

如何构建100%可再生能源电力系统？—述评与展望

原创 编辑部 中国电机工程学报 1周前



点击标题下「中国电机工程学报」即可关注本刊微信

喜讯！CSEE JPES被Scopus数据库收录啦！

提示

新增功能：点击文字底部左下角“[阅读原文](#)”可在手机端查看论文全文，登录官网www.pcsee.org可免费
下载论文。

构建100%可再生能源电力系统述评与展望

文云峰，杨伟峰，汪荣华，胥威汀，叶希，李婷

DOI：10.13334/j.0258-8013.pcsee.192031

1 项目背景

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。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。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。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。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。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；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。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。

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。

2 100% REPS的基本概念

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。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(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。而对于纯清洁能源电力系统，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。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。

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。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。

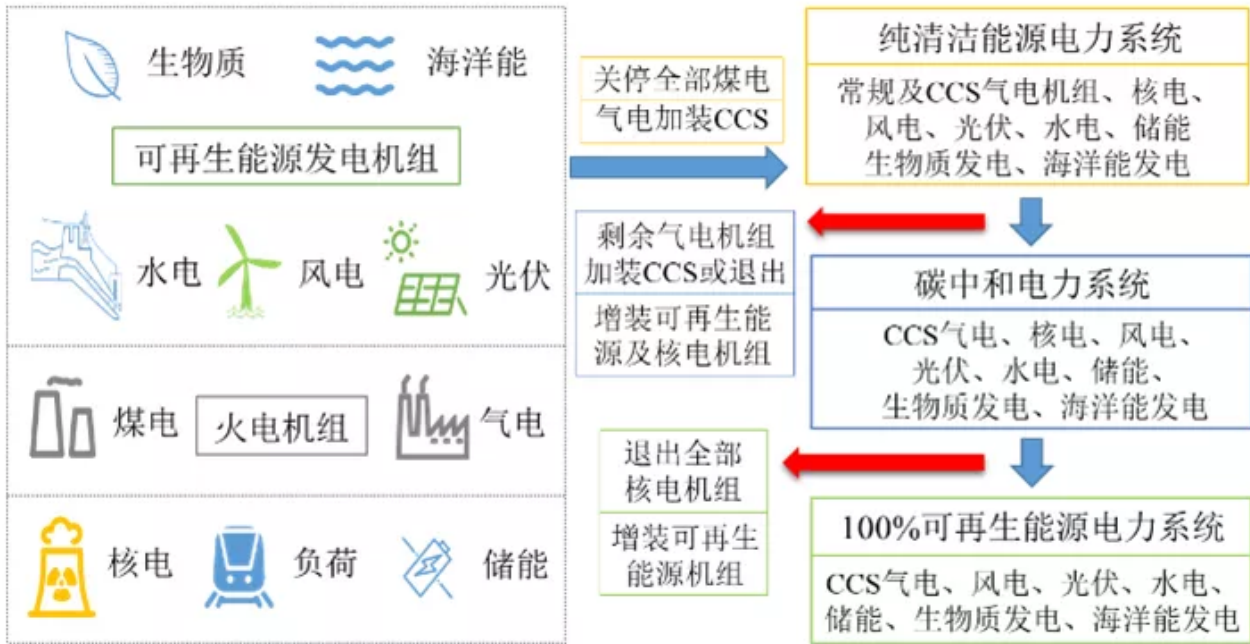


图1 100%可再生、碳中和、纯清洁能源电力系统构成

3 100% REPS的国内外构想和实践

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。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%；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%；澳大利亚同样也提出风、光为主的100% REPS构想；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；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。

