

“互联网+”智慧能源信息系统远程协同共享研究

杨湛晔¹, 王佳楠², 张虎润¹, 刘宝³, 郑杰³, 苏民强³

(1. 海南绿色能源与环境工程技术研究院, 海南省 海口市 570125;

2. 海南大学管理学院, 海南省 海口市 570228;

3. 海南天能电力有限公司, 海南省 海口市 570125)

Research on Remote Synergic Sharing of “Internet +” Smart Energy Information System

YANG Zhanye¹, WANG Jianan², ZHANG Hurun¹, LIU Bao³, ZHENG Jie³, SU Minqiang³

(1. Hainan Institute of Clean Energy & Environment Engineering Technology, Haikou 570125, Hainan Province, China;

2. Management School of Hainan University, Haikou 570228, Hainan Province, China;

3. Hainan Tianneng Power Co., Ltd., Haikou 570125, Hainan Province, China)

摘要: 为了实现海南清洁能源(水电、光伏、海岛微网等)发电系统的高效管理, 结合分布式能源特性和互联网技术进展, 初步构建了“互联网+”智慧能源信息服务系统, 实现了多个分布式能源信息系统的异地协同共享。首先采用阿里云技术搭建了弹性的基础数据平台, 继而开发了基于物联网协议的网络协议转换器, 实现本地新老电站与云端平台的数据对接; 然后进行运行数据分析与处理, 通过互联网web发布和移动端APP软件向不同目标群体推送数据信息。目前已完成34个总装机容量91 MW分布式光伏电站的集成管理工作, 并稳定运行3年, 大大提高了分布式能源的管理水平。利用互联网新技术对清洁能源、分布式能源实现高效管理, 尝试云端智慧决策, 有益于推进能源互联网技术的发展。

关键词: 清洁能源; “互联网+”智慧能源; 信息系统; 异地协同共享; 专家系统

ABSTRACT: In order to achieve efficient management of clean energy (such as hydropower, photovoltaic, island micro grid, etc.) power generation system in Hainan. Combining the characteristics of distributed energy with

internet technology, we built the Internet plus intelligent energy information service system, and implemented collaborative sharing of multiple distributed energy information systems. Firstly, Alibaba cloud technology was used to build a flexible basic data platform, and then a network protocol converter based on Internet of things protocol was developed to realize the data docking between the local power station and the cloud platform. After that, the operation data were analyzed and processed, and data information was pushed to different target groups through Internet web publishing and mobile APP software. At present, 34 distributed photovoltaic power plants with installed capacity of 91MW have been integrated and managed, which have been running stably for about three years and greatly improving the management level of distributed energy. The attempt of using new internet technology to achieve efficient management and intelligent decision-making of clean energy and distributed energy is conducive to promoting the development of energy Internet.

KEY WORDS: clean energy; “Internet +” smart energy; information system; remote synergic sharing; expert system

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0905105, 2018YFB0905103); 海南省重点研发计划项目(ZDYF2018003); 国家社科基金面上项目(16BGL123); 海南省自然科学基金项目(521RC1110)。

Project Supported by National Key Research and Development Program (2018YFB0905105, 2018YFB0905103); Hainan Key Research and Development Program (ZDYF2018003); General Program of National Social Science Foundation (16BGL123); Natural Science Foundation of Hainan Province (521RC1110)

0 引言

能源互联网趋势下, 分布式能源形式多样, 为用户提供冷、热、电等多种能源利用方式, 是提高能源利用效率、解决能源危机、保障能源安全的一种有效途径^[1-8]。

区别于集中式能源系统, 分布式能源设备数

量巨大、分布松散、不易管理，因此分布式能源的管理水平是影响系统效益的核心要素，它直接影响系统的运行维护成本、用能效率，以及能源可靠性^[9-11]。提高厂站信息化、智能化水平，加强分布式能源的管理，是应对投产电站增多、装机容量增长的主要措施。目前用于分布式能源管理的信息服务系统主要存在以下不足：

