

高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战

卓振宇, 张 宁, 谢小荣, 李浩志, 康重庆

(电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084)

摘要: 高比例可再生能源并网将改变电力系统的形态, 为电力系统稳定控制、调度运行和规划决策等领域带来重大变革。文中基于不同可再生能源渗透率水平下系统的发展特点, 将未来电力系统迈向高比例可再生能源的过程分为三大阶段并总结了各个阶段的特征。结合这一领域的研究成果, 全面解析了高比例可再生能源电力系统发展过程中将出现的挑战, 分析了电力系统消纳高比例可再生能源的一系列技术解决方案, 对各项技术的基本原理、经济成本与发展前景进行了分析和比较。研究表明, 高比例可再生能源并网将面临一系列技术挑战, 而每项关键技术仅能解决其中一部分问题。这些技术在未来高比例可再生能源电力系统中的应用不仅取决于其技术有效性, 还取决于其经济性以及与其他技术的互补性。中国未来实现高比例可再生能源电力系统的形态与发展路径取决于各项关键技术的相对发展步伐及其耦合影响。

关键词: 高比例可再生能源; 可再生能源渗透率; 发展路径; 技术经济性

0 引言

为应对全球气候变化、环境污染和能源战略等问题, 世界各国正积极推动能源系统的低碳化、清洁化和可持续化转型。落实到能源结构上, 具体体现为电能替代与清洁替代。然而, 当前终端能源消费中的电能比例仅为20%, 电能替代有巨大的发展空间。全球能源系统正面临一场规模巨大的技术革命。以风电和光伏为代表的非水可再生能源是这场能源革命中最具活力的组成部分。国际能源署预计2020年全球风电与光伏装机容量较2019年将分别增加超过65 GW(增速10.4%)和107 GW(增速18.3%)^[1]。风电和光伏等新型可再生能源具有发电过程中零碳排放和零边际成本等优点, 未来必将成为能源转型中电能替代与清洁替代的主体。

中国提出将力争在2030年前实现碳达峰, 努力争取2060年前实现碳中和, 并于2020年气候雄心峰会上提出2030年实现风电和光伏总容量超过1 200 GW的发展目标。截至2020年底, 中国风电和光伏装机均已突破250 GW^[2]。但要实现上述目标, 可再生能源仍需要在未来30年内实现跨越式发展。探究电力系统迈向高比例可再生能源的发展路

径与解决方案具有重要战略意义。

以风电和光伏为代表的非水可再生能源机组的发电原理、控制方式、并网设备和外部特性均与常规机组有较大差别。装机比例的量变将引发系统特性的质变。高比例可再生能源电力系统在稳定机理^[3]、调度运行^[4]和规划发展^[5]等众多方面均将发生深刻变化。为应对未来高比例可再生能源电力系统面临的诸多新挑战, 核心是解决可再生能源间歇性带来的时空不确定性与并网方式带来的高比例电力电子化两大关键科学问题^[6]。

本文着眼于高比例可再生能源电力系统中的技术问题, 对高比例可再生能源并网不同发展阶段的技术挑战和解决方案进行探讨。首先, 根据不同的可再生能源渗透比例, 将未来可再生能源发展分为3个阶段, 分别阐述了不同发展阶段下系统的技术挑战。其次, 围绕稳定、运行和规划3个领域对不同可再生能源发展阶段可能遇到的挑战进行了分析。针对这些挑战, 重点分析了相应的解决方案, 包括其实现技术机理、发展阶段和实施成本等。最后, 展望了目前学术研究需要关注的潜在技术发展点并对中国未来高比例可再生能源的发展蓝图进行总结。

1 高比例可再生能源发展阶段

经过二三十年的发展, 世界范围内可再生能源发电从无到有, 装机比例已实现了长足提升。由于资源禀赋和发展起步时间的不同, 世界各国电力系

收稿日期: 2020-09-22; 修回日期: 2021-01-23。

上网日期: 2021-03-24。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900100); 国家自然科学基金资助项目(51925701)。

统正处在不同的可再生能源发展阶段(参考附录A第A1章)。但目前世界范围内总体的非水可再生能源电量渗透率仍较低(约8%),绝大多数区域电力系统的非水可再生能源电量渗透率低于10%,仍处在低比例渗透阶段^[7]。不同可再生能源渗透率的电力系统在暂态、运行和规划多个时间尺度均面临不同的挑战。国内外学者针对不同挑战提出了相应的解决方案。图1系统性梳理了可再生能源不同发展阶段可能面临的挑战与解决方案。根据可再生能源渗透比例,将未来可再生能源发展分为中比例(10%~30%)、高比例(30%~50%)和极高比例(50%~100%)3个阶段。图1中, α 表示可再生能源渗透率。

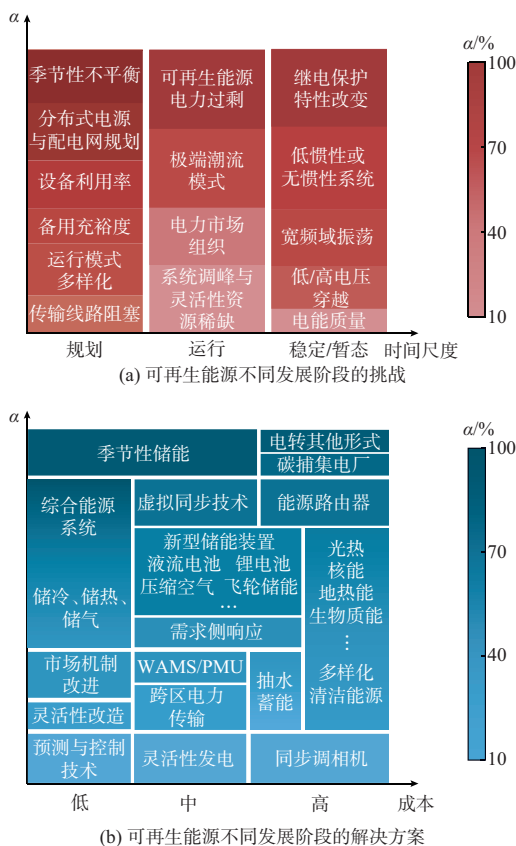


图1 可再生能源不同发展阶段的挑战与解决方案

Fig. 1 Challenges and solutions in different development stages of renewable energy

由于高比例可再生能源电力系统中存在的挑战主要来自风电和光伏等间歇性可再生能源。本文中若无特殊区分,均以可再生能源代指风电和光伏为代表的非水可再生能源。渗透率均指年平均电量渗透率,即全年可再生能源机组可输出总电量与全年负荷需求电量的比值。

1) 中比例渗透阶段。

中比例渗透阶段对应约10%~30%的可再生

能源渗透比例。风电和光伏以局部集中并网为主,送出端可再生能源比例较高,因此,对电网的挑战主要来源于送出网络和并网等局部环节。由于大部分风电和光伏资源富集地区远离负荷中心,需要通过远距离输电从地区电网末端接入,送出网络往往较为薄弱。可再生能源出力的随机波动将导致并网线路与并网节点周围的电能质量与潮流阻塞问题^[8]。另外,可再生能源机组通过电力电子换流设备与主网连接。这使得其对输出电气量的控制更强,反应更加灵敏,同时故障的耐受能力也更差。

系统运行方面,为保证系统供需实时平衡,并网地区的调峰调频灵活性资源需求急剧增加。此时,由于可再生能源是在局部集中接入,灵活性资源不足带来的问题主要体现为局部地区的弃风和弃光。

2) 高比例渗透阶段。

高比例渗透阶段对应约30%~50%的可再生能源渗透比例。随着可再生能源机组装机容量增加,其并网方式从局部并网转为多地区的集中式与分布式并网。德国目前已有90%以上的光伏装机为分布式^[9]。中国光伏和风电装机增量也呈现相近的趋势^[10],随着装机的广泛普及,可再生能源出力的间歇性开始对电网整体运行产生影响。

稳定性方面,由于电力电子接口控制量包含多个时间尺度,使得电力电子装置能够在较宽的频带内响应电网扰动^[3]。机组与机组之间、机组与网络之间的稳定问题进一步复杂化,超同步振荡等宽频域内的独特现象将开始在更大范围内出现。

分布式与集中式并举使得电源侧与负荷侧的不确定性均大幅度增加,日内运行场景呈现多样化。全系统常规机组将不得不随可再生能源波动调整出力大小。一方面,这对大型煤电、热电联产等火电机组的调频调峰能力提出了进一步要求;另一方面,电力资源需要通过电网在全系统内协调配置,系统潮流模式更加多样,转换更加频繁。

此外,受到廉价可再生能源电量的挤占和频繁调节的影响,常规机组的利用小时数将显著下降。常规机组与风光机组的竞争性矛盾开始凸显,需要构建合理的电力市场运营环境,保证系统消纳可再生能源带来外部成本的正确分配。

3) 极高比例渗透阶段

极高比例渗透阶段对应约50%~100%的可再生能源渗透比例。以风电和光伏为主体,多种电源形式甚至多种能源形式协调发展将会是极高比例可再生能源电网的重要特征。

此时,若仅通过提升间歇性的风电和光伏的渗透率实现100%可再生能源渗透,其间歇性与电力

电子接口对于电力系统的挑战将进一步被放大。系统充裕性、经济性和稳定性都会受到严重影响。

系统稳定方面,在极高比例可再生能源的背景下,由于大型火电比例降低,同步电网的惯性将大幅度下降。1996年至2016年,欧洲等效惯性时间常数下降了20%^[11]。系统整体惯性与频率稳定和暂态稳定息息相关。当可再生能源瞬时渗透率超过50%时,由于惯性的降低而出现频率稳定或暂态稳定问题的概率将会大幅度增加^[12]。

此外,风电和光伏的容量系数极低,若要满足大部分的电量供应,其电力装机容量将远超负荷峰值。这意味着在日内运行时,若风电和光伏等间歇性可再生能源出力较大,系统中将出现大量的电力过剩;若出力较低,系统中则将出现大量电力缺额,需要保持大量的备用容量。电力网络在此波动下,传输负担也会增加,但利用率反而降低。分布式能源也将使得配电网潮流呈现双向特征。从长期看,风电和光伏机组生产的电量还将出现严重的季节性不平衡问题。

针对极高比例可再生能源并网带来的问题,系统需要储能、光热、生物质能和热电联产等灵活性发电资源作为维持供电稳定的方案。同时,需要紧密连接的坚强电网作为跨区域资源调配平台。目前,世界上没有一个独立区域电力系统的可再生能源渗透率超过50%。但已有大量学者研究未来100%可再生能源电网的发展路径与最终形态^[13]。多样化电源与多能源协调将是其重要特征。

2 高比例可再生能源电力系统挑战

2.1 稳定与保护

风电和光伏均需要直接或间接通过电力电子装置并网。其电压频率支撑特性与水电、火电等常规机组有较大差别。因此,随着高比例可再生能源接入电网的规模不断增大,系统动态特性将发生深刻变化,对系统稳定运行构成新的挑战。同时,对系统保护装置提出了新的要求。

故障连锁脱网与电能质量问题在系统中比例甚至低比例渗透阶段有可能出现。对于机组本身,电力电子装备过流耐受能力比同步发电机差。当机端发生故障时,由于无法像常规机组一样维持并网点电压^[14],风电和光伏电源在电网产生故障时往往更加倾向于尽快脱离电网^[15]。由于换流器抗干扰能力弱,在可再生能源发展早期全球便已发生了大量大规模脱网事故。

此外,在可再生能源机组的局部并网点,电力电子装置功率开关元件的高频开断动作将产生高频谐

波并注入电网,使并网点产生电压畸变与闪变,影响并网点的电能质量。在并网点电压较低、结构薄弱且可再生能源渗透率较高的电网,电压波动^[16]与闪变严重程度^[17]将会加剧,但通常超出并网标准情况较少^[18]。

在中低比例阶段的集中并网区域,可再生能源机组电力电子装置与系统中的其他元件相互影响可能产生稳定问题。随着可再生能源渗透率的逐步提升,传统电力系统中以机电动态为主导的各种参数的稳定性,包括功角、电压和频率稳定性均会发生改变。在高比例渗透阶段,由于电力电子的宽频响应特性,系统稳定性不再局限于传统的工频和机电时间尺度,电磁动态特性加剧,导致出现振荡频率范围扩展到数千赫兹的宽频电磁振荡现象。且在高比例渗透阶段,这一现象将不仅局限局部并网地区,宽频电磁振荡将可能扩展至全系统。文献[19]研究了中国新疆的风电次同步振荡事故的发生机理,利用模型仿真方法,指出大量永磁直驱风机接入薄弱电网造成的负阻尼效应是高比例可再生能源送端电网产生次同步振荡的关键因素。

