

分布式能源网络系统总体架构

朱晓军^{1†}, 朱建华^{1†}, 朱振旗^{2†}, 李红霞², 甘中学^{2*}

1. 中国石油大学(北京)化学工程学院, 北京 102249;

2. 新奥科技发展有限公司, 廊坊 065001

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: zhongxuegan@126.com

2017-04-25 收稿, 2017-07-12 修回, 2017-07-12 接受, 2017-08-14 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2014CB249200)资助

摘要 随着城市人口不断增长, 能源与环境的矛盾开始制约生态文明的发展, 分布式能源是解决这一矛盾的重要方向之一. 根据国内外分布式能源的发展趋势, 针对我国分布式能源发展所面临的困境, 本文提出分布式能源网络系统的基本定义、总体技术架构和主要特征, 并分别对各重要组成部分进行了阐述, 介绍了分布式能源网络节点的四环节结构设计方法, 总结出适用于分布式能源网络系统的协同控制方法. 在此基础上, 提出了针对分布式能源网络系统的“系统能效理论”, 并就系统能效理论的科学问题进行了阐述, 包括结构有序化对系统能效的影响机制, 分布式能源网络系统的提质、增量和循环原理, 以及基于信息与能量协同的分布式能源网络系统的协同控制原理, 指出基于信息与能量耦合的分布式能源网络, 是一种具有代表性的新型能源系统发展方向.

关键词 分布式能源网络, 能源互联网, 信息与能量, 系统能效

2015年7月29日联合国经济与社会事务部发布的《2015年修订版世界人口展望报告》, 预计世界总人口将在2030年达到85亿, 在2050年增至97亿, 在2100年增至112亿^[1]. 众所周知, 能源基础设施是城市基础设施的一个重要组成部分, 城市涉及的交通、建筑、采暖、照明以及居民日常生活各领域, 均需要消费大量的能源^[2]. 随着社会的进步, 人类对生活品位的要求也正在向多元化方向发展, 不仅对生活环境、生活质量有了全新的认识及要求, 对不同品质能源及用能的舒适性、智能化需求也在日益增加. 然而, 伴随着城市化及城市人口快速增长的同时, 城市发展也面临着雾霾、垃圾、污水以及能源结构不合理等诸多环境问题.

如图1所示, 在WHO公布的世界空气污染交互式地图中, 中国、印度、巴基斯坦和孟加拉国, 拥有

全球40%的人口, 却存在非常严重的空气污染问题. 在中国的PM_{2.5}污染情况示意图中, 中国的东部、中部、南部、东北及西北等大部分地区空气污染严重, 人口密集、城市集中的发达区域空气污染更加严重^[3].

产生环境问题的主要根源之一是能源, 由能源产生的污染物排放占比, 无论是SO₂还是NO_x, 基本上都在70%~80%甚至更高. 若不解决能源问题, 生态文明建设及环境污染状况就难以改变^[4]. 为了解决我国能源资源紧缺、环境污染等问题, 国家陆续出台了多项相关的意见及政策以发展分布式能源(Distributed Energy Resource, DER). 2004年, 中华人民共和国国家发展和改革委员会(以下简称国家发改委)在《关于分布式能源系统有关问题的报告》(发改能源[2004]1702号)的文件中正式提出发展分布式能源, 并在报告中对分布式能源的概念、特征及发展重

引用格式: 朱晓军, 朱建华, 朱振旗, 等. 分布式能源网络系统总体架构. 科学通报, 2017, 62: 3659–3671

Zhu X J, Zhu J H, Zhu Z Q, et al. General architecture of distributed energy network system (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3659–3671, doi: 10.1360/N972017-00442

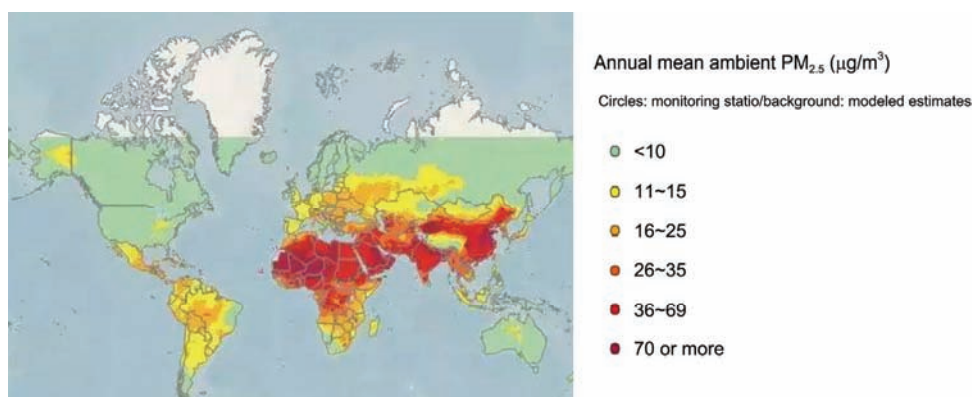


图1 世界空气污染交互式地图

Figure 1 Interactive map of world air pollution

点等进行了较为详细的描述^[5]。

我国自2009年前后吸收国外大量的已有成果,结合本国特点开始了分布式能源的研究工作,虽然起步较晚但亦取得了丰富的成果,形成了具有自身特点的分布式能源技术。然而分布式能源系统受各类终端用户用能需求及外部环境等因素变化的影响均很大,加上没有充分利用可再生能源及实时满足客户的动态需求,系统通常很难长时间维持在最佳工况下运行,造成分布式能源系统的投资成本高、系统实际运行效率并不高的尴尬局面,致使分布式能源系统并未能在国内得到大规模的推广应用。因此,有必要发展新型的分布式能源技术以解决目前遇到的技术难题,分布式能源网络化技术应运而生,图2给出了我国典型的能源系统的三个重要发展阶段。

纵观我国分布式能源的发展历程,从国内第一

个分布式能源系统建立至今,各地均在积极发展分布式能源,分布式能源系统的发展经历了分布式冷热电联产到目前的可再生能源和化石能源融合的先进分布式冷热电联产,下一阶段将向分布式能源网络系统发展。

2016年2月,国家发改委在《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》(发改能源[2016]392号)文件中进一步明确了分布式能源网络的建设工作^[6]。同年12月,国家发改委在《能源发展“十三五”规划》(发改能源[2016]2744号)提出大力发展分布式能源网络,增强用户参与能源供应和平衡调节的灵活性和适应能力^[7]。

