

“新型电力系统电压稳定控制关键技术”专栏

构建新型电力系统电压治理体系：挑战、实践与展望

王锋华，邵先军，吴俊飞，章天晗

(国网浙江省电力有限公司衢州供电公司，浙江 衢州 324000)

摘要：在新型电力系统建设过程中，电网“双高”特征不断凸显，电压问题已由局部性、技术性挑战演变为系统性、多层级的安全稳定风险。对此，基于“双碳”目标下新型电力系统的结构转型与运行特性，系统分析了电压双向越限、电能质量问题突出、电压稳定裕度降低和无功功率快速波动的成因与表现；探讨了当前电压治理面临的调压机理不清、无功调节手段匮乏、协同机制缺失等多重挑战；最后，介绍了构建新型电力系统电压治理体系的关键技术与实践经验，以为构建安全、高质量的新型电力系统提供理论参考与实践路径。

关键词：新型电力系统；电压治理；新能源；无功调节

DOI: 10.19585/j.zjdl.202603001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Building a voltage governance framework for modern power systems: challenges, practices, and prospects

WANG Fenghua, SHAO Xianjun, WU Junfei, ZHANG Tianhan

(State Grid Quzhou Power Supply Company, Quzhou, Zhejiang 324000, China)

Abstract: During the development of modern power systems, the “dual-high” characteristics—high penetration of renewable energy and high power-electronic interfacing—have become increasingly prominent in power grids. Consequently, voltage issues have evolved from localized, technical challenges into systemic and multi-level risks to safety and stability. In this context, and in light of the structural transformation and operational characteristics of the modern power systems under the “dual-carbon” goals, this paper systematically analyzes the causes and manifestations of bidirectional voltage violations, pronounced power quality problems, reduced voltage stability margins, and rapid reactive power fluctuations. The paper further examines the multiple challenges currently faced in voltage governance, including unclear voltage regulation mechanisms, insufficient reactive power regulation resources, and a lack of coordinated control mechanisms. Finally, key technologies and practical experiences for building a voltage governance framework are presented, aiming to provide theoretical insights and practical pathways for the development of secure, high-quality modern power systems.

Keywords: modern power system; voltage governance; renewable energy; reactive power regulation

0 引言

位于西欧的伊比利亚半岛电网由西班牙和葡萄牙两国共建，该电网中新能源装机容量占比达 78%，被欧盟认定为欧洲新能源转型先行示范区。但在 2025 年 4 月 28 日，伊比利亚半岛电网突发大规模停电事故，直接影响人口超过 5 000 万人，西葡两国社会秩序受到严重冲击。事后调查表明，

事故的主要原因是电网电压出现短暂波动时，部分光伏电站的保护机制被触发而退出运行，导致系统电源侧和外送通道的无功功率需求下降，源侧电网电压随之上升，进而触发更多新能源电源保护动作并导致其解列，最终形成恶性循环，引发全域电网崩溃。与传统频率失稳导致的电网崩溃事故不同，此次事故暴露出新型电力系统在电压控制方面的薄弱环节，引起学术界与工程界的广泛关注^[1-2]。

基金项目：国网浙江省电力有限公司科技项目(B311QZ26A002)

近年来，在“双碳”目标的推动下，我国电网

正由传统电力系统加速向新型电力系统转型,整体呈现出高比例新能源、高比例电力电子设备的“双高”特征。一方面,风电、光伏等新能源大规模集中并网与分布式广泛接入并举,新能源在电源结构中的占比迅速提升,电力系统清洁化水平显著增强;但其出力的间歇性与随机波动性导致局部电网电压频繁波动,尤其在高渗透区域易造成过电压或电压跌落,对传统电压调节手段提出新挑战。另一方面,以变流器、变频装置为代表的电力电子设备在发电、输电、用电各环节广泛应用,在提升系统控制灵活性和新能源消纳能力的同时,也显著改变了电网的稳态和暂态特性;电力电子设备的大规模接入削弱了系统的转动惯量,导致电压响应特性发生变化,易引发快速电压波动甚至暂态稳定问题,对电压的实时精准控制提出更高要求。此外,随着跨区跨省电力输送规模持续扩大,“西电东送”“北电南供”格局不断深化,外来电在负荷中心地区电力供应中的占比日益提高;远距离大容量输电在增强电网互济能力的同时,也带来受端电网电压支撑能力不足的风险,一旦主通道发生故障,可能引发受端系统电压崩溃,对区域电压稳定性构成严峻威胁。上述因素使得电压稳定问题日趋复杂,新型电力系统的电压治理面临多方面的严峻挑战。

在这一背景下,如何在新型电力系统的实际建设与运行场景中探索可行的电压治理路径,成为亟待解决的现实问题。浙江衢州作为典型的高比例新能源接入地区,近年来在电压治理方面开展了系统化探索与实践,形成了围绕仿真预判、协同控制、规划优化等方面的电压治理经验,可为全国其他地区电压治理提供借鉴与参考。

1 国内外研究现状

1.1 电压治理理论研究现状

国外稳态电压治理理论研究起步较早,已形成体系化经典成果,核心围绕模型构建与稳定判据优化展开。早期通过PV曲线、QV曲线分析法建立了电压与功率的量化关系^[3-4],为静态电压稳定极限评估提供了直观工具;灵敏度分析法则凭借局部参数响应特性,实现了稳定性的快速判断,成为工程应用中的基础方法^[5]。优化算法方面,从Dommel和Tinney提出的简化梯度法,到牛顿

法的迭代改进,逐步解决了传统无功优化中的收敛性难题,奠定了集中式电压治理的理论基础。同时,德国VDE-AR-N 4105等标准的出台,规范了分布式电源接入场景下的稳态电压控制要求,推动理论成果向工程实践转化^[6]。

国内研究聚焦传统理论的本土化适配与新型电力系统场景创新,取得了针对性技术突破。模型构建方面,通过改进连续潮流算法克服雅克比矩阵奇异问题,提升了电压稳定极限计算精度^[7-8];提出数据机理融合的线性化电压模型,简化了配电网物理参数缺失场景下的计算流程,增强了工程实用性^[9-10]。稳定判据研究中,量化了ZIP负荷特性对电压稳定的影响,构建了网损与电压质量并重的多目标无功优化模型,提升了理论对高比例新能源接入场景的适配性^[11-16]。当前国内研究已初步形成契合我国电网结构特征的理论补充,但在多源耦合场景下的协同治理模型、动态边界稳定判据等方面仍存在拓展空间,为本文研究提供了核心切入点。

