

构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望

文云峰¹, 杨伟峰¹, 汪荣华², 胥威汀², 叶希³, 李婷²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082; 2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川省成都市 610041; 3. 国网四川省电力公司, 四川省成都市 610041)

Review and Prospect of Toward 100% Renewable Energy Power Systems

WEN Yunfeng¹, YANG Weifeng¹, WANG Ronghua², XU Weiting², YE Xi³, LI Ting²

(1. College of Electrical and Information Engineering (Hunan University), Changsha 410082, Hunan Province, China;

2. Sichuan Electric Economy Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan Province, China;

3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Vigorously promoting the development of renewable energy is an effective way to tackle the current energy crisis and environmental problems. Many counties and regions have already proposed their ambitious plans toward the transition to 100% renewable energy power systems (100% REPS). Also, numerous academical advancements related to this area have been achieved in recent years. To provide an important reference for continuously conducting the future research work, this paper comprehensively reviewed the recent advancements and future trends in 100% REPS. First, we presented the definition of 100% REPS and its differences with the zero-carbon power systems and the 100% clean energy power systems, then key challenges in terms of technology, economy, and policy for building 100% REPS were analyzed. On this basis, a theoretical research framework was proposed, which covers six sections including the generation allocation, power grid expansion planning, reactive power configuration, stability analysis and control, operational dispatch, and power quality optimization. The difficulties and potential research contents in each section needed to be taken into consideration are revealed. Finally, future trends about the exploration and application of 100% REPS were summarized and prospected.

KEY WORDS: 100% renewable energy power system; clean energy (100% REPS); power system planning; generation allocation; stability analysis and control; operational dispatch; low inertia; power electronization

基金项目: 国家自然科学基金项目(51707017); 国家电网公司科技项目(SGSCJY00GHJS1900010); 中国电机工程学会青年人才托举工程项目(CSEE-YESS-2018004)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51707017); Key Technology Project of State Grid Corporation of China (SGSCJY00GHJS1900010); Young Elite Scientists Sponsorship Program by CSEE (CSEE-YESS-2018004).

摘要: 大力推动可再生能源发展是应对当前能源危机和环境问题的重要手段, 全球许多国家和地区陆续提出未来向 100% 可再生能源电力系统(100% renewable energy power systems, 100% REPS)转型的设想, 相关学术研究成果在近年来也持续大量涌现。为全面综述该领域的国内外研究现状和发展趋势, 对进一步开展该领域相关研究工作提供参考和借鉴, 该文阐述 100% REPS 的基本概念及其与碳中和电力系统、清洁能源电力系统的联系和区别, 从技术、经济、政策 3 方面分析构建 100% REPS 将面临的主要挑战。在此基础上, 从电源规划、网架规划、无功配置、稳定性分析与控制、运行调度、电能质量优化 6 个环节, 综述当前相关研究成果, 拟定应对这些挑战的潜在研究方向, 分析其中需要重点关注的难点问题, 进而提出一套面向 100% REPS 的研究框架。最后, 对未来 100% REPS 的应用实践与探索进行总结和展望。

关键词: 100% 可再生能源电力系统(100% REPS); 清洁能源; 电力系统规划; 电源配置; 稳定性评估与控制; 运行调度; 低惯性; 电力电子化

0 引言

在全球化石能源枯竭、温室效应日益严重的现实威胁下, 世界范围内正在掀起能源清洁化的热潮, 以化石能源为主的能源结构正逐步向以风、光、水等可再生能源为主的能源结构转型^[1]。在此背景下, 许多国家和地区陆续提出构建 100% 可再生能源电力系统(100% renewable energy power system, 100% REPS)的设想。

丹麦物理学家 B. Sørensen 于 1975 年在《Science》期刊中率先提出 100% REPS 的构建设想^[2]。但此后的进展较为缓慢, 直到近年来由于世界能源和环境问题凸显, 相关研究才大量涌现^[3]。

据国际可再生能源署统计,当前已实现 100% REPS 的国家有 4 个,分别是巴拉圭、冰岛、阿尔巴尼亚、刚果;且有较多国家或地区电力系统已接近 100% 可再生能源供电,例如挪威、乌拉圭以及加拿大的 British Columbia、Manitoba 和 Quebec 3 个省份^[4]。此外,包括丹麦、意大利、德国、葡萄牙、芬兰、澳大利亚、巴西等众多国家的政府或研究机构已提出于 2030 年或本世纪中叶完成 100% REPS 构建的目标^[5-18]。例如,澳洲能源运营商设想在澳洲西部构建以光伏为主、风电为辅的 100% REPS^[8];德国环境研究委员会提出在 2050 前建成风电装机高达 69.9% 的 100% REPS^[9]。在我国某些水电资源极为丰富的地区,也存在着构建以水电为主、风光为辅的 100% REPS 的可行性。截止 2018 年底,我国四川、云南、青海、西藏 4 个水电资源丰富地区的清洁能源装机占比已超过 80%,而根据相关规划,其风电、光伏等新能源装机占比还将进一步增大。

在能源革命热潮的驱动下,对 100% REPS 开展深入的理论研究,对推动能源消费的清洁化具有重要意义。然而,构建 100% REPS 也将面临技术、经济和政策等多方面挑战。随着火电机组逐步关停及高比例风电、光伏等具有电力电子化接口机组的并网,系统将具有强不确定性和低惯性特征,其运行形态十分复杂、调节能力和稳定性水平大幅下降,对于规划设计、调度运行、稳定控制、电能质量各环节均提出了尚待解决的科学问题^[19-21]。

在全球范围内,近年来已有大量关于 100% REPS 的相关研究文献发表,特别是欧美地区。为理清相关概念及基本问题,对进一步开展该领域的研究工作提供参考和借鉴,本文对 100% REPS 的国内外研究进展和相关实践进行述评与展望。首先,阐述各类清洁能源电力系统之间的联系和区别,并综述国内外 100% REPS 的发展现状及主要特征;在此基础上,给出未来构建 100% REPS 面临的主要挑战,提出适用于该系统构建的理论研究框架;最后,对未来 100% REPS 的应用实践与探索进行总结和展望。

1 100% REPS 的基本概念

1.1 基本定义

100% REPS 是指完全利用水能、风能、太阳能、生物质能、海洋能、地热能等非化石燃料且可再生的能源,经过水电/风电机组、太阳能集热器/电池板等各类发电装置转化为电能,最终通过输配电网

送到终端负荷加以消耗的系统^[22]。

与其概念相近又不完全等同的还有碳中和电力系统(zero-carbon power system)以及纯清洁能源电力系统(100% clean energy power system)。其中,碳中和电力系统是由核电、可再生能源机组以及带有碳捕获和封存技术(carbon capture and store, CCS)的火电机组构成,该系统 CO₂ 的净排放量为零甚至为负是其主要特征^[23]。而对于纯清洁能源电力系统,国内外尚未形成统一定义。例如,2015 年巴黎全球气候大会期间,包括中国在内的 24 个国家和欧盟委员会共同提出的加速清洁能源革命创新项目“Mission Innovation”中,涉及的清洁能源技术包含可再生能源、核能、氢能、燃料电池、储能、工业和建筑能效、碳捕获等;而美国能源部则将可再生能源和核能作为其开发清洁能源的首要组成部分,未将燃气列入清洁能源行列中;我国国家能源局制定的《能源发展“十三五”规划》中,提出通过增加天然气和非化石能源的消费比重,达到降低 CO₂ 和污染物排放水平,从而促进能源系统清洁化^[24-25]。从上述介绍可以看出,各国机构对于清洁能源的定义略有区别,在我国可再生能源、核能以及天然气都被认为是清洁能源的重要构成。本文基于这一定义,并在下文解释 100% REPS、碳中和电力系统以及纯清洁能源电力系统这 3 者之间的联系与区别。

