

特大型新能源基地面临挑战及未来形态演化分析

张玮¹, 白恺¹, 鲁宗相^{2,3*}, 李海波³, 郭金智¹, 王泽森¹

(1. 国网冀北电力有限公司, 北京市 西城区 100054;

2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084;

3. 清华四川能源互联网研究院, 四川省 成都市 610299)

Analysis of the Challenges and Future Morphological Evolution of Super Large-scale Renewable Energy Base

ZHANG Wei¹, BAI Kai¹, LU Zongxiang^{2,3*}, LI Haibo³, GUO Jinzhi¹, WANG Zesen¹

(1. State Grid Jibei Electric Power Company, Xicheng District, Beijing 100054, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China;

3. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610299, Sichuan Province, China)

Abstract: Under the background of promoting the high-quality and leap-forward development of renewable energy in China, large-scale development, integration and transmission via long distance of renewable energy has become one of the most important paths for China's renewable energy construction. Super large-scale renewable energy (SLRE) base has become an important conformation for the future. Due to the lack of conventional AC synchronous generator sets and reliable reserve capacity, the challenge of SLRE base are prominent, including the stability of base, renewable energy utilization rate and power supply adequacy. Its morphological structure and evolution path have become a hot issue of current concern. This paper systematically combs the latest academic research results, studies and judges the possible power and grid form of SLRE base in future and analyzes the characteristics. Further, in view of the challenges of weak system strength, insufficient flexibility, and prominent contradiction between source and network coordinated operation in SLRE base, planning support technologies and key scenario operation technologies, such as source and network coordinated planning, flexibility special planning, and grid strength improvement special planning are proposed. Finally, taking Zhangbei SLRE gathering area as an example, combined with its resource endowment, this paper analyzes the current situation of renewable energy base and studies the development trend of power and grid form, and puts forward the key supporting technology system to adapt to

the future development of Zhangbei renewable energy base, which provides reference for the short-term and medium-term planning, and reliable operation of Zhangbei SLRE base system.

Keywords: super large-scale renewable energy base; morphological evolution; operation optimization; flexibility balance; short circuit ratio

摘要: 在推动中国新能源高质量跃升式发展背景下, 大规模新能源开发、汇集和远距离输送成为新能源建设的重要路径之一, 特大型新能源基地成为未来的重要形态。由于缺少常规交流同步发电机组和可靠备用容量, 特大型新能源基地稳定性挑战、新能源利用率与供电充裕性矛盾凸显, 其形态结构及演化路径成为当前关切的热点问题。系统梳理了当前最新学术研究成果, 研判特大型新能源基地未来可能的源网形态并做特征分析; 进一步, 面向特大型新能源基地系统强度弱、灵活性不足、源网协调运行矛盾突出等挑战, 针对性提出源网协调规划、灵活性专项规划和系统强度提升措施的优化配置技术等规划支撑技术和关键场景运行技术; 最后以张北特大型新能源汇集区为例, 结合其资源禀赋分析新能源基地现状并研判未来源网形态发展趋势, 提出适应张北特大型新能源基地未来发展的关键支撑技术体系, 为张北特大型新能源基地近中期规划和可靠运行提供参考。

关键词: 特大型新能源基地; 形态演化; 运行优化; 灵活性平衡; 短路比

0 引言

当今人类社会面临能源安全和气候变化等多重严峻考验, 推动能源系统清洁、低碳转型成为各国能源

基金项目: 国网冀北电力有限公司科技项目(52010121N00L)。

Science and Technology Foundation of State Grid Jibei Electric Power Company (52010121N00L)。

发展的共同目标, 规模化开发风电、光伏已经成为全球趋势^[1]。截至2021年底, 全球风光发电量占比首次超过10%^[2], 中国风光发电量占比达到11.7%^[3]。为实现新型电力系统建设战略目标, 中国提出进一步推动新能源高质量跃升式发展。2021年3月发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中提出, “十四五”期间将重点发展九大清洁能源基地、五大海上风电基地。2022年1月, 国家发展改革委与国家能源局发布的《“十四五”现代能源体系规划》中明确提出, 有序推进风电和光伏发电集中式开发, 加快推进以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地项目建设。因此, 具有千万kW级及以上新能源装机规模的“特大型新能源基地”将成为未来中国新型能源供给体系的重要组成部分。

特大型新能源基地由海量风电、光伏发电单元及其汇集、输送网络组成, 与常规电源基地的结构及特性相比呈现显著区别。以新能源为主体的电源结构与气象、资源强耦合而强波动; 可再生能源多电压层级汇集网络与本地电网深度融合而影响供电或导致风光利用率问题; 本地消纳和外送输出并举, 使高比例可再生能源电源的特性与源端电网的本地负荷供给及跨区联络输电功能深度耦合。这些特性给特大型新能源基地的规划和运行带来了巨大的技术挑战。为在高度电力电子化条件下实现趋近同步机的技术特征, 需探讨不同电源结构方案在支撑性能、设备成本、技术成熟度、系统经济性等方面的差异; 为提高电网的灵活调节性能, 需比较特/超高压柔性交流、多端柔直组网或柔性直流、低频/分频等差异化输电技术对不同新能源基地运行场景需求的适应性。特大型新能源基地的规划, 除了电力电量平衡优化工作, 需针对源网荷储运行特性迥异、灵活性调节不足、新能源基地系统强度弱等问题提出解决方案, 并对海量场景及其运行特性开展分析。

目前, 特大型新能源基地形态演化的专门研究相对较少, 对于新能源基地输电方式^[4]、运行方式优化^[5]、稳定机理^[6]、优化规划^[7]等方面的技术探讨, 缺乏针对特大型新能源基地可能形态及其演化路径的技术方案, 难以支撑中国新型电力系统建设。

本文首先研判特大型新能源基地未来可能的源、网形态特征, 进一步分析其规划面临的挑战, 提出应开展的专项规划及规划场景运行特性, 最后结合张家口坝上特大型新能源基地现状及下阶段大规模开发

面临的挑战, 分析未来源、网形态与支撑技术演化路径。

1 特大型新能源基地未来形态特征

随着新能源比例的不断提高, 电力系统的形态特征随之发生演变。本章根据系统多时间尺度供需平衡和安全稳定基本原理, 分别从电源、电网两个角度研判特大型新能源基地未来形态特征要求, 提出源、网侧未来可能的形态特征。

1.1 源侧可能的形态特征

据相关专家测算^[8], 中国2030年同步机组出力占总负荷之比大于50%、80%的累计时段将分别达到全年时长的100%和约61%。在新能源低出力时段需要相应的灵活性同步机电源来维持系统稳定, 因此, 新型电力系统仍以交流同步机制运行。

目前局部高比例新能源替代同步机带来的电力系统安全问题已经陆续显现, 出现过多次不同机理的振荡现象, 如2013年宁夏吴忠直驱风电场发生95 Hz超同步振荡, 2015年新疆阿拉光伏电站出现30 Hz次同步振荡, 2015年西北电网大规模风电/光伏汇集区域发现10~110 Hz等次/超同步频率分量等。其中, 西北电网振荡问题最终导致天中直流送端配套的3台66万kW火电机组因轴系次同步扭振动作跳闸, 西北电网频率降低至49.91 Hz, 严重威胁系统安全运行^[9]。2019年英国“8·9”停电事件中, 风电集中区域产生10 Hz左右次/超同步振荡导致风电机组大规模脱网, 引发低频减载装置动作、切除大量用电负荷。高比例新能源接入系统带来的系统低惯量问题也是焦点。系统发电与用电存在一定差值时, 惯量越小的系统频率变化越快, 即新能源出力占比越高的系统, 其频率偏差响应越大, 系统因故障发生大功率缺额时, 可能因频率下降过快导致触发低频减载动作而损失负荷, 发、用电平衡差值的安全裕度更小(见图1)^[10-15]。因此, 如何保障系统惯量, 使系统惯性常数趋近传统同步机水平, 是特大型新能源基地安全稳定运行的关键保障。

表1对比了各类电源的支撑系统稳定运行的性能。可见, 与同步旋转发电机相比, 电力电子形式接入电网的传统跟网型新能源发电未考虑系统稳定支撑能力, 最大功率跟踪运行方式下功率上调性能差, 无惯量、电压耐受能力弱、暂态电压支撑能力弱。随着新能源装机和电量占比逐年攀升, 中国2022年启动实施

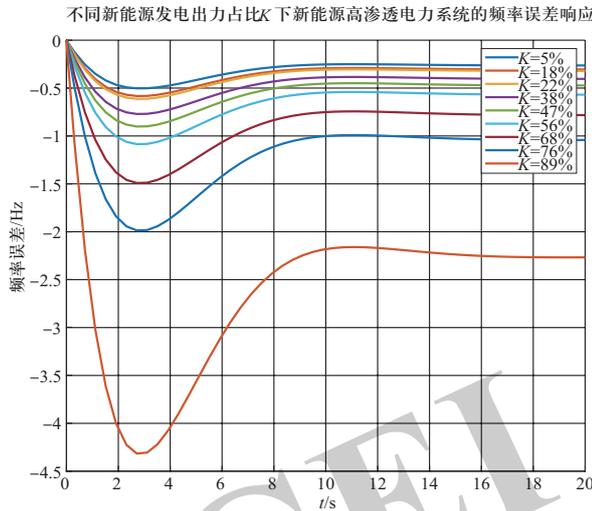


图1 不同新能源出力占比下系统频率误差响应
Fig. 1 System frequency error response with different proportion of renewable generation