1.2 电压治理方法研究现状

电压治理方法已形成“优化模型-控制算法-求解方法”三位一体的技术体系^[17]。国外在优化模型方面,早期以单目标OPF(最优潮流)模型为主,追求网损最小化^[18-19],近年转向多目标优化,综合考虑电压质量、设备寿命与运行成本。控制算法分为集中式、分散式与分布式三类:集中式算法依赖全局信息但鲁棒性不足^[20];分布式算法通过局部与邻居信息协同,成为研究热点,但存在步长设置与同步通信依赖问题。求解方法方面,原对偶内点法、加速近端梯度法等被广泛应用,有效提升了大规模电网的计算效率^[21-24]。

国内研究侧重方法的工程化适配与新能源场景创新:优化模型突破传统单目标局限,构建了网损最小与电压质量最优的加权妥协模型,通过节点灵敏度分析动态调整权重因子;控制算法创新聚焦分布式技术,提出基于状态势博弈的分布式调节算法,在通信链路故障时仍能保证收敛性,且无需统一步长设置;求解方法上,将遗传算法、粒子群优化算法与传统运筹学方法融合^[25],改进了算法收敛速度与全局搜索能力,适配新能源出力的随机性特征^[26-27]。此外,国内针对源网荷储互动场景,开发了多主体协同控制方法^[28],为分

布式光伏、电动汽车等柔性资源参与电压治理提供了技术路径。

1.3 人工智能技术在电压治理中的应用现状

人工智能技术为新型电力系统电压治理提供了精准化、自适应解决方案。目前国内外围绕电压诊断、控制与优化三大核心场景形成了差异化应用路径。国外聚焦技术落地与场景适配,在电压诊断中通过机器学习算法挖掘量测数据关联,实现暂态电压扰动分类、谐波源定位及薄弱节点识别;在电压控制领域融合强化学习与模型预测控制,构建分布式调节框架以适配新能源动态无功需求;在优化层面借助深度学习提升新能源出力与负荷预测精度,为无功配置提供数据支撑^[29-30]。国内紧扣“双高”特征与源网荷储互动需求,深度融合人工智能与工程场景,在诊断环节结合数字孪生与深度学习构建多物理场耦合模型,实现电压风险预警与量化评估;在控制端通过联邦学习、边缘计算破解数据壁垒,开发多主体协同策略;在优化场景中,基于强化学习的多时间尺度无功优化算法与图神经网络模型协同,提升分布式资源调度适配性,为高渗透率新能源接入下的电压治理提供技术支撑^[31-33]。

1.4 本文研究定位

现有电压治理理论与方法多基于传统电力系统构建,以单点局部治理为核心,在适配新型电力系统“双高”特征与源网荷储深度互动需求方面存在不足,协同调控能力欠缺。本文针对这一问题,结合浙江衢州实践经验,聚焦主网-配电网多层级协同、电压仿真支撑、多场景差异化策略三大核心方向,构建系统化电压治理框架,填补现有研究在实操性与全域协同性上的空白,为新型电力系统电压安全稳定运行提供技术支撑与实践路径。

2 新型电力系统电压问题新特征

在传统电力系统向新型电力系统转型的过程中,系统运行特性发生了显著而深刻的变化。首先,系统呈现高比例新能源、高比例电力电子设备的“双高”特征,其无功电压支撑模式与静态稳定特性随之发生根本性转变;其次,电压问题的时空关联性增强,已从局部现象演变为可影响电

网多区域、多层级耦合稳定性的系统级问题^[34-41]。新型电力系统电压问题呈现出如图1所示的新特征。

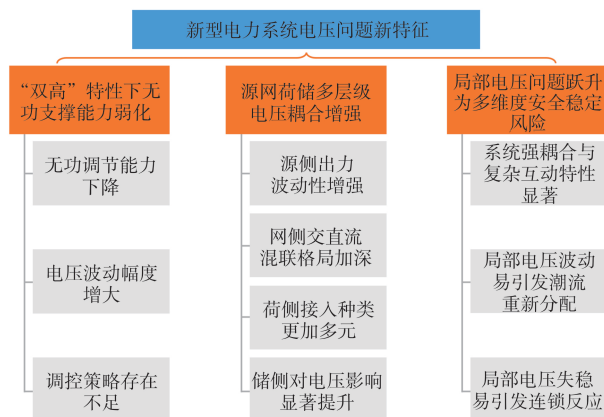


图1 新型电力系统电压问题新特征

Fig.1 New characteristics of voltage issues in modern power systems

2.1 “双高”特性下无功支撑功能弱化

在“双高”特性下,电网的无功电压问题呈现出一系列新特征。首先,系统无功调节能力呈结构性弱化,传统以同步发电机为核心的无功供给体系持续受冲击,系统自身无功调节能力呈现下降态势,同步机组的动态无功支撑冗余度逐步缩减,系统整体呈现无功调节储备量减少、调节灵活性降低的特性。在此基础上,系统电压波动幅度呈现增大趋势,新能源出力的随机性与负荷的动态变化叠加,电压运行点可能频繁偏离额定区间,电力电子设备的暂态响应特性进一步放大了电压波动的影响范围。同时,现有无功调控策略对“双高”场景的适配性不足,传统基于稳态工况的调控逻辑难以应对多源互动下的动态无功需求,不同层级、不同类型无功资源的协同调度机制尚未完善,无法实现无功资源的时空最优配置,进一步凸显系统无功支撑能力的弱化趋势^[42-44]。

2.2 源网荷储多层级电压耦合增强

新型电力系统的运行呈现出源、网、荷、储多环节深度互动与耦合的典型特征。在此背景下,系统的电压动态行为已超越传统电网中以输电网络和无功补偿设备为主的单一模式,转变为源、网、荷、储多层级共同参与并紧密交互的复杂过程。在电源侧,高比例电力电子化的新能源机组

的无功输出和电压控制特性与传统同步发电机存在本质差异，且其出力波动性会直接影响电网电压。在电网侧，交直流混联格局使得电压问题在直流落点与交流电网间快速耦合。在负荷侧，特别是随着分布式光伏、电动汽车充电设施等新型负荷的规模化接入，配电网乃至主网电压的扰动源与调节手段均变得更为多元和分散。与此同时，储能系统的充放电行为同样会显著改变局部节点的无功平衡与电压水平^[45-48]。

2.3 局部电压问题跃升为多维度安全稳定风险

“双高”特性推动新型电力系统网络结构与运行模式深度变革，系统强耦合与复杂互动特性显著，各区域、各环节间的电气关联突破传统边界，局部节点的电压状态与系统整体运行态势形成深度绑定，不再局限于独立的局部运行范畴。在此背景下，当局部电压波动时，系统原有功率平衡状态被打破，潮流沿强耦合的网络路径重新分配，该过程不再局限于局部区域，而是向更广范围扩散，改变更多节点的功率运行参数，使电压问题的影响范围从局部向系统层面延伸。当局部电压波动进一步发展为电压失稳时，在复杂互动的系统环境中，失稳效应快速传递至相邻环节，触发相关保护装置动作，原本的局部电压问题由此突破单一维度，跃升为涉及系统功率平衡、设备安全运行及整体供电可靠性的多维度安全稳定风险，且随着“双高”特性的持续深化，该风险的传导效率与影响程度呈逐步加剧趋势^[49-53]。

