

高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望

鲁宗相^{1,2}, 黄 瀚³, 单葆国³, 王耀华³, 杜松怀⁴, 黎静华⁵

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084;

2. 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, 北京市 100084;

3. 国网能源研究院, 北京市 102209; 4. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京市 100083;

5. 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室(广西大学), 广西壮族自治区南宁市 530004)

摘要:在清洁化、低碳化和智能化的能源革命背景下,高比例可再生能源成为电力系统未来发展的一个突出特征,也导致了电力系统结构形态的巨变。文中对高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测方法进行了阐述。首先分析了电力系统结构形态的内涵及其要素,建立了其形态演化的驱动力综合模型,然后结合高比例可再生能源发展趋势,分析其对电力系统形态结构的影响,建立高比例可再生能源驱动的电力系统形态演化模型。围绕高比例可再生能源电力系统结构形态演化机理和复杂多重不确定性运行场景下的电力预测理论两个科学问题,分四个方面对其研究体系进行了详细阐述。

关键词:高比例可再生能源;结构形态演变;广义负荷预测;驱动力模型

0 引言

为了应对气候变化和环境污染,世界主要国家能源电力系统正处于清洁化、低碳化和智能化转型时期。构建以电为中心的全新能源供应格局,电网向集能源开发、输送、配置、使用于一体的能源互联网演化,正逐渐成为全球共识和目标方向^[1]。未来,电力系统在电源、电网、负荷、储能等环节,以及信息通信等方面技术不断进步、模式持续创新,系统形态结构特征将呈现急剧变化。

近年来,能源电力的技术创新与应用进入了高度活跃期,各国相继出台能源领域技术规划,如美国的《全面能源战略》^[2],欧洲的《能源路线图 2050》^[3],日本的《能源环境技术创新战略 2050》^[4],韩国的《能源新产业与核心技术研发战略(2015—2017 年)》^[5],中国的《能源技术创新行动计划(2016—2030 年)》^[6]、《能源技术创新重点创新行动路线图》^[7]和《“十三五”国家科技创新规划》^[8]等。能源清洁、低碳利用技术创新是各国关注的焦点,都突出可再生能源在能源供应中的主体地位。

未来电力系统结构形态预测也是研究热点,其关注重点是进一步加强电网互联,提高清洁能源消

纳比例和电气化水平。2015 年,日本政府成立广域系统运行协调机构(OCCTO)^[9],2016 年,美国能源部公布电网现代化新蓝图^[10],欧洲输电联盟发布其第四版十年电网规划^[11],英国能源与气候变化部委托 IET 研究其未来电力系统结构^[12],中国国家发展和改革委员会、国家能源局发布《电力发展“十三五”规划》^[13]。在清洁发展目标驱动下,电力系统的发展格局呈现了多样性特征,源-网-荷-储各个环节急剧变化,信息通信技术与物理系统的深度融合成为关键趋势。

与以往历次技术革命不同,外部的驱动因素成为当前能源电力科技发展的重要推动力。无论是化石能源枯竭,还是气候变化,都促使能源电力系统加快转型。与科技创新这一内部驱动因素的作用机制不同,外部驱动带来的系统变革往往是突变性的,而非连续渐变模式。因此,在外部驱动力主导下的能源电力系统结构形态演化机理,是一个新课题。在低碳化、清洁化发展趋势下,高比例新能源将成为未来电力系统的关键特征,而这一特征将导致整个能源电力系统的形态结构、相应的规划方法及运行方式发生重大变化^[14]。

本文对未来高比例可再生能源电力系统的结构形态演化和电力预测方法的研究理论框架进行阐述。首先分析了电力系统结构形态的内涵及其要素,然后从公共驱动力、市场驱动力和技术驱动力三

收稿日期: 2017-01-09; 修回日期: 2017-02-18。

上网日期: 2017-03-03。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900101)。

方面建立了其形态演化的驱动力模型,再结合高比例可再生能源发展趋势分析其对电力系统结构形态的影响,建立高比例可再生能源驱动的电力系统形态演化模型。围绕高比例可再生能源电力系统结构形态演化机理和复杂多重不确定性运行场景下的电力预测理论两个科学问题,提出了高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测的理论研究框架和实施方案。