了风电接入电力系统技术条件、并网电源一次调频技术规定及试验导则等推荐性国家标准，要求风电场和光伏电站应具备惯量响应、一次调频、连续电压穿越等能力，目前处于启动实施阶段。

为满足新能源装机容量持续增长态势下的新能源基地的稳定运行^[16-22]，高度电力电子化条件下新能源场站需具备趋近同步机的技术特征，本文综合各类电源技术特点及其新技术成熟度、成本发展趋势，考虑新能源机组与其他辅助手段相结合的思路，研判未来特大型新能源基地的电源侧可能形态，如表2和图2所示。

电源结构以新能源为主体，其中大量存量场站仍将以跟随型并网方式接入系统，但将通过改进变流器并网策略、增加新型无功补偿装置、增加调相机、改进场站控制策略等方案，提高场站电压穿越能力、一次调频性能，提高对系统的电压和频率稳定支撑能

表1 各类型电源系统稳定支撑能力对比

Table 1 Comparison in system stability supporting capability of power supplies

	功率调节范围 (P_n)	典型惯量/s	一次调频功率变化幅度 /(调节时间要求/s)	电压耐受 (电压穿越)能力	静态无功调节 范围	暂态电压稳定 支撑能力
火电	0.3~1 (深调峰) 0.5~1 (常规)	8~12	$\geq 6\% \sim 10\% P_n / 45 \text{ s}$	$1.3 U_n / 1 \text{ min}$		
光热	0.2~1	4		$1.3 U_n / 1 \text{ min}$	功率因数超前- 滞后0.85	强励
水电	0.2~1	3~6	$\geq 8\% P_n / 30 \text{ s}$	$2 U_n / 1 \text{ min}$		
核电	0.85~1	6~9	$\geq 6\% P_n / 45 \text{ s}$	$1.3 U_n / 1 \text{ min}$		
风机场*	仅向下	0.15 (双馈) 0 (直驱)	无 (传统跟随型) 向上 $\geq 6\% P_n$ 、向下 $\geq 10\% P_n$ /15 s (新颁推荐国标)	$1.3 U_n / 0.2 \text{ s}$ $1.1 U_n / 10 \text{ s}$ $0.9 U_n / 2 \text{ s}$ $0.2 U_n / 0.625 \text{ s}$	机组功率因数 超前-滞后0.95 通过配置静态、 动态无功补偿 装置及自动电	弱
光伏电站*	仅向下	0	无 (传统跟随型) 向上 $\geq 6\% P_n$ 、向下 $\geq 10\% P_n$ / $\leq 15 \text{ s}$ (新颁推荐国标)	$1.3 U_n / 0.5 \text{ s}$ $1.2 U_n / 10 \text{ s}$ $1.1 \sim 0.9 U_n$ $0.9 U_n / 2 \text{ s}$ $0.2 U_n / 0.625 \text{ s}$ $0 U_n / 0.15 \text{ s}$	基本具备稳态 和动态电压稳 定需求	

(注: *指未专门设计调频、惯量功能的传统跟随型并网新能源机组或储能单元)

表2 电源侧汇集形态特征

Table 2 Power side collection form characteristics

	电源	灵活性	支撑系统稳定能力	技术成熟度
新能源	跟随型新能源		弱	成熟
	改进型新能源 (如虚拟同步机等)	无, 可配置储能提高	配置新型无功补偿装置、调相机、储能等, 结合 新能源变流器先进控制技术提高部分能力	示范
	构网型新能源		趋近于同步发电机, 具备惯量、一次调频、主动 调压、阻尼控制等	理论和实验室阶段
储能	抽水蓄能	强	强	成熟
	压缩空气储能	强	较强	示范
	独立电化学储能	强	取决于并网性能设计	推广应用

续表

	电源	灵活性	支撑系统稳定能力	技术成熟度
	水电	较强	强	成熟
其他同步机 类电源	生物质	较强	强	成熟
	光热发电	较强	强	示范
	CCUS燃煤机组	较强	强	示范

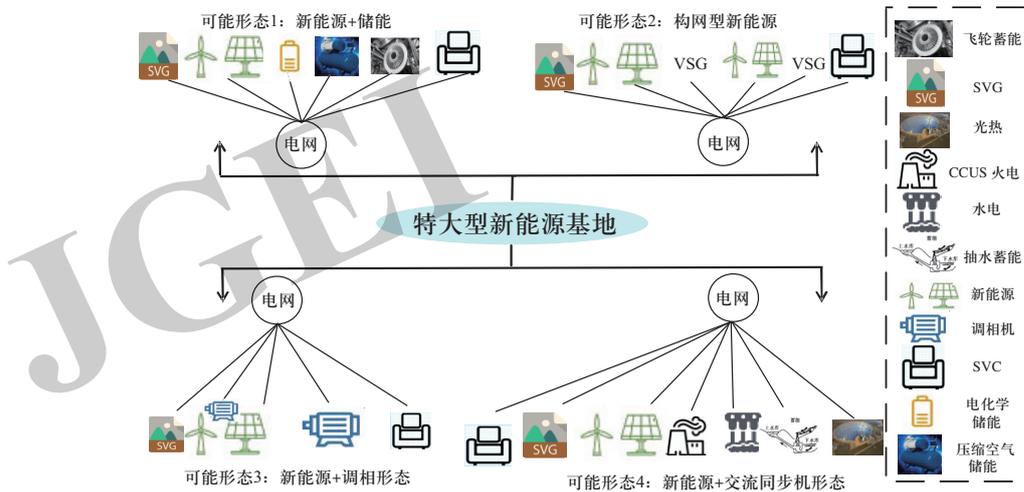


图 2 特大型新能源基地电源可能的形态预判

Fig. 2 Prospect of power source forms in SLRE (super large-scale renewable energy) base

力。新增的构网型新能源场站，除了上述能力，还应通过增配储能，具备接近同步发电机特性的惯量、一次调频、主动调压、阻尼控制等能力。同时，为提高风、光新能源基地的汇集系统和输电通道利用率，可配置抽水蓄能、压缩空气和电化学储能等储能系统，平移大发时段电量至小发时段，前两者还可提供同步机的电压和频率稳定能力，满足基地持续增量开发需求。另外，还可以根据当地清洁能源资源禀赋条件，建设水电、生物质和光热电站，通过提高同步发电机占比，提高汇集区域电网强度。必要时还可能通过增加具备CCUS功能的火电机组大幅提高系统强度。未来特大型新能源基地的电源侧可能形态与资源禀赋、近区和受端电网稳定运行条件、各竞争技术发展趋势等有关。

1.2 网侧可能的形态特征

新能源机组单机容量小、并网电压等级低，必须逐级升压、汇集、输送，实现规模开发和运行。典型新能源场站由风电机组或光伏发电单元经站内10 kV/35 kV汇集系统升压至110 kV/220 kV/330 kV升压站，站内配一定容量无功补偿装置，通过场站送出线路汇

集到500 kV或750 kV汇集站后，接入交流大电网或直流换流站，或继续汇集升压到1000 kV特高压交流站。在有特高压直流或交流的特大型新能源基地，新能源汇集站会继续升压汇集，接入特高压交流或特高压直流系统送端。同时，新能源电站虽然可以通过配置一定容量储能，一定程度改善发电出力的随机性和波动性，但与传统机组相比，平稳性和可控性仍存在较大差距。

电力电子接口并网且长距离汇集和输送导致高比例新能源系统电气强度弱，发电能力与气象、资源强耦合而强波动、强随机导致新能源发电可控性差，两者给特大型新能源基地汇集与输送网络提出了“柔性化”要求，即电网应在结构形态上多元化、运行控制上高度灵活，新能源场站的协同可控性、抗扰能力、主动支撑能力逐步提高，以共同保障特大型新能源基地的安全稳定和可靠供电能力。

1) 汇集网络。

表3和图3给出了特大型新能源基地的汇集网络的形态及其特征。

采用传统的新能源场站交流汇集方式虽然具有接线简单、造价低等优点，但与主网电气距离较远的新

能源基地末端，在各种大扰动下难以从主网中获得足够的电压、频率和宽频阻尼支撑，可能会造成脱网甚至更严重的连锁事故^[23-24]。

近些年，随着高压大容量电力电子技术进步和成本下降，给电网“柔性化”带来各种技术路线可能性，可以根据具体发电特性和电网场景选择不同的新能源汇集电网形态。

表3 特大型新能源基地汇集系统形态特征

Table 3 Connection & transmission grid forms and characteristics of SLRE base

汇集网络形态	支撑方式	优点	缺点	技术成熟度
交流汇集-交流外送	新能源场站或汇集站加装分布式调相机等	强电压支撑	投资大，可能存在系统功角稳定问题	成熟
	增加抽水蓄能、小水电等同步发电机	同时具备灵活性和电网支撑能力	资源要求高，投资大，建设周期长	成熟
	光资源开发以光热为主、光伏为辅	同时具备灵活性和电网支撑能力	资源、地理环境要求高，投资大，可靠性略低	示范工程
	构网型风电/光伏等	投资较少	全电力电子系统控制复杂	理论和实验室阶段
交流汇集-超高压柔直外送	柔直V/f控制	风电场和光伏电站无特殊接入技术要求，输电系统电压、频率控制稳定	投资大、全电力电子系统控制复杂，高压大容量电力电子装备可靠性略低	示范工程至推广阶段
全直流汇集外送	柔直V/f控制	变流环节少，能效高，控制便捷	不成熟，应用场景有限	理论和实验室阶段