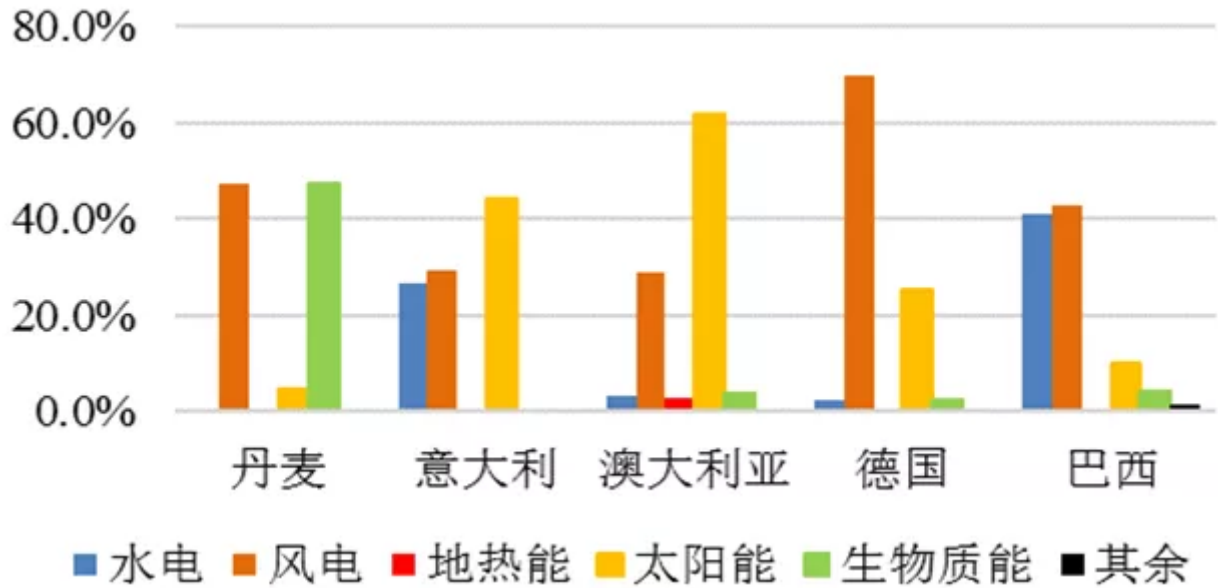


图2 各国100%可再生能源系统的具体构想

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（巴拉圭、冰岛、阿尔巴尼亚、刚果），可再生能源装机占比超过95%的国家有10个。其中，巴拉圭早在2000年就已经实现电力系统100%可再生化，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。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的主要有挪威、乌拉圭以及加拿大的British Columbia、Manitoba和Quebec三个省份。总体而言，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%；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。

虽然一些国家和地区的电力部门还未实现100%可再生能源电力系统，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。

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，其理论蕴藏量和技术可开发装机容量两项指数均列世界第一。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。

4 100% REPS的挑战和研究框架

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。

在规划具体100% REPS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100% REPS构建方案。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% REPS时可能面临的挑战。在技术角度，需应对火电退出和新能源高渗透下的系统调节能力、稳定裕度、电能质量、供电可靠性和安全性恶化等问题；在政策角度，应制定多方面适宜的政策以推动火电退出、支持分布式电源并网、激励可再生能源消纳、促进核心技术装备国产化、构建新型电力市场、推动各能源行业的深度互联；在经济角度，需着重考虑构建100% REPS过程中的电源投资成本、系统运营成本、电价波动加剧风险和改造成本。相关具体分析请见原文。



图3 构建100%可再生能源电力系统面临的主要挑战

本文基于近年来国内外机构在该领域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出力强不确定性、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。

