

基于能源交换机和路由器的局域能源互联网研究

王继业¹, 李洋², 路兆铭³, 曹军威⁴

(1.国家电网公司; 2.中国电科院; 3.北京邮电大学; 4.清华大学)

Research on local-area energy Internet control technology based on Energy switches and Energy routers

.....

(State Grid Corporation of China,)

ABSTRACT: Energy Internet is studied as a promising electricity-centered energy network, which revolves around reliable framework, widely interconnected, highly intelligent and open interaction. In this paper, we propose the local-area energy internet framework with the core of energy switches and energy routers based on the thought of SDN and the theory of CPS. We respectively model and analyze the core structure and main functions of energy switches as well as energy routers. We use open north-bound and south-bound control protocol, and put forward the integrated control method of energy internet. Finally, several typical application scenarios are given.

KEY WORDS: energy switch; energy router; energy Internet; Cyber-Physical System; software definition;

摘要:能源互联网是以电为中心,围绕更清洁更经济的发电、更安全更高效的配置、更便捷更可靠的用电,而构建的“网架坚强、广泛互联、高度智能、开放互动”的新型能源网络。本文以此为基础,借鉴“软件定义”的思想,基于信息物理融合建模理论,构建了以能源交换机和能源路由器为核心的局域能源互联网体系架构,设计能源交换机和能源路由器的核心结构及主要功能,利用开放式南向和北向控制协议,提出了能源互联网的一体化控制方法,给出了面向局域能源互联网的各类典型应用场景,有助于推动能源生产与消费革命,促进清洁发电和高效用能。

关键词:能源交换机;能源路由器;能源互联网;信息物理系统;软件定义;

0 引言

能源互联网的概念由美国著名经济学家杰里米·里夫金在《第三次工业革命》中提出并受到广泛关注^[1],文中重点描述了未来能源互联网的应用,引发了世界范围的关注和研究^[2-4]。2013年国家电

网公司刘振亚在《智能电网与第三次工业革命》中创新性地提出了“智能电网承载并推动第三次工业革命”的重要观点,集中阐述了以电为中心,围绕更清洁更经济的发电、更安全更高效的配置、更便捷更可靠的用电,构建“网架坚强、广泛互联、高度智能、开放互动”的能源互联网^[5]。

在信息方面,美国国家科学基金项目“未来可再生电力能源传输与管理”参照互联网技术的核心设备,提出了能源路由器的概念^[6],文献^[7]总结了能源互联网体系结构与技术框架、分析了发展能源互联网过程中信息技术所面临的关键问题和挑战。文献^[8]指出软件定义方法更能满足信息能源基础设施一体化意义下的能源互联网信息通信的需求,给出一体化的实现方法,并进行实验验证。文献^[9]提出了电网信息物理融合建模技术、电网信息物理系统分析方法、基于融合模型的电网控制技术、基于融合模型的形式化验证。

在能源方面,文献^[10]提出面向能源互联网的灵活配电系统体系结构,提出电力电子变压器为基础的电能路由器和电能交换器关键电气装备,提出基于信息物理系统融合的电气信息物理系统设备互联参考模型。文献^[11],基于虚拟电机理论,交流侧接口采用虚拟同步电机控制,直流侧接口采用虚拟直流电机控制,增强了系统惯性和阻尼,提升系统稳定性。文献^[12]探讨了以能源路由器为核心交换装置的能源互联网实现模型,从能源路由器的实现目标,已有支撑技术和实现部署方式等方面分析了涉及的关键技术,并结合已有研究成果说明了

该领域亟需突破的研究方向。文献[13]提出了实现能源互联网的先进储能、固态变压器、智能能量管理技术、智能故障管理、可靠安全通信和系统规划分析等技术,并对各项关键技术所涉及的科学问题进行了分析与探讨。

