

Development, Basic Concept and Framework of Energy Internet

Shengyu Zhou, Linxian Hu

School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang
Email: 17s106118@stu.hit.edu.cn, linxian_hu@163.com

Received: Apr. 5th, 2018; accepted: Apr. 21st, 2018; published: Apr. 28th, 2018

Abstract

With the exhaustion of fossil fuels and the worsening of environmental pollution, Energy Internet has attracted great attention of scholars all over the world. First, the emergence background and significance of Energy Internet are described. Second, the basic concept of Energy Internet is comprehensively reviewed. Third, the present research state of Energy Internet is introduced. Finally, the basic framework of Energy Internet without transportation system is established.

Keywords

Energy Internet, Concept, Development Status, Framework

能源互联网发展、概念及其基本框架

周升戔, 胡林献

哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨
Email: 17s106118@stu.hit.edu.cn, linxian_hu@163.com

收稿日期: 2018年4月5日; 录用日期: 2018年4月21日; 发布日期: 2018年4月28日

摘要

随着化石能源的日益枯竭、环境污染日益严重, 能源互联网引起了国内外学者的广泛关注。首先描述了能源互联网的产生背景及研究意义, 其次对能源互联网的基本概念进行了全面的综述, 然后介绍了能源互联网在国内外的的发展现状, 最后建立了不含交通系统的能源互联网基本框架。

关键词

能源互联网, 基本概念, 研究现状, 基本框架

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

能源是国民经济的重要物质基础, 更是人类社会赖以生存和发展的物质基础。人类社会的每一次重大变革都与能源的开发利用息息相关。然而自人类进入工业社会以来, 随着工业的迅速发展、人口持续增长和人民生活水平的不断提高, 人类消耗石油、煤炭等目前大量使用的传统化石能源的速度远大于其在自然界中生成的速度, 而新的能源生产供应体系又未能及时建立, 从而导致传统化石能源趋于枯竭。与此同时, 国际能源署(International Energy Agency, IEA)发布的《IEA 世界能源展望 2016: 能源与空气质量特别报告》[1]指出, 能源的生产和利用, 尤其是在未受监管、监管不力或效率低下情况下的燃料消耗, 是迄今最重要的人造空气污染物排放源。木柴或其他固体燃料的不完全燃烧产生的颗粒物排放会造成烟尘环境; 而城市中密集的煤炭、石油等化石燃料的燃烧所产生的二氧化硫、氮氧化物排放则是造成室外污染的主要原因。空气污染已经成为了继高血压、饮食风险和吸烟之后的人类第四大健康威胁。

为了避免能源枯竭与环境污染对人类社会产生更进一步的危害, 各国必须改变生产和利用能源的方式。自第二次工业革命以来, 电力作为一种高效、清洁且可实现多种能源相互转换的能源利用形式, 在世界经济社会发展中发挥着越来越重要的作用[2]。它是当今世界中能源最重要的转化形式, 是国民经济乃至国家安全的重要保障。越来越多的一次能源被转换为电力的形式加以利用, 很多可再生的清洁能源也只有转换成电能才能广泛地得到应用。电力和能源是紧密联系在一起, 因此, 能源变革的实现也必将以电力产业的变革为重点。

传统的发电模式以火力发电为主, 其发电量在总发电量中所占比重为 70% 以上, 而火力发电输出的电能大多由化石能源的燃烧所产生的热能转换而成。为了遵循可持续发展的原则, 世界各国都在积极寻求新型可持续的电力供应技术, 借以替代传统的发电方式。其中水力发电利用水位落差产生廉价无污染的电力, 但可能会造成生态破坏; 核能发电不会造成空气污染, 但发电成本较高, 且一旦发生核事故, 将造成严重的危害; 风力发电将风能转换为电能发出, 光伏发电则是将太阳能转换为电能发出, 而风能、太阳能都是清洁能源, 且都具有取之不尽、用之不竭的优点。但由于风能、太阳能具有随机性、波动性特征, 为了最大程度地利用这些间歇性可再生能源, 并解决资源在空间上分布不均衡的问题, 实现对负荷多种能源形式的高可靠供给, 学者们相继提出了微电网技术、智能电网技术, 促使传统电网逐步向智能电网过渡。