3 新型电力系统典型电压问题及成因

在上述新特征下，新型电力系统的电压问题呈现出多层次、多维度的特点，主要表现为电压双向越限交织、电能质量问题突出、电压稳定裕度降低及无功功率快速波动等^[54-58]。

3.1 电压双向越限问题及成因分析

在新型电力系统中，电压双向越限问题的核心机理源于高比例分布式新能源接入引发的配电网潮流及电压分布规律变化。配电台区中，光伏出力与负荷通常存在错配：白天光伏出力高峰时，潮流反向倒送沿线路抬升电压，逆变器在默认最大功率追踪模式下的电压“爬坡”效应更显著，导致并网点电压持续越限；夜间光伏出力骤降则使

系统失去无功支撑，叠加电动汽车充电与居民用电负荷高峰，线路末端电压快速跌落，形成典型的“日高夜低”特征^[59-63]。

以浙江衢州为例，全域光伏渗透率91%，为全省平均水平的2倍，近年来江山、常山、龙游等地的台区电压双向越限问题尤为突出。2024年，衢州全域15 981个低压台区中，众多台区曾出现电压越限问题，既制约光伏接入消纳，也影响居民用电安全。

3.2 电能质量问题及其成因分析

新型电力系统中的电能质量问题主要包括谐波污染与电压暂降两个方面。谐波污染的核心机理在于多环节电力电子设备引发的非线性扰动叠加系统治理适配性不足。源侧高比例新能源通过变流器并网，其非线性换流过程会产生3次、5次、7次等特征谐波；荷侧电动汽车充电桩、变频设备等电力电子负荷运行时，开关器件高频通断输出非正弦电流，不同类型负荷谐波叠加后使污染范围扩大。同时，部分分布式光伏逆变器存在软件版本错误、参数设置不合理等问题，无法有效抑制自身谐波输出，而传统集中式治理设备难以覆盖分布式主体的就地治理需求，导致谐波在电网中持续传递。以浙江衢州为例，110 kV凤林变母线三相电流监测显示3次、5次、7次谐波均突破国标上限，110 kV兰塘变曾因谐波问题导致站内电容器烧毁，印证了多因素叠加下谐波污染的实际影响。

电压暂降问题的核心机理是系统抗扰能力弱化与故障扰动传递放大的协同作用。高比例无惯量新能源替代传统同步机组，使系统惯量显著下降，故障时电网暂态过程持续时间延长，电压暂降幅度与影响范围扩大；电网侧线路短路故障、变压器励磁涌流、大容量异步电机启动冲击等事件，易打破局部功率平衡，而山区长链路薄弱供电方式、20 kV电网中性点接地方式不合理等结构问题，进一步放大暂降效应^[64-66]。此外，部分用户低压失压脱扣装置未合理设置延时，与上级电网保护定值不匹配，电压暂降时非故障线路易触发脱扣跳闸，扩大负荷损失；以芯片制造为代表的新型高端产业对电压暂降敏感度高，更凸显问题严重性。2025年3月，广州多地因电压暂降引

发用户低压脱扣装置动作,导致大面积短时停电;浙江衢州东港片区20 kV供区近年来也已多次发生暂降事件,引发敏感用户停电。

3.3 电压稳定裕度降低问题及其成因分析

系统电压稳定裕度降低的核心机理在于新型电力系统“双高”特性引发的系统电压支撑能力弱化与调控机制适配不足。首先,电源结构深度转型导致传统支撑电源占比下降,煤、核、气等常规电源装机增速放缓,而新能源占比持续提升,其无功调节能力先天较弱,且多通过长距离、多级升压接入电网,电气距离增加进一步削弱电压支撑效果,同时新能源出力的间歇性与波动性加剧电压失衡。其次,系统本地同步机组占比降低,其强励能力未充分挖掘,而新能源机组暂态电压支撑能力远逊于同步发电机,故障时易因耐受能力不足触发连锁脱网,扩大电压扰动。再者,大规模电力电子设备接入后,变流器动态支撑响应滞后,涉网性能标准执行缺乏有效监管,难以适配系统电压快速波动需求。此外,故障状态下系统惯量与短路容量下降,暂态过程延长,进一步降低电压稳定裕度,对系统安全稳定运行构成严峻挑战。

甘肃酒泉曾因电压跌落导致598台风电机组脱网,损失出力84万kW,造成严重影响。2025年4月的“西葡大停电”事件更是直接暴露了高比例新能源接入下新型电力系统所面临的电压稳定裕度不足问题^[67-70]。

3.4 系统无功功率快速波动问题及其成因分析

系统无功功率快速波动的核心机理,源于设备控制逻辑异化、系统形态转型、调控协同缺陷与扰动传递放大的协同作用。高比例电力电子设备接入使无功调节从传统同步机组的自然响应转向依赖实时信号的主动控制,新能源机组配套变流器易因环境条件突变触发控制策略瞬时切换,导致无功输出阶跃式波动;电动汽车充电桩、变频设备等电力电子负荷的无功消耗随启停与工况切换呈脉冲式变化,进一步加剧局部扰动。分布式新能源规模化接入推动配电网从辐射状无源网络向多源互联有源网络转型,潮流双向化使线路无功损耗随功率流向与大小动态改变,局部无功平衡频繁被破坏;加之无惯量电源占比提升,系

统对无功失衡的缓冲能力显著降低。主网与配电网间数据交互壁垒导致无功调节需求难以跨层级传递,传统调控设备响应速度无法匹配毫秒至秒级波动,且局部调控缺乏全局协同,易引发二次扰动;同时电力电子设备间控制耦合易引发宽频振荡,使无功呈周期性波动,网状电网拓扑进一步加速扰动传递放大,形成系统性无功快速波动。

以浙江衢州为例,110 kV江泰光伏电站接入220 kV清漾变,因光伏电站日内出力波动频繁,220 kV清漾变出现站内无功功率快速波动现象,在日间光伏大发时段波动尤为明显。

4 新型电力系统电压治理面临的挑战

上述电压问题已对系统安全稳定运行、新能源高水平消纳、用户高品质用电构成严重威胁。然而,当前电压问题治理手段难以应对新型电力系统电压问题的新特征,仍存在多元设备复杂耦合下调压机理不清、无功调节手段匮乏与潜力挖掘不足、电压治理策略场景适配性不足、系统化多层级协同治理机制缺失等核心挑战^[71-74]。

