



能源互联网与能源路由器

曹军威^{①③}, 孟坤^{②*}, 王继业^④, 杨明博^①, 陈震^{①③},
李文焯^②, 林闯^{②③}

① 清华大学信息技术研究院, 北京 100084

② 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084

③ 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084

④ 国家电网公司信息通信部, 北京 100031

* 通信作者. E-mail: mengkurt@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2014-01-01; 接受日期: 2014-03-10

国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB328105, 2013CB228206)、国家自然科学基金 (批准号: 61020106002, 61071065, 61233016, 11171368)、中国博士后科学基金 (批准号: 2013M540952)、清华大学自主科研 (批准号: 20121087999) 和国家电网科技资助项目

摘要 日益紧张的能源供需矛盾和环境压力等要求可再生清洁能源应该在未来能源体系中承担主要能源供给任务. 能源传输技术、存储技术、信息通信以及高性能计算技术的发展为有效利用分布式、间歇性可再生能源提供了技术支持. 针对类似于信息互联网式的能源互联网愿景, 本文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.

关键词 能源互联网 能源路由器 可再生能源 分布式能源 微网

1 引言

目前, 飞速发展的可再生能源技术正逐步缓解人类对化石能源的依赖, 欧盟、美国和中国相继分别提出到 2050 年实现可再生能源在能源供给中占 100%, 80% 和 60%~70% 的目标. Internet 融合多种通信模式, 为丰富和利用信息提供了极大便捷, 正悄然改变人们沟通和信息交流方式, 颠覆越来越多传统产业的经营模式, 为构建未来能源系统提供了借鉴和信息支撑^[1]. 信息与新能源技术为构建智能能源系统提供了必要技术储备, 它们的融合有望形成以“能源互联网”(energy internet) 形式供给和消费能源, 支撑“第三次工业革命”^[2]. 能源互联网可以被认为是未来能源基础平台, 分布式能源、生产-消费一体的能源主体将成为其主要组成部分, 满足它们的接入和定制化需求面临诸多挑战, 如间歇式能源的调节与接入、生产和存储的合理调配、定制化需求的响应等. 因此, 能源互联网发展亟待解决架构、构建方法及相关通信和控制协议设计开发等难题.

当前, 电能是应用最为广泛的二次能源, 电网已实现电能的远距离配送, 并具备了相当规模. 随着越来越多电动设备的成熟, 电能将成为未来人们直接使用的主要能源形式, 电力网络将是未来能源互

引用格式: 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 714-727, doi: 10.1360/N112014-00001

联网的主要载体. 然而, 当前电网运营还保持二元结构特点, 生产、配送与消费相互割裂, 个性化消费需求和分布式能源供给还不能被很好地支持; 生产、配送过分依赖预测, 缺乏高效的通信通道实现信息共享, 能源利用率处于较低层次. 此外, 太阳能、风能、潮汐能及生物质能等可再生能源都具有较大的利用潜力, 但是, 环境因素和生产效率使得间歇性和不稳定性成为了它们的共同特点, 对它们的高效利用存在诸多挑战^[3]. 如: 太阳能受到光线强度和光照时间的影响, 风力和潮汐发电受地域和自身特性的影响, 所生产的电能质量和数量上都难以达到现有电网的要求. 因此, 以现有电网为基础, 对可再生能源生产和存储进行恰当调度是实现能源互联网的基本要求, 研发支持便捷双向能源流和信息流融合的技术和设备是构建能源互联网的关键.

按照能源互联网的愿景^[4], 通信系统承担信息采集, 信息传输和信息处理业务, 信息及时采集、优化处理和有用信息及时准确到达是其必须具备的能力^{1),2)}. 然而, 一方面, 现有 Internet 采用链路共享和接收转发的基本运行原则, 数据拥塞等严重影响信息处理效率, 时效性和兼容性等要求使得直接利用 Internet 支撑能源互联网的调度和控制面临巨大挑战. 另一方面, 我国现有电网通信网络主要采用预留专门通道方式保证关键业务的信息需求, 存在巨大的资源浪费. 因此, 综合利用 Internet 和电网通信系统设施, 构建具有带宽保障, 海量计算和灵敏反应能力的信息架构是能源互联网的基本要求.

针对能源互联网在能源接入、能源控制和能源传输等面临的挑战, 借鉴 Internet 中交换设备的设计理念, 设计能够实现能源网络互联、调度 and 控制的“能源路由器”(energy router)是构建能源互联网的一种直观可行的方案^[5], 但详细的实现方法仍亟需探讨. 本文将在分析能源互联网需求的基础上, 针对能源路由器设计与实现过程中涉及的各种关键技术进行深入分析, 说明基于能源路由器构建能源互联网的优势, 并深入探讨能源路由器功能和实现方法.

2 Internet 发展的启示

Internet 已经超越了技术范畴, 成为了一种具有超强融合能力的生态环境, 正以巨大的力量逐步颠覆多个传统产业的生产和经营方式. 能源互联网旨在实现可再生能源高效利用, 满足日益增长的能源需求和减少能源利用过程中对环境造成破坏, 分布式能源供应和共享是其主要特征, 调动各能源单元的主观能动性, 形成具有自我服务, 自我维护和自我更新的生态环境是它的目标. 该部分将分析 Internet 的发展经验, 说明能源互联网的设计和实现过程中应采纳的方法.

2.1 Internet 的成功经验

(1) 开放对等理念提供巨大的“横向力量”

旨在摆脱电话网络对中心交换局的依赖, 开放对等理念在 Internet 建立之初即被认为是其生存和发展的根本. IP 技术简化了网络接入设备结构, 降低了设备制造成本, 使得 Internet 快速扩张; Web 技术进一步便利了人们使用 Internet, 促使越来越多的传统业务向 Internet 转移. Internet 几乎成为了与人类社会同构的虚拟社会, 开放, 对等的网络环境更有利于用户间或产业间的信息共享, 促进了产业融合和创新活动的开展, 在可预见的时间内, Internet 将颠覆更多的传统产业经营模式.

(2) 自媒体、自通信丰富网络服务内容

1) http://www.vde.com/en/dke/std/KoEn/Documents/DKE_Normungsroadmap_ENG-20%20-%20gV.pdf.

2) <http://www.zhinengdianwang.cn/fenxi/show.php?itemid=1405>.

