

能源局域网: 物理架构、运行模式与市场机制

宋永华^{1,2}, 林今¹, 胡泽春¹, 董树锋²

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;

2. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Energy Distribution Network: Infrastructure, Operation Mode and Market Mechanism

SONG Yonghua^{1,2}, LIN Jin¹, HU Zechun¹, DONG Shufeng¹

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical

Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Accessing flexibilities in energy demand side will pave the way for a higher integration of variable and intermittent renewable energy in power systems. Energy distribution network (EDN) is a novel concept of integrating flexibilities in demand side by interoperating diverse energies such as electricity, gas and heat within a local area. With highly flexible energy interoperations, EDN can actively respond to variable renewable energy leading to a higher renewable share in power systems. This paper systematically presented the concept of EDN with the discussions on its infrastructure and fundamentals on multi-energy coordination. Three types of operation modes of EDN were investigated as well as mode conversions and comparisons with typical smart grid applications. A surplus market of EDN was proposed in the paper aiming at trading large amounts of renewable energy surplus, which can be a positive attempt of China's power market reformation. Finally, the outlook of potential breakthroughs was summarized in the paper.

KEY WORDS: energy internet; energy distribution network (EDN); infrastructure; operation modes; surplus market; power market

摘要: 增加能源消费侧的运行灵活性是提升电力系统高比例随机波动新能源消纳能力的重要手段。建设电、气、热等多种能源互补的能源局域网(energy distribution network, EDN),可在非电能源系统中大规模利用清洁的可再生能源,

显著提升电力需求侧的运行灵活性,甚至追踪并响应系统内新能源电源的随机波动。该文探讨 EDN 这一典型的综合能源系统,较为系统地讨论 EDN 典型的基础概念、物理架构与多能互补的工作机理。在此基础上,进一步提出 EDN 的 3 类工作模式及工作象限,分析其相对于智能电网典型应用的运行特征。面向新能源的大规模消纳难题,该文提出 EDN 的余量市场模式及其基本的交易流程,分析该交易模式对电力市场改革的积极意义。最后,展望 EDN 所亟需突破的关键技术问题。

关键词: 能源互联网; 能源局域网; 物理架构; 运行模式; 余量市场; 电力市场

0 引言

能源安全和环境保护是世界范围内能源系统的重要挑战,大幅提升能源系统中清洁低碳的可再生能源消纳比例已成为了全球能源行业发展的集体共识和重要战略^[1]。

以风能、太阳能为代表的,能够规模开发、环境友好、社会接受度高的新能源通常都首先转换为电能接入电力系统,在发电侧引入了大量功率随机波动难以调控的电源^[2]。电力系统发电侧的运行不确定性显著增加,调控灵活性不断下降,电力的需求依然呈现刚性,难以响应新能源电力系统功率与能量平衡的需求。这一矛盾随着新能源在电力系统中接入比例的不断提升而愈加凸显,世界各国均面临着新能源电力的大规模消纳难题。2015 年,我国全国平均弃风率已达 15%,弃风损失电量 339 亿 kW·h^[3];德国政府制定了在 2020 年、2050 年可再生能源发电比例先后达到 20%、50%的目标,随着

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2014AA051901); 国家自然科学基金项目(51261130472, 51577096, 51477082); 国家国际科技合作专项项目(2014DFG62670)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2014AA051901); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51261130472, 51577096, 51477082); International S&T Cooperation Program of China (2014DFG62670).

新能源装机规模的扩大,其消纳问题也日益凸显^[4];丹麦已规划在 2050 年实现 100%基于可再生能源的能源系统,高比例的新能源必须通过与德国、挪威电网的坚强互联方可解决消纳问题^[5]。

增加能源消费侧的运行灵活性是提升电力系统高比例可再生能源消纳能力的重要手段。为此,能源行业提出了“能源互联网”这一重要理念^[6-8],希望通过电、气、热等多种能源间的互济互补,实现随机波动的新能源在综合能源系统内的消纳与利用。从空间覆盖范围和主要服务对象的角度进行区分,能源互联网可以被分为能源主干网与能源局域网(energy distribution network, EDN)两个部分^[9]。能源主干网由坚强的智能电网与大规模气体输送管网组成,主要服务于规模化电源和气源的集中式接入,实现能源在空间上的大范围、规模化、跨区域的优化配置。能源局域网则位于能源的消费侧,主要服务于一定区域内的终端用户与就地接入的分布式能源^[10]。能源局域网间通过能源主干网实现互联,在能源互联网的调控与市场机制的指导下,实现综合能源系统的灵活运行^[10]。

与能源主干网相比,能源局域网更靠近能源的消费侧,可能交互的非电能源类型更加多样,能源消纳的手段也更加丰富,是一类典型的综合能源系统^[11-12]。建设多源互补的能源局域网,不仅可能显著提升能源的综合利用效率^[13],更可显著提升电力系统的需求柔性,成为新能源电力系统运行灵活性的全新来源。能源局域网将在能源的消费侧最大限度的响应并追踪新能源的随机波动,为能源互联网实现复杂的综合能源管控提供重要的技术保障。

能源局域网的建设对推动能源互联网的技术落地,实现我国能源系统的改革目标具有重要意义。为了推广能源局域网这一新理念,本文探讨能源局域网的基础概念,提出能源局域网的典型物理架构,较为系统地分析能源局域网中多种能源的转换与配用机理。在此基础上,本文进一步提出能源局域网的“电气定热”、“电热定气”和“气热定电”三大类共 12 个象限的运行模式。通过对比需求侧响应、微电网、主动配电网等智能电网的典型应用,分析能源局域网相对于智能电网的运行特征。面向大规模消纳可再生能源的难题,本文提出能源局域网的余量市场这一能源市场商业模式,以支撑能源局域网用户的高效经济用能以及局域网与主干网

的交易互动。结合能源局域网的典型运行模式与商业模式,本文展望能源局域网所亟需突破的关键技术问题,并为未来相关领域的研究工作做出设想。

1 能源局域网的物理架构

1.1 能源局域网的网络架构

能源局域网是实现一定区域内电、气、热等多种能源高效集成,连接能源主干网运行并具备与非电能源系统间转换与交互能力的综合能源系统。能源局域网的概念不仅强调局域网所集成的能源形式,同时强调局域网在能源互联网中的接入方式,以及能源在电和非电形式间转换的运行交互特征。能源局域网中主要涉及到的能量转换装置如表 1 所示。

| 表 1 能源局域网的主要能量转换装置 | | | |
|---|-------------------------------------|-----------------------------------|---|
| Tab. 1 Energy converters in energy distribution network | | | |
| 类型 | 输入 | 输出 | 实现方式 |
| 电转气 P2G | 电能 | H ₂ 、CH ₄ 等 | 以电解池为核心制取氢气,再借助甲烷 |
| | | 燃气、热能 | 化反应制取合成天然气 |
| 电转热 P2H | 电能 | 热能 | 以电锅炉为核心,将电能转化为热能, |
| | | | 为供热管网提供热源 |
| 热电联供 CHP | 燃气 | 电能、热能 | 以燃气机组为核心,将燃气燃烧推动 |
| | | | 燃烧轮机旋转进而发电,燃烧同时产生热量,可以用作供热热源 |
| 冷热电 三联供 | 燃气 | 电能;热能;制冷 | 以燃气机组、空调、热泵为核心,将燃气 |
| | | | 燃烧推送轮机旋转,一方面用作发电,一方面用作供热热源,利用空调/热泵动力,进行制冷/制热 |
| 静态 气转电 | H ₂ 、CH ₄ 等燃气 | 电能、热能 | 以燃料电池为核心,利用 H ₂ 、空气的燃料电池反应发电,同时产生可利用余热 |

