

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191373

# 基于 SOA 与虚拟私有云的断路器状态可视化监测系统

练椿杰, 韦化, 覃圣超, 李宗声

(广西电力系统最优化与节能重点实验室(广西大学), 广西 南宁 530004)

**摘要:** 提出了基于面向服务架构(Service-Oriented Architecture, SOA)及虚拟私有云(Virtual Private Cloud, VPC)的断路器状态实时可视化监测系统, 解决了现有 SCADA 系统在大数据背景下断路器信息分散不集中、可视化困难的问题。系统采用 SOA 架构, 将各基础功能封装成接口服务, 相互调用以实现整体功能, 具备低耦合、易维护、易拓展的特点。将系统部署至虚拟私有云, 整合虚拟私有云高性能、低成本、强灾备、高安全性的优势, 实现了可交互、可跨平台的 B/S 模式的 Web 客户端。其作为一个决策支持系统, 为电网工作人员可靠地监控整个电网提供了强有力的依据。对所提系统的原理、结构、特点及部署过程进行了详细地介绍。运行结果表明, 该系统提高了电力系统的安全稳定特性, 满足电网的可靠性要求, 且应用于实际电力系统, 具有良好的应用前景。

**关键词:** SOA; 虚拟私有云; 断路器状态监测; 可视化; 安全稳定

## A circuit breaker status visual monitoring system based on SOA and virtual private cloud

LIAN Chunjie, WEI Hua, QIN Shengchao, LI Zongsheng

(Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology (Guangxi University), Nanning 530004, China)

**Abstract:** The existing Circuit Breaker Monitoring System (CBMS) suffers from some problems such as information dispersion and is challenging to visualize. To solve these problems and to offer real-time visual monitoring of circuit breaker status, a Service-Oriented Architecture (SOA)-based and Virtual Private Cloud (VPC)-based CBMS (SV-CBMS) is proposed. The SOA architecture is adopted to encapsulate the basic functions of the system into interface services and calls each other to realize the overall function. It has the characteristics of low coupling, easy maintenance, and easy expansion. It deploys the system to the VPC and integrates the advantages of high performance, low cost, strong disaster recovery, and high security of the VPC, thus realizing the interactive and cross-platform B/S mode Web client. As a decision support system, it provides a strong basis for power grid dispatchers to monitor the entire power grid reliably. In this paper, the principle, structure, characteristics and deployment process of the proposed system are introduced in detail. Operational results show that the system improves the safety and stability characteristics of the power system, and meets the reliability requirements of the power grid. It has been applied to the actual power system and has a good application prospect.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51167003).

**Key words:** SOA; virtual private cloud; circuit breaker status monitoring; visualization; safety and stability

## 0 引言

断路器是维持电力系统正常运行的关键设备, 在输电、配电过程中起着决定性作用, 且与继电保护密切相关, 其分闸、合闸对供电的可靠性、电网的安全运行均具有重大的影响<sup>[1-2]</sup>。并且随着电网规模不断扩大, 电力系统的信息量呈指数型增长, 电

力系统迎来了大数据时代<sup>[3-4]</sup>。而现有的监控系统存在信息不完全和信息孤岛等技术问题<sup>[5]</sup>, 对断路器状态进行监测变得愈发困难。故对电网断路器状态进行实时监测, 并将监测结果友好地呈现给调度工作人员, 实现可视化有重要意义。

现有的断路器状态监测系统仅实现了断路器动作信号的采集与存储<sup>[6-8]</sup>, 存在以下问题:

(1) 当断路器状态发生改变时, 无法将信号直观地用图形进行显示, 可视化困难。例如, 断路器由

合闸到分闸，其发生的准确时间、状态的变化仅能通过数据记录进行查看与分析。

(2) 断路器的信息分散不集中。例如，想同时查看所有变电站下断路器的动作信号变化时，需要查询诸多数据，无法同时显示所有断路器当前的动作状态。

(3) 系统互操作性低，未能实现跨平台、跨移动设备操作，不便于远方人员查看与操作。

(4) 软件备用成本高、更新与维护困难，且需下载、安装、配置和调试。

随着 SOA 技术的成熟及云计算技术的不断普及，在电力领域关于两者的研究也正在展开。文献[9]指出在大数据时代，将电网集成至云计算具有广泛的应用前景。文献[10]提出了基于 VPC 的电力调度自动化系统，该系统安全、可靠、经济，并在实际电力系统中投入运行。文献[11]指出采用云计算技术可以在不损害网络安全和数据隐私的前提下，以高可靠性、高安全性的方式满足电力系统运行规划中的各种计算需求。文献[12]将 SOA 应用于电力系统的故障计算，提高了计算的效率及精度。文献[13]针对现有电力系统调度体系结构，提出了一种 SOA 调度方法，该方法的实际应用能够满足电力系统跨区域信息数据交换的需求。

在上述背景下，本文提出了一种结合 VPC 与 SOA 架构的断路器状态实时可视化监测系统，该系统可以解决现有断路器状态监测系统可视化困难、信息分散不集中的问题，且满足了电网的安全可靠性要求。

### 1 VPC 与 SOA 架构

#### 1.1 VPC

VPC 是一种基于云计算技术的安全、弹性、高性能云上专有网络，用户可通过 VPC 在云上快速构建一个隔离的私有网络环境，满足高安全性的要求[12]。其具备以下特点：

(1) 网络虚拟化：基于 OverLay[14]技术在物理网络基础上构造虚拟网络；

(2) VPC 之间完全隔离：使用 Vxlan[15]协议对每个 VPC 网络进行隔离，不同 VPC 之间保证二层逻辑隔离，无法直接进行通信；

(3) 可自定义网络环境：可自定义 IP 地址范围、网段、路由表及网关等，按需对网络进行规划和管理。

综上，VPC 具备高性能、高安全性及虚拟化等特点。将 VPC 与电力系统断路器状态可视化监测系统结合，不仅继承了云计算技术的优势，在节省资

源的同时极大地加速了对新计算资源的获取，且拥有传统云计算技术缺乏的弹性动态伸缩能力及更高的安全性能。在大数据环境下，结合 VPC 便于信息的集成与分析，利于软件系统的开发、维护与升级，且大幅度降低了运维成本。

#### 1.2 SOA 架构

SOA 是一种面向服务的体系结构、一个以服务为中心，松散耦合，可动态优化和重用扩展的组件模型[16-17]。其通过定义良好的接口与服务之间的契约将应用程序的不同功能单元连接起来[18]，开发人员可按功能模块化的方式添加新服务或更新现有服务，系统整体结构清晰且易拓展[19-20]。SOA 服务的特点如下：

(1) 以服务的形式完成特定的功能，服务是细粒度的松散耦合[21]。

(2) 服务独立于硬件平台、操作系统及编程语言，使用标准的行业通信协议，具有良好的互操作性。

(3) 服务位置透明。用户调用的 URL 地址不随服务物理地址地改变而改变。

故本文将 SOA 作为系统的底层应用架构，保证系统稳定性的同时，使其具备了部署灵活、易扩展、易维护等一系列优点[22]。

### 2 SV-CBMS 架构简介

#### 2.1 SV-CBMS 的硬件架构

基于 VPC 的特点，本文所提出的断路器状态实时可视化监测系统的硬件架构围绕 VPC 为核心，如图 1 所示。

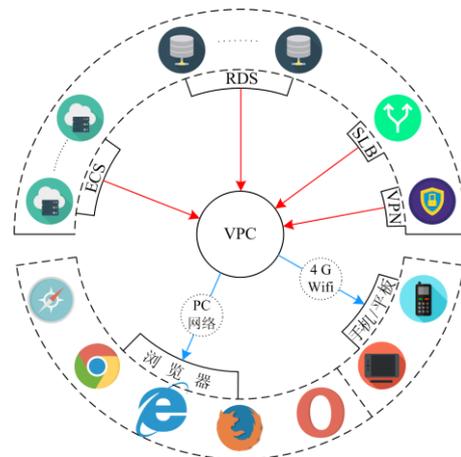


图 1 SV-CBMS 的硬件架构

Fig. 1 Hardware architecture of the SV-CBMS

如图 1 上半部分所示，云服务器(Elastic Compute Service, ECS[23])、云数据库(Relational Database Service, RDS[24])、负载均衡(Server Load Balancer,

