

高比例可再生能源电力系统的科学问题与理论研究框架

康重庆¹, 姚良忠²

(1. 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; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 100192)

摘要: 大力发展可再生能源是应对能源危机和环境问题的重要手段, 高比例可再生能源并网将成为未来电力系统的基本特征。文中从高比例可再生能源接入带来的强不确定性和高度电力电子化带来的稳定机理变化两个方面, 分析了高比例可再生能源电力系统面临的关键科学问题。在此基础上, 从中国未来电力系统结构形态分析与电力预测、含高比例可再生能源的输电系统规划、含高渗透率可再生能源的配电系统规划、电力电子化电力系统稳定性分析、含高比例可再生能源交直流混联系统的优化运行等 5 个方面, 提出了高比例可再生能源电力系统的研究框架, 重点阐述了这 5 个方面的相互关系。最后, 对未来高比例可再生能源电力系统的研究进行了总结和展望。

关键词: 高比例可再生能源; 电力系统规划; 优化运行; 稳定分析; 负荷预测; 输电网; 配电网

0 引言

在当前全球能源安全问题突出、环境污染问题严峻的大背景下, 大力发展风电、太阳能发电、水电等可再生能源, 实现能源生产向可再生能源转型, 是中国乃至全球能源与经济实现可持续发展的重大需求^[1]。中国可再生能源近年来发展迅猛, 2030 年前中国可再生能源的发电量占比将达 30% 以上^[2]。一方面, 目前中国可再生能源消纳面临严峻局面, 大量弃风弃光, 造成了极大的浪费; 另一方面, 高比例可再生能源并网将成为中国电力系统的必然发展趋势和未来重要特征。在可再生能源革命驱动下, 对高比例可再生能源电力系统开展深入的理论研究, 为中国大型可再生能源电站并网和高比例可再生能源电力系统规划与运行奠定理论基础, 对促进高比例可再生能源消纳, 减少弃水、弃风、弃光电量, 提高整个能源系统效率等具有重要意义。

传统的电力系统规划设计主要考虑常规火电、水电或者核电的接入, 负荷也呈现一定的规律性。在低比例可再生能源接入下, 电力系统仅需要考虑如何为可再生能源电力系统的随机性提供备用等问题。而随着集中式和分布式可再生能源并网比例的进一步提高, 电网的源端和荷端呈现较大的不确定性, 电力系统的运行形态将更加复杂; 另外, 可再生

能源并网使得电力系统的电力电子接口更多, 电力系统惯性更小, 稳定机理将发生变化^[3]。

目前, 国内外学者对可再生能源并网相关问题的研究很多, 包括电力系统的优化运行、规划、保护、稳定分析等各个方面。文献[4]定量分析了中美两国整体风力资源、平均理论容量因子等, 并从提高电力系统灵活性等方面提出了应对弃风等问题的措施; 文献[5]从源-网-荷端电力电子装备显著增加的视角, 分析了不同时间尺度下电力电子化电力系统电压、功角稳定问题, 并提出了一种幅相动力学分析方法; 文献[6]利用电力规划和生产模拟模型对中国可再生能源发展情景进行了分析, 预期中国 2050 年可再生能源装机占比将达到 60% 左右; 文献[7]定量分析了高比例风电对系统调频体系的影响; 文献[8]建立了高比例风电爬坡事件模型, 定量表示爬坡事件表征量与风电功率曲线之间的关系, 构建了评估系统运行充裕性的指标体系; 文献[9]构建了小时级别的调度模型, 指出在当前并网电价水平下, 通过有效的电力体制改革, 到 2030 年中国的并网风电总量可达到电力总供应量的 26% 左右。文献[10]从运行的角度提出了一种考虑风电波动性和随机性的电力系统灵活性评估指标体系。在此基础上, 文献[11]从电力系统灵活性角度出发, 对含高比例可再生能源电力系统的规划进行了综述和展望。文献[12]从规划的角度对国内外关于风电容量可信度的评估方法进行了综述, 总结了影响风电容量可信度的重要因素。

除上述研究之外, 与高比例可再生能源电力系

收稿日期: 2017-01-20; 修回日期: 2017-02-13。

上网日期: 2017-03-07。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900100)。

统相关的其他领域研究也很多,包括多能源系统融合促进可再生能源消纳、可再生能源并网下的电力系统保护与控制、能源互联网时代下的信息物理系统等。为了聚焦电力系统本身,本文主要关注电力系统的规划、运行等方面的基础问题。另外,由于水电规划和运行技术成熟,且水电与风电、光伏等间歇性可再生能源的不确定性特征有显著差异,因此后文的可再生能源主要是指“非水可再生能源”。本文首先分析总结了高比例可再生能源电力系统的若干基本特性;在此基础上提出了高比例可再生能源电力系统面临的主要科学问题;然后,给出了未来高比例可再生能源电力系统的理论研究框架;最后,对高比例可再生能源电力系统的关键技术进行了展望。

1 高比例可再生能源电力系统基本特征

表1给出了2015年中国部分省市区可再生能源装机容量和发电量占比的统计结果,可以看出,当前中国甘肃、新疆、宁夏、内蒙古、青海等局部地区的非水可再生能源装机容量占比已超过或接近30%,非水可再生能源发电量占比已经超过或接近10%。

表1 2015年中国可再生能源装机容量与发电量占比统计
Table 1 Percentages of installed capacity and power generation of renewable energy of China in 2015

省市区	装机容量占比/%		发电量占比/%	
	含水电	不含水电	含水电	不含水电
青海	84.67	29.44	79.09	14.39
云南	81.46	6.20	89.61	3.90
四川	81.28	1.26	86.62	0.37
西藏	77.99	9.06	96.26	6.79
湖北	59.83	2.85	56.29	0.98
甘肃	58.44	40.10	42.49	15.13
广西	48.97	1.51	58.21	0.51
贵州	47.02	6.43	44.58	1.71
湖南	43.83	4.43	43.36	1.83
新疆	43.04	34.22	19.26	9.66
宁夏	37.17	35.82	12.01	10.66
重庆	33.54	0.48	36.04	0.37
吉林	31.72	17.27	16.27	8.70
福建	30.18	3.76	25.70	2.38
内蒙古	30.13	27.84	12.78	11.85
全国	32.47	11.28	23.87	3.99