1 电力系统结构形态及其演化模型

1.1 电力系统结构形态的内涵及其要素

一般而言,“结构”侧重于描述系统各部分的具体连接关系,而“形态”则侧重于系统特征抽象指标的表征,两者共同构成对系统的完整描述。电力系统结构形态,是指电力系统的组成设备及其参与者的连接组织形式及交互作用方式^[12]。电力系统结构形态的内涵与要素如图 1 所示,包括对电源、电网、负荷及二次系统的完整描述。电网包括输电和配电部分,但随着分布式电源的接入比例提升,输配电网的界限将越来越不清晰;电源除了传统电源和可再生能源之外,电动汽车和储能也可视为一种灵活调节电源纳入系统运行;负荷侧将涌现多种新设施,具备主动响应能力和双向互动能力,从而使得用户参与系统运行成为可能;二次系统以通信信息技术为基础,实现调度、保护、控制、交易的综合优化运行。

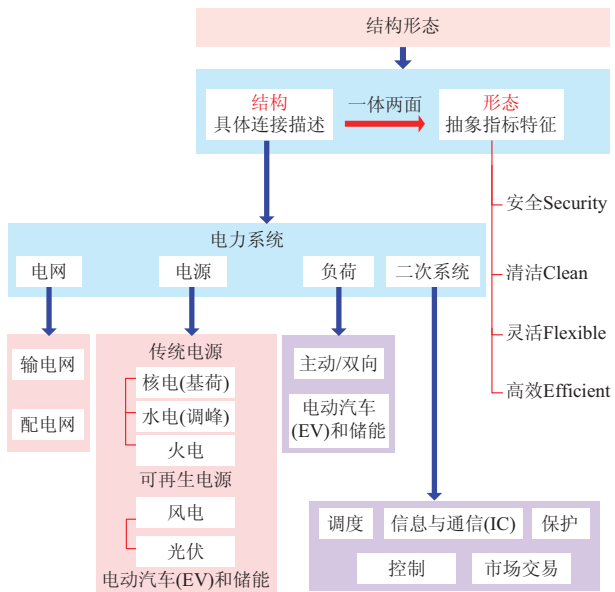


图 1 电力系统结构形态的内涵与要素
Fig.1 Meaning and elements of power system morphology

事实上,电力作为洁净优质二次能源,在整个能

源系统中占据日趋重要的地位,其结构形态也需要纳入整个能源系统形态中进行整体考量。从能源系统形态来看,当前电力形态的关键热点是“两个替代”^[15],即能源生产的清洁替代和能源消费的电能替代,从而提升整个能源系统的电气化水平,降低对化石能源的依赖程度,提高可持续发展能力。

1.2 电力系统形态演化的驱动力

电力系统形态演化的驱动力主要来源于三个方面,即公共驱动因素、市场驱动因素和技术驱动因素。

公共驱动因素主要反映国家层面的战略需求,包括现代化进程、资源环境约束、气候变化与低碳经济、国家安全等四个方面。

市场驱动因素主要反映产业和企业层面的战略需求,包括市场化改革进程,能源系统优化,产业经济的辐射、拉动和集聚效应,现代企业制度的发展与变革等四个方面。

技术驱动因素主要源于电力系统发展面临的技术挑战和机遇,当前的主要热点有通信信息技术与“物联网”、清洁能源与储能技术、非化石燃料交通能源技术、新材料技术(重点包括先进电力电子技术和超导电力技术等)等。

不同时间、环境下,电力系统的驱动力作用大小和模式存在差别。以技术为主的驱动模式下,是一种由内而外的演化方式,新技术替代旧技术实现关键性能指标提升,是一种渐变式发展,整个形态演变可预测程度较高。而公共驱动因素则是一种外部压力驱动模式,其作用力强大,往往导致一种跃迁式发展模式,整个体系可能被重构,形态演变可预测程度较低乃至完全不可预期。市场驱动因素的作用力介于其间,一方面市场化改革有助于还原电力商品属性,实现资源的优化配置;但另外一方面,电网的社会基础设施和公共服务属性,决定了自然垄断性和非完全盈利性。

