

Research
Smart Grid and Energy Internet—Article

像互联网一样智能的电网

刘艳丽^{a,*}, 余贻鑫^a, 高宁^a, 吴复立^{b,c,*}^a School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China^b Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China^c Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, CA 94720, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 July 2019

Revised 12 October 2019

Accepted 4 November 2019

Available online 25 June 2020

关键词

分布式智能

电网

互联网

可再生能源

摘要

随着电力系统的去碳化和各部门的广泛电气化, 电气新时代即将到来。为了充分发挥可再生能源的潜力, 适应技术创新, 培育新兴的产消者以及实现对纳米电网(nano-grid)、迷你电网(mini-grid)和微电网(micro-grid)的无缝衔接, 电网需要像互联网一样智能。互联网建立在能够促进技术创新的分层架构上, 它的智能分布在网络的各个层级上。本文分析了数据流和潮流之间的根本区别。当前电网的运营模式是由集中式电网运营商负责维持电网瞬时功率的平衡。新型分布式运营模式由各子电网共同承担维持瞬时功率平衡的责任并要求每个子电网维持其自身的功率平衡。基于这种新型运营模式, 本文提出了一种像互联网一样智能的电网及其分层的网络结构和运营架构。

© 2020 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

化石燃料的燃烧会产生大量温室气体, 从而导致全球气候变化。大气中温室气体(主要成分是二氧化碳)的浓度已经达到100万年来的最高水平。地球温度相比工业化前已经上升了1℃。然而大气中的温室气体总量仍然呈现有增无减的趋势, 从而不断加剧全球气候变暖的危机。2015年, 世界各国的领导人在巴黎气候变化大会上达成共识, 即人类行为所导致的气候变暖将威胁全人类的生存, 因此全世界应当共同采取行动来大幅降低温室气体的排放水平, 从而实现在21世纪末将全球温度上升控制在2℃之内的目标, 同时积极探寻将温度上升控制在1.5℃内的解决方案。近期, 国际知名的气候学

家提醒我们[1]: 1.5℃和2℃之间相差的0.5℃将会增加干旱、洪水、极端高温天气和数百万人口贫困化等灾难的风险。因此, 人类必须在2030年以前共同采取紧急行动将气温上升控制在1.5℃以内, 否则后果将不堪设想。我们每个人都应尽其所能, 立即采取措施以应对全球气候变化, 从而拯救人类和造福子孙。

经济发展伴随更多能源消耗, 而生活水平的提高也会增加对能源的需求。目前世界上大部分人口仍然生活在发展中国家, 人均能耗非常低。而在未来的10年左右, 数十亿人(其中很大一部分在亚洲)将脱贫或从低收入水平上升至中等收入水平, 因此全球能源需求将会随之上升。联合国在其可持续发展目标中已明确指出, 消除贫困和促进经济增长必须与应对气候变化和环境保

* Corresponding author.

E-mail address: yanliliu@tju.edu.cn (Y. Liu), ffwu@eee.hku.hk (F. Wu).

护携手共进。简言之，世界将需要更多的能源，但需要更少的碳。

从化石燃料转向可再生能源和其他非化石能源来实现电力的去碳化，以及加深其他经济部门的电气化程度，是实现可持续发展的有效途径[2,3]。然而，新型可再生能源并网将会从根本上改变电力系统的特性。风光发电的最佳选址是环境条件（如风速、太阳辐射）良好的地区。风光发电不具有规模经济效益，因此主要以分布式的方式部署，并且可以在用户侧安装使用。这些根本性的变化使新一代电网的特性越来越像互联网，即能量可以像信息一样在整个网络中随时随地产生和共享。新一代电网与互联网之间显著的相似性启发人们展望未来电网的新场景，即在未来的电网中，数以亿计的人们在家里、办公室和工厂中利用可再生能源生产自己的能源，并储存在本地的电池中，然后通过电网与他人共享[4]。互联网是智能的，那么电网会像互联网一样智能从而促进能源的广泛共享吗？

本文将主要回答以下问题：

- 为什么我们需要像互联网一样智能的电网？
- 互联网智能的原因是什么？
- 为何以往对电网进行互联网化改造的尝试均未成功？
- 我们如何让电网像互联网一样智能？

2. 未来是电气时代

一个崭新的电力时代即将到来！利用可再生能源逐步实现电力的去碳化，为人类提供更多的能源和更少的碳，使电力行业成为减排的先锋。进一步加深其他经济部门的电气化程度将成为应对全球气候变化的捷径。

政府部门的政策和技术进步极大地降低了可再生能源的成本。根据2017年的数据，已有179个国家制定了可再生能源的目标，57个国家制定了100%可再生能源发电的目标[5]。在2019年联合国气候行动峰会上，77个国家和100多个城市承诺到2050年实现零碳排放的目标。包括印度、中国和美国在内的其他国家有望在短期内采取行动。中国是世界上最大的碳排放国，正在努力实现到2030年非化石能源占比至少达到20%的目标。美国是第二大碳排放国，尽管在特朗普政府的领导下退出了《巴黎协定》，但许多州和私营企业仍在积极努力实现《巴黎协定》的目标。例如，加利福尼亚州在2018年签署了一项法案，要求到2030年该州60%的电力由可再

生能源供应，同时呼吁到2045年实现100%的零碳发电。纽约州正在推动提前5年达到100%零碳排放的目标。旨在鼓励可再生能源开发和利用的各种政府政策激励了相关领域密集的研发、技术革新和企业创业。由此带来的技术进步、规模经济效应和日益自动化的生产流程将推动可再生能源的成本大幅下降。

风能是目前最廉价的电力来源之一，而且成本越来越低[6]。材料研究的进步使太阳能电池板的成本大幅下降——从1977年每瓦77美元下降到2017年每瓦0.64美元，40年来下降了99%以上[7]。2010—2017年，美国民用太阳能发电的平均安装成本下降了60%，而公用事业规模的太阳能发电的平均安装成本则下降了77%[8]。可再生能源的成本预计将持续下降。2017年，包括发达国家和发展中国家在内的全球新增发电量中，可再生能源发电占2/3，而其中中国的可再生能源发电就占了一半[9]。可再生能源有望在2040年发展成为世界主要电力来源[10]。

目前，世界总能源消耗中约有1/5来自电力，重要的非电力部门（如交通、建筑和制造业）消耗的能源中有3/4以上来自化石燃料。电力供应的去碳化而非电力部门的电气化有可能显著减少化石燃料的消耗和碳排放量[2,3]。交通部门在短期内最有机会实现电气化。虽然目前电动汽车的市场份额仍然很低，但在过去的几年中，电动汽车发展迅速，目前全球已有300多万辆电动汽车。在2017年，仅中国就增加了50万辆电动汽车，比2016年增长了72%，此外，中国还新增了37万辆电动公交车和2.5亿辆电动自行车。预计低成本的自动驾驶（无人驾驶）车辆共享出行服务的兴起将主要基于电动汽车。据国际能源署（International Energy Agency, IEA）预测，到2030年，全球电动汽车的数量将达到1.25亿辆，甚至高达2.2亿辆。建筑物在某种程度上已经实现了电气化，而工业部门是除发电部门外最大的化石燃料消耗部门，由于其用户的多样性，实现电气化相对更困难。与可再生能源发电和电动汽车的情况一样，积极的政府政策、技术创新和企业创业是进一步降低这些部门电气化成本的关键。