未来中国风电和太阳能发电的装机容量将呈现持续上升趋势。预计高比例场景下,2030年和2050年中国风电、太阳能发电总装机容量分别高达2.2 TW和5.1 TW,局部地区非水可再生能源发电量占比将超过30%。

高比例可再生能源接入后,电力系统将呈现以下几个方面的特征。

1) 电力电量平衡概率化。当可再生能源发电占比较低时,传统的火电、水电、核电等机组能够完全满足电力电量平衡要求,可再生能源出力仅作为电力系统的补充;而电力系统接纳高比例可再生能源的一大重要标志在于:可再生能源将承担一部分负荷平衡的责任,传统机组不再独立满足负荷需求,在电力电量平衡中,可再生能源将由“锦上添花”的角色变为与常规能源“平分秋色”。电力系统电力电量平衡以及容量充裕度的概念与方法将由目前确定性的思路向概率性的思路转化。

2) 电力系统运行方式多样化。在较少可再生能源并网时,由于负荷变化相对有规律,整个电力系统的运行方式相对固定,例如在电力系统规划时,只需要选取不同季节的典型负荷曲线;而在高比例可再生能源电力系统中,由于在源端和荷端存在较大的不确定性,电力系统的“边界条件”将更加多样化,未来的电网结构形态需要具有更大的“可行域”以满足整个系统的安全性。另外,传统方法(如确定性预测方法、确定性规划方法和运行方法)无法指导系统规划和运行,需要充分引入并评估源端和荷端的不确定性^[13]。

3) 电网潮流双向化。在配电网中,分布式可再生能源并网将成为未来重要发展趋势,当局部地区可再生能源的瞬时出力大于负荷时,配电网将会发生潮流反转,向主网倒送功率,可能产生严重的过电压问题^[14];在输电网中,正常情况下联络线传输功率保持相对恒定,而为了跨区消纳可再生能源,联络线潮流可能要“随风而动”,导致联络线功率波动或双向流动,形成跨区电网互济。可见,在高比例可再生能源接入下,电网不仅仅承担电能传输的作用,而且将更多地承担电能互济、备用共享的职能。

4) 电力系统稳定机理复杂化。高比例可再生能源大力发展,意味着系统中电力电子装备将不断增加,导致系统惯性降低,其稳定机理发生变化。一方面,风电、光伏等可再生能源通过电力电子变换装置接入电网;另一方面,柔性直流输电技术、直流配电技术、负荷侧电力电子装置也在不断涌现。在源-网-荷不同环节电力电子元件的普及程度不断提高,特性不一,导致电力系统的暂态特性难以用现有的经典理论解释与分析^[6]。

5) 电力系统灵活资源稀缺化。当可再生能源占比较高时,扣除可再生能源出力后的电力系统“净负荷”短时波动将非常明显,光伏比例大的电力系统可能出现“鸭型曲线”等,对于调频、负荷跟踪能力的需求大大增加。为了实现实时平衡,需要传统机组、储

能、需求响应等多方面资源进行灵活的调节^[15]。传统机组需要实现从“主要能源供应者”向“灵活性资源提供者”的转变。

6) 电力系统源荷界限模糊化。未来可再生能源将逐步从集中式为主的发展方式转变为集中式、分布式并举,电动汽车、分布式储能、需求响应在需求侧不断普及。系统中传统的电能消耗者也可能成为电能的提供者,出现所谓产销者(prosumer),电力系统将变得更加扁平化^[16],源-荷的界限也更加模糊。在未来电力系统运行和规划过程中需统筹考虑源-网-荷特性。

2 高比例可再生能源电力系统科学问题

高比例可再生能源并网,将会改变电力系统的基本形态,主要有两方面原因:①可再生能源本身出力具有强不确定性;②可再生能源的并网、传输和消纳在源-网-荷端引入了更多电力电子装置。由此产生高比例可再生能源电力系统的两个科学问题:①电力系统多时空耦合的强不确定性问题;②电力系统电力电子化趋势问题。

针对高比例可再生能源并网带来的多时空强不确定性和电力系统电力电子化趋势,现有电力系统必须实现从“被动适应可再生能源并网带来的不确定性”的模式,到主动构建“强不确定性-交互性耦合”的友好互动模式的转变。这种转变对于大型可再生能源电站并网和高渗透率可再生能源发电集群灵活并网、提高电网消纳可再生能源的能力具有重要意义。下面具体阐述这两个科学问题。

2.1 多时空强不确定性与电力系统形态演化

科学问题 1: 高比例可再生能源并网对电力系统形态演化的影响机理和源-荷强不确定性约束下输电网规划和运行问题。

如图 1 所示,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发展阶段,电力系统形态将发生巨大变化。在源端强波动性、随机性与荷端大量含源负荷的共同作用之下,输电网的规划与运行特征也将发生根本性变化。

具体地,对于源端和荷端,通常需要对中长期和短期的可再生能源出力和负荷进行预测,可再生能源出力多时空耦合具有较大的不确定性,分布式可再生能源的接入对“净负荷”的预测技术也带来了极大的挑战。另外,电力系统的形态发生了较大的变化,包括交直流混联等,需要适应电网边界条件的多样化、分散化和差异化,解决电网的分析和规划所面