2) 新能源输送网。

新能源输送网是将新能源汇集站或群的汇入节点至负荷中心、或至主网的链接电网，是保障特大型新能源基地电力平衡和消纳的关键通道，其形态受新能源发电特性影响，应具备足够的电压支撑能力、电网柔性或韧性以及潮流控制能力，以提高输电网运行安全和新能源消纳保障能力^[25-28]。新能源输送网主要形态包括超/特高压交流输送、常规特高压直流、多端高压柔直输电、柔性直流输电、分频/低频输电等方式(见表4和图4)。

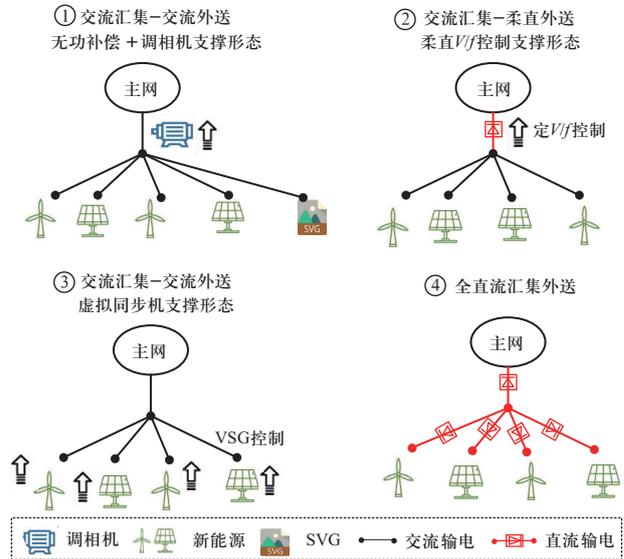


图3 特大型新能源基地汇集网络预判形态

Fig. 3 Prospect of connection system forms of SLRE base

表4 新能源基地输电网形态特征

Table 4 Transmission system forms and characteristics of SLRE base

输电网形态	优点	缺点	技术成熟度
常规特高压直流	投资低、传输容量大，控制简单	输电灵活性差，滤波需求容量大，交流系统故障的换相失败频发	商业应用
特/超高压交流 UHVAC	简单，投资低	串补可能带来低频振荡风险，部分远端新能源场站需配置调相机提高短路比	广泛商业应用
多端高压柔直 MT-VSC-HVDC	潮流控制和稳定支撑能力强	高投资	商业应用
柔直电网 MMC-HVDC	潮流控制和稳定支撑能力强	高投资，存在新型振荡风险(如宽频振荡等)	小规模示范应用
分频/低频输电 FFTS/LFTS	投资较柔直低	多频率系统控制复杂，研发大量新装备	示范初期

2 特大型新能源基地中长期规划面临挑战及关键支撑技术

2.1 特大型新能源基地规划面临挑战

经典的电力系统规划以负荷预测作为初始条件，分析煤、水等资源，依据资源条件提出电源规划方案并优化，电源规划的最大容量与负荷最大容量相比，具有一定的裕度。电网以保障电源有效送出为目的，

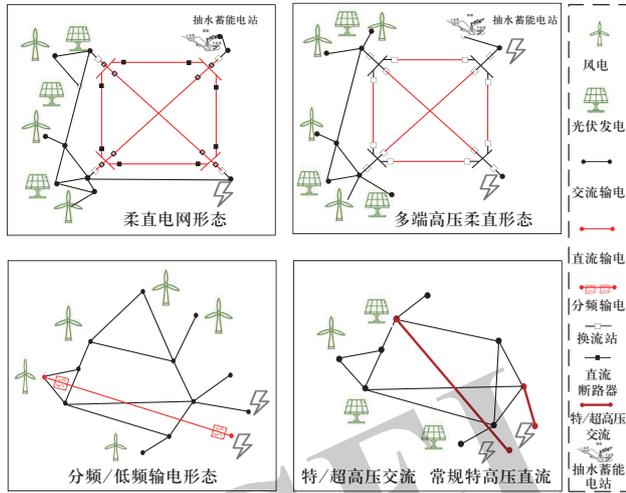


图 4 特大型新能源输电电网预判形态

Fig. 4 Prospect of transmission system forms of SLRE base

其规划同样具有较高的裕度。然而对强不确定性的特大型新能源基地规划时, 上述典型规划方法显然无法适用^[29-32], 具体表现在以下方面。

1) 源、网技术协调预判不足, 直接影响系统接入和输送新能源的能力。

随着电力系统新能源装机增长要求和新能源技术发展, 新能源基地建设往往长达十几年、几十年, 过程通常伴随着新能源场站并网特性差异、汇集网络和输电网络差异, 系统的电压、振荡、频率等稳定问题呈现出多样、多变的复杂性^[33-44]。若不能在规划阶段提前考虑源网协调问题, 很难避免已投运的新能源因送出稳定问题导致送出受阻而限制出力, 同时也可能出现新能源开发滞后带来输电资产利用效率低下的问题。因此, 针对新能源基地的源网协调规划投产时序协同问题, 需针对不同基地技术特点, 考虑源网协调特性开展针对性优化规划^[45-48], 满足新能源送出和电网稳定要求。

2) 缺少新能源基地灵活性资源专项规划, 规划方案难以满足运行阶段实际调节需求。

传统规划以典型场景为主, 但新能源基地出力场景与资源气象因素紧密耦合, 难以通过有限场景覆盖, 运行阶段通常会超出传统规划假设的约束方式边界, 导致新能源无法送出, 降低了新能源利用率。因此针对特大型新能源送端系统, 应在规划阶段充分考虑灵活性资源的优化配置, 通过全年8760 h精细化生产模拟校验灵活性规划方案是否能覆盖海量运行场景。

3) 缺少针对电网强度提升的专项规划, 电力电子化新特征带来的安全稳定约束未能在规划阶段充分考虑。

常规同步发电机组因其同步特性、自然惯量和强励能力, 是交流电网安全稳定的“基石”, 能有力提升和支撑近区电网强度, 且其安全稳定控制技术成熟, 在传统规划中已经积累了大量成熟经验, 因此, 系统规划时较少考虑系统同步安全稳定特性和电网强度问题。然而面对特大型新能源基地, 除了可能有少量抽蓄是同步机组, 系统中新能源、柔性交直流装备、新型储能等多样化电力电子设备及复杂控制设备接入^[49-52], 系统中宽频振荡风险明显提高, 低短路比、系统低惯量常数等弱强度电网问题, 都对后期新能源基地的稳定运行和新能源利用率产生制约, 传统规划缺乏考虑电网强度提升的规划工作。

2.2 关键支撑技术

应对特大型新能源基地规划方面存在的挑战, 需立足新能源基地实际资源气象环境与接入送端电网强度等情况, 以保证新能源基地系统安全运行为基本前提, 以源网协调互动及灵活性规划为支撑, 依托数字化技术, 统筹源、网、荷、储资源, 多维度提升系统灵活调节能力、安全保障水平和综合运行效率, 满足特大型新能源基地安全送出、经济高效的综合性目标。特大型新能源系统规划关键支撑技术体系如图5所示。

1) 源网荷储协调规划技术。

源网荷储协调规划技术是使规划期内系统总成本净现值最小化, 包括各区域电力平衡约束、电量平衡约束、调峰能力约束、调节速率约束、输电容量约束、输电电量约束、源网荷储各类元素扩展规模约束、清洁能源占比约束、二氧化碳和主要污染物排放约束等十余类约束, 实现源网荷储一体化规划^[53-55]。



图 5 特大型新能源基地系统规划关键支撑技术

Fig. 5 Key planning technologies of SLRE base

2) 灵活性资源规划技术。

灵活性规划技术是传统电力系统规划技术的扩展和优化,是针对系统不确定性特性及应对方案的专项规划方法,其关键流程如图6所示。通过源网荷储各侧统一电力系统多时空尺度灵活性的定义和数学描述方法,实现电力系统全环节灵活性需求与资源的平衡配置,通过灵活性不足概率、不足期望等量化评价指标,对系统灵活性资源进行优化规划直至满足多时空灵活性资源供需平衡需求。面对特大型新能源基地送出需求,也可通过接入主网之间的互联互通能力优化规划方法,结合空间尺度灵活性互补特性,充分发挥输电网之间的灵活性资源互济潜力,提高特大型新能源基地多时空灵活性资源供需平衡^[56-59]。