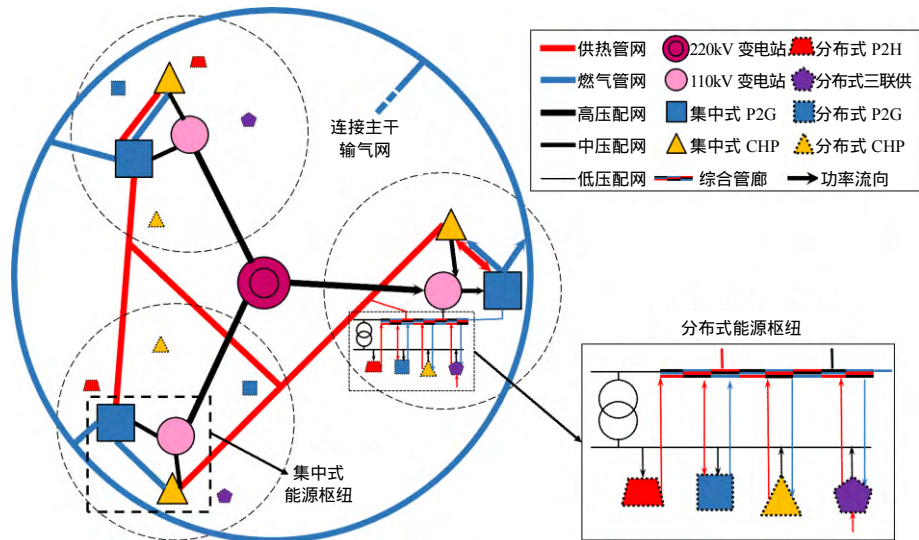
一个集成了电/气/热的能源局域网,其物理架构的示意图如图 1 所示,一共由三大类能源网络组成,现简述如下:

1) 电力网络。

能源局域网以配电网作为区域内能源配送的骨干网络。我国的配电网根据电压等级的高低可以分为 110kV 的高压配电网、110~10kV 的中压配电网以及 10~400V 的低压配电网^[14]。能源局域网通过高压配电网在 220kV 的并网点接入能源主干网,获取输电网络中集中接入并跨区域传输的规模化新能源。而以光伏发电为代表的分布式能源和以电池为代表的分布式储能则多通过中低压配电网接入到能源局域网中。

2) 气体能源网络。

气体能源网络通过以“电转气”装置(power to



注：图中的分布式装置均通过综合管廊与集中式能源枢纽相连，限于示意图的版面与美观需求，仅以与分布式能源枢纽处的管廊连接示意。

图 1 能源局域网的网络架构示意图

Fig. 1 Network infrastructure illustration of energy distribution network

gas，P2G)和以静态“气转电”装置为核心的气体能源站(下文简称气站)接入中低压配电网^[15]。气体能源既可以在区域内通过综合管廊组成输配电网，也可以利用交通网络实现气体能源在区域内的配售。同时，气体能源网络也可以通过集中供气站接入输气主干网，实现跨区域的气体能源输送与消纳。

3) 热力网络。

热力能源网络同时与电力网络和气体能源网络交互。一方面通过以“电转热”装置(power to heat，P2H)为核心的热力能源站(下简称热站)接入中低压配电网；另一方面，也可以通过热电联产的燃气机组(CHP)就近接入气体能源网络和电力网络。其中接近中高压配电网的集中式热站与气站，可以同中高压变电站(主要指 110kV 变电站)共同组成能源局域网中的“电气热”集中式能源枢纽站(Energy Hub)^[16]。接近中低压配电网的分布式热站与气站，则可以共同组成“电气热冷”分布式能源枢纽站，为限定区域提供更为丰富的能源形式^[17]。

1.2 能源局域网的能源互补特性

能源局域网的区域集中性更容易发挥出气体能源与热力能源等非电能源网络在实际运行中的互补特性，如表 2 中的具体对比所示。

如表 2 所示，以天然气、氢气为代表的气体能源具备较强的中长期储存与能量转换能力，具备为新能源电源提供规模化储能的应用潜力^[17-19]。然而，气体能源常以气态或液态的形式存在，其传输过程

表 2 能源局域网的能源互补特性

Tab. 2 Energy characteristics in energy distribution network

| 特性 | 电力能源 | 气体能源 | 热力能源 |
|------|-----------|------------------|------------------|
| 传输距离 | 长距离 | 长距离 | 短距离 |
| 传输速度 | 接近光速 | 气体形式流动速度缓慢 | 液体形式流动速度缓慢 |
| 传输成本 | 较低 | 管道或交通形式，较高 | 管道形式，较高 |
| 转换能力 | 高位能转换能力很强 | 化学能转换能力较强 | 低位能转换能力很弱 |
| 储存能力 | 难以规模储存 | 规模化具备 中长期储存能力 | 规模化具备 中短期储存能力 |

遵循流体定律，传输速度在数十公里/小时量级^[21]，因此，气体能源网络的能源配置速度远逊于以接近光速传输的电力能源网络。同时，气体能源在传输过程中需要依赖外界加压做功或依托交通网络运输，边际传输成本较高。在地域覆盖广阔的能源主干网中，输气网络很难在运行过程中与输电网络紧密结合。但在能源局域网中，由于地域的集中性，气体能源能够实现就地生产、配送与消费。因此，气体能源网络能够紧密结合区域配电网的运行方式，实现电力与气体能源在运行过程中的互济互补。

以供热和供冷为代表的热力能源需要使用液体工质作为能量载体，一般仅能在数十公里的范围内有效传输^[22](载冷液体工质传输距离通常不超过 10 公里^[23])。因此，能源主干网很难利用热力网络完成能源的资源配置。但在能源局域网的区域范围内，热力能源不仅可以作为中短期的储能资源，大规模消纳随机波动的可再生能源，还可与气体能源

网络互补运行，提升区域内的整体能源利用效率。

与能源主干网相比，能源局域网更靠近能源的消费侧，可以交互的非电能源形式更加多样，能源消纳的手段也更加丰富，更能体现能源互联网“多能互补、多源协同”这一优化能源运行，提升整体能源利用效率的核心理念。

2 能源局域网的运行模式与特征

2.1 能源局域网的运行模式

从运行调控的角度看，能源局域网可以通过多种能源形式间的互补转换，规模化消纳随机波动的可再生能源。能源局域网与能源主干网的运行模式有所区别，能源主干网主要通过网络的调控实现区域间能源的优化配置，侧重点在“网”。能源局域网的区域性较为集中，主要通过能源枢纽站的调控，实现局域网的灵活运行，侧重点在“站”。因此能源枢纽站的运行模式与能源局域网是相同的。

