

能源互联网结构形态及技术支撑体系研究

王 璟¹, 王利利¹, 林济铿², 孙义豪¹, 王佰淮³, 叶剑华⁴

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052;

2. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 3. 天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072;

4. 天津职业技术师范大学 天津市信息传感与智能控制重点实验室, 天津 300222)

摘要: 能源互联网作为可再生能源大规模高效利用的重要基础设施, 成为当前能源领域的热点研究课题。在分析对比国内外关于能源互联网内涵及结构形态的基础上, 提出完整一次能源系统、电力系统、交通网络及信息网络组成的新的能源互联网内涵及相应的新型结构形态, 并对新型结构形态的各部分之间的关系进行详细阐述; 对所提的新型能源互联网结构形态设计相应的技术支撑体系。

关键词: 能源互联网; 结构形态; 技术支撑体系; 电力系统

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.001

0 引言

2015 年两会期间, 李克强总理在政府工作报告^[1]中提出了“互联网+”行动计划, 从而给本已成为大众关注热点的互联网深度研究及应用课题添加了中国政府的关注度。该行动计划概括了中国政府对于利用互联网技术进行传统产业及与互联网技术密切相关产业的改造及产业升级的总体行动纲领。为积极响应, 中国电力科学研究院主办了第四届中国电力发展和技术创新院士论坛, 两院院士围绕“电力绿色发展, 促进能源革命”这一主题, 共同探讨中国电力技术的发展趋势, 研讨全球能源互联网理论, 提出了推动能源消费、能源供给、能源技术和能源体制等方面的“改革、创新及革命”的思路。

国际上, 美国政府提出了基于互联网技术及智能制造的制造业重振计划^[2]; 德国及欧盟等提出了以互联网及智能制造为核心的工业 4.0 计划等^[3-5]。电力及能源领域, 由于其本身正是与互联网及信息技术密切相关的产业之一, 可以预见, 在这一轮席卷全球的“互联网+”或“全球能源互联网”的研究及应用热潮中将无可争议地得到进一步的快速发展。能源互联网技术并不是简单的“互联网+能源网”, 而是基于互联网本身所具有的“开放化、实时化、数据化、规模化”的特点, 把互联网技术作为一次能源系统、电力系统和交通系统实现紧密“互联互通”的技术支撑之一, 使得原本处于隔离或松散联系的 3 个工业系统实现紧密耦合, 以实现能源在大范围内的高效生产、传输和消费以提高能源的利用效率, 实现分布式可再生能源的大规模消纳及节能减排的目的, 从而使得能源生产及消费绿色化、环保化和可持续化。

由于能源产业是社会生产及发展的支柱产业, 其对于其他相关产业的发展影响巨大, 因此, 能源互

联网技术的发展被不少研究人员及专家学者看作第三次工业革命的核心技术^[6]。与此同时, 部分学者及专家对能源互联网的内涵^[2, 6-15]进行了详细研究及论述, 但所阐述的内涵及关注的重点存在较大差异, 部分学者对能源互联网的结构形态进行了深入研究, 并提出了较为完善的能源互联网架构设计^[2, 7-8, 16-22], 但其涵盖的内容及目的不尽相同, 且没有考虑占主导地位的非可再生能源(化石燃料)供给网络之间的耦合。同时, 能源互联网的发展必须依靠先进的互联网技术、通信技术的支撑, 鉴于此, 很多学者对能源互联网的关键技术^[17, 23-28]进行了详细分析及总结。

本文首先分析、比较不同学者对能源互联网内涵的理解, 进而阐述了本文对能源互联网内涵的新见解; 其次, 对不同学者设计的能源互联网的结构形态进行归纳、总结, 提出了涵盖完整一次能源系统、二次能源系统、交通网络及信息网络的新型能源互联网结构形态; 最后, 基于所提的能源互联网的新见解及新型能源互联网结构形态, 详述了与其相适应的技术支撑体系。

1 能源互联网的内涵讨论及新见解

能源互联网技术发展时间很短, 从美国著名学者杰里米·里夫金在《第三次工业革命》^[6]一书中提出能源互联网的愿景之后, 国内外研究人员从不同切入点及各自关注角度提出了多种各具特色的能源互联网技术所应涵盖的内涵和特点, 相互之间既有共同点又有所差异。表 1 从能源互联网技术所涵盖内容、共同点及与智能电网的区别 3 个方面阐述了不同学者对能源互联网内涵的理解。

由表 1 的对比分析不难看出, 能源互联网技术所涵盖的内容迄今并不统一, 关注的重点相互之间的差异还比较大, 如文献^[9]强调能源互联网的核心是“能源综合网”; 文献^[2, 7]认为能源互联网的重点是