在极高比例渗透阶段,全系统电网的频率稳定特征将发生从量变到质变的转变。这种转变来源于机组惯性低和调频能力弱的特征。随着常规电源比例的下降,全系统的同步惯性水平将不断降低。惯性决定了系统受到干扰后电气量的变化速率。惯性下降将直接影响系统故障时的频率变化率和最低频率^[20],进而影响系统稳定能力。同时,继电保护装置的传统整定方式可能不再适用于高比例可再生能源电力系统的故障特点。这主要体现在系统短路电流减小和不对称故障响应特性改变2个方面。

综上所述,在可再生能源渗透率不断增高的过程中,系统的稳定问题由局部的电源脱网和电能质量问题逐步向全网的惯性与稳定问题扩展,最终将深刻改变全系统的稳定特性与机理。高比例可再生能源渗透对系统稳定与保护的挑战如图2所示。

2.2 经济安全运行

在运行时间尺度上,可再生能源带来的一系列挑战源自其固有波动性与随机性。可再生能源电源出力上限通常不可调度,且其变化规律往往与负荷曲线变化不匹配,甚至呈现反调峰特性。风电场高出力时段可能在负荷较低的深夜,而日中负荷高峰时出力较低^[21-22]。光伏出力在傍晚开始下降,相对晚高峰亦呈现反调峰特性。净负荷的波动需要灵活性资源,比如可调常规电源、储能电站和区外来电等调整出力以保证平衡。随着波动程度的增加,对调峰与爬坡速率等资源总量的需求进一步增大。这一

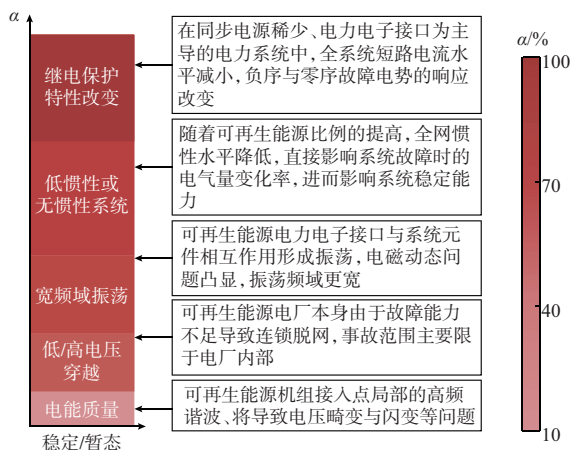


图2 高比例可再生能源渗透对系统稳定与保护的挑战
Fig. 2 Challenges on system stability and protection of penetration of high proportion of renewable energy

问题在中比例渗透阶段有可能出现。美国加利福尼亚州(简称“加州”)电网2013年至2018年,可再生能源渗透率由7.5%提升至23.8%,净负荷曲线波动性指标相应增加至2.4倍,“鸭形曲线”问题突出,为日前预测与调度带来了巨大困难^[23]。预计至2020年,中欧的火电机组启停和爬坡次数最多可分别增加23%和181%^[24]。文献[25]研究了可再生能源可提供备用量的评估方法,通过在运行过程中合理进行弃风处理,为系统运行提供灵活性,实现更加经济的系统调度。

反映在电力市场上,可再生能源并网将对电力市场的平稳运行产生结构性影响。由于可再生能源发电边际成本几乎为零,加之其反调峰特性,这将导致市场中电力供需关系不稳定,直接反映为频发的极端电价,这在目前的中比例渗透地区电力市场已经有所反映。进一步地,在高比例渗透阶段,随着可再生能源装机容量的不断升高,能量市场出清价格不断走低,将挤压火电电源等传统行业的利润空间,多方利益主体矛盾突出。如何设计合理的市场机制,调动辅助服务资源,合理分摊成本是市场组织面临的另一大挑战。

在高比例渗透阶段,可再生能源接入对输配电网也将产生巨大压力。按照中国目前输电线路规划方案,至2035年,跨区输电容量将达到300 GW,超过11%的电能需求将通过跨区域传输满足^[26]。跨省、跨区电网互联的功能定位需要由过去较为单一的电能运输通道逐步转变为支撑不同资源禀赋地区能源互济支持的输电平台。分布式可再生能源出力较大时,配电网络由电能下送通道转变为上送通道,可能出现严重的过电压和主变压器容量不足等问题^[27]。

可再生能源机组容量系数远低于常规水、火电源。在极高比例渗透阶段,电力过剩问题将十分突出。2019年,中国风电和光伏设备的平均利用小时数分别为2 082 h和1 169 h^[28]。高比例可再生能源电力系统中,风电和光伏装机容量将远超负荷峰值。按照目前的风光比例与负荷容量系数,假设区域平滑效应为60%,若未来风光需要满足中国80%的电能需求,总电力装机容量将达到负荷峰值的1.75倍。在反调峰的极端场景下,电力过剩更加严重,与外界互联通道容量较小的局部地区尤甚,需要从需求侧角度寻找可调负荷主动消纳多余的可再生能源发电。

综上所述,系统调峰与电力市场的组织问题在中比例渗透阶段的时候便会出现,随着渗透率的增加,问题逐渐凸显。极端潮流模式和电力过剩的问题在高比例与极高比例渗透阶段才会出现。高比例可再生能源渗透对系统经济安全运行的挑战如图3所示。

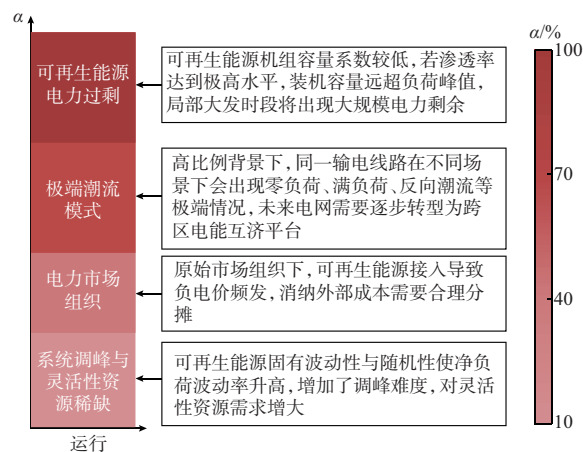


图3 高比例可再生能源渗透对系统经济安全运行的挑战
Fig. 3 Challenges of penetration of high proportion of renewable energy on system economic and secure operation

2.3 电力系统规划

电力系统规划解决的是数年或数十年时间尺度上电力系统发展路径的问题,在保证安全的前提下寻求经济最优的发展路径。从电力系统规划的角度看,需要立足于整个系统在更长的时间尺度上考虑可再生能源发展带来的挑战。

输电资源短缺的问题在中比例渗透阶段将会出现,随着可再生能源渗透率的不断提高,尤其是分布式可再生能源的普及,输电资源短缺的情况将向更低的电压等级和更广阔的网络范围转移,线路阻塞的情况更加普遍。可再生能源广域空间上的出力波动要求在电网规划中提供充足的输电能力。高比例

可再生能源电力系统中电力系统局部的发电负荷自我平衡能力降低,需要更广泛的电网互联,充分利用可再生能源出力平滑效应。

在高比例渗透阶段,系统在源端和荷端均存在较大的不确定性,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。因此,电力系统规划必须保证未来系统的发展能够适应运行场景的多样化,传统电源电网规划仅考虑“冬大、冬小、夏大、夏小”4种代表性运行模式。文献[29]利用精细化运行模拟方法模拟生成青海省的运行数据,并利用大数据分析指出,可再生能源渗透率由20%提升至40%时,系统典型运行方式的数量将提高4倍。不同运行方式之间的切换频率达到每年100次。运行方式的多样化使得规划中必须考虑更多的场景,这对系统规划的建模方法与算法求解效率都提出了新的挑战。源荷随机波动、设备故障和季节性不平衡等造成的长短期不平衡均需要电力系统中预留充足的备用容量。

未来极高比例可再生能源背景下,可再生能源波动出力进一步增大,常规火电机组装机逐步退出,广域互联带来的效益逐步饱和,系统仍需要补充足够的可调度备用资源。在规划过程中评估系统备用需求需要全面考虑系统发展各种要素的相互作用,充分计及各类备用来源,合理分摊可再生能源并网带来的外部成本,从系统层面进行技术经济性测算。

此外,分布式可再生能源在配电网中的渗透逐渐改变了配电网在电力系统中承担的角色。传统配电网规划针对某个负荷预测值以及容载比设计网络结构来应对最大运行工况,具有成熟的规划设计方案。分布式电源并网普及后,配电网由单纯的电能消费者向电能生产者转换,配电网的规划准则将发生改变^[30]。同时,输电网也由电能输送通道转为跨区的能源互济支援平台。在极高比例渗透阶段,两者的协同规划更加重要。文献[31]提出了一项针对输电网与配电网协同规划的分布式算法,能够对分布式电源与变压器非线性特性进行有效建模。未来配电网需要具有包容性、开放性、系统性、广泛性和互动性等特点^[32]。

除了日内短时间尺度的电力随机波动外,可再生能源的月度可供应电量也存在先天的季节波动特性。解决较长时间尺度下电力系统可再生能源出力与负荷需求的电量不匹配矛盾是极高比例可再生能源电力系统面临的重要挑战。季节不平衡引起的弃风和弃光损失将远大于中比例渗透阶段由于短期调峰不足引起的损失。一方面,需要根据各个局部区

域风电、光伏和负荷的季节特性合理配比可再生能源装机容量,充分利用风电和光伏的季节互补特性,减少供电电量的不平衡;另一方面,需要季节性储能实现能量的跨季节调整。

综上所述,电力系统规划需要在保证系统安全运行的基础上,综合考虑可再生能源发展与相关消纳手段的成本与收益。高比例可再生能源渗透对系统规划与发展的挑战如图4所示。

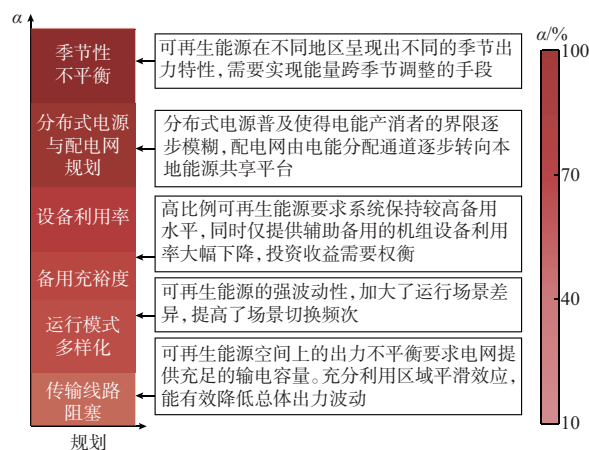


图4 高比例可再生能源渗透对系统规划与发展的挑战
Fig. 4 Challenges of penetration of high proportion of renewable energy on system planning and development

在电力系统走向高比例可再生能源并网的道路上,上述各种挑战随着可再生能源渗透率的提高和发展阶段的推进,开始在稳定、运行和规划各个方面逐渐显现。目前,有些问题已经在电力系统中低比例渗透阶段有所体现,比如并网困难、负电价与极端电价、网络阻塞等。有些挑战虽然还未在全网普遍出现,但已能在局部高比例渗透率地区看出端倪,比如低惯性调频和灵活性资源稀缺等问题。还有些问题未来将有可能在极高比例电力系统中出现,现有研究已经进行了前瞻性研究,比如继电保护特性改变和全网电力、电量不平衡等。具体案例与数据说明可参考附录A第A2章。应对上述挑战需要制定电力系统一整套技术解决方案。

3 高比例可再生能源电力系统关键技术

3.1 稳定性控制与监测

针对高比例可再生能源并网在稳定、运行和规划各方面的新挑战,目前已有众多学者与工程人员提出了各种解决方案。暂态短时间尺度上面临的挑战主要来自可再生能源电力电子设备高比例并网带来的稳定性问题,具体表现在故障耐受能力不足、新型机电稳定问题、宽频域振荡、电能质量恶化和全网继电保护特性改变等5个方面。

3.1.1 高低电压穿越能力改造

可再生能源机组故障穿越模块化改造是除安装无功补偿设备外提高机组故障穿越能力的另一类技术。硬件改造从根本上提升了换流器对系统电压变化的耐受能力。常用的保护电路有2类,一类称为消弧电路,主体为电阻,安装于机组一侧换流器的交流部分,用于吸收过剩能量加速过电流衰减以实现故障时的低电压穿越;另一类称为斩波电路,主体为电阻和开关器件,位于换流器直流部分,通过开关斩波实现能量消耗^[33]。