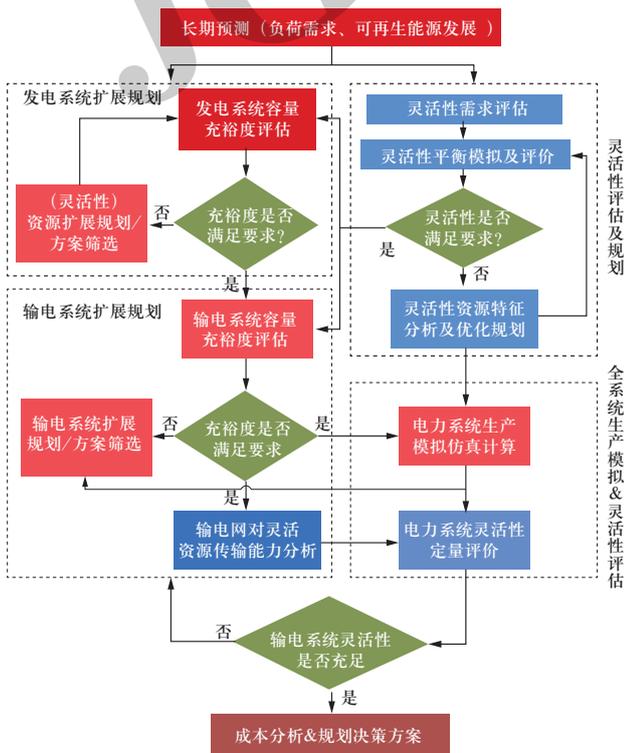


图6 广义灵活电源规划技术的流程图

Fig. 6 Flow chart of generalized flexibility planning method

3) 系统强度提升措施的优化配置技术。

为解决特大型新能源系统存在弱阻尼、低惯量、低短路比等影响稳定运行的问题,还需要开展系统强度提升专项规划,主要工作是合理配置包括调相机、无功补偿装置、储能、构网型新能源等能够提供主动支撑能力的系统补强设备,并开展系统强度分析和优化提升。

系统强度提升专项规划模型如下:

$$\min Z = C^{\text{pm}} \sum_{i=1}^{N_b} S_i^{\text{pm}} + C^{\text{p}} P^{\text{es}} + C^{\text{s}} E^{\text{es}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} F(P^{\text{es}}, E^{\text{es}}, x, t) \leq 0, & (t=1, \dots, T) \\ \frac{\sum_{i=1}^{N_b} \sum_{t=1}^T (P_i^{\text{re,max}}(i, t) - P_i^{\text{re}}(i, t))}{\sum_{i=1}^{N_b} \sum_{t=1}^T P_i^{\text{re,max}}(i, t)} \leq 5\% \\ K^{\text{SCR}}(i, t, S_i^{\text{pm}}) \geq 2, & (i=1, \dots, N_b) \end{cases} \quad (2)$$

式中: Z 表示与成本有关的目标函数; C^{pm} 、 C^{s} 、 C^{p} 分别表示调相机单位容量配置成本、储能单位能量和单位功率配置成本; 函数 F 表示传统生产模拟模型中的传统约束集合; x 表示传统生产模拟中决策变量的集合; P^{es} 、 E^{es} 分别表示储能功率与能量; K^{SCR} 表示系统各节点短路比值; S_i^{pm} 表示节点 i 处所配置的调相机容量; $P_i^{\text{re,max}}$ 、 P_i^{re} 分别表示新能源出力的最大值与运行值; T 、 N_b 分别表示运行总的时刻数、新能源场站数。函数 F 包括电力电量平衡约束、储能运行约束、新能源场站出力约束、调相机无功出力约束、系统潮流约束; 其他约束包括新能源场站的弃电率小于等于5%、新能源场站 i 在 t 时刻的短路比值大于等于2等。

2.3 未来规划场景特性及其运行分析

新能源电源与资源气象呈现强耦合特性,气象因素引起的风光功率预测偏差大、可信容量低,使得系统运行优化不足;在新能源大出力场景下仍存在输送断面满载、新能源运行策略不满足准同步机特性等潜在安全风险和挑战。因此有必要针对以上未来规划场景特性开展运行分析和优化,建议的支撑技术整体框架如图7所示。



图7 特大型新能源基地运行场景关键支撑技术

Fig. 7 Key technologies for operation of SLRE base

1) 针对新能源功率预测在部分时间尺度存在缺失, 极端天气下的预警能力不足的问题与挑战, 开展多时间尺度精准预测, 在1~15 d风电/光伏发电能力预测方面, 可采用全球多模式集成的双级时间注意力和空间卷积U-Net深度学习实用技术; 在新能源短期及超短期预测方面, 可采取概率预测及极值预测方法; 在新能源极端转折天气中爬坡预测方面, 采用极端数值天气预报下的大规模风电/光伏功率爬坡的加权集合预测方法; 在超短期预测方面, 采用基于快速循环、精细化、集合数值天气预报 (numerical weather prediction, NWP) 技术和时空图神经网络的日内发电功率预测技术^[60-63]。

2) 针对新能源可信容量低, 在多时间尺度调度运行优化中难以充分考虑的挑战, 应用基于人工智能的多时间尺度调度运行优化技术, 结合新能源多时间尺度预测, 在电网方式安排、调度计划制定及调度运行优化时, 对系统各类灵活性资源统筹优化分配, 包括火电存煤、水电库容、燃气输送量、抽水蓄能上下库容以及未来制氢用能存储量等多类型资源, 进行多时间尺度预测和调整优化, 提升电网的调度运行优化能力^[64-67]。

3) 针对现有新能源运行策略难以满足其准同步机涉网性能的运行要求的挑战, 可应用动力学建模、稳定性分析、优化控制等数学工具, 提升新能源主动同步能力。在频率支撑方面, 目前主要采取新能源参与电力系统一次调频控制的虚拟惯量控制^[68-69]、以虚拟同步机 (VSG)^[70-71]为代表的构网型技术、场站级风光储联合调频等。在电压支撑方面, 主要以稳态电压无功控制、电网强度提升^[72-74]、暂态高/低电压穿越能力提升、调相机配置等为主^[75-80]。

4) 针对新能源大出力场景下电网输电能力断面极限不足, 存在新能源消纳受阻的挑战, 需要对重满载或存在过载风险的输电断面, 采用基于人工智能驱动的动态极限提升技术, 根据新能源基地出力波动, 优化稳控装置自适应策略, 实现输电极限自适应。在新能源出力较大时自适应提升断面稳控限额, 应对新能源送出系统输电能力不足的挑战^[81]。

5) 针对新能源基地运行场景下系统数据信息量大、安全校核模型和优化计算复杂的挑战, 应用数字化技术 (如AI技术) 提升各项运行功能模块性能。在新能源预测方面, 通过对气象、新能源历史运行数据等开展大数据分析并应用AI算法, 最大限度地实现对新能源发电的精准预测; 在优化调度方面, 利用AI技

术和大数据技术, 快速计算源荷在空间与时间上的不平衡差额, 并在更大范围内实现对多区域灵活调节资源的高效分配; 在稳定控制方面, 借助AI技术可快速感知系统动态安全风险, 准确进行暂态稳定预测并及时预警高风险运行方式, 同时进行最优的紧急控制和负荷频率控制策略, 实现电网的安全稳定运行^[82-83]。

3 张北特大型新能源基地源网形态演化路径预判及关键支撑技术分析

基于上述分析, 本章以张北特大型新能源基地及其所在的华北电网区域作为分析对象, 首先分析基地运行现状和规划装机容量持续“倍增”带来的技术挑战, 参照第2章的技术思路预判2025年、2028年、2030年源侧、网侧可能形态及特征, 最后针对性提出张北特大型新能源基地未来规划和运行层面亟需开展的关键支撑技术研究。

3.1 张北特大型新能源基地现状及挑战

冀北新能源基地是国家九大清洁能源基地之一, 其中张北坝上地区风、光资源丰富, 是距离北京负荷中心仅200~300 km的“风光储一体化”基地, 自张家口2011年被列为国家级可再生能源示范区以来, 集中式新能源装机高速增长。截至2021年底, 张北坝上地区新能源装机总量近2000万kW, 其中风电1500万kW, 光伏近500万kW, 主要通过三大通道集中外送消纳: 一是交流汇集至内蒙火电西电东送的点对点500 kV超高压交流输电通道, 接入京津唐电网, 该通道已接入约500万kW风电和160万kW光伏; 二是以孤岛方式接入500 kV张北柔性直流电网的2个换流站, 通过与丰宁地区抽蓄机组群的换流站、北京受端换流站形成四端柔性直流电网, 已接入300万kW风电和160万kW光伏; 三是交流汇集接入张北—雄安1000 kV特高压北电南送输电通道, 接入华北交流特高压主网架, 已接入约700万kW风电和160万kW光伏。