表 1 能源互联网内涵
Table 1 Connotations of energy internet

典型代表	主要内容	与智能电网区别	共同点
文献[6]	1. 基于互联网技术实现广域内的电源、储能设备及负荷的协调和广域能源的共享; 2. 实现交通系统的电气化; 3. 实现由集中式化石能源利用向分布式可再生能源利用转变。	1. 分布式设备的广域协调控制; 2. 电气化交通系统(电动汽车)的普及; 3. 能源利用模式由化石能源向可再生能源转变。	
文献[2,7]	1. 以能源路由器为核心,电网实现各种分布式可再生能源的即插即用、用户的良好互动以及与其他形式能源系统的紧密互联; 2. 能源路由器由固态变压器、智能能量管理系统、智能故障隔离系统等组成。	1. 分布式电源的即插即用; 2. 以能源路由器为核心,实现不同形态能源系统的互联。	
文献[8]	以互联网及电力电子技术为基础,实现广域内分布式电源设备的协调与控制,实现电力系统与天然气网络及电气化交通系统的紧密融合。	1. 电力系统、交通系统、天然气网络共同组成一个协调统一系统,而不只是电力系统; 2. 能量可在电能、化学能、热能等多种形式间相互转化、消费和存储,而不仅仅是电能; 3. 分布式能源由局部消纳控制向广域协调消纳转变。	1. 基于先进电力电子技术和信息通信技术,实现可再生能源(集中式并网和分布式并网)的消纳和用户的良好互动; 2. 实现电网、能源网络(燃气网、热力网等)及交通网络的深度融合。
文献[9]	1. “energy internet”应理解为“互联能源网”或“综合能源网”; 2. 综合能源网是由物理系统(电网、气网、热力网、交通网)与信息网络构成的信息物理融合系统; 3. 信息流全方位地支持整个能源流的安全防御及优化运营,实现包括可再生能源在内的各类一次能源、电能为主的二次能源,以及能源需求侧的各种能源终端之间的综合交互与协调优化。	1. 信息物理系统从单纯的电网扩展到电网、气网、热力网、交通网构成的综合网络; 2. 信息系统支撑各种一次能源、以电能为主的二次能源的传输、转化、消费的优化与协调,及与消费者之间的互动。	
文献[10]	1. 利用送端的多端直流输电电网联结大型水电、风电、光伏电源基地及火电基地,实现各类电源资源的跨空间、跨流域远距离的传输、协调、优化及消费; 2. 将电网与燃气管网连接,实现电能与燃气的灵活模转化、储存及消费; 3. 构建局部风光电、储能、储热、供热、供电综合利用系统,实现各类能源综合利用。	在强调多端直流实现可再生能源跨区域、跨空间的协调优化及消费的基础上,提倡电网与燃气网、供热网的互联、相互转化、相互存储及消费。	
文献[11-14]	1. 基于“Energy Carriers”构建“Energy Hubs”,而“Energy Hubs”通过“Energy Interconnectors”相互连接形成“Hub Network”; 2. “Energy Hub”具有电、气、热(冷)输入、输出端口,其组成元件“Energy Carriers”主要包括微机处理器、变压器、电储能器、化学储能器、热(冷)储能器等设备,每个“Energy Hub”都是一个局部能量转换调节器,可利用微机处理器调节各“Energy Carriers”实现输入、输出端口的能量调节;“Energy Interconnectors”是联合传输设备,实现电、气、热(冷)的协同传输和消费。	1. 利用“Energy Hub”实现各种能源的转换、调节及消费,而不是单纯地对于电能的调节及消费; 2. 利用“Energy Interconnectors”实现能源(电、气、热(冷))的协同传输和消费,而不只是电能的传输及消费。	

基于能源路由器的分布式发电的即插即用等^[29]。但这些内涵的共同点均认为能源互联网是基于先进的电力电子技术和互联网(信息通信)技术,实现可再生能源的良好消纳的同时,实现一次能源网络(燃气网、煤运网等)、二次能源网络(即电力系统)、电气化交通网络(电动汽车、充电桩(站))及能源消费者(包括一次能源消费者及二次能源消费者)的紧密深度融合,实现能源生产、传输、分配、转换、存储、消费等全过程的协同和优化,实现能量流、信息流的双向流动的能量对等交换和共享的多网流系统。

经过比较分析,本文认为能源互联网是以解决能源枯竭危机、环境污染、气候变暖等问题以及实现分布式可再生能源(风能、太阳能等)大规模高效利用为目的,以特高压电网、智能电网建设为骨干,以电力网络为核心,以涵盖先进的互联网技术、通信技术

的信息通信网络为支撑,形成涵盖一次能源网络(不仅考虑不可再生能源网络,还考虑了分布式可再生能源网络)、电力网络、交通网络(电动汽车、充电桩(站)、加气(油)站以及电气化铁路)及信息通信网络的高度融合的、复杂的、能量流和信息流双向流动的多网流系统。

2 能源互联网结构形态比较分析及新型能源互联网结构形态设计

2.1 现有能源互联网结构形态比较分析

对于能源互联网,众多研究者提出了相应的结构形态,表 2 给出了不同文献设计的能源互联网结构形态及其相应的功能(结构图见图 1—5)。

然而,以上结构形态设计仍存在不完善之处:燃气网络只是一次能源网络(煤、燃气等为一次能源,

表 2 能源互联网结构形态设计

Table 2 Morphological design of energy internet

文献	结构形态特点	结构图	共同点
文献[2,7]	1. 以能源路由器为核心,由分布式可再生能源、分布式储能装置、终端用户及传统电网组成; 2. 在信息系统的支撑下,基于能量管理系统,实现可再生能源及储能装置的即插即用、用户与电网的良好互动、电能与燃气(如氢气)的自动转换等。	图 1	1. 强调信息通信的支撑作用,通过信息的采集、处理、决策来完成对全网能源的优化配置、高效利用,实现信息-能源一体化; 2. 在实现不同能源网络之间(如电网与燃气网络)以及与交通网络耦合和协同的同时,强调可再生能源(集中式及分布式)的大规模、高效率的利用和消纳。
文献[8]	1. 由电力系统、交通系统、天然气网络和信息网络紧密耦合而成; 2. 信息网络对全网设备的沟通、协调与控制起信息支撑作用; 3. 电力系统通过电动汽车充电桩、电制氢站(燃料电池)而与交通网络紧密耦合。	图 2	
文献[16-18]	1. 采用互联网理念构建信息能源融合的“广域网”; 2. 以大电网为“主干网”,以分布式可再生能源及微网等单元为“能源局域网”,以能源路由器为智能控制单元,采用开放对等的信息能源一体化框架体系实现“能源局域网”互联而成“能源广域网”,实现能源在广域内的传输、协调、优化和消费。	图 3	
文献[21-22]	1. 将能源互联网分为全球能源互联网、广义能源互联网和狭义能源互联网 3 类; 2. 设计了基于能源路由器、能源交换机及能源接口这 3 种核心硬件组成的狭义能源互联网的 3 层结构。	图 4	
文献[19]	1. 由智能能源网络、电力网络、信息网络组成的层次化结构; 2. 智能能源网络由能源微网互联组成; 3. 能源微网基于智能能量开关,由发电单元、储能单元、负荷互联而组成。	图 5	