SLB<sup>[25]</sup>及网关(Virtual Private Network, VPN<sup>[26]</sup>) 均为 VPC 内部的虚拟硬件,也是 SV-CBMS 的硬件组成。其中:

ECS 集群是一种简单高效、处理能力可弹性伸缩的计算服务,提供虚拟服务器、数据的分析计算及响应各类服务请求的功能。

RDS 集群独立于 ECS,可弹性伸缩按需扩展实例,两者分离的模式为系统提供更加稳定、高性能、安全可靠的数据库服务。

SLB 提供对多例 ECS 进行流量分发的负载均衡服务,可以通过流量分发扩展应用系统对外的服务能力,通过消除单点故障提升应用系统的可用性。

VPN 为系统的 Web 客户端实现了 Https 化,对外数据传输通过构建好的 SSLVPN 通道,使客户端可信、防劫持、防篡改、防监听及更安全地加密。

上述四部分的关系及数据流向如图 2 所示。

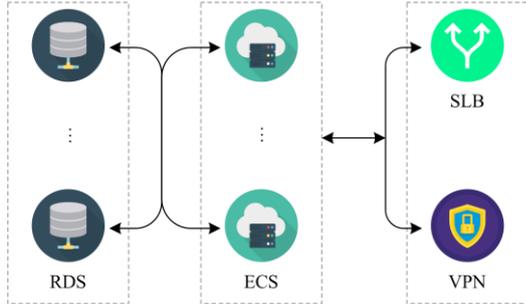


图 2 ECS、RDS、SLB 及 VPN 的关系

Fig. 2 Relationship between ECS, RDS, SLB and VPN

上述四部分虚拟硬件之间通过数据交互进行联系,当 SLB 接收到服务请求时,会对其进行分流,选择合适的 ECS 进行数据分析处理,ECS 再与 RDS 进行交互,用户请求无法直接操作 RDS,保证了数据的安全隔离。数据处理完成后,ECS 便将服务响应通过 VPN 传输至 Https 化后的 Web 客户端。

图 1 下半部分为 VPC 对外的服务,即 SV-CBMS 不仅可在具备联网功能的 PC 端浏览器中运行,还可借手机、平板等联网移动设备随时随地地实时监测断路器状态。

## 2.2 SV-CBMS 的功能结构

基于 SOA 架构,SV-CBMS 的功能结构分为三部分,分别是云调度端、ECS 端及 RDS 端。其中,云调度端包含数据转发单元;RDS 端包含报警信息存储单元与遥信数据分类存储单元;ECS 端包含数据获取单元、数据分析单元、图形绘制单元、断路器数据服务单元及网页单元。上述各功能单元的联系与包含关系如图 3 所示。