1) 传统分布式监控系统无法适应互联网数据采集、传输、处理及存储要求；智能电网信息系统接入门槛高、安全等级要求高、维护成本高；分布式能源发电收益不稳定，技术更新不积极。

2) 分布式能源散状分布且环境复杂，网络因素限制了测量精度、数量，数据传输质量及速率低，通信故障多，误报和漏报情况严重。

3) 厂站数据综合分析能力差，缺乏运营分析工具和数字化手段，故障定位及现场反馈困难；数据报表通过 Excel 手工处理，通过短信、微信、邮件传输，造成数据不准确、不及时。

4) 系统异地协同能力不足，设备管理与人员管理脱节，问题处理周期长、维护效率低、投入人力大。

针对分布式能源的监控管理系统，文献[12]率先描述了光伏电站远程数据中心的系统架构；文献[13]提出了一种基于物联网消息队列遥测传输(message queuing telemetry transport, MQTT)协议的消息传输和 ILZ4 压缩法的智慧能源云平台，可快速降低大规模数据的存储成本和传输开销；文献[14-18]分别从光伏云网、光储云网、分布式综合能源云网等多角度，证明了云计算技术能够显著提升能源大数据查询与分析性能，并有效降低成本。随着信息通信技术的发展以及“互联网+”趋势下各厂站对能源管理的迫切要求，能源互联网信息系统融合的研究越来越多^[19-21]。

本文针对分布式能源厂站系统，通过开发物联网协议网关，实现多地新旧多类型电站与云端服务器进行数据交互；通过部署云端信息服务平台，汇总处理分析全域实时数据及历史数据；利用互联网异地协同共享，实现了“互联网+”运维与运营；通过对云计算、边缘计算专家系统的分析，探讨了智慧信息系统问题分析、故障定位和

趋势预测等，并结合光伏子系统构建经验，拟在分散式风电、微网储能、小水电、电动汽车充电等场景推广应用。

1 系统结构与功能

信息系统由本地厂站监控(或测控装置)、数据采集及 MQTT 协议转换器、云服务器及系统软件、网络及其设备、个人终端(如 PC、手机)等构成，如图 1 所示。

本地厂站监控设备实现本地设备(如光伏逆变器、汇流箱、变压器、电能表、电站通信管理机及其他测控设备)数据的汇总及整理，并根据需要进行处理，用于后续调用。数据采集及 MQTT 协议转换器实现厂站数据向云端数据平台的转发功能，作为 MQTT 协议客户端对接云端 MQTT 服务器。通过网络互联在阿里云部署 MQTT 服务器、应用及 web 服务器。

“互联网+”智慧能源信息管理系统软件实现各电站数据管理和应用功能，并通过云数据中心向互联网用户发布信息。系统管理功能包括用户管理、权限管理、系统日志管理、数据备份与恢复等；设备信息管理功能包括设备信息录入、查询、维护管理等；数据采集功能包括光伏子站/水电子站/风电子站/海岛微网等智能子站系统的数据采集功能；应用数据分析功能包括光伏电站、水电站数据分析等；专项信息推送可以实现智慧运维管理的反馈。系统软件功能如图 2 所示。

2 系统“互联网+”数据处理与共享

2.1 云服务器

系统软件部署在云服务器，云服务器实现计算资源的即开即用和弹性伸缩。即无需自建机房，无需采购以及配置硬件设施，可快速部署，缩短应用上线周期；可根据业务波动随时扩展和释放资源，按需使用，降低成本；专有网络，逻辑上可实现彻底隔离的云上私有网络，可以自行分配私网 IP 地址范围、配置路由表和网关等。虚拟防火墙、角色权限控制、防病毒攻击及流量监控等