4.1 多元设备复杂耦合调压机理不清

新型电力系统中设备类型日益多元化,既包含同步发电机、变压器等传统设备,又广泛接入了风电、光伏、储能变流器及各类FACTS(柔性交流输电系统)装置等电力电子设备。不同设备的调压机理与动态响应特性存在显著差异:同步机组依托励磁系统提供惯性响应与电压支撑,而电力电子设备则通过快速开关与控制算法实现无功调节,二者在响应时间、带宽和物理基础上截然不同。当多类设备在同一电气耦合点或区域电网中并列运行时,其控制回路之间可能产生复杂的动态交互,甚至引发振荡,使系统调压行为呈现强非线性及多时间尺度特征。

目前,学术界与工程界对如何协调这些异质设备以实现系统层面高效、稳定的电压协同控制,尚未建立清晰统一的理论框架与设计规范。尤其是随着电网运行工况因新能源出力波动、负荷变化及网络拓扑调整而频繁变化,设备间的动态交互机制更趋于复杂,进一步增加了耦合调压机理的揭示难度。该理论瓶颈导致在多种运行方式及扰动场景下,难以制定精准、自适应的电压控制

策略,不仅制约了电压质量的提升,更对系统安全稳定运行构成潜在风险,因此亟需深入开展针对多元设备耦合调压机理的基础性与应用性研究^[75-77]。

4.2 无功调节手段匮乏与潜力挖掘不足

传统电力系统的无功调节主要依赖同步发电机励磁系统与电容器、电抗器等无功补偿设备。随着高比例新能源并网,大量同步机组退役,励磁系统的无功支撑能力随之大幅削弱,而系统无功调节资源仍以无功补偿设备为主,并未发生根本性变化。无功补偿设备虽可提供固定容性无功,但难以适应局部高渗透率新能源接入地区的调节需求,在面对新能源出力毫秒级波动引发的电压快速变化时,其调节滞后性显著。此外,新型电力系统多元场景下的无功潜力挖掘严重不足。在分布式能源集群中,无功协同调控尚未形成体系,缺乏基于集群特性的无功分配策略。配电网侧电动汽车、储能等可调节资源由于通信延迟与控制策略缺失,参与无功调节的响应速度慢、精度低。系统级无功优化缺乏全局视角,未结合地理信息、负荷特性与新能源出力预测,传统无功规划以静态负荷为依据,与动态变化的新型电力系统工况不匹配,导致无功资源配置冗余或不足。因此,亟待构建适配新型电力系统特性的无功调节体系,通过深挖逆变器、变流器等新型设备的无功调节能力,完善逆变器相关涉网性能标准,并借鉴同步发电机的调度、控制和运行管理范式规范逆变器管控,全面激活新型主体的无功调节潜力,从而破解新型电力系统的电压治理困局。

4.3 电压治理策略场景适配性不足

新型电力系统涵盖集中式新能源基地、分布式能源集群、交直流混联配电网等多种运行场景,不同场景的电压特性与扰动诱因存在显著差异,对电压治理提出了多维度、差异化的要求。从设备层面看,各类电力电子设备的电压治理策略与控制逻辑之间存在协同障碍。例如,新能源逆变器的无功调节能力受其电流指令优先级和控制带宽的限制;而传统AVC(自动电压控制)系统以工频电压为调控目标,未充分考虑逆变器的高频调制特性与动态响应延迟,导致下发至电力电子设备的无功补偿指令与其实际响应之间存在相位偏

差,影响控制精度。

从电网运行工况来看,高比例新能源接入显著增加了系统运行方式的不确定性,对电压治理策略的广域适应性与鲁棒性提出了更高要求。在轻载时段,新能源高比例出力易引发潮流反向输送,导致基于正向潮流假设的传统电压调节策略失效;而在故障情况下,电力电子设备因快速保护动作易发生脱网,引发剧烈电压波动。现有治理策略未能充分考虑故障后设备的重构特性与协同恢复机制,往往导致电压恢复过程延长,甚至出现二次失稳。上述问题揭示了当前电压治理策略在复杂多场景下的适配性不足,严重制约了整体治理效能。

4.4 系统化多层次协同治理机制缺失

当前电网电压治理体系呈现显著的“层级分割、条块管理”碎片化特征。在输电、区域电网、配电网乃至用户台区等不同层级中,电压调控的目标设定、技术手段与管理责任往往相互独立,缺乏跨层级协调与统一优化。这种“孤岛式”治理模式难以适应新型电力系统源荷双侧动态互动、扰动全域传播的运行特点。尤其是在新能源高比例渗透、负荷波动性增强的背景下,电压扰动往往在多层次并发且相互耦合。若各层级仍基于局部信息与独立目标实施调控,不仅难以从根本上解决系统性问题,还可能因控制动作失配而产生反向调节效应,造成“治理内耗”,甚至加剧电压波动。

因此,亟需构建贯穿“主网-区域-配电网-台区”的全层级协同控制机制,明确各层级控制目标的耦合关系,建立统一的信息交互接口标准与数据共享体系,并明确界定跨层级的控制责任与联动流程。这不仅是实现新型电力系统电压安全与优质运行的内在要求,也是当前电网运行控制体系转型升级的重要方向。

5 新型电力系统电压治理体系的关键技术

针对高比例新能源接入引发的电压双向越限、电压稳定裕度下降等系统性风险,亟需构建“仿真-控制-规划”三位一体的电压治理技术体系。该体系以动态电压稳定机理为理论基础,通过高精度仿真预判风险、多时间尺度协同控制平抑波动、

源网荷储联合规划优化资源配置,实现从被动应对到主动防御的转变。其关键技术如图2所示。国网衢州供电公司电压治理系列工程实践验证了该体系的有效性,为系统性电压风险治理提供了实践经验。

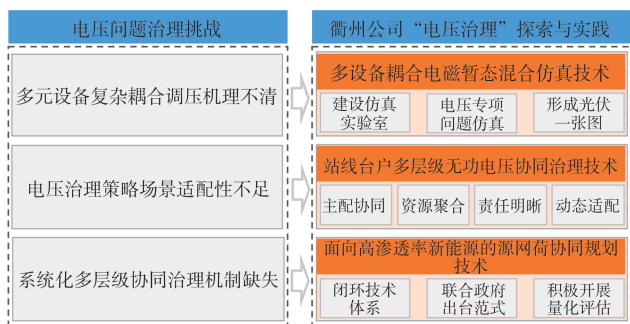


图2 构建新型电力系统电压治理体系的关键技术

Fig.2 Key technologies for building a voltage governance framework for modern power systems

5.1 多设备耦合电磁暂态混合仿真技术

新型电力系统电压问题研究的仿真实理论与技术体系可依据分析目标的时间尺度划分为稳态与暂态两大类。稳态仿真主要依托潮流计算及其扩展方法,如CPF(连续潮流)和OPF,用于评估系统在不同运行方式下的静态电压稳定性、无功裕度及电压薄弱节点,结合概率潮流或区间潮流还可有效刻画高比例新能源出力不确定性对电压分布的影响。暂态仿真则以机电暂态TDS(时域仿真)和EMT(电磁暂态)仿真为核心:机电暂态仿真适用于分析秒级至分钟级的电压动态过程,广泛应用于大电网安全稳定校核;电磁暂态仿真凭借微秒至毫秒级的时间分辨率,可精确模拟电力电子变流器的快速控制动态、锁相环交互及谐振等现象,是研究高比例电力电子系统中电压失稳、次/超同步振荡等新型电压问题的关键手段。