换流器故障穿越根据机组类型的不同改造成本差异很大。对于每台风机,成本为10万元至50万元。假设每台风机容量为3 MW,改造成本约为单位装机成本的0.5%~2.3%,若在设计之初便考虑故障穿越要求,成本应更低。世界各国对可再生能源机组故障穿越性能的具体指标各有不同,中国要求风电场与光伏电厂在电压跌至额定电压20%时能够分别保持并网0.625 s和1.000 s^[34-35],但对高电压穿越不做要求。德国、加拿大和美国等国家还要求机组实现0.5 s内零电压穿越^[36]。

3.1.2 控制策略创新

电力电子接口的外部特性由其控制策略决定,可以根据系统需求进行灵活设定,为传统电力系统运行注入了新的可控性。可再生能源机组电力电子接口根据原动机内部以及电网侧电气量的变化,按照预设的策略调整可控资源实现目标电气量达到预设数值。电力电子接口引起的众多问题源于对系统特征认识不足而导致的控制策略不当或错误。因此,其作为高比例可再生能源问题的来源,同时也是解决问题的有力手段,控制策略方面的创新已经用于解决暂态时间尺度的各种稳定问题。

低比例渗透率场景下,调整控制策略已经能够解决一些系统局部问题,甚至能够在不进行硬件改造的前提下解决系统稳定问题。针对低电压穿越问题,可以在系统电压骤降时启动机组减载运行模式,即风机采用变桨距控制,光伏板不再进行最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT),直接减少原动机输出能量,防止能量在换流器内部累积造成危害。频率异常造成的故障穿越能力不足,源于对系统频率的错误测量,本质上属于误动作。改进频率测量方法是在控制系统合理中设置动作阈值^[37]。

宽频域振荡问题直接源于换流器多时间尺度控制的特性与系统宽频特征的相互作用。虽然其失稳机理仍不完全明确,但已有众多研究通过幅相动力学理论、复频域阻抗建模方法和全电磁暂态仿真等手

段进行了研究。这些研究均指出控制器参数是影响其并网振荡稳定性的重要因素^[38-40]。在某些频率下,机组控制器展现出弱阻尼甚至负阻尼的特性,机组自身与网络的阻尼不足以导致发散问题。因此,可以通过调整机组与附加设备的控制参数或添加额外的虚拟阻抗控制设备及阻尼控制环节,改变系统元件的频率阻抗特性以避免振荡发生^[41]。中国新疆维吾尔自治区哈密市风电场采用优化的控制器参数后,该风电场监测到的次同步振荡次数整体为下降趋势^[42]。

针对高比例可再生能源渗透下可能出现的问题,国内外学者提出了2个新的控制策略概念:虚拟同步机和组网换流器。虽然两者出发点有所不同,但均关注未来电网常规电源逐步退出时系统稳定运行的问题。

虚拟同步机考虑的是未来低惯性或无惯性情况,换流器控制方式使可再生能源机组受到扰动时展现出与同步机相同的响应特性。其核心技术理念在于通过电源侧储能电量代替同步电机的转子动能,根据系统频率和频率变化率(rate of change of frequency, RCF)等状态量的变化,以下垂控制或惯性控制策略调整有功输出,从而模拟旋转同步机的惯性特征,进而实现调频等辅助服务功能^[43]。除加装储能设备外,还可以通过消耗风机转子动能或降低保留备用功率等方式为虚拟同步机提供有功控制空间^[44]。

组网换流器从电压稳定出发,指出目前换流器需要以系统电压相量为系统锁相环与内电势调整的参考,实现有功功率和无功功率的解耦控制。在未来换流器主导的电网中,组网换流器可以作为电压源承担电压稳定的作用^[20]。组网换流器本质上在模拟同步机组励磁调压的功能,需要储能与无功补偿设备的配合动作。近年来,学术研究中两者概念范围不断扩展,开始引入频率稳定和电压稳定等概念。

控制策略创新本身属于软件算法研发,应用推广成本较低。但控制策略往往需要硬件设备(如储能、无功补偿装置)为其提供控制资源。因此,其应用成本还需要与这些装置的投资成本综合考虑。

3.1.3 柔性交流与直流控制设备

电能质量和故障穿越问题主要集中在单机或单电厂等局部区域,在可再生能源发展早期就已出现。目前,应用现有的无功补偿与滤波技术能够较好地应对。能够改善电压质量指标的主要设备包括静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止无功发生器(static var generator, SVG)和动态电

压调节器(dynamic voltage regulator,DVR);能够改善电流质量指标(谐波为主)的设备主要包括传统的无源滤波器和有源电力滤波器(active power filter, APF)等^[45]。此外,SVC和SVG等无功补偿设备能够在系统故障时起到稳定机端电压的作用,防止换流器过电流,一定程度上提高了机组的故障穿越能力。

这类柔性交流无功控制设备基于大功率电力电子器件,通过电力电子开关器件的柔性控制,调整相应电气量,消除可再生能源电力电子接口的不利影响。由于技术发展成熟,相应设备投资成本逐步降低,目前大容量SVC、SVG和APF投资成本分别约为200元/kvar、400元/kvar和130元/kVA,投切电容的成本仅为20元/kvar^[46]。无功补偿设备容量通常为可再生能源电厂总容量的30%~50%^[47-48]。按比例,柔性交流控制设备仅占可再生能源电厂单位投资成本的4%左右。中国风电场^[34]和光伏电站^[35]并网标准中均已对输出电能的质量指标与故障时无功支持能力提出了基本要求,柔性交流无功控制设备已成为大型风光电站的标配。

随着全控型电力电子器件的快速发展,基于电压源换流器的系统级柔性控制设备也开始投入电网实际生产运行。这类设备除无功支撑外,还能为系统提供对有功潮流的控制能力,具体包括统一潮流控制器(unified power flow controller,UPFC)、统一电能质量控制器(unified power quality conditioner,UPQC)和电压源换流器型高压直流输电(voltage source converter based high voltage direct current,VSC-HVDC)技术等。前两者仍属于柔性交流控制设备,由于造价较高,目前还未大规模推广。中国某UPFC项目造价2.1亿元,约合1173元/kVA。VSC-HVDC是对常规直流输电技术的改进,其应用可以避免常规直流换相失败的问题,实现对有功功率和无功功率的解耦控制是可再生能源并网的理想方式。

系统级柔性控制设备可以为受端系统提供无功支撑,提升电压稳定和改善电能质量。因其控制灵活,还可以通过附加控制来提高系统的频率稳定性。相比常规变电控制设备与常规直流,这类系统级柔性控制设备的价格相对较高,未来随着容量提高和器件成本的下降,其整体成本也将逐渐下降。

3.1.4 同步调相机

同步调相机是一类通过调节励磁实现无功补偿的传统电机设备。在SVC和SVG等静态柔性无功补偿设备普及之前,同步调相机是唯一能够连续调节无功输出的辅助设备。但由于包含转动部件,同

步调相机存在运维成本较高且有功率损耗大等缺点,因此,发展空间逐渐被柔性交流控制设备挤占。

近年来,随着非同步可再生能源机组带来的低惯性、低短路电流危害逐渐为人们所认识,同步调相机开始以“同步机”的身份回到人们的视野。由于结构与发电机基本相同,同步调相机能够同时提供惯性和短路容量。一般同步调相机惯性时间常数约为1.25s,加拿大使用的高惯量调相机时间常数能够达到7.84s^[49]。300Mvar同步调相机能够为所并网母线提供1000~1200A短路电流^[50]。同步调相机恰好能弥补极高比例可再生能源并网引起的低惯性和低短路电流两大挑战。在网络结构薄弱的小型电力系统中,其作用尤为关键。近几年,中国华东电网、英国、意大利撒丁岛和南澳大利亚都安装了同步调相机应对惯性降低问题。

经济性方面,目前同步调相机的投建成本仍较高,根据国外实际案例推算,约为2900元/kvar^[51]。该数值已接近火电机组装机成本。此外,同步调相机另有每年2700~5600元/kvar的运维成本。在未来火电机组逐步退出的趋势下,改造火电机组将成为提升同步调相机装机的重要来源。其改造成本约为140~350元/kvar^[52]。单就改造成本而言较为经济,但还需要综合考虑设备寿命和安全性风险。

3.1.5 广域测量与控制系统

高比例可再生能源并网使得系统的故障特征发生显著变化,远距离的机组谐振与系统短路电流减小等都对继保设备的正确动作提出挑战。继电保护装置的整定与工作原理需要与高比例可再生能源电力系统的特点相互适应。目前的继电保护,比如距离保护和零序保护主要针对单个设备或局部地区,而广域测量管理系统(wide area management system,WAMS)基于相量测量单元(phasor measurement unit,PMU)和先进通信技术,能够进行高频采样,实时动态监测系统全局的运行工况变化^[53]。大数据技术分析系统全局海量数据为预判和区分系统潜在故障提供了新思路。2009年中国就已投入了1000多处PMU节点,建立了十多个WAMS中心站,基本覆盖500kV变电站和主要发电厂^[54]。开发WAMS系统在高比例可再生能源系统保护与控制中的先进应用有良好的基础条件。但由于传统的PMU和WAMS通常只获取基波相量,针对高比例可再生能源接入电力系统的新型稳定性问题,需要对监测系统升级,拓宽相量数据测量和传输的频率范围。

系统惯性与稳定控制技术成本对比如图5所示。改进控制技术和广域测量系统应用的成本最

低,属于控制策略创新的范畴。但其控制性能和系统观测保护能力取决于系统中可控资源的充裕性和信息采集装置的充裕性,例如:电源侧储能的配备容量和PMU的普及程度。高、低电压穿越改造由于直接涉及硬件设备投资因而成本较高,与可再生能源电厂整体投资相比,这两者的硬件投资比例不高。同步调相机的投建成本较高,但同步调相机包含无功支撑、惯性支持和提供短路电流等多重效益,未来可能会在极高比例可再生能源电力系统中产生重要作用。柔性无功交流控制设备成本较低,但以UPFC和VSC-HVDC为代表的系统级柔性潮流控制设备的成本极高,目前仅有少量示范项目。

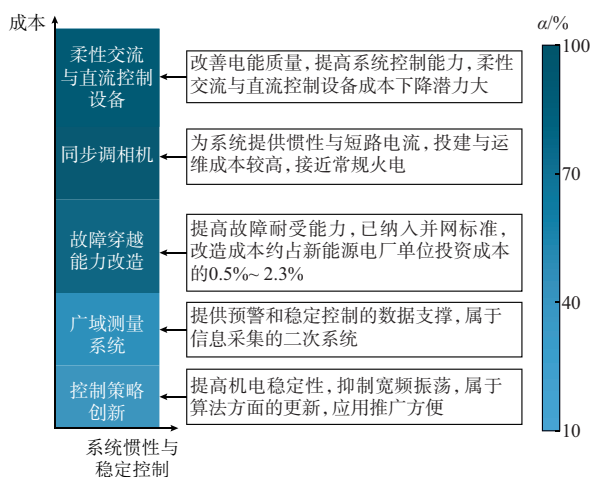


图5 系统惯性与稳定控制技术成本对比

Fig. 5 Cost comparison of system inertia and stability control technologies

3.2 电力、电量的时序平衡

可再生能源出力的波动性与不确定性造成了多个时间尺度上的电力、电量不平衡,为电力系统供需平衡带来了挑战。短期体现为电力不平衡,长期体现为电量的不平衡。应对这一挑战的根本方法是提高系统的灵活性,使系统出力可调节资源可以适应净负荷曲线的变化。提高系统灵活性具体可细分为提高系统灵活性调节能力和减小净负荷曲线间歇性2个方面。前者包括机组硬件的改进和市场组织方式的创新,后者主要涉及负荷侧的技术。

3.2.1 灵活性电源与火电灵活性改造

目前,中国的电源结构仍以煤电为主导,煤电装机占总装机容量的比例约为60%。传统大型煤电的调节性能较差,运行范围较窄,在爬坡速度、启动时间和调峰能力等方面均难以满足可再生能源并网的需求。煤电向下调峰能力不足曾经是中国“三北”(东北、华北、西北)地区弃风的主要原因。推进灵活调节电源建设和火电灵活性提升工程是现阶段电源

侧灵活性提升的两大主要手段^[55]。火电机组灵活性特性参数与投资成本如附录A表A1所示。燃气轮机组的各项调节能力均远优于煤电机组,单位装机投资成本也较低。但由于中国天然气价格较高,燃气轮机装机比例较低。在英国和美国等燃气资源丰富的国家,燃气轮机已成为主要的火电机组类型。柴油发电机主要是容量在1 MW以下的分布式发电资源,主要存在于低压配电网中。由于装机容量小,单位容量投资成本较低,但这类机组燃烧效率较低,边际成本极高。未来随着分布式可再生能源的普及,在微电网自发自用的背景下,柴油发电机组能起到一定局部供需平衡调节的作用。