本文借鉴“软件定义”的思想,结合大数据云服务技术,提出了广域能源互联网和局域能源互联网的概念,构建了包含服务聚合层、集中优化层、分布自治层和就地保护层的局域能源互联网分层分级的体系结构;基于信息物理融合建模理论,借鉴“即插即用”的思想,提出了局域能源互联网关键设备能源交换机和能源路由器的系统结构和主要功能;利用开放式南向和北向控制协议,提出了信息安全管理与能量优化控制统一的方法;最后构建了局域能源互联网小前端、大后台的应用环境,并分析了在不同环境中的应用场景,有效支撑面向未来能源综合运营的创新商业模式。

1 能源互联网与信息物理融合建模

1.1 分层分级的能源互联网结构

能源互联网根据分布范围又分为广域能源互联网和局域能源互联网,如图1所示。广域能源互联网主要是由跨国、跨洲骨干网架和涵盖各国各电压等级电网(输电网、配电网)的国家泛在智能电网够成,连接“一极一道”和各大洲大型能源基地,即广域能源互联网也就是全球能源互联网^[14],是未来智能电网的发展方向^[15-18]。局域能源互联网主要针对各国 35kV/110kV 电压等级以下的配电网,适应各种分布式电源及电动汽车的接入、能够实现需求侧响应与管理,具有较强的资源配置能力和安全可靠运行能力,能够实现多类型能源的综合互补和互联共享,体现能量流、业务流和信息流的高度融合与统一。局域能源互联网又分为四层:服务聚合层、集中优化层、分布自治层和就地保护层。

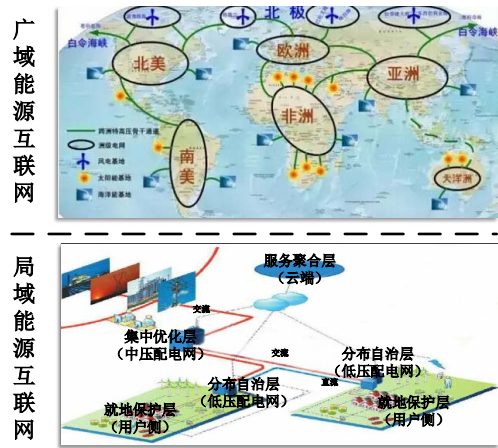


图1 能源互联网的结构

Fig. 1 the structure of energy Internet

1.2 能源互联网关键设备信息物理融合建模

基于信息物理融合建模理论,构建局域能源互联网关键设备的信息物理融合模型,支撑能源互联网一体化的控制架构、用户行为决策模型和优化算法^[19-20]。基于信息物理系统的融合模型构建,分为两个步骤进行:

(1) 基于能源互联网物理实体和公共信息模型,采用混合建模法对单个能源互联网关键设备进行信息物理融合建模,形成单个能源互联网信息物理融合模块。

使用面向对象的建模方法,基于公共信息模型对能源路由器、能源交换机、分布式能源、可控负荷与储能设备等物理对象进行抽象,形成对象类和属性以及它们之间的关联关系;

对物理模型进行时域表征,其在某一时刻所得到的物理量可以映射到信息模型,反之,信息模型也可以通过映射关系,在物理模型中找到该类和属性所对应的值。

对物理模型和信息模型双向修正与不断细化,使得双方能够达到一一映射,以利于实现信息系统对物理系统的全局控制与优化。

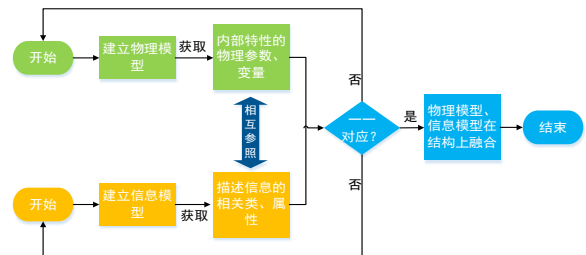


图2 基于混合建模法的局域能源互联网建模

Fig. 2 Modeling of local-area energy Internet based on hybrid modeling

(2) 对能源互联网信息物理融合模块进行整合, 以形成满足高异质性、高耦合性的能源互联网信息物理融合模型。

采用纵向集成, 横向互联的方法对单一能源互联网信息物理融合模块进行整合。基本原则是纵向集成: 各个模块的信息过程形成逻辑节点, 各个模块的物理过程形成功能块; 横向互联: 各个逻辑节点进行逻辑连接, 功能节点进行功能连接。通过信息整合和物理整合, 实现能源互联网内部异构模块的信息交互和互操作, 形成满足高异质性、高耦合性的能源互联网信息物理融合模型。