临的挑战^[17]。因此需要革新电力系统传统的预测、规划等理论与方法,以适应高比例可再生能源引起的多时空强不确定性。

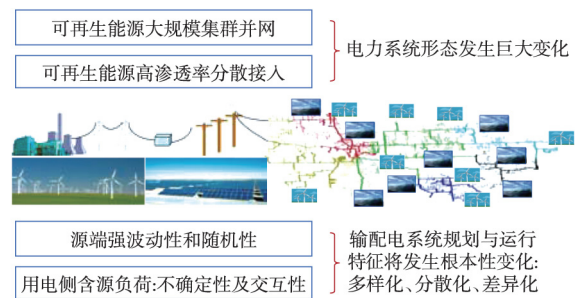


图 1 多时空强不确定性

Fig.1 High uncertainty in multiple spatial scales

2.2 电力系统电力电子化

科学问题 2: 源-网-荷高度电力电子化条件下电力系统多时间尺度耦合的稳定机理与协同运行问题。

如图 2 所示,高比例可再生能源电力系统中,网架结构发生变化,可再生能源通过电力电子装置并网,通过交直流线路进行传输,负荷侧也出现了多样化的电力电子装置。电力电子技术广泛应用于可再生能源并网、能量路由器、电能传输和负荷接入,使源-网-荷都将呈现高度电力电子化的趋势。电力电子装置具有低惯性、弱抗扰性和多时间尺度响应特性,导致电力电子化电力系统的稳定性分析理论和优化运行方法将出现根本性变化。

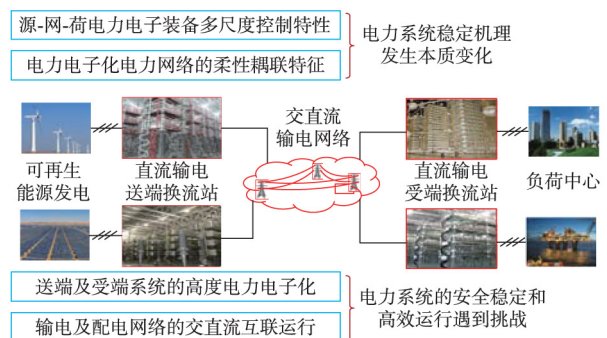


图 2 电力电子化电力系统

Fig.2 Power electronics dominated power systems

具体地,火电、水电等传统机组具有较强的惯性,现有稳定性分析方法如派克变换、等面积法则主要适用于这类机组的分析^[18],而对于含大量电力电子装置的弱惯性系统,需要考虑不同电力电子设备的运行特性、控制策略等。另外,电力电子化的电力系统也需要对稳定域、系统短路比^[19]等指标重新进行定义,以适应未来电力系统的稳定性分析和优化运行。

3 高比例可再生能源电力系统研究体系

3.1 研究主线

围绕多时空强不确定性与电力系统形态演化、电力系统电力电子化这两个科学问题,本文提出了未来高比例可再生能源电力系统的研究脉络,如图3所示。首先,多时空强不确定性和电力系统电

力电子化2条主线贯穿“源-输电网-配电网-负荷(发输配用)”4个环节始终;在此基础上,将这2条主线和4个环节划分为“电力系统结构形态与预测”“输电网规划”“配电网规划”“高度电力电子化电力系统稳定分析”“交直流混联系统优化运行”这5个着眼点开展研究。

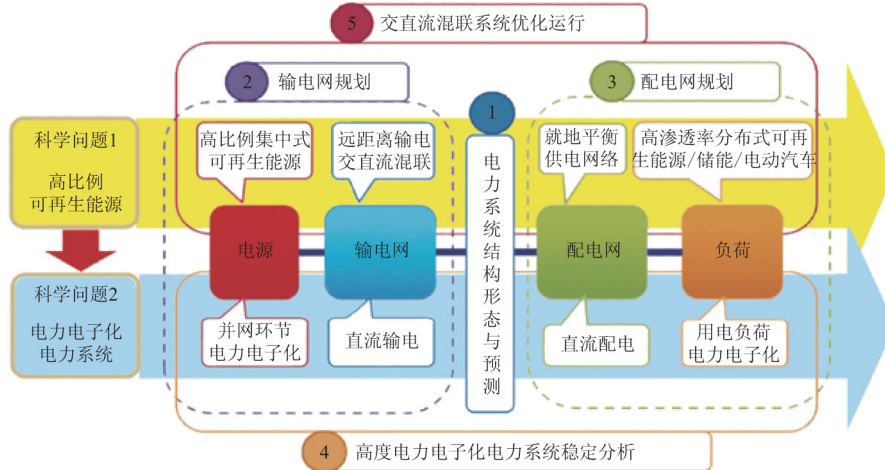


图3 高比例可再生能源电力系统研究脉络

Fig.3 Research map of power systems with a high proportion of renewable energy

本章将围绕高比例可再生能源电力系统,从电力系统的“形态、结构、预测”到输配电网规划,最后到运行的层次逐级递进;其时间尺度是从电力系统“形态、结构”的长时间尺度,过渡到输配电网规划的中长期时间尺度,最后到输配电网稳定分析与优化运行的短时间尺度。

3.2 研究框架

本文提出的未来高比例可再生能源电力系统的

研究框架如图4所示。首先,研究电力系统结构形态演化模型与电力预测方法,提供源-网-荷结构形态和各种运行场景,以及不同可再生能源渗透率下的电力电量预测结果,作为电力系统规划和运行研究的输入边界条件。在此基础上,其他研究点从规划和运行两个方面展开,为电力系统形态和结构的研究提供系统安全经济运行边界以及可再生能源消纳能力评估结果。

