

全球能源互联网—四川行动

褚艳芳¹, 田立峰¹, 魏巍², 李淑琦², 李世平¹, 侯国彦¹

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 能源互联网是解决未来可再生能源大规模有效利用的重要基础, 发展能源互联网对改变当前以化石能源为主的能源生产和消费模式具有重要意义。阐述了能源互联网的理念, 探讨了中国特色的能源互联网及其主要特征; 同时阐述了能源互联网和互联网的区别, 提出了能源互联网发展进程中需要研究的关键技术。结合当前四川电网的发展状况, 分别从特高压输电线路、“互联网+”管控系统、综合能源管理平台、多类型能源优化互补调度、富余水电制氢、智能调度与安全防护等方面对四川电网在能源互联网的构建过程中已做出的成果及其未来的发展方向做出了讨论。

关键词: 能源互联网; 特高压输电; 能源管理; 智能调度

Abstract: Energy internet is the key to solve the issue of effective utilization of renewable energy; and developing the energy internet is of great significance for changing the present energy generation and consumption modes dominated by fossil fuels. Firstly, the concept of energy internet is reviewed and the energy internet with Chinese characteristics and its main features are discussed. The difference between the energy internet and the internet are described and the key technologies needing investigated in the development of energy internet are proposed. Combining with the current situation of Sichuan power grid, the achievements already made in the construction of energy internet and the future developing direction of Sichuan power grid are respectively presented in such aspects as UHV transmission lines, "internet plus" based project, integrated energy management platform, multi-energy hybrid dispatching optimization project, hydrogen production using surplus hydropower, intelligent dispatching control and security defense. These discussions can provide a reference for energy internet construction in other regions of China.

Key words: energy internet; UHV transmission; energy management; intelligent dispatching

中图分类号: TK-9 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2016)04-0011-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.04.003

0 前言

近年来, 由传统化石能源所带来的环境污染日益严重, 并且这些资源是不可再生的, 是有限的, 按照目前的社会需求和开采速度, 百年之内全球化石能源将处于一种枯竭的状态^[1]。为了应对能源危机, 世界各国积极研究新能源技术, 尤其是对太阳能、水能、风能和生物质能等可再生能源。就可再生能源的传输利用来说, 能源互联网旨在最大程度上提高可再生能源的利用效率, 降低经济发展对传统化石能源的依赖程度, 从根本上改变当前的能源生产和消费模式。

能源互联网的提出, 打破了传统能源产业之间的供需界限, 最大程度地促进煤碳、石油、天然气、

热、电等一、二次能源类型的互联、互通和互补; 在用户侧支持各种新能源、分布式能源的大规模接入, 实现用电设备的即插即用; 通过局域自治消纳和广域对等互联, 实现能量流的优化调控和高效利用, 构建开放灵活的产业和商业形态。能源互联网是能源和互联网深度融合的产物, 受到了学术界和产业界的广泛关注^[2]。

四川省是“一带一路”和“长江经济带”的重要接合部, 在全球能源互联网战略中具有特殊地位, 且四川省拥有大量的清洁能源, 目前全省80%的发电装机都是清洁能源, 其水电技术可开发量约1.2亿kW, 风能、太阳能资源也非常丰富^[3]。国网四川省电力公司在2016年工作会议上提出, 要主动顺应能源革命和改革创新发展趋势, 积极融入全球能源互联网建设^[4]。总经理石玉东在四川日报上发表文

章 提出国网四川省电力公司主动围绕全球能源互联网战略构想,本着“促共识、搭平台、引资源、建示范”原则,将大力实施能源互联网“四川行动”计划。

1 能源互联网概述

1.1 能源互联网定义

随着互联网理念的不断深化,一种新型的能源体系架构——“能源互联网”的构想应运而生。如图1所示,其主要理念是将可再生能源作为主要的能量供应源,通过互联网技术实现分布式发电和储能的灵活接入,以及交通系统的电气化,并在广域范围内分配共享各类能源^[5]。而针对不同国家的国情来说,能源互联网应以国家需要解决的问题为导向。就中国当前能源开发利用现状来说,首要任务是节能减排及提高可再生能源的开发利用效率。电能作为一种清洁、高效的二次能源,其传输效率高,使用便捷。将电力系统作为链接一次能源和二次能源的枢纽,既能提高各种一次能源的利用效率,又可以充分利用各地的清洁能源,进行能源转型。