1.2 100% 可再生能源电力系统与其它系统形态的联系与区别

图 1 对这 3 类电力系统具体的构成与联系做了一个简单划分。可以看出,这 3 类系统其实对应了电力系统清洁化发展的 3 种不同形态:

1) 首先,基于当前电力系统,利用 CCS 技术改造一部分气电机组,关停全部煤电机组,并增加可再生能源、天然气以及核电等机组支撑负荷侧用

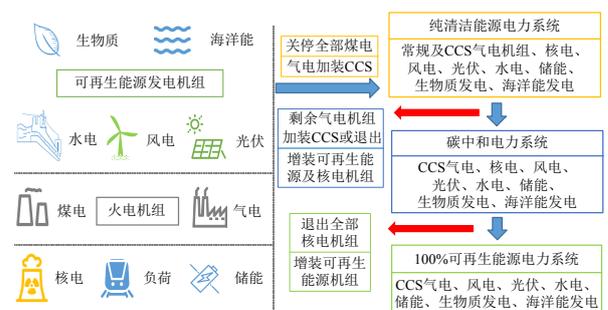


图 1 100% 可再生、碳中和、纯清洁能源电力系统构成
Fig. 1 100% renewable, zero-carbon, and fully clean energy power system

电需求，形成纯清洁能源电力系统。纯清洁能源电力系统中可以含有一定的碳排放量，丹麦政府早在 2006 年就已经提出建立该系统的构想^[5]。

2) 在纯清洁能源电力系统的基础上，进一步关停天然气发电机组或对该机组全面配置 CCS 设备，使得系统自身的碳排放量降至零，以形成碳中和电力系统^[26]。由于该系统需要全面处理自身排放的 CO₂，因此，其构建的难度相比纯清洁能源电力系统更大。欧洲已提出在 2050 年前实现这一目标。

3) 在这 3 类系统中，构建难度最大的是 100% REPS。由于需要实现发电资源完全可再生，故需在碳中和电力系统的基础上完全退出核电，并充分利用 CCS 和天然气合成技术来满足系统部分的储能及供电需求，最终形成 100% REPS。

为实现电力系统完全可再生能源化的发电形态，以解决能源和环境危机，丹麦、意大利、德国、澳大利亚、巴西等世界上多个国家和地区的能源部门及相关学者已经提出一些适用于自身环境的 100% REPS 构想方案，甚至有少部分国家和地区已经或接近实现电力系统完全可再生能源并网。

2 100% REPS 的国内外构想和实践

2.1 100% REPS 的构想

虽然早在 1975 年丹麦物理学家 B. Sørensen 就建议丹麦构建以风能和太阳能为主的 100% 可再生能源供电形态，但直到 2006 年 10 月丹麦政府才在议会中正式提出构建全面利用可再生能源、核能的长期目标。随后不久，丹麦工程师协会提出“IDA energy plan 2030”，设想在 2030 年前建立以可再生能源和核能为主导的纯清洁能源电力系统。而丹麦奥尔堡大学 Lund 教授领导的研究团队进一步提出关停核电，并在 2050 年前实现以生物质能、风能为主，光能、水能为辅，系统 100% 可再生能源供电的构想^[5]。随着近年来相关领域成为研究热点，当前已有众多国家提出与丹麦类似的 100% 可再生能源电力或能源系统构想方案，例如：意大利提出构建风、水、太阳能发电均衡的 100% REPS，太阳能发电装机占比为 44.1%，风电 29.4%，水电 26.5%^[6]；德国则提出构建风电为主、光伏为辅 100% REPS 的构想，其海陆风电容量占比高达 51.8%^[9]；澳大利亚同样也提出风、光为主的 100% REPS 构想^[8]；巴西提出构建太阳能 10%、风能 43%、生物质能 4.3%、水力发电 41% 以及需求侧管理 1.7% 的电源规划目标，并能够保证该系统即使在极旱气候

下也能维持连续 3 年的负荷用电需求^[10]；此外，葡萄牙、芬兰等国也提出了类似的构想。上述各构想系统具体的电源构成方案如图 2 所示，这些构想预计实现的时间大多数都集中于本世纪中期。

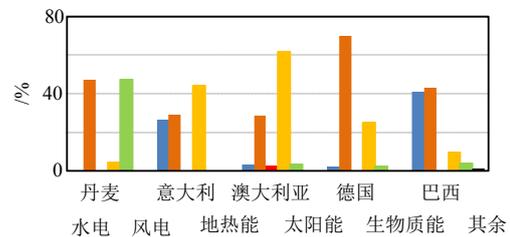


图 2 各国 100% 可再生能源系统的具体构想

Fig. 2 Specific conception for 100% renewable energy systems or power systems in several countries

部分国家 100% REPS 的构建报告中甚至纳入了其他能耗行业(如供热、交通等)以构建 100% 可再生综合能源系统，实现全行业的可再生化。显然，构建 100% 可再生综合能源系统比仅仅电力行业的 100% 可再生化更具挑战性，故 100% 可再生综合能源系统可作为对 100% REPS 的推广和发展。

2.2 全球 100% 可再生能源电力系统的相关实践

目前，全球范围内已有较多国家和地区近乎或已经实现了电力系统的 100% 可再生化。根据国际可再生能源署的统计，已实现 100% 可再生能源供电的国家共有 4 个，可再生能源装机占比超过 95% 的国家有 10 个，接下来本文将分别对其发展近况进行具体阐述^[4]。

1) 已经实现 100% 可再生能源的电力系统。

目前，已经实现 100% REPS 的国家包括巴拉圭、冰岛、阿尔巴尼亚和刚果。其中，巴拉圭早在 2000 年就已经实现电力系统 100% 可再生能源化，系统发电几乎都来源于水电，其年发电量的近 82% 都用于电力的出口，是一个水电主导、电能外送比极高的系统。而冰岛相对于前者就是一个典型的水电主导、电能自耗型系统，该系统 2017 年的水电出力达到其总量的 72.7%，而年总发电量的 97.37% 都用于供应网内负荷。因此，可见 100% 可再生能源并网在水电主导的外送及自耗型 2 种系统中都可被实现。上述各系统 2017 年度的具体发电数据如表 1 所示。

除上述 4 个国家级电力系统实现了 100% 可再生能源供电以外，还有很多地区也已经实现 100% REPS。系统容量和范围相对较大的有德国的梅克伦堡-前波莫瑞州、石勒苏益格-荷尔斯泰因州以及奥地利的下奥地利州，而容量及地理范围较小的系统

表1 现有100%可再生能源电力系统2017年度年发电量及出力状况

Tab. 1 Annual electricity energy and generation proportion of each 100% renewable energy power system in 2017

国家	年发电量/(GW·h)	水电/%	风电/%	地热/%	光能/%	生物质/%
巴拉圭	63902.3	99.8	0.0	0.0	0.0	0.2
冰岛	18547	72.7	0.0	27.3	0.0	0.0
阿尔巴尼亚	7783.9	99.98	0.0	0.0	0.02	0.0
刚果	9924	99.97	0.0	0.0	0.03	0.0

则有丹麦萨姆索岛、美国科罗拉多州阿斯彭市等。我国浙江嘉兴城市能源互联网试点中的核心示范区也在2019年初实现了可再生能源100%的接入与消纳。

2) 接近100% REPS。

经统计,系统容量和地理范围较大、年发电量大于10TW·h、近乎实现100% REPS主要有挪威、乌拉圭以及加拿大的British Columbia(BC)、

Manitoba(Man)和Quebec(Que)3个省份。上述系统2017年度的具体发电数据如表2所示^[4,27]。对比表1、2看出,一方面,现有已经或接近实现100%可再生能源并网的电力系统全部是以水电为主导,除冰岛外其余系统中的水电出力均大于90%。另外,接近100% REPS年发电量相较于前者要大很多,表明容量大小对系统实现100%可再生能源供电存在一定影响,容量越大构建的难度相对也越大。