传统的化石燃料发电是可控的，以供应电网中波动的负荷需求。然而，依赖于风能和太阳辐射的可变可再生能源（variable renewable energy, VRE）具有间歇性、可变性和随机性的特点。VRE的大量接入正在改变现有电网的格局。近年来，为了平抑可再生能源的波动和维持电网瞬时功率平衡，电池储能、飞轮储能、压缩空气

储能、热储能和氢储能等多种新型储能系统迅猛发展。其中，电动汽车对电池的需求促进了技术创新和市场扩张，从而推动了电池技术的巨大进步。2010—2016年，电池成本降幅超过1/4 [12]。电池既可以部署在网侧，也可以部署在用户侧。一方面，安装在电表前的大规模电池既可以帮助电网运营商维持电网功率平衡，也可以有其他各种用途。另一方面，安装在电表后的本地太阳能电池板和电池可能会使用户“背叛电网”（grid defection），从而降低电网运营商的控制能力。从电网的角度来看，电池储能与可再生能源发电相结合是传统化石燃料发电的弱替代品[13]。为了适应快速增长的VRE水平，仅储能系统在技术和经济上就需要满足极高的规模和质量要求。

另一种应对可再生能源发电波动性的方法是将负荷平移到其他供电更充足的时段，如阳光和风力充足的时段。可以将这种需求响应看作是一个虚拟的储能系统。数字连接有助于持续监测及控制电器和设备（如智能家电、智能恒温器、楼宇能量管理系统、智能工业锅炉等），以调整需求使其与可用供应最佳匹配。更高的自动化程度、物联网（Internet-of-Things, IoT）设备在居民和商业领域的普及、电动汽车和智能充电系统的强化部署，都将增强需求响应能力。预计到2040年，20%的电力消耗有望在技术上实现需求响应[14]。

自爱迪生点亮纽约千家万户之后的100多年来，电网每天都在为越来越多的人（目前为60亿人）供电，让他们享受到经济利益和机遇。然而，目前仍然有10亿人面临缺电的情况，他们中的大多数人都非常贫穷，并且住在偏远的乡村里。面对高昂的并网费用，他们的政府也无能为力。在过去的10年中，新技术的涌现和私营企业的兴起从根本上降低了向偏远农村居民供应能源的成本，使贫困和偏远地区的人们能够以更快的速度和前所未有的低成本使用电力。如上文所述，太阳能电池板和电池成本的大幅下降促进了用户或社区发展本地化的发电和储能技术。其他技术发展趋势迅猛，如更节能的家用电器（如LED照明和移动电话）、用于远程监测和服务的IoT以及移动支付，这使企业能够提供可行的能源服务，例如，通过即付即用（pay-as-you-go, PAYG）的商业模式销售从几瓦到几百瓦的发电/储能组件。越来越多的企业正在积极尝试各种商业模式，帮助推动以可再生能源为基础的迷你电网行业走向成熟。仅印度在2016—2017年就安装了200多个迷你电网。通过部署离网太阳能系统或基于可再生能源的迷你电网，分布式可

再生能源供应系统正在为全球3.6亿多人供电[5,15]。

发展中国家对电力供应的需求和发达国家为实现减排而进一步电气化的需求可能会导致到2040年全球电力增长高达60%~90% [3]。电力能源系统正在切身经历自诞生一个多世纪以来的最大变革。主要的变革包括：

（1）VRE份额不断增加。电网去碳化越成功，电气化程度就会越高，从而更大程度降低全球的碳排放量。电网的运行必须适应持续增加的VRE份额，并不断提高VRE的利用率。

（2）产消者的兴起。目前，居民用户拥有全球近1/3的太阳能光伏容量。电池储能同样如此。这种持续性的发展趋势将会带来两个方面的影响：首先，成千上万甚至上百万的小型发电资源将会广泛分布在整个系统中；其次，电网的用户将同时充当生产者和消费者的角色，即成为产消者。

（3）智能的电网外围。在数字时代，数据、分析和连通性对于电网外围（即配电系统及其他地区）的产消者非常重要，这使他们能够智能地调度、管理和控制自己的VRE、电池储能系统、电动汽车充电和各种需求响应系统等。电网运营商不再是唯一具有控制能力和智能的角色。

（4）纳米、迷你和微电网的普及。在很大程度上实现自给自足的微电网已经成为一种发展趋势[16]。基于可再生能源的迷你电网和离网纳米电网（其中包括太阳能发电和电池）正在发展中国家迅速发展。与此同时，在发达国家，越来越多的拥有太阳能和电池储能系统的产消者“背叛电网”，从而威胁着电力公司的生存，这种现象被称为“公用事业的死亡螺旋”（utility death spiral）。

（5）技术创新步伐加快。近年来，太阳能光伏和电池技术的迅猛发展给传统电网的运营带来了巨大压力。在未来的某个时间点，将会涌现出更多的创新技术，其中一些将具有颠覆性。电网的运营必须充分、及时地利用现有的创新成果。

电网的物理结构和特性正在发生显著变化，尤其在电网外围[17]。但是电网的运营模式仍然没有改变。目前用于电网运行的运行规则、控制架构和基本工具都是在20世纪中期最后一次电网扩张期间发展起来的。虽然第一代数字计算机的出现增强了控制中心的智能，但要求原来的运营模式完全适应具有不同特性的新一代电网似乎难度较高。

到目前为止，电网应对这些新变革的效果如何？首

先让我们看看它如何处理VRE的并网问题。2016年,中国作为世界上VRE装机容量最大的国家,其太阳能和风能装机容量所占比例(13.7%)远远高于其发电量(5.3%)。VRE装机容量排在第二位的美国的情况稍好一些(装机容量占10.7%,发电量占6.9%)[18]。这些数据表明,VRE资产(即装机容量)的利用率(即发电量)低于目前电网的平均水平(电网主要由常规机组和调峰机组构成)。表1数据[19]显示,全球风电利用的容量系数(即如果全天可用,其实际发电量占所能发电总量的百分比)还比较低,并没有随着装机容量的增加而提高。

众所周知,在电网运行过程中,常常需要通过削减VRE资源的发电量以满足电网的运行约束[20–22]。削减率是指能源削减量占所产生的能源总量的百分比。例如,弃风率可能达到10%或更高,这意味着每年浪费数十太瓦小时的能源。这些运行约束是由传统的电网运营模式造成的,即使在传输容量充足的情况下也难以避免。电网的建设本来是为了方便将能源从发电侧传输到用户侧。在VRE的时代,电网不再是一个推动者,而成为了一个阻碍者。

电网被认为是20世纪最伟大的发明,而互联网是21世纪最伟大的发明。互联网是智能的,能很容易适应快速变化的具有颠覆性的信息变革。电力新时代需要一个像互联网一样智能的电网!这样的电网应该能够充分发挥可再生能源的潜力,适应技术创新、促进产消者的兴起并整合纳米电网、迷你电网和微电网。

3. 互联网

对于电网和互联网的用户而言,这两种网络都是泛在的(即随时随地可用)和异构的(即传输任何形式的能量/数据)。但互联网更加智能,原因在于其实现智能的方式。

3.1. 分布式智能

无论是文本、语音或视频,任何形式的数据都可以通过互联网进行传输,它们仅依赖于本地节点的传输端

表1 风电容量和容量系数

Country/region	Wind capacity (GW)	Capacity factor (%)
United States	82.2	32.0
European Union	153.0	22.5
China	168.7	16.5