“马太效应”在 Internet 的发展过程中同样发挥作用, 丰富的服务内容吸引越来越多的用户关注 Internet, 用户参与进一步丰富网络内容, 使得 Internet 进入了良性发展轨道。直观地, Web2.0, 即时通信及移动互联网技术支持了自媒体和自通信业务的开展, 其中, 微博和社交网络给予用户自发丰富网络内容的机会; 即时通信软件拓展了人们的通信手段, 降低了通信成本; 移动互联网更是加速了信息创造和更新的速度。

(3) 服务细致化分工保证服务质量稳步提升

Google, YouTube, Flickr 等专门网络服务提供商的成功表明: 细致化分工使企业更专注于研发提高服务质量的技术, 为 Internet 发展提供了技术积累。例如, Google 针对搜索业务提出的 MapReduce, BigTable, GFS 引发了人们对未来互联网思考。此外, 细致化分工为更精准地为用户提供服务奠定了基础, 要求企业密切关注用户的需求变化, 以用户体验质量 (quality of experience, QoE)^[6] 为核心的技术研发更具针对性和持续性。

(4) 开源平台提供持续更新动力

开源提高了技术到产业化的转化效率, 促进了技术创新, 为 Internet 持续创新提供了不竭动力。当前, Internet 是知识和技术共享的平台, 其中包括 Internet 的相关资源, 如涉及操作系统的 Linux 开源平台, 涉及云计算的 Hadoop 平台, 涉及网络协议的软件定义网络 (software defined networking, SDN) 开源平台等, 用户可以根据需要下载源代码搭建自己所需的应用。此外, 即时通信和社交网络为技术交流提供了渠道, 为群智 (crowdsourcing) 解决问题提供了基础。

2.2 能源互联网可行发展模式

Internet 通过采用开放对等理念, 在创新服务模式的基础上提供了多种多样的信息服务, 使 Internet 成为了支撑当前社会发展的基础设施; 能源互联网旨在实现能源的高效传输、分享与利用, 为经济社会发展提供坚实的能源基础架构, 因此, Internet 的发展模式对能源互联网的发展具有良好的借鉴作用。IP 技术曾经是推动 Internet 飞速发展的重要动力, 但是随着网络服务内容的日益丰富, 基于 IP 机制的 Internet 通信效率越来越难以支撑人们对网络的需求, 关于构建非 (后)IP 的下一代互联网的呼声越来越高^[7,8], 鉴于此, 关于能源互联网的发展模式存在两种不同的观点: 革命式和演进式。

所谓革命式, 强调较少地考虑现有能源网络的束缚, 从未来能源需求的特征出发, 探讨合适的通信、能源和控制技术, 给出基于可再生能源的能源供应体系。Rifkin 认为第三次工业革命可能率先在发展中国家发生正是基于该种观点^[2], 认为只要建立起以可再生能源为供应主体、以建筑物为能源共生产和存储主体、以电力网络为共享平台、以即插即用的电力交通工具为运输方式的能源系统即可成为能源互联网, 为能源互联网的发展提供了足够多的自由发挥空间, 但与当前能源体系的脱离势必导致该种模式动力不足。

相对地, 演进式发展能源互联网强调对现有能源系统的向前兼容, 在不影响现有能源供应的基础上, 探讨各种技术手段实现能源供应逐步转向以可再生能源为主, 保证能源利用率的进一步提高。智能电网可以认为是这种观点的直接产物, 首先通过探讨基于高效通信手段的能源供销平衡控制提高能源的利用率; 智能电网 2.0 阶段^[4,9,10] 则更多强调可再生能源的接入, 强调能源生产方与消费方的交互, 其发展轨迹强调对现有基础设施的利用, 收益分配模式等经济因素将制约该种发展模式的效率。

鉴于上述分析, 我们认为能源互联网的发展应采取两者相结合的发展模式。一方面, 鼓励开展相关关键技术的先导性研究, 探讨综合一体化的解决方案, 在传统能源供应相对不足的地区开展小范围的示范工程; 另一方面, 结合实际情况, 开展基于现有能源基础设施能源调控、可再生能源接入、需求

信息采集与分析、能源供需双向通信等方面的研究, 积累能源互联网的建设经验。

3 信息 — 能源融合的能源互联网架构

能源互联网的建设势必为我们提供一个坚实的能源支撑体系, 信息利用是智能化的保证, 在信息技术的支撑下实现能源系统整合和智能化改造是主要发展道路, 但采用何种架构、技术来实施还存在诸多争论。该部分在总结已有成果的基础上, 探讨性地给出了基于能源路由器的信息 — 能源融合能源互联网架构, 设想通过设计开发能源路由器实现能源互联网的构建, 并在剩余的部分中重点针对能源路由器的关键技术进行详细分析。

(1) 智能控制为中心的 FREEDM 系统

针对可再生能源的日益普及, FREEDM 系统的理念是在电力电子、高速数字通信和分布控制技术的支撑下, 建立具有智慧功能的革命性电网构架吸纳大量分布式能源。通过综合控制能源的生产、传输和消费各环节, 实现能源的高效利用和对可再生能源的兼容。FREEDM 是多技术融合的产物, 固态变压器为实现与信息网络融合奠定了基础, 市场经济模型考虑加快了市场化步伐。其中, 固态变压器实现 four-quadron 功率流控制, 使得分布电站变得即插即用, 并同时保证电网中用户储能及负载的增加不会相互影响; 系统设计激励策略确保绿色能源的最大化利用, 大幅提升整个系统的能源利用率。

(2) 智能电池为基础的 Stem 能量存储系统

Stem 开发的 STEM 能量存储系统将电能和能量预测软件结合起来, 软件可随能源价格变化进行实时反应, 使楼宇建筑能够最经济的使用电能。Stem 能量存储系统为间歇式可再生能源的并网提供了可行的探讨。Stem 智能电池相当于能源互联网中的能量“缓存”(cache), 它的广泛应用将大幅提升能源互联网的能源交换能力, 使整个能源网络的总的能源储量和储量变化阈值得到大幅提升, 为能源互联网实现智能调度、能源双向对等整合奠定了基础, 预示着以大数据为特征的能源互联网将开启节能新时代。

(3) 智能电力电子技术驱动的日本数字电网

日本数字电网完全建立在信息互联网之上, 用互联网技术为其提供信息支撑, 通过逐步重组国家电力系统, 逐渐把同步电网细分成异步自主、但相互连接的子电网, 给发电机、电源转换器、风力发电场、存储系统、屋顶太阳能电池以及其他电网基础结构等分配 IP 地址。电力路由器与现有电网及能源局域网相连, 可以根据相当于互联网地址的“IP 地址”识别电源及基地, 旨在通过电力路由器完成能源分配, 架构参见文献 [11]。