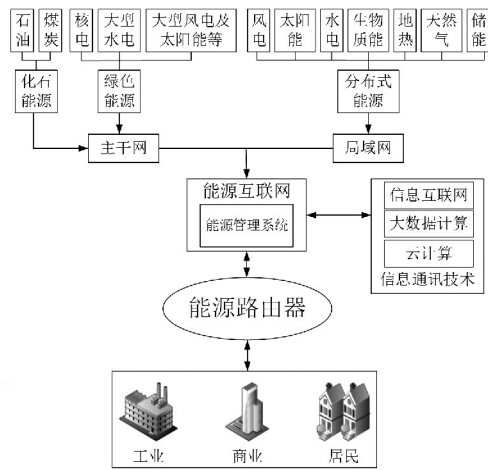


图1 能源互联网示意图

综上所述,中国的能源互联网应当是以互联网技术为基础,以特高压为骨干网架,通过电力系统,将太阳能、风能、水能等各种清洁能源、化石能源转换成电能后传输,并与其他传统能源传输方式分工协作,对资源进行优化配置^[6-11]。

1.2 能源互联网的主要特征

能源互联网将能源行业与互联网相联接,构建一个以电能为主体,强调多种能源形式综合互补的能源生态系统。其特征主要有以下5点:

1) 包容性。能源互联网可接纳大规模集中式电网、分布式微电网以及大规模清洁能源发电和消

纳分布式电源,将各种一次能源,特别是可再生能源转化成二次清洁能源到用户,为人们的生活提供安全可靠的动力,提高能源利用效率。

2) 开放性。能源互联网依靠先进的柔性控制技术,优化能量传输路径,提供多种兼容性的电能输出接口,实现电动汽车等特殊用户的规模化接入。

3) 系统性。能源互联网能够在系统内部通过能源配置的优化调节,保证局部能源设备的互通,通过传统化石能源和清洁能源的协调互补,提高系统的安全性和经济性。

4) 信息性。电力行业是一个实时的动态系统,能源互联网通过互联网信息技术将实时的能量信息进行接收和发送,并进行智能化处理,有利于对能源配置的优化。

5) 可靠性。安全可靠是能源互联网需具备的最重要特征。能源与人们的生活息息相关,能源的缺失会对人们的生活产生极大影响。而能源互联网的稳定不仅需保证电气网络的安全可靠,信息传递的可靠性也是至关重要的。

2 能源互联网与互联网的区别

互联网(internet)是基于IT技术的信息网络,又称为网际网络。它是指网络以一组通用的协议相连,形成逻辑上的单一巨大的全球化网络,它拥有交换机、路由器、各种不同的连接线路、种类繁多的服务器和不计其数的计算机、终端,且能够将海量信息瞬间发送到千里之外的用户手中,它是信息社会的基础。

能源互联网(intergird)不仅基于信息技术,更基于特高压电网技术,具备网架坚强、广泛互联、高度智能、开放互动的特征。能源互联网是综合运用先进的电力电子技术,信息技术和智能管理技术,将大量由分布式能量采集装置,分布式能量储存装置和各种类型负荷构成的新型电力网络、石油网络、天然气网络等能源节点互联起来,以实现能量双向流动的能量对等交换与共享网络。它利用先进的传感器、控制和软件应用程序,将能源生产端、能源传输端、能源消费端的数以亿计的设备、机器、系统连接起来,形成能源互联网的物联基础。大数据分析、机器学习和智能预测是能源互联网实现生命体征的重要技术支撑;它通过整合运行数据、天气数据、电网数据、安全数据、电力市场数据等,进行大数据分析、负荷预测、发电预测、机器学习、打通并优化能源生

产和能源消费端的运作效率,需求和供应将可以进行随时的动态调整。

表 1 能源互联网和互联网的区别

	互联网 Internet	能源互联网 Intergrid
网络功能	各类信息的通信、传输和交换共享平台	各类(集中/分布式)能源通信、传输和交换共享平台
	实现人与人、人与机器之间的通信	实现人与物、物与物之间的通信
网络结构	广域网	大区域输电网(特高压、超高压、高压)
	城域网	城市配电网(中压)
	局域网	小区域电网和微网(低压)
网络协议	OSI 协议,基于 TCP/IP 协议栈	IPv6
网络服务	信息接入、信息结算、信息消费	能源接入、能源结算、能源消费
网络设备	网络交换机	能源交换机
	网络路由器	能源路由器
网络安全	防火墙、入侵检测设备、隔离设备	保护装置、继电保护和自动化设备
服务对象	信息提供者	能量提供者
	信息消费者	能量消费者