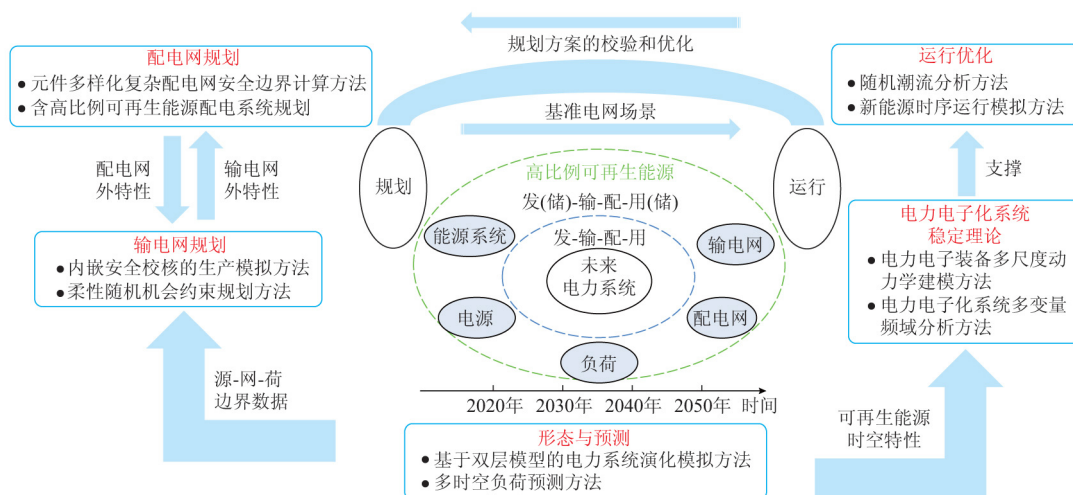


图4 高比例可再生能源电力系统研究框架

Fig.4 Research framework of power systems with high proportion of renewable energy

输配电网络规划在整个研究框架中起到了承上启下的作用:一方面规划要基于“电力系统形态和预测”研究得到的能源电源负荷场景,并将其对输配电网络的技术需求转化成具体的规划方案;另一方面,输配电网络规划的研究成果为后续输配电网优化运行和稳定机理相关的研究提供基础数据和场景;同时,输电网规划和配电网规划需要相互协调,实现输配电系统的协同规划。

电力电子化电力系统稳定理论和电力系统优化运行研究共同在优化运行领域展开研究,紧扣大规模可再生能源并网后源-网-荷电力电子化趋势,分别从稳定机理探索、输配电网优化运行两个子领域进行研究。其中,稳定机理分析可以为电力系统优

化运行的研究提供基础与支撑。稳定分析和优化运行的研究将为输配电系统规划的研究提供安全和稳定判据。

4 高比例可再生能源电力系统的核心技术

下面将分别从“电力系统形态与预测”“输电网优化规划”“配电网优化规划”“电力电子化电力系统稳定性分析”“输配电网优化运行”这5个方面对未来高比例可再生能源电力系统的核心技术进行具体阐述。

4.1 未来电力系统结构形态与电力预测

高比例可再生能源电力系统结构形态和电力预测理论的研究框架如图5所示。

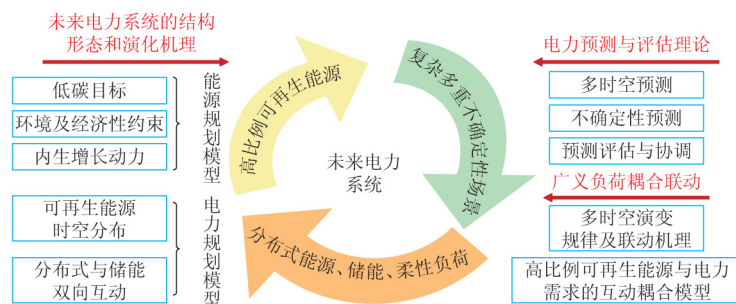


图5 未来电力系统结构形态与预测

Fig.5 Shaping and forecasting of future power systems

可再生能源出力和负荷是电力系统规划和运行的重要边界条件,提高可再生能源出力和负荷预测的精度能够有效降低电网规划和运行成本。在高比例可再生能源,特别是分布式可再生能源并网情况下,需求侧出现了大量储能、电动汽车、需求响应等灵活性资源。这些灵活性资源与可再生能源出力以及实际用电需求一起可以称为广义负荷。首先,研究广义负荷的耦合联动特性,包括辨识其组成结构^[20],探索复杂多重不确定性场景下广义负荷对经济、气象、电价等外界因素的响应特性^[21],研究负荷的多时空尺度演变与转移规律,建立广义负荷的动态关联模型与响应特性以及高比例可再生能源与电力需求的互动耦合模型。在此基础上,需要研究面向用户-馈线-母线-系统,包含实时-短期-中期-长期的可再生能源与需求互动的电力预测与评估理论。针对可再生能源的强随机性,探索不同时空尺度下可再生能源和负荷不确定性的描述方法,研究考虑预测误差相关性的区间预测与概率预测方法^[22]。最后,对所提出的电力预测技术,建立面向高比例可再生能源消纳的电力预测评估方法,与传统基于误差数值统计不同,需要充分考虑预测误差对系统规划和运行成本造成的影响^[23-24],进而根据

预测评价结果动态取舍和优化预测技术,将多种预测技术进行优化组合以提高预测精度。

在电力系统结构形态方面,未来中国可再生能源的发展主要是受节能减排、低碳发展的“外力驱动”的影响,其电网发展的机理与顺应电力系统“内在需求”的发展机理可能存在较大的区别。所以,需要探索以清洁低碳化为目标的未来能源、电力格局变化趋势及其演化机理,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。在此基础上,进一步研究面向中远期可再生能源的发展规划和电源规划模型,构建中国能源-电源系统典型结构形态及布局场景,进而研究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^[25]。

4.2 高比例可再生能源输电网优化规划

高比例可再生能源输电网规划理论研究框架如图6所示。

对于输电网,高比例可再生能源接入将使电力系统运行方式多样化、电网交直流连接复杂化。具体表现在:①电源和电网规划耦合更加紧密,需要揭

示源网协同的机理,研究源网协同规划方法;②可再生能源的多时空不确定性对电力系统运行机理影响较为复杂,现有的规划模型难以有效考虑这些复杂的时空特性;③未来交直流混联系统本质地改变了电力系统运行的优化和控制方式,这些运行层面的优化和控制需要在规划中进行考虑;④最后,传统的电力系统规划可以通过若干种典型的运行场景进行评估,而未来电力系统在强不确定性环境下,系统运行方式多样化,需要对系统运行方式进行全面评估,才能掌握电网规划方案的安全性、经济性和适用性。