数据转发单元位于文献[10]所提出的云调度系统,负责对实时调度数据进行转发,向 SV-CBMS 的数据获取单元提供实时动态数据支持。

RDS 端中的报警信息存储单元与遥信数据分类存储单元中的数据实际上是由多个实时数据断面组合而成的历史数据集,负责向数据获取单元提供云调度系统的运行结果数据。

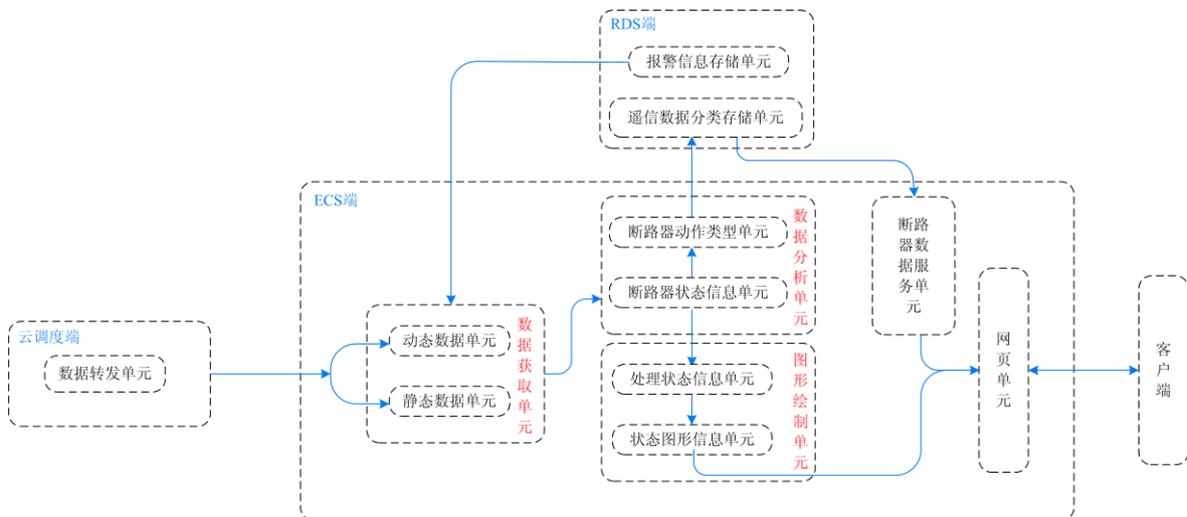


图 3 SV-CBMS 的功能结构

Fig. 3 Functional structure of the SV-CBMS

数据获取单元负责向云调度端的前置数据转发单元和 RDS 端的报警信息存储单元发送通信请求,完成与电网数据的实时交互,获取电网设备的动态

数据信息及静态数据信息。其中动态信息包括实时遥信值、实时遥测值,静态信息包括遥信的 PID 点号、遥信的类型。

数据分析单元负责将数据获取单元获取到的实时遥信值与上一时刻的遥信值进行比较,分析出断路器的动作状态,如合闸、分闸,具体内容见表 1。并筛选出对应断路器名称及其所属变电站名称,确定其唯一对应的关系,接着在断路器动作状态信息显示为分闸的基础上对分闸类型进行分类,即带负荷分闸、空载分闸,生成断路器动作类型信息,存储在遥信数据分类存储单元,具体内容见表 2。

表 1 断路器动作状态  
Table 1 Operating state of circuit breaker

变电站名	动作值变化	当前状态
断路器名	1-0	分闸
	0-1	合闸

表 2 断路器动作类型  
Table 2 Operating types of circuit breaker

变电站名	动作类型	遥测值	特定动作类型
断路器名	分闸	等于 0	空载分闸
		大于 0	带负载分闸

图形绘制单元负责将经数据分析单元处理后的数据写入 SVG 图,生成图形信息,并将图形信息发送至网页单元。

断路器数据服务单元从遥信数据分类存储单元读取各变电站中所有断路器的动作类型相关信息,并将其进行封装,发送至网页单元以表格的形式进行显示。

网页单元将图形绘制单元生成的图形信息以 SVG 形式在网页上显示,实时显示所有断路器的动作状态,其着色情况见表 3。且网页单元可同时获取断路器数据服务单元所封装的信息,以表格统计的形式对断路器动作类型进行显示。