2 高比例可再生能源波动性及其驱动的电力系统形态演化模型

2.1 高比例可再生能源波动特征及其影响

风电和光伏是当前技术最成熟的可再生能源发电技术。这两类电源都具有很强的波动性、随机性,往往被统称为波动电源(variable generation, VG)。文献^[16]对世界各地的大规模风电出力和系统净负荷(负荷与风电出力之和)的波动性进行了多年统计分析,发现全球可按风电波动性低、中、高划分为三类地区,瑞典、西班牙和德国属于风电低波动地区,葡萄牙、爱尔兰、芬兰和丹麦属于风电中波动地区,

北美的魁北克、邦纳维尔电力局、德州可靠性管委会辖区,中国的甘肃、吉林和辽宁,挪威,丹麦的海上风电属于风电高波动区。低波动区每小时风电爬坡功率不超过额定容量的 10%,而高波动区每小时风电爬坡功率可达额定容量的 30%。

光伏出力具有显著的昼夜周期性。在太阳能资源富集的美国加州地区,高比例光伏并网导致其净负荷呈现“鸭型曲线”^[17],即春季净负荷在中午急剧下降而成为全日低谷负荷点,且这种趋势随着光伏接入比例升高而加剧,预计到 2020 年将需要系统具有 3 h 内 13 000 MW 的爬坡调节能力方可保证不弃光。

风电、光伏等波动电源的波动特性源于一次资源。风光资源是一种过程能源,不可存储、不易控制,在不同时间尺度、不同空间范围,呈现不同的波动特性^[16,18-19]。

可见,在高比例可再生能源并网的未来电力系统,电源波动甚至超过了负荷波动而成为系统不确定性的主要来源。而如何应对这种电源和负荷的双不确定性,也成为系统规划和运行的核心问题^[20-21]。北美电力可靠性组织(North American Reliability Council,NERC)研究提出^[22],为了消纳风电、光伏、海洋能和小水电,北美电力系统的传统规划和运行方法要进行巨大变革,具体包括以下几个方面。

- 1)开发多种类型的波动电源,在广域空间尺度内平衡一次资源,并采用先进控制技术实现波动电源的功率爬坡和电压控制性能。
- 2)适应高比例波动电源并网,电网输变电设施需要显著增加,保障源荷间功率交换和辅助服务。
- 3)新增储能和可控负荷,如需求响应、电动汽车、大规模储能,有助于平衡波动电源的灵活调节需求。
- 4)提升波动电源的出力测量和预测精度是保障整个系统运行和规划可靠性的关键。
- 5)输配电网需要更加协调地综合规划。
- 6)需要扩大供需平衡区域规模以获得更好的波动电源消纳能力。

2.2 高比例可再生能源驱动的电力系统形态演化模型

高比例可再生能源带来的不确定性,是电力系统形态演化的关键驱动力。

高比例可再生能源驱动的电力系统形态演化模型如图 2 所示。

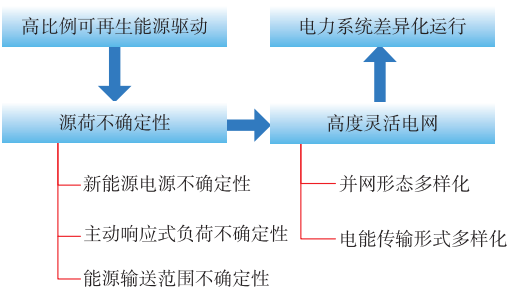


图 2 高比例可再生能源驱动的电力系统形态演化模型
Fig.2 Power system evolution model driven by high proportion of renewable energy

欧洲^[23]、美国^[24]和中国^[25]分别提出 2050 年实现 100%,80%,60%可再生能源电力系统蓝图。全新场景下,电力系统特征将发生显著变化,随机波动的风能和太阳能成为主力电源,基本取消“基荷”发电厂,常规火电机组在日内启停,并通过水电厂、燃气电厂、储能等灵活资源调节实现对可再生能源随机波动性的互补^[26],灵活性成为规划和运行关注的核心问题。