在近十年发展过程中, 由于张北新能源装机爆发式的增长和送出形态的多样性, 陆续出现新能源汇集电网暂态电压失稳、风电与串补次同步振荡、风电与柔性直流宽频带振荡等不同运行风险骤增的问题, 通过大量研究并实施新能源低/高电压穿越改造、大规模新能源集群电压协同控制, 风电机组阻抗重塑、柔直先进开环策略等, 解决了大量制约新能源安全稳定送出的技术难题, 保障了张北新能源基地的持续开发,

促进了中国风电并网技术条件、光伏电站接入电网技术条件等技术标准制订修订,大力促进了中国新能源并网和运行技术发展。

张雄源网协调送端电网短路比过低,已成为制约张北新能源送出的关键因素。截至2021年底,张北—雄安特高压工程汇集新能源约866万kW,但因送端电网短路比较低、暂态过电压严重等因素制约(如图8所示),张雄特高压送出极限仅为新能源接入规模的45%,新能源送出受阻较为严重。

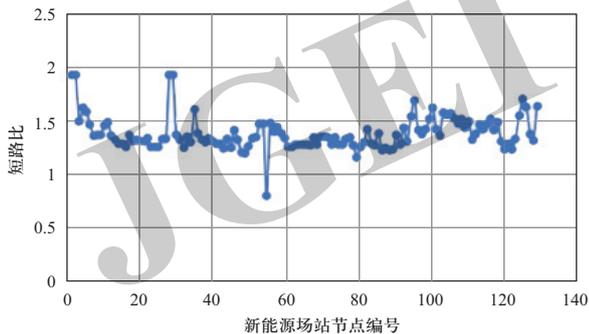


图8 张雄特高压送端新能源场站短路比

Fig. 8 Short circuit ratio of VRE (variable renewable energy) power stations in Zhang-Xiong UHVAC sending-end system

同时,地区部分500 kV及以下汇集系统断面受限是影响新能源利用率、阻碍地区进一步大规模开发的重要因素。另外,京津唐电网供暖期调峰压力也是影响新能源利用率的重要因素之一。京津唐电网新能源装机占比超过35%,净负荷呈现出典型的“鸭型”曲线,“一日双峰”特性对调峰带来极大挑战,如图9所示。

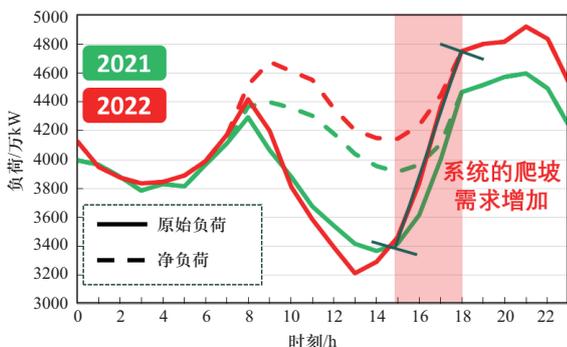


图9 京津唐电网典型日负荷曲线

Fig. 9 Typical daily load curve of Jingjintang power grid

综上,在新能源基地规划前期应充分考虑长时间尺度下源网特征的演化,从更大资源配置范围的角度上,将多类型灵活性资源的时空互济能力和电力电子

化特性下的安全稳定约束纳入新能源基地规划体系。

3.2 张北特大型新能源基地源网形态演化分析

1) 电源侧演化分析。

张北地区属于国家风能、太阳能二类优质资源区。在80 m高度年平均风速基本在6~9 m/s,年辐照值在5040~6300 MJ/m²,年日照小时数在2700~3300 h。此外,张北地区可利用土地资源丰富,面积广阔、地势平坦,利于集中式风电、光伏大规模开发利用。风能资源可开发容量达4000万kW以上,太阳能发电可达3000万kW以上。未来风电、光伏、光热发电仍有巨大的开发潜力。

张北地区具备建设抽水蓄能、生物质电站等调节类电源潜力。张北尚义县东洋河落差在海拔1450 m至-400 m之间,国家能源局规划批复,明确将在尚义县开发建设140万kW抽水蓄能电站。同时,根据《张家口市绿色农牧产业崛起行动方案(2022—2025年)》,张北未来畜牧业、种植业快速发展,农业废弃物、畜禽粪便等生物质资源丰富,适宜开发建设生物质电站。

结合张北地区资源禀赋,参照《张家口可再生能源示范区规划》^[84]和《河北省抽水蓄能发展规划》^[85],预判未来电源侧仍将以集中式风电、光伏为主体,以光热发电、抽水蓄能、生物质发电、压缩空气储能、电化学储能等灵活性调节资源为支撑,辅以部分新能源构网型技术,共同构成电源侧未来形态。

2) 电网侧演化分析。

目前张北新能源汇集电网已初具规模,并且以交流汇集为主要形态,且交流汇集具有经济性好、技术成熟度高的优势,因此,张北地区未来仍然以交流汇集为主,通过分布式调相机、虚拟同步机、无功补偿装置等提升汇集电网强度,未来随着低压柔直设备及柔直技术发展,将可能出现全柔直接入汇集为辅的补充形态,提高汇集电网运行经济性和能效水平。

在输送电网环节,随着新能源送出需求继续增加,原500 kV交流、多端柔直、1000 kV特高压交流三类输送形态均存在输送受阻的情况,需采取针对性支撑措施提升输电极限和输送柔性,保障新能源可靠、灵活外送。

高压交流形态方面,未来更多新能源汇集接入沽源县后,通过高压交流输送形态,经两回500 kV交流输电线路送至负荷中心唐山的太平站,已增加无功补偿装置(串补装置)提升线路极限,系统强度加强后

可以有效提高沽源站新能源送出能力。增强500 kV高压交流输电通道与华北主网的耦合, 满足未来规划新能源外送需求。特/超高压交流输送形态方面, 未来规划约1400万kW的新能源接入, 通过传输极限约600万kW的张雄特高压外送, 存在同时率高于42%的新能源出力无法消纳的问题, 需要增加调相机和拓展特高压电网增加系统强度。结合近区华北主网电网强度增加, 以及与华北特高压电网互联互通, 提升新能源输送能力, 形成更加稳定的华北地区新能源基地群+清洁火电的供给体系, 满足京津唐电网用电需求。

对于多端柔直输送形态, 未来规划接入900万kW新能源装机, 目前四端柔直电网新能源汇集端2座换流站(安康巴诺尔、中都换流站)总容量为450万kW, 仅满足新能源同时率50%的外送需求, 因此亟需通过相关支撑技术进一步提高柔直电网输送容量, 并考虑扩建柔直电网覆盖范围。

因此, 未来张北特大型新能源基地输送电网形态将在以上网络基础上进一步延伸和发展, 与华北其他主干网络互联互通, 形成大规模交直流混联电网, 张北新能源电源将与华北区域内各种类型电源、灵活性负荷、新型储能深度耦合, 进一步提升特大型新能源基地外送消纳水平。

3.3 张北特大型新能源基地关键支撑技术分析

为了保证上述所提张北特大型新能源基地源网形态的实现, 需要针对性开展相关工程技术研究。

1) 源侧支撑技术演化分析。应发展AI等数字技术, 结合新能源场站侧储能优化运行, 提高新能源场

站功率预测和发电能力预测精度, 降低新能源出力不确定性给电网多时间尺度平衡带来的压力和成本; 应关注各类储能技术发展, 包括氢储能、抽水蓄能、压缩空气储能、电锅炉储热等支撑技术, 增加多时间尺度电力电量平衡灵活资源。另外, 为满足张北地区未来特大型新能源发展送出需求, 需提高新能源场站稳压、稳频、抑制振荡等主动支撑能力, 提高源侧系统稳定性。

2) 网侧支撑技术演化分析。着重改善输电网强度和柔性, 提升输变电设备利用效率。随着各类支撑技术成熟度的持续提升和技术成本的不断下降, 未来张北地区可借助AI等数字技术, 通过源网荷储协同规划技术、灵活性优化规划和系统强度提升措施的优化配置技术提升系统规划水平, 支撑调相机、柔直电网及分频输电的可能形态演化; 通过调度运行优化技术、输电断面动态极限提升技术满足未来新能源基地输电网络灵活高效运行需要。