根据可以灵活调控的资源类型，能源局域网可以实现三大类，共 12 个象限的运行模式，包括：

1) “电气定热”运行模式。

“电气定热”表示能源局域网根据电能和气体能源的需求确定热力能源的需求。在该模式下，能源局域网可以在四个象限下运行，如图 2(a)所示。

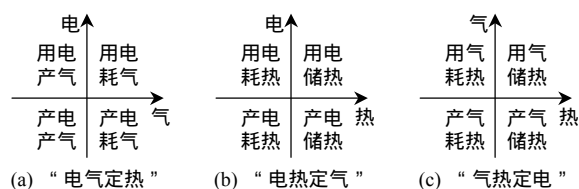


图 2 运行方式

Fig. 2 Operating mode

图 2(a)中的坐标轴表示能源局域网与能源主干网交换的能源类型，横轴表示与能源主干网(输气网)交换的气体能源，纵轴表示与能源主干网(输电网)交换的电力能源。图 2(a)中规定正方向表示用能方向，即从主干网获得电能/气体能源，负方向则表示向主干网输送电能/气体能源。

“电气定热”模式的运行要点是利用热力网络作为电能和气体能源生产/消费过程的储能备用并回收工艺流程余热，以保证局域网的电能和气体能源供应，提升能源的整体利用效率。在第 1 象限中，能源局域网消耗主干网中的电能与气体能源，在满足局域网的基本能源消耗条件下，富余的能量通过能源枢纽站的“电转热”和“气转热”装置转换为

热能短期储存。在第 2 象限中，能源局域网消耗电能，通过“电转气”装置转换为气体能源，就地储存或输送回能源主干网。在第 3 象限，能源局域网有大量分布式电源电量无法消纳，部分通过“电转气”装置转换为气体能源储存，剩余部分作为余电上网。在第 4 象限中，能源局域网消耗气体能源，利用燃气发电机组或是燃料电池机组，将气体能源转换为电能输送回输电网。在第 1 和第 2 象限的运行模式，特别适合于规模化消纳能源主干网中富余的可再生能源；第 4 象限的运行模式，适合于规模化消纳能源局域网中富余的分布式能源。第 2、3、4 象限中，热力网络均可以被用于回收“电-气”转换装置的工艺流程余热，以提升综合能源系统的利用效率^[24]。

2) “电热定气”运行模式。

“电热定气”表示能源局域网根据电能和热力能源的需求确定气体能源的需求。在该运行模式下，能源局域网的运行象限如图 2(b)所示。需要特别指出的是，由于热能传输距离的限制，能源主干网难以提供热源。因此图 2(b)中，横轴正方向的意义是局域网承载热能的工质在封闭循环过程中储存热能，负方向的意义是消耗热能。

“电热定气”模式的运行要点是利用气体能源网络作为电能和热能生产/消费过程的储能，保证局域网的电能和热能供应。第 1 象限的运行可被应用于规模化消纳富余的可再生能源，即局域网从输电网获得可再生能源电力并进行储热，“电转热”产能不足的部分可以由气体网络通过“气转热”提供。第四象限的运行则被应用于消纳能源局域网内富余的分布式电源，增加能源自发自用的比例，减少分布式电力上网。第 2 和第 3 象限则将各类渠道储存的热能通过热力网络配送至终端用户。需要指出的是，能源局域网一般较少运行在该模式的第 3 象限，仅当局域网的上网电价较高，或是区域内“电转热”装置已达到工作极限依然无法满足局域网的热力需求时发生。

3) “气热定电”运行模式。

“气热定电”表示能源局域网根据气体能源和热力能源的需求确定电力能源的需求，其运行象限如图 2(c)所示。该模式的运行要点是利用能源主干网的电能作为储能，保证局域网内的气体能源和热力能源的供应。

在该模式的第 1 象限，能源局域网消耗气体能

源制热或是热电联供, 剩余的热能储存于热力网络, 供第2象限中的热力负荷消耗。这种方式常常被用于冷热电三联供的区域能源微网中^[17]。考虑到气体能源具有良好的储存能力, 一般仅需确定一定时间段内气体的生产总量, 因此其生产过程具有较强的调节柔性, 这也使得第3和第4象限的运行模式, 可以被部分用于消纳电力网络中富余的可再生能源。在第3象限, 热力网络还可以被用于提升“电转气”流程的电解质温度, 提升工艺流程效率, 这常常发生在“电转气”装置运行功率较低的工况下; 在第4象限, 热力网络则还可以用于回收“电转气”流程的余热, 热力需求不足的部分由电力网络通过“电转热”补充。

综合上述分析, 能源局域网“电气定热”运行模式的第1、第2象限以及“电热定气”模式的第一象限适合于规模化消纳能源主干网中富余的可再生能源; 同时, “电气定热”运行模式的第3象限以及“电热定气”模式的第4象限则适合于消纳能源局域网内富余的分布式能源。当系统的运行目标更倾向于非电能源生产时, 也可以使用“气热定电”模式的第3和第4象限, 部分消纳电力网络中富余的可再生能源。

能源局域网具备“电气热”3个维度的运行自由度, 可以根据生产目标的不同, 选择合适的运行模式和工作象限, 协调气体能源网络和热力网络作为储能备用。现有的联合能源系统通常仅能在“以电定热”和“以热定电”这两个自由度间切换, 这给新能源电力系统的运行造成了一定影响^[25]。运行灵活性的大幅提升, 增强了能源局域网在全系统内规模化消纳新能源的能力, 以及局域网整体的能源利用效率。

2.2 能源局域网的运行特征

智能电网是支撑能源局域网运行的核心网络。虽然能源局域网的发展紧密依托智能电网的技术提升, 但其12个象限的运行模式与现有的智能电网应用有着明显的区别, 如下所述:

1) 与需求侧响应的区别。

需求侧响应是智能电网“源网荷”互动非常重要的一项技术^[26]。通过需求侧响应, 可以有效降低电力系统高峰期的用电负荷峰值, 提升智能电网的运行安全性, 延缓甚至避免电网昂贵的一次系统扩容与改造投资。需求侧响应的主要目标是在短时间内降低负荷峰值, 而能源局域网主要面向规模化的

消纳可再生能源, 因此其运行目标之一在于控制局域网的电力负荷在最大程度上追踪随机波动的新能源电力, 实现新能源电力系统功率和能量平衡。目标的偏差造成了实现手段的区别, 现有的需求侧响应通常考虑采用短期直接控制^[27]或是经济激励的方式^[28]实现, 而能源局域网则通过电气热综合能源系统的多源互补协调运行实现控制目标。

2) 与微电网的区别。

微电网的建设初衷在于实现高可靠性的微型电力系统, 可以实现并离网的光滑切换, 避免输电系统大停电对重要负荷的影响^[29]。随着分布式新能源技术的发展, 微电网还被作为高效利用分布式新能源的重要手段, 强调并网点功率控制能力^[30]。能源局域网从概念设计上就是与能源骨干网络相连, 强调全系统的用能可靠性而非局部系统的供电连续性。从电压等级上看, 微电网一般设计在中低压配电网^[31], 用于提升局部区域内分布式能源的自发自用水平; 能源局域网通过高压配电网接入能源主干网, 用于提升综合能源系统内新能源的消纳水平。微电网的资产所有权通常唯一, 可以使用直接控制的手段优化运行^[29]; 能源局域网通常涉及到多个运行主体, 需要综合协调控制与市场驱动的方式优化运行。