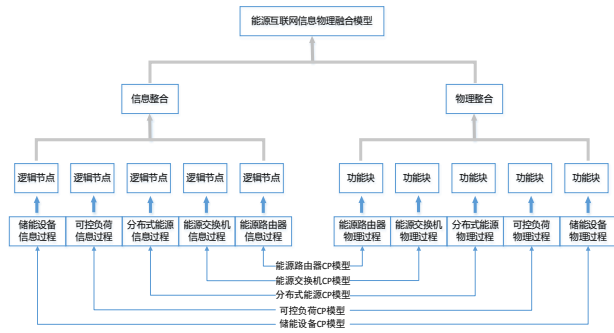


图3 能源互联网信息物理融合模块整合方法

Fig. 3 Integration method of Information Physics of energy Internet

2 能源交换机和能源路由器

2.2 能源交换机

能源交换机是局域能源互联网中分布协调自治层的核心设备, 它主要负责微电网内部的设备即插即用、电压频率的自适应调节、电能质量治理、用户侧需求响应等。

(1) 能源交换机的系统结构

能源路由器主要由标准化电气接口、集成母线系统、电力电子变流器、智能传感与控制器、嵌入式系统、集成网络系统和标准化网络接口构成。能源交换机模块设计如下图:

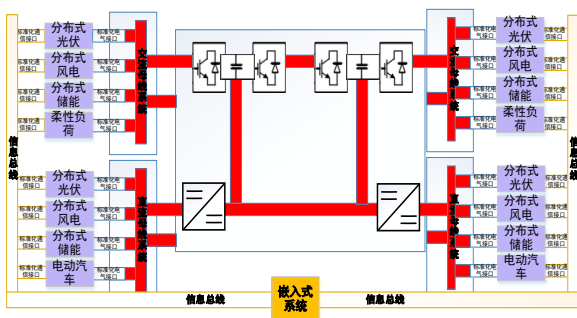


图4 能源交换机系统结构

Fig. 4 the physical structure of energy Switches

(2) 能源交换机的主要功能

能源交换机可主动跟踪电网电压和频率变化, 自适应改变自身输出的功率, 平滑系统电压和频率波动, 有助于电力系统稳定运行。能源交换机主要功能包括: 微电网的设备监测控制、协调优化控制、电能质量治理、故障预警告知、运行维护管理、用户互动服务。

(a) 设备监测控制

测量、保护、监控、通信、接入控制及管理等功能。

(b) 协调优化控制

可采用定功率输出和下垂控制模式运行, 跟踪配网运行, 并根据下垂特性响应电网电压和频率的变化。

(c) 电能质量治理

通过控制算法, 实现谐波治理与无功补偿功能。

(d) 故障预警告知

当微电网内部出现孤岛、过压、过流及短路等故障时, 发出提示信息告知用户。

(e) 运行维护管理

对微电网内的系统配置、设备参数、运维信息等进行维护和管理。

(f) 用户互动服务

根据实时电价, 基于用能数据和嵌入策略, 引导用户优化用电方式, 实现能效的主动管理。

2.3 能源路由器

能源路由器是局域能源互联网中集中优化管理层的核心设备, 它主要负责局域能源互联网的集中能量管理、电力电子变压、最优潮流控制、风险评估预警、信息聚合服务及大数据分析应用等。

(1) 能源路由器的系统结构

能源路由器主要由标准化电气接口、集成母线系统、电力电子变压器、智能传感与控制器、服务器集群、集成网络系统和标准化网络接口构成。标准化电气接口, 可为用户提供“即插即用”的统一并网方式。标准化网络接口, 可为用户提供自动识别的服务交互信息。能源路由器模块设计如下图:

