传输延时,为常数; $D_{p_i,rec}$ 为第 i 个微服务从共享内存获取的数据量; $\beta_{p_i,cal}$ 为第 i 个微服务的计算时钟周期; $c_{p_i,j}$ 为第 i 个微服务分配在第 j 个 CPU 核的计算资源; $D_{p_i,sav}$ 为第 i 个微服务存储到共享内存的数据量。

串联支路延时为串联支路上所有微服务从共享内存接收数据的延时、计算延时、存储数据到共享内存的延时之和,即

$$t_{k_1,ser} = \sum_{p_i \in K_1} t_{p_i,rec} + \sum_{p_i \in K_1} t_{p_i,cal} + \sum_{p_i \in K_1} t_{p_i,sav} \quad (8)$$

式中 $t_{k_1,ser}$ 为该串联支路的延时; K_1 为处于该串联支路上的微服务集合。

并联支路延时为并联支路上的微服务延时的最大值,即

$$t_{k_2,par} = \max_{p_i \in K_2} \{t_{p_i}\} \quad (9)$$

式中 $t_{k_2,par}$ 为该并联支路的延时; K_2 为处于该并联支路上的微服务集合。

复合支路延时为属于该复合支路的串联支路的延时最大值,即

$$t_{k_3,com} = \max\{t_{k_1,ser}\}, k_1 \in K_3 \quad (10)$$

式中 K_3 为属于该复合支路的串联支路集合。

2.2 约束条件

1) 第 i 个微服务所分配的第 j 个 CPU 核的计算资源量 $c_{p_i,j}$ 应该不小于零,即

$$c_{p_i,j} \geq 0 \quad (11)$$

2) 保护终端的第 j 个 CPU 核的计算资源应满足调度到该 CPU 核的微服务计算资源需求,保护终端的第 j 个 CPU 核的计算资源约束表达式如下:

$$0 \leq \sum_{i=1}^n s_{p_i,j} c_{p_i,j}(t) \leq C_j \quad (12)$$

式中 n 为微服务总数; C_j 为保护终端的第 j 个 CPU 核的计算资源。

3) 微服务调度集合约束。微服务调度集合约束可用 0-1 变量 $s_{p_i,j}$ 表示,微服务调度集合约束表达式如下:

$$\sum_{j=1}^m s_{pi,j} = 1 \tag{13}$$

式中 m 为 CPU 核数。

2.3 求解方法

本文采用改进差分进化算法求解,算法主要流程如图 3 所示。

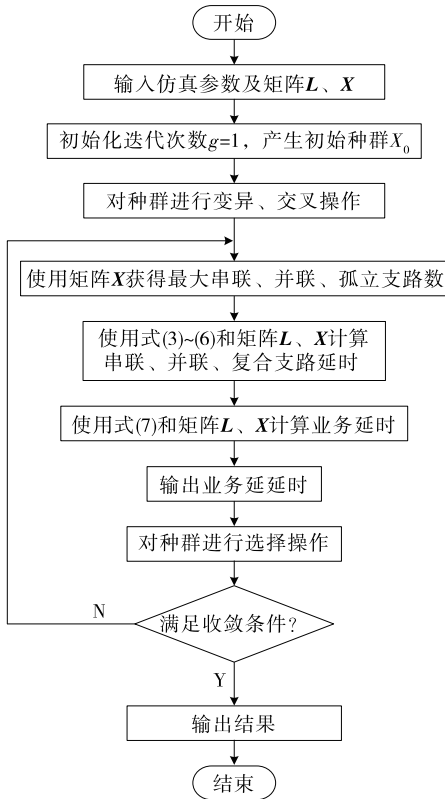


图 3 改进差分进化算法流程

Figure 3 Flow chart of improved differential evolution algorithm

本文提到的矩阵 L 用于描述各微服务所处支路的连接始末关系,矩阵 X 描述各微服务所处的支路类型。通过矩阵 X 可识别微服务 1、3 处于串联支路,因此使用式(8)计算串联支路延时,其余支路同理。通过矩阵 L 可识别微服务的先后执行顺序,如微服务 1、3 和 2、4 所在串联支路先于微服务 5、6 所在串联支路,因此微服务 5 开始执行的时刻为微服务 1、3 和 2、4 所在串联支路的延时的最大值,其余支路同理。