3) 与主动配电网的区别。

按照CIGRE对主动配电网的定义, 主动配电网可以在兼顾区域内分布式能源消纳的同时为输电系统提供辅助服务支撑^[32], 甚至可以通过能源路由实现交直流电力的互联^[33], 这样的运行目标与能源互补方式与能源局域网是高度一致的。从技术路线的角度看, 能源局域网是继承并发展自主主动配电网的。二者最主要的区别在于调控对象的选择: 主动配电网的控制点侧重在网络拓扑结构与分布式电源^[34], 对于能源主干网的调控参与能力有限; 能源局域网的控制点侧重在能源枢纽站, 通过多种能源形式间的转换实现新能源电力在不同能源系统中的规模化利用, 依托气体能源网络与热力能源网络, 能源局域网具备较强的参与能源主干网调控的能力。

3 能源局域网的余量市场交易机制

3.1 灵活的电价机制是能源局域网的发展要求

通过高效集成电能、气体能源与热力能源, 能源局域网具备规模化的储能能力, 是实现100%可

再生能源系统的重要技术支撑。从目前的技术进展看,“电”、“气”、“热”等多种能源形式间的转换机理已很清晰,部分核心转换装置与储能装置也已投入商业化运行^[34-36]。

除部分关键技术外,阻碍我国的富余可再生能源规模化进入非电能源系统的最大障碍在于电价机制。以电转氢后甲烷化制合成天然气为例,能量转换的效率可达 56%^[36],即 1 标方合成天然气需要消耗近 18 度电,即使以平均 0.5 元/度的居民销售电价计算,零碳的合成天然气也很难和目前工业天然气的市售价格(约 3 元/标方)竞争。“电转热”也面临同样的难题,采用电能替代的清洁锅炉很难与高碳的燃煤甚至燃气锅炉的运行成本竞争。

僵硬的固定电价体系造成了边际成本低的可再生能源富余电力宁可被主动弃掉,也无法被转换进入气、热等非电能源系统。灵活的电价体系需要依赖完善的电力市场机制形成,例如德国的 P2G 示范工程^[37],即是通过参与德国的电力能量市场和辅助服务市场降低运行成本。

随着我国新一轮电力体制改革的启动,电力市场的建设正在稳步开展,南北两大电力交易中心与多个省级交易中心已经启动,并开始进行电力的中长期合同交易^[38]。然而,目前的电力市场化改革还未推进到现货市场的层面,市场及调度机制很难在运行过程中解决规模化的可再生能源弃电问题。

推动我国电价体系的改革和推进能源互联网的建设是不可分割的两个方面。鉴于我国电力体系的复杂国情,全国性的电力市场特别是现货市场的建立,必然需要经历一段漫长而又艰巨的过程。因此,能源局域网的市场交易可以先行一步,先行先试,通过局部的市场改革为全国的电力市场建立积累经验。为此,本文提出可以通过余量市场的建立,推进能源局域网的建设。

3.2 能源局域网的余量市场交易机制

余量市场是国际上近期重要的研究热点^[38-39],研究者期望能够应用该市场机制解决主动配电网的优化运行与区域电力交易问题。

主动配电网内部接入了高比例的分布式电源,这让很多传统的用电用户转变为了新型的“能源生产型消费者”(Prosumer)^[39-40]。该类群体的发展初期,一般采用自发自用、余量上网的模式^[41],降低用户的用电成本。随着分布式电源的不断增多,生产型消费者内部在不同时段盈余出来的新能源以

及清洁能源电量显著提升。这就给电力的供求双方以及电网公司带来了全新问题和机遇:

1) 生产型消费者。由于余电的上网电价远小于销售电价,期望将余电电量销售给周边用户,增加售电收入;

2) 传统消费者。自身没有条件建立分布式电源,但区域内有大量余电电量,希望购买以降低购电费用;

3) 电网公司。大量的用户自建分布式电源,销售电量下滑,需要新的利润增长点平衡电网的基础设施投入。

余量市场就是为了解决上述问题所设计的,结合现有的余量市场模型^[39]与我国的电价体系及电量结算机制,余量电能可能的交易流程如图 3 所示。

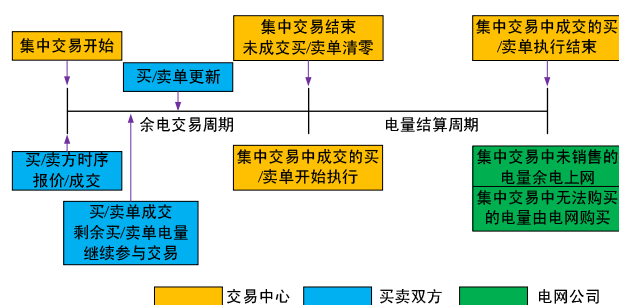


图 3 余量市场的交易流程

Fig. 3 Trading process in surplus market

我国电网的电量结算每 15min 进行一次,可设定余量市场的交易周期与电量结算周期相同,图 3 中所示的交易流程可被分为三个周期:

1) 交易准备期。在 0min 前,买卖双方各自预测电量结算周期(15~30min)的余电电量和购电电量。

2) 余电交易期。0~15min 为余电交易阶段,买卖双方通过双边竞价的方式各自销售和购买余电电量。考虑电网的电价机制,售电方的售电报价不会低于电网的余电上网电价,购电方的购电报价不会高于电网当时的销售电价。因此,余电交易期周期结束后的成交电价将高于余电上网电价,低于销售电价。通过双边竞价的机制,实现了生产型消费者增加售电收入,传统消费者减少购电费用的目标。

3) 电量结算期。15~30min 为电量结算阶段,在该阶段的结束时刻(即第 30min 时),交易中心将进行电量平衡清算:对于集中交易中售电方未销售出的电量,由电网按照余电上网价格统一收购;对于集中交易中购电方无法购买到的电量,从电网按照当时的销售电价统一购买。同时,交易中心还将

对由于预测误差造成的成交但未执行的买单及卖单进行平衡或惩罚。在该结算期,电网公司作为最大的电量平衡商,采用余电上网电价和销售电价参与市场,并可根据市场内余电电量的成交规模收取过网费用,从而在电量销售外创造新的收入增长点。

图3中的余量市场模式不仅适用于能源局域网的内部交易,同样也可适用于含高比例可再生能源的能源骨干网^[17]。此时,能源局域网作为整体被视作生产型消费者,基于第2节提出的3类工作模式,参与能源主干网交易。本文作者曾据此提出过一个适用于富余水电和制氢企业间交易的余量市场交易机制^[42],以作为在计划电量主导的电力体系下实施市场化现货交易的有益补充。

作为生产型消费者,能源局域网同样能够参与到具有健全机制的电力市场之中。通过同时参加外部能源主干网的电力市场与内部能源局域网的余量市场,配电网公司或售电公司可以通过能源主干网的市场竞价结果,灵活调节能源局域网的销售电价和上网电价^[43],从而最大限度的利用局域网内由气体能源网络和热力网络构成的海量储能资源,消纳系统内富余的可再生能源电力。