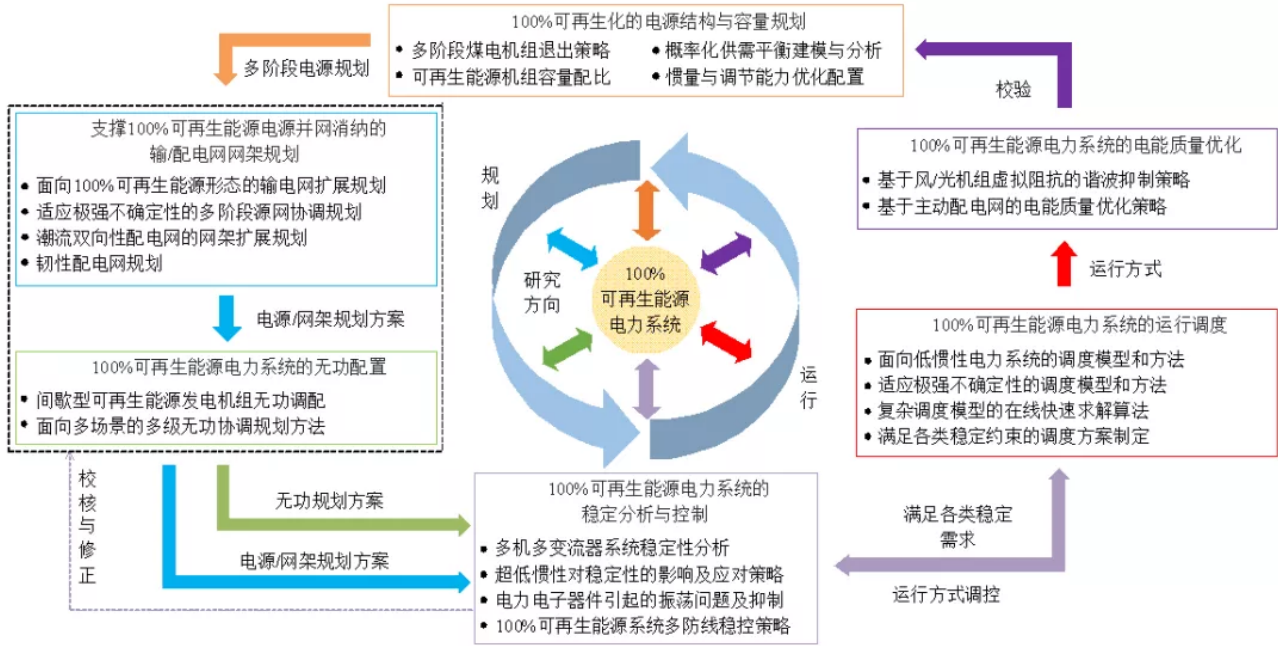


图4 100%可再生能源电力系统的研究框架

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年用电负荷预测及基于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。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/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。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% REPS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，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。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。

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态下的无功波动需求，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；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电压稳定性。另一方面，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。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，尚需研究更为有效和快速的评估方法以突破多重不确定因素“组合数爆炸”问题。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。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，需深入研究针对100% REPS在各类稳定形态下的控制策略。如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，有学者提出通过同步继电器维持短路电流方法来解决；针对低惯性系统频率稳定问题，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；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，则可采用调节水机组调速器PID参数和增加阻尼调速器两种方法加以解决。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，但其建模精度和求解效率还需重点突破。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。目前已有众多用于提升电能质量的装备和方法，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；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。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。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。

5 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。

6 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。

文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 胥威汀, 叶希, 李婷. 构建100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.

WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Toward 100% Renewable Energy Power Systems: Review and Prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856(in Chinese) .

▼ 往期精彩回顾 ▼

基于LSTM-RNN的脉冲大倍率工况下锂离子电池仿真建模方法

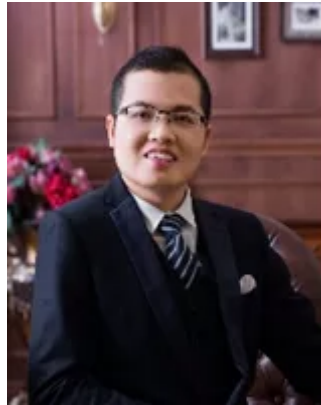
【CSEE JPES】热文榜单|CSEE JPES 2018~2019年最新热点文章排行出炉！

【新鲜出炉】《中国电机工程学报》2020年第12期目录

如何精准刻画和有效抑制SiC MOSFET的串扰电压？

如何充分利用光热电站灵活的调节特性在电力市场中获利？

作者简介



文云峰(1986), 湖南大学副教授, 博士生导师, 长期从事低惯量电力系统规划、运行与控制领域的研究工作。2010年获四川大学学士学位, 2015年获浙江大学博士学位。获湖南省自然科学基金优秀青年基金、入选中国电机工程学会“青年人才托举工程”。近年来, 作为负责人主持10余项纵向及横向项目, 已发表SCI/EI论文50余篇, 其中18篇发表在电力系统领域IEEE汇刊。



杨伟峰(1996), 湖南大学硕士研究生, 研究方向为低惯量电力系统稳定性分析与控制、风电机组虚拟惯量控制与优化策略。

责任编辑：邱丽萍

声明

本文为原创作品，所涉文字及图片版权均属中国电机工程学报编辑部所有，根据国家版权局最新规定，纸媒、网站、微博、微信公众号转载、摘编我编辑部的作品，务必请提前联系我编辑部。个人请按本微信原文转发、分享

联系我们

电话: 010-82812972

邮箱: pcsee@epri.sgcc.com.cn

pcsee_1964@163.com

网址: www.pcsee.org

主办：中国电机工程学会

官方微信号: PCSEE1964



欢迎关注英文刊CSEEJPES微信：



欢迎关注中国电机工程学会微信：



↓↓↓ 点击“阅读原文”可查看全文原文

阅读原文