源端的主要趋势是电源清洁化。风电/光伏等可再生能源大力发展(局地发电量占比超过 30%),水电充分开发,火电定位调整,逐步参与调峰,核电稳步发展,从而形成一种全新的高度清洁化电源格局。

电网的关键特征是电力电子化。远距离输电系统和就地平衡供电网络因地制宜,差异化并存,交直流混联输电网广泛应用,配电网中多类型新设备涌现,直流配电技术得以快速发展。

负荷呈现多重不确定性。分布式电源、电动汽车、分布式储能和双向负荷的涌现和接入比例不断提升,整个系统“源-网-荷-储”互动耦合特性凸显,不确定性成为规划和运行面临的核心问题。

3 科学问题剖析及研究内容

以绿色发展为目标,中国即将步入可再生能源大规模集群并网、高渗透率分散接入并重的高比例发展阶段,电力系统形态将发生巨大改变,而且这种形态演化以外部驱动力主导,其演化路径及模拟模型成为首要的科学问题;而源荷不确定性的剧增,广义的电力预测方法又成为一个关键的科学问题。下面具体阐述这两个科学问题。

3.1 高比例可再生能源电力系统结构形态演化机理问题

高比例可再生能源场景下电力系统结构形态的演化机理问题,需要探索以清洁低碳化目标驱动的

未来能源和电力格局变化趋势及其演化机理,以及在低碳清洁发展和技术创新驱动下的电力系统输电网和配电网结构形态及其演化机理。具体而言,包括构建面向中远期可再生能源的能源发展规划和电源规划模型,构建能源-电源系统典型结构形态及布局场景;提出输电网和配电网结构形态的标准特征集及评估方法,构建适应高比例可再生能源集群送出的输电网结构形态、高渗透率分布式电源和储能接入的配电网形态。

1)面向中远期低碳化发展的能源电力格局及演化机理

研究涵盖“低碳目标-环境及经济性约束-内生增长动力”的全角度能源规划优化模型;探索清洁低碳化目标驱动下,中远期中国能源格局变化趋势及特征;建立纳入高比例可再生能源时空分布特性、分布式能源与双向互动特性的储能等多类型、技术及经济性差异化的电源规划模型;探索未来电源系统空间协同发展与时间动态演变过程、机理;提出能源-电力格局评价指标体系,并构建 2030 年和 2050 年的能源-电源系统典型结构形态及布局场景。

2)高比例可再生能源与高度电力电子化条件下输电网的结构形态及演化模式

研究影响未来输配电系统结构形态的关键因素及作用机理,交流/直流/交直流等输电网结构形态对高比例可再生能源集群送出的适应性,高渗透率可再生能源、储能和互动负荷灵活接入的配电网形态特性,高比例可再生能源在输配电网协同接入及优化配比,以及高比例可再生能源和高度电力电子化条件下的输配电网典型结构形态及布局场景。

3.2 复杂多重不确定性运行场景下的电力预测科学问题

高比例可再生能源带来的多时空强不确定性,使得电力预测方法成为一个科学问题,具体而言,包括广义负荷特性及其互动耦合机理、多时空电力预测理论与评估方法两个方面。

1)复杂多重不确定性场景下广义负荷特性及其互动耦合机理研究

研究含分布式新能源、储能、主动负荷等广义负荷的结构辨识与解析方法;建立高比例可再生能源与电力需求的互动耦合模型与主动负荷挖掘技术;探索复杂多重不确定性场景下多时空尺度的负荷曲线形态与特性的演变与转移规律;构建电价、气象、电源结构与电网结构等因素与广义负荷特性变化的动态关联模型及多时空负荷响应特性。