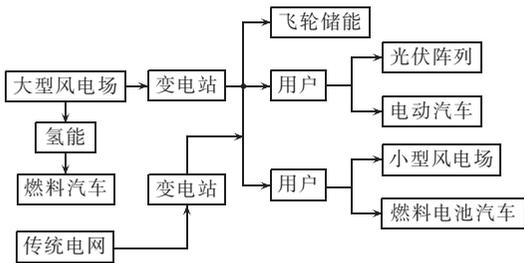


图 1 结构图 1
Fig.1 Structure diagram 1

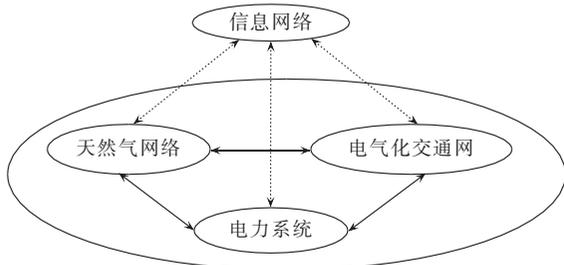


图 2 结构图 2
Fig.2 Structure diagram 2

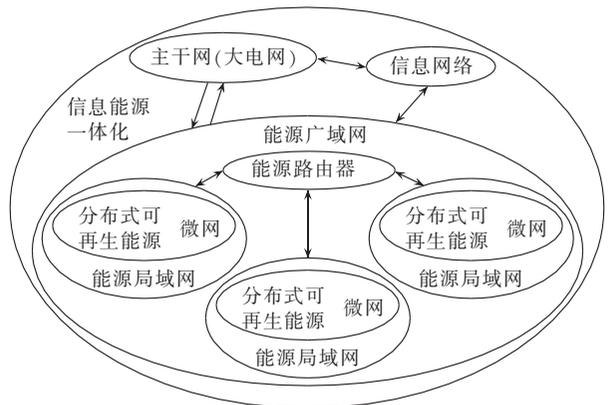


图 3 结构图 3
Fig.3 Structure diagram 3

其传输及分配网络为一次能源网络,电能为二次能源,相应电网为二次能源网络)的部分网络,电网与一次能源网络之间的耦合只考虑与燃气网络之间的耦合,而大多未考虑与占主导地位的不可再生能源(煤运网络、石油网络)供给网络之间的耦合。随着以煤碳为主的清洁利用及排放问题的技术进步和发展,在相当长的一段时期内,在世界范围内化石能源仍占主导地位,因此其传输及消费必然显著影响着其他能源的运行,故能源互联网非常有必要涵盖该网络。

2.2 新型能源互联网结构形态设计

基于上文的能源互联网内涵的讨论及其形态结构的对比,本文认为能源互联网所涵盖的一次能源系统应该是完整一次能源系统,除了天然气网络之外,还应包括在相当长一段时间内仍处于主导地位的其

他不可再生能源网络(煤运网络、石油网络)。虽然风能、太阳能等可再生能源在短时间内得到了快速发展,但其随机性、间歇性的特点,制约着其实现完全替代不可再生能源(天然气、煤、石油)的可能性,即不可再生能源在相当长的一段时间内仍将处于能源结构的主导地位。同时,清洁利用技术及废气(物)处理技术的发展,进一步稳固了不可再生能源的“地位”。鉴于此,新型能源互联网的结构形态设计,如图 6、7 所示。

图 6 所示为新型能源互联网结构形态宏观图,其涵盖一次能源网络、电力系统、交通网络及信息网络 4 个网络耦合而成的复杂的网络体系。一次能源网络、电力系统及交通网络两两之间不仅能够进行能量的双向流动,还可在信息网络的支撑下实现信息流的双向传输,信息网络实现全网覆盖。此外,一次能源网络包括不可再生能源(煤、石油、天然气)供给网络、可再生能源网络;电力系统包括传统电力系统、智能电网、特高压电网;交通网络包括电气化交通网络、传统交通网络;信息网络由信息局域网互联而成,起支撑作用。