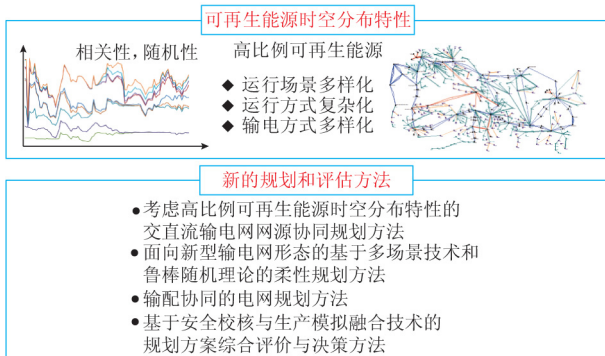


图6 输电网规划

Fig.6 Transmission network planning

所以,需要提出一套适应于高比例可再生能源并网的输电网规划理论。具体地,针对高比例可再生能源的多时空分布特性对电网形态的影响,研究交直流输电网源协同规划理论与方法;而针对电力系统规划中考虑高比例可再生能源出力的强波动性和随机性的问题,研究可再生能源出力不确定性模型,建立基于鲁棒规划理论和随机规划理论的柔性输电网规划方法^[26];另外,针对高比例可再生能源通过不同电压等级、不同输电方式接入电网的差异性,建立与配电网相协同的、考虑经济性和安全性的交直流输电网多目标规划方法;最后,针对高比例可再生能源接入后输电网规划决策复杂化的问题,研究基于安全校核与生产模拟融合技术的规划方案综合评价与决策方法。

4.3 高渗透率可再生能源配电网优化规划

高比例可再生能源配电网规划理论研究框架如图7所示,其中TSC表示最大供电能力,DESS表示分布式储能系统,EV表示电动汽车,DG表示分布式发电,DSSR表示配电网安全域,AL表示主动负荷。

对于配电网,高渗透率分布式可再生能源并网的同时,将有储能、需求响应等各种灵活性资源的“配套”接入,未来的主动配电网源荷界限模糊化,可调度资源需要在规划中予以充分考虑;另外,对于边界条件多样的主动配电网,如何对其安全运行区间

进行有效建模对配电网的规划也具有重要意义;最后,配电网面向的负荷类型需要予以个性化考虑,而不能简单地按照PQ节点进行等值,需要针对城市和农村等不同典型的负荷分布形态设计不同的规划方案。

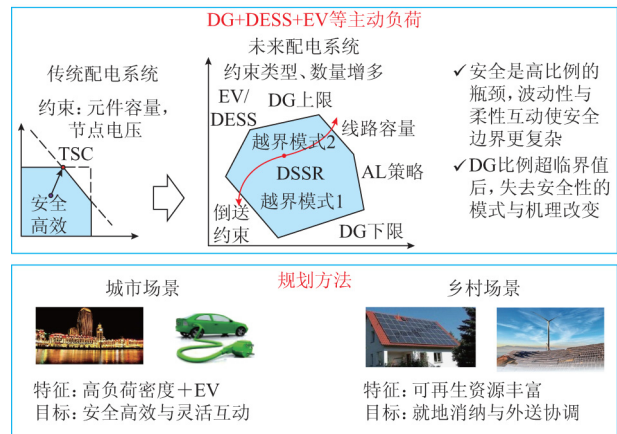


图7 配电网规划

Fig.7 Distribution network planning

所以,需要建立一套高渗透率可再生能源接入下考虑柔性负荷的配电网规划理论,给出现有配电系统消纳可再生能源的比例以及提高比例的规划方法。具体地,首先,基于广义负荷特性及其互动耦合机理,研究可再生能源与主动负荷响应、分布式储能(包括电动汽车)、输电网相协同的配电网规划模型与方法;另外,研究考虑柔性负荷的高渗透率配电系统安全边界理论,对配电网的安全边界进行刻画与评价,研究安全边界的拓扑性质,分析工作点失去安全性的新模式与机理,提出临界渗透率的计算方法^[27];在此基础上,研究高负荷密度城市市场场景下配电网安全高效的规划方法,得出类似经典规划指标容载比的广义源荷配比指标,以及可再生能源高比例接入下乡场景下就地消纳与外送相协调的规划方法,实现低压、中压、高压配电网以及输电网分层消纳^[28]。

4.4 电力电子化电力系统稳定性

未来电力电子化电力系统在源-网-荷不同环节以及不同尺度之间的作用机理示意图如图8所示,其中PI表示比例-积分控制器,PLL表示锁相环,SPWM表示正弦脉宽调制。

一方面,随着集中式和分布式可再生能源并网,未来电力系统在发电和输电环节都会接入更多的电力电子设备;另一方面,直流输电网、直流配电网、交直流混联、电力电子接口负荷等越来越多,使得未来电力系统呈现明显的电力电子化趋势。电力电子设备的控制策略多样化,暂态特性也不尽相同,需要对电力系统不同时间尺度特性进行全面的分析^[29]。