综合上述对未来张北特大型新能源基地关键支撑技术的分析, 考虑各类支撑技术成熟度随时间的演变过程, 得到如图10所示的张北特大型新能源基地演化场景。

4 结论

对特大型新能源基地源、网形态进行研判, 提出其规划与运行阶段面临的挑战与关键支撑技术, 并以张北特大型新能源基地为例开展形态演化分析, 得出以下结论。

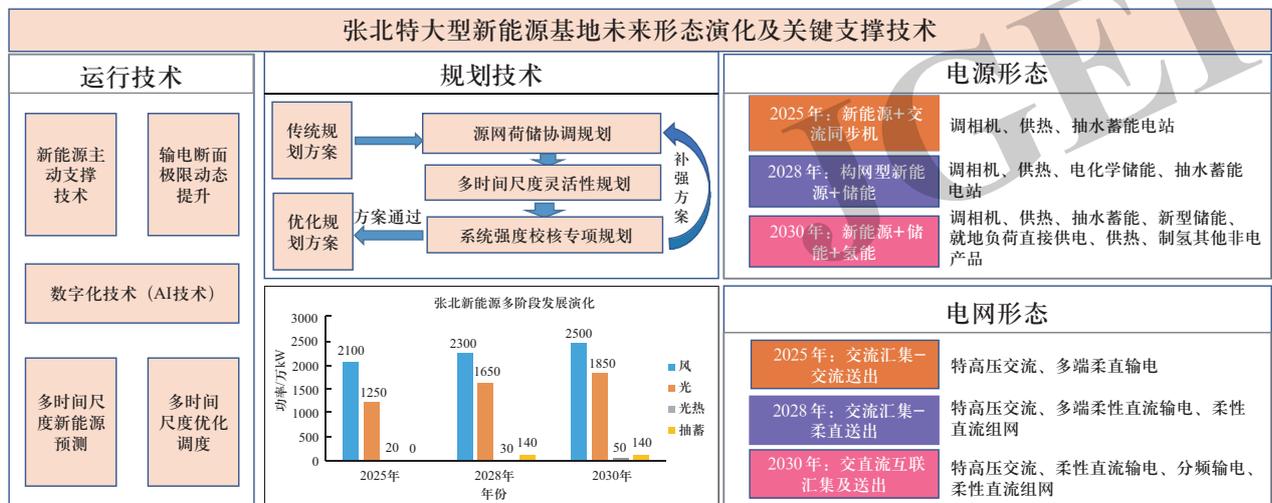


图 10 张北特大型新能源基地形态演化及关键支撑技术

Fig. 10 Future morphological evolution and key technologies in SLRE base of ZhangBei

1) 电源形态方面, 由于未来特大型新能源基地总体电源并网需求仍应趋近传统同步机水平, 因此, 基地电源需具备频率、电压、惯量等支撑能力、高/低压穿越能力以及功率调节能力等。张北特大型新能源基地可通过多种技术路径实现, 包括增配调相机、储能等辅助装备形成主动支撑型或构网型新能源电站, 新能源与清洁传统同步机电源打捆, 在新能源电站汇集站增配调相机、储能等辅助装备, 基地增加抽水蓄能电站等。从张北基地所处京津唐电网看, 各时间尺度调节能力需求将越来越高, 其中电源仍是可调节能力的主力, 张北基地除了增加抽水蓄能和新型储能外, 未来新能源电站还有可能通过为就地负荷直接供电、供热、制氢系列或其他非电产品演变为综合能源生产单元, 为系统提供更多可调节能力。

2) 电网形态方面, 新能源电源单机容量小、电压低, 逐级汇集、传输的本质不会改变, 仍分为汇集网络和输送网络, 但电网柔性化水平即电网对电源、负荷的适应能力应逐步提高。张北特大型新能源基地汇集和输送方式总体保持以特/超高压交流为主、以柔性直流输电为辅的格局, 但将由传统交流向柔性交流方向发展, 局部形成柔性直流组网形态。

3) 规划技术方面, 特大型新能源基地规划应充分考虑源网协调与灵活性资源配置, 将安全运行约束、电网规划边界前置到新能源基地规划阶段考虑, 避免新能源基地因送端电网强度低、调节性能差等约束导致电网无法送出的问题。随着张雄特高压扩建为“两横一纵”特高压交流网络规划实施, 将连接蒙西和蒙东新能源+火电打捆基地, 其稳定特性将发生改变, 存在张北新能源基地送端系统电压、频率、宽频振荡等稳定问题。可采用调相机+新能源主动支撑+构网型储能+SVG等技术组合, 提升“两横一纵”特高压交流网络强度和惯量支撑能力, 解决新能源安全外送问题。

4) 运行技术方面, 特大型新能源基地应重点开展资源-气象多源信息耦合的多时空尺度功率预测、多时间尺度协调滚动优化调度、主动控制技术与智能运维技术研究。张北特大型新能源基地应引入并持续深化AI技术在提高新能源多时间尺度功率预测精度、供电保障能力和优化调度方面的研究与应用。在新能源电站涉网控制性能、运维可靠性等方面也应利用各类数字化新技术不断提高智能化水平。

本文研究成果可为高比例新能源系统规划优化、系统调度运行优化、新能源稳定分析及系统可靠性提升提供参考。

参考文献

- [1] International Energy Agency. Net zero by 2050 [R/OL]. Paris: IEA, 2021. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- [2] REN21: Renewables 2017 global status report[R/OL]. REN21, 2017. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017_Full-Report_English.pdf.
- [3] 中国电力企业联合会. 中电联发布《中国电力行业年度发展报告2021》[N/OL]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-298413>.
- [4] 张适宜, 周明, 黄瀚燕, 等. 新能源基地多端柔性直流汇集系统运行灵活性研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3846-3857.
ZHANG Shiyi, ZHOU Ming, HUANG Hanyan, et al. Operational flexibility optimization of renewables generation multi-terminal flexible DC collector system[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3846-3857(in Chinese).
- [5] 李湃, 王伟胜, 黄越辉, 等. 大规模新能源基地经特高压直流送出系统中长期运行方式优化方法[J/OL]. 电网技术, 1-13[2022-10-17].
LI Pai, WANG Weisheng, HUANG Yuehui, et al. Method on optimization of medium and long term operation modes of large-scale renewable energy power base through UHVDC system[J/OL]. Power System Technology, 1-13[2022-10-17].
- [6] 沈广进, 辛焕海, 刘昕宇, 等. 大型新能源基地中调相机同步失稳机理与影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 100-108.
SHEN Guangjin, XIN Huanhai, LIU Xinyu, et al. Analysis on synchronization instability mechanism and influence factors for condenser in large-scale renewable energy base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 100-108(in Chinese).
- [7] 王康, 李子恒, 杨超然, 等. 面向大型新能源基地小干扰稳定性提升的调相机选址方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 66-74.
WANG Kang, LI Ziheng, YANG Chaoran, et al. Siting method of synchronous condenser for small-signal stability improvement of large-scale renewable energy base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 66-74(in Chinese).
- [8] 郭剑波. 新型电力系统面临的挑战以及有关机制思考[J]. 中国电力企业管理, 2021(25): 8-11.
- [9] 樊陈, 姚建国, 张琦兵, 等. 英国“8·9”大停电事故振荡事件分析及思考[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 34-41.
FAN Chen, YAO Jianguo, ZHANG Qibing, et al. Reflection and analysis for oscillation of the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 34-41(in Chinese).
- [10] 刘辉, 葛俊, 巩宇, 等. 风电场参与电网一次调频最优方案选择与风储协调控制策略研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1): 44-52.
LIU Hui, GE Jun, GONG Yu, et al. Optimization scheme

- selection of wind farm participation in grid primary frequency modulation and study of wind-storage coordination control strategy[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(1): 44-52(in Chinese).
- [11] 易佩, 景志滨, 徐飞, 等. 考虑频率安全约束的电力系统临界惯量计算[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(10): 1721-1729.
YI Pei, JING Zhibin, XU Fei, et al. Calculation of the critical inertia of a power system considering frequency security constraints[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(10): 1721-1729(in Chinese).
- [12] 任凯奇, 张东英, 黄越辉, 等. 基于新能源出力比例的大规模系统惯量估计[J]. *电网技术*, 2022, 46(4): 1307-1315.
REN Kaiqi, ZHANG Dongying, HUANG Yuehui, et al. Large-scale system inertia estimation based on new energy output ratio[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(4): 1307-1315(in Chinese).
- [13] 李东东, 刘强, 徐波, 等. 考虑频率稳定约束的新能源电力系统临界惯量计算方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(22): 24-33.
LI Dongdong, LIU Qiang, XU Bo, et al. New energy power system critical inertia estimation method considering frequency stability constraints[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(22): 24-33(in Chinese).
- [14] 徐海珍, 余畅舟, 毛福斌, 等. 基于频率稳定性提升的虚拟惯性优化控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(12): 126-133.
XU Haizhen, YU Changzhou, MAO Fubin, et al. A virtual inertia optimization control strategy based on frequency stability improvement[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(12): 126-133(in Chinese).
- [15] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 电力系统新型振荡问题浅析[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(10): 2821-2828.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. On new oscillation issues of power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10): 2821-2828(in Chinese).
- [16] 屠竞哲, 张健, 刘明松, 等. 考虑风机动态特性的大扰动暂态过电压机理分析[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(11): 197-205.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, LIU Mingsong, et al. Mechanism analysis of transient overvoltage with large disturbance considering dynamic characteristics of wind generator[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(11): 197-205(in Chinese).
- [17] 贺静波, 庄伟, 许涛, 等. 暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J]. *电网技术*, 2016, 40(6): 1839-1844.
HE Jingbo, ZHUANG Wei, XU Tao, et al. Study on cascading tripping risk of wind turbines caused by transient overvoltage and its countermeasures[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(6): 1839-1844(in Chinese).
- [18] 贾俊川, 金一丁, 赵兵, 等. 风机低电压穿越控制对系统暂态过电压的影响及优化[J]. *电网技术*, 2021, 45(2): 526-533.
JIA Junchuan, JIN Yiding, ZHAO Bing, et al. Impact analysis and performance optimization of LVRT control of wind turbine on transient overvoltage of power system[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(2): 526-533(in Chinese).
- [19] 朱凌志, 曲立楠, 刘纯, 等. 新能源发电集群的改进等效短路比计算方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(22): 74-82.
ZHU Lingzhi, QU Linan, LIU Chun, et al. Improved calculation method of equivalent short-circuit ratio for power generation cluster of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(22): 74-82(in Chinese).
- [20] 杜维柱, 罗亚洲, 李蕴红, 等. 风电汇集系统无功盈余导致暂态过电压问题的研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(9): 3224-3239.
DU Weizhu, LUO Yazhou, LI Yunhong, et al. Reviews of transient overvoltage problem cause by extra reactive power in large scale wind power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(9): 3224-3239(in Chinese).
- [21] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(6): 90-95.
CHANG Haijun, HUO Chao, LIU Fusuo, et al. Research on optimal allocation method of synchronous condensers for improving transient voltage stability level of weak sending-end power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(6): 90-95(in Chinese).
- [22] 康勇, 林新春, 潘辰, 等. 弱电网下采用SVC与SVG补偿后新能源并网变换器的功率传输特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(6): 2115-2125.
KANG Yong, LIN Xinchun, PAN Chen, et al. Analysis of power transmission characteristics of renewable energy grid-connected converter considering SVC and SVG compensation under weak grid condition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(6): 2115-2125(in Chinese).
- [23] 刘飞, 赵澄颖, 王世斌, 等. 新能源直流汇集分群综合协调控制策略[J]. *电力建设*, 2022, 43(5): 127-136.
LIU Fei, ZHAO Chenghao, WANG Shibin, et al. Coordinated control strategy of new energy DC collection system[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(5): 127-136(in Chinese).
- [24] 何世恩, 董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(1): 131-137.
HE Shien, DONG Xinzhou. Cause analysis on large-scale wind turbine tripping and its countermeasures[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(1): 131-137(in Chinese).
- [25] AGHAHOSSEINI A, BOGDANOV D, BREYER C. Towards sustainable development in the MENA region: analysing the feasibility of a 100% renewable electricity system in 2030[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2020, 28: 100466.
- [26] ZAPPA W, JUNGINGER M, BROEK M. Is a 100% renewable