4 能源局域网亟需突破的关键技术

能源局域网的建设对推动能源互联网的概念落地,实现我国能源系统的改革目标具有重要意义,是能源互联网的重要研究领域。为了实现能源局域网“多能协同”的运行模式与“对等共享”的市场交易,亟需突破一系列关键技术,以支撑能源局域网的概念落地。

4.1 能源局域网的物理架构关键技术

1) 高效“电-气”转换技术。

气体网络的集成,为能源互联网提供了消纳可再生资源海量储能容量和空间,是能源互联网实现灵活运行重要保障。目前“电转氢”的转换效率一般在57%~73%间,而实现“氢转电”的燃料电池技术转换效率在50%~60%左右^[36]。氢的甲烷化和天然气重整的能量转换效率,也有进一步提升的空间^[44]。通过高温固体氧化物实现的水电解池与燃料电池能够实现超过80%的转换效率^[35,44],是目前该领域亟需突破的前沿技术。

2) 气体能源的安全高效储运技术。

气体能源的储运是制约以氢能为代表的零碳气体能源网络发展的主要技术瓶颈。这需要突破两个

方面的限制,第一是安全性方面的考虑,大规模的气体压缩存储或是低温液化存储均尚未被实践完全证明其安全性^[46];第二是储运的高效性,气体压缩或是低温液化均会带来接近10%左右的能源损耗,同时长期存储也会带来较大的损耗^[47]。以上两点也是目前气体能源领域的研究热点与技术前沿。

3) 高能量转换率的规模化储能技术。

气体能源和热力能源受限于热力学定律,由低位能重新转换为高位电能的能量转换效率提升空间有限。因此,在电力网络中集成能量转换率较高,且具有一定容量规模的储能资源,与气体与热力网络共同构成梯级储能,能够提升能源局域网的能量利用效率与运行效益。在目前的技术条件下,以压缩空气储能^[48]为代表的物理储能,和以电池储能^[15]为代表的化学储能,均具有较强的应用潜力与提升空间。另外,以电动汽车V2G为代表的智能交通与电网互动技术^[49],也可能成为能源局域网的虚拟化储能资源。

4) 低位热能的高效利用技术。

根据热力学第二定律,电力和气体能源间的相互转换造成的熵增,必然产生大量的低位余热。实践证明,如果能够充分将余热利用,可以将燃料电池的利用效率提升至超过90%^[50]。低位热能可以进入热力网络,供应居民热水和采暖需求,减少热力网络的能源消耗。或是成为吸收式热泵和空调的热源^[51],通过分布式能源枢纽,就近供应当地的热力用户。

4.2 能源局域网的系统运行关键技术

1) 能源枢纽的集成与高效运行技术。

能源枢纽是能源局域网实施控制的支点,是实现“电气热”能源间相互转换的核心节点。能源枢纽的集成,涉及到电、气、热3类装置及其配套的辅机设备的有机集成与控制。目前关于能源枢纽的研究多停留在稳态外特性的层面^[52]。如何从微观角度建立能源枢纽的动态模型,分析其动态过程并设计协调控制器,以及如何从宏观角度科学规划与设计能源枢纽^[16],均是当前能源互联网领域的前沿研究方向。

2) 能源局域网的安全运行与优化调度技术。

能源局域网的运行涉及到电、气、热等多类能源网络的复杂耦合,并需要考虑市场交易和不同运行主体对局域网安全运行和调度优化所造成的影响。多能源系统的能流计算^[53]、安全运行校验^[54]

与多时空尺度调度优化^[55]，是目前能源领域的研究热点与理论前沿。有必要在最新研究成果的基础上，结合能源局域网的物理架构与运行特点，深入开展能源局域网的安全运行与优化调度技术的研究工作。

3) 分布式发电和负荷的超短期预测技术。

分布式电源和负荷的超短期预测是能源局域网实现优化运行和市场交易的重要技术支撑^[55-56]。高精度的发电和负荷预测能够显著提升市场的运行效率，提升能源局域网的运行效率^[58]。与传统的发电和负荷预测比较，分布式发电和负荷预测的时间和空间颗粒度更细，受外部影响的程度更大，难度更高。需要结合外部环境监测^[59]以及非侵入测量^[60]提供更多的物理信息，提升预测精度。

4) 态势感知、非侵入式测量与物联网技术。

支撑能源互联网灵活运行的重要基础是实现局域网内海量用能装置运行状态的深度感知，以提前预判系统的运行态势^[61]。这涉及到两类前沿技术的深度集成，第一是能源物联网技术，可以使能源局域网中的每一个用能原子节点实现数字化与智能化，并通过云端的物联网总线交互并实现协调控制。如英特尔推出的 Helix Cloud^[61]、百度推出的天工平台^[63]等，均有望成为未来能源物联网的云端解决方案。第二是非侵入式测量技术，可以通过部分节点的高精度量测，分析用户内部的用能装置及其运行态势，这也是目前智能电网领域的研究前沿^[63-64]。

4.3 能源局域网的市场交易关键技术

1) 能源局域网市场的运行机制与商业模式。

余量市场仅是能源局域网的一种可能的交易形式，根据区域网络以及交易能源对象的不同特点，需要进一步研究能源局域网的市场交易机制，实现入网用户的对等交易(P2P 交易)^[65-66]，形成交易性网络(Transactive Grid)^[68]。在市场交易机制的基础之上，有必要深入研究局域网市场的价格形成机制、阻塞管理机制和偏差能量平衡机制^[69]。希望通过市场的价格信号驱动，形成能源局域网的“自主交易、主动调节”，实现社会效益与经济效益的最大化。

2) 能源局域网市场的区块链交易技术。

能源局域网的市场交易依然需要依赖区域的交易中心执行。随着参与市场的用户群体不断扩大，交易中心的执行效率和公正性将面临严峻的考验。区块链技术是一种新型的分布式数据库技术，

能够支撑海量用户的点对点交易，并能在去交易中心的条件下实现可信交易，同时能够以智能合约的形式自动执行交易结果，非常有希望成为未来能源局域网市场交易平台的支撑技术^[70]。

3) 能源局域网市场的机器学习交易技术。

能源局域网的市场交易体现出“交易量少频多、市场变化复杂”的特点，无法依靠人力执行交易。现有的研究成果尚未实现可以反映市场情况的交易策略^[59]。面向复杂的市场变化，可以采用机器学习的方式，自适应的动态学习市场态势，设计全自动的竞价策略，并依托能源物联网和交易区块链实现智能交易。

5 结论

能源局域网是实现一定区域内电、气、热等多种能源高效集成，连接能源主干网运行并具备与非电能源系统间转换与交互能力的综合能源系统。能源局域网靠近能源的消费侧，可能交互的非电能源类型更加多样，能源消纳的手段也更加丰富。根据运行目标的区别，能源局域网可以实现“电气定热”、“电热定气”和“气热定电”三大类共 12 个象限的运行模式，显著增加能源消费侧的运行灵活性。通过引入能源局域网的余量市场交易机制，引导清洁的新能源电力进入非电能源系统，有望在局部区域内试行市场化的现货交易，为牵一发而动全身的全国性电力市场改革积累宝贵经验。能源局域网的运行模式与市场交易机制充分体现了能源互联网“多能互补、多源协同、开放民主、对等共享”的核心理念，在一系列关键技术的支撑下，有望显著提升系统能源的综合利用效率，增强能源系统对高比例随机波动新能源的消纳能力。