表2 接近100%可再生能源的电力系统2017年度年发电量及出力状况

Tab. 2 Annual electricity energy and generation proportion of almost 100% renewable energy power systems in 2017

国家地区	年发电量/(TW·h)	可再生比/%	水电/%	风电	地热	光能	生物质	非可再生
挪威	149.6	97.2	96.2			$\Sigma=1.0\%$		2.8%
BC	76.4	>97.0	90.0	1.0%	0.0%	0.0%	6.0%	<1.0%
Man	37.2	>99.0	97.0	2.0%			$\Sigma<1.0\%$	
Que	212.2	>99.0	96.0			$\Sigma=3.0\%$		<1.0%

此外,虽然一些国家和地区的电力部门还未实现100% REPS,但却已有维持短时100%可再生能源供电的能力。例如,2017年哥斯达黎加实现了100%可再生能源发电满足全国约500万人口、长达300天的用电负荷,期间系统约80%的电能都来自于水电;2018年德国电网在强风及低负荷的环境下,实现100%可再生能源发电达3h,并仅依靠风电就已满足全国85%的用电需求,其余电量则由水力和生物质能发电填补;葡萄牙在2017年5月7日至11日期间,实现连续107h 100%可再生能源供电。我国青海电网在2018年6月20日午夜至29日午夜,仅有少量火电电量通过电力市场交易外送至省外,这期间已趋于实现100%可再生能源供电。

2.3 我国100%可再生能源电力系统发展潜力

由上述国内外发展现状可知,目前全球范围内已经或者接近实现100%可再生能源供电的电力系统皆是以水电为主。我国的水能资源非常丰富,其理论蕴藏量为6.94亿kW,技术可开发装机容量达到5.42亿kW,两项指数均列世界第一^[28]。截止2018年底,四川、云南、西藏、青海4个水电资源极为丰富省份/自治区的可再生能源装机占比已超过80%(水电分别占79.58%、71.55%、55.79%、45.1%),而根据相关规划,其风电、光伏等新能源装机还将

进一步增大。因此,这些拥有富裕可再生能源的地区若实现100%可再生能源的升级转型,将具有里程碑式意义,可对我国其余省份进一步提升电力系统的清洁化水平提供示范。

3 100% REPS的挑战和研究框架

可靠性和经济性是电力系统长期稳定运行的必备要素,若按照不恰当的构建路径推动当前高比例可再生能源电力系统的100%可再生化,势必会造成原系统良好的安全性和运行经济性被破坏,难以长久持续发展。因此,在规划具体构建路径时,应同时考虑经济、技术和政策多个角度的问题和应对策略,给出经济和技术上可行、政策支持下的100% REPS构建方案。本节首先从实际情况出发,介绍基于高比例可再生能源电力系统转变为100% REPS时将要面临的挑战。然后,结合现有相关研究工作,提出一套面向100% REPS构建的研究框架,为进一步开展相关研究工作提供参考。

3.1 100% REPS将面临的挑战

100% REPS相较于高比例可再生能源电力系统,主要区别在于后者可以在电网中保留有一定容量的常规火电机组,用以保证系统的安全稳定及调节能力等需求。而100% REPS中,常规火电机组

将完全关停。由火电机组退出和用电负荷增长带来的电力电量不平衡问题，常需通过装机、并网更多的风电/光伏这类随机性/间歇性电源加以解决，但这将给系统带来多方面的严峻挑战。

图 3 从经济、技术和政策 3 个角度出发，结合现有清洁型、高比例可再生能源电力系统研究工作遇到的实际问题以及国家出台的相关政策，提出未来构建 100% 可再生能源电力系统时可能面临的挑战。下文将对图中所给的挑战进行具体分析，阐述其产生的原因及将引起的问题。

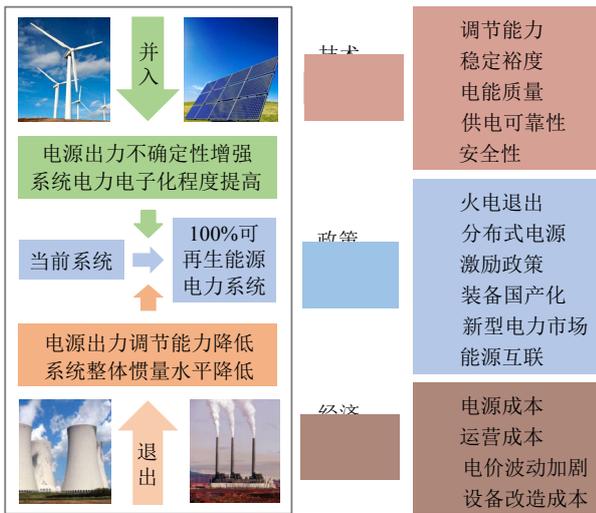


图 3 构建 100% 可再生能源电力系统面临的主要挑战

Fig. 3 Major challenges in building 100% renewable energy power systems

3.1.1 技术角度

1) 调节能力：一方面，传统电力系统中所需的灵活性及惯性支撑、调峰/调频/调压能力主要由火电机组提供，当系统在转变为 100% 可再生能源发电的过程中，火电逐渐退出，使得各形式的调节能力大幅下降。另一方面，由于风电、光伏本身具有出力波动性，要求系统有额外的调节能力用于应对间歇性电源出力的不确定性，伴随风、光渗透率的上升，将进一步恶化系统调节能力不足问题。

2) 稳定裕度：随着系统中起惯性支撑作用的火电机组大量退出，而新增风电和光伏机组为了能够得到最好的经济效益，几乎不对系统提供惯性、电压及频率响应，使系统的同步转矩以及电压、频率抗扰能力与传统火电主导系统相比均大幅下降，系统稳定裕度不足，当遭受各类大小扰动时，将出现功角、电压、频率稳定性方面的问题。由于风、光机组的频率和电压耐受能力远不如传统同步机组，因此，当系统在遭受较大频率和电压变化时，新能源机组更容易脱网，加剧频率与电压稳定问

题。2016 年 9 月和 2019 年 9 月，分别在澳大利亚和英国发生了大面积停电事故，原因之一在于当时系统惯量水平较低、调节和抗扰能力较弱，导致系统在受到故障扰动时电压和频率越限，触发低频减载保护动作，最终导致用户侧大面积停电^[29-30]。而在水电为主的 100% 可再生能源电力系统中，由于水轮机调速具有“水锤效应”，容易引起扰动后频率呈现负阻尼状态或超低频振荡现象，对系统频率稳定性造成较大影响。此外，在换流器高占比的 100% REPS 中，由于电力系统的电力电子化程度较高，使得系统装备间相互耦合的结构更为复杂，既有转子多质量块间的直接耦合形式，也存在通过交流、直流电网等通道形成的间接耦合形式。当系统在受到不同时间尺度扰动时，设备各电气参数将呈现不同的动态特性，容易引起诸如次同步振荡在内的一系列宽频谐振稳定性问题^[31-33]。

3) 电能质量：随着风光机组、直流输电、电动汽车、储能等设备在系统电源侧、负荷侧和输电环节的应用和发展，大量电力电子设备并入电网，系统电力电子化程度大幅提高。虽然，这有助于提升系统的可控性，但同样也会使得系统内的谐波电流增多、畸变率升高，影响供电品质、造成电气仪表测量结果不正确等不良后果。同时，新能源发电的波动和间歇特性也会加剧电压波动和闪变等电能质量问题。