来处理 and 完成任务,无需中央控制和协调设施。互联网的智能分布在整个网络中,各个节点共同承担确保数据传输成功以及数据完整性、可靠性和身份验证的责任。分布式智能和分散式控制使互联网具有抗干扰和中断的能力。通过对网络结构和操作协议的分层架构进行设计,复杂的系统可以实现完美而高效的运行[23,24]。

3.2. 互联网结构——子网的层次结构

为了理解互联网的结构,让我们举一个简单的例子。天津用户A想向美国旧金山用户B发送一封电子邮件(图1)。用户A的计算机连接在一个局域网(local area network, LAN)上,由中国的本地互联网服务提供商(internet service provider, ISP)为其提供电子邮件服务(图2)。这封电子邮件可能需要经过ISP骨干网络中的几个中间节点(如从本地ISP到区域ISP)才能到达全球互联网中一个管辖范围较大的国际网络的网络服务提供商(network service provider, NSP),而用户B也是如此。但是,用户A和用户B的ISP可能不在同一个NSP网络中,因此,电子邮件将通过两个NSP骨干网络之间的网络接入点(network access point, NAP)进行交换。传送这封电子邮件所经过的点到点路径如下:从天津用户A的计算机经过LAN、ISP(可能有更多中间节点)、NSP(或多个中间节点)、NAP、另一个NSP(或多个中间节点)、另一个ISP(或多个中间节点)、另一个LAN,最后到旧金山用户B的计算机上。互联网是由分层结构的(子)网络组成的,最顶层是全球互联网,中间层包括NSP骨干网、ISP骨干网等,最底层是LAN或用户。

3.3. 路由器

电子邮件在互联网中通过多个路由器进行路由。路由器通常用于连接不同的网络,一个ISP和NSP可能有多个路由器作为其骨干网络的一部分。因此,互联网在逻辑上是一种按层次结构排列的路由器网络。路由器是一种专门指导数据传输的计算机。每个路由器能够掌握

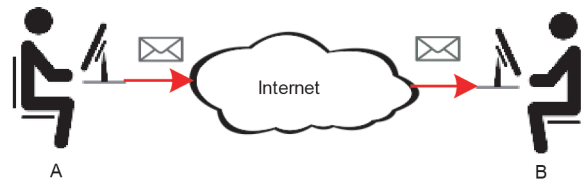


图1. 利用互联网发送电子邮件的案例。

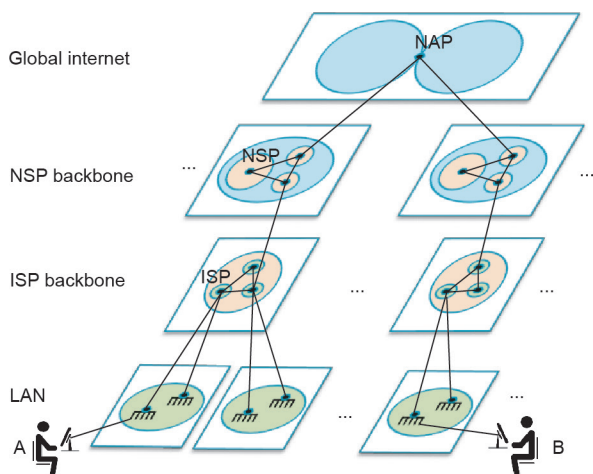


图2. 互联网的基本结构。

其自身网络和它下层所有子网的信息。当电子邮件到达一个路由器时，它会提取收件人的地址，并根据一个简单的规则将电子邮件发送到下一个正确的路由器，如果收件人地址在自己的子网中，电子邮件将被发送到子网路由器，否则，电子邮件将被发送到默认路由器，该路由器通常是层级结构中的上一层，该层具有范围更广的子网集合。

由于每个路由器都与它所属的和它所负责的子网相连接，因此基于子网概念描述数据传输的路径为我们提供了另一个视角，这也将有利于对第4节和第5节内容的理解。用户A的计算机连接在LAN的路由器上。当它通过一个ISP路由器连接到互联网时，它就成为ISP网络的一部分，以此类推。因此，与其将电子邮件的传输路径描述为在互联网上从一个节点传到另一个节点（即从路由器到路由器），不如将其看成从一个子网传到另一个子网。电子邮件从天津的一个LAN，到包含LAN的中国ISP网络，到包含ISP的NSP网络，到全球互联网中的NAP，到另一个NSP网络，再到美国的另一个ISP网络，最后到旧金山的LAN。电子邮件在子网层级结构中的上下传递路径取决于用户的位置及其所属的子网。

3.4. 互联网分层架构体系

用户A发给用户B的电子邮件必须从文本信息转换为电信号，通过互联网进行路由，然后再转换回文本信息。路由器之间交换的信息会受到通信协议规范中规则和约定的限制。在现代设计中，协议通过分层设计形成协议栈。分层是一种设计原则，它将设计任务拆分为更小的步骤，每个步骤完成一个特定的子任务，并且仅以少量明确定义的方式与其他子任务进行交互。它允许将

单个复杂的任务分解为更简单、清晰和相互协作的子任务。分层也是一种功能分解，每一层分别解决不同类型的通信问题。

国际标准化组织定义了7层网络协议，称为开放系统互联（Open System Interconnection, OSI）参考模型，该模型也可简化为4层模型，如图3所示。简化模型类似于互联网上使用的协议栈，即传输控制协议/网际协议（Transmission Control Protocol/ Internet Protocol, TCP/IP）栈，下面简要介绍这4层模型的功能。

- **应用层。**用户与应用层交互。其中，互联网的应用不仅包括简单邮件传输协议（Simple Mail Transfer Protocol, SMTP），还包括超文本传输协议（Hypertext Transfer Protocol, HTTP）和文件传输协议（File Transfer Protocol, FTP）等应用。应用程序将消息传递到传输层进行传输。

- **传输层。**一条消息通常被分成更小的数据包，这些数据包与目标地址一起单独发送。传输层能确保数据包按顺序且准确无误地到达。

- **网络层。**网络层处理主机之间的通信。数据包被封装在数据报中，基于路由算法确定该数据报是直接发送还是发送到一个路由器上。

- **物理层。**物理层负责将包含文本信息的数据包转换为电信号并通过通信信道进行传输。

消息（在本例中指电子邮件）从发送者的计算机的

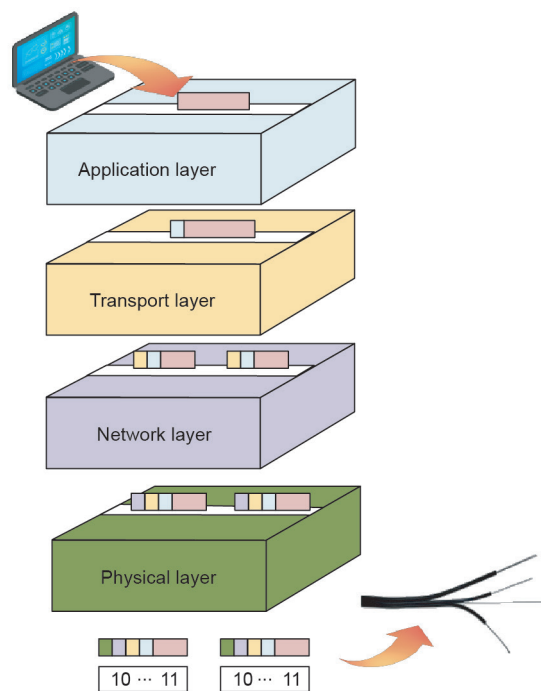


图3. 传输控制协议/网际协议（TCP/IP）栈。

协议栈顶层开始向下传递(图3)。上一层利用下一层中可用的功能,并指示下一层执行任务。将上一层的指令编码为标头并添加到消息的前端,每一层都在向下传递过程中添加一个标头。接收端的处理流程与发送端的流程正好相反,每一层从消息的标头中读取并翻译指令,并在从消息中删掉用于指示本层的标头之后向上/向下传递消息。图4展示了电子邮件在具有两个中间路由器的协议栈中上下传递的路径。在这个例子中,假设路由器D是ISP的主服务器,并执行存储和转发功能。