- European power system feasible by 2050? [J]. *Applied Energy*, 2019, 233/234: 1027-1050.
- [27] DIESENDORF M, ELLISTON B. The feasibility of 100% renewable electricity systems: a response to critics[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 93: 318-330.
- [28] AGENCY I E. Electricity information 2018[M]. OECD, 2018.
- [29] 鲁宗相, 林弋莎, 乔颖, 等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(16): 3-16.
LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(16): 3-16(in Chinese).
- [30] 武昭原, 周明, 王剑晓, 等. 双碳目标下提升电力系统灵活性的市场机制综述[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(21): 7746-7764.
WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, WANG Jianxiao, et al. Review on market mechanism to enhance the flexibility of power system under the dual-carbon target[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(21): 7746-7764(in Chinese).
- [31] 侯验秋, 丁一, 包铭磊, 等. 电-气耦合视角下德州大停电事故分析及对我国新型电力系统发展启示[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(21): 7764-7775.
HOU Yanqiu, DING Yi, BAO Minglei, et al. Analysis of Texas blackout from the perspective of electricity-gas coupling and its enlightenment to the development of China's new power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(21): 7764-7775(in Chinese).
- [32] 孙荣富, 徐海翔, 吴林林, 等. 中国区域低温天气及其对风力发电影响的统计[J]. *全球能源互联网*, 2022, 5(1): 2-10.
SUN Rongfu, XU Haixiang, WU Linlin, et al. Statistics of cold weather and its impact on wind power generation in China[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2022, 5(1): 2-10(in Chinese).
- [33] 张前进, 周林, 李海啸, 等. 考虑SVG补偿装置的大型光伏并网系统振荡分析与抑制[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(9): 2636-2644.
ZHANG Qianjin, ZHOU Lin, LI Haixiao, et al. Oscillation analysis and suppression of large-scale grid-connected photovoltaic system considering SVG equipment[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2636-2644(in Chinese).
- [34] 叶晖, 李爱魁, 张忠. 基于储能的无功补偿技术综述[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(6): 2209-2217.
YE Hui, LI Aikui, ZHANG Zhong, Overview of reactive power compensation technology based on energy storage[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(6): 2209-2217(in Chinese).
- [35] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. *电网技术*, 2017, 41(10): 3315-3325.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10): 3315-3325(in Chinese).
- [36] 张哲任, 金砚秋, 徐政. 两种基于构网型风机和二极管整流单元的海上风电送出方案[J]. *高电压技术*, 2022, 48(6): 2098-2107.
ZHANG Zheren, JIN Yanqiu, XU Zheng. Two offshore wind farm integration schemes based on grid forming wind turbines and diode rectifier unit[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(6): 2098-2107(in Chinese).
- [37] 许诒翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. *电网技术*, 2022, 46(9): 3586-3595.
XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(9): 3586-3595(in Chinese).
- [38] CHANDORKAR M C, DIVAN D M, ADAPA R. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1993, 29(1): 136-143.
- [39] ARGHIR C. Grid-forming control for power converters based on matching of synchronous machines[J]. *Automatica*, 2018, 95: 273-282.
- [40] SINHA M, DÖRFLER F, JOHNSON B B, et al. Uncovering droop control laws embedded within the nonlinear dynamics of van der pol oscillators[J]. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2017, 4(2): 347-358.
- [41] 张琛, 蔡旭, 李征. 具有自主电网同步与弱网稳定运行能力的双馈风电机组控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 476-486.
ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Control of DFIG-based wind turbines with the capability of automatic grid-synchronization and stable operation under weak grid condition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(2): 476-486(in Chinese).
- [42] HEIDARY YAZDI S S. Analytical modeling and inertia estimation of VSG-controlled Type 4 WTGs: power system frequency response investigation[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 107: 446-461.
- [43] 查雨欣, 林健, 王悦, 等. 基于广义下垂控制的光伏发电系统的惯量特性分析[J]. *智慧电力*, 2021, 49(2): 54-59.
ZHA Yuxin, LIN Jian, WANG Yue, et al. Analysis of inertia characteristics of photovoltaic power generation system based on generalized droop control[J]. *Smart Power*, 2021, 49(2): 54-59(in Chinese).
- [44] 桑顺, 齐琛, 张新松, 等. 永磁直驱风电机组的构网型控制与黑启动[J]. *电网技术*, 2022, 46(8): 3168-3180.
SANG Shun, QI Chen, ZHANG Xinsong, et al. Grid-forming control and black start of PMSG-based direct-driven wind turbine[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(8): 3168-3180(in Chinese).