4) 供电可靠性：100% 可再生能源发电形态下，电源侧出力具有强随机性，新能源电站所发出的有功相比同等容量常规机组的差值往往较大，尤其是在风光资源不足的时段，导致新能源机组接入系统后的等效容量小于实际额定容量，易引起电力供应不足事件的发生。随着系统中同步机组进一步被风光机组所替代，系统供电可靠性问题将更加突出。

5) 安全性：由于大部分风光发电的配套输电设备一般远离负荷，具有薄弱网架结构，且传输功率往往接近或达到额定值，此时一旦有线路发生故障而切除，原本该线路上的负荷便转移到了其余重载线路上，发生连锁故障的风险较高。其次，在 100% 可再生能源形态下，出力随机性电源增多，系统潮流分布状态的变化将更为频繁，再加上弃能约束政策的实施，使得其正常和 N-1 故障状态下的静态和动态安全性将遭受较大影响。在运行安全分析中，预想故障集的维度和广度需进一步扩展，除需考虑机组跳闸、线路停运、联络线中断等传统 N-1 事故外，还需重点考虑相继故障、大容量换流器和

无功支撑装置故障、直流多极闭锁\重启动\换相失败、新能源电站大面积脱网等严重事故下的安全态势和协调控制措施。此外,由于100%可再生能源形态下的电力系统具有与热、气、交通运输网等耗能行业互联的可行性,使得各网络间的耦合度更高,各系统将受到的影响因素更为复杂,电力系统需要在传统安全性的基础上,考虑其余网络与电力网络相互作用所造成的安全性问题。

3.1.2 政策角度

1) 推动火电退出:火电机组陆续退出将给发电企业带来较大的经济影响,同时也会引起工作岗位减少等社会问题。政府和相关企业应加强宣传和引导,并制定合理政策和措施,加快淘汰落后火电产能,妥善分流和安置电厂员工,以较小经济损失推动火电机组平稳关停。同时,对于转型过程中的新建火电规划项目,应当防范其产能过剩风险,并完善碳排放市场交易机制,压缩火电机组存有空间,推动100% REPS 构建进程。

2) 支持分布式电源:在未来100% REPS 中,为缓解大电网供电调度压力,规模化的分布式可再生电源并网将是重要路径。政府和电网应针对推动分布式可再生电源并网制定相关鼓励政策。既要保证用户侧电源的效益,推动分布式电源的发展,以缓解主网压力,也要协调好各阶段补贴扶持的力度,使分布式电源的占比和政府补贴支出都在合理范围内。同时,应推动分布式能源参与配电网层面的电力交易,调动用户侧灵活性,以减弱分布式发电的不确定性影响。

3) 可再生能源激励政策:在发展可再生化电力系统的初期,通过高上网电价、补贴资金等政策能够快速推动系统可再生能源渗透率提升。然而,当系统已含有一定比例的可再生能源向100% REPS 发展时,高电价的保障政策将过度激励可再生能源发展,加重弃能问题。同时,连续高昂的可再生能源财政补贴将导致电价上涨,使得可再生能源财政补贴的增收少于支出需求的增长,补贴资金利用效率低,政府及消费者负担增加。为此,在100% REPS 构建过程中,应当动态调整适用的激励政策,维持政府投资效率在较高水平上。

4) 推动核心技术装备国产化:新能源机组所处环境相比火电机组更为恶劣,对于设备的性能和工艺要求较高,电力电子芯片、功率变流器等器件和装备的制造工艺本国企业仍无法保障,部分器件和技术仍需依赖国外进口,费用相对高昂。政府应

制定合理政策已激励本国相关企业提高相关技术和工艺水平。

5) 构建新型电力市场:随着可再生能源发电机组占比越来越高,传统电力市场其市场化程度低、监管和法律建设弱的缺点,会造成可再生能源发电和消纳空间受火电机组刚性出力计划挤压而缩小。电网有必要创新自身营销模式,建立新型电价体系,合理利用需求响应等新兴技术,发展更多客户资源,实现互利共赢,最终建立新型电力市场体系。弥补当前由于市场化交易机制不完善、风光资源市场配置不足所引起的弃能,以及由于市场缺乏激励预测信息实时披露的机制,使得电价信号低效无法具有灵活配置可再生资源能力等问题。构建适用于100% REPS 形态的电力市场极具挑战性,但也是至关重要的一环。

6) 推动各能源行业的互联:在电力系统100%可再生能源化的构建过程中,扩展与交通、供热、供气等其他能源应用行业的联系,可为进一步实现全行业的100%可再生化奠定基础。

3.1.3 经济角度

1) 电源投资成本:在短期内开展大量投资是不经济且没有必要的,因此,在构建具体向100% REPS 转型路径时,应综合考虑系统中各阶段的负荷需求、各类化石燃料、可再生能源机组、输配电设备的成本和规模,提出成本合理的多阶段清洁能源投建方案,明确火电机组年度退出规模和新增设备并入时间点,保证系统年总成本与平均输电价格皆在合理范围内。

2) 系统运营成本:传统电力系统发电成本主要来源于煤电、气电、核电等机组的燃料成本,而在100% REPS 投入运营后,由于其发电均来源于可再生资源,故系统除少量天然气合成的费用外几乎不存在燃料成本。但系统运行时仍需预留一定的有功备用容量,用于维持和保证系统的稳定运行,故备用成本的有效核算较为关键。为得到最为经济的系统运营成本,在调度运行中应制定经济、可靠的发电和备用计划。

3) 电价波动加剧:100% REPS 中高比例新能源发电的瞬时出力波动特性将增加供需平衡能力的需求,引起电价波动性,加剧市场中的金融风险。灵活性发电和用电资源调用机制的缺乏,加上可再生能源发电强制上网或补贴政策的影响,电力市场在运行中可能出现负电价的状况,且随着新能源发电渗透率的提高将更加明显。

4) 设备改造成本：为克服现有风光机组惯性/频率/电压支撑能力不足的缺陷，需将系统中的一部分机组/变流器进行改造，使其既能兼容目前系统，也能支撑未来电力电子主导、甚至同步机组完全退出下的惯性/频率/电压需求，所带来的成本问题需要被考虑在内。此外，为使风光机组拥有一定的高/低电压和频率穿越能力，需配置对应的故障穿越和储能设备，但同样也需考虑改造成本的问题。

3.2 100% REPS 的研究框架

在全球范围内，近年来已有大量关于 100% REPS 的相关文献发表，特别是欧美地区。此外，目前国内外在高比例新能源电力系统方面已有较多成熟研究成果，可为进一步开展 100% REPS 的研究提供重要参考^[18-19,34]。为此，本文基于近年来发表的相关论文和报告，综合考虑其采用的方法和思路，结合上文论述的挑战问题，建立了一个较为全面的 100% REPS 研究框架，为未来具体开展 100% REPS 构建方案的研究工作提供参考。

图 4 为本文给出的 100% REPS 研究框架，针对大量新能源发电所带来的强不确定性、低惯性、高度电力电子化、调节能力与安全稳定性减弱等影响，分别从电源规划、网架规划、无功配置、运行调度、稳定性分析与控制、电能质量优化 6 个环节，给出解决或改善这类问题的潜在研究方向，具体阐述如下：