互联网之所以是智能的,原因在于分层架构明确了分工以及分布式控制实现了责任共享。从A到B发送消息的责任由传输路径上的多个路由器共同承担。每个路由器的智能在于完成简单且具体的任务,即正确地将消息转发给下一个接收方。分层架构体系中的功能分解可以通过利用和配置已有的底层功能来实现添加新的应用程序或功能,从而有利于创新。分布式控制和分层架构体系也使互联网能够抗干扰并且适应技术进步。

4. 数据流与潮流

以往对电网进行互联网化改造的尝试主要集中于实

现互联网中路由器的功能,即作为“交换机”(switch)将传入的数据包传递到下一个路由器[25-28]。随着现代电力电子技术的发展,已提出一种“能量路由器”(energy router),用于引导或限制从微电网或产消者到电网的潮流[26]。另一种“能量路由器”基于交流/直流/交流(AC/DC/AC)变换器调节潮流[27,28],利用电力电子电路更好地控制设备中直流环节中的潮流,本质上将交流电网划分为许多交流-直流-交流混合子电网。这些尝试都是值得肯定的且有助于推动电力系统技术的进步;然而,这些尝试并没有使电网互联网化。我们将分析使互联网中数据流和电网中潮流不同的基本物理原理。

4.1. 数据流

语音、视频和其他数据信号通常会叠加在适用于指定介质中进行传输的载波上[29]。通信网络中的物理介质是信号传播或数据流通过的传输路径。通常采用许多不同类型的有线或无线通信媒体,包括电话线、电缆、光纤、微波和无线电等。高频正弦波通常被用作载波,但针对不同应用场景,它既可以是直流形式的,也可以是脉冲链形式的。在现代无线电通信中,如正交频分复用(orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM)

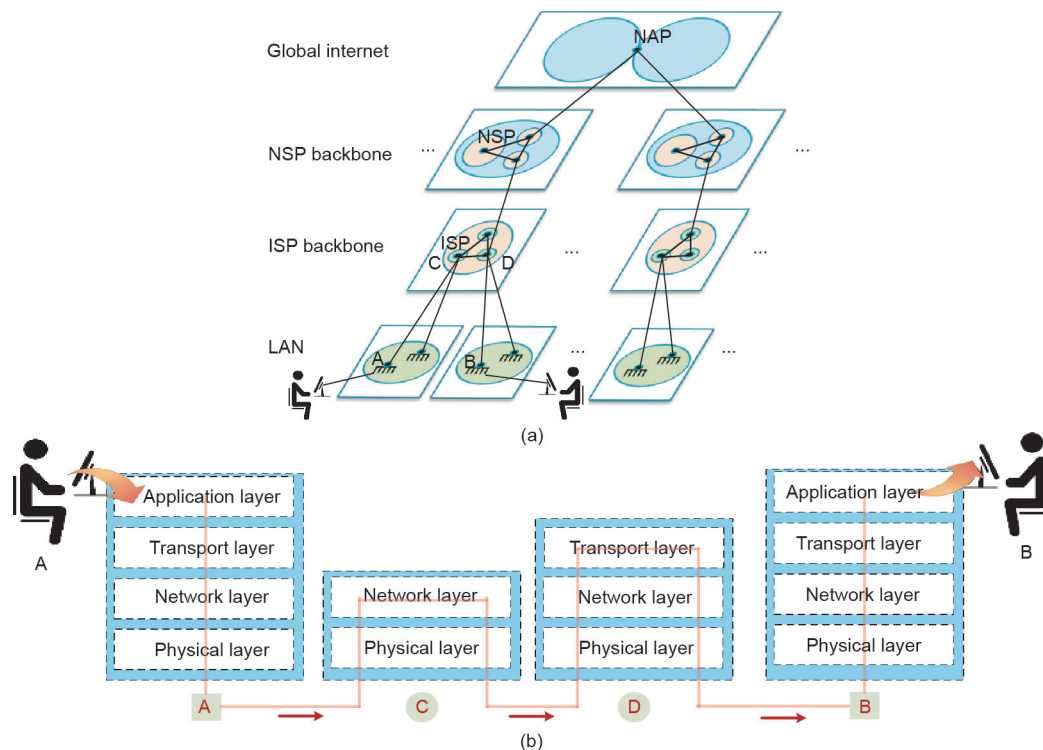


图4. 案例分析——数据流分别在网络结构(a)和协议栈(b)中的路径。

或码分多址 (code-division multiple access, CDMA), 通常使用多个不同频率的载波进行通信。无论是电磁波、光波还是无线电波, 载波都涉及电子或光子的物理运动。为携带来自发射机的信号而进行的载波处理过程被称为调制。在接收端, 信号通过解调得以恢复。调制对于长距离传输信号至关重要, 因为低频信号无法远距离发送。我们可以将通信中的调制波理解为数据流被叠加到载波的电子流或光子流中。

大容量通信介质可以被分成不同的段 (即带宽) 用于非重叠的调制载波, 带宽可租给不同的公司供其独立使用。此外, 通常在公共介质中将多个信号组合为一个信号进行传输, 该过程即为多路复用。多路复用通过频分、时分或其他方式将通信信道进一步划分为多个逻辑信道, 并将每个信道分配给不同且独立的数据流。多个发射机和接收机可以共享一个公共介质, 从而在通信中形成多路访问信道。

总之, 电子或光子流携带数据流在通信介质中传输, 而且可以在通信网络中从一个节点流到另一个节点 (或者从一个子网流到另一个子网)。以图4为例, A中生成的数据通过中间路由器发送到B, 即从A到C, C到D, 最后从D到B。

4.2. 潮流

在潮流中, 功率直接由电子携带[30]。更大的功率意味着移动更多电子。功率的流动必须服从物理定律, 即基尔霍夫定律和欧姆定律。这些物理定律可概括为: 要求在电网中必须随时随地维持功率的平衡。若电网中某一时刻的用电量出现增加或减少, 则必须在电网某处同时出现发电量的增加或减少。功率在电网中的分布是功率平衡的物理规律所决定的。任何电力供需的变化都将导致互联电网中潮流的重新分配。从技术角度来看, 电力系统专业的入门课程会介绍电网中的潮流在数学上是通过求解潮流方程所得到的, 潮流方程是对电网中每个节点必须维持有功和无功功率平衡的数学描述。潮流方程是由欧姆定律和基尔霍夫电流、电压定律推导出来的。

在如今的交流电力系统中, 功率包括有功功率和无功功率。有功功率是产生或消耗功率的平均值; 无功功率与电压相关, 即要维持期望的电压水平, 必须有充足的无功功率。此外, 在电网运行期间, 必须同时维持稳态和暂态的功率平衡。电网上功率的突变 (即扰动) 将导致系统的状态转移至一个新的功率平衡状态。在暂态