然而, 智能电网的物理实体主要是电力系统, 能量在智能电网中只能以电能一种形式传输和使用[3], 不同能源之间的传输仍旧是独立进行的, 电能、天然气、热能、冷能等的传输互不干扰, 有着各自的传输网络。从能源消耗方面而言, 虽然通过支持可再生能源的接入, 分布式发电技术能够减少火力发电在发电总量中所占的比重, 但用户对于除了电能以外的其他能源的需求(如热能、冷能等)却依旧消耗着大量的化石能源, 因此光靠分布式发电不能够完全缓解目前能源紧张的问题, 分布式能源的大规模高效利用依旧难以实现[4]。因此, 综合天然气、电能、热能等各个能源网络进行混合供能, 以便实现多种能源子

系统之间的协调规划、优化运行, 协同管理、交互响应和互补互济, 这是满足系统内多元化用能需求、有效提升能源利用效率、促进能源可持续发展的必然趋势。

2. 能源互联网的基本概念

美国著名学者杰里米·里夫金先生在他的著作《第三次工业革命》[5]中首次提出了“能源互联网”的愿景。里夫金先生在书中展示了他对第三次工业革命的宏伟构想, 他认为第三次工业革命将会是网络通信技术与可再生能源技术的融合, 而能源互联网则是第三次工业革命的核心支柱。他设想, 未来传统发电技术将被可再生能源发电技术逐步替代, 而现有的建筑也将被改造成具有微型发电厂功能的两用场所; 以氢能源作为储存介质的储能技术将得到发展, 以便存储间歇性能源; 且现有的汽车将被插电式电动车、燃料电池动力车所替代, 促使交通系统将向电气化转型。而能源互联网则是将各个建筑物就地生产、存储的能源联网共享的核心环节, 它利用互联网技术将各大电力网转化为能源共享网络, 使得数以百万计自助生产能源的人们能够通过点对网络的方式分享彼此的剩余能源。

里夫金先生提出的“能源互联网”构想引起了全世界学者的广泛关注, 不少研究人员都从各自的角度提出了对能源互联网技术内涵的理解, 但尚未形成一种统一的定义。文献[3]认为, 能源互联网是以电力系统为核心, 以互联网及其他前沿信息技术为基础, 以分布式可再生能源为主要一次能源, 与天然气网络、交通网络等其他系统紧密耦合而形成的复杂多网流系统。文献[6]认为, 能源互联网是指借鉴互联网的概念, 通过互联网技术、电力电子技术和信息技术将可再生分布式能源采集装置和存储装置作为网络节点与负荷节点联结起来, 从而将传统电网转变为具有快速治愈能力的智能化数字网络, 实现能源和信息的双向流通网络, 合理分配共享能源。文献[7]则将能源互联网定义为以互联网技术为基础, 以电力系统为中心, 将电力系统与天然气网络、供热网络以及工业、交通、建筑系统等紧密耦合, 横向实现电、气、热、可再生能源等“多源互补”, 纵向实现“源-网-荷-储”各环节高度协调, 生产和消费双向互动, 集中与分布相结合的能源服务网络。

从上述各种对能源互联网内涵的不同理解中不难归纳出, 能源互联网是对智能电网的进一步发展和深化, 它的物理实体由单一的电力系统转变为由电力系统与天然气网络、供热供冷系统等其它系统紧密耦合而成的能源共享网络。在能源互联网中, 能量不再仅仅以电能的形式传输和使用, 而是可以在电能、化学能、热能、冷能等多种形式的能量间相互转化并统一调度。能源互联网为用户提供了一个公共的能源交换与共享的平台, 用户将作为“能源消费者”的身份, 更将作为“能源供应商”的身份参与到能源互联网中, 并可根据自身能源储量实时转变身份。能源互联网技术的诞生将极大程度地提升一次能源的利用效率, 并将最大限度地减少环境污染, 有利于人类社会的可持续发展。