此外, VPEC 公司考虑到日本电流频率存在地区差异的现状, 开发了通过挖掘电流蕴含的信息, 设计了不依赖专门信息网络支持的数字电力供给系统“ECO 网络”。电力路由器通过邻近电力路由器发来的频率信息来判断邻近发电站所具备的电能余量, 电力路由器能够根据蓄电池剩余电量改变输出电力的频率, 形成站所间自治流通机制。ECO 中信息来源于电力特性, 减少了对信息基础设施的依赖, 结构较为简洁, 为构建轻量级能源互联网提供了借鉴。

上述新能源网络方案表明: 能源互联网必然要具有对能量流控制和信息流融合的能力, 利用信息通道及时反馈能量流状态, 根据信息流反馈及时调整对能量流的控制, 实现信息 — 能源一体化是能源互联网的发展趋势。

3.1 信息 — 能源基础设施一体化趋势

实现能量流与信息流的融合, 有效实现信息实时采集和控制策略实时部署是能源互联网的基本要

求. 综合计算、网络分配和物理基础设施相融合, 信息 – 能源一体化解决方案得到了多个国家的高度关注, 出现了许多探索性研究成果.

(1) 美国 NSF 的 Cyber-infrastructure

Cyber-infrastructure 核心在于提供能够融合各种信息技术的框架, 提供具有先进数据处理, 数据存储, 数据管理, 数据整合, 数据挖掘及数据可视化及信息计算能力的研究环境. 该架构旨在有效连接实验室、数据、计算机和人等信息因素, 以期支撑信息技术更有效发展. 一般地, Cyber-infrastructure 采用分层架构³⁾, 介质层包括计算、存储和数据通信 3 个类别, 提供实际运行环境; 传输层提供组网、操作系统及中间固件功能, 为服务层提供各种接口和驱动; 服务层综合上述资源, 提供观察测量装配、虚拟接口设置及协作等服务, 接受高性能计算、数据信息处理和知识管理服务请求; 应用层立足于服务层, 提供局域信息、服务入口和定制应用等服务. 该框架是旨在构建信息融合平台, 为构建智慧能源平台提供了借鉴.

(2) 信息物理系统 (cyber physical systems, CPS)

CPS 是集成计算, 通信和控制技术, 通过实时监测, 协同配合, 智能化物理工程应用的综合系统, 是物理过程和计算过程深度结合的产物⁴⁾. CPS 通过把计算和控制功能以网络为纽带嵌入到物理世界, 实现智能优化, 赋予物理设备计算, 网络通信, 精确控制, 远程协调和自治等几大功能, 具有自适应性, 自主性, 高效性, 功能性, 可靠性, 安全性等特点. 从信息能源融合体系建设的实际情况出发, CPS 是一种可行的能源互联网架构^[12~16].

(3) 伯克利框架 — 以信息为中心的能源基础设施

加利福尼亚大学伯克利分校针对智能电网的信息保障, 提出“以信息为中心的智慧能源网络”架构 (见文献 [17]), 以期通过智能通信协议与电能传输相结合, 实现分布式控制和及时响应. 该架构等价于在配电系统上覆盖了信息控制网络, 信息网络是该系统的神经中枢. 按照区域, 能源网络被分为能源子网, 各子网通过“智能电源开关 (IPS)”实现互联. 针对实现方法, 研究团队给出可扩展能源网络模型 -LoCal, 开发多种能源信息接口和传输协议, 旨在实现发电, 储能和用电等模块的协同智能. 该方面的研究成果为构建能源互联网组网和实现信息, 能源融合提供了借鉴.

3.2 基于能源路由器的能源互联网架构

能源互联网旨在提供便捷的能源接入和消费平台, 构建能源传输网络和设计优化调度方案是亟待解决的问题. 电能以其在能源传输效率方面无法比拟的优势, 在当前的能源体系中占据重要位置, 且已经形成了初具规模的电力传输网络. 因此, 无论从经济角度, 还是从技术实现角度, 充分利用现有的电网基础设施是必须考虑的因素. 借鉴上述成果, 我们认为以“大电网”为能源传输骨干通道, 通过设计恰当的能源 – 信息一体化交换设备, 采用递增式的方式构建能源是可行方法. 基于此, 我们得到如下的能源互联网架构, 见图 1.

该架构拟采用互联网理念构建的信息能源融合“广域网”, 它以大电网为“主干网”; 以分布式能源及微网等单元为“局域网”; 以能源路由器为智能控制单元, 采用开放对等的信息能源一体化框架实现能源的双向按需传输和动态平衡使用. 该架构只需对现有能源配送网络进行裂解, 通过部署能源路由器实现分布式的能量流管控.

由于我国现有电力网络耦合性强^[18], 稳定控制是其首要考虑的问题, “如何在保证稳定的情况下

3) Cyberinfrastructure. <http://en.wikipedia.org/wiki/Cyberinfrastructure>.

4) cyber-physical systems. http://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-physical_system.

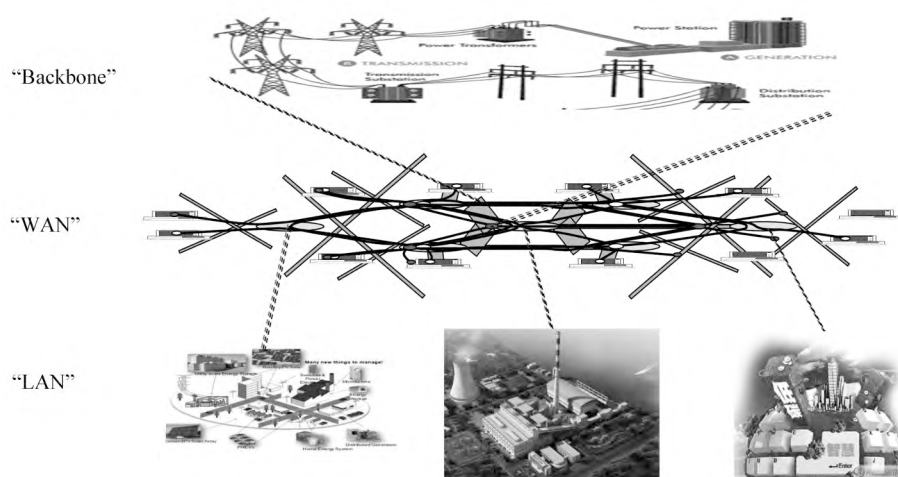


图 1 依托原有双网的新型能源互联网构架

Figure 1 Conventional power grid based new architecture of energy internet

实现网络的优化控制?”是在我国实现能源互联网必须解决的问题. 因此, 我们立足于国情, 研究主要着眼于能源路由器, 以电能质量以及电网稳定性控制为基础, 以接纳间歇式、分布性的可再生能源为目标, 探讨一种符合我国国情的能源互联网发展之路.