为破解多元设备复杂耦合调压机理不清的难题,需通过建立全电磁数字实时仿真实验室实现主网、配电网、台区多层次硬件在环仿真,深入分析底层调压机理,同时构建包含光伏一张图、预测与告警平台的电网一张图仿真模型,形成“生产出题、仿真答题”的闭环管理模式,贯通技术与生产实践;针对电压风险防控碎片化、响应滞后的问题,还需融合广域同步相量测量、智能电表、分布式终端及边缘感知节点等海量终端数

据,依托数字孪生平台构建电网多物理场耦合仿真模型,深度融合边缘计算、人工智能等新一代数字技术,实现电压异常的早期识别与风险量化,建立预测、仿真与控制的闭环智能风控机制,提升系统电压风险治理响应速度。

在工程实践方面,国网衢州供电公司建立了全省首个山区全电磁数字实时仿真实验室,完成多项现场电压问题专项仿真,为高比例新能源接入场景下的电压稳定分析及治理方案提供了有力支撑。

5.2 站线台户多层次无功电压协同治理技术

针对新型电力系统运行不确定性加剧导致传统调控策略适应性不足的问题,需构建从被动响应向主动协同、从孤立控制向系统集成、从经验驱动向机制驱动演进的新型电压治理理念,进而建立“主配协同、资源聚合、责任明晰、动态适配”的电压治理新架构,通过分层决策机制厘清主网全局优化与配电网本地自治的权责边界,依托多时间尺度控制指令动态交互实现跨层级资源互济,以差异化场景策略替代“一刀切”式调控。

具体技术路径包括:在站侧强化暂态电压支撑与全相序谐波抑制,部署构网型SVG(静止无功发生器)、有源滤波器等设备,创新研制电力电子有载调压变压器,破解因高比例新能源替代传统同步机组后,系统内能提供动态无功支撑与惯性响应的同步电源占比持续下降所带来的电压支撑不足问题;在线侧针对电压暂降与越限传播,在反向越限严重的中压线路部署智能调压装置,优化供区主变中性点接地方式,开展长链路薄弱供电电压暂态治理,阻断电压问题跨区域传导;在台侧根据电源接入拓扑进行分类,制定差异化的“分散+就地”“单点+协同”治理方案;在户侧针对电压暂降敏感用户,建立多方协同机制,通过优化主变中性点接地方式、安装用户侧分界开关等措施提升供电可靠性。同时,为充分挖掘无功调节潜力,需构建源网荷储多主体一体化无功协同调控框架,依托构网型储能、虚拟同步机、柔性直流、智能逆变器与分布式资源群调群控等新技术,优化无功配置策略、完善市场激励机制与控制接口标准,提升配电网电压动态调节能力。

国网衢州供电公司采用“站-线-台-户”四级

电压治理体系，部署相关技术设备与差异化治理方案，实现试点台区电压越限指数下降22.6%、区域电压暂降引发的非故障跳闸次数同比降低60%等显著效果。

5.3 面向高渗透率新能源的源网荷协同规划技术

在新型电力系统构建背景下，需打破传统源荷规划与运行割裂的模式，构建规划、运行、控制一体化的闭环技术体系，通过跨域模型嵌入、多源数据贯通、规划-运行动态反馈机制，实现电压安全约束在规划源头的显性化与调控能力的前瞻性配置。在电源侧，应统筹城市功能分区、土地利用与光伏资源禀赋，将电压承载能力作为分区准入的核心约束，提前开展接入系统方案设计，超前谋划汇集站布点与送出通道，避免“先建后改”导致的电压支撑薄弱问题；在负荷与调节资源侧，需创新性地构建面向电压支撑能力提升的储能需求评估指标体系，引入“高负载集中度”“反向潮流集中度”“无功波动范围”等反映电压脆弱性的关键指标，对具备储能接入条件的变电站开展量化评估与优先级排序，为网侧储能在电压敏感区域的前瞻性布局提供依据。

通过健全多元主体共治的电压综合治理体系，制定专项政策，明确无功资源配置标准、新能源并网电压支撑能力要求及配电网动态调节责任边界，编制分布式电源并网调度与无功支撑规范，完善电力辅助服务市场机制，建立“贡献可量化、收益可兑现”的市场化补偿机制，激发多元主体参与系统调节的积极性。

国网衢州供电公司联合地方政府编制光伏发展及输电规划，建立储能需求评估指标体系并应用于新型储能年度实施计划，实现了从“事后被动治理”向“事前主动引导”的机制跃迁，为源网荷储协调发展提供了可复制的范式。

6 未来展望

未来需从技术创新、资源激活、机制构建三方面持续发力，推动电压治理体系迭代升级。仿真层面，深化数字孪生仿真技术，融合广域量测与边缘感知数据，构建毫秒级多物理场耦合模型，提升复杂场景下电压风险预判精度。技术层面，

强化人工智能与电力电子技术融合，推广构网型逆变器、虚拟同步机等设备，依托联邦学习与多智能体协同算法，破解多元资源协调控制难题。机制层面，完善“主网-配电网-台区”全层级协同治理规则，统一信息交互标准；培育市场化辅助服务机制，建立无功调节贡献量化与收益兑现体系，激发分布式光伏、储能、电动汽车等柔性资源的参与积极性。通过技术、资源、机制的深度协同，持续提升电压治理的自适应性与精细化水平，为新型电力系统高质量发展筑牢安全基础。

7 结语

本文立足“双碳”目标下新型电力系统转型背景，系统剖析了电压问题的无功支撑能力弱化、多层级电压问题耦合增强、局部电压向全局跃升等新特征，深入探究了电压双向越限、电能质量问题突出、电压稳定裕度降低、无功功率波动频繁等典型问题及其成因，明确了当前电压治理面临的多元设备复杂耦合调压机理不清、无功调节手段匮乏与潜力挖掘不足、电压治理策略场景适配性不足、系统化多层级协同治理机制缺失等挑战，并结合浙江衢州在新型电力系统电压治理的实战经验，提供了可行的电压综合治理路径。