过程中, 任何过载保护装置都不应引发电网运行的进一步中断 (如停电)。电力系统稳定性是指电网在发生扰动后始终维持功率平衡且不会引起过载或其他异常运行状态的能力。在下面的讨论中, 为简洁起见, 功率泛指有功功率和无功功率, 功率平衡泛指稳态和暂态的功率平衡。

由于电网上的功率必须处处平衡, 所以对于任何一个子电网或电网区域, 所有子电网边界线路上流入和流出功率叠加得到的净功率必须平衡。相反, 如果任何子电网能维持净功率平衡, 且所有子电网的集合覆盖整个电网, 则整个电网将实现功率平衡。

潮流不能像互联网中的数据流, 可以控制从一个节点流到另外一个节点。尽管如此, 从逻辑上可以基于子电网追踪从发电到负荷的潮流, 就像第3.2节中基于子网追踪数据流。例如, 假设A将电力出售给B, 其中A和B在同一个配电变电站下, 如图5所示。由A出售给B的多余功率代表功率平衡的变化, 这将影响与A和B均相连的电网区域 (即配电变电站下的子电网) 的潮流。分别将A和B所属的子电网定义为A和B, 它们都是配电变电站D的子电网, 再定义另一个子电网C (参见第5.2节), 试图找出所有受功率平衡变化影响的子电网。由于 (子电网) A 必须维持净功率平衡, 因此来自A的多余功率必须输出到C (在本例中, C是包含A的馈线的子电网)。类似地, 为了使C维持净功率平衡, 必须将输入到C的多余功率输出到D。D可以维持其功率平衡, 因为C和B都在D内, 且B能消耗来自C的多余功率。当然, 所有这些潮流变化都是同时且瞬间发生的。

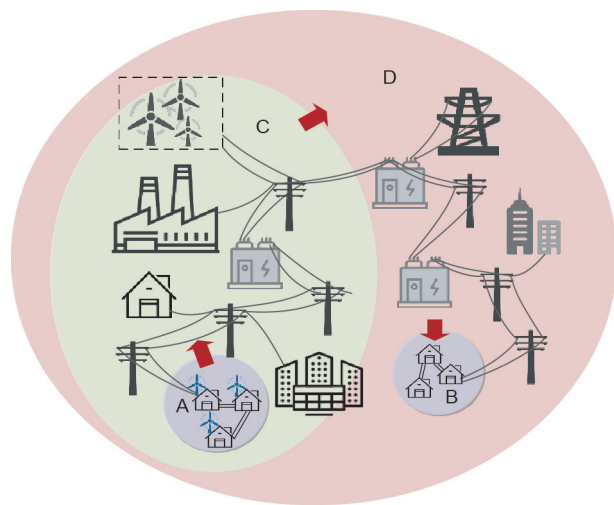


图5. 从A到B的潮流。

5. 具有智能外围的智能电网

装在涵盖数百个发电机和变电站的高压输电系统中的能量管理系统（energy management systems, EMS）近几十年来成功管理和控制电力系统以确保电力系统的经济可靠运行[31]。然而，若将该能量管理系统及其集中式的运营模式拓展应用到未来拥有成千上万个产消者的配电系统时，会出现效率低下、智能不足和难以维持的问题。最近的一项研究表明，随着未来电网变得越来越复杂，如果继续维持目前集中式的运营模式，电网的可靠性和韧性将面临巨大挑战[32]。互联网已经说明了分布式智能和分散式控制是提高系统可靠性和韧性的最有效手段。因此，我们提出了一种具有分布式智能和责任共享的新型电网运营模式。为了适应这种新型运营模式，拥有智能外围的电网（GRIP）被提出，即通过赋予电网外围更多权力，从而使电网像互联网一样智能[33,34]。GRIP聚焦电网外围，但不需舍弃成功的EMS或良好的输电系统网络运行的做法，仅是使其变得更简单（对外围设备不承担任何责任）。而且，未来的输电系统仍然可以演变成与新型运营模式相适应的更为分散的运营模式。

5.1. 分布式智能

在传统的运营模式中，唯一的集中决策者（电网运营商）负责系统运行的基本责任，即维持整个电网的瞬时功率平衡，不出现过载和异常运行状态。如第4节所述，当且仅当电网任何一个子电网净功率平衡（不出现过载和异常运行状态），则电网的功率平衡（不出现过载和异常运行状态），该原则可作为构建未来电网新型分布式运营模式的基础。

集群（cluster）是指电网中一个由一群具有管理和控制净功率平衡能力的产消者构成的连通子电网。根据这个定义，以下均是集群的例子。

- 一个拥有独立系统运营商（independent system operator, ISO）的互联输电系统，其中ISO在管辖范围内通过管理EMS控制其成员的发电和用电；
- 一个作为“控制区”运行的带有EMS的输电公司或机构[35]；
- 一个拥有现代配电自动化系统和（或）高级计量基础设施（advanced metering infrastructure, AMI）系统的供电公司，其中现代配电自动化系统用于控制馈线和分支线上的潮流和电压（即无功潮流），AMI协助控制

用户负荷；

- 微电网、迷你电网或纳米电网；
- 一个拥有EMS的智能社区，可以通过为其增加管理和控制净功率平衡的功能，使其成为一个集群；
- 一个拥有楼宇EMS的智能楼宇，可以通过为其增加管理和控制净功率平衡的功能，使其成为一个集群；
- 一个智能住宅，可以通过为其增加管理和控制净功率平衡的功能，使其成为一个集群；
- 一个聚合商，可以与同一配电公司下属的智能住宅、智能楼宇、智能社区和微电网签约管理和控制聚合的发电和用电形成一个集群。

5.2. GRIP 结构——群集的层次结构

两个集群不能有重叠，因为一旦有重叠会导致它们都无法维持自身的净功率平衡。因此，两个集群要么完全不重叠，要么一个集群完全包含于另一个集群，就像互联网中的LAN被视为包含于ISP子网一样（图2）。一个集群可以包含多个集群，也可以不包含任何集群；作为一个更大集群的一部分，一个集群还可以包含几个集群。这形成了群集的自然层次结构（图6），顶层是整个互联电力系统，下面的一层可以是一个作为互联电力系统“控制区”运行的拥有EMS的电力机构或公司，最底层可能是一个智能住宅。

让我们回顾图5中的例子，其中A向B售电，而A、B、C和D都是集群。我们将根据潮流在集群之间的流动来分析这笔交易的路径，这与第3.3节中分析数据流在很多与互联网路由器连接的子网中流动路径的思路一致。集群A内部没有多余的功率需求来平衡产生的多余功率，因此集群A把功率输出到与其相连的上一层集群，