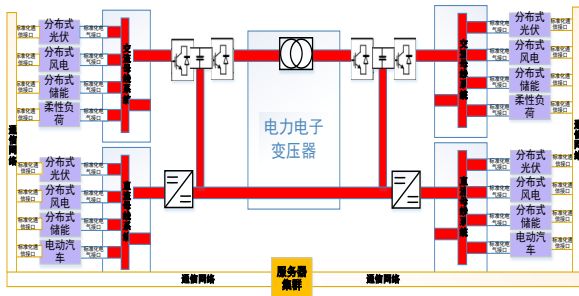


图 5 能源路由器系统结构

Fig. 5 the physical structure of energy routers

(2) 能源路由器的主要功能

多模式多功能运行，具备信息融合态势感知能力、平衡系统功率、电能品质优化控制、高效需求侧能源利用、多能源协同交互控制等高级功能；具备分布式能源接入以及变压、电能交换、电能质量控制等定制电力高级功能。能源路由器主要功能包括：局域能源互联网的信息监测控制、能量优化管理、电能质量治理、风险评估预警、辅助分析决策、运营维护管理、用户互动服务、大数据分析与服务。

(a) 系统监测控制

测量、保护、监控、通信、接入控制及管理等功能。

(b) 能量优化管理

根据发用电预测，基于信息物理模型的实时上传与解析，实现网络拓扑重构，进行能量管理和最优潮流控制。

(c) 电能质量治理

可配置无功补偿装置或有源滤波器，实现谐波治理与无功补偿功能。

(d) 风险评估预警

通过薄弱环节辨识和运行故障识别，快速确定隐患位置、故障类型和故障位置等，进行隔离和预警。

(e) 辅助分析决策

对生产和运营数据，进行综合分析，提炼关键结论和支撑依据，辅助运营决策。

(f) 运营维护管理

基于系统数据交互信息，进行量价费补贴、生产运行和营销管理等。

(g) 用户互动服务

基于交互的发用电信息，发布实时电价、互动

信息和竞价购售电服务等。

(h) 大数据分析与服务

基于虚拟化云端管控技术，为客户提供规模化的大数据分析与服务业务。

2.4 能源交换机和能源路由器的区别

能源交换机和能源路由器均是局域能源互联网中的核心设备，其主要区别如下表：

表 1 能源交换机和能源路由器的区别

	能源交换机	能源路由器
用户互动服务	基于嵌入策略，进行需求侧控制。	发布实时电价、互动信息和竞价购售电服务。
物理结构模块	由电力电子器件实现变压、变流功能。	由电力电子固态变压器和电力电子器件实现变压、变流功能。
信息监测控制	监测微电网内部的运行、设备等信息	监测多个微电网群的运行、设备等信息
能量优化管理	通过定功率或下垂控制，实现自适应调节。	通过供用电预测和实时调度，实现最优潮流控制。
电能质量治理	通过控制算法实现电能质量调节。	通过无功补偿和有源滤波等装置，实现电能质量治理。
风险评估预警	对故障进行预警和告知	对薄弱环节辨识和运行故障识别，隔离及预警。
辅助分析决策	无	对生产和运营数据，进行综合分析。
运营维护管理	对微电网系统配置、维护和管理。	对量价费补贴、生产运行和营销策略进行管理。
大数据分析服务	无	基于虚拟化云端管控技术，为客户提供规模化的大数据分析与服务业务。

3 软件定义的局域能源互联网

设计网络性能突出、网络能力开放、安全可信、易扩展的局域能源互联网，可以为基础设施、控制平台、业务需求提供更完备的策略和控制支撑。本文借鉴 SDN 的思想，结合虚拟化技术，利用开放式南向和北向控制协议，实现对能量流和信息流的安全管理和高效潮流管理，从而实现电能和信息的一体化控制，达到电能资源的高效利用的目的。软件定义的局域能源互联网架构如图所示：