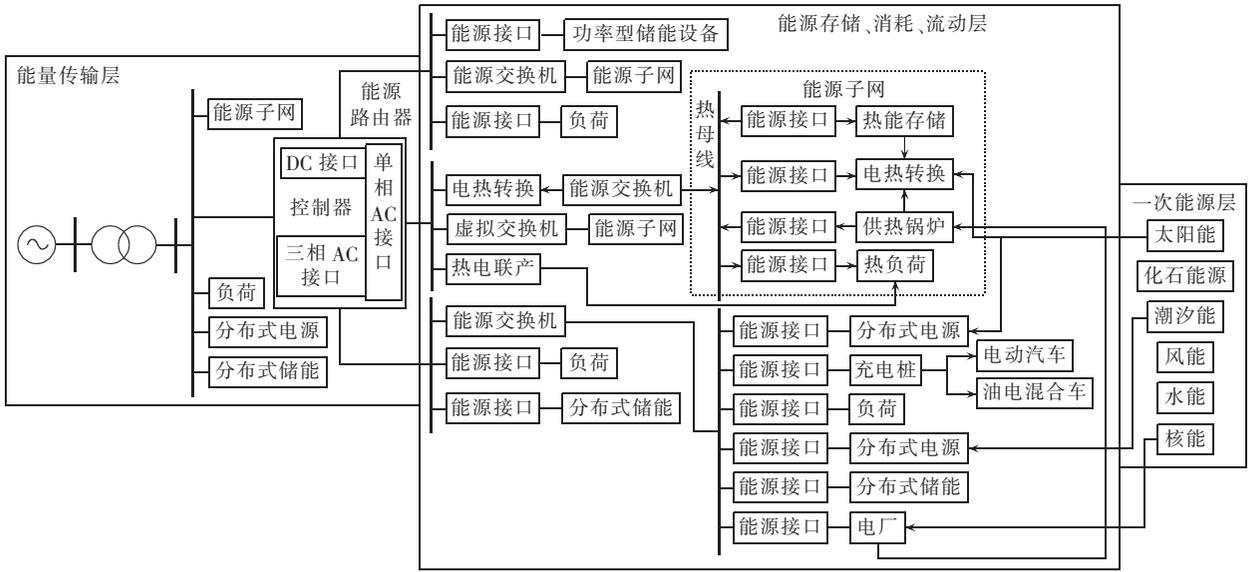


图 4 结构图 4

Fig.4 Structure diagram 4

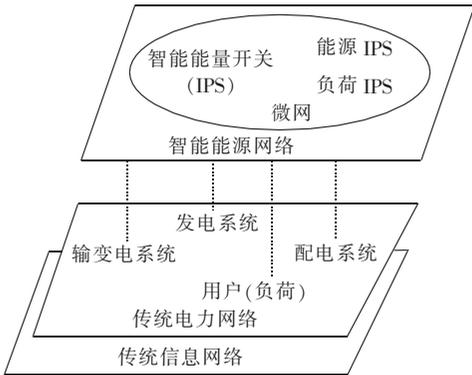


图 5 结构图 5

Fig.5 Structure diagram 5

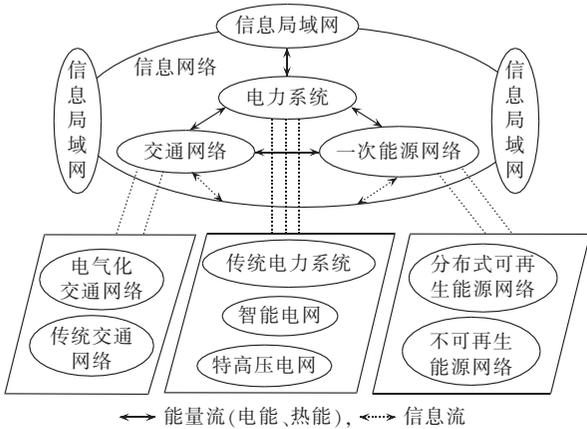


图 6 新型能源互联网结构形态宏观图

Fig.6 Macroscopic diagram of new energy internet morphology

图 7 所示为新型能源互联网结构形态微观图,从图中可知,不同的能源局域网可通过能源路由器相互联接而形成能源互联网,能源互联网也可通过能源路由器实现不同能源局域网间的解离。即依靠能源路由器,能源互联网可实现并网模式与孤岛模式的平滑切换,进而实现能源互联网的多模式(组网模式、

孤岛模式)下安全、可靠、经济运行。此种运行(调度)模式的实现,是完全依赖 Internet 来完成信息的交互、组网/孤岛的执行。此外,图 7 详细地规划了能源互联网(能源局域网)各模块(元件)间的连接关系,可具体表述如下。

a. 电力系统承担着一、二次能源转化、传输、分配的任务,是能源互联网的核心。电力系统核心作用的发挥依靠信息网络的支撑及能源路由器的配合。

b. 一次能源系统与电力系统、交通系统的交互影响。一次能源系统中不可再生能源供给网络(煤运网络)的供应水平很大程度依靠交通系统的支撑,若交通系统无法提供足够的电煤,则直接影响电能的生产,威胁着电能供求的平衡,导致供不应求;电煤的运输则一定程度上依赖电气化铁路运输,进一步加剧了电能供不应求的困境。即一次能源网络中不可再生能源网络、电力系统及交通系统是相互影响、密不可分的。

c. 电力系统与交通系统之间通过充电站(桩)、电动汽车相互影响。充电站的布局及车主的驾驶和充电行为会影响交通网络流量;反之,交通网络流量也会影响车主的驾驶和充电行为,进而影响电力系统运行。

d. 在一、二次能源转换设备中,利用电转气(P2G)技术,可以将可再生能源机组的多余出力转化为甲烷(天然气的主要成分),再注入天然气网络中进行运输和利用。此技术的应用导致燃气机组在发电侧的比例逐渐提高,天然气网络的运行将直接影响电力系统的经济运行及可靠性。电力系统与天然气网络之间的能量流动由单向变为双向。此外,利用电制氢技术制造燃料电池,从而解决分布式可再生能源产能过剩而难以储存的问题。

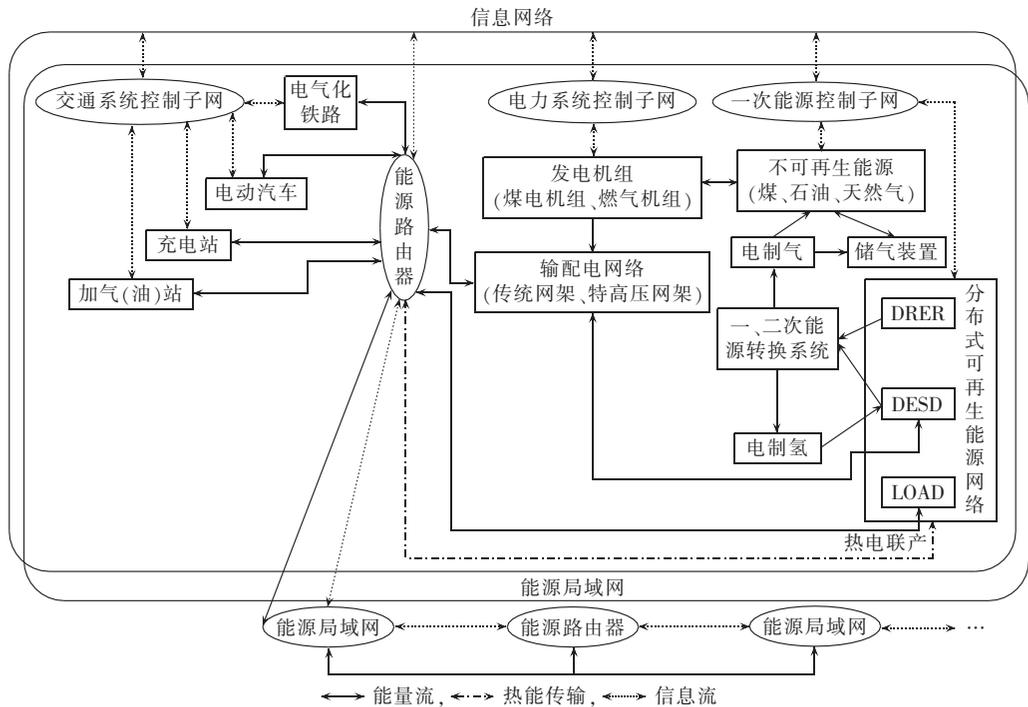


图 7 新型能源互联网结构形态微观图

Fig.7 Microscopic diagram of new energy internet morphology

e. 系统内的各种物理设备,尤其是分布式发电、分布式储能、可控负荷及电动汽车等,需要通过一个强大的信息网络进行协调和控制。信息网络将不仅是传统的工业控制网络,而且应该由互联网(Internet)等开放网络与工业控制网络互联构成。

f. 能源路由器在能源互联网中起着至关重要的作用。能源互联网中分布式能源的接入/退出,电动汽车的充/放电,分布式储能装置的充/放电,用户购电/卖电(用户互动),能源的传输、分配、转换,均依靠能源路由器来实现。能源路由器上述功能的实现则需要信息网络作为技术支撑。

3 能源互联网技术支撑体系设计

实现具有新型能源互联网结构形态的能源互联网正常运行,发挥其综合效益,必须建立与之相适应的技术支撑体系,包括能源互联网建模技术、能源互联网规划技术、能源互联网运行分析评估技术、能源互联网优化调度技术、能源互联网仿真技术和能源互联网抗灾及控制技术^[30-31]。