4 能源路由器的功能需求

能源路由器是本文能源互联网架构的核心部件, 我们从能源、信息、定制化和系统运行需求几个方面阐述能源路由器应该具备的功能.

4.1 能源控制

在能源互联网中, 骨干网络仍将承担能源远距离传输的功能; 分布式能源单元不仅是能源负荷, 也是重要的能源供应来源, 实现不同特征能源流融合是能源路由器必须具备的功能. 一方面, 能源路由器必须保证流入能源的质量满足需求要求; 另一方面, 应能够保证能源的合理流动, 实现恰当数量的能源流向恰当的负荷; 第三方面, 能够及时监控能源流的质量, 实时调节保证能源流的安全流动.

以电力能源为例, 承担局域能源单元与骨干网络互联的能源路由器必须能够实现骨干高压能源流到低压适用的能源流的变压调节、交流能源和直流能源的相互转换; 局域能源单元互联的能源路由器必须具备消纳可再生能源生产, 尽可能地保证可再生能源的高效利用, 因此, 变压、整流、存储和消纳功能是能源路由器必须具备的功能. 保证能源流的适时流动要求路由器必须能够感知负荷和能源供应变化, 具备改变能源流动方向和数量的功能, 负荷监控和自动调节使其需具备的功能, 多级别变压和能源存储管理技术能够较好的支撑该功能. 电流质量的细微变化都有可能造成整个能源供应体系的崩溃, 及时发现和处理能源质量问题是主要解决办法, 在路由器上实现能源质量的监控和调节是分布式保证能源质量问题的有效方法, 能源质量感知和自动安全保护功能也应该在能源路由其中加以设置.

4.2 信息保障

信息是决定能源路由器控制策略恰当与否的关键, 准确性和时效性尤为重要, 一方面, 要求所有策

略的选择都能够受最广泛信息的支持, 避免片面信息引起决策失误; 另一方面, 要求所有信息必须被及时传送, 避免过时信息的影响. 兼容 (或具备) 信息通信和信息处理功能是能源路由器有效运行的必然要求, 要求各能源路由器不仅能够分享其管理范围内所集的实时信息, 还能够对得到的信息进行处理和利用. 信息保障的实现需要能源路由器具有两方面的功能: 通信和计算. 通信功能要求能源路由器应具有通信接口, 能够与通信链路连接实现信息的接收与发送. 为保证信息的传输时延、可靠性和安全性, 能源路由器可以设置为支持多种通信模式, 不仅能够便于在多种情况下保证通信功能的实现, 还为通过冗余传输保证通信可靠性提供了基础. 此外, 设计有针对性的通信协议和安全防护机制也是通信功能保障必须考虑的问题. 计算功能要求能源路由器具有信息处理模块, 一方面可以联合信息采集设备, 完成原始数据的收集和存储, 并进行冗余信息的过滤和初步处理; 另一方面, 设计高效的信息处理架构或借用数据中心完成数据的深层次处理, 并把有用信息发送到相应的控制单元. 在信息采集阶段可以借用物联网的研究成果, 云计算和大数据方面的研究成果可以较好地支撑信息的高效计算^[19]. 此外, 信息模型也是值得关注的方面, 它将保证各种信息流的有序高效流动.

4.3 定制化需求管理

支持用户个性化能源使用策略是能源互联网的主要功能之一, 其实现基础在于支持用户和能源互联网的交互. 一方面, 用户可以根据当前的能源供应形势调整自己的能用使用策略, 能源互联网根据所有用户能源策略制定能源供应模式满足用户需求; 另一方面, 能源互联网会搜集不同用户的能源使用数据, 从中计算出相应的能源使用规律, 制定合理的能源使用策略, 作为一个最佳使用策略反馈给用户, 供用户选择. 因此, 能源路由器应具有接收和处理所管理区域内用户请求的能力, 并且能够及时准确地用能源价格等反映当前的能源供应形势的信息反馈给用户, 涉及交互和需求管理等功能模块.

未来的能源单元从范围上来看, 可以包括单一设备、家庭、建筑物、小区、甚至一个区域或国家, 定制化服务保障具有明显的范围特征要求, 所需的信息和能源支撑方法存在差异, 要求路由器具有针对性的解决方案. 对于特定设备, 如电动汽车, 其对应的用电策略可能仅包括充供电管理, 其仅需要能源网络提供当前的电压、电流水平和能源价格等信息, 并能够接收和识别它的策略, 设备移动性支持要求能源路由器之间具有协同工作机制; 随着能源单元范围的扩大, 包含的设备数量、类型都将大幅度提高, 以家庭为例, 它可以包括能源存储设备、能源生产设备 (太阳能、燃气等) 和能源消耗设备, 能源路由器的工作重点在于协调各设备间联合工作, 按照即定的目标安排能源生产、存储和消费. 此外, 为适应能源管理企业需求, 能源路由器还必须设计有必要的开放接口, 允许第三方根据需求更有效地完成它们之间的协同工作.

4.4 网络运行管理

网络运行管理对能源互联网来说同样重要, 实时保持网络的可用性、可扩展性、可靠性、可生存性、安全性等是追求的目标. 能源路由器为实施网络管理提供了天然介质, 设置管理功能模块, 开发针对性的管理协议对于能源互联网的运营具有重要的意义. 从功能角度看, 管理功能应包括网络的接入识别、管理策略的远程部署、异常处理和修复、以及日志文件的设定与管理等.