如表 1 所示,能源互联网与互联网具有相似的结构特征,但是却拥有不同的网络功能、网络协议、网络服务、网络设备、及服务对象。能源互联网在普通 IT 技术的基础上,将能量管理系统、信息安全系统、企业资源计划系统、办公自动化系统等多种内部信息流与能源传输、能源运行、能源交换有机结合。

因为网络安全的原因,能源互联网的各个信息系统(实时的或者非实时的)且与外界隔离的,实际上是企业内网(intranet)。因此,能源互联网(interg-rid)是由一次电网(powergrid)和企业内网(intranet)两部分有机组合而成。如何构造多能源主体和信息网络的相互关系及协调控制策略是未来保证能源互联网高效运行的重要因素。由于能源互联网中的信息流已不再独立运行,它将和能量流相互依存,相互影响,具有更加复杂、灵活、多变的特性,因此一旦信息系统发生紊乱,将直接影响能量的正常传输,引发一系列的能量阻塞、中断。图 2 揭示了信息系统和电力系统的交互影响关系:利用电网状态感知技术及信息通信系统,可有效维护电网安全运行。但是,如果电力系统与信息系统无法正确交互作用,就有可能引发信息流和电力流的连锁反应,造成电网大面积停电的风险。

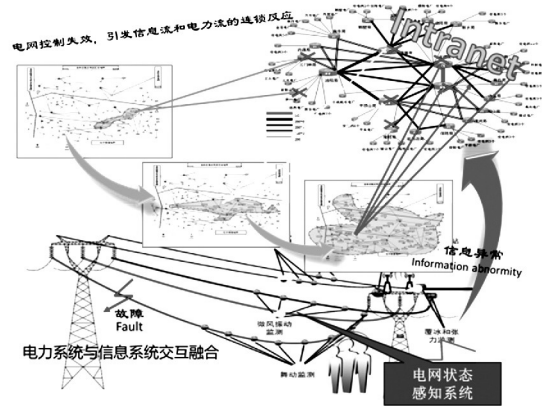


图 2 信息系统和电力系统交互关系示意图

3 能源互联网的核心技术

未来能源互联网会有大量的分布式和集中式可再生能源的接入,为了有效推动能源互联网的发展,需要对可再生能源的生产、传输、存储和服务环节中的核心技术进行研究^[12-16]。

3.1 可再生能源发电技术

随着国家不断推进可再生能源发展的政策,可再生能源产业保持快速稳步发展的态势,如图 3 所示。而“以清洁能源为主导、以电为中心”将是未来能源发展的主要方向,可再生能源发电技术在构建能源互联网的过程中会起到至关重要的作用。可再生能源发电技术主要有集中式与分布式风电、太阳能发电技术、运行控制技术、能量转化技术等。其重点研究方向有风电精准预测与运行调控技术、间歇式可再生能源发电的系统保护技术、大规模新能源发电并网控制技术。

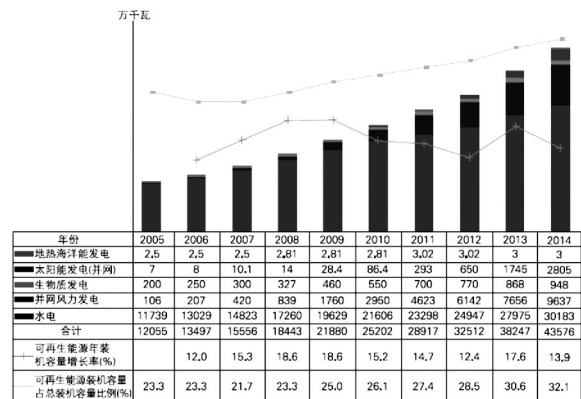


图 3 2005 - 2014 年中国可再生能源装机容量

3.2 特高压大容量远距离输电技术

大容量远距离输电是解决大规模可再生能源发电外送和能源资源大范围优化配置的关键,是解决中国能源分布不均衡最有效的手段,如图 4 所示。

中国将电网建设为以特高压为骨干网架,各级电网为分区的具有中国特色的电网,利用高压直流互联可再生能源基地,形成覆盖全国的交直流混合电网^[17]。其重点研究领域包括:柔性直流输电技术、直流电网技术、多段直流输电技术等。直流电网技术对于解决中国能源资源分布不平衡、区域交流电网互联的稳定运行等问题是最有效的技术手段之一^[18-21]。