3.1 能源互联网建模技术

对于由图 7 所示的能源互联网系统,其实际是信息物理系统,在此环境下,所有元件的反应取决于相应的信息,因此,需要建立所有元件及模块的信息系统模型,具体如下。

a. 电力系统的信息物理建模。

电力系统建模从被建模对象的角度可分为:发电机建模、负荷建模及网络元件建模。其中负荷建模,

由于其类型复杂多变,存在很大的不确定性及无法用统一模型来描述等特点,一直是电力系统建模研究领域的主要研究对象。因此本文设计了在能源互联网环境下的涵盖负荷量测、动态与电价信息之间关系的负荷信息物理模型,如图 8 所示。

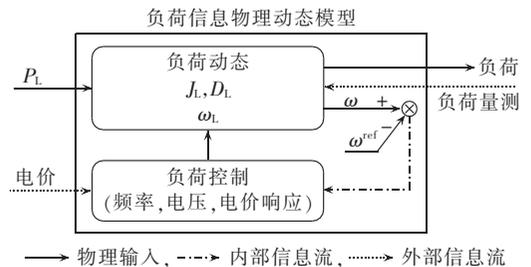


图 8 负荷信息物理模型示意图

Fig.8 Schematic diagram of physical load cyber model

显然,此时的负荷模型与传统意义下的负荷模型具有很大的不同,其负荷的动态除了反映于自身的物理特性之外,还反映于电价等信息;而实际上负荷的需求及动态还可能反映于除电价之外的其他如气象、系统状态、政策等信息,其过程相较于传统意义下的负荷模型要复杂得多。其他各类设备及元件,包括分布式电源、微网控制中心、各级负荷中心,乃至协调设备等均拥有与此类似的特点。因此需首先采用预测技术、数据挖掘技术及仿真技术等研究在此环境下的各个电气元件反映于信息的精确建模技术。

由于具有非常丰富的信息,此时可以采用 2 种策略进行电力设备的实时建模^[32]。

策略 1 完全基于在线信息对模型进行预测辨

识建模,并进行实时修正。该策略的优点是无需区别能源互联网各类参与者的物理形态上的差别,而把它当成简单的信息函数,具有黑箱特点,无需考虑信息对模型的作用特性而具有模型辨识算法简单的优点,但其缺点是精度可能不够高、计算时间长,且需频繁地在线修正等。

策略 2 把信息作为一个影响因子,结合设备特点及基本分类和属性,对设备进行在线修正建模。该策略具有辨识精度高的特点,但如何确定信息影响因子,以及在该信息因子参与的情况下如何保证模型参数的可辨识性及结构的可区分性,是该策略的难点。进而进行不同层级的元件、设备及局部网络的等值技术研究,由于不同层级的等值,其等值模型的精确性具有不一致性,此时等值在一定意义上相当于具有不同精度的信息融合,需研究相应的在线等值方法及校正方法。此外,在能源互联网环境下,信息量大且繁杂,还可能出现信息的不精确,如何从这些纷繁复杂且可能包含一定矛盾的信息中快速提取出有用且尽可能正确的信息,也是实现基于信息的电力设备建模的关键之一。此时,模糊集理论、粗糙集理论、证据理论、趋势分析、贝叶斯理论,乃至 DSmT 理论均可能是相应的候选方法。若所有电力设备及参与者均实现了上述建模,就实现了电力系统动态及稳态物理建模。

b. 信息系统建模。

信息系统主要是由大量的交换设备组成,因而非常有必要对交换设备进行建模。为准确计算信息在网络的传送时间,虽然存在不同通信协议,但都需要涉及交换设备内的 pipeline 流水线的各个功能,包括入口流分类及缓存、流量监管和整形、交换、出口队列缓存及队列调度、出口发送等环节。

在调度和队列缓存环节,由于可能的竞争,因而会产生传送的不确定性,使用的策略不同会产生不同效果,这些环节的功能可以使用随机过程来描述或者使用专门的基于 Petri 网的仿真软件来体现。

因与信息通信紧密相关的传感器、执行器以及通信链路等已成为能源互联网的重要组成部分,需首先研究信息系统的动态及稳态建模技术。在能源互联网环境下,通信方式众多、通信协议复杂,使得通信协议具有空间分布性、并发性、异步性、不稳定性和多样性的特点。对于信息系统的建模可以采用有限状态机模型(FSM)。它是一种图形式模型,并且有严谨的数学定义,通过状态的转移来表示信息系统的通信过程,以判断信息系统是否存在漏洞;该方法具有可视性的优点,但对于复杂实际信息系统的表达,该策略需进一步研究相应的复杂化简化方法。在获得信息系统的模型之后,进一步研究基于此信息系统

模型的信息动态及静态模型。

c. 交通系统的信息物理建模。

交通系统^[30]也是一个复杂的信息物理系统,其物理系统主要由大量的物理感知设备(红外、微波、超声波等检测器,RFID 电子标签、视频、线圈采集设备,智能车载设备,电子不停车收费系统(ETC)、可变信息交通标志(VMS)、发光二极管(LED)等)、计算设备(服务器、计算机等)和车辆、道路网等组成,这些设备通过信息网络实现互连。需要对交通物理系统和信息系统分别建模,再联合建立统一的信息物理模型。

对电动汽车充电的建模需考虑多方面的因素。电动汽车充电选择在时间上和空间上具有随机性,电动汽车可以根据自身的电量、充电站的位置、充电价格等信息改变自身选择。其他的各类设备及元件,包括非电动汽车、交通控制中心等均拥有与此类似特点。其物理建模也可采用与负荷建模类似的方法。交通信息系统建模可采用与电力信息系统类似的方法,再联合建立统一的交通信息物理模型。

d. 燃料供给网的信息物理建模。

燃料供给网包括石油供给网、煤炭供给网、天然气供给网等化石燃料子网络。在未来能源互联网中可再生能源将是能源消费的主体,但仍有部分的能源消费由化石能源提供,包括燃气发电、燃煤发电、混合动力汽车等,这些发电厂作为能源互联网的辅助,依然承担着重要的调峰调频任务。燃料供给网作为这些发电厂的重要供应媒介,自然也是能源互联网的重要组成部分。石油、煤炭、天然气等燃料子网相对独立,可分别对其进行信息物理建模。