2)面向可再生能源并网的多时空电力预测理论与评估方法研究

研究面向“用户-馈线-母线-系统”的电力需求及空间负荷预测方法;研究“实时-短期-中期-长期”电力动态协调预测方法,构建不同时间尺度下电力预测的闭环协调策略;探索描述不同时空尺度可再生能源和负荷、预测误差、波动等不确定特性的区间预测与概率预测方法;建立面向可再生能源消纳的电力预测评估方法,并提出考虑预测误差大小、分布及其相关性的最优组合协调预测理论。

4 研究方案与主要方法构想

根据上述的科学问题,高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测的研究体系可分解为面向中远期低碳化发展的能源电力格局及演化机理、高比例可再生能源与高度电力电子化条件下输电网的结构形态及演化模式、复杂多重不确定性场景下广义负荷特性及其互动耦合机理、面向可再生能源并网的多时空电力预测理论与评估方法等四个研究点,其研究体系分别描述如下。

4.1 面向中远期低碳化发展的能源电力格局及演化机理

面向中远期低碳化发展的能源电力格局及演化机理的研究体系及思路如图 3 所示。在研究中首先构建以低碳发展为目的的能源和电力系统规划模型,模型纳入高比例可再生能源时空分布特性、供给特点,以及分布式能源与双向互动储能模块等,采用随机生产模拟和竞争性投资决策相结合的双层规划思路,解决大规模可再生能源接入后能源和电力系统规划所面临的多重不确定性及格局演化建模与表征问题。

4.2 高比例可再生能源与高度电力电子化条件下输电网的结构形态及演化模式

高比例可再生能源与高度电力电子化条件下输电网的结构形态及演化模式的研究体系及思路如图 4 所示。

输电网形态部分侧重研究其对高比例可再生能源集群送出的适应性,主要针对中国大型可再生能源基地的实际背景开展研究。而配电网形态特性则与可再生能源、互动负荷、储能等的技术特征和接入比例紧密耦合,可能呈现出完全不同的特性。考虑到可再生能源集中接入和分散接入并重,需要研究高比例可再生能源在输配电网的协同接入及优化配比。

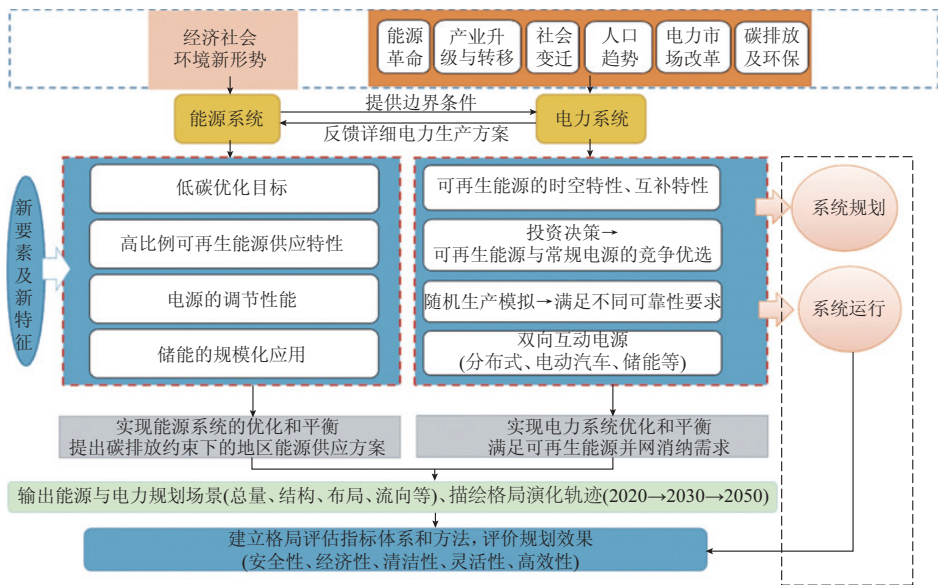


图 3 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测的研究体系

Fig.3 Research structure of morphological evolution and power forecasting of power system with high proportion of renewable energy