1) 100%可再生化的电源结构与容量规划。

构建 100% REPS 的电源规划方案时，需重点考虑新能源出力的强不确定性，在满足投资约束、电力电量平衡、调节能力等多维需求下构建经济合理的电源规划方案，确定多阶段煤电机组退出策略和可再生能源发电装机构成及容量。斯坦福大学 M. Z. Jacobson 教授领导的团队尝试探索了关于 139 个国家的 100% REPS 电源规划方案。该研究结合各国 2050 年用电负荷及基于 Gator-Gcmom 气候模型的可再生能源出力预测数据，考虑储能和需求响应，以系统总成本最低为目标、零负荷损失为核心约束，求得了用于实现 100%可再生能源发电形态的各国未来需要新增(清洁能源)和退出(煤电)机组的基本规划方案^[35]。帝国理工大学学者 N. M. Dowell 基于线性规划建立了 100% REPS 电源优化规划模型，对有功平衡条件进行适当松弛，使得到系统具有一定的有功调节能力^[36]。也有学者采用综合能源系统模型对电力、热力及其它能耗系统统一开展 100%可再生能源形态研究。例如，柏林工业大学 C. V. Hirschhausen 教授采用同时含有电力、热力及交通行业的能源规划模型 GENeSYS-MOD，以投资和运营总成本最低为目标，供需平衡、碳排放量、储能容量、各类可再生能源的开发潜力等条件为约束，建立线性化的综合能源系统规划模型，求得包含电源配置在内的多能源系统规划方案^[37]。芬兰阿尔托大学 S. Syri 教授采用 EnergyPLAN 软件对综合能源系统进行建模，不仅考虑各类可再生能源

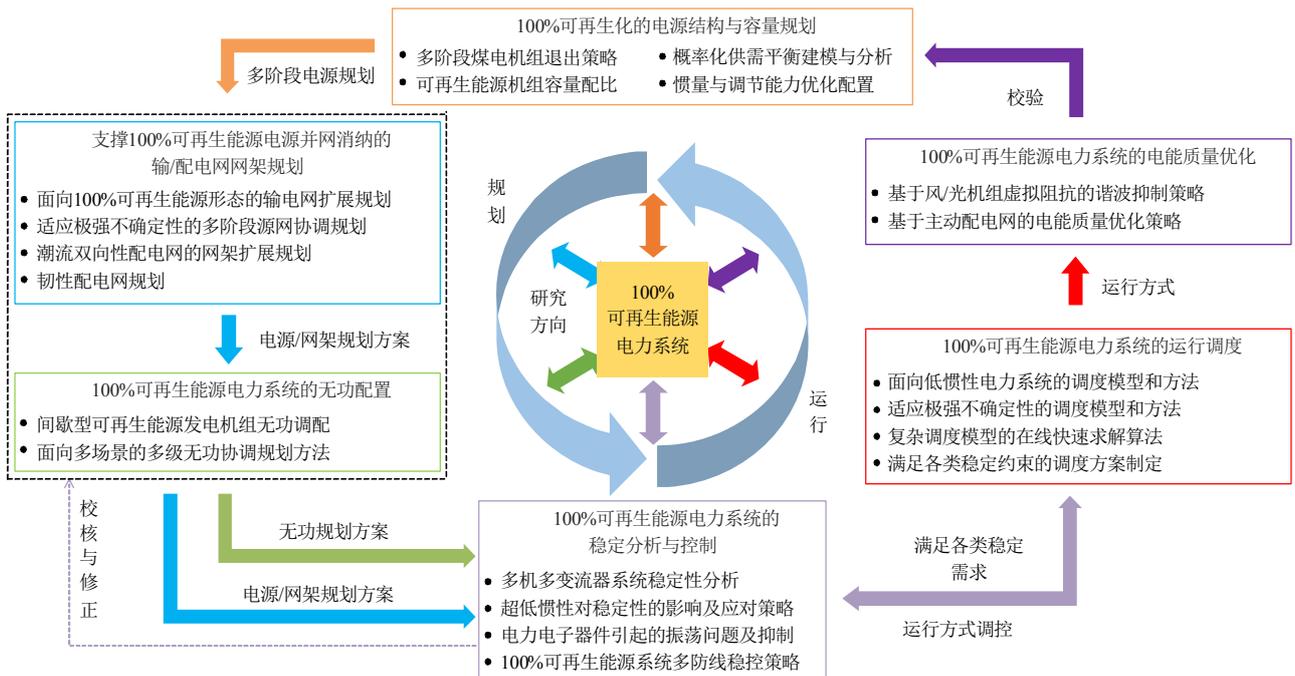


图 4 100%可再生能源电力系统的研究框架

Fig. 4 Research framework for the 100% renewable energy power systems

的投资、运营成本和最大渗透率等常规约束,还简要附加了系统惯性、备用容量等约束条件,通过对模型进行逐小时的仿真求解,得到具有一定灵活性的多阶段可再生能源规划方案^[7]。

从上述相关研究成果可知,目前针对100% REPS电源规划的研究主要从电力电量平衡角度出发,研究各类可再生能源电源的容量优化配比,而对于火电完全退出下的系统惯性与各类调节能力需求考虑不足,下一步应重点拓展这方面的研究工作。例如,可在面向100% REPS的电源规划模型中考虑虚拟惯量优化配置环节,从系统层面出发,对各区域/节点的惯量进行合理配置,以满足稳定运行所需的惯性需求。

2) 支撑100%可再生能源电源并网消纳的输电配电网网架规划。

由于100% REPS在源荷两端都具有极强不确定性,使得构建坚强的输电网架和配电网架规划方案的难度都大为增加。

在输电网规划方面,已有学者针对考虑高比例可再生能源出力不确定性的输电系统扩展规划开展了大量研究工作,将多场景优化、区间优化、鲁棒优化及机会约束优化等方法应用到规划建模中,使求得的网架增强方案具有一定的适应电源和负荷波动场景的能力^[38]。这些工作为含100%可再生能源的输电网扩展规划研究提供了有益参考。IEEE会士A. J. Conejo教授领导的团队首次研究了面向100%可再生能源电力系统构建的电源与输电网协调规划模型,采用多场景技术考虑新能源出力和负荷需求的不确定性,耦合电源/网架投资约束及系统运行约束(机组出力、潮流安全等),并利用滚动窗口的形式对单阶段模型逐次求解得到多阶段性的输电网及电源扩建方案^[39]。德国环境研究委员会M. Faulstich教授同样考虑新能源出力不确定性,在100% REPS路径规划中基于电源、网架和负荷需求,以年总成本最低为目标,建立适用于多场景的线性化输电网扩展规划模型,通过对各场景进行逐小时仿真,得到具有一定鲁棒性的网架规划方案^[9]。

在配电网规划方面,目前还鲜有与100% REPS构建直接相关的研究成果。为支撑系统100%可再生能源化,需进一步加强配电网侧分布式可再生能源并网、储能、需求响应、主动配电管理等技术的研究和应用。相较传统配电网,100%可再生能源场景下配电网规划建模的复杂性和求解难度将是需

要解决的关键问题。此外,为提升含100%可再生能源配电网在自然灾害、网络攻击等事件下的恢复和自治运行能力,还需进一步探索配电网的韧性规划问题,确保具有一定的孤岛穿越能力,这对提升系统整体运行可靠性有着重要意义^[40-41]。

3) 100% REPS的无功配置。

在构建100%可再生能源电力系统的过程中,火电完全退出将使得传统的静态无功配置不再适用于新形势下的无功波动需求,需要构建一套新的无功配置方案,用于满足100%可再生能源供电情况下的电压支撑能力。目前可参考的研究思路主要有两种:一种是基于各类评价指标找出源荷随机波动系统中的电压薄弱节点,加入无功补偿装置,提升电压稳定^[42];另外,也可通过对光伏电站或风电场施加鲁棒无功控制策略,令机组能够响应自身有功波动,输出一定量无功,提升波动性电源并网点电压稳定性^[43]。另一方面,由于风、光机组在并网时多需要通过变流器实现,而当前所应用的并网变流器主要为grid-following型,不具备电压支撑能力,同样也会给维持电压稳定带来困难。针对该问题已有学者提出可通过应用grid-forming型并网变流器,并附加电压控制策略,加强机组的故障穿越能力,以达到提升系统电压质量的效果^[44-46]。在开展100% REPS无功配置研究时,可同时考虑协调寻找电压薄弱点、系统无功规划及风光机组无功控制策略3种方法,以得到兼具经济性和电压稳定性的无功配置方案。