表 3 断路器状态的着色区分

Table 3 Coloring distinction of circuit breaker status

变电站名	时刻 1	时刻 2	曲线颜色
断路器名	0	0	绿
	0	1	红
	1	1	红
	1	0	绿

客户端能借助联网设备通过特定的 URL 对网页单元进行实时访问,查看该局域网所有断路器状态。

### 3 SV-CBMS 的性能分析

#### 3.1 安全性分析

一个架构、系统的首要任务是确保安全性,其中,本文所提系统的安全性主要有数据安全和网络

安全两个部分。

#### 1) 数据安全

本文采用 ECS 和 RDS 的组合,实现了服务器与数据库的分离,不仅释放了 ECS 的计算资源,并且保证了数据库访问的安全性。其中 RDS 是一种即开即用、安全可靠、可弹性伸缩的关系型在线数据库。利用 RDS 设置了允许连接实例的 IP 白名单,严格控制了访问源,且采用主备架构,主备之间自动同步数据,当主 RDS 实例发生故障,系统自动将数据库连接切换至备用 RDS 实例,可实现数据无中断切换。利用 RDS 创建异地备灾,通过数据传输实现异地数据实时同步,支持自定义备份策略,可通过克隆实例恢复到任意时间节点,找回误删数据。RDS 的使用提高了数据的安全性。

#### 2) 网络安全

网络安全体现在三个方面,分别是 VPC、RDS 及 SSLVPN。

在 VPC 内部,可自主选择 IP 地址范围、划分网段、配置路由表和网关,其基于 Overlay 技术构造了虚拟网络,并用 Vxlan 协议对每一个 VPC 进行隔离,保证了不同 VPC 之间的二层隔离,无法直接进行通信。VPC 位于不同的路由面,仅允许通过安全组和防火墙访问三层网络,实现了更加安全的网络环境。

对于 RDS 本身,自动开启了 DDoS 防护,访问链路使用 SSL 加密,杜绝了中间人的攻击行为,并开启透明数据加密,有效地拦截了 SQL 注入并降低了拖库的风险。

移动设备端到 VPC 之间,架设了 SSLVPN 通道,移动设备接入 VPC 需进行唯一的身份验证。利用部署有国际 CA 证书的 ECS 对 Web 客户端进行 Https 化,建立一个信息安全通道。不同于 Http 协议以明文传输数据的方式,SSL 使用 40 位关键字作为 RC4 流加密算法,对数据进行加密,服务端和客户端之间的所有通信,都需要经过握手过程,从根本上保证了网络的安全。

综上所述,SV-CBMS 满足了电网更高的安全性要求。

#### 3.2 可靠性分析

本文所提系统架构上采用 SOA 架构,主程序运行环境为 ECS,两者均保证了系统的可靠性。SOA 架构将应用程序的功能封装成服务,服务与服务之间仅靠接口连接,程序功能之间的依赖性降到最低,某一程序功能发生故障时,不会导致其他功能崩溃,直至故障功能被修复,系统恢复正常运行,用户均感受不到故障的发生。而根据阿里的官方数据,ECS

的实例可用性达 99.95%, 可靠性为 99.9999999%, 从根本上保障了系统的可靠性。其次, VPC 采用服务器与数据库分离的模式, 两者相互独立, 可独立进行开发与维护, 在一定程度上也提高了系统的可靠性。

#### 4 SV-CBMS 的部署与运行效果

本文所提系统运行环境为中国的阿里云, ECS 配置为 Windows Server 2016 R2 标准, 4 核 16 G ROM, RDS 配置为 Microsoft SQL Server 2008 R2, 4 核 8 G ROM, 100 G 存储空间。使用的软件开发工具主要为 Visual Studio 2019。

##### 4.1 SV-CBMS 的实现方法

SV-CBMS 的实现方法整体上包含以下三个步骤:

(1) 获取断路器实时的遥信遥测信息及静态信息;  
 (2) 将遥信信息进行比较, 分析断路器动作状态, 生成断路器动作状态信息, 对断路器动作状态信息与遥测值进行分析, 生成对应的动作类型信息, 并将其存储;

(3) 根据获取的断路器状态的变化信息, 将其生成 SVG 图, 以网页的形式实时显示, 并着色将其状态进行区分, 将断路器动作类型信息与表格绑定。

其中, 继续细分, 整体实现步骤(2)包含下述实现过程:

(1) 数据分析单元将获取的实时遥信数据与前一次遥信的采样数据进行比较;

(2) 检测到遥信值前后状态不一致时, 获取其 PID 点号所对应的断路器名称及其所属变电站名称, 确定唯一对应的关系, 生成断路器状态信息并发送给图形绘制单元;