3. 能源互联网研究现状

3.1. 国外研究现状

2008年, 美国国家科学基金项目资助了北卡罗莱纳州立大学的黄勤教授研发的未来可再生电能传输与管理(the Future Renewable Electric Energy Delivery and Management, FREEDM)系统[8], 该系统支持可再生分布式能源的“即插即用”, 利用能源路由器优化能源分配; 另外, 该系统利用固态变压器实现分布式能源、负荷和储能装置的接入, 利用智能配电系统软件实现了对分布式能源、负荷和储能装置的管理; 并设置了创新性的故障保护装置。德国联邦政府经济和技术部于2008年发起了名为“E-Energy”的技术创新促进计划[9], 开发了基于能量传输系统的信息和通信控制技术, 且使用“智能电表”为系统的网络节点提供必要信息; 并推出了适用于双向系统的ICT(Information and Communication Technology)解决方案, 从而首次实现了“以产定销”模式的实际应用。瑞士联邦政府能源办公室与产业部门一同发起

了名为“Vision of Future Energy Networks”的研究项目[10], 重点研究分布式能源的存储和转化以及多能源传输系统的应用, 并提出了两个概念: 即用以存储和转换能源的设备“混合能源路由器”, 以及组合传输不同能源的“能源内部互联器”。欧盟于2011年启动了未来智能能源互联网(Future Internet for Smart Energy, FINSNEY)项目[11], 旨在使未来的能源互联网实现自动化故障修复、功率分析控制以及电网维护的功能, 并为其构建改进的ICT平台。2010年, 日本开展了“智慧能源共同体”示范工程[12], 提出了一个需求侧响应能源系统, 并推动了生产者与用户间能源共同利用模式的形成, 且系统中创造性地引入了智能热能供应链, 借以实现各建筑间的热能共享。韩国首尔市政府于2011年发布了“智慧首尔2015”计划[13], 期望从智能电网、云计算、绿色交通信息化以及智能环境等方面, 实现“智能绿色城市”的信息化发展目标。

很多学者以及独立团队的研究也对能源互联网的发展作出了很大的贡献。文献[14]将能源互联网称作“智能电网2.0”, 提出了能源互联网的技术架构, 并引用了能源互联网的五层架构体系。作者还预言, 未来的能源生产、消费与共享将与当今世界的信息共享一样便利。文献[15]提出了一个可容纳任意数量能量载体传输和转换的稳态潮流模型, 并推导了多能量载体优化调度的总体最优化条件。文献[16]提出了一种新型能源路由器模型结构“GRecRouter”, 该模型能够减少能源通过路由器时的能量损耗, 有利于能源的高效利用。文献[17]介绍了风能转换系统的最新结构、组成及技术, 并论述了利用通过物理网络技术设计支持能源互联网的新一代风能转换系统的必要性。文献[18]重点讨论了智能电网的实现技术, 探讨了新兴的物联网技术如何为能源互联网提供可行的解决方案, 并验证了利用小型廉价的网络支持设备作为关键组件来设计未来智能电网系统的可行性。文献[19]针对能源路由器设计了一种能准确评估其传输稳定性的新型能量函数, 并为能源互联网特别设计了基于故障能量脉冲的反馈控制方法, 以使系统维持稳定。文献[20]介绍了一个具有代表性的能源互联网架构——未来可再生电能传输管理系统, 提出了能源预测、价格调整模型、分布式能源、稳定性评估等能源互联网的多种功能要求, 并总结了发展能源互联网将遇到的复杂性、效率性、可靠性和安全性等挑战。文献[21]结合基于多智能体的一致算法, 提出了一种应用于能源互联网分布式电机中的新的分布式协调控制器, 从而使能源互联网能够作为旋转备用系统运行。