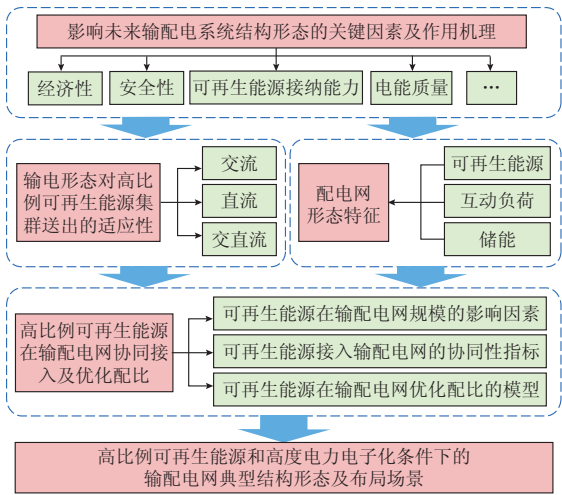


图 4 影响未来输电系统结构形态的关键因素及作用机理

Fig.4 Key factors and mechanisms of influence on future configuration of power system

4.3 复杂多重不确定性场景下广义负荷特性及其互动耦合机理

复杂多重不确定性场景下广义负荷特性及其互动耦合机理的研究体系及思路如图 5 所示。

基于大数据技术，建立源荷关联的广义负荷概念，从结构辨识、演变机理、响应特性和互动耦合四个方面研究其特性和耦合机理。结构辨识广泛收集不同类别的负荷数据，采用结构辨识与数据挖掘的方法，分析负荷特性、负荷与外界影响因素的关联关系、负荷时空响应特性、在不同市场规则下不同用户的响应特性等；演变机理则研究长期行业电量与经

济关联联动特性，研究未来产业结构调整、供给侧改革、人口增长对各个行业的负荷需求和负荷特性的影响，并识别不同行业负荷之间的传递或者协同的内在关联关系；响应特性研究负荷、新能源发电在电力市场环境多变量（时间、空间、交易规则等）下的响应特性，构建不同类别负荷、可再生能源发电与电价波动、气象因素的动态关联解析模型。关联关系侧重研究短时用电需求、可再生能源发电、气象、电力市场等的关联特性研究，研究不同行业、区域内负荷对气象、电价、能源结构变化，以及电网结构调整（高比例/高渗透率可再生能源分布式电源）等外在因素的敏感性。

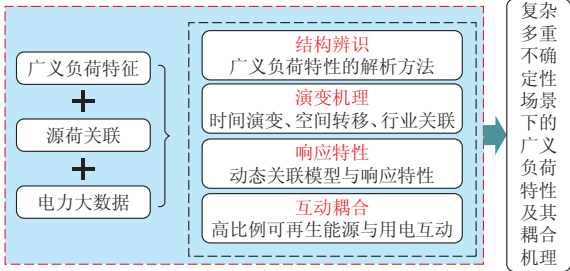


图 5 广义负荷特性及其耦合机理的研究框架

Fig.5 Research framework of generalized load characteristics and its coupling mechanism

4.4 面向可再生能源并网的多时空电力预测理论与评估方法

面向可再生能源并网的多时空电力预测理论与评估方法的研究体系和思路如图 6 所示。

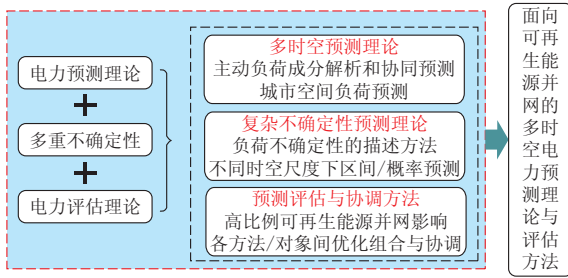


图6 面向可再生能源并网的多时空电力预测理论与评估方法的研究思路

Fig.6 Research framework of multiple temporal and spatial power forecasting theory and evaluation method

复杂多重不确定性场景及其多时空尺度预测理论的研究是核心,构建面向用户-馈线-母线-系统、实时-短期-中期-长期的可再生能源与需求互动的多时空电力预测模型,提出考虑预测误差相关性的区间预测与概率预测,考虑高比例可再生能源消纳的预测评估与最优组合协调预测理论。