受限于燃气轮机和柴油机的边际成本较高,未来相当长一段时间内中国电源结构仍将会以煤电为主。对煤电进行灵活性提升改造是当前挖掘灵活性比较经济的手段。具体的技术路线包括锅炉侧改造、汽轮机改造和控制系统改造^[56]。在德国,改造后的燃煤电厂最小负荷已能够达到额定容量的12%。中国要求改造后的纯凝机组最小技术出力达到额定容量的30%,部分电厂机组不投油稳燃时的纯凝工况最小技术出力为20%~30%。根据机组类型和改造技术路线的不同,煤电灵活性改造成本为60~180元/kW^[57]。此外,灵活运行会降低发电厂寿命,其对应的额外成本需要精细化考虑。

3.2.2 灵活的电力市场

在电力市场发展成熟的国家,电力系统所有生产环节均须通过市场交易的方式进行。合理的市场平衡机制对调动灵活性资源参与市场和平抑可再生能源发电的间歇性起到至关重要的作用。一方面,系统需要提高市场交易频度和灵活性以应对可再生能源小时级以内的波动。以德国为例,2011年,德国日内交易结束时间从交割前45 min缩短至30 min。预测点距离当前时间越短则预测结果越精准,这使得灵活的日内合同进入平衡市场就已消纳了一部分不平衡误差。此外,2014年,欧洲能量交易中心(European Energy Exchange, EEX)引入15 min级出力合约代替半小时和小时级合约^[58]。更细颗粒度的合约曲线能够准确地匹配风电出力,这也为更加精细的可再生能源出力预测提供了动力(相关示意图如附录A图A2所示)。灵活的市场组织能够填补交易机制僵化带来的一部分灵活性损失。

此外,电力市场还为可再生能源带来的“外部成本”提供了内部化的途径。尽管可再生能源本身的发电边际成本几乎为零,但其带来了额外的调峰需求、爬坡需求和惯性稳定需求,其廉价出力在挤占传

统电源发电量的同时,又要求其他主体提供辅助服务。电力市场为电力系统转型过程中的传统主体转型与新主体引入提供了平台。

为实现“谁受益、谁承担”的原则,世界各地已有许多地区根据自身发电结构开展辅助服务市场,保障传统电源收益。美国加州针对光伏的特点在早晨与傍晚专门设置了爬坡资源市场。美国和英国均建立了容量市场,补贴边际机组以保证发电充裕度和系统运行安全。中国东北和华北地区为解决制约可再生能源消纳的调峰问题,均开展建立了调峰市场或补偿新机制。中国华北、华东和南方区域还增设了自动电压控制服务补偿^[59]。华东电网目前已正式印发了相关细则对电厂参与辅助服务的行为定义、考核与补偿方式、计量与监管手段进行了详细规定^[60-61]。

未来对辅助服务的市场化管理将成为电力调度交易机构的重要改革内容。引入更灵活的电力市场的经济成本较低,其单位成本远小于硬件投资成本,但市场的改革涉及利益的重新分配和原有机制的突破,存在体制方面的难度。

3.2.3 提升预测精度

可再生能源出力与负荷需求的预测是电力系统机组组合与经济调度的基础^[62]。可再生能源预测相对误差高于目前负荷预测误差1%~3%^[63],可再生能源预测平均误差则为3%~8%,且风电预测误差通常大于光伏^[64],最大误差超过10%(以上百分比均为预测误差对装机容量的比值)。但随着技术进步与历史数据的逐步累积,可再生能源出力预测误差整体呈现下降的趋势,某公司近10年可再生能源平均预测误差变化如附录A图A3所示^[65]。预测越精准,则实时调度中需要调节资源越少,系统为出力偏差付出的成本越低,在高比例可再生能源渗透背景下尤甚。一项基于美国西部电网精准预测的经济效益研究指出,在可再生能源渗透率为24%时,若预测精度能够较当前水平提高10%和20%,则每年能节省的运行成本分别为1.00亿美元和1.95亿美元。

随着分布式电源与电气化技术的发展,负荷侧近年来也开始展现出新的不确定性特征。一方面,屋顶光伏等分布式电源直接侵占了一部分负荷,其不确定性也进而传递给了统调负荷;另一方面,以电动汽车为代表的新兴电气化技术给负荷的时空分布带来新的不确定性。调度侧对这些新不确定因素的工作方式和容量等信息不完全掌握,为未来电力系统的负荷预测带来新的挑战。文献[66]利用数据驱动方法,基于分成本预测思想与Copula相关性理论

提出了一种计及表后光伏的净负荷预测方法,为解决分布式电源带来的预测困难问题提供了思路。

3.2.4 需求响应

需求响应是挖掘用户侧灵活性的重要手段,通过用户响应能够使电力负荷“随风而动、随光而动”,进而降低净负荷曲线的波动性^[67]。根据用户响应对象的不同,需求响应还可分为基于价格的需求响应和基于激励的需求响应。前者通过零售电价的变化影响用电需求,具体包括分时电价、实时电价和尖峰电价等;后者通过制定确定性或竞争性的奖励政策来激励用户必要时段调整负荷,激励措施包括直接负荷控制、可中断负荷和需求侧竞价等。

中国最早开展需求响应的省份为山东省和江苏省。在发展早期,用户参与需求响应的补贴为固定的单次20元/kW或30元/kW,根据响应模式的不同而不同。目前2个省均已经开始尝试通过竞价方式确定补贴价格,市场化趋势越来越明显^[68]。2018年10月,中国江苏省通过竞价模式在国内首次尝试“填谷”电力需求响应,最大增加低谷负荷1.42 GW。2019年7月30日,江苏省削峰需求响应实际减少用电负荷达4.02 GW,单次需求响应负荷量为世界第一。2019年夏季,浙江省、江西省和河南省等供电紧张地区也纷纷出台了需求侧响应相关政策。需求响应实施范围越来越广,实施主体越来越多,逐渐成为高负荷地区需求侧管理的重要举措^[69]。

需求响应能够提升系统对负荷的控制能力,但针对高比例可再生能源并网带来的问题还需要速度更快、调整更加灵活的响应方式。目前实际实施的需求侧响应以削减负荷为主,主要适用于电力紧张时段调峰。对于平抑可再生能源的波动,保障可再生能源消纳,需要调节更加灵活的负荷,例如电热泵和公共场所温控设备等。此外,应对极高比例可再生能源背景下电力过剩的问题,还需要更多的“增负荷响应”,鼓励负荷低谷时期工商业和居民用户用电,例如通过价格信号引导电动汽车充电或工业负荷调整生产时间等。总之,未来需求响应发展需要尽可能广泛地吸纳负荷侧的多种可控资源,通过直接调控或市场信号等方式根据实际的电力、电量场景选择需求响应方式。

3.2.5 储能

储能设备通过将电能转化为机械能和化学能等其他形式实现能量的存储。截至2019年底,全球已投运电力储能项目的累计装机规模达183.1 GW,同比增长1.2%^[70]。在未来储能成本大幅下降的背景下,储能设备将从根本上改变电能无法大规模长

时间存储的电力系统基本特征。

储能可布局在电源、电网和负荷等电力生产输送的每个环节,能够真正意义上实现多时间尺度上电力、电量的不平衡调节,承担调峰、调频、可再生能源波动消纳和季节性电量平衡等多项辅助任务。现阶段储能装置应用场景与对应储能类型技术经济指标如附录A表A2所示。表中电化学储能数据为磷酸铁锂电池典型数据。储热功率成本随介质和规模不同差别较大,故储热功率成本未列出。

在短时间尺度上,由于可再生能源大规模并网,预测误差与随机波动造成的不平衡将使得系统调频需求显著增加。此外,由于电力系统调度的要求,电源侧也有短时间内保持可再生能源出力平稳的固有需求。这类秒级或分钟级的短时间不平衡需要响应速度较快的储能类型,比如电化学储能和飞轮储能。随着可再生能源装机比例的提高,其波动量增大、持续时间增加,在日内或日间尺度上的电力、电量不平衡开始出现,具体表现为调峰资源稀缺、局部线路阻塞和可再生能源电力过剩等。此时对储能设备能量需求增加,也更需要抽水蓄能、压缩空气储能和储热等储能技术的应用。

在季度或年的长期时间尺度上,高比例可再生能源电力系统面临季节性电力、电量不平衡和传统电源设备利用率低等问题。这需要具备长时间和大容量存储等特点的季节性储能。季节性储能在电力系统电能富余时将电能转化为其他可长期存储的能量形式进行储存,实现跨能源形式的长期储能和优化利用,具体包括电转气、大型抽水蓄能和压缩空气储能等^[71]。

各类储能技术中,抽水蓄能是发展最早也是目前已投建装机容量最大的储能类型,占全球储能总容量的93.4%。估计全球可低成本建设的抽水蓄能总容量达17.3 PW·h,约为2017年全球储能总用电量的79%^[72]。中国早在20世纪便在地多投运抽水蓄能电站,但是当时主要作为重要负荷的备用电源或核电厂的配套工程。目前可再生能源装机规模高速增长,作为技术最成熟的储能技术,抽水蓄能迎来了新一轮的建设高潮。截至2019年底,中国已投运抽水蓄能机组30.2 GW,规划或在建机组超过50 GW,站址包括新疆和内蒙古等内陆地区。

近年来,新型储能装置技术快速发展,电化学储能(尤其是锂电池储能)是除抽水蓄能外发展最快的储能类型。全球累计装机容量已达8.09 GW,中国约为2 GW。但未来电化学储能发展受政策与性能发展的影响较大,有较强的不确定性。在考虑寿命的大规模应用场合下,目前电化学储能经济技术指

标还很难与抽水蓄能相提并论。但在某些领域应用中,电化学储能仍有如下不可替代的优势。

1)快速调频能力。电化学储能本体通过电力电子接口并网,在故障紧急支援与弥补短时系统不平衡时能够在毫秒级进行响应,这一点传统储能难以做到。提供快速调频服务已经是美国电力市场中储能设备的主要盈利方式^[73],目前中国也已开始探索。

2)选址安装灵活快速。电化学设备能够以小容量碎片化地渗透到电源侧与用户侧,满足个性化需求。例如:在电源侧,电化学设备可作为平抑可再生能源波动的缓冲与实现惯性调频的硬件基础;在用户侧可帮助用户参与电力市场套利,减少用电成本。目前可再生能源丰富的地区,比如中国青海、内蒙古和湖南等均对风电和光伏机组配套储能提出了强制要求,电化学储能可间接获得补偿。

可再生能源高渗透带来的灵活性需求将使未来电力系统对储能保持较大需求。但结合目前工程实际与政策,未来10年左右抽水蓄能仍会是电网侧储能的主要形式,承担系统调峰的任务。少量的压缩空气储能也能承担小时级或日级的系统调节任务。以电化学储能为代表的新型储能主要在电源侧与负荷侧承担平抑可再生能源波动、调频和提供惯性支撑等任务。但其发展速度与角色定位变数较大,由其技术性能(寿命和成本)、政策扶持力度和辅助服务市场组织方式等共同决定。

上述针对电力、电量不平衡的时序平衡技术成本对比如图6所示。其中,提高预测精度、市场组织方式创新和基于价格需求响应的成本最低且生效较快。但这些仅基于“软件”的改善方法,本质上是激活与释放系统原有的灵活性,而非从物理上引入新的灵活性资源。灵活性发电和储能设备的成本最高。灵活性改造与发电的技术较为成熟,近年来得到政策和辅助服务市场的支持,目前已逐渐普及。成本是限制储能发展的主要因素,储能设备尤其是新型储能的推广还有赖于度电成本的进一步下降。

3.3 电力、电量的空间平衡

可再生能源机组选址位置与地区资源禀赋天然相关,而资源富集地与负荷中心往往逆向分布,因此,高比例可再生能源电力系统必然存在电力、电量空间的不平衡。为此,需要通过电网的大范围互联和多能源形式之间的互济转化实现电力、电量的空间平衡。

3.3.1 跨区远距离电力传输

高压交直流输电是远距离输电的最基本手段,对各区资源互补备用互济有重要意义。美国在

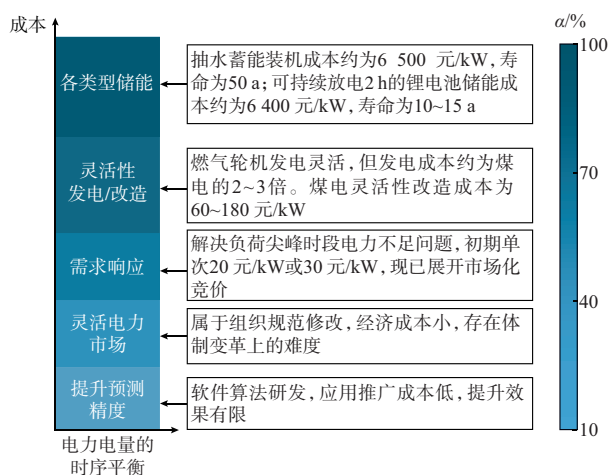


图6 电力、电量的时序平衡技术成本对比
Fig. 6 Cost comparison of chronological power and electrical energy balancing technologies