能源路由器作为能源单元接入能源互联网的统一手段, 便捷的管理界面是必不可少的功能, 要实现类似 Internet 中路由器的功能, 通过连接对应的信息和能源控制接口, 能源路由器应具有友好、便捷的控制界面, 通过该界面, 用户可以根据需求选择或配置其需要的功能模块. 通信、能源管理功能的实现将主要通过能源路由器来完成, 远程控制管理模块将提高管理的效率, 为保证网络的可靠性和可

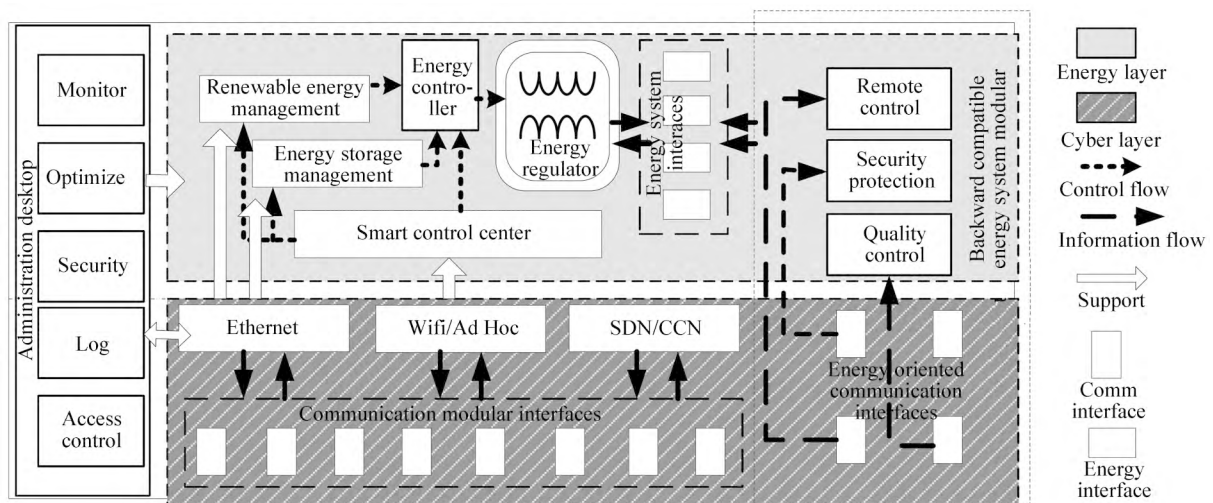


图 2 能源路由器架构设计

Figure 2 Architecture of energy routers

用性提供技术支持. 异常的自动化处理和修复是时效性要求较高的能源互联网系统必须具备的功能, 从能源角度看, 远动、继电保护、测距等业务必须支持, 通信模块为指令的传输提供支撑, 通信模块和管理控制模块的联动是保证该管理功能实施的关键, 规定和开发相应的标准是实现该功能的主要方式. 记录系统运营过程中发生的各种信息, 形成日志文件对系统的持续优化运行至关重要, 针对能源互联网运营, 设计合理的路由器日志文件内容和格式必须得到足够重视.

5 能源路由器设计

5.1 能源路由器架构

Xu 等^[5]以电能为对象给出了如下能源路由器架构: 整个路由器由通信平台、控制器和固态变压器 3 个主要功能模块组成, 通信单元与控制器之间通过 UART 串行链路实现信息传递; 控制模块重点在于实现微网内和微网间的能源配送; 固态变压器在控制器信息的支撑下, 通过电压调节实现各接口间电流的有向流动, 保证电力的供需平衡; 能源路由器之间的协同完全依赖于通信网络, 并开发了专门的通信协议 DNP3.

然而, 当前能源网络, 如电力网络, 为保证系统的可靠性和安全性, 大量管理和保护装置被广泛部署在网络中, 且它们之间采用元件级的通信协议实现协同. 因此, 若能源路由器不能很好地与上述装置实现兼容, 能源网络将面临巨大的安全威胁, 鉴于此, 我们认为兼容保护功能, 拓宽通信模块的支撑功能是可行的解决办法. 一方面, 能源路由器具有能源控制和信息保障功能更易保证能源互联网的运行; 另一方面, 现有能源网络通信功能的逐步扩展 (如电力网络中的 PLC 技术^[20]), 部分实现了信息和能源的传输线路的耦合, 为后续建设提供了便利; 此外, 在能源路由器上扩展用户自定义控制策略的功能可大范围地满足用户的个性化需求. 因此, 我们把能源路由器设计为两层架构, 见图 2, 信息支撑层不但为能源控制层提供信息支持, 还能够与保护等基础部件融合构成能源路由器的特有安保功能; 功能层包括如上节所述的能源控制、优化管理、安全防护和管理维护等.

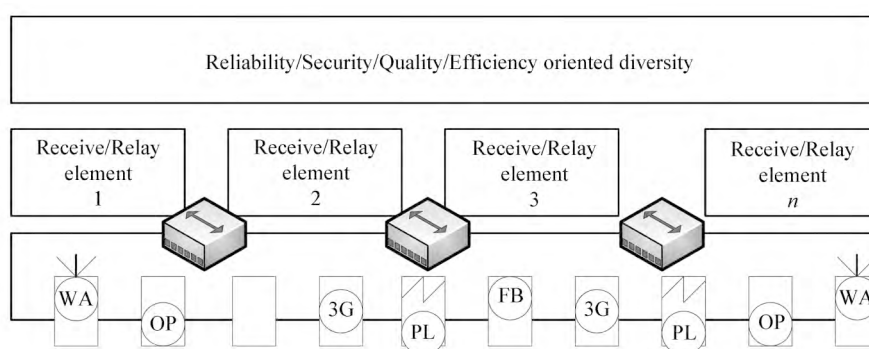


图 3 信息支撑层的异构分集模块设计

Figure 3 Diversity modular in Layer information support

详细地, 用户通过管理界面配置相关功能, 管理员可以设置不同的用户角色, 开放相应使用权限, 在保证安全的情况下方便用户访问. 用户根据能源接口规则, 把各类能源单元连接到能源路由器; 根据业务需求和通信网络接口规则, 连接相应接口. 用户可登录能源路由器完成个性化设置, 如接入控制, 日志管理, 安全设置, 用能策略和监控管理等, 并由智能控制数据中心接收和处理用户需求. 信息支撑层提供各种通信接口和相应协调机制, 不仅包括 Ethernet, Ad Hoc, CCN, SDN 等信息网络接口, 还包括用于远程控制, 安全保护及能源质量控制的专用通信接口, 通信协议兼容和通信方式可靠是该层必须保证的性能. 能源控制层提供能源接入, 能源质量调节, 能源消费优化的功能, 能源接口实现与能源单元连接. 控制功能由综合数据中心和专门业务单元联合实现, 一般采用能源控制器下发控制指令调配能源控制单元的方式. 此外, 考虑到能源路由器工作对电能的依赖, 能源路由器都配备电力能源存储单元, 并支持用户个性化增减. 随着存储空间规模的扩大, 该部件将成为可参与能源控制的组成部分.