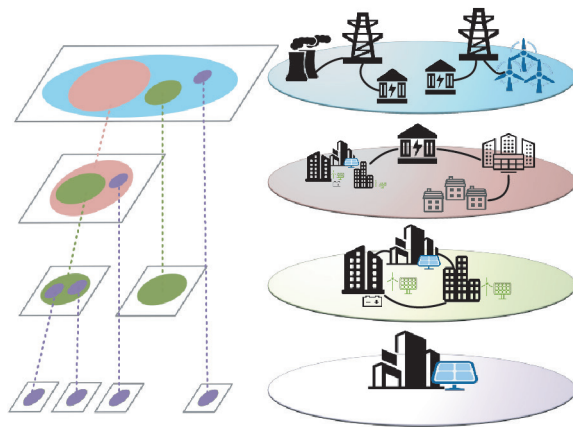


图6. 群集嵌套层次关系。

即集群C。同样，C的多余功率输出到D。在集群D中，B具有多余的功率需求，可以平衡从C输出到D的多余功率。潮流的路径是从A到C，从C到D，最后从D到B。因此，从A向B转移多余功率的任务由一组集群共同承担；每个集群要么将功率输出给上层的集群，要么输出给集群内部的功率需求方。从物理角度分析，在A产生多余的功率的同时，B消耗等量的功率。只要所有集群（A、B、C和D）维持净功率平衡，能量转移瞬间完成。

因此，维持电网功率平衡的责任由受影响的所有集群共同承担，每个集群都有责任维持自身的净功率平衡。为了表示潮流在群集的层次结构中流动的路径，将图5内容更新为图7。

5.3. 能量路由器或集群能量管理系统

集群必须具有管理和控制其净功率平衡的智能。集群能量管理系统（cluster energy management system, CEMS）由管理和控制集群净功率平衡所需的所有硬件和软件共同构成，类似于互联网中的路由器，因此在GRIP中称之为能量路由器（E-router）。能量路由器或者CEMS必须有监测集群边界潮流的传感器、控制潮流的功率调节设备（如限流器）以及管理集群中发电和负荷的信息通信技术。

5.4. GRIP 的分层体系结构

GRIP分层体系结构包括三层，即市场层、调度层和平衡层（图8）。电网用户（即产消者）与电力市场交

互以共享或交易电力。交易必须通过电网调度实现，并且集群的净功率必须始终维持平衡。

（1）**市场层**。在不同的国家和地区，各种形式的日前、小时前、实时和其他类型的电力市场都具有不同的规章制度。双边交易是用于共享能量的最简单的市场交易形式，能够与任何市场兼容。实际中可能需要更通用的多边交易方案[36]。多边交易已经在一个含有五个区域电网的互联电力系统中成功实施[37]。现代区块链技术，即开放的分布式账本，可以有效促进多边交易。市场中的电力交易必须能在调度层中实现，可以通过离线分析将集群运行约束转换为集群可接受的交易约束。对于配电系统中的集群，其网络结构大多是辐射状的，运行约束包括线路负载和允许的电压范围，相较于输电系统更为简单。对于复杂的输电系统，可以采用成熟的“控制区”运行的标准协议。

（2）**计划层**。产消者可以通过参与日前市场、小时前市场和实时市场中的一个或多个市场实现自身利益的最大化。首先，在调度前需要提前确保集群具有在执行交易过程中维持净功率平衡的能力。电网经常会发生意外事件或扰动，例如发电机或者线路停电，因此集群必须能够承受并拥有充足的备用容量来补偿内部由任何干扰所引起的功率不平衡量。集群的备用容量是指能够快速补偿由于干扰引起的功率不平衡量的额外可控的发电或者负荷。在电力系统术语中，这种承受干扰的能力称为安全性。对于一个拥有多个发电和负荷的集群，可以通过供需调度实现资源的高效、经济共享。风险抑制调度（risk-limiting dispatch, RLD）方案同时考虑了计划、调度、安全性和经济性[38,39]。RLD是基于多阶段的随机

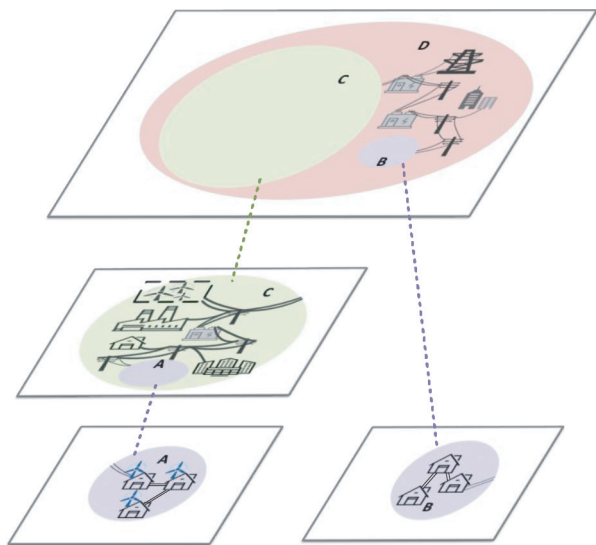


图7. 在群集的层次结构中从A到B的功率传输。

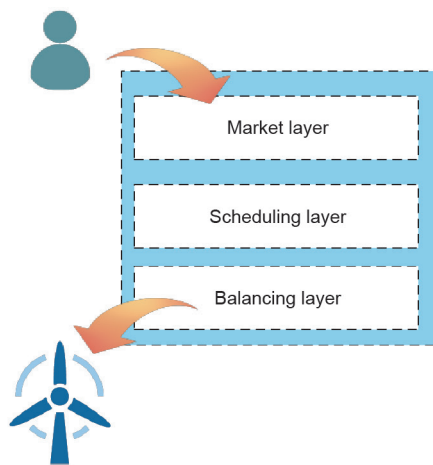


图8. 集群的分层体系结构。

优化框架（图9）实现的，具有如下特征：

- 不同阶段对应电力市场中的不同调度阶段——日前、小时前、实时等。
- 考虑了VRE、其他类型发电以及负荷的不确定性。
- 控制变量是集群内可计划和调度的发电和负荷。
- 终端状态需要将其净功率不平衡的风险严格限制在可接受范围内（类似银行部门的风险管理）。
- 集群运行满足安全约束。
- 优化的目标函数是集群的经济效益。

图9中的符号定义如表2所示。

因此，RLD是在传统电力系统大量运行分析工具的基础上演变而来的，其中包括经济调度、机组组合、最优潮流、安全约束的经济调度、随机最优潮流等，能够适应未来电网的运行。输电系统中现有的EMS可以渐进式地采用RLD，而配电系统中规模更小的集群可以轻松实现RLD的简化形式。

(3) 平衡层。计划层能确保集群在调度时间步长（几秒钟或者更短时间）内维持净功率平衡。为了维持净功率平衡，需要消除由于集群内发电或负荷波动造成的与计划功率平衡的偏差。研究人员为外围集群发明了电力弹簧（electric spring, ES），它没有用于输电系统同步发电机的调速器和励磁系统[40,41]。ES是一种电力电子设备，它利用普遍存在于外围集群中的负荷来消除功率偏差。由于某些负荷（如热水器、空调和非必要的照明等）能够承受短暂的功率降低或增加，而且自身无明显不良影响，可以将这些负荷认为是非重要负荷。ES与

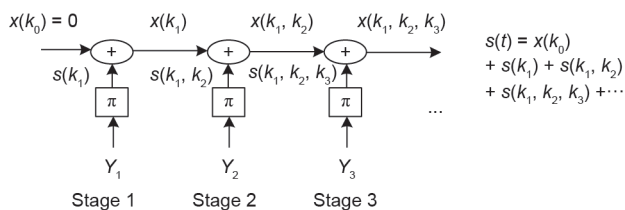


图9. RLD多阶段随机优化框架。

表2 图9中的符号定义

Symbol	Description
Y_1, Y_2, Y_3, \dots	Available information at each stage
$k_0, k_1, k_2, k_3, \dots$	Initial stage, stage 1, stage 2, stage 3, ...
t	Time
$s(k_1), s(k_1, k_2), s(k_1, k_2, k_3), \dots$	Dispatch decisions of net supply at each stage
$x(k_0), x(k_0, k_1), x(k_0, k_1, k_2), x(k_0, k_1, k_2, k_3), \dots$	Total dispatched net supply after each stage