2008年提出以765 kV主干网架连接美国三大网络消纳全国风电的设想。中国主要大型能源基地与东部负荷中心之间的距离为1 000~3 000 km,超出传统超高压输电线路的经济输送距离。截至2019年6月,中国特高压远距离输电工程累计线路长度已达27 570 km。“九交十直”的特高压混联电网格局基本形成,其中,9条用以连接“三北”地区可再生能源生产基地和东部沿海。张北柔性多端高压直流项目已于2020年投入使用,缓解了张北地区困扰已久的能源消纳难题。

2018年中国高压输变电工程的相关造价数据如附录A表A3所示。与其他电网灵活性设施相比,输电线路的成本相对较低,经济性上有一定竞争优势,且具有综合效益。中国目前主要跨区、跨省输电工程的输电电价平均值为0.047 4 元/(kW·h)。直流输电的成本相对较高,比如哈密南—郑州直流工程和酒泉—湖南直流工程等大型直流工程的输电价格均为0.06 元/(kW·h)左右^[74]。其主要原因在于换流站成本较高,但直流线路损耗较低,不存在同步稳定问题,在远距离大容量输电方面具有经济性。国家电网有限公司2020年特高压输电项目投资规模预计突破1 811亿元,欧洲也将大电网互联作为未来1 000亿欧元绿色低碳法案的重点工作内容^[75]。未来随着终端用能电气化的推进,电力系统负荷仍然具有较大增长空间,电网空间拓展的需求巨大。

3.3.2 综合能源系统

综合能源系统是指不同形式能源的开发、转换、储备、运输和使用等环节高度协同并共同满足终端能源需求的能源系统。能源枢纽、能源路由器、电制

氢和电转其他能源(power-to-x, P2X)技术,直至广义的季节性储能等技术都可以归为综合能源系统的范畴。地理范围上,综合能源系统可以分为区域级和跨区级2个层次。前者主要指园区以及城市某个区域各类能源的分配、转换和存储系统;后者是指连接多个区域综合能源系统以及能源产地的能源传输网络。由综合能源系统打破电、热、气和交通等不同能源领域的壁垒,能够实现能源供需更大范围内的平衡,充分挖掘能源系统的灵活性。能源转换装置是综合能源系统的核心设备,储能设备价格如附录A表A4所示。

综合能源系统帮助消纳可再生能源,减少空间电力、电量不平衡的原理在于综合能源系统能就地提供多种广义能量存储效应以应对可再生能源的波动。综合能源系统包含最直观的储气、储热和储冷等跨能源存储装置。此外,由于多种能源形式运行时间尺度的差异,热网和气网中的暂态过程也能为电力系统提供隐式的储能,例如供热管网和建筑物的等效储热效应^[76]。

综合能源系统中的P2X技术除了制气和制热外,还涵盖利用电能制取的工业原料,例如铝、乙烯和汽油等。工业原料通过物流网络进行储运,广义上也可认为消除了空间电力、电量需求的不平衡。最后,综合能源系统实现了更广泛能源形式之间的需求互补,多种能源灵活转化和多能源综合需求响应为电力系统消纳可再生能源提供了额外弹性。

目前,已有学者对综合能源系统多能互补的经济效益与技术价值进行了分析^[77-81]。文献[82]研究显示考虑区域热网2~3 h的热力传输时延,可进一步优化区域系统运行,提高约2%的风电消纳。文献[83]以小镇综合能源系统为算例分析指出该综合能源系统消纳可再生能源的极限约为负荷电量的40%,电能平均成本为570 元/(MW·h)。文献[84]指出在当前技术水平下,P2X技术制备主要工业原料的技术成本高、能量转化效率低。例如:电制汽油成本为2.5 美元/kg,是石油炼化成本的4倍。未来电制燃料或工业原料突破口可能在制氢、制甲烷和制甲醇这3个方面。

跨区输电线路建设与综合能源系统两者对于解决空间电力、电量不平衡的思路较为不同。前者构建电气通道连接各大区,后者转化能源形式挖掘其他能源网络的运输存储空间。两者目前工程应用的规模相差极大。针对大地理范围、大规模的能源传输,输电线路建设成本相对较低,尤其是750 kV或500 kV的高压交流线路。电力、电量的空间平衡技术成本对比如图7所示。图中,LCC-HVDC为电流

源型直流输电, HVAC为高压交流输电。目前的综合能源系统主要应用于小范围地区。未来广泛普及后, 规模效应或网络输送限制等因素对其成本与性能的影响需要进一步研究。

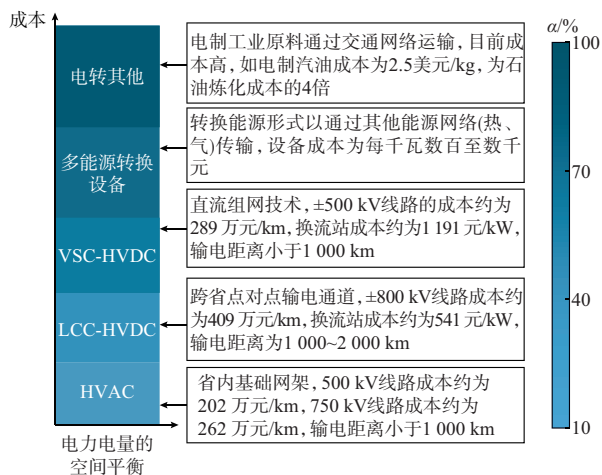


图7 电力、电量的空间平衡技术成本对比

Fig. 7 Cost comparison of spatial power and electrical energy balancing technologies

3.4 多样化清洁能源电力

虽然当前新增可再生能源电力以风电和光伏为主, 但其他可再生能源与清洁能源, 比如光热和生物质能等的发展潜力亦不容忽视。一方面, 这些电源形式的发展能够结合不同电源形式的特性帮助电力系统更好地消纳风电和光伏的电能; 另一方面, 可以提升系统中可再生能源的渗透率。风电和光伏装机均是在近10年内呈现出短时爆发式增长(如附录A图A4所示), 不能排除未来技术发展带来新的可再生能源电力增长点。依靠多类型电源的互补协同效应也是实现高比例乃至极高比例可再生能源电力系统的重要途径。本节将对多种“小众”清洁能源电力的发展现状、经济技术特性和未来电力系统中的定位进行评述。

3.4.1 光热

太阳能光热发电(concentrating solar power, CSP)是一种新兴的可再生能源发电技术。其通过反射太阳光到太阳能集热器进行太阳能的采集, 再通过换热装置提供高压过热蒸汽驱动汽轮机进行发电。光热电站能够配备高性价比的储热环节, 使得太阳能光热发电能够解决太阳能的间歇性和不确定性, 实现灵活可控运行。

阻碍光热快速发展的因素在于其过高的投资成本, 目前单位装机成本为26000~29000元/kW, 是光伏装机成本的4~5倍, 且运维成本远高于光伏。

截至2019年全球光热发电装机容量仅为6.45 GW, 主要分布于西班牙和美国。中国近年来开始尝试发展光热电站, 首批太阳能热发电特许权招标核定标杆上网电价为1.15元/kW^[85]。中国目前总装机容量仅约500 MW, 根据中国可再生能源学会预计, 2030年中国光热装机容量将达到30 GW, 2050年将达到180 GW^[86]。

光热发电由于引入了储热环节而使其具有运行灵活性和可控性, 提供了“以可再生能源发电消纳更多其他可再生能源”的技术路径。随着可再生能源发电比例不断提高, 光热电站的经济性将逐渐增强。在60%的可再生能源渗透率背景下, 投建光热电站的年化总成本下降6%^[87]。

此外, 由于既是可再生能源电源又是灵活性电源, 光热相比电储能运行调度中可控性与灵活性更强。在一般比例可再生能源发电并网下, 昂贵的投资成本使得投建光热不经济。但在较高比例可再生能源并网下, 光热发电经济性迅速提高。在高比例可再生能源并网的背景下, 风电-光伏-光热的组合电源形式相比单一电储能更具经济竞争力, 光热发电技术有望成为未来高比例可再生能源并网电力系统的重要补充发电技术(如附录A图A5所示)。

3.4.2 生物质能

生物质能发电通过机组燃烧生物质产生电能, 是最常见、应用最广泛的生物质能利用形式。根据燃料类型的不同还可具体分为农林生物质发电、垃圾焚烧发电和沼气发电等。其装机形式以分布式电源为主, 通常机组容量在50 MW以下, 平均利用小时数超过5000 h^[88]。因此, 本质上属于燃料可短期再生的小型火电机组, 其并网特性和调节灵活性等均与常规火电接近, 不存在风电和光伏机组带来的各种问题。

生物质能发电已经是目前世界范围内继风电和光伏之后第三大新型可再生能源利用形式。截至2019年底, 全球生物质能发电装机已达123.8 GW, 主要分布在巴西、欧洲和北美等森林资源丰富的国家和地区^[89]。在一些负荷体量较小的欧洲国家, 生物质能发电已成为主要的电力来源之一。丹麦、英国和德国等国家的电源结构中, 可调度的生物质能所占比例均超过8%。在丹麦和英国该比例甚至超过光伏发电。2019年, 中国生物质能发电新增装机容量为4.73 GW, 累计装机达到22.54 GW, 全年生物质能发电量为111.1 TW·h, 继续保持稳步增长势头^[28]。

未来生物质能发电技术有可能成为中国电力系统的重要电源, 但超越风电和光伏成为主要可再生

能源电源的可能性不大。一方面,受到成本的约束,不同容量的生物质能机组单位投资成本为8 701~19 397元/kW,单位装机成本随着机组总容量的增加而减小。中国农林生物质发电和垃圾焚烧发电平均单位装机成本约为9 569元/kW^[88],前者每度电补贴0.75元,后者每度电补贴0.65元。该补贴电价自2010年开始实施,10年来没有明显下降,可见其成本下降空间已较小。更重要制约在于生物质燃料的总量,中国每年出产生物质资源总量约为 4.6×10^8 t标准煤^[90],折合电量为1 533 TW·h,约为中国2019年全社会用电量的21.2%。考虑到生物质能作为燃料与供暖等其他用途以及不完全开发,实际比例将远低于这一数值。国际能源署预计2030年全球生物质能电量将达到1 168 TW·h^[91],仅为中国2019年全社会用电量的16.2%。生物质能发电虽然成本较高,但作为一种清洁能源,与光热发电类似,能够提供“以可再生能源发电消纳更多其他可再生能源”的技术路径,在高比例以及极高比例可再生能源并网场景下能够提供电压支撑、同步惯量、备用容量和调频调峰等服务,具有较高的综合效益。

3.4.3 地热能

地热能发电通过地底热能加热水或其他工质推动原动机转动进而实现发电,与生物质能类似,也属于热源清洁化的火电机组。虽然是继风电、光伏和生物质能之后的第四大新型可再生能源,但其发展程度暂不及前三者。截至2019年底,全球地热能总装机容量为13.93 GW,主要分布在北美、东南亚和土耳其等地热资源较为丰富的地区。目前,中国地热能发电装机容量约为27 MW,发展比较缓慢。首先,由于其开发成本较高,地热电厂单位装机成本约为28 000元/kW^[88]。再者,对站址要求较高,需要进一步深入探明中国可利用地热能储量。此外,地热能开发可能改变地质结构,间接导致地震与地下水温下降,需要充分评估其环境影响。中国沿海与西南地区地热资源丰富^[92],但其大规模开发的可行性与经济性仍需要综合论证。目前,地热能主要充当热源通过地源热泵或直接供热的方式参与小范围综合能源系统的运行。

3.4.4 海洋能

海洋能发电利用海水涨落与波动的能量发电,具体利用形式包括潮汐能发电、潮流能发电、波浪能发电和海洋热能发电等。早在20世纪就已有大型潮汐能电站落成,但由于造价较高、选址建设困难和机组利用小时数低等原因未能实现普及。以韩国某潮汐电站为例,该电站装机容量为254 MW,耗资约

5.6亿美元,年发电量为552.7 GW·h^[93],单位装机成本约为15 000元/kW,年利用小时数仅2 175 h。截至2019年底,世界范围内海洋能装机容量仅为530.57 MW^[89]。