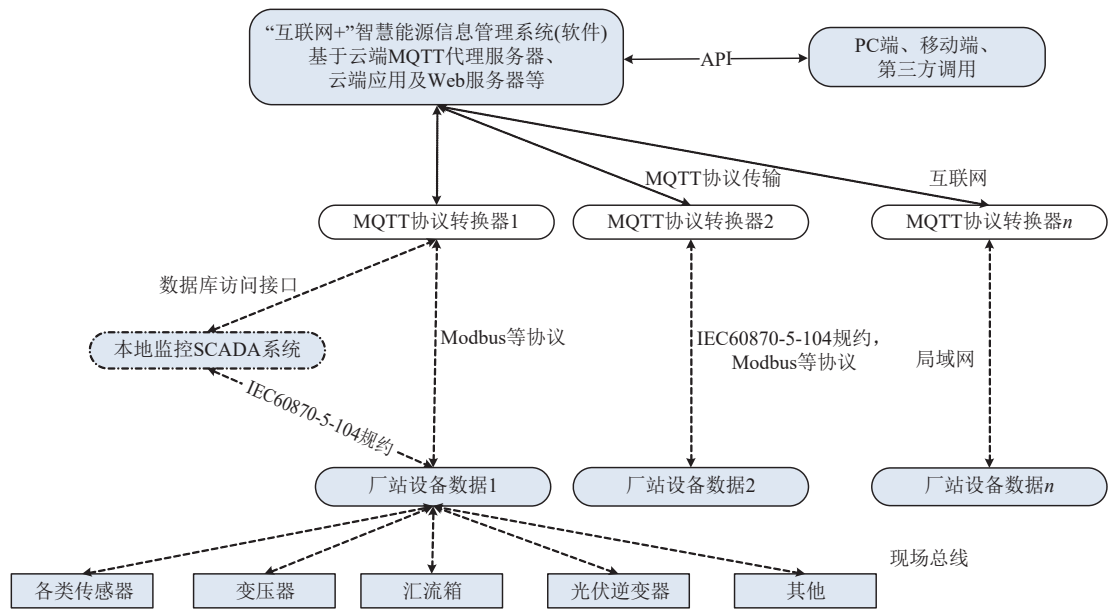


图 1 智慧能源云平台组网拓扑

Fig. 1 System networking topology diagram

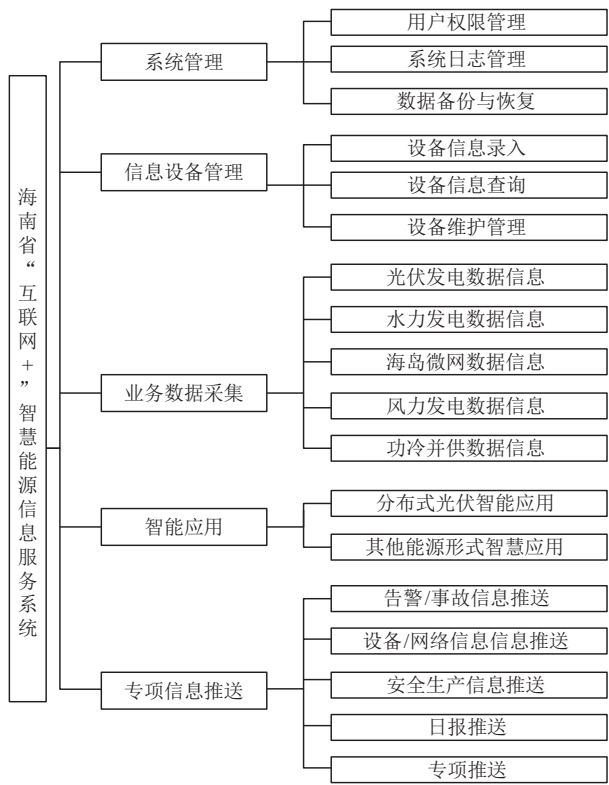


图 2 系统软件功能

Fig. 2 Software architecture diagram

多重安全方案保障了系统的安全稳定。结合电站数量和装机规模，部署了5台8核CPU、32 GB内存服务器用于大数据处理，10台4核CPU、8 GB内存服务器用于web发布、API等服务。