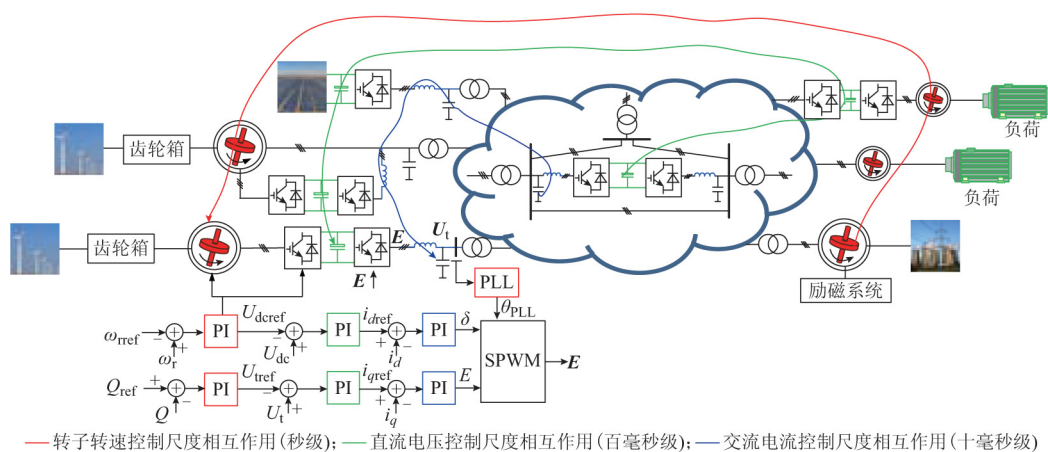


图 8 电力电子化电力系统稳定性分析
Fig.8 Stability analysis of power electronics dominated power systems

所以,需要研究源-网-荷高度电力电子化的电力系统稳定性分析理论。首先,以典型可再生能源发电、直流输电及变频调速负荷等装备的机电功率控制架构与电磁多时间尺度控制结构(直流电压环、交流电流环、锁相环等)为基础,研究源-网-荷电力电子化的电力系统中各元件多时间尺度(机电、电磁)动力学行为及建模方法;然后,需要研究电力电子化电力系统全过程数字仿真方法,分析多种扰动情形下系统的机电暂态和电磁振荡行为特征。在此基础上,研究装备的电磁暂态行为及装备间的暂态耦合特征,提出机电暂态行为描述方法及电磁暂态的时空分布规律及其刻画方法;研究电力电子化电力系统电压动态特性描述方法及其与功角稳定的相互作用机制,探索不同运行场景下电力电子化电力系统机电振荡稳定新形态及稳定性分析指标体系^[30];最后,需要研究电力电子化电力系统中高频振荡的形成机理、激发因素、辨识方法与抑制措施,提出电力电子化电力系统电磁多尺度振荡特征的分析理论与方法^[6]。

4.5 高比例可再生能源电力系统优化运行

高比例可再生能源输电网优化运行研究理论框架如图 9 所示。

对于输电网,交直流混联系统成为中国未来电力系统的必然发展趋势,如何充分调用各种灵活性资源提高系统安全性和经济性,如何对多时空强不确定性的电网进行实时态势感知,如何在运行层面充分考虑电力系统电力电子化带来的稳定性问题,这些都是在未来高比例可再生能源电力系统中亟待解决的问题。

所以,将针对高比例可再生能源接入交直流混联系统的优化运行问题,开展含高比例可再生能源、

电动汽车及储能的交直流混联系统运行的实时状态评估方法研究;然后,考虑可再生能源不确定性和预测精度、负荷波动性以及系统可控能力,对输电系统进行实时态势感知和多维度运行风险分析^[31];另外,针对含高比例可再生能源集中式并网的输电系统,研究涵盖低频、次同步、超同步等宽频带范围的稳定性评估方法,研究考虑资源类型/时空互补性和宽频带稳定约束的可再生能源机组/场站/集群多层次并网控制及协调运行方法。

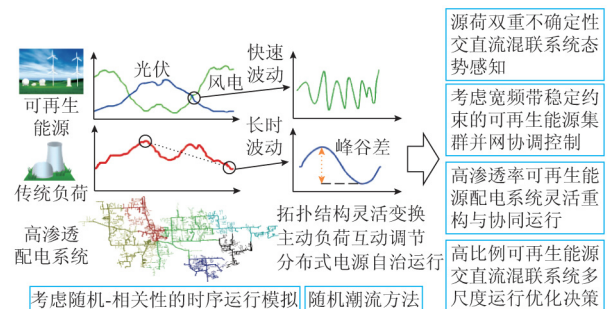


图 9 交直流混联电力系统优化运行
Fig.9 Optimal operation of AC-DC hybrid power system

对于配电网,需要充分考虑未来可能存在的多种灵活性资源,特别是在电力市场环境下,掌握其响应特性。另外,传统的配电网的运行通常将主网当做无穷大电源,作为一个可靠的边界条件予以考虑,主动配电网未来可能需要承担为主网提供备用的角色,输电网的交互将被加强^[32]。

所以,针对高渗透率可再生能源的配电系统,开展考虑电动汽车、储能与可再生能源协调的配电系统主动重构与自治运行方法以及市场环境下协同优化理论的研究。另外,针对高比例可再生能源并网的交直流混联输配电系统多尺度运行优化与决策问题,研究系统备用需求评估方法和跨区域电力电

量消纳机制^[33],提出交直流混联跨区域备用共享原则和适应预防与紧急控制的输配电网多层次风险调度方法。

5 高比例可再生能源电力系统挑战与展望

适应高比例可再生能源电力系统的优化规划与运行研究需要多方面的关键技术,本文尝试从数学方法、分析理论、技术渗透和标准系统等4个方面对中国未来高比例可再生能源电力系统规划和运行的研究挑战进行分析和展望,如图10所示。从电气学科之外借鉴新的数学方法,从电气学科本身研究新的分析理论,同时要注重新的技术渗透,最后需要设计符合高比例可再生能源并网特征的标准电力系统,对所提出的关键技术与方法进行测试。

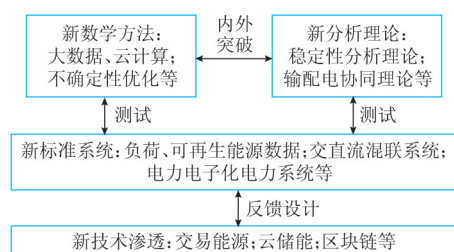


图10 高比例可再生能源电力系统研究关键技术
Fig.10 Key technologies of power systems with a high proportion of renewable energy