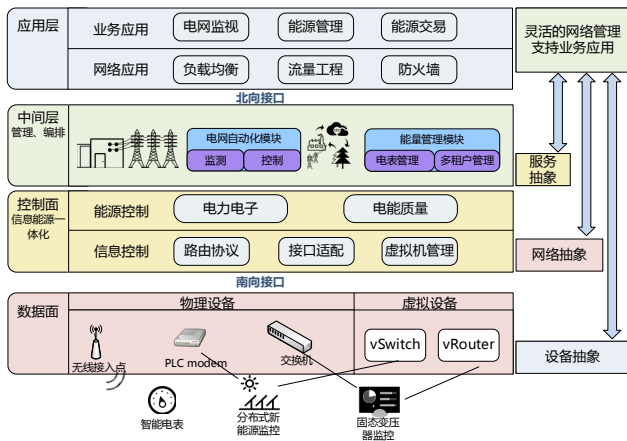


图6 能源互联网的一体化管控架构

Fig. 6 Integrated control framework of energy Internet

在能源互联网中，以分布式能源系统为核心，以系统中的电力用户和其他储能设备、输配电设备为组成部分形成的发电与用电相统一的小型能源微网，构成了局域能源互联网的基本网络单元。软件定义的局域能源互联网架构分为四层：数据层、控制层、中间层和应用层。

(1) 数据层（基础设施层）负责基于能量交换和路由、智能电表、监控等业务的数据处理、转发和状态收集；

(2) 控制层主要采用扁平控制和层次控制相结合的方式对电网进行分布式扩展，主要负责通过南向协议，处理数据层资源的抽象信息，可支持网络拓扑、状态信息的汇总和维护，并基于应用的控制来调用数据层的资源。

(3) 中间层通过虚拟化技术和网络编排功能实现服务抽象，把网络资源抽象成电网自动化和能源管理功能模块，通过北向接口提供给应用层调用，提高上层对网络资源调用的灵活性；

(4) 应用层则包括通信网络和能量接口管理等不同业务和应用，可以管理和控制网络对应的转发、处理策略，也支持对网络属性的配置来提升网络资源利用率、保障通信网络的安全和实时性等服务质量，构建一体化控制综合服务平台，为用户提供可定制的监测、控制策略，实现灵活的网络管理，提供支持虚拟运营等功能。

3.1 总体结构

根据能源互联网“局部消纳，局域互联”的需要，局域能源互联网从网络架构角度可以分为三层，包括就地保护层、分布自治层和集中优化层，共同支

撑应用层面的服务聚合层，软件定义的局域能源互联网的网络结构如下图所示：

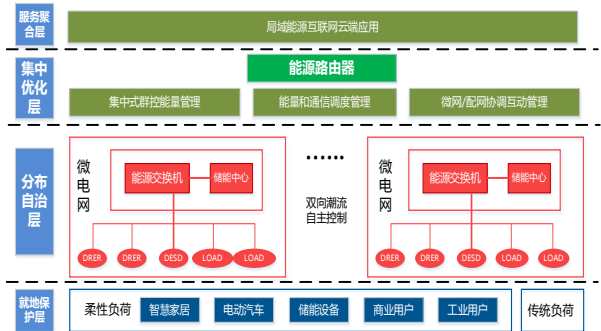


图7 局域能源互联网网络结构

Fig.7 network structure of Local energy Internet

其中，就地保护层利用继电保护装置完成对发电、储能和重要负载等设备的保护，在整个局域能源互联网的结构中，体现为与发电、储能和负载设备相连的网络终端，采集设备的状态和保护信息给网络。分布自治层主要利用能源交换机，通过双向潮流自主控制，完成微网内部的电能交换和管理，实现电能局部消纳的目标，尽可能的减少长距离传输带来的能量损耗。集中优化层主要利用能源路由器，通过集中式的群控能量管理和微网/配网协调互动管理，完成微网之间的能量交换和管理；通过调度管理和虚拟市场交易，完成微网间用户的能量实时动态交易，从而实现局域能源互联网局域互联的目标。下面主要针对分布自治层和集中优化层展开论述。