对天然气管道压气站的建模,需要考虑压气站中天然气压缩机组的台数、类型和效率等。其他的各类设备及元件,包括天然气管道、输配气节点等均拥有与此类似的特点,其物理建模也可采用与负荷建模类似的方法。燃料网信息系统建模可采用与电力信息系统类似的方法,再联合建立统一的燃料网信息物理模型。

e. 能源路由器建模。

能源路由器是能源互联网的核心组成,以能源路由器为枢纽,实现一次能源网络、二次能源网络(电力系统)、电气化交通系统及信息网络的紧密耦合。能源路由器可实现能量生产/消耗预测、能源调度和故障隔离等功能,包含能源变换模块(能源形式转换模块,实现电能、热能及天然气等能源的转换;交直流转换模块,实现整流、电压变换、逆变等功能)、智能控制模块、故障检测模块和通信模块,以实现能源路由器所在子网工作于并网模式与孤岛模式。在并网模式中,能源路由器按照本子网内部能量需求以及上

级配电网的要求进行电能的智能协调控制,使得本子网具有多种工作状态(供电、受电、平衡和新能源最大出力等状态),此时能源路由器视作恒定的功率源,即能源路由器向主电网注入或者从主电网吸收恒定的有功功率和无功功率。在孤岛模式时,能源路由器智能调控本子网内电能,保证本子网的稳定、可靠运行。

f. 能源互联网的完整模型。

电力系统、交通系统和一次能源网络这些系统之间通过能量流和信息流进行紧密耦合,如图9所示,图中实线箭头表示信息流,点线箭头表示能量流及一次能源网络与能源路由器之间、电气化交通网络与能源路由器之间的弱耦合性,短虚线箭头表示能量流及电力系统与能源路由器之间的强耦合性。电动汽车通过充放电实现交通系统与电力系统的互动;一次能源网络(燃料供给网)为电力系统中的火力发电厂提供煤炭,为燃气机组提供天然气,反之,电力系统中多余的电能转化为天然气存储起来;一次能源网络(燃料供给网)为交通系统中的汽车提供燃油和天然气。这些系统中的能源供需和转化关系等通过信息网络进行交互。信息网络将一次能源网络、电力系统及交通系统整合成有机整体,实现能源互联网内信息、能源的互联互通,互联网化,即能源互联网。这些系统的内部运行情况其他系统无需知晓,只需向其他关联系统提供边界的交互能量信息,通过预测、迭代和反馈校正实现各系统的协同。

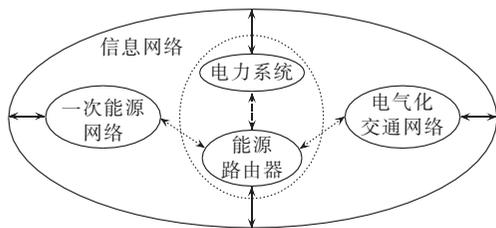


图9 能源互联网多网络耦合图

Fig.9 Multi-system coupling of energy internet

3.2 能源互联网规划技术

能源互联网是由一次能源系统(燃料供给网络)、二次能源系统(电力系统)、交通系统通过信息网络耦合而成的复杂网络体系。若要实现能源互联网的安全、可靠、经济及环保运行,必须对组成能源互联网的各个系统进行协调规划。可先分别规划电力信息物理系统、燃料供给信息物理系统、交通信息物理系统,进而对这3个信息物理系统进行联合协调规划。在数学上为混合整数非线性优化模型。此规划采用最小化3个信息物理系统的投资成本和运行成本之和作为其目标函数。约束包括3个信息物理系统的等式约束、不等式约束及各系统之间的相关约束,具体如下^[33]。

a. 电力系统约束。

电力系统约束与传统的发电规划和电网规划模型中的约束类似。约束包括潮流约束、机组出力约束、变压器容量约束、功率传输上下限约束、电压上下限约束、电流上下限约束等。

b. 燃料供给网络约束。

燃料供给网络约束主要包括节点气(油)量平衡约束、储气(储油)设施气量(油量)平衡约束、输气(石油)管道潮流上下限约束、储气(储油、储煤)设施容量约束、气(油、煤)价格约束、储存量约束。

c. 交通系统约束。

交通系统约束包括交通网络的结构约束、道路车流量上限约束、交通路线约束、充电设施位置约束、充电设施容量约束、加油(气)站位置约束、加油(气)站容量约束等。

d. 各系统之间的相关约束。

各系统之间的相关约束包括电转气的规模及效率约束,电制氢规模约束,燃料供给与电力需求平衡约束,燃料供给与油(气)需求平衡约束,分布式能源位置与电制气、电制氢设施间约束,输配电网络与充电站位置约束等。

3.3 能源互联网运行分析评估技术

a. 能源互联网运行安全性分析及评估技术。

电力系统、交通系统和燃料供给网的状态都有很大的自主性,使得各系统的变化具有很大的不确定性,甚至突变性。因各系统之间是紧密耦合的,一个系统状态的变化会对其他系统的状态产生影响。比如交通系统中的电动汽车通常白天行驶,晚上充电,且充电时间比较固定,若数量庞大,会与其他居民负荷叠加,形成负荷高峰,对电力系统的运行造成很大压力,因此需研究能源互联网当前状态的安全性分析及安全裕度评估技术。

b. 能源互联网可靠性分析及风险评估技术。

在能源互联网环境下,电力系统、交通系统或燃料供给网中的设备故障会给本系统的安全运行带来风险,也可能造成其他系统的运行风险。比如天然气管道泄漏,一方面会造成天然气供应减少,加气站的气量减少,影响天然气汽车的行驶轨迹,影响交通系统的交通流分布,造成局部交通堵塞,影响正常运转;另一方面,相关的燃气机组发电减少,造成电力系统的局部发电功率减少,可能造成局部地区电力功率缺额,有失负荷风险;另外,信息网络的故障,如通信阻塞、延迟乃至中断、恶意攻击等,可能导致错误的调度决策,均会不同程度地影响各系统安全可靠的能源传输,因此,需研究能源互联网可靠性分析及风险评估技术。

c. 能源互联网稳定性分析及评估技术。

在能源互联网环境下,电力系统、交通系统或燃料供给网中的设备故障会给本系统的稳定性造成影响,情况严重时,可能使本系统失稳,也可能波及与其他系统,造成其他系统稳定性下降。因此需研究能源互联网的稳定性分析及稳定裕度评估方法。