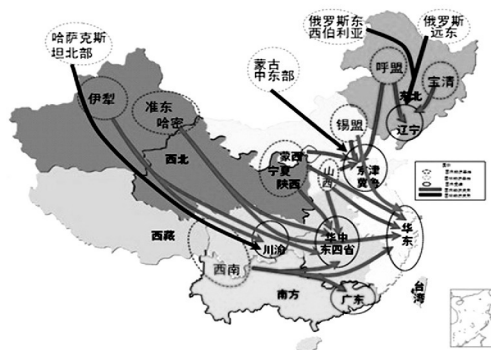


图 4 中国未来电力流向示意图

3.3 互联网信息技术

互联网信息技术负责能源信息的识别、采集、分析、传输、管理等,是能源互联网的重要组成部分,如图 5 所示。通过互联网,不仅能够利用互联网营销技术、云存储、云计算技术来获取能源储备和用户使用信息,而且能再云端大数据技术的分析处理下,进行能源的优化配置。为了适应能源互联网的发展,需要在互联网信息领域取得创新和突破,如大数据的数据采集、预处理、存储分析,能够与能量传输特点相匹配的新型通信网络技术,能源路由器等方面。

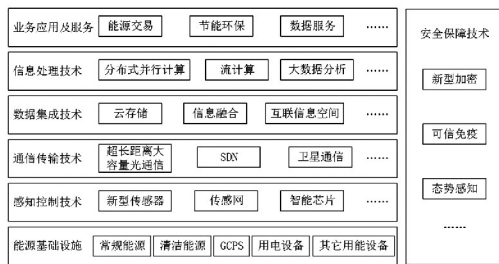


图 5 能源互联网的信息技术架构

3.4 智能调度控制与安全防护技术

由于新能源系统广泛采用分布式发电机及储能元件,且用户能源消纳方式有所改变,因此智能调度与安全防护尤为重要。如图 6 所示,智能调度控制中心连接各类电源并通过双向信息流实现发电机出力、用户侧负荷和储能系统之间的协调以及水、火、风、光、储能等能源的动态平衡。

3.5 先进的储能技术

可再生能源发电是未来能源互联网的主要能量来源,而大规模可再生能源的非线性随机波动特性

接入会影响电网的稳定性、经济性。在能源网络中配置大容量的储能系统能够平滑电网的能量输出,保证供电的持续性和可靠性。如图 7 所示,可行的大规模电网储能方式有抽水蓄能、压缩空气储能等物理储能,以及锂电池、液流电池、铅酸电池等化学储能。未来储能技术的创新和突破,会对电力系统发、输、配、用电的各个环节带来根本性的影响,对能源互联网的建设有至关重要的作用。

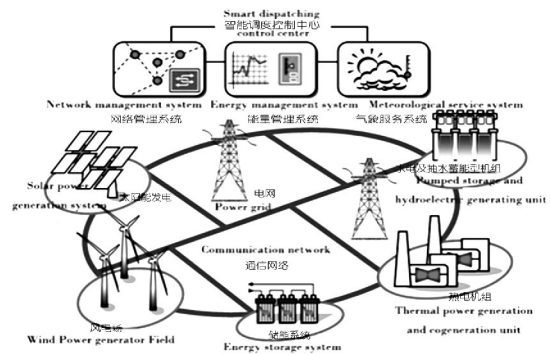


图 6 智能调度及安全防护一体化示意图

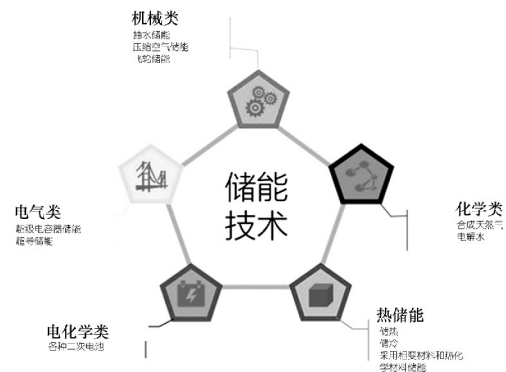


图 7 储能技术种类示意图

4 能源互联网在四川的实践

4.1 加快建设特高压输电线路

特高压电网是构建能源互联网的关键,是输送清洁能源的最有效手段。四川省的水、风及太阳能资源蕴藏总量达 1.93 亿 kW。通过特高压输电网络进行大区互联,有助于减轻化石能源的压力,实现能源、经济、社会可持续发展。