近年来,潮流能和波浪能发电技术的逐渐发展为海洋能利用提供了新的思路。这两者均试图通过在海洋中布置类似风机或光伏的发电阵列实现能源汲取,有望降低海洋能的发电成本,扩大开发能力。目前,苏格兰^[94]和中国都有已投运的潮流能发电项目等,但均处于试验运行阶段,装机容量低于10 MW,距离大规模商业化开发仍有距离。文献[95]研究指出中国海洋能可开发容量约为53.4 GW。考虑其较低的利用小时数,即使全面开发其电能渗透率亦不足2%。在海洋能发电技术取得重大突破之前,其将主要为海岛微电网与沿海局部地区供电。

3.4.5 核能

核能发电通过核原料裂变反应产生的热能蒸汽推动汽轮机转动产生电力。截至2019年底,全球共有在运反应堆450座,总装机容量398.9 GW。2020年,新并网的5.146 GW机组中有2.66 GW来自中国^[96]。目前,中国核电装机容量为48.74 GW,在建机组容量为8.06 GW,已规划机组容量为49.75 GW^[97]。中国核电装机容量在过去9年间保持9%以上的高速增长,多年增速超过20%。3.2.5节中提及的抽水蓄能大发展一定程度上也得益于中国核电事业的快速发展。电力发展“十四五”规划预测,到2025年中国核电装机将达到72 GW,远景规划将超过200 GW。

中国核电工程单位装机造价为12 000~16 000元/kW,约为光伏成本的3倍、陆上风电的2倍。但核电的平均利用小时数高达7 346.22 h,是光伏的6.3倍、风电的3.5倍^[98]。2019年,中国核电发电量为348.1 TW·h,是光伏电量的1.6倍。且核电厂的使用寿命一般为50~60 a,风电机组与光伏板的寿命仅为20~25 a。因此,在经济性方面,三者实际上是可比较的,甚至核电在度电成本上还有一定的优势。核电发展的约束有3个:①事故危害不可承担;②出力不可调节,出于安全性考虑,目前中国核电只负担基荷出力,不参与调峰与调频;③只能由大型企业集中投建,而风电和光伏可以进行分布式和市场化的开发,核电发展动力较为单一。

作为中国第三大清洁能源,未来相当长一段时间,风电、核电和光伏会呈现共同高速发展的态势。这三者均对系统灵活性提出更高的要求。若未来中国核电能够进行基础的调峰和调频辅助服务,为系

统提供惯性,则核电能成为消纳高比例可再生能源的重要灵活性资源。中国实现高比例可再生能源电力系统的发展路径上,核电所扮演的角色与最终所占比例仍然有待研究。

3.4.6 碳捕集电厂

2019年,中国火电装机容量为1 190.55 GW,仍保持4%的年增长率。另外,高比例可再生电力系统本身也需要火电机组提供备用容量和转动惯量。燃煤火电机组还将长期保持较大规模,对火电机组进行碳捕集改造成为提高机组灵活性同时降低电力系统碳排放的必要手段。

碳捕集和封存(carbon capture and storage, CCS)技术通过将二氧化碳从排放源中分离出来,输送到安全的封存地点,实现其与大气的长期隔绝。具体技术路线包括燃烧后捕集、燃烧前捕集和富氧燃烧捕集等^[99]。此外,由于碳捕集电厂的捕集能量主要来自发电循环抽取蒸汽或直接利用厂用电,相比传统燃煤火电厂,碳捕集电厂拥有更加优越的调峰特性。文献[100]基于中国某省实际电力系统进行了碳捕集电厂调峰经济效益的分析,指出系统中600 MW燃煤火电机组若替换为碳捕集电厂能够多容纳约800 MW的风电装机接入,节约调峰成本5.7万元/h,每天可节约35.0万元。

CCS技术造价高是阻碍其发展的主要因素。电厂捕集装置的额外成本通常约为电厂成本的60%,为2 000~2 400元/kW,且额外增加捕集成本为0.133~0.196元/(kW·h)^[101-102],接近燃料成本的70%。目前全世界已有23个大规模CCS示范项目正在运营或建设中,年封存二氧化碳约 3.8×10^6 t。但由于大部分地区缺乏足够的激励,目前CCS的商业化运营与发展进程并不理想。此外,大规模的碳储存的意义与前景也需要进一步研究。

应用CCS技术后的火电厂可以在低碳清洁和灵活性资源2层意义上作为对高比例可再生能源系统的补充。在高比例可再生能源电力系统的发展路径上将长期存在,CCS技术可能将是电力系统走向100%可再生能源最后一步需要的关键技术。

其他清洁能源电力技术成本对比如图8所示。一方面,利用多样化电源的不同优势能够帮助电力系统更好地消纳风电和光伏电能,实现优势互补;另一方面,风电和光伏以外的可再生电源发展本身就提升了系统中可再生能源的渗透率。未来的电力系统将会走向多类型能源电源共存,但其发展潜力和未来定位是不同的。按照当前的经济技术指标,介绍的6种清洁能源技术未来大规模发展潜力由高到低大致排序为:核能、生物质能、光热、碳捕集电厂、

地热能 and 海洋能。核能按照已规划容量“十四五”期间必将保持高速增长的态势。生物质能和光热发电较有潜力,两者发展主要受资源分布与装机成本的影响。碳捕集电厂、地热能和海洋能三者目前的技术成熟度,成本竞争力与资源储量等因素均不支持其作为重要电源形式广泛普及。

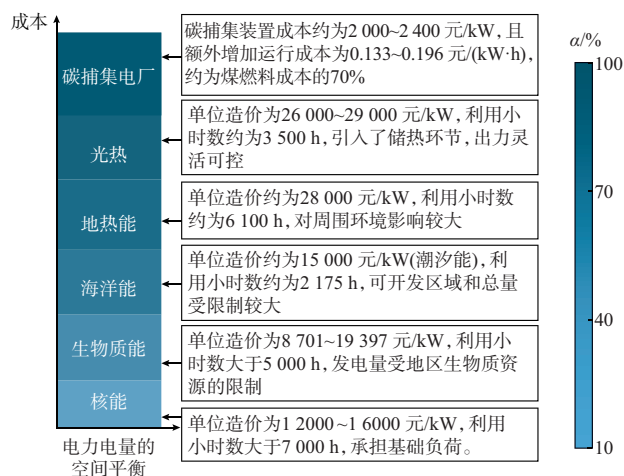


图8 其他清洁能源电力技术成本对比
Fig. 8 Cost comparison of other clean energy power technologies

4 观点与研究展望

高比例可再生能源带来的挑战主要源于风光发电随机性、电力供需实时平衡的矛盾和电力电子设备并网带来的稳定与继电保护问题。这2方面的问题在电力系统的不同时间尺度派生出不同形式的具体挑战。在并网比例较低时,挑战主要产生在电源设备本身或送出并网等局部环节。当并网比例达到高比例甚至极高比例时,其对系统的稳定、运行和规划产生的挑战将是全局性的。

为应对这些挑战,工业界与学术界目前已经有众多技术手段或技术构想。这些技术在高比例可再生能源的不同并网渗透率下承担不同的角色。现阶段有些技术方案比较成熟,比如机组故障穿越技术已经纳入了机组并网的基本标准。有些碍于经济性和机制体制等多方面的因素还未全面普及,但展现出了可观的发展潜力,比如新型储能和需求响应等。图9展现了本文所介绍的一系列高比例可再生能源挑战与技术解决方案之间的对应关系。由图中的对应关系可以得到以下结论。

1)高比例可再生能源并网是一项系统工程,各种挑战与解决方案并不是完全孤立或一一对应的。对同一类挑战有多种技术手段可以解决,一项技术或装备往往也能解决多方面问题。从解决高比例可

再生能源并网的角度而言,没有一种技术是“包打天下”的终极解决方案,不同的技术手段之间需要相互配合。

2)解决高比例可再生能源并网的技术选择并不是唯一的,不同技术之间可能存在互补关系,也可能存在竞争关系。中国高比例可再生能源电力系统发展路径的技术选择取决于国家及行业政策,以及各类技术的综合经济性比较。部分技术由于技术进步可能产生较大技术经济性的提升,长期而言,技术选择还具有一定不确定性。

3)对于某一项技术而言,其对高比例可再生能源并网的技术经济性往往体现在多个方面。例如储能能在电网调频、调峰和平抑可再生能源波动等方面均能起到重要作用;同步调相机在系统无功支撑、惯性支持和提供短路电流方面均有作用。因此,在评价某一项技术时不能片面地考虑其某一方面的效益,需要考虑在多重应用场景下的综合效益。

基于以上对高比例可再生能源电力系统挑战与技术解决方案的探讨,总结该领域值得关注的几个具体技术研究方向如下。

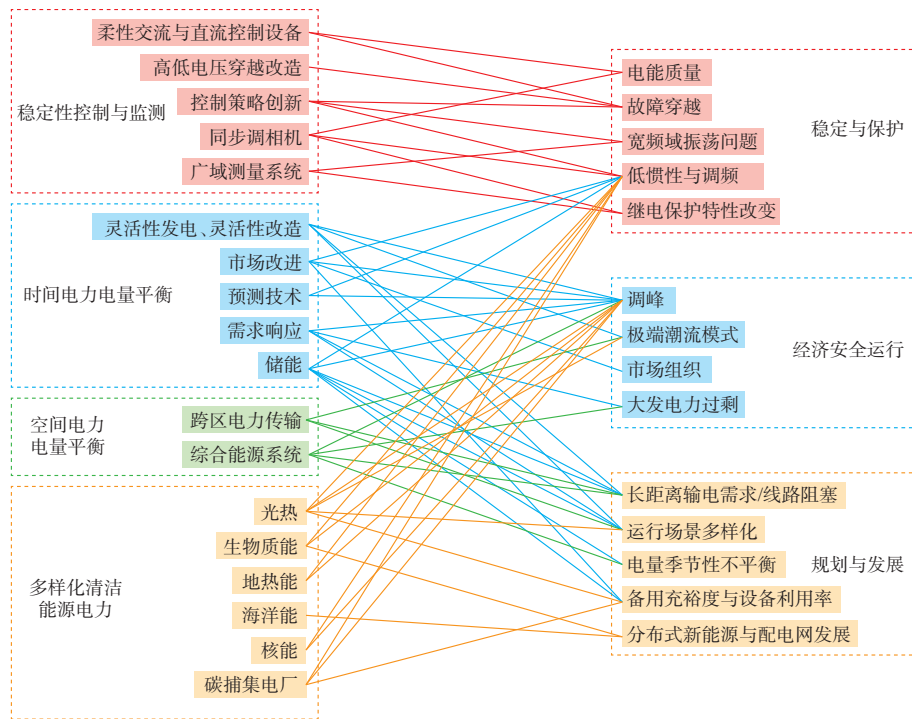


图9 高比例可再生能源挑战与技术解决方案的对应关系

Fig. 9 Correspondence between challenges and technical solutions of high proportion of renewable energy

1)中国高比例可再生能源电力系统未来形态与转型路径。目前,世界各国都制定了在2050年左右实现电力系统清洁化和能源系统电气化的目标。但未来高比例可再生能源并网下的技术解决方案选择、电网形态和实现这个目标的发展路径与发展模式仍在研究之中,尚无公认结论。这是政策-经济-技术紧密耦合的复杂问题。不仅需要在宏观上进行战略方向的审慎选择,在微观上也要精细化研究各类技术的可行性与技术经济性。面对这一复杂问题,需要一套能应对内部技术革新驱动因素与外部政策环境长期不确定变化与可再生能源出力波动短期不确定性的电力系统发展模拟与决策方法,为转型战略发展提供充分的辅助决策信息。

2)高比例可再生能源电力系统的稳定性机理。电力系统传统稳定性概念是面向同步发电机、基于

工频相量模型构建的。但随着新能源和电力电子控制主导的动态特性日益凸显,亟须研究相关装置的动态行为特性,对比分析新能源渗透率升高后稳定性方面的变化,开展针对新型稳定问题的基础理论研究。主要包括:①分析新形态下电力系统稳定性机理,提出描述电力系统稳定性的新概念,建立新稳定性问题的分类标准,从而探索稳定性分析与控制的新框架;②探究电力系统稳定性在多维时空下的演变规律,实现对稳定性的量化分析;③研究时变性、异构性、不确定性和复杂性等对电力系统稳定性的影响并提出应对策略。

3)考虑系统复杂稳定机理的电力系统规划与运行技术。传统学术研究中,电力系统的优化规划和运行与系统的稳定性判定是相对割裂的。但随着可再生能源渗透率的提高和系统惯性的逐步降低,系