5.2 信息通路分集模块

数据获取, 保护和控制指令传递, 能源单元间系统通信都需要通信系统的支持. 高速, 双向, 实时, 集成的通信系统是基本要求. 这里, 我们给出一种包括接口多样化、多模块并行处理、信息优化选择等在内的信息支撑层的分集方案, 如图 3 所示.

整体地, 采用光纤通信可保障通信安全可靠, 电力线通信可减少辅助通信设施的依赖, ZigBee, 3G, Ad Hoc 等可提高通信灵活性. 通过采用分集技术协同各种通信通道, 可提高传输效率, 并保证数据质量. 为兼容目前主要的通信介质, 如光纤、双绞线、电力线及电磁波等, 能源路由器的通信接口应根据需要设置相应接口, 可设置双接口备份保证通信的可靠性. 为保证数据接收的可靠性, 设置多个接收/转发模块来并行工作. 信息数据质量判定与分集模块负责对数据的安全性和可靠性等进行判别, 通过分集技术竭力修复受损数据.

5.3 软件定义的能源控制系统

软件定义网络 (SDN) 通过将控制面与数据面分开, 利用具有网络信息的 Controller 设备实现网络流量的精准控制^[21]. 为更好地支撑能源调度效率, 适应更多用户的定制化需求, 我们设计如下软件定义的能源互联网控制结构, 如图 4 所示.

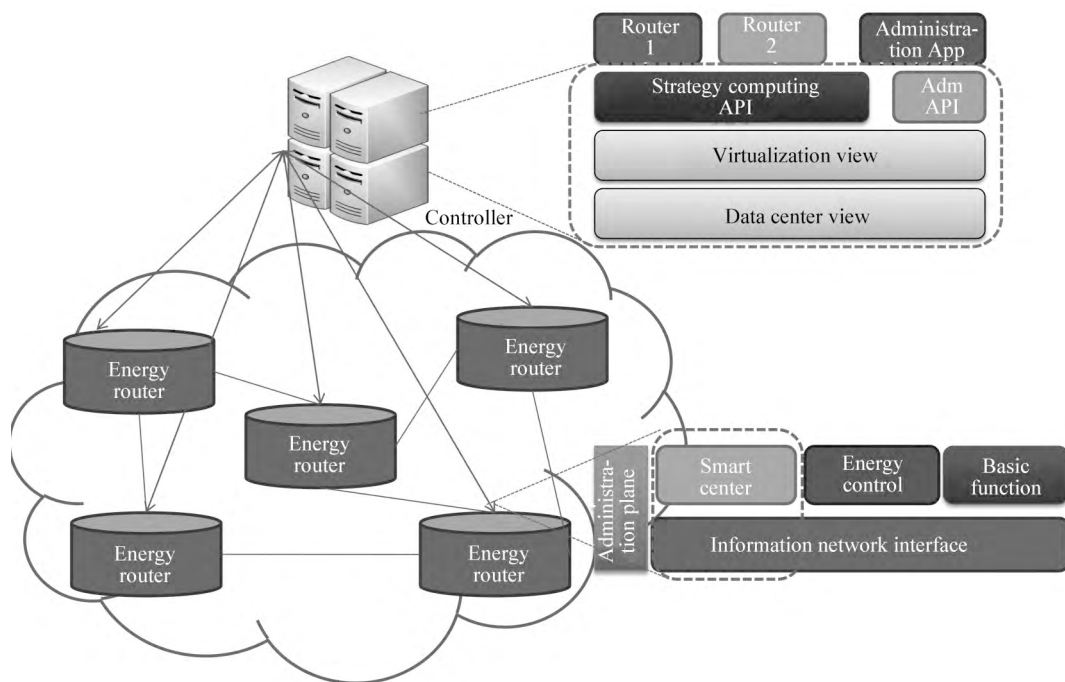


图 4 软件定义的能源控制系统

Figure 4 Software defined energy control system

该结构中的能源路由器不仅可以依靠其智能控制中心的计算和分析, 还可以通过中心控制器得到优化策略. 一般地, 中心控制器针对每一个能源路由器计算最佳实施策略并向相应设备单元发送指令. 能源路由器提交的需求来自于其管理区域内用户, 为方便形成可识别请求, 路由器控制界面提供相应的编程界面. Controller 可以采用云计算架构实现, 如装箱式的移动式数据中心等.

5.4 定制化信息模型

保证用户定制化要求的合理性, 引导用户合理利用能源互联网是该部分的讨论重点. 能源互联网对网络信息的收集和推送可让用户实时明晰当前的能源网络状况, 通过设置能源需求定制模块和优化用能策略模板推荐可以实现用户定制化服务需求. 基于此, 我们得到定制化信息模型, 如图 5.

(1) 能源实时状态通知

能源路由器通过接收网络中监控设备发送的实时信息和数据中心发送的网络状态信息等内容构建实时数据信息库, 根据用户需求周期性通告相关信息. 信息包路由器负载, 当前电价, 用户能源存储空间, 可再生能源 (自给能源) 生产效率等.

(2) 用能策略定制

用能策略定制模板旨在方便用户选择策略指标, 如能源质量指标 (能源费用最小或能源供应可靠性等), 能源生产指标 (储能设备的预留能源水平或能源生产设备的工作时段等). 策略的实施依赖存储管理, 接入管理和用能模型等模块.

(3) 优化用能模板推送

能源互联网利用在信息方面的优势, 结合实时能源供应情况, 可以得到实时最优用能策略. 用户通过修改能源路由器管理控制功能获得相应的推送服务, 并由数据中心根据其需求实时向其推送策略.