随着新型电力系统建设的不断推进，长期在有功与频率调控中处于“配角”地位的无功与电压，其作用已从基础支撑升级为保障系统安全稳定运行、提升新能源消纳能力、优化供电质量的核心要素，成为新型电力系统建设不可或缺的重要组成部分，亟需业界予以高度重视。未来需通过强化场景化技术研发、激活多元设备调节潜力、构建多层级协同机制、培育辅助服务市场等举措，持续提升无功电压治理水平，为新型电力系统高质量发展与“双碳”目标实现奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 舒印彪,汤涌,张正陵,等.欧洲伊比利亚半岛电网“4·28”大停电事故分析及启示[J].中国电机工程学报,2025,45(17):6603-6611.
SHU Yinbiao, TANG Yong, ZHANG Zhengling, et al. Analysis and lessons of the April 28, 2025 blackout in the Iberian Peninsula power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(17): 6603-6611.
- [2] 张武其,张志学,胡亮,等.2025年伊比利亚半岛大停电事

- 故原因探析及启示[J].控制与信息技术,2025(4):20-27.
- ZHANG Wuqi,ZHANG Zhixue,HU Liang, et al. Preliminary exploration of 2025 Iberian Peninsula widespread power outage and its implications for power equipment suppliers [J]. Control and Information Technology, 2025 (4):20-27.
- [3] JEEWANDARA J M D S, SANJU K A Y, SAMARAWICKRAMA S B, et al. Development of a steady state voltage regulation method for power distribution networks[C]//2022 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon). July 27-29, 2022, Moratuwa, Sri Lanka: IEEE, 2022:1-6.
- [4] 崔杨,祝福,王议坚,等.基于时空伪孪生网络的图深度强化学习分区电压控制策略[J].中国电机工程学报,2025,45(21):8295-8307.
- CUI Yang, ZHU Fu, WANG Yijian, et al. Zonal voltage control strategy based on graph deep reinforcement learning with spatial-temporal pseudo-twin network [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(21):8295-8307.
- [5] 万千,夏成军,管霖,等.含高渗透率分布式电源的独立微网的稳定性研究综述[J].电网技术,2019,43(2):598-612.
- WAN Qian, XIA Chengjun, GUAN Lin, et al. Review on stability of isolated microgrid with highly penetrated distributed generations[J]. Power System Technology, 2019, 43(2):598-612.
- [6] LIU R D, ZHANG X R, LING X B, et al. Voltage stability analysis considering the impact of distributed photovoltaic generation [C]//2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). November 11-13, 2022, Chengdu, China: IEEE, 2023: 378-382.
- [7] VARGANOVA A V, DJAGAROV N F, PETROV D A, et al. Optimization model of an external source of electricity in the conditions of power supply systems with distributed generation [C]//2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). November 16-18, 2021. Ufa, Russian Federation: IEEE, 2021:101-104.
- [8] 黎家明,霍群海,尹靖元,等.考虑柔性有载调压变压器的两阶段电压无功优化协调控制方法研究[J].电网技术,2025,49(1):272-283.
- LI Jiaming, HUO Qunhai, YIN Jingyuan, et al. Research on two-stage voltage and reactive power optimization coordinated control method considering flexible on-load tap changer[J]. Power System Technology, 2025, 49(1):272-283.
- [9] 程浩忠,胡泉,王莉,等.区域综合能源系统规划研究综述[J].电力系统自动化,2019,43(7):1-13.
- CHENG Haozhong, HU Xiao, WANG Li, et al. Review on research of regional integrated energy system planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 1-13.
- [10] 黄莘杰,方斯顿,罗颖冰,等.双向潮流下考虑储能系统状态耦合特性的配电网电压协调管理策略[J].中国电机工程学报,2025,45(14):5577-5588.
- HUANG XinJie, FANG Sidun, LUO Yingbing, et al. A coordinated voltage management for distribution network considering the state coupling characteristics of energy storage systems under bi-directional power flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(14):5577-5588.
- [11] 郑超,孙华东,杨大业.基于广域支路响应的暂态电压失稳判据与控制[J].中国电机工程学报,2023,43(24):9470-9481.
- ZHENG Chao, SUN Huadong, YANG Daye. Criterion and control of transient voltage instability based on wide area branch response[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24):9470-9481.
- [12] 杨龙月,任烜辰,蔡智鹏,等.高光伏渗透率配电网电压控制策略研究综述[J].电网技术,2024,48(12):5056-5070.
- YANG Longyue, REN Xuanchen, CAI Zhipeng, et al. Review on voltage control strategies for high PV penetration distribution networks [J]. Power System Technology, 2024, 48(12):5056-5070.
- [13] 王烁哲,韩民晓,范溢文,等.基于改进自律分散控制的换流器型电网频率/电压调整与功率分配策略[J].中国电机工程学报,2025,45(13):4980-4991.
- WANG Shuozhe, HAN Minxiao, FAN Yiwen, et al. Frequency/voltage regulation and power sharing strategy of converter-based grid with improved autonomous decentralized control [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2025, 45(13):4980-4991.
- [14] 李慧玲,余贻鑫,韩琪,等.割集功率空间上静态电压稳定域的实用边界[J].电力系统自动化,2005,29(4):18-23.
- LI Huiling, YU Yixin, HAN Qi, et al. Practical boundary of static voltage stability region in cut-set power space of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4):18-23.
- [15] 郑建锋,陈鹤林,许鸿卫,等.计及新能源接入低压配电网分布式储能双层协同优化[J/OL].水力发电,1-12(2025-12-31)[2026-01-05].<https://link.cnki.net/urlid/11.1845.TV.20251231.1020.002>.
- ZHENG Jianfeng, CHEN Helin, XU Hongwei, et al. Bi-level collaborative optimization of distributed energy storage in low-voltage distribution networks considering new energy access [J/OL]. Water Power, 1-12 (2025-12-31) [2026-01-05]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1845.TV.20251231.1020.002>.