5.1 新数学方法

高比例可再生能源并网给电力系统的源端和负荷端都带来了较大的不确定性,如何从强不确定环境中尽可能提高可再生能源和负荷预测精度、在电力系统的规划和运行等优化问题中充分考虑复杂耦合的不确定性都需要新的数学方法。例如,在电力预测中,需要充分融合经济、气象等多元信息,运用先进的大数据处理手段,深入分析可再生能源、负荷等的变化规律与模式,进一步提高预测精度^[34];又如,对于优化规划和运行,充分考虑可再生能源、电网结构等各种不确定性,利用鲁棒优化、博弈等技术开展相应的建模分析,提出高效的优化求解算法,以满足实际工程需求。对于数学、计算机等领域新的研究成果,采用“拿来主义”,并与高比例可再生能源电力系统的实际需求相结合。

5.2 新分析理论

未来电力系统会因高比例可再生能源的接入从量变走向质变,意味着一些传统的分析方法可能难以适用于未来电力系统的分析。例如,电力系统中交直流混联、电力电子设备控制策略等对电力系统稳定性分析的影响;又如,电力系统中,同时考虑集中式可再生能源和分布式可再生能源并网时,输电

网规划与配电网规划如何协同开展等问题。这些都需要深入分析电力系统内在机理,研究适应新形势下的电力系统分析理论。

5.3 新技术渗透

为满足未来高比例可再生能源并网的需求,在源-网-荷等不同环节,都有可能开发新的硬件设备,研发新的控制技术,设计新的市场机制,运营新的商业模式,等等。这些新技术渗透在解决一部分问题的同时,也有可能带来新的挑战。例如,虚拟同步电机技术增强了电力系统的稳定性,但需要进一步分析虚拟同步机的特性、控制可靠性等问题;又如,在需求侧,最新的可交易能源(transactive energy)^[35]和云储能^[36]等商业模式可有效促进可再生能源就地消纳,这些全新的商业模式也需要全新的建模方法;再如,区块链对碳计量与交易、可再生能源灵活交易等方面可能产生根本的影响^[37],其带来的机遇与挑战也需要进一步研究。

5.4 新标准系统

对于高比例可再生能源电力系统研究的所有方法,都需要通过一定的科学算例或实际系统进行验证,针对相同研究问题的不同解决方法,则需要在一套公共、公开的数据集中进行测试,避免出现多头的现象,将所有的研究都用“一把尺”来衡量。目前,国际已经形成多套IEEE标准系统用于开展潮流分析与计算、可靠性评估等各方面的研究。但传统的标准数据难以反映高比例可再生能源电力系统的特性。因此,需要设计新的标准系统,充分考虑高比例可再生能源并网的相关特性,考虑中国源-网-荷形态特征以及发展趋势,给出小时级甚至更细粒度的边界条件,为预测、规划、运行、稳定性分析等各方面的研究奠定基础。

6 结语

本文分析了高比例可再生能源电力系统的基本特征,围绕“多时空强不确定性与电力系统形态演化”和“电力系统电力电子化”两个关键科学问题,从电力系统结构形态与预测、输电系统规划、配电系统规划、电力系统稳定机理分析、输配电网运行5个方面,阐述了未来高比例可再生能源电力系统的研究框架与关键技术。最后,从数学方法、分析理论、技术渗透和标准系统4个方面对未来高比例可再生能源电力系统规划与运行的研究进行了展望。高比例可再生能源并网成为未来电力系统发展的必然趋势,希望本文能够为中国未来高比例可再生能源电力系统(特别在规划和运行方面)的研究提供参考。

参考文献

- [1] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [2] 国家发改委能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究[R]. 2015.
- [3] WANG X, BLAABJERG F, WU W. Modeling and analysis of harmonic stability in an AC power-electronics-based power system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2014, 29(12): 6421-6432.
- [4] LU X, MCELROY M B, PENG W, et al. Challenges faced by China compared with the US in developing wind power[J]. Nature Energy, 2016, 1(6): 6p.
- [5] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [6] 白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3699-3705.
BAI Jianhua, XIN Songxu, LIU Jun, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705.
- [7] 丁立, 乔颖, 鲁宗相, 等. 高比例风电对电力系统调频指标影响的定量分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20130810001.
DING Li, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Impact on frequency regulation of power system from wind power with high penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20130810001.
- [8] 马欢, 李常刚, 刘玉田. 风电爬坡事件对系统运行充裕性的影响评估[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 41-47. DOI: 10.7500/AEPS20160527008.
MA Huan, LI Changgang, LIU Yutian. Assessing impact of wind power ramp events on operation adequacy of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 41-47. DOI: 10.7500/AEPS20160527008.
- [9] DAVIDSON M R, ZHANG D, XIONG W, et al. Modelling the potential for wind energy integration on China's coal-heavy electricity grid[J]. Nature Energy, 2016, 1(7): 7p.
- [10] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电并网的电力系统运行灵活性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1672-1678.
LI Haibo, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Assessment on operational flexibility of power grid with grid-connected large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1672-1678.
- [11] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158. DOI: 10.7500/AEPS20151215008.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158. DOI: 10.7500/AEPS20151215008.
- [12] 张宁, 康重庆, 肖晋宇, 等. 风电容量可信度研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 82-94.
ZHANG Ning, KANG Chongqiang, XIAO Jinyu, et al. Review and prospect of wind power capacity credit [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 82-94.
- [13] 康重庆, 夏清, 徐玮. 电力系统不确定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [14] WANG Y, ZHANG N, CHEN Q, et al. Dependent discrete convolution based probabilistic load flow for the active distribution system[J/OL]. IEEE Trans on Sustainable Energy [2016-12-15]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7784832/>.
- [15] MAJZOUBI A, KHODAEI A. Application of microgrids in supporting distribution grid flexibility[J/OL]. IEEE Trans on Power Systems [2016-12-01]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7763825/>.
- [16] 陈启鑫, 刘敦楠, 林今, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(一)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3050-3056.
CHEN Qixin, LIU Dunnan, LIN Jin, et al. Business models and market mechanisms of energy internet (1) [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3050-3056.
- [17] OCHOA L F, PADILHA-FELTRIN A, HARRISON G P. Evaluating distributed generation impacts with a multiobjective index[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1452-1458.
- [18] 郝思鹏, 薛禹胜, 张晓明, 等. 基于 EEAC 理论分析低频振荡[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 11-15.
HAO Sipeng, XUE Yusheng, ZHANG Xiaoming, et al. Low-frequency oscillation analysis based on EEAC theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 11-15.
- [19] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.
XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [20] KAUR A, NONNENMACHER L, COIMBRA C F M. Net load forecasting for high renewable energy penetration grids [J]. Energy, 2016, 114: 1073-1084.
- [21] MURATORI M, RIZZONI G. Residential demand response: dynamic energy management and time-varying electricity pricing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2016, 31(2): 1108-1117.
- [22] HONG T, FAN S. Probabilistic electric load forecasting: a tutorial review[J]. International Journal of Forecasting, 2016, 32(3): 914-938.
- [23] DU E, ZHANG N, KANG C, et al. Managing wind power uncertainty through strategic reserve purchasing[J/OL]. IEEE Trans on Power Systems [2016-10-18]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7592460/>.
- [24] LI G, CHIANG H. Toward cost-oriented forecasting of wind power generation[J/OL]. IEEE Trans on Smart Grid [2016-09-28]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7579134/>.
- [25] MOKRYANI G, HU Y F, PILLAI P, et al. Active