(3) 根据断路器状态信息获取对应断路器的遥测值, 与设定的遥测限值比较, 并根据断路器的遥信值、遥测值生成特定的动作类型信息, 将动作类型信息发送给遥信数据分类存储单元;

(4) 图形绘制单元接收断路器状态信息, 把断路器状态信息封装成图形;

(5) 将断路器动作类型信息按变电站名、断路器名、断路器动作类型一一对应存储在遥信数据分类存储单元;

(6) 断路器数据服务单元读取遥信数据分类存储单元中每个变电站下所有断路器动作类型的相关信息, 将这些动作类型信息进行封装;

(7) 进入整体实现步骤(3), 同时将图形信息和封装信息以网页形式实时、动态地显示在网页单元上。

整体实现步骤(3)包含下述实现过程:

(1) 网页单元通过 SVG 技术绘制调度系统图形, 生成相对应的显示 SVG 图和存储 SVG 图;

(2) 网页单元设计网页时, 将显示 SVG 图嵌入网页的页面部分, 存储 SVG 图放置在网页的后台部分;

(3) 网页单元从图形服务单元实时读取断路器状态图形信息, 更新存储 SVG 图, 显示 SVG 图读取存储 SVG 图中的遥信信息及实时遥信状态信息;

(4) 网页单元从断路器数据服务单元中获取动作类型信息, 并根据设定的关键字从动作类型信息中选出重要特定动作类型信息;

(5) 客户端通过网络访问网页单元, 以网页形式将图形信息在客户端进行显示, 也可以选择获取断路器数据服务单元的封装信息, 以表格形式进行显示。

最后将该 SV-CBMS 通过 Internet 信息服务 (Internet Information Service, IIS) 以 Web 客户端的形式进行发布, 至此, SV-CBMS 得以实现。

##### 4.2 SV-CBMS 的运行效果

实时断路器状态可视化图形界面包含两个功能界面, 分别为断路器状态曲线和断路器状态统计报表, 如图 4 和图 5 所示。状态曲线界面将断路器的动作状态信息清晰地以图形曲线的形式向调度工作人员展示。统计报表界面将各变电站断路器的动作类型信息按日、周、月、季、年进行统计, 并以表格的形式展示。工作人员可凭这两个可视化界面在第一时间了解到所有断路器的动作状态、动作类型, 进而对电网运行情况及时做出分析决策。

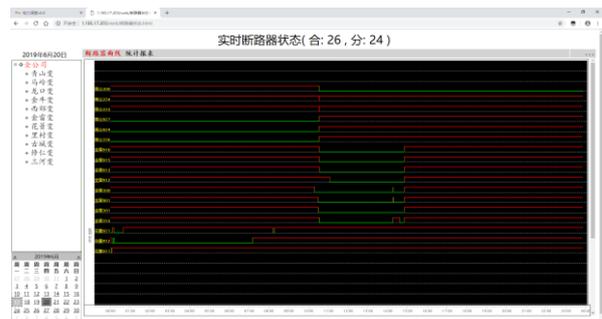


图 4 断路器状态曲线  
 Fig. 4 Circuit breaker state curve

断路器名称	遥信	遥测	动作	类型
1101	0	0	0	0
1102	0	0	0	0
1103	0	0	0	0
1104	0	0	0	0
1105	0	0	0	0
1106	0	0	0	0
1107	0	0	0	0
1108	0	0	0	0
1109	0	0	0	0
1110	0	0	0	0
1111	0	0	0	0
1112	0	0	0	0
1113	0	0	0	0
1114	0	0	0	0
1115	0	0	0	0
1116	0	0	0	0
1117	0	0	0	0
1118	0	0	0	0
1119	0	0	0	0
1120	0	0	0	0
1121	0	0	0	0
1122	0	0	0	0
1123	0	0	0	0
1124	0	0	0	0
1125	0	0	0	0
1126	0	0	0	0
1127	0	0	0	0
1128	0	0	0	0
1129	0	0	0	0
1130	0	0	0	0
1131	0	0	0	0
1132	0	0	0	0
1133	0	0	0	0
1134	0	0	0	0
1135	0	0	0	0
1136	0	0	0	0
1137	0	0	0	0
1138	0	0	0	0
1139	0	0	0	0
1140	0	0	0	0
1141	0	0	0	0
1142	0	0	0	0