4) 100% REPS的稳定分析与控制。

适用于传统确定性电力系统的稳定性分析方法难以准确描述100% REPS在遭受随机扰动后的动态行为。针对不确定因素给稳定性分析带来的影响,奥地利国家技术研究院H. Bosetti提出基于Gram Schmidt和李雅普诺夫协变矢量的暂态稳定性分析方法,利用李亚普诺夫指数和向量对系统全局的稳定性进行分析,避免推导能量函数时所需的假设,使评估方法更加适用于不确定性环境下的稳定性评估^[47]。而针对电力电子暂态行为分析的局限性,则可基于器件的物理和控制原理,建立包含锁相环、直流侧动态和闭环控制器在内的变流器并网接口发电机正序模型,以用于电力系统在多机多变流器状态下的暂态稳定性评估^[48]。

另外,对于高度电力电子化的100% REPS,其整体呈现一种零火电、低惯性状态,对系统的继电保护、暂态、频率、电压以及静态稳定性等方面均

会造成一定影响。美国可再生能源实验室 B. Johnson 研究员针对电力电子化系统不能提供足够大短路电流造成继电保护失效的问题,提出通过同步继电器维持短路电流方法来解决^[44];而对于低惯性系统的暂态稳定问题,则可考虑在发电机组上加装一种分布式非线性鲁棒控制器,以提高系统在通信延迟和物理扰动下的暂态稳定裕度^[49];IEEE 会士 K. Y. Lee 教授提出根据各机组受小扰动的影响程度,对可再生发电机组基于层次组成分析法施加无功控制策略,提升系统静态稳定性^[50];针对低惯性系统频率稳定问题,则可通过加装调相机或施加虚拟惯量控制的方法,增强系统受扰动时的惯性响应,提升系统频率稳定性^[51]。针对零火电、低惯性系统电压稳定问题,可考虑对风电、光伏以及特高压直流输电线路附加调压控制策略,增强系统在大扰动下的电压稳定性^[52-53]。而对于系统中由于大量水电参与调频所引起的超低频振荡问题,则可采用调节水电机组调速器 PID 参数和增加阻尼调速器两种方法加以解决^[54-55]。对于风电场大规模并网所导致的次同步振荡等问题,则可采用对风电变流器、静止无功补偿器等装置附加次同步阻尼控制;或改变系统内装置的运行方式,如将静止无功发生器的恒电压控制转变为恒功率控制的方法加以抑制^[56-57]。

总体而言,现有关于稳定性方面的研究多集中于如何分析低惯性下的各类稳定性问题,还需加强电力电子器件本身以及控制策略所引起的多尺度振荡与失稳方面的研究。

5) 100% REPS 的运行调度。

新能源和电力电子高渗透的 100% REPS 转动惯量较低,在运行中面临多重不确定因素,发生频率失稳的风险较大,大幅增加了系统运行中机组组合、发电调度、备用计划和检修安排的难度,相关内容是需攻克的难点。虽然国内外在考虑可再生能源出力不确定性的优化调度模型和方法方面已有大量成果,但是,这些模型和方法是否可以直接扩展应用于新能源和电力电子高渗透的 100% REPS 的在线快速计算,仍值得商榷和深入研究。

频率稳定约束优化调度是一种面向低惯性电力系统的调度方式,近年来受到国内外学者的高度重视。相较传统优化调度,其在模型中对预想功率扰动事件下的暂态频率指标进行了严格限制,通过对系统转动惯量、旋转备用容量及其分布进行合理优化,可将事故后暂态频率指标控制在可接受范围

内。针对含高比例风电的低惯性电力系统,目前已有部分该类模型的研究开展。文献[58-61]推导维持暂态频率在可容忍范围内的充要性条件,建立计及频率变化率、极值频率偏差、准稳态频率偏差等多维频率指标约束的最优潮流和机组组合模型。考虑到传统同步机组响应速率较慢,文献[62]提出一种计及储能快速校正控制策略的频率动态约束机组组合模型,可改善低惯性电网在事故后短期过程中的频率动态响应能力。文献[63-65]进一步探索频率稳定约束优化调度在含大容量传统直流和柔性多端直流的新能源高渗透异步电网中的应用。应当指出,上述研究建立的计及惯性/频率稳定的运行调度模型维度通常较高,且可能耦合大量 0/1 变量和非线性项,目前仍缺乏有效和快速的求解方法。而简化的频率解析表达式难以精确表征大功率扰动下的频率响应性能,如何提高建模精度仍值得进一步研究。此外,现有研究得到的调度方案难以满足 100% 可再生能源形态下电力系统的各种调节能力和稳定裕度需求,未来还需开展大量相关研究工作。

6) 100% REPS 的电能质量优化。

100% REPS 形态下电源侧出力高度不确定性会引起节点电压和频率波动频繁、谐波含量增加等电能质量问题,给供电品质带来一定挑战^[66]。目前已有众多用于提升电能质量的装备(如静止无功补偿器、调相机、可控并联电抗器等)和方法,对于优化 100% 可再生能源形态下的电能质量具有重要参考价值。此外,有学者提出对可再生能源机组施加虚拟同步机控制策略,通过设置虚拟转矩和虚拟励磁对机组的有功和无功出力实现双向调节,达到同时抑制电压和频率波动的效果^[67];除传统的利用机组和加装设备的电能质量控制外,也有学者提出将电动汽车和负荷侧需求响应纳入调频、调压环节中,使二者都能够响应系统的频率和电压变化^[68-69]。针对谐波含量过多问题,IEEE 会士 F. Blaabjerg 等人提出在并网变流器的控制环节中,附加虚拟阻抗控制策略,以减少系统电流中的谐波含量^[70]。

通过进一步研究电能质量优化方法,对潜在的电能质量问题加以改善,是 100% 可再生能源电力系统构建路径中的最后一环,这对保障负荷供电品质是非常有必要的。

4 未来 100% 可再生能源电力系统的展望

总体而言,100% REPS 的构建不可一蹴而就。

对于水电为主、风光为辅的 100% REPS, 由于同步发电机组占主导, 规划和运行不确定性程度相对较小, 在资源和政策条件允许下, 其技术层面的构建难度相对不太大(国外已有多个实例系统)。然而, 对于新能源和电力电子高渗透的 100% REPS, 其构建难度往往要大得多。为使 100% 可再生能源发电形态的构建更具实践可行性, 未来还需在系统规划、运行和控制研究中探索多方面的前瞻性科学与技术问题, 这里简要举例如下:

1) 虚拟惯量控制策略引起的机组载荷波动加剧、寿命减少问题: 目前已有大量关于虚拟惯量控制的研究及应用, 但虚拟惯量控制可能引起设备疲劳载荷增大, 造成有效使用寿命缩短、噪声增大等问题。如何在控制机组参与虚拟惯量和频率支撑的同时, 保证机械损耗在可接受范围内, 还需进一步开展研究工作。

2) 系统电力电子化程度过高导致现有过流保护装置失效: 当系统由原来的同步电源主导转变为电力电子换流器主导后, 由于基于换流器的电源不具有与同步发电机相同的故障特征, 它们通常只能提供略高于额定值的故障电流且维持时间极短, 极易引起系统中的继电保护装置由于故障电流消失而失去故障感知能力的问题。