目前国内对分布式能源网络研究较少,尚未给出官方的分布式能源网络定义,《能源发展“十三五”规划》只是以官方形式正式提出大力发展分布式能源

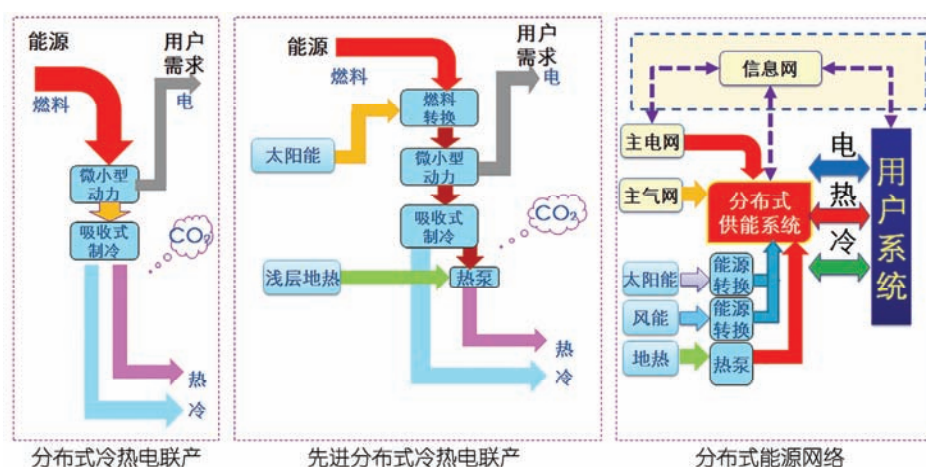


图2 我国典型能源系统三个重要发展阶段

Figure 2 Three development stages of typical energy system in China

网络,而国内尚未有分布式能源网络的定义.本文就分布式能源网络的定义与架构进行阐述,提出分布式能源网络的主要组成部分,并针对每一部分进行详细的介绍.

1 分布式能源技术与微电网技术研究现状

分布式能源网络是近年来新兴的能源技术,国外也未见有相关研究.简单来说,分布式能源网络以分布式能源站为节点,通过电力网、燃气网和热力网相互耦合成物理网络,上层由先进的信息网络和控制网络构成,与物理网络相互融合;从相关性上看,分布式能源网络是最早由分布式能源技术以及微电网技术进化而来.

分布式能源技术具备下一代能源系统的所有显著特征:燃料多元化;设备小型、微型化;网络化;智能化控制和信息化管理;冷、热、电联产化和高标准的环保水平等,是代表当今世界发展潮流的最先进理念和技术^[8].分布式能源具有多重社会效益及经济效益,是世界能源供应方式发展的一个重要方向,美国、日本及欧盟等已将发展分布式供能作为能源安全、节能和能源经济发展的重要战略.

美国分布式发电方式包括天然气多联供、中小水能、太阳能、风能、生物质能及垃圾发电等,热电联产总装机容量超过美国发电量的15%.在美国,对微网的研究及开发最出名的机构是建立于1999年的CERTS(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, 电力可靠性技术协会).在2002年左右, CERTS 提出了详细的微网方案,资助威斯康辛大学麦迪逊分校建立了实验性微网,并随后在俄亥俄州建立了示范性微网^[9,10].对微网研究做出重要贡献的机构还有国家可再生能源实验室NREL(National Renewable Energy Laboratory),该机构资助了大量再生分布式能源的基础性研究,如主要由威斯康辛大学麦迪逊分校完成的实验性微网建设的项目研究,参与了IEEE std 1547的测试和制定,开发了多个仿真及规划优化软件,如小型分布式能源规划优化软件Homer.加州能源署、通用电气公司、北方电气公司、桑地亚国家实验室以及橡树岭国家实验室等也对微网开展了许多研究工作^[11-15].

目前,日本分布式能源主要为直接的分布式发电应用方式及微网方式两类.日本在微网技术开发上沿用了美国CERTS的研究成果,再结合本国特点

进行了改进.除NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)外,日本还有一些公司也在微网的研究方面做了许多工作,如日本著名的建筑企业清水建设株式会社,建立了自己的实验性微网,并开发了负荷跟踪、负荷预测、优化调度及热电联产控制软件.日本微网的架构允许燃气轮机等旋转发电设备直接接入到微网同步运行,代表日本微网技术路线的有六个有名的微网案例:爱知县、京都市、八门市、仙台市、清水建设公司及东京燃气公司,其各具特点^[16].小原伸哉等人基于札幌及东京地区的实际样本,制订了区域能量网络的多套方案,并且通过优化算法,从网络中挑选少量燃料电池进行调节以保障其他燃料电池的效率,网络的平均发电效率均高于孤立微网的发电效率^[17].日本在建设了大量的微网示范项目后,至今其微网及储能等技术仍保持国际领先水平.

欧盟微网的结构也是通过电网接入分布式电源,但考虑了分布式电源即插即用的要求.欧盟的微网允许向主网输出电力,这点与CERTS 微网有所不同.值得一提的是NTUA(希腊雅典国立大学)在主导对微网项目的研究时,在微网控制中较早引入了分布式控制方案^[18],从施耐德向中国市场提供的方案也可看到,其结构基本沿用了NTUA框架.欧盟第五、第六和第七框架计划(The 5th, 6th and 7th Framework Programme)的“能源、环境与可持续发展”主题支持并完成了一系列与可再生能源和分布式发电接入技术有关的研究项目. EU-DEEP是更为综合性的项目,研究目的是分布式能源在欧洲大规模应用的技术及非技术问题,其中FENIX的研究对象同样是分布式能源网络,主要解决分布式能源网络与传统电网的融合问题^[19].第五框架下的项目主要解决了分布式发电和微网的技术问题,而第六框架下的项目主要解决分布式能源网络运行及能源市场问题.在第五、第六框架计划的实施过程中,欧盟又逐渐明确了基于可再生能源及分布式发电系统的未来欧洲电网的发展趋势.且在2005年明确提出了欧洲的“智能电网”,主要在第七框架下进行^[20].