- [45] 孙惠, 翟海保, 吴鑫. 源网荷储多元协调控制系统的研究及应用[J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3264-3271.
SUN Hui, ZHAI Haibao, WU Xin. Research and application of multi-energy coordinated control of generation, network, load and storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3264-3271(in Chinese).
- [46] 杜佩仁, 文福拴, 刘艳茹, 等. 多元用电需求网格分析与“源网荷储”分层分区平衡模型[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(1): 5-10.
DU Peiren, WEN Fushuan, LIU Yanru, et al. Diversified power demand block analysis and “source-network-load-storage” hierarchical partition balance model[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(1): 5-10(in Chinese).
- [47] 罗首权, 丁孝华, 韩韬, 等. 基于目标级联分析法的区域源网荷储系统日前运行优化[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(7): 11-19.
LUO Shouquan, DING Xiaohua, HAN Tao, et al. Day-ahead operation optimization of regional scale source network load storage system based on analytical target cascading theory[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(7): 11-19(in Chinese).
- [48] 廖剑波, 吴恺琳, 刘鹏. 面向新型电力系统源网荷储协同的电力平衡方法[J]. 电工技术, 2022(10): 132-138.
LIAO Jianbo, WU Kailin, LIU Peng. Power balance method oriented to synergy of source-network-load-storage of new power system[J]. Electric Engineering, 2022(10): 132-138(in Chinese).
- [49] 张思彤, 梁纪峰, 马燕峰, 等. 直驱风电场经柔性直流输电并网的宽频振荡特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 33-42.
ZHANG Sitong, LIANG Jifeng, MA Yanfeng, et al. Broadband oscillation characteristics analysis of a VSC-HVDC connected direct drive wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 33-42(in Chinese).
- [50] 王雪梅, 王艺博, 刘雨桐, 等. 基于虚拟电抗的主动支撑型新能源机组低电压穿越控制方法[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4435-4444.
WANG Xuemei, WANG Yibo, LIU Yutong, et al. Low voltage ride-through control of actively-supported new energy unit based on virtual reactance[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4435-4444(in Chinese).
- [51] 刘刚, 陈海东, 孙睿哲, 等. 集群光伏电站频率主动支撑自校正控制方法[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 156-162.
LIU Gang, CHEN Haidong, SUN Ruizhe, et al. Self-tuning control method of active frequency support of clustering photovoltaic power plants[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 156-162(in Chinese).
- [52] 王立, 王艺博, 何国庆. 新型虚拟同步发电机分布式主动支撑控制策略[J]. 电测与仪表, 2018, 55(21): 112-118.
WANG Li, WANG Yibo, HE Guoqing. Novel virtual synchronous generator based distributed active-supporting control strategy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(21): 112-118(in Chinese).
- [53] 张忠会, 雷大勇, 李俊, 等. 基于自适应 ϵ -支配多目标粒子群算法的含SOP的主动配电网源-网-荷-储双层协同规划模型[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2199-2212.
ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, LI Jun, et al. Source-network-load-storage bi-level collaborative planning model of active distribution network with SOP based on adaptive ϵ -dominating multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2199-2212(in Chinese).
- [54] 陈保瑞, 刘天琪, 何川, 等. 考虑需求响应的源网荷储调分布鲁棒长期扩展规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 6886-6900.
CHEN Baorui, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Distributionally robust coordinated expansion planning for generation and transmission systems with demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6886-6900(in Chinese).
- [55] 尚策. 广域综合能源的一条规划路径[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4081-4092.
SHANG Ce. A path to planning wide-area integrated energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13): 4081-4092(in Chinese).
- [56] 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).
- [57] 杨珺, 李凤婷, 张高航. 考虑灵活性需求的新能源高渗透系统规划方法[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2171-2182.
YANG Jun, LI Fengting, ZHANG Gaohang. Power system planning method with high new energy penetration considering flexibility requirements[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2171-2182(in Chinese).
- [58] 马丽叶, 王海锋, 卢志刚, 等. 计及相关性影响的增强台风灾害下配电网韧性灵活性资源规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 60-68.
MA Liye, WANG Haifeng, LU Zhigang, et al. Flexible resource planning for improving distribution network resilience under typhoon disasters considering relevance impact[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 60-68(in Chinese).
- [59] 朱晓荣, 鹿国微, 谢婉莹. 考虑源网荷灵活性资源的配电网储能鲁棒规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 8-16.
ZHU Xiaorong, LU Guowei, XIE Wanying. Robust planning of energy storage in distribution network considering source-network-load flexible resources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 8-16(in Chinese).
- [60] 杨茂, 张罗宾. 基于数据驱动的超短期风电功率预测综述

- [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 171-186.
YANG Mao, ZHANG Luobin. Review on ultra-short term wind power forecasting based on data-driven approach[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 171-186(in Chinese).
- [61] 乔妍, 韩丽, 李梦洁. 基于爬坡特征和云模型的风电功率预测误差区间评估[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(11): 75-84.
QIAO Yan, HAN Li, LI Mengjie. Interval estimation of wind power forecasting error based on ramp features and cloud model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 75-84(in Chinese).
- [62] 赵凌云, 刘友波, 沈晓东, 等. 基于CEEMDAN和改进时间卷积网络的短期风电功率预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 42-50.
ZHAO Lingyun, LIU Youbo, SHEN Xiaodong, et al. Short-term wind power prediction model based on CEEMDAN and an improved time convolutional network[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 42-50(in Chinese).
- [63] 毕贵红, 赵鑫, 陈臣鹏, 等. 基于多通道输入和PCNN-BiLSTM的光伏发电功率超短期预测[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3463-3476.
BI Guihong, ZHAO Xin, CHEN Chenpeng, et al. Ultra-short-term prediction of photovoltaic power generation based on multi-channel input and PCNN-BiLSTM[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3463-3476(in Chinese).
- [64] 李飞, 李咸善, 李振兴, 等. 基于梯级水电调节的多能联合发电系统短期优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 11-20.
LI Fei, LI Xianshan, LI Zhenxing, et al. Short-term optimal scheduling of multi-energy combined generation systems based on the regulation of cascade hydropower stations[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 11-20(in Chinese).
- [65] 刘雨佳, 樊艳芳, 郝俊伟, 等. 基于碱性电解槽宽功率适应模型的风光氢热虚拟电厂容量配置与调度优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 48-60.
LIU Yujia, FAN Yanfang, HAO Junwei, et al. Capacity configuration and optimal scheduling of a wind-photovoltaic-hydrogen-thermal virtual power plant based on a wide range power adaptation strategy for an alkaline electrolyzer[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 48-60(in Chinese).
- [66] 曹敏健, 胡泽春, 孟颖, 等. 含抽蓄电站与新能源发电的柔性直流系统日前优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(15): 36-44.
CAO Minjian, HU Zechun, MENG Ying, et al. Day-ahead optimal dispatch method for flexible DC system with pumped storage hydropower plant and new energy power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 36-44(in Chinese).
- [67] 张思远, 龙高翔, 周过海, 等. 新型电力系统下的调度智能平衡系统研究[J]. 湖南电力, 2022, 42(2): 29-36.
ZHANG Siyuan, LONG Gaoxiang, ZHOU Guohai, et al. Research on dispatching intelligent balance system in novel power system[J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(2): 29-36(in Chinese).
- [68] YAN Z M, XU Y. Data-driven load frequency control for stochastic power systems: a deep reinforcement learning method with continuous action search[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 1653-1656.
- [69] LIU H Z, CHEN Z. Contribution of VSC-HVDC to frequency regulation of power systems with offshore wind generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 918-926.
- [70] LIU J, MIURA Y, ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [71] KIM J, MULJADI E, PARK J W, et al. Flexible IQ-V scheme of a DFIG for rapid voltage regulation of a wind power plant[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8832-8842.
- [72] 刘浩芳, 朱艺颖, 刘琳, 等. 新能源机组的电网强度适应性及暂态响应特性测试方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 179-185.
LIU Haofang, ZHU Yiying, LIU Lin, et al. Test scheme for power grid strength adaptability and transient response characteristics of renewable energy unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 179-185(in Chinese).
- [73] YOUSEFIAN R, BHATTARAI R, KAMALASADAN S. Transient stability enhancement of power grid with integrated wide area control of wind farms and synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4818-4831.
- [74] ZHANG J Y, LU C, SI J, et al. Deep reinforcement learning for short-term voltage control by dynamic load shedding in China southern power grid[C]//2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Rio de Janeiro, Brazil. IEEE: 1-8.
- [75] LI Y J, XU Z, ZHANG J L, et al. Variable droop voltage control for wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 491-493.
- [76] MAKNOUNEJAD A, QU Z H. Realizing unified microgrid voltage profile and loss minimization: a cooperative distributed optimization and control approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1621-1630.
- [77] CAGNANO A, TUGLIE E D. Centralized voltage control for distribution networks with embedded PV systems[J]. Renewable Energy, 2015, 76: 173-185.
- [78] TSUJI T, TOMURA K, OYAMA T, et al. A study of centralized voltage profile control of distribution network considering dynamics of distributed generator[J]. Electrical

- Engineering in Japan, 2012, 179(1): 29-39.
- [79] KULMALA A, REPO S M, JÄRVENTAUSTA P. Coordinated voltage control in distribution networks including several distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 2010-2020.
- [80] CHENG R, XU Z, LIU P, et al. A multi-region optimization planning model for China's power sector[J]. Applied Energy, 2015, 137: 413-426.
- [81] 习工伟, 赵兵, 郑帅飞, 等. 新能源基地经特高压交流送出系统输电能力与提升措施[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 131-138.
- XI Gongwei, ZHAO Bing, ZHENG Shuaifei, et al. Transmission capacity and improvement measures of the UHVAC sending system from new energy base[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 131-138(in Chinese).
- [82] 杨博, 陈义军, 姚伟, 等. 基于新一代人工智能技术的电力系统稳定评估与决策综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 200-223.
- YANG Bo, CHEN Yijun, YAO Wei, et al. Review on stability assessment and decision for power systems based on new-generation artificial intelligence technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 200-223(in Chinese).
- [83] 鞠平, 周孝信, 陈维江, 等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018(5): 2-11.
- JU Ping, ZHOU Xiaoxin, CHEN Weijiang, et al. “Smart Grid Plus” research overview[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018(5): 2-11(in Chinese).
- [84] 张家口市人民政府. 国家发改委关于印发《张家口可再生能源示范区“十四五”规划》的通知[EB/OL]. [2022-01-03].

<https://www.zjk.gov.cn/content/gh/154352.html>.

- [85] 国家能源局. 国家能源局关于河北抽水蓄能电站选点规划调整成果的复函[EB/OL]. [2020-6-10]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2020-06/10/c_139173008.htm.

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2022-12-06。



张玮

作者简介:

张玮(1971), 男, 博士, 主要研究方向为能源政策、能源规划、企业管理等。

白恺(1971), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 从事新能源发电及并网、储能技术等研究工作。

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

李海波(1990), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为可再生能源并网规划与运行、电力系统灵活性、综合能源系统等。

郭金智(1979), 男, 硕士, 主要研究方向为新型电力系统、电网规划等。

王泽森(1989), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力电量平衡、电力系统稳定分析等研究工作。

(责任编辑 张宇)

JGEEI