图 5 断路器状态统计报表  
 Fig. 5 Circuit breaker state report

SV-CBMS 还可以在联网移动设备上运行，调度工作人员可随时随地地了解断路器状态。如图 6 和图 7 所示，分别为断路器状态曲线、断路器状态统计报表在手机上的运行情况。

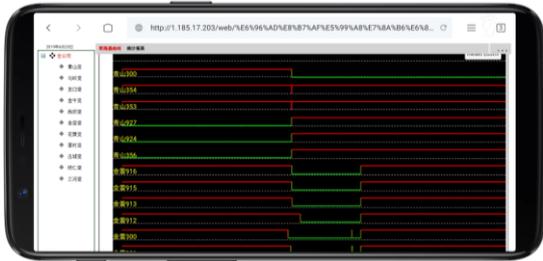


图 6 手机运行断路器状态曲线

Fig. 6 Circuit breaker state curve operates on a mobile phone



图 7 手机运行断路器状态统计报表

Fig. 7 Circuit breaker state report operates on a mobile phone

## 5 结论

本文提出了基于 SOA 及虚拟私有云的断路器状态实时可视化监测系统，将 SOA 架构与云计算技术相结合，融合了 SOA 架构松耦合、易扩展与虚拟私有云高性能、高可靠性等特点。将断路器的状态以可视化的形式向调度工作人员实时反应，为电网工作人员可靠地监控整个电网提供了强有力的依据。所提系统目前已应用于实际的电力系统，运行结果表明，该系统具有良好的应用前景。

## 参考文献

[1] 黄新波, 王霄宽, 方寿贤, 等. 智能变电站断路器状态监测 IED 设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 95-99.  
HUANG Xinbo, WANG Xiaokuan, FANG Shouxian, et al. Design on status monitoring IED of circuit breaker for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 95-99.

[2] 李永丽, 李瑞鹏, 卢扬, 等. 断路器操作回路的智能化监测系统设计[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 211-217.  
LI Yongli, LI Ruipeng, LU Yang, et al. Intelligent

monitoring system design for circuit breaker operating circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 211-217.

[3] 宋亚奇, 周国亮, 朱永利. 智能电网大数据处理技术现状与挑战[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 927-935.  
SONG Yaqi, ZHOU Guoliang, ZHU Yongli. Present status and challenges of big data processing in smart grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 927-935.

[4] HU Z, HE T, ZENG Y, et al. Fast image recognition of transmission tower based on big data[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 149-158. DOI: 10.1186/s41601-018-0088-y.

[5] 毕艳冰, 蒋林, 王新军, 等. 面向服务的智能电网调度控制系统架构方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 92-99.  
BI Yanbing, JIANG Lin, WANG Xinjun, et al. Design and investigation on service-oriented architecture-based smart grid dispatching and control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 92-99.

[6] MA J, CHEN X, TAN Y, et al. Research on online temperature monitoring system based on SAW for intelligent circuit breaker[C] // 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), July 21-23, 2017, Changsha, China: 1168-1170.

[7] YIN K, GE L, JIN Y. Application of key performance indicator in circuit breaker online monitoring[C] // 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia), November 28-December 1, 2016, Melbourne, VIC, Australia: 844-849.

[8] FEIZIFAR B, USTA O. Condition monitoring of circuit breakers: current status and future trends[C] // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), June 6-9, 2017, Milan, Italy: 1-5.

[9] XIE Y, JIANG Y, LIAO R, et al. User privacy protection for cloud computing based smart grid[C] // 2015 IEEE/CIC International Conference on Communications in China - Workshops (CIC/ICCC), November 2-4, 2015, Shenzhen, China: 7-11.