3) 系统在极端天气和气候环境下运行的能力: 100% REPS 相较传统火电主导电力系统或者高比例可再生能源电力系统来说, 其对极端天气或气候的敏感度更高。当暴雨、台风、干旱等天气或气候出现时, 将直接影响风、光、水电机组的发电能力, 导致系统持续供电能力大幅下降。为此, 应基于各地多尺度气象条件, 对概率性的极端天气和气候, 提前制定适当的防灾调度和应急储备, 提升系统抵御各类自然灾害的能力。

4) 应对新能源出力强不确定性的新型备用准则: 对于新能源高占比的 100% REPS, 必须革新传统以同步发电机备用为主的备用准则, 扩展利用储能、需求响应以及风、光机组辅助调频等方法来提供新型系统所需的备用容量。在构建新型备用准则时如何克服风、光机组出力强不确定性的问题, 仍需进一步研究和分析。

5) 建立系统惯性和备用容量在线评估与配置体系: 目前电力系统运行调度中一般不考虑系统惯性需求, 备用设置也非常粗略(如以系统峰荷的 8%~10% 或者单机最大容量作为系统备用容量需求)。这种经验方法会造成新能源和电力电子高渗透

的 100% REPS 惯性与备用容量匮乏状况的出现。因此, 有必要建立一套系统惯性与备用容量需求在线评估和配置体系, 以更好指导调度运行, 保障系统安全稳定运行。

5 结论

目前全球范围内许多政府和研究机构正在着力开展 100% REPS 形态与构建方面的相关研究, 我国部分水电极为丰富的地区也存在着进一步构建 100% 可再生能源发电形态的可行性。为使电力系统在未来 100% 可再生能源发电形态下仍能够安全可靠运行, 前瞻性地揭示其面临的挑战性问题并探索一套较为完整的研究框架具有重要意义。本文从 100% REPS 的基本概念出发, 介绍了其主要构成以及与其他相似概念的区别, 对目前有关 100% REPS 所提出的构想及实践状况进行了广泛综述和分析, 探讨其主要特征以及实现要素。然后, 基于现有研究成果提出构建 100% REPS 在技术、经济、政策 3 方面将面临的主要挑战, 进而提出一套面向 100% REPS 的研究框架, 该框架覆盖了电源规划、网架规划、无功配置、运行调度、稳定性分析与控制、电能质量优化 6 个环节。最后, 对未来 100% REPS 的应用实践与探索进行了展望。希望本文成果能为未来 100% REPS 的发展和进一步开展相关研究工作提供参考和借鉴。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5103-5110.
Liu Zhenya. Research of global clean energy resource and power grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5103-5110(in Chinese).
- [2] Sørensen B. Energy and resources[J]. Science, 1975, 189(4199): 255-260.
- [3] Hansen K, Breyer C, Lund H. Status and perspectives on 100% renewable energy systems[J]. Energy, 2019, 175: 471-480.
- [4] International Renewable Energy Agency. Renewable capacity statistics 2018[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2018.
- [5] Lund H, Mathiesen B V. Energy system analysis of 100 percent renewable energy systems: the case of Denmark year 2030 and 2050[C]//Proceedings of the 4th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems. Dubrovnik, Croatia, 2007.
- [6] Meneguzzo F, Ciriminna R, Albanese L, et al. Italy 100% renewable: a suitable energy transition roadmap[EB/OL].

- [2019-12-06]. <https://arxiv.org/abs/1609.08380>.
- [7] Zakeri B, Syri S, Rinne S. Higher renewable energy integration into the existing energy system of Finland-Is there any maximum limit?[J]. *Energy*, 2015, 92(3): 244-259.
- [8] Teske S, Dominish E, Ison N, et al. 100% renewable energy for Australia-decarbonising Australia's energy sector within one generation institute for sustainable futures[R]. Sydney: University of Technology Institute for Sustainable Futures, 2016.
- [9] Faulstich M, Foth H, Callies C, et al. Pathways towards a 100% renewable electricity system[R]. Berlin: German Advisory Council on the Environment, 2011.
- [10] Luz T, Moura P. 100% renewable energy planning with complementarity and flexibility based on a multi-objective assessment[J]. *Applied Energy*, 2019, 255: 113819.
- [11] Esteban M, Portugal-Pereira J, Mclellan B C, et al. 100% renewable energy system in Japan: smoothing and ancillary services[J]. *Applied Energy*, 2018, 224: 698-707.
- [12] Kiwan S, Al-Gharibeh E. Jordan toward a 100% renewable electricity system[J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 423-436.
- [13] Zappa W, Junginger M, van den Broek M. Is a 100% renewable European power system feasible by 2050?[J]. *Applied Energy*, 2019, 233-234: 1027-1050.
- [14] McPherson M, Karney B. A scenario based approach to designing electricity grids with high variable renewable energy penetrations in Ontario, Canada: development and application of the SILVER model[J]. *Energy*, 2017, 138: 185-196.
- [15] Jacobson M Z, Delucchi M A, Bazouin G, et al. 100% clean and renewable wind, water, and sunlight (WWS) all-sector energy roadmaps for the 50 United States[J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(7): 2093-2117.
- [16] Ćosić B, Krajačić G, Duić N. A 100% renewable energy system in the year 2050: the case of Macedonia[J]. *Energy*, 2012, 48(1): 80-87.
- [17] Bogdanov D, Breyer C. North-east Asian super grid for 100% renewable energy supply: optimal mix of energy technologies for electricity, gas and heat supply options[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 112: 176-190.
- [18] Jacobson M Z, Delucchi M A, Bazouin G, et al. A 100% wind, water, sunlight (WWS) all-sector energy plan for Washington State[J]. *Renewable Energy*, 2016, 86: 75-88.
- [19] 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]. *电力系统自动化*, 2017, 41(9): 2-11.
Kang Chongqing, Yao Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(9): 2-11(in Chinese).
- [20] 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(in Chinese).
- [21] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 336-348.
Zhong Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 336-348(in Chinese).
- [22] Lund H. Renewable energy strategies for sustainable development[J]. *Energy*, 2007, 32(6): 912-919.
- [23] Boot P A, van Bree B. A zero-carbon European power system in 2050: proposals for a policy package[R]. Petten: Energy Research Centre of the Netherlands, 2010.
- [24] 苏树辉, 贺宇, 韩文科, 等. 国际清洁能源产业发展报告(2018)[M]. 北京: 世界知识出版社, 2018.
- [25] 国家发展改革委. 可再生能源发展“十三五”规划(发改能源[2016] 2619号)[Z]. 2016.
- [26] Davis S J, Lewis N S, Shaner M, et al. Net-zero emissions energy systems[J]. *Science*, 2018, 360(6396): eaas9793.
- [27] Statistics Canada. Electric power, annual generation by class of producer[EB/OL]. Ottawa: Statistics Canada (2019-12-05)[2019-12-06]. <https://doi.org/10.25318/2510002001-eng>.
- [28] 彭程, 钱钢粮. 21世纪中国水电发展前景展望[J]. *水力发电*, 2006, 32(2): 6-10, 16.
Peng Cheng, Qian Gangliang. Prospects for the 21-century hydropower development in China[J]. *Water Power*, 2006, 32(2): 6-10, 16(in Chinese).
- [29] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(13): 1-6.
Zeng Hui, Sun Feng, Li Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in south Australia and its enlightenment to China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(13): 1-6(in Chinese).
- [30] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(21): 6183-6191.
Sun Huadong, Xu Tao, Guo Qiang, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2019, 39(21): 6183-6191(in Chinese).
- [31] 邢法财, 徐政, 王世佳. 非同步机电源接入电网后的谐振问题分析及抑制[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(15): 71-79.
Xing Facai, Xu Zheng, Wang Shijia. Analysis and