3.2. 国内研究现状

2014年, 全球能源互联网发展合作组织主席刘振亚提出了构建全球能源互联网、实施清洁替代和电能替代的发展思路, 期望建设以特高压电网为骨干网架(通道)、以输送清洁能源为主、全球互联的坚强智能电网。2015年, 习近平主席在联合国峰会上发表了题为《谋共同永续发展, 做合作共赢伙伴》的讲话, 倡议各国共同构建全球能源互联网, 推动以清洁和绿色方式满足全球电力需求。同年, 国务院在李克强总理的签批下印发了《关于积极推进“互联网+行动”的指导意见》, 号召国内企业顺应世界“互联网+”的发展趋势, 主张通过互联网促进能源系统扁平化、加强分布式能源网络建设, 并鼓励探索能源消费新模式。北京电力公司在国家绿色能源示范县延庆地区开展了智能电网创新示范区建设工程, 设计了城市互联网的基础框架, 建成了能大幅提高地区能量传输网络优化配置能力的主动配电网, 建设了基于能源综合大数据管理平台的能源管理中心, 并探索了面向能源互联网的多方参与、利益共赢的渐进式合作建设与运营模式[22]。

多能源混合供能系统是由单一供能向能源互联网发展的重要过渡, 因此国内学者在多能源混合供能领域开展了较多研究。其中, 文献[4]以运行成本为目标函数建立了电气热混合供能系统的数学模型, 并通过改进的遗传算法对目标函数进行优化, 以避免在优化过程中为追求运行成本最小化而产生的启停次数过多的结果; 最后, 以IEEE14节点馈线图为基础的电气热混合供能算例验证了混合供能的可行性。文献[23]建立了考虑不同费率结构以及风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型, 以天然气和购电总成

本建立目标函数, 并采用具有较强局部搜索能力的 NR-PSO 算法进行优化求解, 验证了所提方法能够平抑清洁能源的波动性并实现多种电能完全消纳。文献[24]构建了电转气(Power-to-gas, P2G)技术在综合能源系统协同规划及运行中的经济性评估模型, 并利用一个 9 节点能源中心的电气热混联能源测试系统来验证 P2G 技术在规划及消纳可再生能源中所具有的经济性效益。而现阶段学者们的研究正在由多能源混合供能系统向能源互联网过渡。例如, 文献[25]描述了能源局域网相对于能源互联网的主要特征及运行特点, 并以多能互补为基础, 系统地研究了能源局域网的典型方案, 提出了新型运行机制。文献[3]探讨了能源互联网的基本架构和关键技术, 并探讨了电力系统与天然气网络的融合、电力系统与交通系统的融合、广域分布式设备协调控制等核心问题。文献[26]结合了多能源的时空特性, 提出了面向可再生能源消纳的多能源系统研究框架, 从基本建模、运行优化、系统规划等多个角度评述了现有的研究并提出了相应的思考。

4. 能源互联网基本框架

结合文献[4] [24] [26] [27]提出的能源互联网框架, 本文给出了未考虑交通系统的能源互联网基本框架, 如图 1 所示。其中, 能源中心是实现多能源混合供能系统的枢纽。它是能源互联网中的能源接口, 各种能源可以在能源中心内部被储存、被负荷消耗, 或是被转换为其他形式的能源输出[28]。

从图 1 中可以看出, 能源互联网由电力网络、天然气网络、供热供冷系统、分布式发电单元、储能设备、燃气轮机、燃料电池、锅炉、制冷机等部分组成, 支持光能、风能、天然气、电能、热能、冷能等不同能源间的相互转换, 实现了一次能源侧的多种能源利用率最大化, 满足了用户侧的多样性需求, 并保证了配电网、供热供冷网络的安全、稳定运行。