系统软件部署在云服务器上，对于信息产业技术积累不充分的地区和单位，减少了硬件及网络设备运维管理的成本，提高了系统容错性，可大大延长系统使用寿命。

2.2 物联网协议

厂站数据通过数据采集及MQTT协议转换器发布到云端服务器。MQTT是一种基于客户端-服务器的消息发布/订阅(publish/subscribe)模式的“轻量级”通信协议，以极少的代码和有限的带宽，为连接远程设备提供实时可靠的消息服务。订阅/发布交互模型如图3所示。

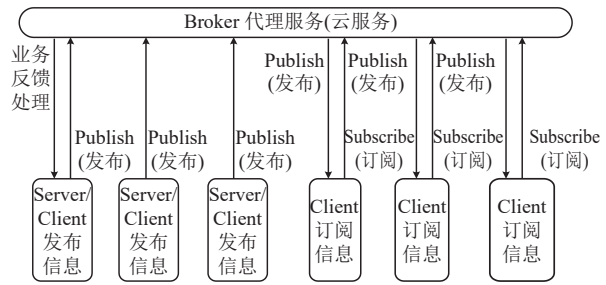


图 3 订阅/发布交互模型

Fig. 3 Subscribe/publish interactive model

由图3可知，实现MQTT协议需要客户端和服务端通信完成，在通信过程中，MQTT协议中有3种身份：发布者(Publish)、代理(Broker)、订阅者(Subscribe)。其中，消息的发布者和订阅

者都是客户端，消息代理是服务器，消息发布者可以同时是订阅者。将应用数据访问作为订阅者，厂站数据节点作为发布者，云端服务器作为代理服务器。系统应用访问者和云端代理服务器直接通信，无需知道厂站地址、数据类型等信息。厂站仅需将电站状态数据发送给云端代理服务器，无需对接系统访问者的信息，从而可极大减少通信代价，提高响应速度。

厂站数据通过 IEC-104 协议上传至数据采集及 MQTT 协议转换器，完成异构协议转换，将电站数据转为符合 MQTT 消息格式的数据，向云服务器发出建立连接请求，成功连接后，实时数据立刻发布到 MQTT 云服务器上，历史数据以时序文档形式存入数据库。云平台与系统应用的交互本质上是云平台处的 MQTT 服务器线程与应用层处的 MQTT Client 线程的交互过程。

2.3 云端数据的处理、展示及互动

信息系统处理厂站各类设备的模拟量、开关量、计算加工数据等，也记录各类设备的告警、故障、操作等相关内容。根据厂站数据信息，结合各类型数据模型，对各种历史数据与运行数据进行统计分析，并根据时间维度(时、周、日、月、年)，利用报表或各种图表的形式在互联网终端或移动互联网终端设备上呈现。通过汇集从全局到细节逐层深入的数据信息，不仅可以进行发电数据统计、设备在线检查、精确定位故障等，还可开展发电效率分析，电站资产分析，告警、故障率分析等。通过互联网系统平台，运维工程师和技术专家可了解全域厂站基本情况，调配现场资源，也可通过语音和视频点对点指导现场工程师实时处理问题与故障，实现全域协同共享。

3 系统运行及智能数据分析

3.1 系统运行情况

海南省“互联网+”绿色能源信息服务系统目前已完成 34 个总装机容量 91 MW 分布式光伏电站的集成管理，包含站端光伏监控系统完成设备增设、云端服务器租赁及软件部署、子站数据接入等工作，系统运行稳定；该系统初步实现了分布式光伏发电的数据和运维管理“互联网+”，以及

远程异地数据共享、数据可视化、运维移动化，基本满足了生产运维管理工作，电站设备及数据管理效率已大大提高。

3.2 云端智能分析

系统具备云端数据分析功能，汇总所有电站生产运营运维数据，对于电站子阵、逆变器、汇流箱、组串的数据监控，利用大数据处理技术开展数据对比，评估电站运行健康状态，快速找出短板、给出优化建议。

以离散率分析为例，离散率可用于评估分布式发电单元的发电性能一致性情况，是分布式发电设备健康状态的重要指标^[22-24]。在实际应用时，可以对电站同类电气量参数一致性进行评价。如果参数离散率较低，说明各路发电性能一致性较好，发电情况稳定；离散率越大，一致性越差，通常存在故障单元。