致 谢

感谢 Bath 大学的 Furong Li 教授在能源局域网余量市场相关研究理念方面的支持与帮助，感谢课题组的万灿博士、延星博士、陈晓爽同学、邢学韬同学、李佳蓉同学在本文研究素材整理、撰写与编辑过程中的帮助。

参考文献

- [1] 李俊峰,时璟丽.国内外可再生能源政策综述与进一步促进我国可再生能源发展的建议[J].可再生能源, 2006(1): 1-6.
Li Junfeng, Shi Jingli. International and Chinese incentive policies on promoting renewable energy development and

- relevant proposals[J]. Renewable Energy, 2006(1): 1-6(in Chinese).
- [2] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.
- Lu Zongxiang, Li Haibo, Qiao Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158(in Chinese).
- [3] 张玥. 2011 年-2015 年中国弃风数据统计[J]. 风能, 2016(2): 34-35.
- Zhang Yue. Statistics of abandoned wind in China from 2011 to 2015[J]. Wind Energy, 2016(2): 34-35(in Chinese).
- [4] Lauber V, Mez L. Three decades of renewable electricity policies in Germany[J]. Energy & Environment, 2004, 15(4): 599-623.
- [5] Lund H, Mathiesen B V. Energy system analysis of 100% renewable energy systems-The case of Denmark in years 2030 and 2050[J]. Energy, 2009, 34(5): 524-531.
- [6] Rifkin J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. New York: Palgrave Macmillan, 2011.
- [7] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
- Dong Zhaoyang, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11(in Chinese).
- [8] 杨方, 白翠粉, 张义斌. 能源互联网的价值与实现架构研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3495-3502.
- Yang Fang, Bai Cuifen, Zhang Yibin. Research on the value and implementation framework of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3495-3502(in Chinese).
- [9] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 714-727.
- Cao Junwei, Meng Kun, Wang Jiye, et al. An energy internet and energy routers[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2014, 44(6): 714-727(in Chinese).
- [10] 曾鸣, 杨雍琦, 李源非, 等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 681-691.
- Zeng Ming, Yang Yongqi, Li Yuanfei, et al. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 681-691(in Chinese).
- [11] Qadrdan M, Wu Jianzhong, Jenkins N, et al. Operating strategies for a GB integrated gas and electricity network considering the uncertainty in wind power forecasts[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(1): 128-138.
- [12] 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 Zhao, Zhou Xiaoxin, Shang Yuwei, et al. Exploring the concept, key technologies and development model of energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022(in Chinese).
- [13] Jin Xiaolong, Mu Yunfei, Jia Hongjie, et al. Optimal day-ahead scheduling of integrated urban energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 180: 1-13.
- [14] 肖白, 张屹, 穆钢, 等. 配电网电压等级的合理配置[J]. 东北电力大学学报, 2009, 29(2): 5-11.
- Xiao Bai, Zhang Yi, Mu Gang, et al. Rational scheming of voltage class in distribution system[J]. Journal of Northeast Dianli University Natural Science Edition, 2009, 29(2): 5-11(in Chinese).
- [15] Lehner M, Tichler R, Steinmüller H, et al. Power-to-gas: technology and business models[M]. Springer, 2014(请核对出版地).
- [16] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
- Wang Yi, Zhang Ning, Kang Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681(in Chinese).
- [17] 程林, 刘琛, 朱守真, 等. 基于多能协同策略的能源互联微网研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 132-138.
- Cheng Lin, Liu Chen, Zhu Shouzhen, et al. Study of micro energy internet based on multi-energy interconnected strategy[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 132-138(in Chinese).
- [18] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Energy storage systems-characteristics and comparisons[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(5): 1221-1250.
- [19] Agbossou K, Kolhe M, Hamelin J, et al. Performance of a stand-alone renewable energy system based on energy storage as hydrogen[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 633-640.
- [20] Psola J H, Estelmann S, Henke M. Potential of methane usage as long-term energy storage and hybrid systems[C]//Proceedings of International ETG Congress 2015; Die Energiewende-Blueprints for the new energy age. Bonn, Germany: IEEE, 2015: 1-6.
- [21] Shabanpour-Haghighi A, Seifi A R. An integrated

- steady-state operation assessment of electrical, natural gas, and district heating networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3636-3647.
- [22] 吕太, 王正, 康慧. 热电厂供热范围的探讨[J]. 暖通空调, 2008, 38(8): 52-54, 46.
- Lü Tai, Wang Zheng, Kang Hui. Research on heating scope of combined heating and power plants[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(8): 52-54, 46(in Chinese).
- [23] Bao H S, Wang R Z, Oliveira R G, et al. Resorption system for cold storage and long-distance refrigeration[J]. Applied Energy, 2012, 93: 479-487.
- [24] Baumann C, Schuster R, Moser A. Economic potential of power-to-gas energy storages[C]//Proceedings of the 2013 10th International Conference on the European Energy Market (EEM). Stockholm, Sweden: IEEE, 2013: 1-6.
- [25] 丁明, 刘新宇, 朱乾龙, 等. 电网风电接纳能力建模及影响因素分析[J]. 电气工程学报, 2016, 11(7): 1-8, 17.
- Ding Ming, Liu Xinyu, Zhu Qianlong, et al. Research on the model and influences of power grid's ability of admitting wind power[J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 11(7): 1-8, 17(in Chinese).
- [26] 曾鸣, 杨雍琦, 向红伟, 等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 102-111.
- Zeng Ming, Yang Yongqi, Xiang Hongwei, et al. Optimal dispatch model based on coordination between “generation-grid-load-energy storage” and demand-side resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 102-111(in Chinese).
- [27] 艾欣, 赵阅群, 周树鹏. 空调负荷直接负荷控制虚拟储能特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1596-1603.
- Ai Xin, Zhao Yuequn, Zhou Shupeng. Study on virtual energy storage features of air conditioning load direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1596-1603(in Chinese).
- [28] 葛少云, 郭建祎, 刘洪, 等. 计及需求侧响应及区域风光出力的电动汽车有序充电对电网负荷曲线的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1806-1811.
- Ge Shaoyun, Guo Jianyi, Liu Hong, et al. Impacts of electric vehicle's ordered charging on power grid load curve considering demand side response and output of regional wind farm and photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1806-1811(in Chinese).
- [29] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
- Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107(in Chinese).
- [30] 国家能源局. 关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见[EB/OL]. [2015-07-23]. http://www.nea.gov.cn/2015-07/23/c_134440478.html.
- National Energy Administration. Guiding opinions on promoting the demonstration project construction of renewable energy microgrid[EB/OL]. [2015-07-23]. http://www.nea.gov.cn/2015-07/23/c_134440478.html (in Chinese) (请核对英文标题).
- [31] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.
- Wang Chengshan, Li Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23(in Chinese).
- [32] D'Adamo C, Abbey C, Jupe S, et al. Development and operation of active distribution networks: Results of CIGRE C6.11 working group[C]//Proceedings of the CIRED 21st International Conference on Electricity Distribution. Frankfurt, Germany: CIRED, 2011: 6-9.
- [33] 赵彪, 赵宇明, 王振, 等. 基于柔性中压直流配电的能源互联网系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4843-4851.
- Zhao Biao, Zhao Yuming, Wang Yizhen, et al. Energy internet based on flexible medium-voltage DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4843-4851(in Chinese).
- [34] Valverde G, Van Cutsem T. Model predictive control of voltages in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2152-2161.
- [35] Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: an international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(5): 2039-2061.
- [36] Schiebahn S, Grube T, Robinius M, et al. Power to gas: technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(12): 4285-4294.
- [37] Kopp M. Operational and economical analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis[R]. Wiesbaden: RheinMain University of Applied Sciences, 2016.
- [38] 顾阳, 李予阳, 庞彩霞. 京穗两大电力交易中心获批组建[EB/OL]. 北京: 经济日报, (2016-03-02)[2016-09-10]. http://www.ce.cn/cysc/ny/gdxw/201603/02/t20160302_9221543.shtml.
- [39] Ilic D, Da Silva P G, Karnouskos S, et al. An energy market for trading electricity in smart grid neighbourhoods[C]//Proceedings of the 2012 6th IEEE International Conference on Digital Ecosystems