- distribution networks planning with high penetration of wind power[J]. *Renewable Energy*, 2017, 104: 40-49.
- [26] CHEN B, WANG L. Robust transmission planning under uncertain generation investment and retirement [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2016, 31(6): 5144-5152.
- [27] 肖峻,甄国栋,王博,等.配电网的安全距离:定义与方法[J/OL].*中国电机工程学报*[2016-08-16].DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.160246.
XIAO Jun, ZHEN Guodong, WANG Bo, et al. Security distance of distribution network: definition and method [J/OL]. *Proceedings of the CSEE*[2016-08-16]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.160246.
- [28] BAKIRTZIS E A, BISKAS P N. Multiple time resolution stochastic scheduling for systems with high renewable penetration[J/OL]. *IEEE Trans on Power Systems* [2016-06-07]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7486048/>.
- [29] SINGH M, SANTOSO S. Dynamic models for wind turbines and wind power plants[R]. Golden, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2011.
- [30] FAN L, MIAO Z. Nyquist-stability-criterion-based SSR explanation for type-3 wind generators [J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2012, 27(3): 807-809.
- [31] PANTELI M, KIRSCHEN D S. Situation awareness in power systems: theory, challenges and applications [J]. *Electric Power Systems Research*, 2015, 122: 140-151.
- [32] HUANG Q, VITTAL V. Integrated transmission and distribution system power flow and dynamic simulation using mixed three-sequence/three-phase modeling [J/OL]. *IEEE Trans on Power Systems* [2016-12-13]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7782366/>.
- [33] XU Q, ZHANG N, KANG C, et al. A game theoretical pricing mechanism for multi-area spinning reserve trading considering wind power uncertainty[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2015, 31(2): 1084-1095.
- [34] VASILAKOS A, HU J. Energy big data analytics and security: challenges and opportunities [J]. *IEEE Trans on Smart Grid*, 2016, 7(5): 2423-2436.
- [35] FORFIA D, KNIGHT M, MELTON R. The view from the top of the mountain: building a community of practice with the GridWise transactive energy framework[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2016, 14(3): 25-33.
- [36] LIU J, ZHANG N, KANG C, KIRSCHEN D, et al. Cloud energy storage for residential and small commercial consumers: a business case study [J]. *Applied Energy*, 2017, 188: 226-236.
- [37] 张宁,王毅,康重庆,等.能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探[J].*中国电机工程学报*, 2016, 36(15): 4011-4023.
ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(15): 4011-4023.

康重庆(1969—),男,通信作者,教授,主要研究方向:电力规划与运行、可再生能源、负荷预测、低碳电力技术。
E-mail: cqkang@tsinghua.edu.cn

姚良忠(1961—),男,博士,教授,博士生导师,国家“千人计划”特聘专家,主要研究方向:直流电网技术、可再生能源发电与并网。

(编辑 蔡静雯)

Key Scientific Issues and Theoretical Research Framework for Power Systems with High Proportion of Renewable Energy

KANG Chongqing¹, YAO Liangzhong²

- (1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Vigorously developing renewable energy generation is an effective way to tackle the challenges of energy crisis and air pollution. High proportion of renewable energy integration will be one of the basic characteristics of future power systems. This paper summarizes a number of key issues for power systems with a high proportion of renewable energy generation from two aspects: the power system planning and operation under high level uncertainty and the stability mechanism of power system with massive integration of power electronic devices. On this basis, a theoretical research framework is proposed by dividing the above two scientific issues into five sub-problems: the evolution of power system structure and its forecasting model; a multi-objective planning method for AC/DC transmission network with a high proportion of renewable energy generation; the distribution system planning with a high proportion of renewable energy generation; the stability analysis of power electronics dominated power systems; the cooperative optimal operation theory of AC-DC hybrid power system with a high proportion of renewable energy generation. The relationship among the five sub-problems is described. Finally, key technologies for future power systems with a high proportion of renewable energy generation are provided and prospected.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100).

Key words: high proportion of renewable energy; power system planning; optimal operation; stability analysis; load forecasting; transmission network; distribution network