其中某时刻(j 时刻)核心电气量参数(如汇流箱或逆变器的组串电流)离散率计算公式为

$$C_v = \sigma / \mu \quad (1)$$

式中： C_v 为 j 时刻核心电气量参数(某台汇流箱或逆变器下所带组串电流)的离散率，此处是指统计学中的标准差系数； μ 为 j 时刻采集参数的平均值； σ 为 j 时刻该采集参数的标准差。

根据经验，对于光伏组串电流离散率值的评价，一般分为 4 个等级：若组串电流离散率范围在 0~5%，说明支路电流运行稳定；5%~10%，运行情况良好；10%~20%，运行情况有待提高；超过 20%，运行情况较差，必须进行整改。光伏组串电流离散率分析如图 4 所示。同样，参考发电小时数离散率或输出功率离散率，可以对逆变器的发电性能差异进行评估确认。

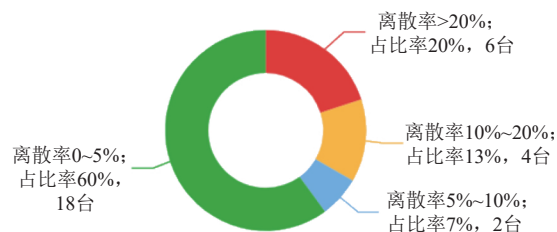


图 4 信息系统界面-离散率分析

Fig. 4 Interface of information system-dispersion rate analysis

离散率分析可在分布式能源领域推广,对设备、设备集合或电站的数据和时间段灵活选择,可根据需要部署在云端或边缘侧,开展全域数据或局部数据特定参数的数据分析,可以快速划分定位问题,提高运算效率。

3.3 系统瓶颈及不足

MQTT 协议轻量级的特点,更适宜在低带宽、不可靠的网络下提供基于云平台的远程设备的数据传输和监控,而在分布式高可靠性、实时传输设备数据通信及工业控制等领域存在数据通信瓶颈。其在系统中的问题如下:

- 1) 云端展示系统数据 5~15 min 刷新一次;
- 2) 云端部署的简单分析逻辑运算,其逻辑确认及推送信息需要 60~120 min;
- 3) 子站数据汇集到云端系统后,仅实现了若干数据的简单汇集,未实现核心数据整体重构;
- 4) 运维运营现实需求无法及时响应,功能新增及调整周期过长;
- 5) 传统的子站自动化系统与云端的智能化相互无互动,“互联网+”智慧能源信息服务系统的共享模式仍有较大发展空间。

4 系统协同共享优化探讨

4.1 基于信息互联的数据共享

物联网、工业互联网、能源互联网等均是其所辖各种元素互联起来,无论是机器、人还是系统。信息互联实现了数据端到端的流动和跨系统的流动,从而实现更充分的数据共享。

目前,工业互联网基本形成了“终端连接+边缘计算+云端存储+大数据分析+应用服务”等端到云的工业互联网平台。其中,北京亚控科技以组态的思想构建信息系统,工程师以工程需求灵活调整方案,将“互联网+”信息系统从定制化推向了工程化,在实现现有功能的基础上,增加智能策略的灵活性,有益于降低成本并加速“互联网+”信息服务系统的推广。

华为技术有限公司在 2019 年推出了电力物联网方案架构,提出了云、管、边、端的系统解决方案。云端包含资源弹性管理、数据智能融合、智能 AI 等;管即通信,包含有线/无线(5G)全场

景,按需连接;边即智能边缘计算,实现边缘安全自治,增强云边互动;端侧实现设备自发现、自组网及全面感知,即插即用,拓扑识别,并统一新型模型。华为边缘计算实现了硬件平台化、软件 APP 化,数据统一采集,边缘业务数据就地重构,云边高度协同,按需灵活部署及调整 APP 软件,且即插即用简化工程配置,颠覆了原有设备的软硬件开发及工程实现的生态模式,进一步提高了效率。华为电力物联网系统架构如图 5 所示。