综上所述,美国主要以发展天然气分布式能源、微电网和智能电网为主;日本则结合本国特色,重点发展社区级微网以及燃料电池微网为主;欧洲则针对分布式发电网络化进行相关研究,并且重视分布式能源网络与传统电网融合发展,上述国家或地

区都是以电力为主要能源形式。

2 分布式能源网络的特征与定义

可以认为,分布式能源技术的发展为从早期强调的“分布式电源并网”发展到“分布式能源与传统能源网络整合”,分布式能源不再是一个个单体,而是逐渐融合为复杂的能源网络。根据国内外相关调研和研究分析,大致可得出分布式能源网络必须具备以下主要特征:

构成以太阳能、风能等可再生能源为主体的多能源协调互补的能源网络,其包含有大容量、低成本、高效率及寿命的储能系统,并由分布式可再生能源与天然气分布式能源协同发展,是一种多种能源形态协同转化、集中式与分布式能源协调运行的能源网络。

在“互联网+”的推动下,综合运用先进的电子技术、信息技术和智能管理技术,将大量由分布式能量采集装置、储存装置和各种类型负载构成的新型能源网络等能源节点互联起来,以实现双向流动的能量对等交换与共享网络,实现分布式能源的及时有效接入,逐步建成开放共享的能源网络,并且具备覆盖电网、气网及热网等智能网络的协同控制基础设施。

具备不同能源网络接口设施的标准化、模块化,支持各种能源生产、消费设施的“即插即用”与“双向传输”,大幅提升可再生能源、分布式能源及多元化负荷的接纳能力,能接纳高比例的可再生能源,促进灵活互动用能行为和支持分布式能源交易。

用户端智能化用能,以智能终端和能源灵活交易为主要特征的智能家居、智能楼宇、智能小区和智能工厂,支撑智慧城市建设,实现以多能融合、开放共享、双向通信及智能调控为特征,各类用能终端灵活融入的微平衡系统。

建立各分布式能源间的信息互联互通,通过大数据、人工智能等技术以及基于信息的智能调控,形成多能互补、供需协调的新型智慧能源管理系统,具备双向通信和智能调控功能,并支持多种能源的计量、交易和结算等经济功能。

本文给出的分布式能源网络定义为:分布式能源网络系统是在分布式能源系统基础上演化而成的一种融合多种能源网络、信息网络的新型智能能源网络系统,该分布式能源网络系统与智能电网、天然气主干网和区域供热网相连,同时将区域内的多种可

再生能源与天然气以分布式方式与终端用户联接,实现冷、热、电即产即用和双向传输,并通过物质流、能量流和信息流的协同控制,实现整个能源网络的有序化,从而构建一个高效的分布式能源网络系统。

3 分布式能源网络架构

分布式能源的网络系统由若干具有开放的能源两环节、三环节或四环节结构的分布式能源站构成的网络节点,以及网络节点之间能源网络和信息网络共同构成。

如图3所示,在每个分布式能源网络节点内部,将能源全生命周期范围内原本彼此独立的能源生产、应用两环节协同起来,在此基础上引入储运和回收环节,再将三个或四个环节协同起来,通过能源供需匹配及能量梯级利用,最大化的引入可再生能源,并充分利用系统回收的余能,最大限度提升能源转化及利用过程的有序化程度。

由图4所示,在实际分布式能源网络的节点设计过程中,要因地制宜地利用能量流与物质流的耦合,形成多品类的能源流(水、冷热、电力与燃气),构成基于四环节的分布式能源网络节点。通过信息流实现分布式能源网络节点内部的跨时空协同及多尺度智能协同,借助对可再生能源的品位提升和对资源能量的高效利用,产生系统能量在全生命周期内的非线性增效,从而输出高品质、高效率的智能能源。

如图5所示,分布式能源网络节点与节点间采用电力、热力和天然气网络相互连接,在用户集中区域,分布式能源站优先供应其邻近的周边用户。当出现用户用能变化较大或可再生能源生产不足的情况时,



图3 分布式能源网络节点的四环节结构

Figure 3 Structure of four stages energy loop in a distributed energy network node

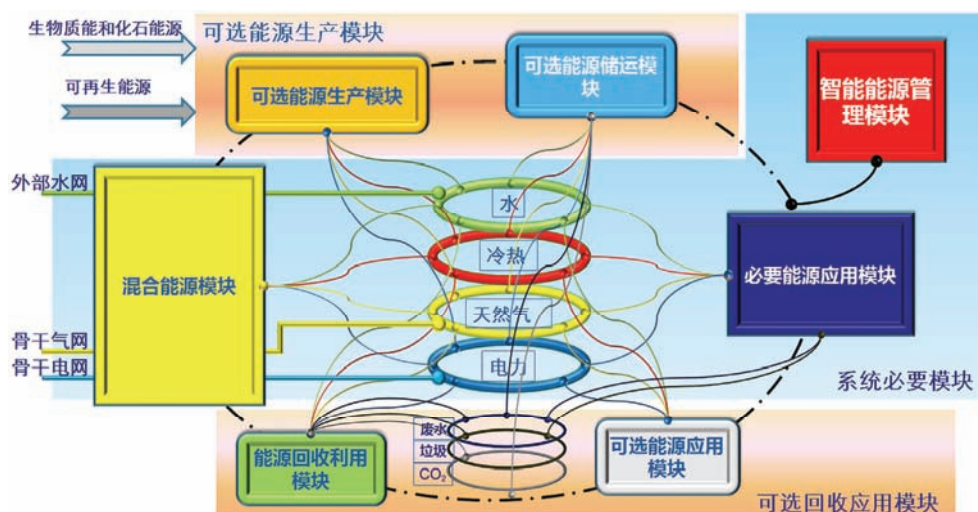


图4 分布式能源网络节点的四环节设计示意图

Figure 4 Design sketch map of the four stages energy loop of the distributed energy network node

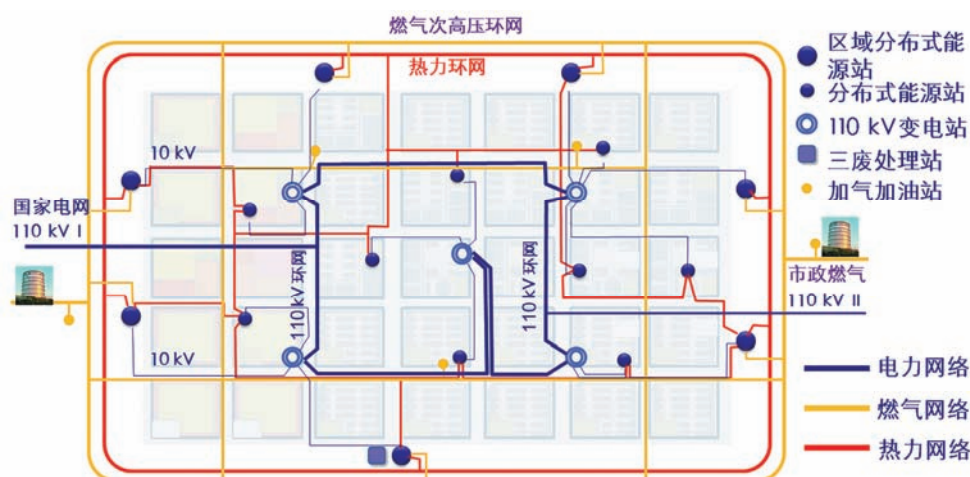


图5 分布式能源网络节点互联示意图

Figure 5 Diagrams of interconnection between nodes in a distributed energy network