四川省是输电线路位居国网系统第一,输变电规模位居第二超级电力大省,也是中国较早建设投运特高压电网的省份之一,先发优势明显,如图 8 所示,目前已有 3 条特高压输电线路投入运行:

1) 向家坝至上海(复奉) ±800 kV 特高压直流输电工程是我国自主研发、自主设计和自主建设的世界上电压等级最高、技术水平最先进的直流输电工程之一;

2) ± 800 kV 锦苏线是输电距离最远的特高压直流输电工程之一;

3) ± 800 kV 宾金线是目前输送功率最大的特高压直流输电工程之一。

5 年来,三大特高压直流输电线路,已累计向上海、江苏、浙江等地输送四川清洁水电达到 2 033 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,相当于节约燃煤 9314 万 t,减排烟尘 7.4 万 t、二氧化硫 45.8 万 t、氮氧化物 48.4 万 t、二氧化碳 18 297 万 t。四川清洁能源以清洁和绿色方式满足了中国东部的部分能源需求,为实现节能减排,推进大气污染防治作出了重要贡献。但就四川水电储量来说,每年仍有非常严重的弃水现象。2015 年全省富余水电装机约 450 万 kW ,弃水电量达 102 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。因此特高压输电工程的建设仍需大力推进,在未来的 5 年内,国网公司规划将继续建设:

1) 8 座 1 000 kV 特高压交流变电站;

2) 16 座 500 kV 变电站;

3) 构建跨省电力交换和电力平衡的能源交换大平台。

四川在建设具有信息化、自动化、互作为特征的四川电网已卓有成效,已初步建成 500 kV 电网覆盖全省各市州,169 座 110 kV 及以上自能变电站,基本建成国网公司系统最大的省级电网。

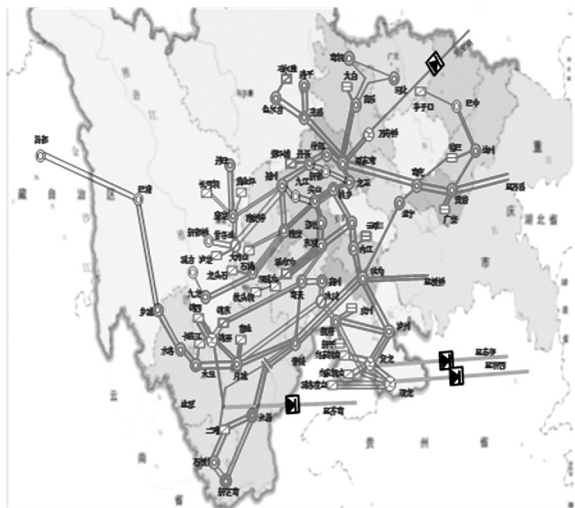


图 8 四川特高压直流工程线路

4.2 积极构建“互联网+”管控系统

国网四川省电力公司以国网天府新区供电公司试点,探索更加高效、更加扁平的运营模式。为加快电网规划建设,公司着力打造以自动化系统为基础,以信息化平台为支撑,以智能化控制为手段,适应现代化能源互联网发展的天府新区“智慧电网”。科学编制电网发展规划,优化变电站布点及廊道路径,提高电网建设标准,推动自动化系统改造升级。

加快建设营配信息高度融合的 GIS 应用平台、快速响应的移动工单平台、便捷高效的客户沟通互动平台,打造以实时信息为基础的运营监控指挥中心。充分利用大数据、云计算、互联网等现代化手段对电力系统综合利用进行智能检测控制、操作运营和能效管理。推动未来电动汽车、微电网、智能用电等新型、互动的用电模式发展,建设坚强、可靠的现代化能源互联网络^[22-26]。

如图 9 所示,四川省电力公司计划以天府新区为依托,建设分布式智慧能源的“互联网+”管控系统示范工程,具体措施包括:

1) 建设分布式智慧能源设备广泛接入的生态化能源系统,搭建实时计量与结算平台;

2) 对储能设施进行互联网化管控和利用;