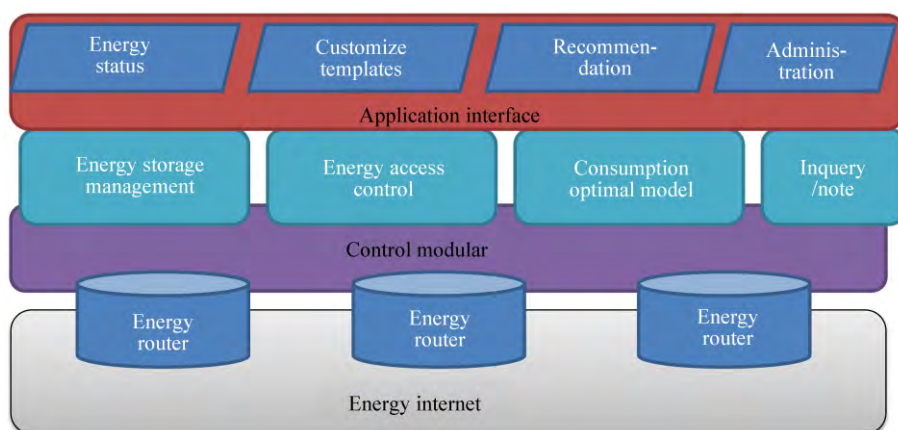


图 5 用户用能定制化信息模型

Figure 5 Information model of customization modular

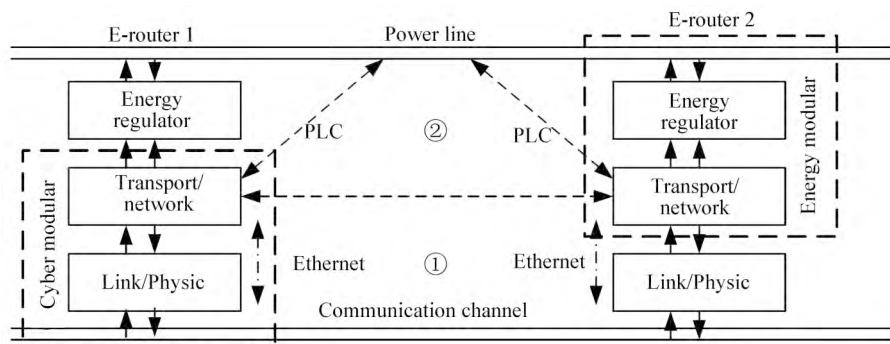


图 6 电力路由器连接方式

Figure 6 Connection between power routers

5.5 电力路由器组网与可扩展业务

以电能为例, 电力路由器需实现信息传递和电能的调配, 其需要通信网和电力网支持, 路由器之间可采用如图 6 所示的方式组网. 其中, 能源控制器件状态调整实现能源传输和分配; 信息网络负责子网状态或需求信息的发送, 及控制指令等信息的接收或转发.

电力路由器可以承担微网与骨干电网间互联功能, 也可以承担微网间的互联功能, 如图 7 所示, 路由器连接骨干电网、负荷、可再生能源电力生产单元、电力存储单元, 以及由其他电力路由器承担连接功能的微网.

此外, 通信设施是电力互联网的重要支撑, 且在电力系统中已具备了相当规模的覆盖和通信带宽 (如现有电力网络有专门的光纤网络), 电力路由器的引入为已有通信资源的高效利用也带来了希望. 通过在能源路由器模块集成相应模块, 可扩展更多智能能源网络应用, 提高资源的利用效率. 可以想象, 在不远的将来, 插上电源插头浏览因特网将变为现实.

6 总结

能源互联网旨在实现更广泛能源的利用与分享, 能源技术、控制技术和信息技术为其提供了良好

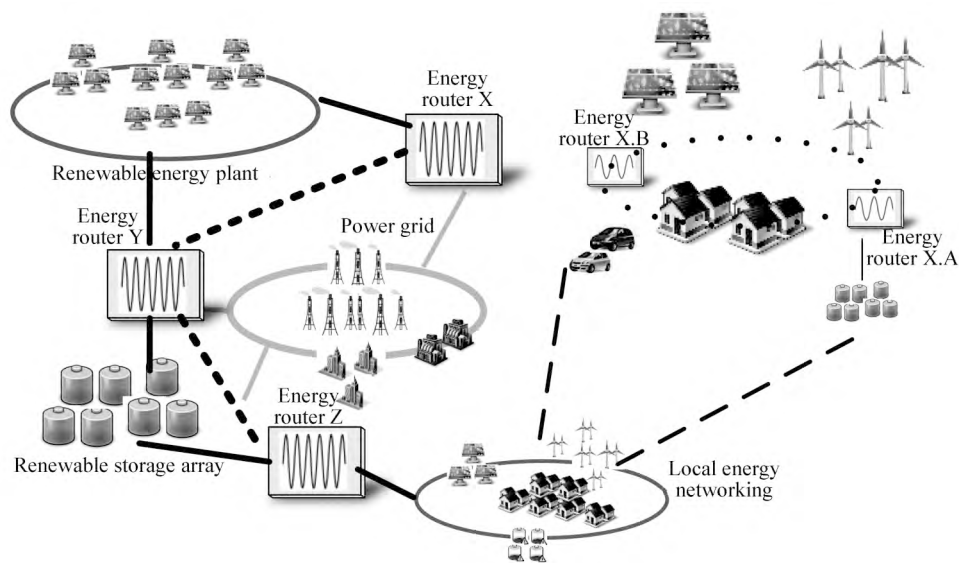


图 7 电力路由器应用示例

Figure 7 An example of energy internet with energy routers

的技术支撑, 在分析 Internet 成功经验的基础上, 我们认为开放、可扩展、可控制连接交换设备的实现是推动能源互联网普及的直接力量, 基于此, 对能源路由器的关键技术进行了深入探讨, 从功能需求和设计实现两方面给出了详细讨论, 并以电力路由器为例给出了一种实现方案. 由于能源互联网是未来能源体系的可行方向, 其实现需要信息技术与能源技术的融合, 其成功运营还需要能源生产、能源调节、能源存储, 以及用能激励策略等多方面支撑, 在诸如运营模式、政策体制、产业化路径、标准协议、安全监管、经济性分析等方面仍需深入研究. 在此, 我们以电力互联网为例, 仅列举若干亟需突破的方向: 与能源电力基础设施相结合的数据中心设计与实现; 柔性直流输电和直流配电等技术在能源互联网能量路由和传输中的应用; 适合于能源路由器场景的储能系统实现与优化技术; 提高电力电子控制装置效率和可靠性等方面的问题; 基于分散协同路由模式的能源管理系统 (energy management systems, EMS) 设计与实现等等.