3.4 能源互联网优化调度技术

能源互联网各子系统之间紧密耦合,为了获得全局的最优经济运行,需要充分利用各个子系统的特点和优势,进行协调优化调度,如对电动汽车的充放电进行控制,可达到削峰填谷的作用,同时增加系统的经济性。将电气设施与可再生能源发电机组联合运行,就可以将多余的电能转化为天然气存储起来。在电力不足时,通过燃气机组将天然气转化为电能输出。利用已建立的能源互联网各子系统的信息物理系统模型分别对各子系统进行优化调度,与其他子系统之间传递多步预测的能源传输或转换的边界信息,经过滚动优化和反馈校正,实现整个能源互联网范围内的能源优化调度。

3.5 能源互联网仿真技术

基于所建立的能源互联网完整模型(电力信息物理系统、交通信息物理系统或燃料供给信息物理系统及它们的耦合),分别对各子系统进行仿真,在仿真过程中与其他子系统之间传递能源传输或转换的边界信息,可获得能源互联网整体的运行状态轨迹,通过对此轨迹的分析及评估,便于分析及评估能源互联网整体运行的安全性、稳定性及经济性。

3.6 能源互联网抗灾及控制技术

a. 能源互联网抗灾技术。

基于仿真、灵敏度分析以及可靠性风险分析评估,辨识能源互联网各子系统中的薄弱环节,以及各子系统之间交互的薄弱环节;进而研究阻止能源互联网系统中的灾害影响波及到其他子系统的预防策略,研究能源互联网因自然或故意破坏等因素导致的能源互联网崩溃预防策略。

b. 能源互联网电能质量分析及谐波消除控制技术。

在能源互联网环境下,电力系统与交通系统的互动、电力系统与燃料供给网的互动、电力系统与用户的互动,比如电能与天然气的相互转化,用户的积极反馈,拥有大量电力电子设备的分布式发电及电动汽车等的即插即用,不可避免地产生大量的谐波从而影响电能质量,因此需研究在此环境下的电能质量的分析技术,以及谐波源的探测和综合消除控制技术。

c. 能源互联网自愈技术。

由于能源互联网环境下,电力系统、交通系统和燃料供给网紧密耦合,一个子系统及设备故障(通信设备和物理设备)不仅会影响本子系统的正常运行,

还可能给相连子系统的运行造成破坏。因此应研究能源互联网各子系统内部设备故障及交互环节故障的自愈技术。

能源互联网相应技术体系各个部分的关系如图 10 所示。

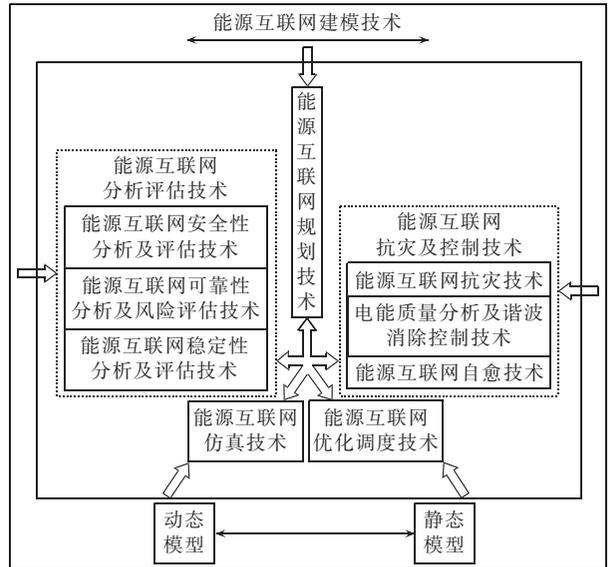


图 10 能源互联网技术体系结构

Fig.10 Architecture of technical system for energy internet

上述 6 个方面的技术体系支撑着能源互联网的运行和发展。

4 结论

本文在对比分析国内外关于能源互联网内涵及结构形态的基础上,阐述了对能源互联网的新见解,提出了包括完整一次能源系统(不可再生能源网络、分布式可再生能源网络)、电力系统、交通网络及信息网络组成的新型能源互联网结构形态;基于所提的新型能源互联网结构形态,提出了相应的技术支撑体系。目前,国内外关于能源互联网研究的差距并不大,大多处于起步及探索阶段,对于我国的能源领域而言,是一个极好的机会。

参考文献:

- [1] 李克强. 政府工作报告——2015 年 3 月 5 日在第十二届全国人民代表大会第三次会议上[N]. 中华人民共和国全国人民代表大会常务委员会公报, 2015.
- [2] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99 (1): 133-148.
- [3] European Commission. Recorded conference mission on growth: Europe at the lead of the new industrial revolution[C]//Power and Energy Society Conference, 2013 IEEE. [S.L.]: IEEE, 2013: 13-20.
- [4] KÖHLER F, NETTLAU H, SCHWEIZER T, et al. The research