统的运行方式(例如火电机组开停机状态和外来电量等)和规划策略(例如对同步调相机、光热和储能等的安排)将对整体稳定性产生直接影响。因此,在电力系统规划与运行中就有必要充分刻画系统故障或稳态时的稳定边界,形成安全稳定校核与规划及运行优化的一体化。

4)多时间尺度储能协同规划与运行优化技术。现有关于储能参与电网运行与规划的研究主要针对其小时级的削峰填谷为电网带来的效益。然而,储能设备的效益体现在秒级调频、小时级调峰和季节性能量平衡等多个方面,因此,需要研究储能设备在多时间尺度上的运行特征和技术经济性。在多时间尺度应用场景叠加的背景下,储能运行需要考虑长、短期时间尺度下储能出力的协同,其对传统电力系统设备的替代与互补关系也会更加复杂,需要进一步探究储能设备选型与规划的方法。

5)跨能源系统的可再生能源消纳。当前已有众多以综合能源系统为核心对象的研究,充分探究了在建模、运行和规划等方面的技术方法,但缺乏跨能源系统的综合效益研究。例如:综合能源系统能够多大程度上提升电网可再生能源的消纳能力;未来是否可以通过综合能源系统达成100%可再生能源;气网、热网和电网三者之间能够互相提供多少灵活性等。综合能源系统既要考虑稳态转化,也要考虑能源的暂态互补,整体上是一个十分复杂的优化建模与求解问题,需要一套电力系统与其他能源网络耦合互动建模的基础理论作为支撑。

5 结语

能源系统日益高涨的清洁化和低碳化的诉求意味着中国必将走向高比例可再生能源电力系统。但以风电和光伏为代表的间歇性可再生能源大规模并网为电力系统运行规划等各个方面带来了全新的挑战。本文首先定性划分了电力系统迈向高比例渗透过程中的3个阶段,梳理了3个阶段的特点。在可再生能源发展初期的中低比例渗透阶段,电网新特征主要来源于电源本身或送出并网等局部环节。随着装机容量的增加,在高比例渗透阶段,可再生能源开始产生系统性的影响。最终,在极高比例渗透阶段,电力系统将呈现以风电和光伏为主体,多种电源形式甚至多种能源形式协调发展的特点。

风电和光伏可再生能源独特的电力电子装置特性与间歇性出力特性是高比例可再生能源背景下技术挑战的根本来源。根据高比例渗透在暂态稳定、运行和规划3个方面造成的不同问题,本文结合学术研究与工程实践梳理了系统惯性降低、灵活性资源稀缺和电量季节性不平衡等14项具体挑战。并

从惯性稳定控制、时间电力电量平衡、空间电力电量平衡和多样化电源发展4个方面介绍了应对挑战的18项解决方案。最后,总结了目前高比例可再生能源领域值得关注的研究方向。

本文的目的并非详述每项具体技术本身,而是通过各种技术的梳理与比较,分析各项技术的定位与发展潜力,揭示高比例可再生能源并网这一问题的复杂性以及各种解决方案之间的复杂耦合关系和相对技术经济性。目前没有一种技术可以一劳永逸地解决高比例可再生电力系统带来的问题,这些技术未来是否能够被广泛用于高比例可再生能源并网,不仅取决于其技术可行性,更取决于其相对技术经济性。本文对各项解决方案的发展前景与经济成本进行了充分的说明与讨论。希望本文提供的观点与数据能够帮助研究人员在开展具体领域的深入研究之前获得一个“全景”概览。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] Renewables 2020 analysis and forecast to 2025[EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>.
- [2] 2020年全国电力工业统计数据[EB/OL]. [2021-02-17]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.htm. National electric power industry statistics in 2019 [EB/OL]. [2021-02-17]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.htm.
- [3] 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.
- [4] 姚良忠,朱凌志,周明,等.高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望[J].电力系统自动化,2017,41(9):36-43. YAO Liangzhong, ZHU Lingzhi, ZHOU Ming, et al. Prospects of coordination and optimization for power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 36-43.
- [5] 鲁宗相,黄瀚,单葆国,等.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[J].电力系统自动化,2017,41(9):12-18. LU Zongxiang, HUANG Han, SHAN Baoguo, et al. Morphological evolution model and power forecasting prospect of future electric power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 12-18.
- [6] 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):1-11. 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): 1-11.
- [7] Renewable capacity highlights (March 31, 2020) [EB/OL]. [2021-02-17]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2020.pdf.
- [8] POUL S R, UNNIKRISHNAN A, MATHEW S. Wind farms connected to weak grids in India[J]. Wind Energy, 2001, 4(3): 137-149.
- [9] 黄碧斌,李琼慧,蒋莉萍.德国分布式电源的发展经验及其启示[J].中外能源,2013,18(6):26-30.
HUANG Bibin, LI Qionghui, JIANG Liping. German experience in developing distributed power systems and lessons for China[J]. Sino-global Energy, 2013, 18(6): 26-30.
- [10] 2019 年光伏发电并网运行情况 [EB/OL]. [2021-02-17]. http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827923.htm.
Operation situation of photovoltaic power generation in 2019 [EB/OL]. [2021-02-17]. http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827923.htm.
- [11] FERNÁNDEZ-GUILLAMÓN A, GÓMEZ-LÁZARO E, MULJADI E, et al. Power systems with high renewable energy sources: a review of inertia and frequency control strategies over time [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115: 109369.
- [12] MARARAKANYE N, BEKKER B. Renewable energy integration impacts within the context of generator type, penetration level and grid characteristics [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 108: 441-451.
- [13] WESLEY D. Comparison of 100% renewable energy system scenarios with a focus on flexibility and cost[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 3168-3178.
- [14] LI R Q, GENG H, YANG G. Fault ride-through of renewable energy conversion systems during voltage recovery[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(1): 28-39.
- [15] KROPOSKI B, JOHNSON B, ZHANG Y C, 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.
- [16] STEWART E M, AUKAI T P, MACPHERSON S, et al. A realistic irradiance-based voltage flicker analysis of PV applied to Hawaii distribution feeders [C]// 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA.
- [17] BRENNAN M, FOIADELLI F, LONGO M, et al. Wind energy and flicker: which correlation? [C]// 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), June 16-18, 2015, Taormina, Italy.
- [18] RAHMAN S, MOGHADDAMI M, SARWAT A I, et al. Flicker estimation associated with PV integrated distribution network [C]// SoutheastCon 2018, April 19-22, 2018, St Petersburg, USA.
- [19] LIU H K, XIE X R, HE J B, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708-4720.
- [20] JULIA M, BABAK B, THIBAUT P, et al. Grid-forming inverters: are they the key for high renewable penetration? [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(6): 89-98.
- [21] 张宁,周天睿,段长刚,等.大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J].电网技术,2010,34(1):152-158.
ZHANG Ning, ZHOU Tianrui, DUAN Changgang, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand [J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 152-158.
- [22] BUTTLER A, DINKEL F, FRANZ S, et al. Variability of wind and solar power: an assessment of the current situation in the European Union based on the year 2014 [J]. Energy, 2016, 106: 147-161.
- [23] HAMID S, HAMIDREZA Z, DAVID W. Impacts of large-scale wind and solar power integration on California's net electrical load [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 761-774.
- [24] ESER P, SINGH A, CHOKANI N, et al. Effect of increased renewables generation on operation of thermal power plants [J]. Applied Energy, 2016, 164: 723-732.
- [25] HUANG H Y, ZHOU M, LI G Y. An endogenous approach to quantifying the wind power reserve [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2431-2442.
- [26] LI Y, LUKSZO Z, WEIJEN M. The impact of inter-regional transmission grid expansion on China's power sector decarbonization [J]. Applied Energy, 2016, 183: 853-873.
- [27] Explore energy data by category, indicator, country or region [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.iea.org>.
- [28] 2020 年一季度网上新闻发布会文字实录 [EB/OL]. [2021-02-17]. http://www.nea.gov.cn/2020-03/06/c_138850234.htm.
Text record of online press conference in the first quarter of 2020 [EB/OL]. [2021-02-17]. http://www.nea.gov.cn/2020-03/06/c_138850234.htm.
- [29] HOU Q C, DU E S, ZHANG N, et al. Impact of high renewable penetration on the power system operation mode: a data-driven approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 731-741.
- [30] Development and operation of active distribution networks [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://smartgrid.epri.com/doc/2%20-%20CIRED%202009%20Active%20Distribution%20Management%20Tutorial%20by%20Chad%20Abbey,%20CanmetEnergy.pdf>.
- [31] LIU J, CHENG H Z, ZENG P L, et al. Decentralized stochastic optimization based planning of integrated transmission and distribution networks with distributed generation penetration [J]. Applied Energy, 2018, 220: 800-813.
- [32] 马钊,周孝信,尚宇炜,等.未来配电系统形态及发展趋势[J].中国电机工程学报,2015,35(6):1289-1298.
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [33] 刘雪菁,朱丹,宋飞,等.风电机组高电压穿越技术研究[J].可再生能源,2013,31(11):34-38.
LIU Xuejing, ZHU Dan, SONG Fei, et al. Feasibility analysis on high voltage ride-through of wind turbines [J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(11): 34-38.
- [34] 国家电网有限公司风电场接入电网技术规定 [EB/OL]. [2021-

- 02-17]. <https://wenku.baidu.com/view/49da49c56137ee06eff918dd.html>.
Technical regulations for connecting wind farms of State Grid Corporation of China[EB/OL]. [2021-02-17]. <https://wenku.baidu.com/view/49da49c56137ee06eff918dd.html>.
- [35] 国家电网有限公司光伏电站接入电网技术规定[EB/OL]. [2021-02-17]. <https://wenku.baidu.com/view/ab5ffc51ad02de80d4d84013.html>.
Technical regulations for connecting PV of State Grid Corporation of China[EB/OL]. [2021-02-17]. <https://wenku.baidu.com/view/ab5ffc51ad02de80d4d84013.html>.
- [36] HAGH M, KHALILI T. A review of fault ride through of PV and wind renewable energies in grid codes [J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(4): 1342-1356.
- [37] 900 MW fault induced solar photovoltaic resource interruption disturbance report[EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.nerc.com/pa/rrm/ea/October%209%202017%20Canyon%202%20Fire%20Disturbance%20Report/900%20MW%20Solar%20Photovoltaic%20Resource%20Interruption%20Disturbance%20Report.pdf>.
- [38] 王晖,李莹,李文锋,等.并网逆变器复合电流环引起次/超同步振荡机理研究[J].电网技术,2017,41(4):1061-1067.
WANG Hui, LI Ying, LI Wenfeng, et al. Mechanism research of subsynchronous and supersynchronous oscillations caused by compound current loop of grid-connected inverter [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1061-1067.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 徐政.高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战[J].南方电网技术,2020,14(2):1-9.
XU Zheng. Three technical challenges faced by power grids with high proportion of non-synchronous machine sources [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(2): 1-9.
- [42] 李明节,于钊,许涛,等.新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J].电网技术,2017,41(4):1035-1042.
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042.
- [43] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等.虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J].中国电机工程学报,2017,37(2):349-360.
LYU Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [44] MOHAMMAD D, MOKHLIS H, SAAD M. Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 144-155.
- [45] BAJAJ M, SINGH A. Grid integrated renewable DG systems: a review of power quality challenges and state-of-the-art mitigation techniques [J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(1): 26-69.
- [46] KUECK J, KIRBY B, RIZY T, et al. Reactive power from distributed energy[J]. The Electricity Journal, 2006, 19(10): 27-38.
- [47] 杨硕,王伟胜,刘纯,等.双馈风电场无功电压协调控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(12):1-6.
YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Coordinative control strategy for reactive power and voltage of wind farms with doubly-fed induction generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 1-6.
- [48] 陈惠粉,乔颖,闵勇,等.风电场动静态无功补偿协调控制策略[J].电网技术,2013,37(1):248-254.
CHEN Huifen, QIAO Ying, MIN Yong, et al. Study on coordinated control strategy of dynamic and static reactive compensation in wind farm [J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 248-254.
- [49] 曹伟,张甜,傅业盛,等.同步调相机增强电力系统惯性和改善频率响应的研究与应用[J].电力系统自动化,2020,44(3): 1-10.
CAO Wei, ZHANG Tian, FU Yesheng, et al. Research and application for increasing inertia and improving frequency response of power system by using synchronous condenser [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 1-10.
- [50] 王彩霞,乔颖,鲁宗相.考虑风电效益的风火互济系统旋转备用确定方式[J].电力系统自动化,2012,36(4):16-21.
WANG Caixia, QIAO Ying, LU Zongxiang. A method for determination of spinning reserve in wind-thermal power systems considering wind power benefits [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 16-21.
- [51] Installation of synchronous condensers [EB/OL]. [2021-02-17]. https://www.electranet.com.au/wp-content/uploads/2019/08/ElectraNet_Syn-Con-Fact-Sheet_WEB.pdf.
- [52] Synchronous condenser market [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/synchronous-condenser-market-189197147.html>.
- [53] PHADKE A G, BI T S. Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(4): 619-629.
- [54] 曹军威,万宇鑫,涂国煜,等.智能电网信息系统体系结构研究[J].计算机学报,2013,36(1):143-167.
CAO Junwei, WAN Yuxin, TU Guoyu, et al. Information system architecture for smart grids [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(1): 143-167.
- [55] 关于提升电力系统调节能力的指导意见[EB/OL].[2021-02-17]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-03/23/content_5276855.htm.
Guiding opinions on improving power system regulation ability [EB/OL]. [2021-02-17]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-03/23/content_5276855.htm.
- [56] Flexibility in thermal power plants [EB/OL]. [2021-02-17].