3 算例分析

3.1 仿真参数

本文配电保护业务的微服务仿真参数如表 2 所示。

表 2 业务包含的微服务参数

Table 2 Related workload parameters of tasks

编号	微服务大小/MB	计算复杂系数/(Mcycle/MB)	计算时钟周期/Mcycle	输出数据大小/MB
1	10	0.20	2.0	0.015
2	10	0.20	2.0	0.010
3	15	0.30	4.5	0.020
4	15	0.20	3.0	0.010
5	20	0.10	2.0	0.030
6	25	0.20	5.0	0.060
7	50	0.15	7.5	0.030
8	40	0.20	8.0	0.020
9	40	0.15	6.0	0.020
10	20	0.10	2.0	0.010
11	10	0.10	1.0	0.005

3.2 配网保护终端的计算资源调度策略分析

采用本文方法求解保护终端的计算资源调度结果,如表 3 所示,并对比其他 3 种调度策略的结果,其中策略 1 为小核偏向调度策略,策略 2 为大核偏向调度策略,策略 3 为随机调度策略。

由表 3 可知,当采用策略 1 时,由于保护终端调度的 CPU 核 1 的计算资源有限,使得配电保护业务的总延时高达 45.30 ms。当采用策略 2 时,保护终端调度的 CPU 核 2 提供了更多的计算资源,但由于配电保护业务执行的微服务多,CPU 单核运行效率更低,该微服务的调度方案业务延时比本文方法高出了 2.42 ms。当采用策略 3 时,由于调度方案并未得到优化,其业务延时也同样较高。通过保护终端微服务的计算资源调度优化,能有效地发挥 CPU 双核的计算资源协同优势,降低保护业务延时。

配网保护业务组成受配网运行状态的影响,分为正常运行状态和故障运行状态,其区别为业务是否包含表 1 中的跳闸控制微服务。当处于故障运行状态时,配网保护业务的微服务数量最多,计算量最大,延时最大。本文以这种延时最大的工况为场景进行计算资源的优化,所得资源调度结果可覆盖正常运行状态时的场景。

本文方法与采用 PSO 算法求解结果对比于表 4 给出。从表 4 结果可知,本文方法相比 PSO 方法寻优能力更强,PSO 算法容易陷入局部最优解。采

用本文方法能更加有效求解业务延时最小的配网保护终端计算资源调度结果。

3.3 配网保护终端的计算资源调度影响因素分析

本文分析了 CPU 核的计算资源对保护终端计算资源调度的影响,保持 CPU 核 1 的计算资源为 1 GHz,改变 CPU 核 2 的计算资源,分析 CPU 核 2 的计算资源对计算资源调度结果的影响,如表 5 所示。由表 5 可知,在相同 CPU 核 1 的计算资源下,

随着 CPU 核 2 的计算资源增加,调度于 CPU 核 2 的微服务数量增加,业务延时减少。从调度结果也可以得出,如微服务 6、微服务 9 这种计算所需时钟周期数较多的微服务,一般调度于 CPU 核 2。如微服务 2 这种计算所需时钟周期数较少的微服务,一般调度于 CPU 核 1。并且,计算时钟周期数最多的微服务 7 和微服务 8 只能分别调度于不同的 CPU 核中,体现了计算资源的合理调度。

表 3 配网保护终端计算资源调度策略分析

Table 3 Analysis of computing resource scheduling strategy for distribution network protection terminal

调度策略	核 1 计算资源/GHz	核 2 计算资源/GHz	核 1 微服务编号	核 2 微服务编号	业务延时/ms
本文方法	1	2	2,4,8	1,3,5,6,7,9,10,11	21.38
策略 1	1	2	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	—	45.30
策略 2	1	2	—	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	23.80
策略 3	1	2	1,2,5,6,9	3,4,7,8,10,11	24.34

表 4 求解方法对比分析

Table 4 Comparison analysis of the solution algorithms

调度策略	核 1 计算资源/GHz	核 2 计算资源/GHz	核 1 微服务编号	核 2 微服务编号	业务延时/ms
本文方法	1	2	2,4,8	1,3,5,6,7,9,10,11	21.38
PSO 算法	1	2	2,3,4,8	1,3,5,6,7,9,10,11	28.54

表 5 配网保护终端的计算资源调度影响因素分析

Table 5 Impacts of computing resources of edge and cloud on the deployment of microservice

核 1 计算资源/GHz	核 2 计算资源/GHz	核 1 微服务编号	核 2 微服务编号	业务延时/ms
1	1	2,4,8	1,3,5,6,7,9,10,11	32.04
1	2	2,4,7	1,3,5,6,8,9,10,11	21.38
1	3	2,8	1,3,4,5,6,7,9,10,11	18.81
1	4	7	1,2,3,4,5,6,8,9,10,11	16.83