3.2 分布自治层结构

在微网内部，光伏等分布式电源、居民及商业用电用户、电动汽车、储能设备、能源交换机共同组成了一个自治系统，如图7所示：

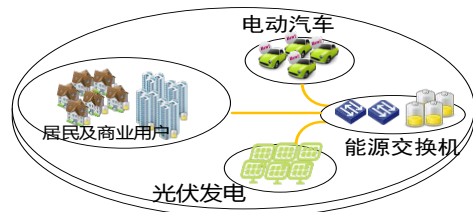


图8 局域能源互联网分布自治层

Fig. 8 Distributed autonomous layer of Local-area energy Internet

考虑到远距离传输的电能损耗，大量的电能交换都会发生在微网内部，因此能源交换机承担了对能量和信息的集中化控制任务，需要完成对微网内

部能源网络和信息网络的一体化集中控制。基于软件定义的思想，将能源和信息的态势感知和管理控制功能同能量和信息的转发功能相分离，抽象至能源交换机上，通过软件的方式实现，达到能量和信息一体化控制的目标。从而实现局域能源互联网在微网层面分布自治、局部消纳的目标。

3.3 集中优化层结构

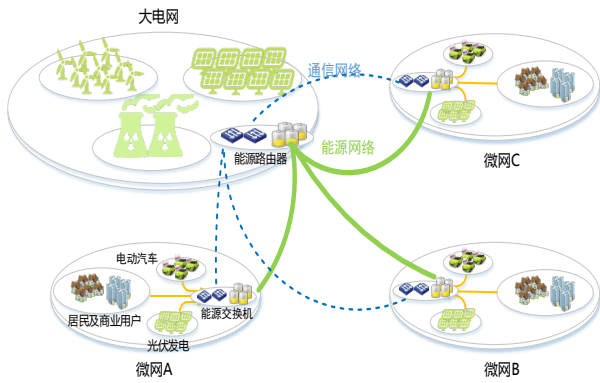


图 9 局域能源互联网集中优化层

Fig.9 focus optimization layer of local energy Internet

如图9所示，多个微网组成了一个微网群，微网与微网之间通过能源和信息网络实现互联，并由能源路由器完成能源和信息的状态感知和管理控制。同样基于软件定义的思想，将微网间能源和信息的态势感知和管理控制功能同能量和信息的转发功能相分离，抽象至能源路由器上，通过软件的方式实现，达到微网间能量和信息一体化控制的目标。同时，能源路由器可以对微网层面的能源交换机进行管理和控制，从而实现局域能源互联网在微网间层面局域互联，集中优化的目标。

4 局域能源互联网的应用分析

基于能源交换机/能源路由器的局域能源互联网总体框架，其应用分析的核心思路是：分层部署应用，随着信息密度的增加，上层应用充分聚合数据和延伸应用深度，构建小前端、大后台应用环境。本节首先提出局域能源互联网的应用架构，再梳理不同层级的业务应用情景，探讨未来的应用趋势。

4.1 应用架构

局域能源互联网的应用架构将遵从“自下而上，分布自治，协同管控，全局优化”的基本原则，全面互联的微网是局域能源互联网内能源交换机/能源路由器的基础运行环境。



图 10 局域能源互联网应用架构

Fig.10 application architecture of local-area energy Internet

从图 10 可以看到，就地保护层之上的应用架构包括三个层级。第一级为面向大量分布式电源、分布式储能及柔性负荷的能源交换机“分布自治层”，主要位于 380/220V 的低压配网，能源交换机的即插即用和适应性控制决定了此级应用的“灵活与高效”特性。第二级为面向多个微网集约化运营的能源路由器“集中优化层”，主要位于 10kV 的中压配网，通过能源路由器来实现的基于信息物理融合模型的多微网即时能量交换、潮流控制优化以及信息资源聚合应用，决定了此级应用的“管控和优化”特性。第三级为局域能源互联网“服务聚合层”，采用软件定义的设计理念，借鉴 SDN 将集中控制逻辑从分散路由节点中独立出来，同时抽取多微网和配网的公共数据，形成多时间尺度和多源量测维度的大数据集合，逐步将一些业务应用部署到云端，此级应用的主要特点是“业务弹性和智能分析”。