5 结语

在能源革命背景下,未来高比例可再生能源电力系统的结构形态将会发生巨大改变。本文对电力系统形态演化和电力预测方法的研究理论框架进行综述,首先分析了电力系统形态结构的内涵及其要素,然后从公共驱动力、市场驱动力和技术驱动力三方面建立了其形态演化的驱动力模型,再结合高比例可再生能源发展趋势分析其对电力系统形态结构的影响,建立高比例可再生能源驱动的电力系统形态演化模型。

围绕高比例可再生能源电力系统结构形态演化机理和复杂多重不确定性运行场景下的电力预测理论两个科学问题,高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测的研究体系可分解为面向中远期低碳化发展的能源电力格局及演化机理、高比例可再生能源与高度电力电子化条件下输电网的结构形态及演化模式、复杂多重不确定性场景下广义负荷特性及其互动耦合机理、面向可再生能源并网的多时空电力预测理论与评估方法等四个方面开展研究,本文对其研究体系进行了详细阐述。

未来能源电力系统演变是一个持续的研究热点,希望本文能够为中国未来高比例可再生能源发展背景下的能源电力系统形态演化机理和发展蓝图提供参考。

参考文献

[1] 国网能源研究院.全球能源互联网发展报告[R].2016.

[2] Executive Office of President. Obama administration record on

an all-of-the-above energy strategy[EB/OL]. [2014-12-15]. https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/docs/aota_report_updated_july_2014.pdf.

[3] The European Climate Foundation. Roadmap 2050—practical guide to a prosperous, low-carbon Europe[EB/OL]. [2010-12-30]. <http://www.roadmap2050.eu/project/roadmap-2050>.

[4] The Energy and Environment Council Government of Japan. Innovative strategy for energy and the environment[EB/OL]. [2012-12-25]. <http://www.un.org/esa/socdev/egms/docs/2012/greenjobs/enablingenvironment.pdf>.

[5] Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). The act on the promotion of the development, use, and diffusion of new and renewable energy[EB/OL]. [2014-12-30]. http://english.motie.go.kr/en/tp/alltopics/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=3&bbs_seq_n=19.

[6] 国家发展改革委,国家能源局.能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)[EB/OL].[2016-06-01].http://www.gov.cn/xinwen/2016-06/01/content_5078628.htm.

[7] 国家发展改革委,国家能源局.能源技术革命重点创新行动路线图[EB/OL]. [2016-04-18]. <http://mt.sohu.com/20160418/n444841527.shtml>.

[8] 国家发展改革委,国家能源局.国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知[EB/OL].[2016-08-08].http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm.

[9] Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators (OCCTO). About OCCTO[EB/OL]. [2016-12-20]. https://www.occto.or.jp/en/occto/about_occto/index.html.

[10] DOE. Grid modernization multi-year program plan (MYPP)[EB/OL]. [2015-12-10]. <https://www.energy.gov/downloads/grid-modernization-multi-year-program-plan-mypp>.

[11] ENTSEO. Ten year network development plan 2016[EB/OL]. [2016-12-20]. <http://tyndp.entsoe.eu/>.

[12] IET. Future power system architecture[EB/OL]. [2016-12-20]. <http://www.theiet.org/sectors/energy/resources/fpsa-project.cfm?origin=reportdocs>.

[13] 国家发展改革委,国家能源局.电力发展“十三五”规划(2016—2020年)[EB/OL].[2016-11-07].<http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201612/P020161222570036010274.pdf>.

[14] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J/OL].电力系统自动化[2017-03-07].DOI: 10.7500/AEPS20170120004.

KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J/OL]. Automation of Electric Power Systems [2017-03-07]. DOI: 10.7500/AEPS20170120004.

[15] 国网能源研究院.2016 国内外电网发展及新技术应用分析报告[M].北京:中国电力出版社,2016.

[16] KIVILUOMA J, HOLTTINEN H, WEIR D, et al. Variability in large-scale wind power generation[J]. Wind Energy, 2016, 19(12): 1649-1665.