欠缺的能源需从分布式能源网络上取得,并且区域分布式能源站负责控制能源网络上的能源整体供需平衡。

如图6所示,以清洁的天然气为主,以风、光、地表浅热及水源热等可再生能源为辅,融合智能化控制和云计算技术,形成多种能源互补利用、供需互动的分布式能源网络。与传统能源系统相比,该系统充分考虑了区域内的自然资源、可再生能源及周边余热资源的综合利用,以及与国家电网、市政燃气及市政热力等主干网络间的智能化调度,将信息网、能量网和物质网耦合成智能协同网。再通过气、电、热等能源的梯级利用和智能协同,呈现出能源循环生产、供

需互动、有序配置、智能协同及价值交换五大特征的新型能源利用新模式,同时,其投资及运营费用也将大幅缩减。分布式能源网络很好地综合了分布式能源系统及信息网络的优点,为解决分布式能源系统当前存在的问题并促进其未来的发展提供了崭新的视角与方向。

4 分布式能源网络协同控制

由于国内分布式能源系统单点(如分布式能源站)的智能控制尚未完全实现,对于复杂的分布式能源网络系统,其对应的控制方法也一直未见有针对性研究。分布式能源网络作为传统能源网络系统(电

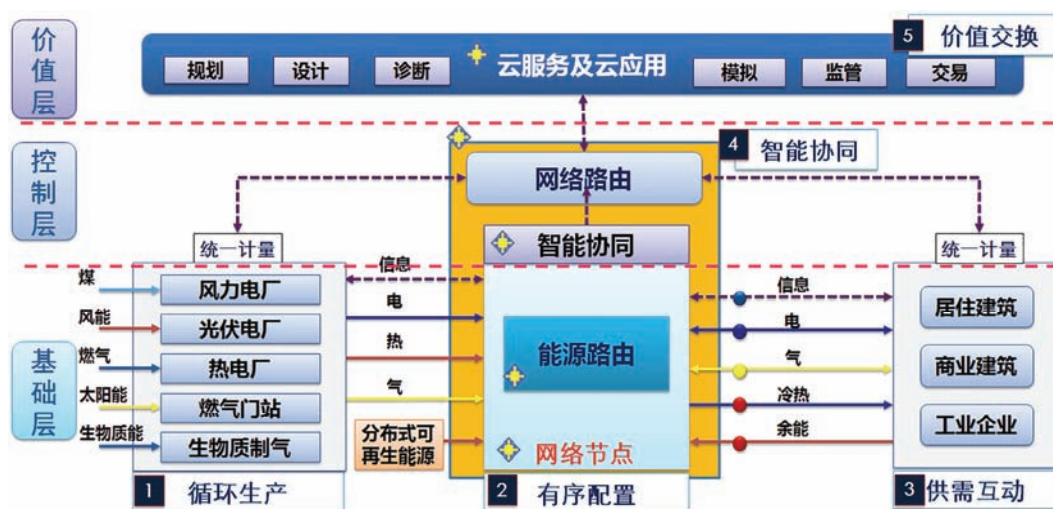


图6 分布式能源网络系统架构图

Figure 6 Framework of distributed energy network system

网、气网)的新世代,其根本物理拓扑架构于信息流通路均呈现出一种复杂网络的形态,要实现对复杂能源网络系统的协同和优化,就必须根据分布式能源网络的一些具体需求和特征,有针对性地就复杂网络系统的某些特性来进行设计.因此,必须对分布式能源网络系统的协同控制方法进行深入研究,为今后分布式能源网络系统的推广应用奠定好基础.

由图7可知,分布式能源网络系统可以由多智能体系统进行协同控制,通过各能源网络节点内部各智能体的协商通讯和协同优化,借助分布式网络控

制器的分布式智能协同,构建一个与分布式能源网络系统相适应的分布式并行网络控制系统.该控制系统能针对复杂分布式能源网络进行动态调整和重构,实现网络的整体协同优化.

位于集聚区域的节点成为“核心节点”,位于边缘地区或人口稀少区域的节点成为“末梢节点”;节点之间的连接和能量的交互,完全取决于客户的需求与能源供应方的互动.由于人类的活动具有“集聚效应”及由此带来的能量需求和经济增长的不均匀性,形成了分布式能源网络系统节点间的差异化.这

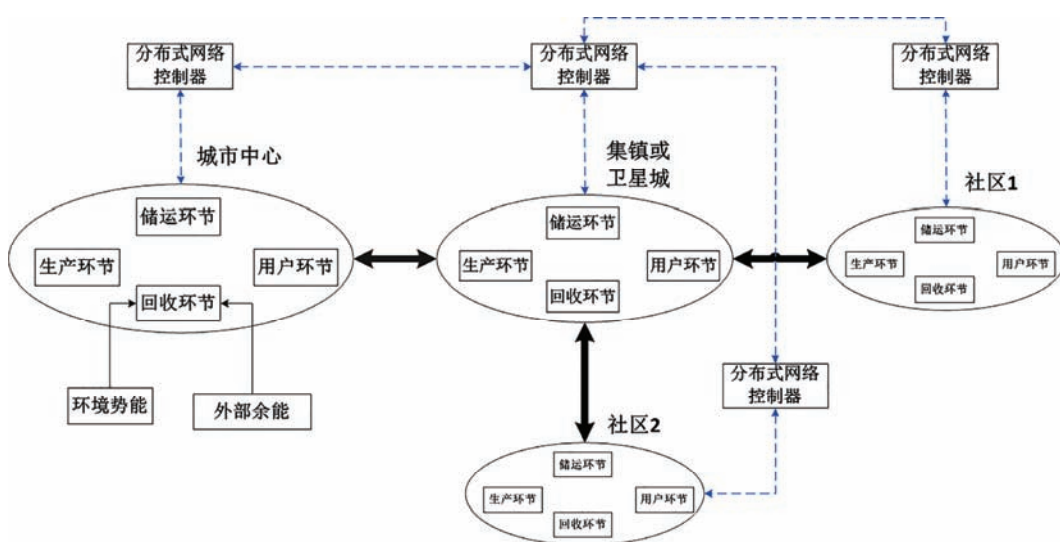


图7 分布式能源网络系统的控制方案

Figure 7 Control scheme of distributed energy network system

种差异化特征导致了分布式能源网络系统成为具有高度非线性的网络拓扑结构,这种拓扑结构有利于系统的有序化,但增加了控制难度。目前常用的先进控制方法,如预测控制、自适应控制及模糊控制等均已无能为力,无法对如此复杂的复杂能源网络系统实现有效的控制。因此,有必要针对分布式能源网络系统自身特点,提出一种新型的控制方法方能满足分布式能源网络系统的控制要求。