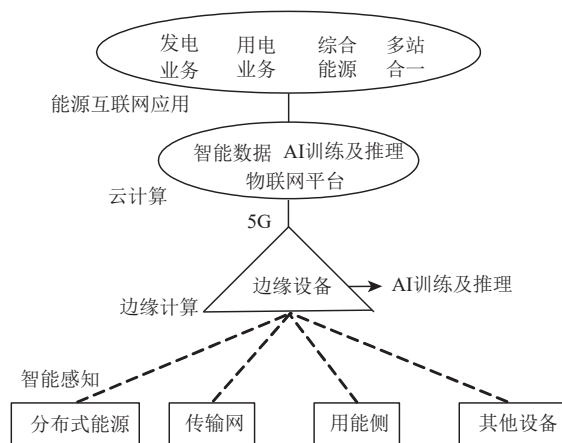


图 5 华为电力物联网系统架构

Fig. 5 Architecture of Huawei power Internet of things

亚控的工业互联网平台、华为的电力物联网平台,均是实现信息互联数据共享的平台工具。

4.2 基于云计算和边缘计算的专家系统经验共享

在设备、人员、数据信息安全准确高速互联之后,系统需要更多的智慧应用和智慧决策。信息服务系统要求准确全面采集数据,展示厂站的运行状态,直观地发现设备告警故障问题等。而智慧决策则可以选择建立在基于云计算和边缘计算所构建的专家系统的基础上,及时明确发展趋势并形成优化方案,确保最优资源调配,保障整体效率。决策推理流程如图6所示。

通过云计算和边缘计算共同构建智慧能源专家系统。专家系统属于人工智能的发展分支,通过用一种知识表达模式,应用大量的推理方法,模拟人类专家的推理思维,设计出一套可求解复杂问题的人工智能程序。系统可模拟人类专家对输入的信息进行推理、判断,并快速给出相应策

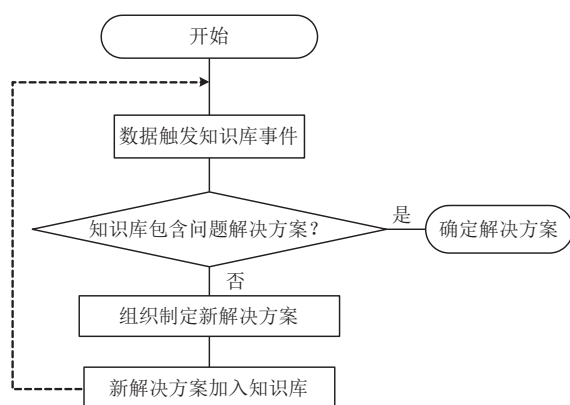


图6 决策推理流程图

Fig. 6 Diagnostic reasoning flowchart

略。专家系统由推理控制策略、人机交互界面、综合数据库、知识库、知识获取等5个部分组成。

信息系统提供了综合数据库和人机交互界面。知识获取是将求解问题的各种专家知识、经验或其他知识源转换到知识库的一种方式^[25]。按照设计数据库的存储规则，获取知识以构造知识库，不断将新知识添加入知识库，使系统的知识与知识库得以不断地更新与补充。推理控制策略是专家系统知识库价值的重要体现，它的任务是通过运用知识库的知识，选择适当的推理控制策略进行推理，解决实际问题。根据缺陷或故障时呈现出的现象及信息，探寻缺陷及故障类别、原因，以及其相应的解决方案。

通过云边协同构建的智慧能源专家系统，可筛查定位故障或潜在问题区域，制定方案推送特定管理人员，安排并监督问题解决。例如，筛选发电低效厂站并优先整改的策略，可先通过云端标准化厂站综合能量效率横向排查全部电站，再采用历史相似日对比分析法纵向确认，进而边侧通过离散数据分析等定位问题区域。上述传统分析方法可在云边协同大数据平台及专家系统上发挥更大作用，通过基本算法排列组合，实现跨地域、跨类型、多时空、有针对性的策略决策。