非重要负荷以串联或者嵌入的方式组合连接，并将该组合与其他负荷（重要负荷）并联连接，如图10所示。当出现供电盈余或者不足时，ES将暂时的功率不平衡量转移给非重要负荷，通过让非重要负荷消耗更多或者更少的功率来消除集群内的功率不平衡。嵌入ES的智能负荷可以被视为一个高级的需求响应系统。

为了说明集群不同层次所发挥的功能，图5（或图7）中的示例如图11所示。其中，假设需要配电站集群D进行发电/负荷的再调度。

在GRIP中，维持功率平衡的责任由所有集群共同承担，即每个集群必须维持自身的功率平衡，同时承担计划、调度、功率平衡和安全性的所有职责。每个集群必须作为自治单元运行，即使在发生扰动事件（如集群内发电机故障）的情况下，也必须严格执行其上报的调度计划。每个集群必须能够避免非计划潮流的扰动，并能从集群内部或者上层集群中获得必要的备用容量。从上层获得的备用容量能够维持集群的净功率平衡，从而避免干扰的影响进一步扩散。与目前的电网运营模式不同，最顶层的互联电力系统不再是供应或吸收不平衡电量的最后手段。仅为了确保可靠性而并网的微电网或者产消者不再有“搭便车”（free ride）的机会。

在分层体系结构中，下层需要执行上层指示的任务，并且明确定义接口。市场层期望计划层能够执行计划层可接受的所有交易，必须明确定义如何构成可接受的交易。计划层需要准确地知道平衡层消除波动的能力水平。各层之间没有反复协商。

6. 结论

电网运行的基本要求是维持电网瞬时功率的平衡。当前电网的运营模式是由集中式的运营商负责维持电网瞬时功率平衡。在即将来临的电力新时代，产消者将具

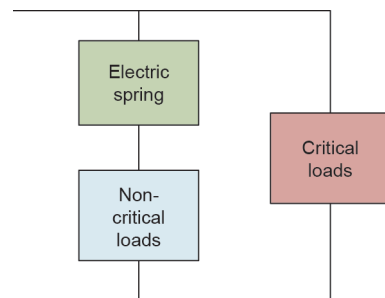


图10. 一个嵌入ES的智能负荷。

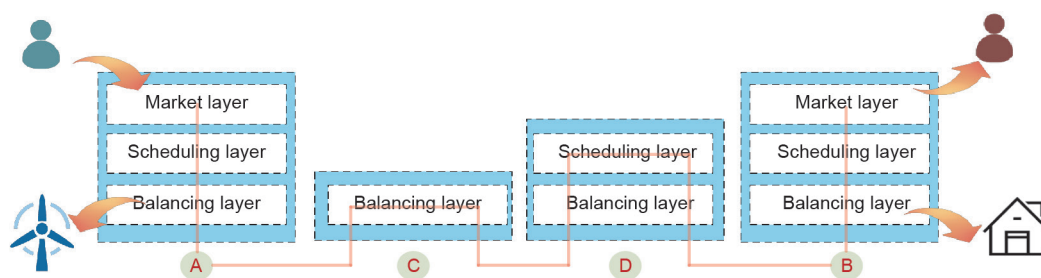


图11. 集群层次架构中从A到B的功率传输过程。

有完全的控制能力和数字化的智能，以更好地管理自己的资源和智能设备，并且不再需要将权限授予电网运营商。通过将功率平衡的责任分配给电网外围的子电网，即让其各自维持自身的净功率平衡，可以实现一种新型分布式运营模式。基于这种新型运营模式，本文提出一个像互联网一样智能的电网——GRIP。

GRIP具有如下的特性，并且适合服务于未来的电网：

- **更好利用可再生能源。** 分布式运营模式能最大化可再生能源的利用率，因为可再生能源将由本地利益相关方运营，这些利益相关方能掌握更多信息进行发电的预测、调度和控制。

- **赋予产消者更多权利。** 产消者可以完全控制自己的发电和负荷资源，有安装和运行更高效的设备的激励，如太阳能光伏、电池储能系统、电动汽车充电系统以及ICT硬件和软件。

- **与电网外围共享责任。** 在新型数字化时代，随着硬件成本的逐渐降低和软件的日益智能化，电网外围在管理自己的子电网方面具有与电网运营商相似的智能和能力。

- **与纳米、迷你、微电网的无缝衔接。** 新型运营模式的责任共享特征与目前纳米、迷你、微电网的自治或者半自治思想兼容，从而有利于它们的无缝衔接。此外，允许集群的半自治运行将会防止产消者“背叛电网”。

- **快速适应技术创新。** GRIP的分层体系结构更有利于兼容新技术。

一旦采用新型运营模式，可以任何速度从现有电网演变成GRIP。具有EMS的输电网可以成为互联的第一个集群。在此基础上，可以添加更多的配电公司群集，每个都覆盖配电变电站的一个子电网。还可以添加智能住宅群集、智能楼宇群集、智能社区群集、微电网群集等。由于集群既可以成为现有集群的一部分，也可以包含任意数目的现有集群，因此可以灵活添加新的群集。

GRIP架构不需要抛弃在输电网中成功运行的EMS或者有效的传统运行方法，只需要聚焦为目前普遍的被动配电系统增加更多的智能和责任，它可以建立在现有电网运营成功经验的基础之上，并通过加强电网外围以兼容创新技术。

能源互联网是近年来的发展趋势，即整合和管理包括电、热、天然气和交通在内的多种能源系统，发现并协调不同能源系统之间的耦合环节，以实现适用于各能源部门以及整个系统的最佳调度[42]。将电力工业所产生的多余热量用于区域供热已有数十年的历史。而电、热和天然气之间的三向转换以及电能和电动汽车电池之间的双向转换为能源管理提供了更多的灵活性。不同形式的能量都遵循相同的基本物理定律，即能量守恒定律。采用文中相同的思想，将能源互联网分解为分层群集，其中每个集群能维持自身的净能量平衡，那么能源互联网也会像互联网一样智能。

致谢

本研究受到中国国家重点研发计划（2017YFB0903000）“电网信息物理系统分析与控制的基础理论与方法”资助。

Compliance with ethics guidelines

Yanli Liu, Yixin Yu, Ning Gao, and Felix Wu declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Global warming of 1.5 °C [Internet]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change; 2018 [cited 2019 Jun 20]. Available from: <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [2] Climate Policy Initiative and Copenhagen Economics. A new electricity