在分布式能源网络系统中,在各节点中的分布式能源网络及其子能源网络构成的复杂能源网络系统中,出现了典型的物质流、能量流及信息流,通过信息流控制能量流,再通过能量流驱动物质流,最终实现网络的协同控制及有序流动,进而构建一个高效的分布式能源网络系统。整个能源网络底层是以物质流为主的能源网络系统,而驱动和控制该物质网络流动的主要动力来自于上一层的能量流网络,但能量流不一定全部伴随着物质流动,有部分能量流会脱离物质流相对独立地运行;在信息流网络中通过系统与外部环境的信息交互,依据外部环境和网络内部的周期性涨落,利用分布式网络控制器构成的信息网络实现对能量的驱动、转换和控制,从而实现对能量流网络流动的驱动和控制。研究这种从信息到物质的立体网络系统将从原理上解决复杂分布式能源网络系统的协同控制及系统有序化难题。

分布式能源网络系统的有序化是保证系统稳定运行的前提,这里的有序主要指系统结构有序、功能有序及状态有序三个方面,图8给出了分布式能源网络系统的有序化问题及关键技术。

与传统分布式能源系统相比,分布式能源网络系统基于信息-能量耦合的拓扑结构重构和协同控制方法,改变了对系统整体的输入输出特性,两者之间必定会存在更为紧密的影响,为掌握这种关联关系,需进行更深入的理论研究。

5 分布式能源网络的系统能效理论

无论是传统能源企业,还是新能源企业,在为客户规划、建设和管理分布式能源网络系统,提供系统化解决方案时普遍缺乏系统理论的支持和指导,往往从各自掌握的优势技术入手,按照传统能源的构建方式自成体系地构建新能源系统,这种系统与传统能源的结合将会出现“不稳定”和“代价高”两个典型特点,致使相当多一部分分布式能源项目陷入困境。

对于复杂非线性的分布式能源网络系统,在构建与实施时,需要由相应的理论,即“系统能效理论”指导。系统能效理论将能源生命周期全过程分为能源生产、储运、应用及再生循环四个环节,通过能量与信息的耦合,形成能量输入和输出跨时域的实时协同,最大化地利用可再生能源(包括太阳能、风能、地热能及生物能等)、减少不可再生资源的输入,实现综合考虑能源、经济、环境及社会等多目标的系统全生命周期的最优化和能量的增效。

系统能效理论在能源利用的全生命周期内,综合考虑能源、经济及环境等因素,针对能量系统的结构(拓扑)、流(包括系统内部的和系统外与系统交互的能量流、物质流及信息流)和运行方式进行协同优化

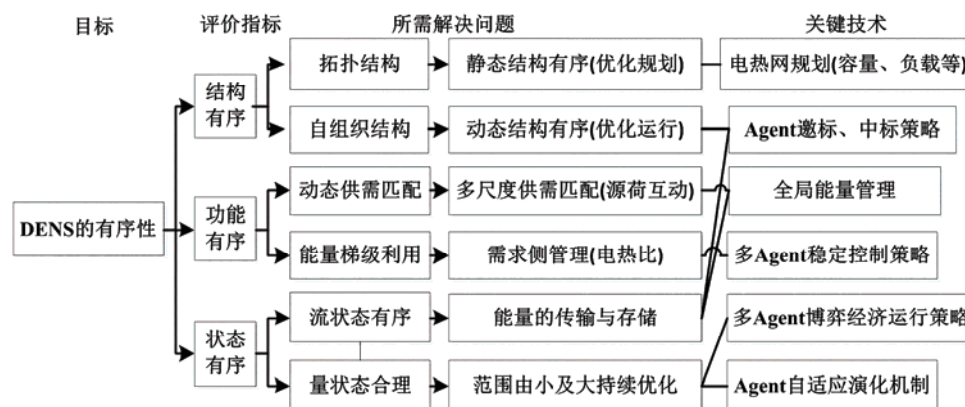


图8 分布式能源网络系统的有序化问题及关键技术

Figure 8 The system ordering problem and key technology of distributed energy network system

研究, 利用分布式网络节点能量“涨落”造成局部网络系统远离平衡态, 产生局部网络能效的增益效应, 实现整体系统的能效增益, 高效率地输出高品质的智能能源. 整个系统能效理论体系可围绕三个科学问题进行阐述.

5.1 分布式能源网络结构有序化对系统能效的影响机制

分布式能源网络由网络节点和能源网络共同构成, 其中网络节点将信息网络和能源网络耦合并统一起来, 提供统一的分布式能源网络结构, 网络节点之间通过信息和能源网络连接. 由于分布式能源网络的复杂性, 通常分布式智能体节点由功能体、协同器及自学习模块三部分构成. 其中由能源系统构成的四环节功能体与能源网络相连, 通过传感与控制实现能源的有序配置; 协同器通过对多智能体系统和相邻智能体的感知、通信和决策, 实现能源的智能协同; 自学习模块则是强化智能体的自适应特征, 并与信息网络相连, 共同实现价值交换.

图9为分布式能源网络多智能体结构示意图, 由分布式能源网络节点构成的分布式多智能体系统, 节点本身是具有封闭功能、能自主决策的功能实体, 具有适应环境的动态自组织能力, 应用分布式人工

智能(distributed artificial intelligence, DAI), 通过分布式网络控制器能直接执行对分布式能源网络节点和能源网络的实时感知和控制, 在逻辑上、时间上和空间上使分布式能源网络系统具有很强的适应性, 且其还具有高效率、高可靠性及低成本的特点.

如图10所示, 由若干个分布式能源网络智能节点组成的分布式能源网络, 实现了信息网络与能源网络的耦合和协同. 在物理层面实现了能源、信息与主干网的调度, 以及各类能源的有序配置, 在控制层面实现了分布式能源网络的协同控制及去中心化, 在价值层面实现了信息的分层自治和价值交换.