4.1. 分布式发电单元

分布式发电单元主要由风力发电、光伏发电等可再生能源发电设备组成, 它是将光能、风能等清洁

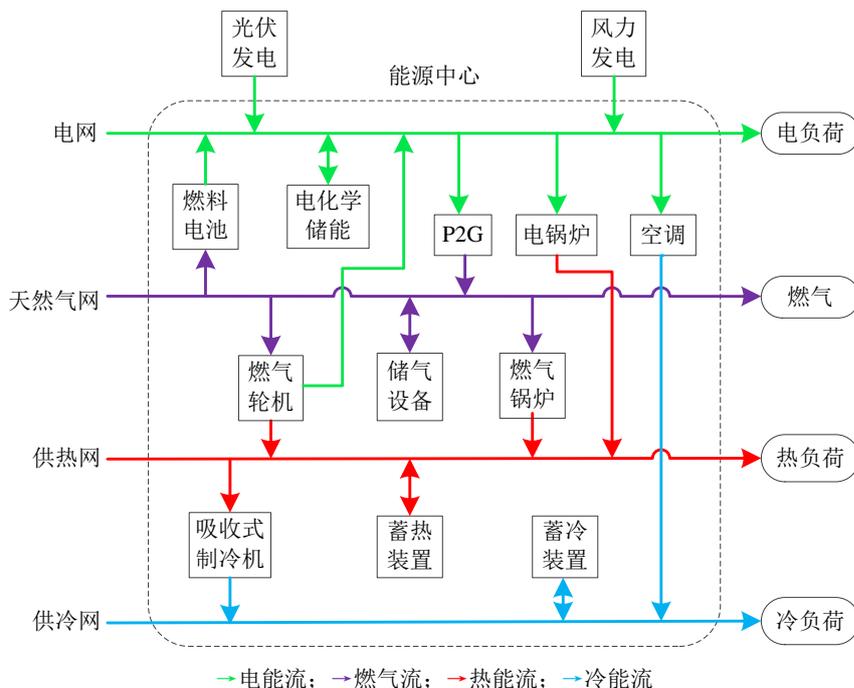


Figure 1. Basic framework of energy internet
图 1. 能源互联网基本框架

能源转换为便于传输和利用的电能的核装置。

风力发电的基本原理为: 风以一定的速度和攻角流过桨叶, 使风轮获得旋转力矩而转动, 从而将风的动能转换为机械能; 而风轮通过主轴联接齿轮箱, 经齿轮箱增速后带动发电机发电, 从而将机械能转换为电能[29]。当前风力发电系统中主要有恒速恒频异步发电机、变速恒频双馈异步发电机和变速恒频直驱永磁同步发电机三大风力发电机型, 其中变速恒频系统能在较宽的风速范围内保持最佳叶尖速比、最大功率点运行, 是当今的主流风力发电系统[30]。

太阳能光伏发电的原理是光伏效应: 当光伏电池受到太阳光照射时, 半导体内产生电子-空穴对, 即“光生载流子”, 将光子中的能量转化为电子的能量; 在 P-N 结内建电场的作用下, 电子被拉向 N 区, 空穴被驱向 P 区, 产生与内建电场方向相反的光生电场; 光生电场使势垒降低, 产生 N 区指向 P 区的光生电动势, 从而实现了光能向电能的转换。

4.2. 储能设备

在能源互联网中, 每一个能源网络都配备了相应的储能设备, 可将多余的能源存储起来, 并在必要时时刻释放存储的能源加以利用, 从而提高能源利用效率。其中, 电力网络利用电化学储能装置存储电能, 天然气网络利用储气设备存储天然气, 供热网络和供冷网络则分别利用蓄热装置以及蓄冷装置存储热能和冷能。

电化学储能又称为蓄电池储能, 它的充放电原理如下: 蓄电池充电时, 利用外部的电能使电池内部活性物质再生, 从而将电能转换为化学能存储; 蓄电池放电时, 电池负极发生氧化反应, 正极发生还原反应, 从而将存储的化学能转换为电能向外输送。目前的电化学储能装置主要包括铅酸电池、锂离子电池、钠硫电池、钒液流电池、锌空气电池、氢镍电池、燃料电池以及超级电容器等等。

目前的天然气存储方式主要包括气态存储以及液态存储两种方式。气态存储方式包括储气罐储气、地下储气库储气、管道储气、压缩天然气储气等, 其中储气罐储气有低压储气罐储气和高压储气罐储气两种方式; 地下储气库又分为四种形式: 利用枯竭油气田地层穴储气、利用含水多孔地层储气、利用岩盐地穴储气和利用废弃煤矿井储气; 液态存储方式即液化天然气储气, 将天然气用低温常压的方法冷却至零下 162°C 以下, 从而转化为液态天然气存储, 能够大幅度提升天然气存储量[31]。其他新兴的天然气存储技术还有水合物储气技术以及天然气吸附储存技术等。