[17] DENHOLM P, O'CONNELL M, BRINKMAN G, et al. Overgeneration from solar energy in California: a field guide to the duck chart[EB/OL]. [2015-11-25]. <http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65023.pdf>.

[18] ELA E, DIAKOV V, IBANEZ E, et al. Impacts of variability and uncertainty in solar photovoltaic generation at multiple timescales[EB/OL]. [2013-12-28]. <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/58274.pdf>.

[19] 肖创英,汪宁渤,昝晶,等.甘肃酒泉风电出力特性分析[J].电力系统自动化,2010,34(17):64-67.
XIAO Chuangying, WANG Ningbo, ZHI Jing, et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 64-67.

[20] 张建平,朱忠烈,柳璐,等.大规模风电接入的输电系统价值规划方法[J].电力系统自动化,2014,38(19):47-51. DOI: 10.7500/AEPS20131028007.
ZHANG Jianping, ZHU Zhonglie, LIU Lu, et al. Transmission network value planning considering large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 47-51. DOI: 10.7500/AEPS20131028007.

[21] 高宗和,滕贤亮,张小白.适应大规模风电接入的互联电网有功调度与控制方案[J].电力系统自动化,2010,34(17):37-41.
GAO Zonghe, TENG Xianliang, ZHANG Xiaobai. Solution of active power dispatch and control scheme for interconnected power grid with large-scale wind power integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 37-41.

[22] NERC. Accommodating high levels of variable generation[EB/OL]. [2015-12-10]. http://www.nerc.com/files/ivgtf_report_041609.pdf.

[23] SCHELLEKENS G, BATTAGLINI A, LILLIESTAM J, et al. 100% renewable electricity: a roadmap to 2050 for Europe and North Africa[R]. London, UK: PricewaterhouseCoopers, 2010.

[24] HAND M M, BALDWIN S, DEMEO E, et al. Renewable electricity futures study [R]. Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2014.

[25] 国家发展和改革委员会能源研究所.中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R].北京:国家发展和改革委员会能源研究所,2015.

[26] International Energy Agency. Harnessing variable renewables [M]. Paris, France: International Energy Agency, 2011: 41-67.

鲁宗相(1974—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:风电/太阳能发电并网分析与控制、能源与电力宏观规划、电力系统可靠性、分布式电源及微电网。E-mail: luzongxiang98@tsinghua.edu.cn

黄瀚(1974—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统规划、运行与控制、智能电网技术,以及新能源发电与并网技术、电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail: han-huang@geidco.org

单葆国(1971—),男,高级工程师,副教授,主要研究方向:宏观经济运行、能源电力供需分析、节能及电力需求侧管理、综合资源战略规划。E-mail: shanbaoguo@sgeri.sgcc.com.cn

(编辑 章黎)

Morphological Evolution Model and Power Forecasting Prospect of Future Electric Power Systems with High Proportion of Renewable Energy

LU Zongxiang^{1,2}, HUANG Han³, SHAN Baoguo³, WANG Yaohua³, DU Songhui⁴, LI Jinghua⁵

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. State Grid Energy Research Institute, Beijing 102209, China;

4. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

5. Key Laboratory of Guangxi Power System Optimization and Energy-saving Technology (Guangxi University), Nanning 530004, China)

Abstract: In the midst of clean, low-carbon and smart energy revolution, a high proportion of renewable energy integration will be one of the basic characteristics of future electric power system that leads to tremendous changes in the morphological changes. And it also introduces the morphological evolution of generation, transmission, distribution and load of the system as a whole. The topology evolution model and power forecasting method of the future electric power systems are reviewed. The elements of the electric power system morphology and driving model are described first. Then based on analyzing the development trend of high proportion renewable energy generations, a future power system morphological evolution model is proposed. Key scientific issues are concluded as: 1) morphological evolution mechanism of power system with a high proportion of renewable energy; 2) power forecasting of complex multiple uncertainty operation scenarios. Suitable research framework is divided into four aspects and analyzed in detail.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900101).

Key words: high proportion of renewable energy; morphological evolution; generalized load forecasting; driving model