3) 建立为分布式设备提供调频、调峰等能源服务及经济补偿机制。

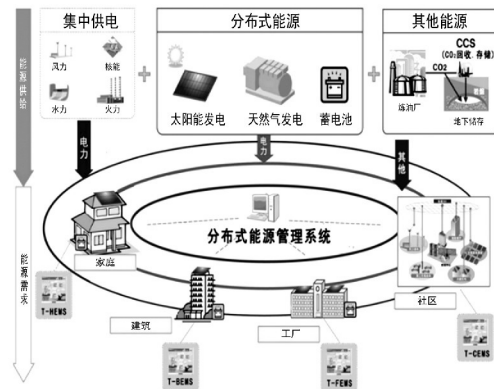


图 9 “互联网+”管控系统结构

该示范项目旨在充分消纳四川省富余水电,提高清洁能源消费比例,实现能源结构清洁化转型。

4.3 着力打造综合能源管理平台

综合能源管理着眼于城市级别的整体能源监控和优化,对能源生产、传输、使用进行监管。它能帮助用能单位在满足扩大生产的同时,合理计划和利用能源,降低单位产品能源消耗,提高经济效益。同时电力、水务及燃气等公用事业公司或市政部门,以及终端能源消费者和生产者如楼宇、工厂、企业、居民、电厂等,应与能源管理中心紧密沟通协作,形成一个分层级的综合管理体系。通过采用先进的信息通信技术,对各个层级上能源子系统信息提取集成,实现管理体系的统一化、实时化和智能化,为政府管理者和公众了解掌握能源生产、传输、使用情况以及相关经济和环境因素,维持能源供给和安全,实现积极的经济发展和节能减排目标,制定能源相关政策及规划,提供信息技术支撑和科学的决策依据。

如图 10 所示,国网四川省搭建综合能源管理平

台 探索智慧服务模式 建设能源优化配置网络和智慧公共服务网络 实现能源的互联与服务的互动 具体措施包括:

- 1) 构建公司社区生活数据资源池 ,支撑新的社区服务模式的建立;
- 2) 推进家庭能源互联网(HEMS) 提升“电与生活”的互动体验 ,促进商业模式的转变;
- 3) 构建能源互联网基本单元 ,形成新的客户聚合能力。



图 10 综合能源管理平台

4.4 科学发展多类型能源优化互补调控系统



图 11 多类型能源互补调度示意图

四川省不但拥有丰富的水电资源 ,同时还拥有风电和太阳能发电基地。如图 11 所示 ,水电、风电、太阳能发电等多种能源形式互联形成混合能源互补供电系统 ,有利于实现能源的最优化利用;并提高供电系统的安全性、可靠性和连续性。合理的能量管理与控制系统不仅能够提高系统的安全性、稳定性、降低系统运行成本 ,而且能够实现互补发电设备的动态优化组合 ,提高电能质量。因此国网四川省电力公司针对混合能源互补供电系统进行研究 ,其研究重心为:基于不同电源的运行特性 ,制定电源间的协调和互补运行机制;解决调度计划业务中新型能源发电能力不确定问题;协调优化多类型电源 ,促进清洁能源消纳和节能减排 ,以实现清洁能源整体协调优化互补的目的^[27-29]。

4.5 大力发展富余水电制氢

四川省是全国最大的清洁能源基地 ,然而由于输电通道建设滞后 ,水电消纳受到制约 ,2014 年弃水量达 96.8 亿 kW · h 2015 年达 102 亿 kW · h ,弃水现象越来越严重。可再生能源进行有效消纳 ,通过储能技术进行能量管理是主流的解决途径。而以制备燃料的方式将电能转化为化学能 ,具有大规模长周期储能的潜力 ,符合能源行业储能的约束条件。

在可用于化学储能的燃料中 ,氢气以其出色的综合性能和广阔的应用前景为业界关注。四川省通过富余水电制氢项目 ,既缓解了水力资源的废弃现象 ,又有助于实现产能端的“清洁替代”和用能端的“电能替代”。氢气按一定比例加入天然气制得的混氢天然气具有高效低耗的特征 ,可大规模用于交通运输业;而纯氢燃料电池被认为是有望取代传统内燃机的技术 ,为待弃水制氢消纳指明了方向。

四川省开展富裕水电制氢项目 ,在“十三五”期间预计消纳 10 亿 kW · h/a ,占富余水电 5% ~ 10%;到“十四五”末期 ,有望消纳 30 亿 kW · h/a ,占比富余水电约 10%^[30]。