蓄热技术是一种以蓄热材料为媒介, 将太阳能光热、地热、工业余热、低品位废热等热能储存起来, 并在需要的时候释放的技术, 主要分为显热蓄热、潜热蓄热与热化学蓄热三类。其中, 显热蓄热是利用材料物质自身比热容, 通过温度的变化来进行热量的存储与释放; 潜热蓄热又称为相变蓄热, 它利用材料的自身相变过程吸热、放热来实现热量的存储与释放; 热化学蓄热则利用物质间的可逆化学反应或者化学吸附反应、脱附反应的吸热、放热进行热量的存储与释放[32]。

蓄冷技术是一种利用蓄能介质将冷量储蓄起来, 并在用户需求高峰期时将冷量释放的技术, 包括水蓄冷技术、冰蓄冷技术以及化合物蓄冷技术等等。其中水蓄冷技术属于显热蓄冷技术, 包括多槽混和连接式(迷宫式)、多槽分层连接式、温差分层式、移动布水分层式四种; 冰蓄冷技术属于相变潜热蓄冷技术, 它经历了由静态冰蓄冷到动态冰蓄冷的发展过程; 化合物蓄冷技术目前还未成熟, 实际应用较少[33]。

4.3. 燃气轮机

燃气轮机[34]是一种旋转式热力发动机, 它以连续流动的燃气为工质, 能够将燃料的化学能转变为转子机械能。燃气轮机由压气机、燃烧室、燃气透平三个主要部分组成。燃机轮机常用于驱动发电机, 构成燃气轮机发电机组, 以将天然气的化学能转换为电能。其工作原理如下: 空气进入压气机, 经过逐级

压缩进入燃烧室, 与喷入的天然气混合燃烧, 产生高温燃气; 然后燃气进入透平中做功, 推动燃气透平叶轮转动的同时带动发电机旋转发电; 燃气经燃烧、做功后产生的高温排气可通过换热设备放热以回收利用部分余热。

4.4. 燃料电池

燃料电池[35]由正负电极以及电解质组成, 是一种将化学能转化为电能的发电装置, 其转化过程是一种不经过燃烧的电化学反应: 当燃料电池处于工作状态时, 燃料输入到阳极, 并在电极和电解质的界面上发生燃料氧化与氧气还原的电化学反应, 产生电流, 输出电能。燃料电池包括碱性燃料电池、质子交换膜燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、固体氧化物燃料电池等。

4.5. 锅炉

电锅炉[36]是将电能转换为热能, 使水加热以产生具有一定温度的热水或一定压力的蒸汽的电热装置。电锅炉的工作原理是: 首先由大功率电热元件通电发热, 将电能转换为热能; 或是由电磁感应元件先将电能转换为电磁能, 再将电磁能转换为热能; 其次利用热交换元件直接或间接地将传热媒介(如水)加热, 产生热水或蒸汽。电锅炉的分类方式很多, 但最基本的分类方法是: 按照电热原理和电热元件不同, 电热锅炉可分为电热管电热锅炉、电热棒电热锅炉、电热板电热锅炉、电极式电热锅炉、感应式电热锅炉等五大类。

燃气锅炉是以天然气为燃料, 将天然气内部的化学能转换为热能的供热装置。其供热原理[37]为: 冷水由进水阀进入锅炉, 经过内部燃烧室燃气燃烧加热后产生热水, 热水通过循环水泵送入采暖散热器, 通过辐射和对流换热来供暖; 回水重新进入锅炉里面进行加热, 然后重新流入散热器, 如此循环往复的进行。

4.6. 制冷机

制冷机是一种能够将具有较低温度的被冷却物体的热量转移给环境介质从而获得冷量的机器, 常见的制冷机包括压缩式制冷机、吸收式制冷机、蒸汽喷射式制冷机, 半导体制冷等。

空调是一种典型的压缩式制冷机, 空调制冷技术能够实现电能向冷能的转换。当前我国应用最为广泛的空调主要有热泵型空调器和电辅热泵型空调器两种类型, 制冷原理[38]均为循环逆卡诺原理: 在空气源热泵技术的制冷过程中, 通过自身收集热量效率高的特点, 将低温热源集中并整合形成高温热源。当空调处于制热模式下时, 室内是制热, 室外是制冷; 而当空调处于制冷模式下时, 室内是制冷, 室外是制热。目前的主流制冷剂仍然依靠人工合成的氟氯昂和一些碳氢化合物作为制冷剂原料, 容易对臭氧层造成破坏。