[10] YANG D, WEI H, ZHU Y, et al. Virtual private cloud based power dispatching automation system - architecture and application[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1756-1766.

[11] MA F, LUO X, LITVINOV E. Cloud computing for power system simulations at ISO New England - experiences and challenges[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2596-2603.

- [12] YANG D, WEI H, WEI H. Architecture design of power system fault calculation based on cloud computing technology[C] // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), November 26-28, 2017, Beijing, China: 1-5.
- [13] ZHANG H, ZUO J, YAN B, et al. Study on the SOA construction methods in power system based on service proxy mode[C] // 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), October 3-5, 2016, Xi'an, China: 620-623.
- [14] LAMB C C, HEILEMAN G L. Overlay architectures enabling cloud computing for multi - level security environments[C] // 2012 IEEE Eighth World Congress on Services, Honolulu, HI, USA: 116-124.
- [15] ZHAO Z, HONG F, LI R. SDN based VxLAN optimization in cloud computing networks[J]. IEEE Access, 2017, 5: 23312-23319.
- [16] TAN W, FAN Y, GHONEIM A, et al. From the service-oriented architecture to the web API economy[J]. IEEE Internet Computing, 2016, 20(4): 64-68.
- [17] WANG C, LI X, CHEN Y, et al. Service-oriented architecture on FPGA-based MPSoC[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2017, 20(10): 2993-3006.
- [18] 冯显力, 韦化, 韦洪波, 等. 含微服务的调度自动化系统分布式实时数据库[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 138-144.  
FENG Xianli, WEI Hua, WEI Hongbo, et al. Distributed real-time database for dispatching automation system with micro-services[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 138-144.
- [19] IBRAHIM N M, HASSAN M F. Agent-based message oriented middleware (MOM) for cross-platform communication in SOA systems[C] // 2012 International Conference on Computer & Information Science (ICIS), June 12-14, 2012, Kuala Lumpur, Malaysia: 547-552.
- [20] IBRAHIM N M, HASSAN M F, BALFAGIH Z. Agent-based MOM for interoperability cross-platform communication of SOA systems[C] // 2011 International Symposium on Humanities, Science and Engineering Research, June 6-7, 2011, Kuala Lumpur, Malaysia: 40-45.
- [21] 李静, 罗雅迪, 郭健, 等. 调控云环境下在线计算软件服务研究与应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 159-164.
- LI Jing, LUO Yadi, GUO Jian, et al. Online calculation software service and its application analysis under dispatching cloud[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 159-164.
- [22] 李本瑜, 石恒初, 翟海燕, 等. 基于 SOA 的继电保护整定计算全过程管理系统的开发及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 103-109.  
LI Benyu, SHI Hengchu, ZHAI Haiyan, et al. Development and application of relay protection setting and coordination calculation processing management system based on the SOA[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 103-109.
- [23] DUSTDAR S, GUO Y, HAN R, et al. Programming directives for elastic computing[J]. IEEE Internet Computing, 2012, 16(6): 72-77.
- [24] JAIN N. The future of database services: cloud database[C] // 2017 International Conference on Algorithms, Methodology, Models and Applications in Emerging Technologies (ICAMMAET), February 16-18, 2017, Chennai, India: 1-5.
- [25] 丁敏. 云环境下高性能数据库集群关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.  
DING Min. Research on key technologies of high performance database cluster in cloud environment[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [26] 裴忠一. 基于云中间件的 VPN 系统设计与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
PEI Zhongyi. Design and implementation of cloud middleware based VPN system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

收稿日期: 2019-11-03; 修回日期: 2020-01-08

作者简介:

练椿杰(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为现代最优化理论及其在电力系统中的应用; E-mail: lianchunjie96@163.com

韦化(1954—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为现代最优化理论及其在电力系统中的应用, 涉及智能电网、最优潮流、状态估计、电力市场、电力云计算与分布计算等; E-mail: wei huagxu@163.com

覃圣超(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为现代最优化理论及其在电力系统中的应用。E-mail: shengchao117@163.com

(编辑 周金梅)