4.6 努力完善智能调度控制与安全防护策略

分布式电源、微电网、储能装置、电动汽车充放电设施接入配电网运行改变了配电网能量平衡的模式 ,为了实现能源互联网的稳定运行 ,进行智能调度控制与安全防护的研究是很有必要的。通过配电网智能调度实现各种资源的优化配置是建设能源互联网的关键内容^[31]。

智能调度控制中心连接各类电源并通过双向信息流 ,对配电网、电源和负荷进行资源优化配置 ,实现发电机出力、用户侧负荷和储能系统之间的协调以及水、火、风、光、储能等能源的动态平衡 ,以此来提高配电网的安全性、可靠性、优质性、经济性、友好性指标 ,实现配电网高效运行。

5 结 语

能源互联网是一个综合性的学科 ,发展能源互联网需要依靠信息科学、材料科学、管理科学、控制科学等多项科学技术。对中国化的能源互联网所涉及的研究方向做了简单分析 ,介绍了能源互联网在国内的重点研究方向 ,讨论了能源互联网发展过程中需要考虑的可再生能源发电技术、互联网信息技术、大容量远距离输电技术、先进储能技术、配置规划技术等多项核心关键技术。最后详细介绍了国网四川省电力公司在能源互联网发展过程中所做的科

学研究和示范工程,研究成果可为国内外区域型送端电网能源互联网建设提供良好的的参考借鉴。

参考文献

[1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 1-20.

[2] 马钊, 周孝信, 尚宇伟, 盛万兴. 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.

[3] 石玉东. 能源互联网“四川行动”全面提升绿色发展能力[N]. 四川日报, 2016-4-27(6).

[4] 石玉东. 实施能源互联网“四川行动”全面提升资源配置和绿色发展能力[N]. 国家电网报, 2016-4-18(6).

[5] Rifkin J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. New York: Palgrave Macmillan, 2011: 73-107.

[6] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3005-3013.

[7] 沈洲, 周建华, 袁晓冬, 等. 能源互联网的发展现状[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(1): 81-84.

[8] 周海明, 刘广一, 刘超群. 能源互联网技术框架研究[J]. 中国电力, 2014, 47(11): 140-144.

[9] 姚建国, 高志远, 杨胜春. 能源互联网的认知和展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 9-14.

[10] 宋永华, 孙静. 未来欧洲的电网发展与电网技术[J]. 电力技术经济, 2008, 20(5): 1-5.

[11] 国家可再生能源中心. 中国可再生能源产业发展报告[R]. 北京: 中国经济出版社, 2015.

[12] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 702-713.

[13] 严太山, 程浩忠, 曾平良, 等. 能源互联网体系架构及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 105-113.

[14] 韩芳. 我国可再生能源发展现状和前景展望[J]. 可再生能源, 2010, 28(4): 137-140.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 范松丽, 苑仁峰, 艾芊, 等. 欧洲超级电网计划及其对中国电网建设启示[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 6-15.

[18] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望-试论三代电网[J]. 中国电机工程学报,

2013, 33(22): 1-11.

[19] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.

[20] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.

[21] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.

[22] 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.

[23] 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): 26-34.

[24] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 计及需求侧资源的大规模风电消纳随机机组组合模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3714-3723.

[25] 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(5): 1109-1126.

[26] 林为民, 余勇, 梁云, 等. 支撑全球能源互联网的信息通信技术研究[J]. 智能电网, 2015, 3(12): 1097-1102.

[27] 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.

[28] 曾鸣, 盛绪美. 北京大气环境与能源综合规划决策模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 1991, 13(5): 67-72.

[29] 胡文雷, 杨润生, 解璞, 等. 混合能源互补供电系统能量管理与控制技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(6): 43-47.

[30] 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.

[31] 陈星莺, 陈楷, 刘健, 等. 配电网智能调度模式及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 22-23.

作者简介:

褚艳芳(1962), 高级工程师, 现任国网四川省电力公司副总经理、党委常委, 国网成都供电公司总经理、党委副书记;

田立峰(1963), 博士, 高级工程师, 主要从事智能电网、计算机科学与技术、特高压交直流输电等方面的研究;

魏巍(1984), 博士, 高级工程师, 主要从事特高压交直流电网安全稳定、新能源并网等方面的研究。

(收稿日期: 2016-06-16)