从理论角度上看, 由于波动性、间歇性、不稳定的可再生能源系统与稳定供应的天然气系统互补、融合, 这种多能互补分布式能源系统的稳定性是整个分布式能源网络长期、安全及可靠运行的保障. 在分布式能源网络节点内部, 在天然气能源作为支撑保障能源的前提下, 如何最大程度地利用可再生能源的可靠模式, 即通过结构序来描述系统结构的规则性和顺序性. 结构序按照时间序(t_i)和空间序(x_i, y_i, z_i)展开, 从而针对研究对象多种基本拓扑结构序及动态运行序的几种模式, 分别研究这些可再生能源供给的不稳定性对网络系统高效运行的影响, 提出由天然气及清洁能源进行互补的融合方式及其对系

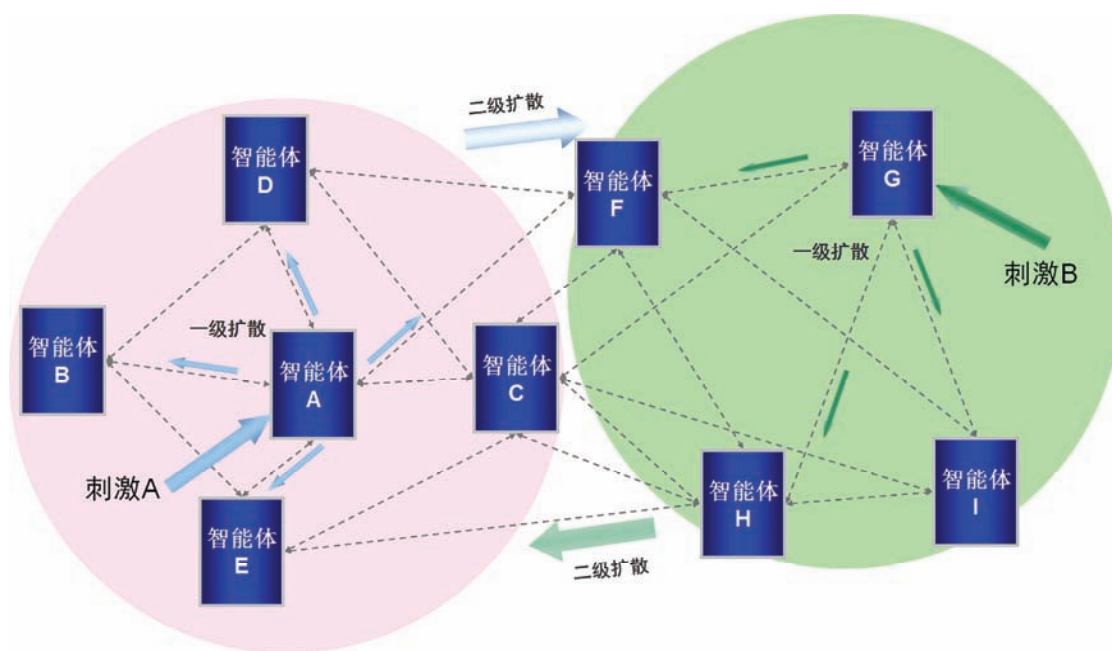


图9 分布式能源网络多智能体结构示意图

Figure 9 Schematic diagram of multi-agent system for distributed energy network

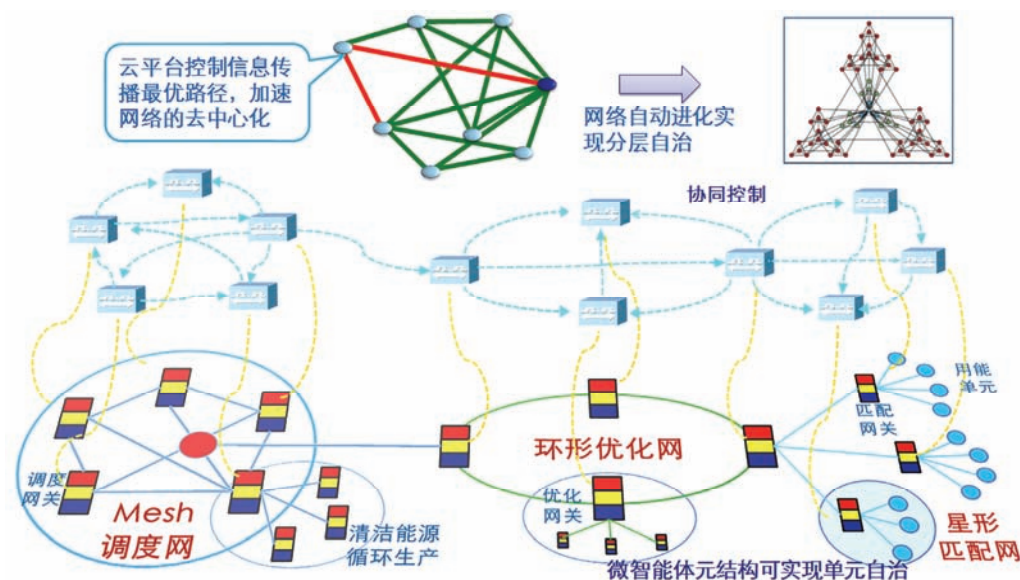


图 10 分布式能源网络立体结构的示意图

Figure 10 Sketch map of the three-tier architecture of the distributed energy network

统能效的影响规律。

5.2 分布式能源网络系统的提质、增量和循环原理

针对单一分布式能源供能系统,“温度对口,梯级利用”原理对于指导提高能源的利用效率非常有效。但在目前的分布式能源网络系统工业实践应用中,绝大部分的热力学分析仍停留在以热力学第一定律来衡量用能水平及用能质量的高低,由于仅考虑能量平衡,进而忽略了能量品质的匹配和利用,特别是对不同行业的比较上,比如燃气热效率相近的企业常被认为是用能水平接近的,但事实上对于涉及高温处理过程较多的企业,常常损失了大量的低温能,结果造成能量“质”的巨大损失。

其次,传统的分布式能源系统在设计过程中将用能端当做固定的负荷和固定的用能需求品位,只考虑供能系统的梯级利用和能效优化,未考虑供能端和用能端全生命周期的协同优化。事实上,用能负荷通常随时间、外部环境等因素而变化,导致系统长时间偏离设计工况,实际运行效率并不高,因而项目实际运行费用往往与预期值存在较大差异,甚至成为负利润项目。

分布式能源的网络系统同时处在多能量输入、多用户需求的动态环境中,为了提高对能量质的利用,需从热力学第二定律出发,研究如何实时地进行各种类型的能源转换,并按照能源的“质”和“量”实施品

位对口的梯级利用及循环利用,特别是在供需高效匹配、整体能效提升及能源网络动力性能相结合的前提下,将用能端设计成能随外部环境变化的自适应调节系统,降低用能端的负荷。

同时,将供能端设计成物理能和化学能分级释放、梯级利用的系统,使供能端能用能端能量需求的品位及数量变化而自动调节,形成供能端与用能端互动的能量梯级利用机制,使系统可在较宽的操作域内,在偏离设计平衡态的工作点下运行,并能在信息协同干预下自动达到高效的稳定运行状态点,形成能在若干稳定运行状态点下系统能效最大化的运行机制。研究分布式能源网络基于智能体的主动调控方法,探究能效的提升机理,可为分布式能源网络节点的协同控制决策奠定理论基础,也为我国今后大规模发展分布式能源网络系统提供相关理论支持。

5.3 基于信息与能量协同的分布式能源网络系统的协同控制原理

分布式能源网络是由诸如太阳能、浅层地热的可再生能源和天然气等多种能源输入,冷、热、电等多能源输出的复杂能量转化系统。针对网络系统中的不确定性,研究复杂能源网络系统的自适应控制理论,对非线性系统自适应机制的深入研究,通过建立相应的自适应协同控制方案,并构建基于多智能体系统的分布式并行控制网络和网络控制器形成整个

能源网络的传感控制网络,能自适应地平抑网络中可再生能源造成的系统不稳定性,并能根据实时的用户信息,可再生能源出力信息做出动态响应,完成不同子系统间的优化调度,以保证整个系统的能效最优.在考虑末端节能优化的基础上,进一步优化分布式能源供能系统及输配网络,实现“主动节能”和“被动节能”的协同优化,以提高分布式能源网络系统的经济性.