- project of the german federal ministry of economics and technology: 'partnership for the heart' -a new approach in telemedicine [J]. *Disease Management & Health Outcomes*, 2006, 14(1): 37-41.
- [5] 宋鸿. 解读德国能源计划把脉未来能源走向[J]. *电力与能源*, 2011, 32(5): 349-353.
- SONG Hong. The interpretation of the Germany energy plan and the trend of future energy[J]. *Power and Energy*, 2011, 32(5): 349-353.
- [6] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. New York, USA: Palgrave Macmillan, 2013: 67-86.
- [7] HUANG A. FREEDM system—a vision for the future grid[C]// *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*. [S.l.]: IEEE, 2010: 1-4.
- [8] 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.
- [9] XUE Yusheng. Energy internet or comprehensive energy network [J]. *Journal of Modern Power Systems & Clean Energy*, 2015, 6(10): 1-5.
- [10] 周孝信. 构建新一代能源系统的设想[J]. *电器工业*, 2015, 1(8): 1-4.
- ZHOU Xiaoxin. The idea of building a new power system of energy internet[J]. *Electrical Industry*, 2015, 1(8): 1-4.
- [11] FAVRE-PERROD P. A vision of future energy networks[C]// *Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa*. [S.l.]: IEEE, 2005: 13-17.
- [12] GEIDL M. Energy hubs for the future[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2007, 5(1): 24-30.
- [13] GHASEMI A, MEHRDAD H, JAVIDI M H. Introducing a new framework for management of future distribution networks using potentials of energy hubs[C]// *2012 2nd Iranian Conference on Smart Grids (ICSG)*. [S.l.]: IEEE, 2012: 1-7.
- [14] SCHULZE M, FRIEDRICH L, GAUTSCHI M. Modeling and optimization of renewables: applying the Energy Hub approach [C]// *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*. [S.l.]: IEEE, 2008: 905-910.
- [15] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(3): 1-5.
- DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(3): 1-5.
- [16] 曹军威, 杨明博, 张德华, 等. 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化[J]. *南方电网技术*, 2014, 8(4): 1-10.
- CAO Junwei, YANG Mingbo, ZHANG Dehua, et al. Energy internet: an infrastructure for cyber-energy integration[J]. *Southern Power System Technology*, 2014, 8(4): 1-10.
- [17] 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, 6(4): 5-17.
- CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, et al. An energy internet and energy routers[J]. *Scientia Sinica Informationis: Information Science*, 2014, 6(4): 5-17.
- [18] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述[J]. *计算机研究与发展*, 2015, 52(3): 1-18.
- WANG Jiye, MENG Kun, CAO Junwei, et al. Research on information technology for energy internet: a survey[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2015, 52(3): 1-18.
- [19] KATZ R H, CULLER D E, SANDERS S, et al. An information-centric energy infrastructure: the Berkeley view[J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2011, 1(1): 7-22.
- [20] 付学谦, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 能源互联网供能质量综合评估[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(10): 1-7.
- FU Xueqian, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Comprehensive evaluation of energy quality for energy internet[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(10): 1-7.
- [21] 孙秋野, 滕菲, 张化光, 等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3667-3677.
- SUN Qiuye, TENG Fei, ZHANG Huaguang, et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3667-3677.
- [22] 孙秋野, 王冰玉, 黄博南, 等. 狭义能源互联网优化控制框架及实现[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(18): 4571-4580.
- SUN Qiuye, WANG Bingyu, HUANG Bonan, et al. The optimization control and implementation for the special energy internet [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(18): 4571-4580.
- [23] 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.
- [24] 黄如, 叶乐, 廖怀林. 可再生能源互联网中的微电子技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(6): 728-742.
- HUANG Ru, YE Le, LIAO Huailin. Microelectronics technologies in renewable energy internet[J]. *Scientia Sinica Informationis: Information Science*, 2014, 44(6): 728-742.
- [25] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3482-3494.
- TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [26] 刘宝龙, 查亚兵. 未来能量互联的关键设备——固态变压器[J]. *国防科技*, 2014, 5(3): 10-13.
- LIU Baolong, ZHA Yabing. The future energy interaction key equipment—solid state transformer[J]. *National Defense Science & Technology*, 2014, 5(3): 10-13.
- [27] 于慎航, 孙莹, 牛晓娜, 等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统[J]. *电力自动化设备*, 2010, 30(5): 104-108.
- YU Shenhong, SUN Ying, NIU Xiaona, et al. Energy internet system based on distributed renewable energy generation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2010, 30(5): 104-108.
- [28] 徐成, 梁睿, 程真何, 等. 面向能源互联网的智能配电网安全态势感知[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(6): 13-18.
- XU Cheng, LIANG Rui, CHENG Zhenhe, et al. Security situation awareness of smart distribution grid for future energy internet [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(6): 13-18.
- [29] 张勇军, 陈泽兴, 蔡泽祥, 等. 新一代信息能源系统: 能源互联网 [J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(9): 1-7.
- ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, CAI Zexiang, et al. New generation of cyber-energy system: Energy Internet [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(9): 1-7.
- [30] 赵俊华, 文福拴, 杨爱民, 等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(14): 2-10.
- ZHAO Junhua, WEN Fushuan, YANG Aimin, et al. Impacts of electric vehicles on power systems as well as the associated dispatching and control problem[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(14): 2-10.

- [31] 付学谦,孙宏斌,郭庆来,等. 能源互联网供电质量综合评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):1-7.
FU Xueqian,SUN Hongbin,GUO Qinglai,et al. Comprehensive assessment of energy supply quality of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):1-7.
- [32] 陈娟,黄元生,鲁斌. 区域能源互联网信息物理建模及控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):1-10,23.
CHEN Juan,HUANG Yuansheng,LU Bin. Physical energy modeling and control strategy of regional energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(12):1-10,23.
- [33] 张国荣,陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备,2017,1(1):1-7.
ZHANG Guorong,CHEN Xiaran. A summary of future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,1(1):1-7.

作者简介:

王 璟(1973—),女,河南郑州人,高级工程师,博士,



王 璟

主要研究方向为电网规划技术(**E-mail**: wangjing@ha.sgcc.com.cn);

王利利(1984—),男,河南郑州人,工程师,博士,主要研究方向为电网规划技术(**E-mail**: wanglili11@ha.sgcc.com.cn);

林济铿(1967—),男,福建莆田人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统稳定性分析及控制、EMS/DEMS、配网自动化、分布式发电、电力市场及能源政策(**E-mail**: mejclin@126.com);

孙义豪(1985—),男,河南郑州人,工程师,硕士,主要研究方向为电网规划技术(**E-mail**: sunyihao@ha.sgcc.com.cn);

王佰淮(1988—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统可靠性、能源互联网(**E-mail**: baihuai90@126.com);

叶剑华(1979—),男,湖南郴州人,博士,研究方向为电力系统可靠性(**E-mail**: yjh7985@126.com)。

Energy internet morphology and its technical support system

WANG Jing¹,WANG Lili¹,LIN Jikeng²,SUN Yihao¹,WANG Baihuai³,YE Jianhua⁴

(1. Electric Power Economic Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company,Zhengzhou 450052,China;

2. College of Electronic and Information Engineering,Tongji University,Shanghai 201804,China;

3. School of Electrical Engineering & Automation,Tianjin University,Tianjin 300072,China;

4. Tianjin Key Laboratory of Information Sensing & Intelligent Control,Tianjin University of Technology and Education,Tianjin 300222,China)

Abstract: As an important infrastructure for the large-scale efficient utilization of renewable energy,energy internet has become a hot research topic in the energy field. Based on the analysis and comparison of domestic and foreign researches on the connotation and morphology of energy internet,a fresh connotation of energy internet and corresponding morphology are proposed,which is composed of the entire primary energy system,electric power system,transportation network and information network. The relationship among its different parts is described and a corresponding technical support system of the proposed energy internet morphology is designed.

Key words: energy internet; structural morphology; technical support system; electric power systems