4 结语

将容器技术、微服务技术应用在配网保护终端,可以更好地适应配电网的新形态。而配网保护业务的实时性是其中关注的关键指标。本文提出了一种配电保护业务的计算资源调度方法,建立了基于容器的配电保护业务的微服务架构,采用改进差分进化算法求解建立的微服务计算资源调度模型。算例研究表明,本文所提出的方法相比小核偏向调度策略、大核偏向调度策略和随机调度策略能

有效降低配网保护业务的延时,且相较于 PSO 算法能有效求解业务延时最小的配网保护终端计算资源调度结果。并且,随着 CPU 核 2 的计算资源增加,调度于 CPU 核 2 的微服务数量增多,保护业务延时减少,即 CPU 核 2 对计算资源的调度结果的影响也愈加明显。本文工作为构建新一代配网保护终端架构提供了定量分析手段和方法。

参考文献:

[1] 刘念,余星火,王剑辉,等.泛在物联的配用电优化运行:信息物理社会系统的视角[J].电力系统自动化,2020,

- 44(1):1-12.
- LIU Nian, YU Xinghuo, WANG Jianhui, et al. Optimal operation of power distribution and consumption system based on ubiquitous internet of things: a cyber-physical-social system perspective[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1):1-12.
- [2] 翟峰,冯云,程凯,等.基于信息熵的多源电力物联终端设备信任度评价方法[J].中国电力,2022,55(5):158-165.
- ZHAI Feng, FENG Yun, CHENG Kai, et al. Information entropy based multi-source power IOT terminal equipment trust degree evaluation method[J]. Electric Power, 2022, 55(5):158-165.
- [3] 曹培,徐鹏,高凯,等.基于边缘计算的电缆接头运行状态智能传感与监测[J].高压电器,2020,56(9):26-32.
- CAO Pei, XU Peng, GAO Kai, et al. Intelligent sensing and monitoring of cable joints state based on edge computing[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9):26-32.
- [4] 吕军,栾文鹏,刘日亮,等.基于全面感知和软件定义的配电物联网体系架构[J].电网技术,2018,42(10):3108-3115.
- LÜ Jun, LUAN Wenpeng, LIU Riliang, et al. Architecture of distribution Internet of Things based on widespread sensing & software defined technology[J]. Power System Technology, 2018, 42(10):3108-3115.
- [5] 计丽妍,李存斌,贾雪枫,等.多证据融合下电力信息物理系统风险评估研究[J].智慧电力,2021,49(10):23-29.
- Ji Liyan, Li Cunbin, Jia Xuefeng, et al. Risk assessment of cyber-physical power system based on multi-evidence fusion[J]. Smart Power, 2021, 49(10):23-29.
- [6] 应俊,蔡月明,刘明祥,等.适用于配电物联网的低压智能终端自适应接入方法[J].电力系统自动化,2020,44(2):22-27.
- YING Jun, CAI Yueming, LIU Mingxiang, et al. Adaptive access method of low voltage intelligent terminal for distribution internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2):22-27.
- [7] 陈皓勇,蔡伟钧,陈健润.能量与信息融合的电力物联网技术[J].电力系统保护与控制,2021,49(22):8-17.
- CHEN Haoyong, CAI Weijun, CHEN Jianrun. Power internet of things technology with energy and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22):8-17.
- [8] 曾兴,蔡泽祥,孙宇嫣,等.综合能源系统配用电监控业务计算负荷建模方法[J].供用电,2020,37(9):42-49+57.
- ZENG Xing, CAI Zexiang, SUN Yuyan, et al. Workload modeling method for power distribution monitoring business in integrated energy system[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(9):42-49+57.
- [9] 聂峥,章坚民,傅华渭.配变终端边缘节点化及容器化的关键技术和应用场景设计[J].电力系统自动化,2020,44(3):154-161.
- NIE Zheng, ZHANG Jianmin, FU Huawei. Key technologies and application scenario design for making distribution transformer terminal unit being a containerized edge node[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3):154-161.
- [10] 招景明,张捷,宋鹏,等.一种高效的基于云边端协同的电力数据采集系统[J].电网与清洁能源,2022,38(5):49-55.
- ZHAO Jingming, ZHANG Jie, SONG Peng, et al. An efficient method of electric power data acquisition system based on cloud edge collaboration[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5):49-55.
- [11] 李艳,张安龙,郑曦.配电网广域保护信息流建模与通信性能分析[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):53-60.
- LI Yan, ZHANG Anlong, ZHENG Xi. Modeling and communication performance analysis of wide-area protection information flow in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2):53-60.
- [12] 黄昱翰,蔡泽祥,潘天亮,等.面向闭环运行配电网的广域保护控制方案[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):47-52.
- HUANG Yuhan, CAI Zexiang, PAN Tianliang, et al. Research on wide area protection and control scheme for closed-loop distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2):47-52.