- Technologies (DEST) . Campione d'Italia , Italy : IEEE , 2012 : 1-6 .
- [40] Vogt H , Weiss H , Spiess P , et al . Market-based prosumer participation in the smart grid[C]//Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies . Dubai , United Arab Emirates : IEEE , 2010 : 592-597 .
- [41] Lampropoulos I , Vanalme G M A , Kling W L . A methodology for modeling the behavior of electricity prosumers within the smart grid[C]//Proceedings of 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe) . Gothenberg : IEEE , 2010 : 1-8 .
- [42] 林今, 张亦弛, 宋永华, 等 . 基于能源互联网思维的我国待弃水电制氢消纳模式与经济可行性分析[J] . 中国能源 , 2016 , 38(4) : 5-9 .
- Lin Jin , Zhang Yichi , Song Yonghua , et al . Analysis of abandoned hydroelectric power mode and economic feasibility of hydrogen consumption to China's energy based on internet thinking[J] . Energy of China , 2016 , 38(4) : 5-9(in Chinese) .
- [43] Cai Yu , Lin Jin , Wan Can , et al . A stochastic bi-level trading model for an active distribution company with distributed generation and interruptible loads[J] . IET Renewable Power Generation , 2016 , doi : 10 . 1049/iet-rpg . 2016 . 0364 .
- [44] Hoekman S K , Broch A , Robbins C , et al . CO₂ recycling by reaction with renewably-generated hydrogen[J] . International Journal of Greenhouse Gas Control , 2010 , 4(1) : 44-50 .
- [45] Kupecki J , Badyda K . SOFC-based micro-CHP system as an example of efficient power generation unit[J] . Archives of Thermodynamics , 2011 , 32(3) : 33-43 .
- [46] Mori D , Hirose K . Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles[J] . International Journal of Hydrogen Energy , 2009 , 34(10) : 4569-4574 .
- [47] Müller K , Arlt W . Status and development in hydrogen transport and storage for energy applications[J] . Energy Technology , 2013 , 1(9) : 501-511 .
- [48] 薛小代, 梅生伟, 林其友, 等 . 面向能源互联网的非补燃压缩空气储能及应用前景初探[J] . 电网技术 , 2016 , 40(1) : 164-171 .
- Xue Xiaodai , Mei Shengwei , Lin Qiyu , et al . Energy internet oriented non-supplementary fired compressed air energy storage and prospective of application[J] . Power System Technology , 2016 , 40(1) : 164-171(in Chinese) .
- [49] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等 . 电动汽车接入电网的影响与利用[J] . 中国电机工程学报 , 2012 , 32(4) : 1-10 .
- Hu Zechun , Song Yonghua , Xu Zhiwei , et al . Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J] . Proceedings of the CSEE , 2012 , 32(4) : 1-10(in Chinese) .
- [50] Burer M , Tanaka K , Favrat D , et al . Multi-criteria optimization of a district cogeneration plant integrating a solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycle , heat pumps and chillers[J] . Energy , 2003 , 28(6) : 497-518 .
- [51] 赵虎, 阎维平, 郭江龙, 等 . 利用吸收式热泵回收电厂循环水余热的方案研究[J] . 电力科学与工程 , 2012 , 28(8) : 64-69 .
- Zhao Hu , Yan Weiping , Guo Jianglong , et al . Program of research recovering the waste heat of power plant circulating water by using the absorption heat pump[J] . Electric Power Science and Engineering , 2012 , 28(8) : 64-69(in Chinese) .
- [52] Krause T , Andersson G , Frohlich K , et al . Multiple-energy carriers : modeling of production , delivery , and consumption[J] . Proceedings of the IEEE , 2011 , 99(1) : 15-27 .
- [53] 王英瑞, 曾博, 郭经, 等 . 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J] . 电网技术 , 2016 , 40(10) : 2942-2950 .
- Wang Yingrui , Zeng Bo , Guo Jing , et al . Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity , heat and gas[J] . Power System Technology , 2016 , 40(10) : 2942-2950(in Chinese) .
- [54] 潘昭光, 孙宏斌, 郭庆来 . 面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J] . 电网技术 , 2016 , 40(6) : 1627-1634 .
- Pan Zhaoguang , Sun Hongbin , Guo Qinglai . Energy internet oriented static security analysis method for multi-energy flow[J] . Power System Technology , 2016 , 40(6) : 1627-1634(in Chinese) .
- [55] Alabdulwahab A , Abusorrah A , Zhang Xiaping , et al . Stochastic security-constrained scheduling of coordinated electricity and natural gas infrastructures[J] . IEEE Systems Journal , 2015 , doi : 10 . 1109/JSYST . 2015 . 2423498 .
- [56] Wan Can , Lin Jin , Song Yonghua , et al . Probabilistic forecasting of photovoltaic generation : an efficient statistical approach[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2016 , doi : 10 . 1109/TPWRS . 2016 . 2608740 .
- [57] Wan Can , Xu Zhao , Pinson P , et al . Probabilistic forecasting of wind power generation using extreme learning machine[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2014 , 29(3) : 1033-1044 .
- [58] Paris J , Donnal J S , Leeb S B . NilmDB : the non-intrusive load monitor database[J] . IEEE Transactions on Smart Grid , 2014 , 5(5) : 2459-2467 .
- [59] Da Silva P C , Ilić D , Karnouskos S . The impact of smart grid prosumer grouping on forecasting accuracy and its benefits for local electricity market trading[J] . IEEE Transactions on Smart Grid , 2014 , 5(1) : 402-410 .