吸收式制冷机组依靠吸收器 - 发生器组的作用完成制冷循环, 采用二元溶液作为工质, 其中低沸点组分用作制冷剂, 利用它的蒸发来制冷; 高沸点的组分用作吸收剂, 利用它对制冷剂蒸汽的吸收作用来完成工作循环[39]。常用的吸收式制冷机包括氨水吸收式制冷机和溴化锂吸收式制冷机两种。

4.7. P2G 技术

P2G 技术是一种将电能转换为气体中蕴含的化学能的技术。P2G 技术的原理为: 首先通过电解水产生氢气和氧气, 从而将电能转换为氢能; 再将生成的氢气进一步和二氧化碳结合, 催化产生甲烷, 从而将氢能转换为甲烷含有的化学能。甲烷是天然气最重要的成分, 可以以一定的配比生成混合气体注入天然气网络进行运输或存储。P2G 技术的出现加强了电气网络和天然气网络的耦合, 实现了能量由电气网络向天然气网络的流动。

5. 结论

发展能源互联网是解决当今世界的能源短缺以及环境污染问题的必然趋势。能源互联网由电气系统、天然气网络、供热供冷系统、交通系统等耦合而成, 结合了互联网技术、可再生能源技术等现代技术, 是对智能电网的进一步发展和深化。本文讨论了能源互联网对于提升能源利用率、促进可持续发展所具有的深远意义, 并从各国政策以及其他学者独立研究成果的角度分析了能源互联网的发展现状。本文探讨了各位学者对能源互联网基本概念的理解, 并基于此构建了不含交通网络的能源互联网基本框架, 框架中包括了负责各种能源转换、储存的能源中心。所提出的框架反映了能源互联网中各种能源网络间的紧密联系, 以及能源互联网提升一次能源利用率的可能性。

参考文献

- [1] Agency, I.E. (2016) Executive Summary. *World Energy Outlook*, 23-30.
- [2] 孙嘉平, 郭基伟. 世界能源与电力宏观指标分析——论4个“E”的关系[J]. *中国电力*, 2005, 38(1): 12-16.
- [3] 董朝阳, 赵俊华, 福控, 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.
- [4] 胡旌伟. 电-气-热混合供能系统优化研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2016.
- [5] Rifkin, J. (2011) *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*. Palgrave Macmillan.
- [6] 钟晓宇, 王晓文. 能源互联网发展综述[J]. *山东工业技术*, 2017(22): 221.
- [7] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. *电网技术*, 2016, 40(1): 114-124.
- [8] Huang, A.Q., Crow, M.L., Heydt, G.T., Zheng, J.P. and Dale, S.J. (2010) The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (Freedm) System: The Energy Internet. *Proceedings of the IEEE*, **99**, 133-148. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2081330>
- [9] 王喜文, 王叶子. 德国信息化能源(E-Energy)促进计划[J]. *电力需求侧管理*, 2011, 13(4): 75-76.
- [10] Geidl, M., Favre-Perrod, P., Klöckl, B. and Koepfel, G. (2006) A Greenfield Approach for Future Power Systems. *Perrod*.
- [11] Pignolet, Y.A., Elias, H., Kyntäjä, T., Cerio, I.M.D.D., Heiles, J., Boëda, D., *et al.* (2013) Future Internet for Smart Distribution Systems. *IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*, 1-8.
- [12] Fan, L., Gao, W. and Wang, Z. (2013) A Model for Regional Energy Utilization by Offline Heat Transport System and Distributed Energy Systems—Case Study in a Smart Community, Japan. *Energy & Power Engineering*, **5**, 190-205. <https://doi.org/10.4236/epe.2013.53019>
- [13] 廖瑾. 来自“智慧首尔 2015”的启示[J]. *上海信息化*, 2012(1): 21-23.
- [14] Cao, J. and Yang, M. (2013) Energy Internet-Towards Smart Grid 2.0. **31**, 105-110. <https://doi.org/10.1109/ICNDC.2013.10>
- [15] Geidl, M. and Andersson, G. (2007) Optimal Power Flow of Multiple Energy Carriers. *IEEE Transactions on Power Systems*, **22**, 145-155. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.888988>
- [16] Hu, C., Wu, C., Xiong, W. and Wang, B. (2011) On the Design of Green Reconfigurable Router toward Energy Efficient Internet. *Communications Magazine IEEE*, **49**, 83-87. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5783989>
- [17] Moness, M. and Moustafa, A.M. (2016) A Survey of Cyber-Physical Advances and Challenges of Wind Energy Conversion Systems: Prospects for Internet of Energy. *IEEE Internet of Things Journal*, **3**, 134-145. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2478381>
- [18] Bui, N., Castellani, A.P., Casari, P. and Zorzi, M. (2012) The Internet of Energy: A Web-Enabled Smart Grid System. *IEEE Network*, **26**, 39-45. <https://doi.org/10.1109/MNET.2012.6246751>
- [19] Sun, Q., Zhang, Y., He, H., Ma, D. and Zhang, H. (2017) A Novel Energy Function-Based Stability Evaluation and Nonlinear Control Approach for Energy Internet. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **PP**, 1-16.
- [20] Wang, K., Yu, J., Yu, Y., Qian, Y., Zeng, D., Guo, S., *et al.* (2017) A Survey on Energy Internet: Architecture, Approach, and Emerging Technologies. *IEEE Systems Journal*, **PP**, 1-14.
- [21] Sun, Q., Han, R., Zhang, H., Zhou, J. and Guerrero, J.M. (2015) A Multiagent-Based Consensus Algorithm for Distri-