- <https://www.agora-energiawende.de/en/publications/flexibility-in-thermal-power-plants/>.
- [57] 徐浩,李华强.火电机组灵活性改造规划及运行综合随机优化模型[J].电网技术,2020,44(12):4626-4635.
- XU Hao, LI Huaqiang. Planning and operation stochastic optimization model of power systems considering the flexibility reformation [J]. Power System Technology, 2020, 44 (12) : 4626-4635.
- [58] FABIAN O, KARL-MARTIN E. The “German paradox” in the balancing power markets [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 892-898.
- [59] 2017年第2季度电力辅助服务有关情况的通报[EB/OL]. [2021-02-17]. http://www.nea.gov.cn/2017-11/10/c_136742811.htm.
Announcement on the situation of power auxiliary services in the second quarter of 2017[EB/OL]. [2021-02-17]. http://www.nea.gov.cn/2017-11/10/c_136742811.htm.
- [60] 华东区域并网发电厂辅助服务管理实施细则(2019)[EB/OL]. [2021-02-17]. <http://hdj.nea.gov.cn/fileupload.download.d?id=1481985525>.
Implementation rules for auxiliary service management of power plants in East China (2019)[EB/OL]. [2021-02-17]. <http://hdj.nea.gov.cn/fileupload.download.d?id=1481985525>.
- [61] 华东区域发电厂并网运行管理实施细则(2019)[EB/OL]. [2021-02-17]. <http://hdj.nea.gov.cn/fileupload.download.d?id=1481985540>.
Implementation rules for power plants connection in East China (2019) [EB/OL]. [2021-02-17]. <http://hdj.nea.gov.cn/fileupload.download.d?id=1481985540>.
- [62] Forecasting wind and solar generation: improving system operations, greening the grid [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.osti.gov/biblio/1253120/>.
- [63] The value of wind power forecasting[EB/OL]. [2021-02-17]. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc830624/m2/1/high_res_d/1011280.pdf.
- [64] PEÑA I, MARTINEZ-ANIDO C B, HODGE B M. An extended IEEE 118-bus test system with high renewable penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 281-289.
- [65] Day ahead generation forecast and actuals wind [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.tennet.eu/e-insights/energy-transition/day-ahead-generation-forecast-actuals-wind/>.
- [66] WANG Y, ZHANG N, CHEN Q X, et al. Data-driven probabilistic net load forecasting with high penetration of behind-the-meter PV [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3255-3264.
- [67] 张钦,王锡凡,王建学,等.电力市场下需求响应研究综述[J].电力系统自动化,2008,32(3):97-106.
- ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106.
- [68] 国家能源互联网发展白皮书(2018)[R].北京:清华大学,2019.
- National energy internet development white paper (2018)[R]. Beijing: Tsinghua University, 2019.
- [69] Power Internet of Things makes demand side response more and more flexible[EB/OL]. [2021-02-17]. http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_mobile/col2019042502/2019-08/26/20190826090928053862074_1.shtml.
- [70] 储能产业研究白皮书(2020)[EB/OL]. [2021-02-17]. <http://esresearch.com.cn/#/resReport/Rreport>.
Energy storage industry research white paper (2020)[EB/OL]. [2021-02-17]. <http://esresearch.com.cn/#/resReport/Rreport>.
- [71] 姜海洋,杜尔顺,朱桂萍,等.面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J].电力系统自动化,2020,44(19):194-207.
- JIANG Haiyang, DU Ershun, ZHU Guiping, et al. Review and prospect of seasonal energy storage technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (19) : 194-207.
- [72] JULIAN D H, BYERS E, WADA Y, et al. Global resource potential of seasonal pumped hydropower storage for energy and water storage[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-8.
- [73] 朱寰,程亮,陈琛,等.多重应用场景下的电网侧储能需求评估方法[J].电力建设,2019,40(9):35-42.
- ZHU Huan, CHENG Liang, CHEN Chen, et al. Assessment method for grid-side storage demand under multiple application scenarios [J]. Electric Power Construction, 2019, 40 (9) : 35-42.
- [74] 跨省跨区专项工程输电价格[EB/OL]. [2021-02-17]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201809/t20180906_962275.html.
Transmission price of special projects across provinces and regions [EB/OL]. [2021-02-17]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201809/t20180906_962275.html.
- [75] Europe's one trillion climate finance plan[EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20200109STO69927/europe-s-one-trillion-climate-finance-plan>.
- [76] CHEN X, LU X, MCELROY M B, et al. Synergies of wind power and electrified space heating: case study for Beijing [J]. Environmental Science and Technology, 2014, 48(3): 2016-2024.
- [77] 王毅,张宁,康重庆.能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2015,35(22):5669-5681.
- WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in Energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [78] ZHANG N, LU X, MCELROY M, et al. Reducing curtailment of wind electricity in China by employing electric boilers for heat and pumped hydro for energy storage [J]. Applied Energy, 2016, 184: 987-994.
- [79] ZHANG X, STRBAC G, SHAH N, et al. Whole-system assessment of the benefits of integrated electricity and heat system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 1132-1145.
- [80] HERIB B, ANDRE F. A review at the role of storage in energy systems with a focus on power to gas and long-term storage [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1049-1086.
- [81] TIMO G, JOSE PABLO CHAVES A V, PEDROLINARES L, et al. A review of cross-sector decarbonization potentials in

- the European energy intensive industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 210: 585-601.
- [82] 顾泽鹏,康重庆,陈新宇,等.考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J].中国电机工程学报, 2015,35(14):3596-3604.
- GU Zepeng, KANG Chongqing, CHEN Xinyu, et al. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3596-3604.
- [83] CHENG Y H, ZHANG N, KIRSCHEN D, et al. Planning multiple energy systems for low-carbon districts with high penetration of renewable energy: an empirical study in China [J]. Applied Energy, 2020, 261: 114390.
- [84] 全球能源互联网发展合作组织.关于电制燃料和电制原材料问题的分析和研究[R].北京:全球能源互联网发展合作组织, 2019.
- Global Energy Interconnection Development and Corporation Organization. Analysis and research on the problems of electric fuel and electric raw materials [R]. Beijing: Global Energy Interconnection Development and Corporation Organization, 2019.
- [85] 关于太阳能热发电标杆上网电价政策的通知[EB/OL]. [2021-02-17]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201609/t20160902_963176.html.
- Notice on the benchmarking on-grid tariff policy for CPS generation [EB/OL]. [2021-02-17]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201609/t20160902_963176.html.
- [86] China 2050 high renewable energy penetration scenario and roadmap study [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.efchina.org/Attachments/Report/report-20150420/China-2050-High-Renewable-Energy-Penetration-Scenario-and-Roadmap-Study-Executive-Summary.pdf>.
- [87] DU E S, ZHANG N, HODGE B M, et al. The role of concentrating solar power toward high renewable energy penetrated power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6630-6641.
- [88] Renewable power generation costs in 2019[EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>.
- [89] Renewable energy statistics 2020 [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.irena.org/publications/2020/Jul/Renewable-energy-statistics-2020>.
- [90] 生物质能发展“十三五”规划[EB/OL].[2021-02-17].http://www.gov.cn/xinwen/2016-12/06/content_5143612.htm.
- The “13th Five-Year” Plan of China for bioenergy energy development [EB/OL]. [2021-02-17]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-12/06/content_5143612.htm.
- [91] Tracking power 2019: bioenergy power generation [EB/OL] [2021-02-17]. <https://www.iea.org/reports/bioenergy-power-generation>.
- [92] 中国地热能发展报告[EB/OL].[2021-02-17].<http://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/201808/P020180827339803573961.pdf>.
- China geothermal energy development report[EB/OL]. [2021-02-17]. <http://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/201808/P020180827339803573961.pdf>.
- [93] YUNHA K. Technology case study: Sihwa Lake tidal power station [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.hydropower.org/blog/technology-case-study-sihwa-lake-tidal-power-station>.
- [94] Key milestones for MEYGEN projects [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://simecatlantia.com/projects/meygen/>.
- [95] The development of marine renewable energy in China: prospects, challenges and recommendations [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/121/5/052079/pdf>.
- [96] Preliminary nuclear power facts and figures for 2019[EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.iaea.org/newscenter/news/preliminary-nuclear-power-facts-and-figures-for-2019>.
- [97] Nuclear power in the world today [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>.
- [98] 2019年1-12月全国核电运行情况[EB/OL].[2021-02-17]. <http://www.china-nea.cn/site/content/36862.html>.
- National nuclear operation situation from January to December in 2019 [EB/OL]. [2021-02-17]. <http://www.china-nea.cn/site/content/36862.html>.
- [99] 康重庆,陈启鑫,夏清.应用于电力系统的碳捕集技术及其带来的变革[J].电力系统自动化,2010,34(1):1-7.
- KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Innovation incurred by carbon capture technologies utilized in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 1-7.
- [100] 陈启鑫,康重庆,夏清.碳捕集电厂的运行机制研究与调峰效益分析[J].中国电机工程学报,2010,30(7):22-28.
- CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing. Operation mechanism and peak-load shaving effects of carbon-capture power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 22-28.
- [101] 通过CCUS(碳捕集,利用与封存)技术改造实现中国煤电碳减排[EB/OL].[2021-02-17].<https://iea.blob.core.windows.net/assets/dc3450c2-4694-4c8c-9db3-9843214ead8a/ChinaCCSretrofitreportCCUS.pdf>.
- Through CCUS (carbon capture, utilization, and storage) technology transformation to achieve China's coal power Carbon emission reduction [EB/OL]. [2021-02-17]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dc3450c2-4694-4c8c-9db3-9843214ead8a/ChinaCCSretrofitreportCCUS.pdf>.
- [102] SINGH S, HAO P J, LIU X, et al. Large-scale affordable CO₂ capture is possible by 2030[J]. Joule, 2019, 3(9): 2154-2164.

卓振宇(1995—)男,博士研究生,主要研究方向:电力系统规划、高比例可再生能源、优化规划算法等。E-mail: zhuozyl7@mails.tsinghua.edu.cn

张宁(1985—)男,博士,副教授,主要研究方向:电力系统规划、多能源系统、风电、光伏发电、光热发电、电力系统运行等。E-mail: ningzhang@tsinghua.edu.cn

谢小荣(1975—),男,博士,教授,主要研究方向:可再生能源电力系统,次同步振荡分析与控制,柔性输电系统等。E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn

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、能源互联网、低碳电力技术等。E-mail: cqkang@tsinghua.edu.cn

(编辑 杨松迎)

Key Technologies and Developing Challenges of Power System with High Proportion of Renewable Energy

ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, LI Haozhi, KANG Chongqing

(State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The integration of high proportion of renewable energy will change the morphology of the power systems and bring great changes to the fields of power system stability and control, dispatch operation, and planning decision. Based on the development characteristics of the system at different levels of renewable energy penetration rates, this paper divides the future development process of power system to a high proportion renewable energy into three stages and summarizes the characteristics of each stage. Combining the research results in the field, this paper comprehensively analyzes the challenges that will arise during the development of power systems with high proportion of renewable energy, and a series of technical solutions for the power systems to accommodate the high proportion of renewable energy. The principle, economic cost and development prospects are also analyzed and compared. Studies have shown that the integration of high proportion of renewable energy will face a series of technical challenges, and every single key technology can only solve certain part of the problems. The application of these technologies in future power systems with high proportion of renewable energy depends not only on their technical performance, but also on their economics and complementarity with other technologies. The morphology and development roadmap of China in future power system with high proportion of renewable energy depends on the relative development pace of various key technologies and their coupling effects.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900100) and National Natural Science Foundation of China (No. 51925701).

Key words: high proportion of renewable energy; penetration rate of renewable energy; development roadmap; technical economy