5 结论

结合海南分布式光伏“互联网+”绿色(智慧)能源信息服务系统的阶段性建设成果和后续计划，结论如下：

1) 系统构建实现分布式光伏新旧系统的跨区域统筹管理，有利于及时发现问题，有助于提高各电站信息的互联互通，有利于经验积累与记录、设备维护、能源生产效率提高，示范效果显著。

2) 海岛微网、储能、余热利用功冷并供、绿色小水电、分散式风电、城市充电站等分布式能源涉及发、储、用，电、热、冷，针对目前各类系统对高效能源管控的迫切需求，可结合应用新技术，尝试更高层次多时空互补的分布式能源聚合。

3) 能源互联网背景下，分布式能源信息化建设应该结合自身特点及互联网新技术，尝试新方法，实现源源互补、源荷互动，强调分布式高效管理与知识经验的共享，以提高整体效率和竞争力，成为骨干能源互联网及智能电网的有益补充。

4) 互联模式和智慧应用也可推广到其他传统产业行业中。

参考文献

- [1] 卞艺衡, 桂恒立, 别朝红. 考虑重构和微电网分区的分布式电源优化配置[J]. 智慧电力, 2020, 48(7): 8-15.
BIAN Y H, GUI H L, BIE Z H. Optimal DG allocation considering reconfiguration and microgrid zoning[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 8-15.
- [2] 程维杰, 颜云松, 康明才, 等. 考虑分布式电源影响的配电网源荷储分层协调控制[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 113-119.
CHENG W J, YAN Y S, KANG M C, et al. Generation-load-storage layered coordinated control of distribution network considering the influence of distributed generation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 113-119.
- [3] 冯庆东. 能源互联网与智慧能源[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 15-18.
FENG Q D. Energy internet and smart energy[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2015: 15-18.
- [4] 任景, 薛晨, 张小东, 等. 含储能及分布式电源的区域电网平衡[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 75-82.
REN J, XUE C, ZHANG X D, et al. Research on regional power grid balance containing energy storage and distributed generation[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(12): 75-82.
- [5] 杨湛晔, 毛建容, 马红伟, 等. 微电网多级保护与控