- suppression of resonance problem in power system with unconventional generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(15): 71-79(in Chinese).
- [32] 袁小明, 程时节, 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(in Chinese).
- [33] 胡家兵, 袁小明, 程时节. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(18): 5457-5467.
Hu Jiabing, Yuan Xiaoming, Cheng Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(18): 5457-5467(in Chinese).
- [34] 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.
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(in Chinese).
- [35] Jacobson M Z, Delucchi M A, Bauer Z A F, et al. 100% clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world[J]. *Joule*, 2017, 1(1): 108-121.
- [36] Heuberger C F, Dowell N M. Real-world challenges with a rapid transition to 100% renewable power systems[J]. *Joule*, 2018, 2(3): 367-370.
- [37] Löffler K, Hainsch K, Burandt T, et al. Designing a global energy system based on 100% renewables for 2050: GENeSYS-MOD: an application of the open-source energy modelling system (OSeMOSYS)[R]. DIW Berlin: German Institute for Economic Research, 2017: 1-44.
- [38] 梁子鹏, 陈皓勇, 郑晓东, 等. 考虑风电极限场景的输电网鲁棒扩展规划[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(16): 58-67.
Liang Zipeng, Chen Haoyong, Zheng Xiaodong, et al. Robust expansion planning of transmission network considering extreme scenario of wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(16): 58-67(in Chinese).
- [39] Domínguez R, Conejo A J, Carrión M. Toward fully renewable electric energy systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(1): 316-326.
- [40] Wen Yunfeng, Chung C Y, Liu Xuan, et al. Microgrid dispatch with frequency-aware islanding constraints[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(3): 2465-2468.
- [41] Conti S, Rizzo S A, El-Saadany E F, et al. Reliability assessment of distribution systems considering telecontrolled switches and microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(2): 598-607.
- [42] 许进, 秦文萍, 宋述勇, 等. 系统薄弱点电压分布特性分析及识别方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(1): 158-167.
Xu Jin, Qin Wenping, Song Shuyong, et al. Analysis and identification method of Power System weak bus based on bus voltage distribution characteristic[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 158-167(in Chinese).
- [43] 张从越, 窦晓波, 盛万兴, 等. 分布式光伏集群鲁棒虚拟同步化控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(2): 510-521.
Zhang Congyue, Dou Xiaobo, Sheng Wanxing, et al. A robust virtual synchronization control strategy for distributed photovoltaic clusters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(2): 510-521(in Chinese).
- [44] Kroposki B, Johnson B, Zhang Yingchen, et al. Achieving a 100% renewable grid: operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2017, 15(2): 61-73.
- [45] Vandoorn T L, De Kooning J, Meersman B, et al. Voltage-based droop control of renewables to avoid on-off oscillations caused by overvoltages[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(2): 845-854.
- [46] Zarei S F, Mokhtari H, Ghasemi M A, et al. Reinforcing fault ride through capability of grid forming voltage source converters using an enhanced voltage control scheme[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(5): 1827-1842.
- [47] Bosetti H, Khan S. Transient stability in oscillating multi-machine systems using Lyapunov vectors[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(2): 2078-2086.
- [48] Pico H N V, Johnson B B. Transient stability assessment of multi-machine multi-converter power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(5): 3504-3514.
- [49] Ayar M, Obuz S, Trevizan R D, et al. A distributed control approach for enhancing smart grid transient stability and resilience[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(6): 3035-3044.
- [50] Mithulananthan N, Shah R, Lee K Y. Small-disturbance angle stability control with high penetration of renewable generations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(3): 1463-1472.
- [51] Nguyen H T, Yang Guangya, Nielsen A H, et al. Combination of synchronous condenser and synthetic inertia for frequency stability enhancement in low-inertia systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(3): 997-1005.

- [52] Li Haifeng, Liu Chongru, Li Gengyin, et al. An enhanced DC voltage droop-control for the VSC-HVDC grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1520-1527.
- [53] Li Xiaoming, Zhang Xiuyu, Lin Zhongwei, et al. An improved flux magnitude and angle control with LVRT capability for DFIGs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3845-3853.
- [54] 肖灿, 王德林, 李振鹏, 等. 抑制电力系统超低频振荡的水轮机调速器参数优化控制研究[J/OL]. 电网技术 [2019-12-04]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1503>.
Xiao Can, Wang Delin, Li Zhenpeng, et al. Research on parameter optimization control of turbine governor for suppressing ultra-low frequency oscillation in power systems[J/OL]. Power System Technology [2019-12-04]. [https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1503\(in Chinese\)](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1503(in Chinese)).
- [55] 刘少博, 王德林, 马宁宁, 等. 水电机组引起的超低频振荡特性及抑制措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5354-5362.
Liu Shaobo, Wang Delin, Ma Ningning, et al. Study on characteristics and suppressing countermeasures of ultra-low frequency oscillation caused by Hydropower units[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5354-5362(in Chinese).
- [56] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
Xie Xiaorong, Liu Huakun, He Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372(in Chinese).
- [57] Faried S O, Unal I, Rai D, et al. Utilizing DFIG-based wind farms for damping subsynchronous resonance in nearby turbine-generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 452-459.
- [58] Badesa L, Teng Fei, Strbac G. Simultaneous scheduling of multiple frequency services in stochastic unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3858-3868.
- [59] Zhang Guangyuan, Ela E, Wang Qin. Market scheduling and pricing for primary and secondary frequency reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2914-2924.
- [60] Trovato V, Bialecki A, Dallagi A. Unit commitment with inertia-dependent and multispeed allocation of frequency response services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1537-1548.
- [61] Paturet M, Markovic U, Delikaraoglu S, et al. Stochastic unit commitment in low-inertia grids[J]. arXiv: 1904.03030, 2019.
- [62] Wen Yunfeng, Li Wenyuan, Huang Gang, et al. Frequency dynamics constrained unit commitment with battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5115-5125.
- [63] Wen Yunfeng, Chung C Y, Ye Xi. Enhancing frequency stability of asynchronous grids interconnected with HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1800-1810.
- [64] Wen Yunfeng, Zhan Junpeng, Chung C Y, et al. Frequency stability enhancement of Integrated AC/VSC-MTDC systems with massive infeed of offshore wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5135-5146.
- [65] Wen Yunfeng, Chung C Y, Shuai Zhikang, et al. Towards flexible risk-limiting operation of multi-terminal HVDC grids with vast wind generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, doi: 10.1109/TSTE.2019.2940488.
- [66] Liang Xiaodong. Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(2): 855-866.
- [67] Chen Yong, Hesse R, Turschner D, et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Malaga: IEEE, 2011: 1-6.
- [68] Sharma S K, Chandra A, Saad M, et al. Voltage flicker mitigation employing smart loads with high penetration of renewable energy in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 414-424.
- [69] Gamit M, Shukla A, Kumar R, et al. Supplementary frequency control in power systems via decentralised V2G/G2V support[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(18): 5287-5291.
- [70] Wang Xiongfei, Li Yunwei, Blaabjerg F, et al. Virtual-impedance-based control for voltage-source and current-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7019-7037.



文云峰

收稿日期: 2019-12-24。

作者简介:

文云峰(1986), 男, 博士(后), 副教授, 博士生导师, 主要从事低惯性电力系统规划、运行与控制的研究, yunfeng.8681@163.com;

杨伟峰(1996), 男, 硕士研究生, 主要从事低惯性电力系统稳定分析与控制、风电机组虚拟惯量控制与优化的研究;

汪荣华(1964), 男, 高级工程师, 主要从事新能源并网、电网规划与设计的研究。

(责任编辑 邱丽萍)