buted Coordinated Control of Distributed Generators in the Energy Internet. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **6**, 3006-3019. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2412779>

- [22] 黄仁乐, 蒲天骄, 刘克文, 等. 城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9).
- [23] 熊焰, 吴杰康, 王强, 等. 风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3616-3625.
- [24] 黄国日. 含电转气技术的综合能源系统协同规划及运行策略[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [25] 朱春萍, 沙志成, 朱子钊. 多能互补区域能源典型方案设计与研究[J]. 国网技术学院学报, 2017, 20(3): 40-43.
- [26] 杨经纬, 张宁, 王毅, 康重庆. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 11-24.
- [27] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015(23):15-25.
- [28] Favre-Perrod, P. (2006) A Vision of Future Energy Networks. *Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa*, Durban, 11-15 July 2005, 13-17.
- [29] 王宏华. 风力发电技术系列讲座(1)风力发电的原理及发展现状[J]. 机械制造与自动化, 2010, 39(1): 181-184.
- [30] 宋恒东, 董学育. 风力发电技术现状及发展趋势[J]. 电工电气, 2015(1): 1-4.
- [31] 施然. 天然气储存技术综述[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013(17): 49-49.
- [32] 汪翔, 陈海生, 徐玉杰, 等. 储热技术研究进展与趋势[J]. 科学通报, 2017(15): 1602-1610.
- [33] 李金峰, 周丽. 蓄冷技术的发展及应用研究[J]. 科技创业月刊, 2016, 29(16): 129-131.
- [34] 何鹏飞. 浅谈天然气发电技术[J]. 科技风, 2016(6): 23.
- [35] 蒋清梅. 燃料电池的发展趋势及研究进展[J]. 山东化工, 2017, 46(22): 56-57.
- [36] 何荣富, 孟祥红, 李珏焯, 等. 电锅炉技术及其应用对环境影响的分析研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(2): 102-105.
- [37] 王佳, 屈菊红. 浅谈天然气锅炉供气系统的设计要点[J]. 上海煤气, 2017(4): 26-29.
- [38] 罗强. 空调制冷技术现状及未来发展趋势探究[J]. 中国高新区, 2017(7).
- [39] 仇颖, 高立虎, 霍廖然, 等. 吸收式制冷机组专利技术发展综述[J]. 制冷与空调, 2014(7): 1-4.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8763, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org