4.2 分布自治层应用

基于能源交换机的协调自治和能量交换，主要包括以下两类应用：

(1) 微网内应用

对分布式电源/储能/柔性负荷进行监视、测量和控制，通过信息物理融合的控制策略，利用能源交换机即插即用的特性，实现分布式电源/储能/柔性负荷的适应式协调控制、信息交互共享、及微网能量管理。

(2) 微网间应用

通过软件定义设计理念，实现各微网间能量交换路径的建立与切换、以及基于能量流、信息流融合的能量管理和适应电价激励机制的个性化用电服务，减少配电网容量的冗余配置，提高资产利用效率。

4.3 集中优化层应用

基于能源路由器的优化控制与运营管理,将构建面向多微网的集中能量优化与信息聚合应用。

通过能源路由器功能设计,实现与配网自动化、生产管理、营销管理等系统的数据交互,以及基于多系统信息交互下的功率预测、负荷分析、分级优化调控、可视化辅助决策等,研究开发局域能源互联网下的多微网协调运行控制、能量优化管理、以及辅助分析决策等高级应用。

大量分布式电源和微网的高效运营,将在不升级配电网架的情况下提高局域电网的供电可靠性。因为能源路由器通过固态变压器与变流器,从单一微网的局部平衡延伸到了多微网的局域平衡,实现了多微网的即时能量交换与潮流控制优化,从而提高了可靠供电能力;而且局域电网内能量的灵活交换,充分体现了分布式能源的就近利用和对等交互的优势,这是未来能源生产和高效利用的一个发展趋势。

能源路由器架构下的信息资源聚合,主要表现在局域电网内基于不同柔性负荷特性分析下高效用能管理服务、分布式储能的全局数字化和优化配置与管控,这些业务应用将有效支撑未来新的能量运营商业模式,如能源的C2C和C2B。

相对于分布自治层应用,集中优化层应用的信息密度大大增加,这些应用更多地承接了能源路由器的功能组合,通过软件定义的设计,方便地实现多微网的集中管控和优化。

4.4 服务聚合层应用

在整合多微网与多配网集约化运营的基础上,将构建虚拟化云端管控服务与大数据分析类业务应用。

在大量分布式电源运营数据、局域电网内不同类型微网中可转移(移峰填谷)、可中断和可调节的电力负荷特性数据、以及分布式储能的调节管控数据等多源运行维护和多时间尺度数据积累的基础上,结合信息物理融合与交互的方法,将形成能源生产与交易、需求响应与服务一体化数据集合,从而构建局域能源互联网全局优化的坚实数据基础。

在此基础上,整合多微网与配电网、灵活供电与需求测的大数据分析成为可能,利用虚拟化云端管控平台,结合大规模配用电数据存储、处理、修正及数据挖掘实现方案,为客户提供规模化大数据分析业务应用,包括:

(1) 面向柔性负荷高效用能的综合能源服务与基于电价动态变化的运营模式优化;

(2) 局域能源互联网内运营设备状态的深度分析、运营效益评估和持有资产交易;

(3) 基于实时/准实时交互的发、用、储信息,开展包括实时计费与交易、实时动态电价发布、多方互动信息和灵活竞价购电等服务;

这些高端业务分析应用将支撑能源企业的可持续运营发展和高投资收益回报。

服务聚合层应用与前两层应用的最大不同是,由于面向多微网和多个配网,其信息资源的聚合密度和多主体协同的业务复杂性都大为增强,利用云端管控的大数据资源池,将派生基于高度融合信息流和能量流的局域能源互联网综合业务应用形态,体现了“业务弹性和智能分析”的应用特点。

5 结论

(1) 提出了广域能源互联网和局域能源互联网的概念,构建了包含服务聚合层、集中优化层、分布自治层和就地保护层的局域能源互联网分层分级的体系结构;

(2) 基于信息物理融合建模理论,借鉴“即插即用”的思想,提出了局域能源互联网关键设备能源交换机和能源路由器的系统结构和主要功能;

(3) 提出了基于软件定义的局域能源互联网架构,利用开放式南向和北向控制协议,提出了信息安全管理与能量优化控制统一的方法;