分布式能源网络协同控制原理主要包括以下三点:第一,要充分地把外界的可再生能源输入到系统中来,并按“质”按“量”分配到能源网络系统中;第二,控制网络系统内部系统的运行状态,使内部能源消耗最低;第三,充分获取和调动用户的智慧并改变用户的用能行为,实现用户与网络的互动,逐渐包含用户端的智慧控制和用能行为,使用户的智能通过合理的互动机制转化为网络的智慧,最终控制方式由传统的集散控制模式转化为分布式并行控制模式.

该科学问题需要研究复杂能源网络多节点协同优化原理,通过信息的感知变送,将人的智慧和能源的智能控制系统相耦合,进而产生信息促发的能效增益,通过控制信息和管理信息使用户与能源系统互动,不但可提升系统的能源效率,而且逐步改变人类的用能行为,解决能源、资源跨时空利用的效率问题.

6 分布式能源网络应用示范

从2009年以来,我国的分布式能源网络经历了能源生态城、中德生态园到河北廊坊分布式能源网络示范项目几个阶段.

6.1 能源生态城

能源生态城位于河北廊坊,一期规划占地10万平方米,采用“系统能效理论”为指导进行整个园区的能源规划、设计、管理和建设.能源生态城充分展示了未来能源的形式、全新的能源结构、全新能源生产和使用方式、全新的能源转换方式,能源生态城的全貌如图11所示.

按照系统能效理论,生态城整体分为四个环节,即生产、储运、应用和回收环节,整个能源系统最大化地利用可再生能源,减少外部化石资源的输入.能源生态城构建一个循环低碳、智能高效的能源资源利用体系,验证了分布式能源的四环节设计方法,从这个试验性项目中初步探索出一条适合中国经济发展



图11 能源生态城鸟瞰图

Figure 11 Airlscape view of energy Eco-city

和环境保护的新型能源产业发展道路,具有较强的可持续发展和推广特性.

6.2 中德生态园

中德生态园位于山东青岛经济技术开发区国际生态智慧城内,规划面积约10平方公里.中德生态园定位为具有国际化示范意义的高端生态示范区、技术创新先导区、高端产业集聚区及和谐宜居新兴城区.整个园区采用新型能源技术,对清洁能源和可再生能源为主的多种能源进行合理配置,提高能源综合利用率,提高能效,降低排放,提升能源系统的运行保障水平和生态园能源智能化水平,为生态园未来产业发展提供高品质的能源供应系统.

中德生态园的分布式能源网络示意图如图12所示,在园区中应用从小到大的生态城市规划方法,将生态园区分为9个区块,分别进行能源系统设计,并在区块内部通过能源网路相连接.以区块为单位,依据用地分类,对各区块进行能源的供需平衡分析,对用能侧负荷进行多能源系统的匹配优化设计.



图12 中德生态园分布式能源网络示意图

Figure 12 Sketch map of distributed energy network in Sino German Eco-Park

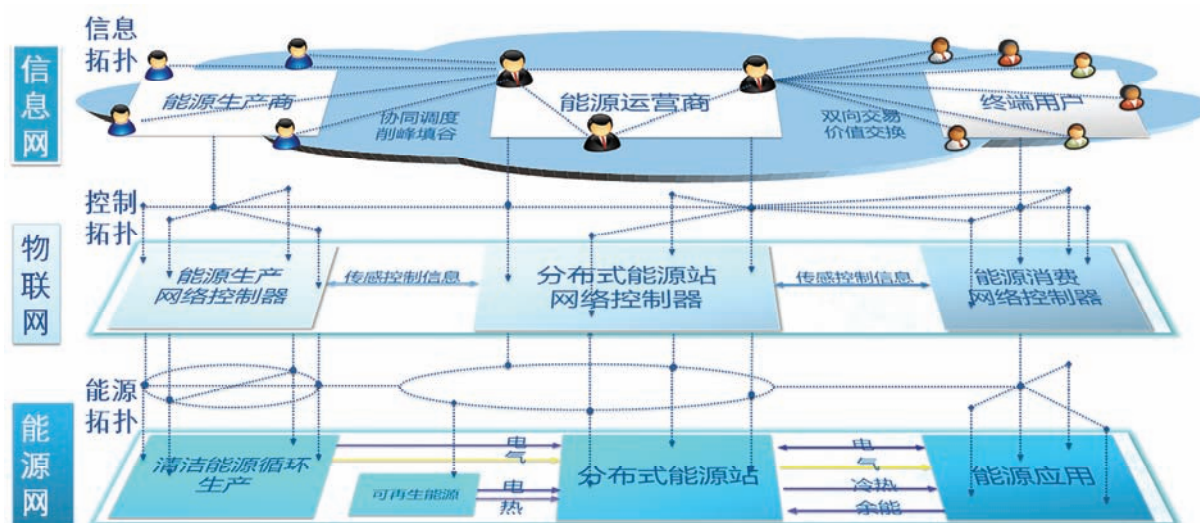


图 13 中德生态园分布式能源网络立体网络结构

Figure 13 Three-tier architecture of distributed energy network in Sino German Eco-Park

如图13所示,中德生态园分布式能源网络系统以信息与能量的耦合为指导,以构建能源网、物联网和信息网为主体的立体网络系统,是一个智能化、高度协同的分布式能源网络。

如表1所示,整个园区的各项技术指标均可达到国内先进水平,中德生态园的分布式能源网络系统大力推进了能源、资源与信息融合利用,对推动全社会节能减排及能源高效利用具有积极的示范和引领作用。

7 结语

分布式能源网络是适应未来能源生产及消费的发展趋势,顺应国家产业政策的一种新型能源系统,是实现我国节能减排的强劲推动力。分布式能源网络的出现,解决了分布式能源长期发展停滞不前的难题,但分布式能源网络的建设是一个复杂的系统工程,涉及到理论、技术和体制等多方面因素,最终会向能源互联网方向发展,也为能源互联网打下坚实的基础。