- 制的实现与优化分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 137-141.
- YANG Z Y, MAO J R, MA H W, et al. Implementation and optimal analysis for the multi-step protection and control technology in micro-grid[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities, 2012, 24(2): 137-141.
- [6] 杨湛晔, 马红伟, 毛建容. 海岛微电网组网优化研究[J]. 电力建设, 2014, 35(6): 63-68.
- YANG Z H, MA H W, MAO J R. Optimal combination technology of island microgrid[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(6): 63-68.
- [7] 杨湛晔, 马红伟, 毛建容, 等. 基于虚拟子微网的独立海岛微电网快速稳定控制策略与验证[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1907-1912.
- YANG Z H, MA H W, MAO J R, et al. Fast and stable control strategy and verification of independent island microgrid based on virtual sub-microgrid[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1907-1912.
- [8] 杨湛晔, 王佳楠, 张虎润. “互联网+”智慧能源储能系统主动调控策略研究[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 281-287.
- YANG Z Y, WANG J N, ZHANG H R. Active regulation strategy of “Internet+” smart energy storage system[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 281-287.
- [9] 陈振宇, 刘东, 高兴宇, 等. 一种面向电力调控云的高效运维方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 175-181.
- CHEN Z Y, LIU D, GAO X Y, et al. An efficient operation and maintenance method for power dispatching and control cloud[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 175-181.
- [10] 耿健, 杨冬梅, 高正平, 等. 含储能的冷热电联供分布式综合能源微网优化运行[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 25-32.
- GENG J, YANG D M, GAO Z P, et al. Optimal operation of distributed integrated energy microgrid with CCHP considering energy storage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 25-32.
- [11] 张浩禹, 邱晓燕, 周晟锐, 等. 基于机会约束目标规划的多电-气互联综合能源系统分布式优化模型[J]. 电力建设, 2020, 41(7): 82-91.
- ZHANG H Y, QIU X Y, ZHENG S R, et al. Distributed optimal dispatch based on chance constrained goal programming for multi-area integrated electricity-natural gas energy systems[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(7): 82-91.
- [12] 黄小铄, 翟长国, 郭剑虹, 等. 光伏电站远程数据中心系统架构设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 61-63.
- HUANG X S, ZHAI C G, GUO J H, et al. Design of system structure for remote data center of photovoltaic power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 61-63.
- [13] 卢阿丽, 顾德林, 张剑书, 等. 基于MQTT和ILZ4压缩法的智慧能源云平台[J]. 控制工程, 2020, 27(1): 174-181.
- LU A L, GU D L, ZHANG J S, et al. Smart energy cloud platform based on MQTT and ILZ4 compression method[J]. Control Engineering, 2020, 27(1): 174-181.
- [14] 于伟, 石文娟, 左高, 等. “互联网+”客户侧分布式光伏系统及平台建设[J]. 供用电, 2017, 34(10): 42-46.
- YU W, SHI W J, ZUO G, et al. The service system of client-side distributed PV under “Internet+” pattern and its platform construction[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(10): 42-46.
- [15] 李洋. “光伏云网”智能化服务研究与应用[J]. 供用电, 2018, 35(9): 42-46, 73.
- LI Y. Research and application of “photovoltaic cloud network” intelligent service[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(9): 42-46, 73.
- [16] 吴凯峰, 刘万涛, 李彦虎. 基于云计算的电力大数据分析技术与应用[J]. 中国电力, 2015, 48(2): 111-127.
- WU K F, LIU W T, LI Y H. Cloud-computing based power big data analysis technology and its application[J]. Electric Power, 2015, 48(2): 111-127.
- [17] 李刚, 焦谱, 文福拴. 基于偏序约简的智能电网大数据预处理方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 98-106.
- LI G, JIAO P, WEN F S. A partial order reduction based method for big data preprocessing in smart grid environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 98-106.
- [18] 李洋, 吴鸣, 周海明, 等. 基于全能流模型的区域多能源系统若干问题探讨[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2230-2237.
- LI Y, WU M, ZHOU H M, et al. Study on some key problems related to regional multi energy system based on universal flow model[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2230-2237.
- [19] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3014-3022.
- MA Z, ZHOU X X, SHANG Y W, et al. Exploring the concept, key technologies and development model

- of energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022.
- [20] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
- SUN H B, GUO Q L, PAN Z G. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [21] 张彦, 张涛, 孟繁霖, 等. 基于模型预测控制的能源互联网系统分布式优化调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6829-6845.
- ZHANG Y, ZHANG T, MENG F L, et al. Model predictive control based distributed optimization and scheduling approach for the energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6829-6845.
- [22] 傅国轩, 李雪, 高旭冬. 并网光伏电站基于汇流箱组串电流离散率的分析方法及应用[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 109-113.
- FU G X, LI X, GAO X D. Analytical method and application of current discrete rate of PV power station based on junction box string[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11): 109-113.
- [23] 范相林. 光伏电站建设及运营管理研究[J]. 电子世界, 2012, 11(9): 64-67.
- FAN X L. Research on construction and operation management of photovoltaic power station[J]. Electronic World, 2012, 11(9): 64-67.
- [24] 苏剑, 周莉梅, 李蕊. 分布式光伏发电并网的成本/效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 50-56.
- SU J, ZHOU L M, LI R. Cost-benefit analysis of distributed grid-connected photovoltaic power generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 50-56.
- [25] 王亚南. 专家系统中推理机制的研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- WANG Y N. Research and application of reasoning mechanism in expert system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.

收稿日期: 2021-01-27。

作者简介:



杨湛晔

杨湛晔(1981), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事分布式能源微网、能源互联网研究, kirksharp@foxmail.com;



王佳楠

王佳楠(1984), 女, 博士, 副教授, 主要从事新能源技术数据分析及趋势研究, 29804265@qq.com;



张虎润

张虎润(1968), 男, 高级工程师, 主要从事热能工程、清洁能源产业及技术研究, 13379825186@189.cn。

(责任编辑 辛培裕)