(4) 基于能源交换机/能源路由器结构和软件定义设计思想,构建了小前端、大后台的应用环境,有效支撑面向未来能源综合运营的创新商业模式。

(5) 将进一步优化能源交换机和能源路由器的功能设计,构建面向不同对象的具体应用场景。

致谢

本文的研究获得以下资助:国家自然科学基金委员会(61472200和61233016),科技部973计划课题(2013CB228206)以及国家电网公司科技项目“能源互联网信息通信体系架构研究”(SGR1XTKJ[2015]253)。

参考文献

[1] 杰里米·里夫金 第三次工业革命[M] 张体伟,孙毅宁,译 北

京: 中信出版社, 2012

- [2] Crow M L. Intelligent energy management of the FREEDM system[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2010: 1-4.
- [3] E-Energy -Smart Energy made in Germany[EB/OL]. [2013-5-10]. <http://www.e-energy.de/en/>
- [4] VERM ESAN O, BLYSTAD L.-C, ZAFALON R. et al. Internet of Energy-Connecting Energy Anywhere Anytime[C]//MEYER G, VALLDORF J. Advanced Microsystems for Automotive Applications, Spring-Verlag, 2011
- [5] 国家电网公司董事长、党组书记 刘振亚. 智能电网与第三次工业革命[N]. 科技日报,2013-12-05001.
- [6] A Huang, M L. Crow, G T Heydt, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet[C]. Proceeding of the IEEE, 2011,99(1): 133-148.
- [7] 王继业,孟坤,曹军威,程志华,高灵超,林闯. 能源互联网信息技术研究综述[J]. 计算机研究与发展,2015,05:1109-1126.
- [8] 曹军威,王继业,明阳阳,杨明博,孟坤,高灵超,林闯. 软件定义的能源互联网信息技术研究[J]. 中国电机工程学报,2015,14:3649-3655.
- [9] 刘东,盛万兴,王云,陆一鸣,孙辰. 电网信息物理系统的关键技术及其进展[J]. 中国电机工程学报,2015,14:3522-3531.
- [10] 盛万兴,段青,梁英,孟晓丽,史常凯. 面向能源互联网的灵活配电系统关键装备与组网形态研究[J]. 中国电机工程学报,2015,15:3760-3769.
- [11] 盛万兴,刘海涛,曾正,吕志鹏,谭骞,段青,冉立. 一种基于虚拟电机控制的能量路由器[J]. 中国电机工程学报,2015,14:3541-3550.
- [12] 曹军威,孟坤,王继业,杨明博,陈震,李文焯,林闯. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学:信息科学,2014,06:714-727.
- [13] 查亚兵,张涛,黄卓,张彦,刘宝龙,黄生俊. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学:信息科学,2014,06:702-713.
- [14] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 71-100. Liu Zhenya. Global energy internet[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 71-100(in Chinese).
- [15] 周孝信. 新能源变革中电网和电网技术的发展前景[J]. 华电技术, 2011, 33(12): 1-4.
- [16] XU Y, Zhang J H, Wang W Y, et al. Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet[C]// Proc 2011 IEEE Int Conf on Smart Grid Communications, 2011:31-36.
- [17] GEIDL M, KLOKL B, KOEPEL G, et al. Energy Hubs for the Futures[J].IEEE Poer & Energy Magazine, 2007(1):24-30.
- [18] KATZ R H, CULLE R D E, SANDE R S S, et al. An Information cntric Energy Infrastructure: The Berkeley View[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2011, 1(1): 7-22
- [19] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,董朝阳. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化. 2011(16)
- [20] 邱宇峰. 电网信息物理融合系统: 面向未来的能源互联网[N]. 国家电网报, 2015-03-09(006)



作者简介:

王继业(1965), 男, 博士, 教授级高工, 国家电网公司信息通信部, 主要研究方向为电力信息化、智能电网、能源互联网等, jiyewang@sgcc.com.cn;

李洋

曹军威 (1973), 男, 博士, 清华大学信息技术研究院研究员, 主要从事分布式计算与网络、智能电网、能源互联网方面的研究工作。

林闯, 男, 博士, 清华大学计算机系教授, 主要从事计算机网络性能评价方面的研究工作。