- [60] 朱想, 居蓉蓉, 程序, 等. 组合数值天气预报与地基云图的光伏超短期功率预测模型[J]. 电力系统自动化, 39(6): 4-10, 74.
- Zhu Xiang, Ju Rongrong, Cheng Xu, et al. A very short-term prediction model for photovoltaic power based on numerical weather prediction and ground-based cloud images[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 4-10, 74(in Chinese).
- [61] Lin Jin, Wan Can, Song Yonghua, et al. Situation awareness of active distribution network: roadmap, technologies and bottlenecks[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(3): 35-42.
- [62] Wind river, helix cloud[EB/OL]. <http://www.windriver.com.cn/announces/helix-cloud/>.
- [63] 百度天工-智能物联网平台[EB/OL]. <http://cloud.baidu.com/solution/iot/index.html?t=cp:nsempf:pcpp:ge-cldpu:iotci:kw:18796>.
- Baidu Tiangong- smart internet of things cloud platform [EB/OL]. <http://cloud.baidu.com/solution/iot/index.html?t=cp:nsempf:pcpp:ge-cldpu:iotci:kw:18796>(in Chinese).
- [64] Gao Pengfei, Lin Shunfu, Xu W. A novel current sensor for home energy use monitoring[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 2021-2028.
- [65] He Dawei, Lin Weixuan, Liu Nan, et al. Incorporating non-intrusive load monitoring into building level demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1870-1877.
- [66] 李芙蓉. 适应综合能源局域网的市场化改革方案(英文)[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3693-3698.
- Li Furong. Market reforms for integrated local energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3693-3698(in Chinese).
- [67] Piclo P2P energy trading[EB/OL]. <https://www.openutility.com/piclo/>.
- [68] Rahimi F, Ipakchi A, Fletcher F. The changing electrical landscape: end-to-end power system operation under the transactive energy paradigm[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(3): 52-62.
- [69] Vytelingum P, Ramchurn S D, Voice T D, et al. Trading agents for the smart electricity grid[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and

Multiagent Systems. Richland, SC: ACM, 2010, 1: 897-904.

- [70] 张宁, 王毅, 康重庆, 等. 能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4011-4022.

Zhang Ning, Wang Yi, Kang Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4022(in Chinese).



宋永华

收稿日期: 2016-09-19.

作者简介:

宋永华(1964), 男, 教授, 英国皇家工程院院士, IEEE/IET Fellow, 主要从事电力系统运行与优化、电力市场、智能电网、能源互联网领域的研究工作, yhsong@tsinghua.edu;



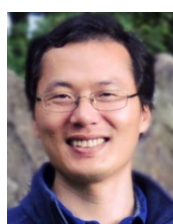
林今

林今(1985), 男, 博士, 助理教授, 主要从事新能源电力系统运行与控制、工业微网、主动配电网、能源互联网领域的研究工作, 本文通讯作者, linjin@tsinghua.edu;



胡泽春

胡泽春(1979), 男, 副教授, 主要研究方向为电动汽车、智能电网、电力系统优化规划与运行, zechu@tsinghua.edu.cn;



董树锋

董树锋(1982), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统自动化、主动配电网、微电网, dongshufeng@zju.edu.cn.

(编辑 乔宝榆)

Energy Distribution Network: Infrastructure, Operation Mode and Market Mechanism

SONG Yonghua^{1,2}, LIN Jin¹, HU Zechun¹, DONG Shufeng¹

(1. Tsinghua University; 2. College of Electrical Engineering)

KEY WORDS: energy internet; energy distribution network (EDN); infrastructure; operation modes; surplus market; power market

Accessing flexibilities in energy demand side will pave the way for a higher integration of variable and intermittent renewable energy in power systems. Energy distribution network (EDN) is a novel concept of

integrating flexibilities in demand side by interoperating diverse energies such as electricity, gas and heat within a local area, as illustrated by Fig. 1

With highly flexible energy interoperations, EDN

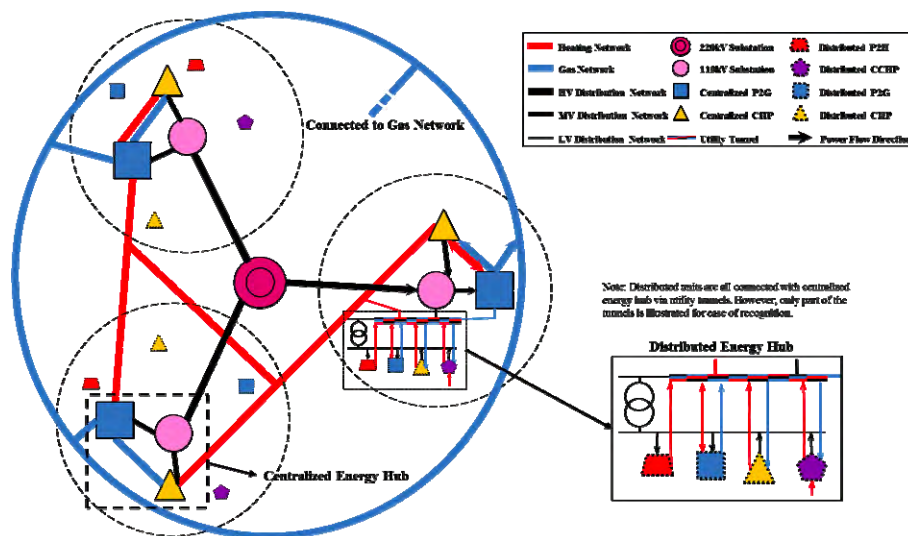


Fig. 1 Network infrastructure illustration of energy distribution network

can actively respond to variable renewable energy, leading to a higher renewable share in power systems. Operating flexibilities are brought by the modes of EDN including (a) Determining Heat by Power and Gas, (b) Determining gas by power and heat, (c) Determining power by gas and heat. Each mode targets to a four quadrants conversions respectively relying on storage amount of electricity, heat and gas.

A surplus market of EDN is proposed in the paper aiming at trading large amounts of renewable energy surplus, which can be a positive attempt of China's power market reformation. The surplus market is constructed as a peer-to-peer CDA based real-time market that can help the neighboring consumers to trade surplus electricity with each other. The energy company uses a legitimate trading mechanism to enable electricity providers and consumers trading surplus electricity in a real-time market under the same energy distribution network, as illustrated by Fig. 2.

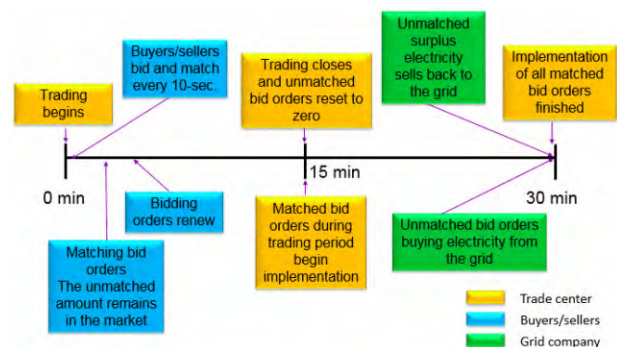


Fig. 2 Surplus electricity trading mechanism

The proposed study proves that by introducing such surplus electricity real-time market, the implementation of DERs can be further improved. Furthermore, both providers and consumers can benefit from such trading market by paying less for purchasing electricity and selling more for providing surplus electricity.

Finally, the outlook of potential breakthroughs is summarized in the paper.