表 1 中德生态园各项技术指标

Table 1 Technical indicators of Sino German Eco-Park

技术指标	指标值(%)
综合节能率	50.7
二氧化碳减排率	64.6
清洁能源利用率	80.6
可再生能源利用率	20.6
能源综合利用效率	80.8

我国未来的能源体系,在能源生产侧形成以可再生能源优先、化石能源支持,分布式为主、集中式为辅,相互协同与融合的能源生产模式;在能源消费侧形成供需互动、有序配置、智慧用能的能源消费模式,同时将产生商业模式的变革。由分布式能源到分布式能源网络,再到能源互联网的发展路线,是“互联网+”智慧能源的创新性应用,同时符合党中央在十八大提出的“实现能源生产和消费革命”的国家重大需求及国家中长期科技发展规划要求,将为国家未来能源产业发展做出应有的贡献。

参考文献

- 1 United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352), 2014
- 2 Xin Y. Focus on energy issues in smart cities (in Chinese). New Econ Weekly, 2014, (9): 56-63 [辛妍. 聚焦智慧城市中的能源问题. 新经济导刊, 2014, (9): 56-63]

- 3 WHO. WHO air pollution map (in Chinese). <http://who.maps.arcgis.com>, 2017-03-25 [世界卫生组织: WHO 空气污染地图. <http://who.maps.arcgis.com>, 2017-3-25]
- 4 Dai Y D. Energy Revolution: an interpretation of energy situation and development strategy (in Chinese). *Electric Age*, 2013, (12): 60–61 [戴彦德. 能源革命进行时——能源形势及发展战略解读. *电气时代*, 2013, (12): 60–61]
- 5 National Development and Reform Commission. A report on issues related to distributed energy systems (in Chinese). <http://www.ndrc.gov.cn>, 2011-10-14 [国家发展与改革委员会. 关于分布式能源系统有关问题的报告. <http://www.ndrc.gov.cn>, 2011-10-14]
- 6 National Development and Reform Commission. Guidance on promoting the development of “Internet plus” smart energy (in Chinese). <http://www.ndrc.gov.cn>. 2016-02-24 [国家发展与改革委员会. 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见. <http://www.ndrc.gov.cn>. 2016-02-24]
- 7 National Development and Reform Commission. On the issuance of the “13th Five-Year” energy development planning (in Chinese). www.ndrc.gov.cn. 2016-12-20 [国家发展与改革委员会. 关于印发能源发展“十三五”规划的通知. www.ndrc.gov.cn. 2016-12-20]
- 8 Xu J Z. Prospects of distributed power supply and combined cooling, heating and power (in Chinese). *Energy Conserv Environ Protect*, 2002, (3): 10–14 [徐建中. 分布式供电和冷热电联产的前景. *节能与环保*, 2002, (3): 10–14]
- 9 Lasseter R. The CERTS Microgrid Concept -White Paper on Integration of Distributed Energy Resources. 2002
- 10 David K. Validation of the CERTS Microgrid Concept the CEC/CERTS Microgrid Testbed. *IEEE Power Eng Soc Gen Meet*, Montreal, 2006. 1–3
- 11 Hatziargyriou N. Microgrids. *IEEE Power Energy Mag*, 2007, 5: 78–94
- 12 Stevens J. Characterization of Microgrids in the United States: Final Whitepaper. 2005
- 13 Firestone R. Distributed Energy Resources Customer Adoption Model Technology Data. 2004
- 14 Whitaker C. Renewable Systems Interconnection Study: Test and Demonstration Program Definition. 2008
- 15 Kroposki B. DUIT: Distributed Utility Integration Test. 2003
- 16 Kojima Y. A demonstration project in Hachinohe: Microgrid with private distribution line. *IEEE International Conference on System of Systems Engineering*, San Antonio, 2007
- 17 Obara S. Fuel Cell Micro Grids. London: Springer, 2008
- 18 Dimeas A L. A MAS architecture for microgrids control. In: *Proceedings of 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems*, IEEE, Tokyo. 2005. 402–406
- 19 European Commission. Towards Smart Power Networks-Lessons learned from European research FP5 projects. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2005
- 20 Bamberger Y, Baptista J, Botting D, et al. Strategic research agenda for Europe’s electricity networks of the future. *Eur Technol Platform SmartGrids*, 2007, (1): 14–71

Summary for “分布式能源网络系统总体架构”

General architecture of distributed energy network system

ZHU XiaoJun^{1†}, ZHU JianHua^{1†}, ZHU ZhenQi^{2†}, LI HongXia² & GAN ZhongXue^{2*}

¹ College of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

² ENN Science & Technology Ltd., Langfang 065001, China

† Equally contributed to this work

* Corresponding author, E-mail: zhongxuegan@126.com

The exponential growth of urban populations often causes conflict between diminishing energy resources and environmental pollution, hence restricting economic development. As individuals, government agencies and businesses voice their concerns, distributed energy networks promise to provide an essential means to resolve these issues. Within China, the demand for modern distributed energy networks is gaining political and scientific support; however, due to variable end user demands and operating conditions, such energy management systems demand extensive maintenance, require extensive economic investment cost coupled with operational inefficiency. Advanced distributed energy networks are intelligence-based systems developed to integrate multiple power grids and information networks, overcoming current barriers to improve the overall efficiency and economic viability of regional energy infrastructures.

Complex distributed energy networks combine advanced energy technologies with micro grids, the internet of things, cloud computing and big data analysis. Fundamentally, the publication describes distributed energy systems from its technical architecture to its primary characteristics while expanding upon its critical components: the four stage design method for energy loops, distributed network nodes, a summary of cooperative control methods and our “system efficiency theory” for distributed energy networks and its challenges. The first issue involves system infrastructure organization, impacting overall energy efficiency, focusing upon topology influence and stability integration with renewable energy and natural gas units. The second challenge involves quality increments and circulation principles among distributed energy networks, focusing upon active regulation and supply-demand interaction. The final problem is cooperative control principles based upon information and energy integration.

The issues involving the four stages energy loop for distributed network nodes was resolved in Hebei Province eco-city and the Sino German Eco-Park in Shandong province. In these domestic level projects, distributed energy networks demonstrated full renewable energy and natural gas optimization, overcoming the conflict between peak energy demand and environmental protection. This demonstration project illustrated the feasibility of advanced distributed energy in China, coupling information and the potential of distributed energy networks as a foundation for energy internet development.

distributed energy network, energy internet, information and energy, system efficiency

doi: 10.1360/N972017-00442