参考文献

- 1 Keshav S, Rosenberg C. How internet concepts and technologies can help green and smarten the electrical grid. ACM SIGCOMM Comput Commun Rev, 2011, 41: 109–114
- 2 Rifkin J. The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World. New York: Palgrave Macmillan, 2011
- 3 Liu Z Y. China Electricity and Power. Beijing: China Electric Power Press, 2012 [刘振亚. 中国电力与能源. 中国电力出版社, 北京, 2012]
- 4 Flood J, Lucero S. Overview: the evolution of smart grid 1.0 to 2.0. ABI Res, 2011: 1–9
- 5 Xu Y, Zhang J, Wang W, et al. Energy router: architectures and functionalities toward energy internet. In: Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Brussels, 2011. 31–36
- 6 Lin C, Hu J, Kong X Z. Survey on models and evaluation of quality of experience. Chinese J Comput, 2012, 35: 1–15 [林闯, 胡杰, 孔祥震. 用户体验质量 (QoE) 的模型与评价方法综述. 计算机学报, 2012, 35: 1–15]
- 7 Lin C, Jia Z X, Meng K. Research on adaptive future internet architecture. Chinese J Comput, 2012, 35: 1077–1093 [林闯, 贾子晓, 孟坤. 自适应的未来网络体系架构. 计算机学报, 2012, 35: 1077–1093]

- 8 Xie G G, Zhang Y J, Li Z Y, et al. A survey on future internet architecture. *Chinese J Comput*, 2012, 35: 1109–1119 [谢高岗, 张玉军, 李振宇, 等. 未来互联网体系结构研究综述. *计算机学报*, 2012, 35: 1109–1119]
- 9 Von Dollen D. Report to NIST on the smart grid interoperability standards road map. *Elec Power Res Inst*, 2009
- 10 Liu Z Y. *Smart Grid Techniques*. Beijing: China Electric Power Press, 2010 [刘振亚. 智能电网技术, 中国电力出版社, 北京, 2010]
- 11 Deng X M. *Digital Power Grid Plan in Japan*. World Science, 2013 [邓雪梅. 日本数字电网计划. 世界科学, 2013]
- 12 Xie L, Ilic M D. Module-based modeling of cyber-physical power systems. In: *Proceedings of the Distributed Computing Systems Workshops*, Beijing, 2008. 513–518
- 13 Li G, Du C L, Song C Y, et al. Cyber-physical aware model based on IEC 61850 for advanced power grid. In: *Proceedings of the Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Chengdu, 2010. 1–5
- 14 Zhao J H, Wen F S, Xue Y S, et al. Cyber physical power systems: architecture, implementation techniques and challenges. *Automat Elec Power Syst*, 2010, 34: 1–7 [赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电力 CPS 的架构及其实现技术与挑战. *电力系统自动化*, 2010, 34: 1–7]
- 15 Zhao J H, Wen F S, Xue Y S, et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power system. *Automat Elec Power Syst*, 2011, 35: 1–8 [赵俊文, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架. *电力系统自动化*, 2011, 35: 1–8]
- 16 Liu H Y, Mou L H. Architecture of microgrid CPS and reasearch of its physical side. *Elec Power Automat Equip*, 2012, 32: 34–37 [刘汉宇, 牟龙华. 微电网 CPS 体系框架及其物理端研究. *电力自动化设备*, 2012, 32: 34–37]
- 17 Katz R H, Culler D E, Sanders S, et al. An information-centric energy infrastructure: the Berkeley view. *Sustain Comput Inform Syst*, 2011, 1: 7–22
- 18 Cao J W, Wan Y X, Tu G Y, et al. Information system architecture for smart grid. *Chinese J Comput*, 2013, 36: 143–167 [曹军威, 万宇鑫, 涂国煜, 等. 智能电网信息系统体系结构研究. *计算机学报*, 2013, 36: 143–167]
- 19 Cao J W, Hwang K, Li K, et al. Optimal multiserver configuration for profit maximization in cloud computing. *IEEE Trans Parall Distr*, 2013, 24: 1087–1096
- 20 Galli S, Scaglione A, Wang Z. For the grid and through the grid: the role of power line communications in the smart grid. *P IEEE*, 2011, 99: 998–1027
- 21 Chen Z, Cao J W. *Information Center Networks*. Beijing: Tsinghua University Press, 2013 [陈震, 曹军威. 信息中心网络. 北京: 清华大学出版社, 2013]

An energy internet and energy routers

CAO JunWei^{1,3}, MENG Kun^{2*}, WANG JiYe⁴, YANG MingBo¹, CHEN Zhen^{1,3}, LI WenZhuo² & LIN Chuang^{2,3}

1 *Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2 *Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

3 *Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Beijing 100084, China;*

4 *Department of Information and Communication, State Grid, Beijing 100031, China*

*E-mail: mengkurt@tsinghua.edu.cn

Abstract The increasing energy demand seriously challenged the current energy system, carbon emission limitation required to change traditional energy production forms, therefore renewable and green energy resources shall play the most important role for the coming energy supply system. The development and mature of electric transmission and storage, information communication and high performance computing have provided solid foundation of efficiently applying distributed and intermittent renewable resources. For the imagination of energy internet, we study an energy routers based scheme to construct an energy internet. Moreover, we discuss comprehensively all kinds of key technologies including the object of designing energy routers, possible deployment

schemes and existing related techniques. In the end, we point several research aspects which need urgently to make breakthrough based on our current results.

Keywords energy internet, energy router, renewable energy, distributed energy, micro grid



CAO JunWei was born in 1973. He received Ph.D. degree in computer science from the University of Warwick, Coventry, UK, in 2001. He is currently Professor and Deputy Director of Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing. He is also Director of Open Platform and Technology Division, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology. He has published

over 150 papers and cited by international scholars for over 6000 times. He has authored or edited 6 books. His research is focused on distributed computing technologies and applications. Prof. Cao is a Senior Member of the IEEE Computer Society and a Member of the ACM and CCF.



WANG JiYe was born in 1964. He received Ph.D. degree in electrical engineering from Tsinghua University, Beijing. Currently, he is a professor-level senior engineer, deputy director of SGCC Information and Communication department. His research interests include information management of power systems, smart grid and the next generation energy system.



MENG Kun was born in 1980. He received Ph.D. degree in communication and information system from University of Science and Technology Beijing, Beijing, in 2002. Currently, he is a Postdoctor Fellow of the Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University. His research interests include energy internet, wireless networking, performance evaluation, network security and stochastic

models. Dr. Meng is a member of CCF and ACM.



LIN Chuang was born in 1948. He received Ph.D. degree in computer science from Tsinghua University, Beijing, in 1994. Currently, he is a professor of the Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University. His research interests include computer networks, performance evaluation, network security analysis, and Petri net theory and its applications. Prof. Lin is a member of CCF, IEEE and ACM,

as well as a steering committee member of International Petri nets group, and the fellow of CCF.