- era: how to decarbonize energy systems through electrification [Internet]. London: Energy Transitions Commission; 2017 Jan [cited 2019 Jun 20]. Available from: http://www.energy-transitions.org/sites/default/files/ETC_CPI%20CE_A%20new%20electricity%20era_2017_0.pdf.
- [3] International Energy Agency. World energy outlook 2018 [Internet]. Paris: International Energy Agency; 2018 [cited 2019 Jun 20]. Available from: <https://webstore.iea.org/download/summary/190?fileName=English-WEO-2018-ES.pdf>.
 - [4] Rifkin J. The Third Industrial Revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world. New York: Palgrave Macmillan; 2011.
 - [5] REN21. Renewables 2018 global status report [Internet]. Paris: REN21; 2018 [cited 2019 Jun 20]. Available from: <http://www.ren21.net/gsr-2018/>.
 - [6] Fares R. Wind energy is one of the cheapest sources of electricity, and it's getting cheaper [Internet]. New York: Scientific American; 2017 Aug 28 [cited 2019 Jun 20]. Available from: <https://blogs.scientificamerican.com/plugged-in/wind-energy-is-one-of-the-cheapest-sources-of-electricity-and-its-getting-cheaper/>.
 - [7] Power World Analysis. Cost of solar panels over time [Internet]. Power World Analysis; 2017 Jun 5 [cited 2019 Jun 20]. Available from: <http://www.powerworldanalysis.com/cost-solar-panels-time/>.
 - [8] Fu R, Feldman D, Margolis R, Woodhouse M, Ardani K. US solar photovoltaic system cost benchmark: Q1 2017 [Internet]. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2017 Sep [cited 2019 Jun 20]. Available from: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68925.pdf>.
 - [9] International Energy Agency. Renewables 2018 [Internet]. Paris: International Energy Agency; 2018 [cited 2019 Jun 20]. Available from: <https://www.iea.org/renewables2018/>.
 - [10] BP. Statistical review of world energy [Internet]. London: BP; [cited 2019 Jun 20]. Available from: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/xlsx/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-all-data.xlsx>.
 - [11] International Energy Agency. Global EV outlook 2018 [Internet]. Paris: International Energy Agency; [cited 2019 Jun 20]. Available from: <https://www.iea.org/geo2018/>.
 - [12] Frankel D, Wagner A. Battery storage: the next disruptive technology in the power sector [Internet]. New York: McKinsey & Company; [cited 2019 Jun 20]. Available from: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/battery-storage-the-next-disruptive-technology-in-the-power-sector?cid=eml-app>.
 - [13] de Sisternes FJ, Jenkins JD, Botterud A. The value of energy storage in decarbonizing the electricity sector. *Appl Energy* 2016;175:368–79.
 - [14] International Energy Agency. Digitalization and energy [Internet]. Paris: International Energy Agency; 2017 [cited 2019 Jun 20]. Available from: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/DigitalizationandEnergy3.pdf>.
 - [15] Davies G. Minigrids are the cheapest way to bring electricity to 100 million Africans today [Internet]. 2018 [cited 2019 Jun 20]. Available from: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/minigrids-are-the-cheapest-way-to-electrify-100-million-africans-today>.
 - [16] Hatziaargyriou N, Asano H, Irvani R, Marnay C. Microgrids. *IEEE Power Energy Mag* 2007;5(4):78–94.
 - [17] Madani V, Das R, Aminifar F, McDonald J, Venkata SS, Novosel D, et al. Distribution automation strategies: challenges and opportunities in a changing landscape. *IEEE Trans Smart Grid* 2015;6(4):2157–65.
 - [18] US Energy Information Administration. International energy statistics [Internet]. Washington, DC: US Energy Information Administration; [cited 2019 Jun 20]. Available from: <https://www.eia.gov/beta/international/data/browser/#?showdm=y>.
 - [19] Huenteler J, Tang T, Chen G, Anadon LD. Why is China's wind power generation not living up to its potential? *Environ Res Lett* 2018;13(4):044001.
 - [20] Qi Y, Dong W, Dong C, Huang C. Understanding institutional barriers for wind curtailment in China. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;105:476–86.
 - [21] Bird L, Lew D, Milligan M, Carlini EM, Estanqueiro A, Flynn D, et al. Wind and solar energy curtailment: a review of international experience. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;65:577–86.
 - [22] Bird L, Cochran J, Wang X. Wind and solar energy curtailment: experience and practices in the United States. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2014.
 - [23] Shuler R. How does the Internet work? [Internet]. Palo Alto: Stanford University; [cited 2019 Jun 20]. Available from: <https://web.stanford.edu/class/msande91si/www-spr04/readings/week1/InternetWhitepaper.htm>.
 - [24] Walrand J. Communication networks: a first course. 2nd ed. Boston: WCB/McGraw-Hill Professional; 1998.
 - [25] Tsoukalas LH, Gao R. From smart grids to an energy internet: assumptions, architectures and requirements. In: Proceedings of 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies; 2008 Apr 6–9; Nanjing, China; 2008. p. 94–8.
 - [26] Huang AQ, Crow ML, Heydt GT, Zheng JP, Dale SJ. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet. *Proc IEEE* 2011;99(1):133–48.
 - [27] Abe R, Taoka H, McQuilkin D. Digital grid: communicative electrical grids of the future. *IEEE Trans Smart Grid* 2011;2(2):399–410.
 - [28] Cao J, Meng K, Wang J, Yang M, Chen Z, Li W, et al. An energy internet and energy routers. *Sci Sin Inf* 2014;44(6):714–27.
 - [29] Proakis JG, Salehi M. Fundamentals of communication systems. 2nd ed. Chennai: Pearson Education India; 2013.
 - [30] von Meier A. Electric power systems. Hoboken: John Wiley & Sons; 2006.
 - [31] Wu FF, Moslehi K, Bose A. Power system control centers: past, present, and future. *Proc IEEE* 2005;93(11):1890–908.
 - [32] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Enhancing the resilience of the nation's electricity system. Washington, DC: National Academies Press; 2017.
 - [33] Bakken D, Bose A, Chandu KM, Khargonekar PP, Kuh A, Low S, et al. GRIP—grids with intelligent periphery: control architecture for Grid2050p. In: Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications; 2011 Oct 17–20; Brussels, Belgium; 2011. p. 7–12.
 - [34] Wu FF, Varaiya PP, Hui RSY. Smart grids with intelligent periphery: an architecture for the energy internet. *Engineering* 2015;1(4):436–46.
 - [35] Cohn N. Control of generation and power flow on interconnected systems. New York: John Wiley and Sons; 1961.
 - [36] Wu FF, Varaiya PP. Coordinated multilateral trades for electric power networks: theory and implementation. *Int J Elect Power Energy Syst* 1999;21(2):75–102.
 - [37] Pandey V, Usha S, Shrivastava VK. Decentralized interchange scheduling in India. In: Proceedings of the 7th International Conference on Power Systems; 2017 Dec 21–23; Pune, India; 2017. p. 416–23.
 - [38] Varaiya PP, Wu FF, Bialek JW. Smart operation of smart grid: risk-limiting dispatch. *Proc IEEE* 2011;99(1):40–57.
 - [39] Rajagopal R, Bitar E, Varaiya P, Wu F. Risk-limiting dispatch for integrating renewable power. *Int J Elec Power Energy Syst* 2013;44(1):615–28.
 - [40] Hui SY, Lee CK, Wu FF. Electric springs—a new smart grid technology. *IEEE Trans Smart Grid* 2012;3(3):1552–61.
 - [41] Chen X, Hou Y, Tan SC, Lee CK, Hui SYR. Mitigating voltage and frequency fluctuation in microgrids using electric springs. *IEEE Trans Smart Grid* 2015;6(2):508–15.
 - [42] Yu X, Xu X, Chen S, Wu J, Jia H. A brief review to integrated energy system and energy internet. *Trans China Electrotech Soc* 2016;31(1):1–13.