- [16] 于凯文,卜广全,吕晨.经验轨迹空间驱动的潮流计算局部电压调整方法研究[J].电网技术,2023,47(7):2869-2881.
YU Kaiwen, BU Guangquan, LYU Chen. Power flow calculation partial voltage adjustment driven by experience-track space [J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2869-2881.
- [17] 马富艺龙,辛焕海,刘晨曦,等.新能源基地柔性直流送出系统小扰动电压支撑强度评估[J].电工技术学报,2023,38(21):5758-5770.
MA Fuyilong, XIN Huanhai, LIU Chenxi, et al. Small-disturbance system voltage support strength assessment method for renewables VSC-HVDC delivery system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21):5758-5770.
- [18] 季天瑶,曾家国,荆朝霞,等.可用输电能力计算与分配方法:研究进展、实践综述与未来展望[J/OL].南方电网技术,1-17(2025-12-19)[2026-01-05].<https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20251218.1402.002>.
JI Tianyao, ZENG Jianguo, JING Chaoxia, et al. Available transfer capability calculation and allocation methods: Research progress, practice review and future prospect [J/OL]. Southern Power System Technology, 1-17(2025-12-19) [2026-01-05]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20251218.1402.002>.
- [19] 彭浩哲.智能电网中电气工程自动化技术研究[J].电力设备管理,2025(16):205-207.
PENG Haozhe. Research on electrical engineering automation technology in smart grids [J]. Electric Power Equipment Management, 2025(16):205-207.
- [20] 吉兴全,孙辰昊,张玉敏,等.基于多智能体与改进目标级联法的输配协同优化调度[J].电力系统自动化,2025,49(2):165-174.
JI Xingquan, SUN Chenhao, ZHANG Yumin, et al. Coordinated optimal scheduling of transmission and distribution networks based on multiple agents and improved target cascading method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(2):165-174.
- [21] 张海全,纪巍,陈欢颐,等.基于原始对偶梯度算法的分布式微电网最优电压控制[J].计算机应用与软件,2025,42(11):285-294.
ZHANG Haiquan, JI Wei, CHEN Huanyi, et al. Optimal voltage control of distributed microgrid based on primal dual gradient algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2025, 42(11):285-294.
- [22] ALKHRAIJAH M, HARRIS R, COFFRIN C, et al. PowerModelsADA: a framework for solving optimal power flow using distributed algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1):2357-2360.
- [23] 蔡木良,赖信辉,李赢正,等.基于主动配电网灵活性支撑机制的电-碳-绿证分布式协同优化方法[J].中国电力,2026,59(1):10-19.
CAI Muliang, LAI Xinhui, LI Yingzheng, et al. Power-carbon-green certificate distributed cooperative optimization method based on flexibility support mechanism of active distribution networks [J]. Electric Power, 2026, 59(1):10-19.
- [24] 罗凯明,徐艺敏,张大林,等.考虑储能荷电状态均衡的低频减载优化控制策略[J].山东电力技术,2025,52(10):25-33.
LUO Kaiming, XU Yimin, ZHANG Dalin, et al. Optimal control strategy for low-frequency load shedding considering energy storage charge state balance [J]. Shandong Electric Power, 2025, 52(10):25-33.
- [25] 张逸,赵微,李传栋,等.基于图卷积网络的电网电压暂降评估[J/OL].电力自动化设备,1-14(2025-12-30)[2026-01-05].<https://doi.org/10.16081/j.epae.202512025>.
ZHANG Yi, ZHAO Wei, LI Chuandong, et al. Power grid voltage sag assessment based on graph convolutional network [J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 1-14(2025-12-30) [2026-01-05]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202512025>.
- [26] LIU J H, LI Z H. Robust expectation-maximization-based secondary voltage control scheme considering stochastic measurement error [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3):2958-2961.
- [27] 马晋弢,杨以涵.遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J].中国电机工程学报,1995,15(5):347-353.
MA Jintao, YANG Yihan. Application of genetic algorithms in reactive power optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(5):347-353.
- [28] 宣筱青,王祥浩.“源网荷储”微电网系统协调控制研究[J].科技视界,2025,15(33):69-72.
- [29] HOSSAIN R R, HUANG Q H, HUANG R K. Graph convolutional network-based topology embedded deep reinforcement learning for voltage stability control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5):4848-4851.
- [30] 姚德贵,张冠宇,郝鹏,等.考虑暂态电压稳定约束的受端电网最大直流馈入功率评估方法[J/OL].中国电力,1-15(2025-12-19)[2026-01-05].<https://link.cnki.net/urlid/11.3265.tm.20251218.1151.004>.
YAO Degui, ZHANG Guanyu, HAO Peng, et al. Considering transient voltage stability constraints: Evaluation method for maximum DC feed-in power of receiving-end power grid [J/OL]. Electric Power, 1-15(2025-12-19) [2026-01-05]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3265.tm.20251218.1151.004>.
- [31] 马继龙,胡旭光,王杰,等.面向大规模配电网的时空关联

- 图神经网络故障定位方法研究[J/OL].中国科学:技术科学,1-18[2026-01-05].<https://link.cnki.net/urlid/11.5844.TH.20251217.1032.002>.
- MA Jilong, HU Xuguang, WANG Jie, et al. Research on spatiotemporal correlation graph neural network fault location method for large-scale distribution networks[J/OL]. Science China: Technological Sciences, 1-18 [2026-01-05]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5844.TH.20251217.1032.002>.
- [32] 王甜婧,汤涌,王兵,等.传统方法与人工智能:潮流控制优化算法的现状、挑战与未来方向[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1799-1817.
- WANG Tianjing, TANG Yong, WANG Bing, et al. Traditional methods versus artificial intelligence: optimization algorithms for power flow control in state of the art, challenge and future directions[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1799-1817.
- [33] 毕聪博,唐聿劼,罗永红,等.电力系统优化控制中强化学习方法应用及挑战[J].中国电机工程学报,2024,44(1):1-21.
- BI Congbo, TANG Yujie, LUO Yonghong, et al. Review on critical problems in reinforcement learning methods applied in power system optimization and control scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 1-21.
- [34] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-474.
- XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.
- [35] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.
- SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [36] 康重庆,杜尔顺,郭鸿业,等.新型电力系统的六要素分析[J].电网技术,2023,47(5):1741-1750.
- KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750.
- [37] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2818.
- ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.
- [38] 肖先勇,郑子萱.“双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统:贡献、关键技术与挑战[J].工程科学与技术,2022,54(1):47-59.
- XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59.
- [39] 王少洪.碳达峰目标下我国能源转型的现状、挑战与突破[J].价格理论与实践,2021(8):82-86.
- WANG Shaohong. Current situation, challenge and breakthrough of China's energy transformation under the goal of carbon peak[J]. Price (Theory & Practice), 2021(8): 82-86.
- [40] 李政,陈思源,董文娟,等.碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J].中国电机工程学报,2021,41(12):3987-4001.
- LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4001.
- [41] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
- KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [42] 李萌,姚增慧,包博,等.“双高”电力系统暂态电压稳定新问题综述与展望[J].中国电机工程学报,2026,46(2):462-477.
- LI Meng, YAO Zenghui, BAO Bo, et al. Review and prospect of new transient voltage stability issues in power systems with high proportion of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2026, 46(2): 462-477.
- [43] 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.
- [44] 孙华东,王宝财,李文锋,等.高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5179-5191.
- SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings

- of the CSEE, 2020, 40(16):5179-5191.
- [45] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4330-4341.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” Architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4341.
- [46] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LIU Dunnan, et al. “Generation-grid-load-storage” coordinative optimal operation mode of energy Internet and key technologies[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124.
- [47] 魏旭, 刘东, 高飞, 等. 双碳目标下考虑源网荷储协同优化运行的新型电力系统发电规划[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3648-3658.
WEI Xu, LIU Dong, GAO Fei, et al. Generation expansion planning of new power system considering collaborative optimal operation of source-grid-load-storage under carbon peaking and carbon neutrality [J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3648-3658.
- [48] 赵冬梅, 徐辰宇, 陶然, 等. 多元分布式储能在新型电力系统配电侧的灵活调控研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1776-1798.
ZHAO Dongmei, XU Chenyu, TAO Ran, et al. Review on flexible regulation of multiple distributed energy storage in distribution side of new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1776-1798.
- [49] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10.
- [50] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [51] 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.
- [52] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [53] 郭贤珊, 厉璇, 王庆, 等. 特高压直流输电技术发展现状与思考[J]. 新型电力系统, 2024, 2(3): 237-250.
GUO Xianshan, LI Xuan, WANG Qing, et al. Status and thoughts on the development of ultra high voltage direct current (UHVDC) transmission technology [J]. New Type Power Systems, 2024, 2(3): 237-250.
- [54] 汪颖, 钟啟明, 刘育权, 等. 新型电力系统的电能质量扰动治理关键技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(22): 8670-8691.
WANG Ying, ZHONG Qiming, LIU Yuquan, et al. Review and prospects of key technologies for power quality disturbance mitigation in new-type power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(22): 8670-8691.
- [55] 胡铭, 陈珩. 电能质量及其分析方法综述[J]. 电网技术, 2000, 24(2): 36-38.
HU Ming, CHEN Heng. Survey of power quality and its analysis methods [J]. Power System Technology, 2000, 24(2): 36-38.
- [56] 苏寅生, 周挺辉, 赵利刚, 等. 电力电子设备谐波对主网的影响分析与对策探索[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 47-56.
SU Yinsheng, ZHOU Tinghui, ZHAO Ligang, et al. Impact analysis and countermeasure exploration of power electronic equipment harmonics on main network [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 47-56.
- [57] 邓晓洋, 董晓庆, 贾焦心, 等. 新能源汇集系统非全相运行过程工频过电压影响因素及控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(增刊1): 151-162.
DENG Xiaoyang, DONG Xiaoping, JIA Jiaoxin, et al. Study on power frequency overvoltage influencing factors and mitigation strategies during open-phase operation in renewable energy integration systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(S1): 151-162.
- [58] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1-8.
LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 1-8.
- [59] 程好, 张真卿, 徐帆, 等. 高比例分布式光伏有源配电网电压协同控制策略[J/OL]. 自动化技术与应用, 1-8 [2026-01-05]. <https://link.cnki.net/urlid/23.1474.TP.20250828.1024.020>.
CHENG Hao, ZHANG Zhenqing, XU Fan, et al. Voltage cooperative control strategy for active distribution network with high proportion of distributed photovoltaics [J/OL].

- Techniques of Automation and Applications, 1-8 [2026-01-05]. <https://link.cnki.net/urlid/23.1474.TP.20250828.1024.020>.
- [60] 王成山,王守相.分布式发电供电系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2008,32(20):1-4.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4.
- [61] 王文彬,伍小生,朱傲,等.基于层次分析法的配电网“低电压”智能规划与综合治理评估技术研究及应用[J].电工技术学报,2018,33(增刊2):596-607.
WANG Wenbin, WU Xiaosheng, ZHU Ao, et al. Research and application of low-voltage intelligent planning and comprehensive treatment evaluation technology for distribution network based on analytic hierarchy process [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2):596-607.
- [62] 李睿.低压配电网电压质量问题分析与治理[J].电工技术,2020(1):110-112.
LI Rui. Analysis and treatment of voltage quality problems in low-voltage distribution network [J]. Electric Engineering, 2020(1):110-112.
- [63] 林跃欢,黄彦璐,田兵,等.配电网低电压治理方案动态评价方法研究[J].电测与仪表,2023,60(6):74-80.
LIN Yuehuan, HUANG Yanlu, TIAN Bing, et al. Research on dynamic evaluation method of low-voltage governance scheme in distribution network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(6):74-80.
- [64] 边宏宇,徐友平,邵德军,等.直流馈入受端电网“空心化”形势下的稳定特性分析及解决措施[J].电力系统保护与控制,2020,48(18):164-170.
BIAN Hongyu, XU Youping, SHAO Dejun, et al. Analysis of stability characteristics and solutions with the hollowing of a DC feed power grid [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18):164-170.
- [65] 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.
- [66] 陈志永,张倩茅,秦梁栋,等.考虑大规模区外来电接入的输电网扩展规划方法[J].电网与清洁能源,2022,38(10):87-97.
CHEN Zhiyong, ZHANG Qianmao, QIN Liangdong, et al. A transmission expansion planning method considering of large-scale external power access [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10):87-97.
- [67] 李润涛.新能源时代下风电与光伏的协同发展路径[J].中国战略新兴产业,2025,(24):81-83.
- [68] 林女贵,徐鸣,郑美春,等.基于双碳目标的新能源电网电力交易优化方法[J].电测与仪表,2025,62(9):149-156.
LIN Nvgui, XU Ming, ZHENG Meichun, et al. Optimization method of electricity trading in new energy grid based on carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(9):149-156.
- [69] 李志伟,王佳凯,董纳洋,等.考虑频率安全和概率性功率平衡的新型电力系统随机优化调度模型[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),1-14(2025-09-09)[2026-01-05]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1999.tm.20250908.1347.002>.
LI Zhiwei, WANG Jiakai, DONG Nayang, et al. Stochastic optimal scheduling model for new power systems considering frequency security and probabilistic power balance [J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 1-14 (2026-01-05) [2026-01-05]. <https://link.cnki.net/urlid/10.1999.tm.20250908.1347.002>.
- [70] 李明节,陈国平,董存,等.新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J].电网技术,2019,43(11):3979-3986.
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system [J]. Power System Technology, 2019, 43(11):3979-3986.
- [71] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等.双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J].高电压技术,2021,47(9):3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9):3036-3046.
- [72] 国网能源研究院有限公司.中国能源电力发展展望2020[M].北京:中国电力出版社,2020.
- [73] 佚名.国家能源局:我国可再生能源实现跨越式发展:我国可再生能源发展有关情况介绍[J].中国电业,2021(4):6-9.
- [74] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):1-8.
- [75] 谢小荣,马宁嘉,刘威,等.新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J].中国电机工程学报,2023,43(1):158-168.

- XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-168.
- [76] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
- YANG Xinfu, SU Jian, LYU Zhipeng, et al. Overview on microgrid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [77] 辛保安. 抢抓数字新基建机遇 推动电网数字化转型[J]. 电力设备管理, 2021(2): 17-19.
- XIN Baoan. Seize the opportunity of new digital infrastructure to promote the digital transformation of power grids [J]. Electric Power Equipment Management, 2021 (2): 17-19.
-
- 收稿日期: 2025-11-25; 修回日期: 2026-01-06
- 作者简介:
- 王锋华(1977), 男, 工学硕士, 教授级高级工程师, 主要从事电网规划、新型电力系统建设等方面的研究工作。
(本文编辑: 方明霞)