

城市安全可靠供电需求下的 韧性配电网实践

郑凯元¹, 于希娟¹, 杨禹锡², 高阳², 王立永¹, 刘庆时², 陈平¹, 刘崇茹³

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京市 100075; 2. 国网北京市电力公司, 北京市 100031; 3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206)

摘要:随着电网形态和运行方式的日益变化,以及国家安全体系和安全治理能力的现代化,电网韧性建设成为提高电力安全水平的必要手段。首先,通过阐述电网韧性的基本概念和特征,综述了国内外韧性研究的主要成果和经验教训,回顾了韧性增强的典型措施和关键技术。然后,以典型受端城市配电网为例,从提升配电网的感知力、协同力、应变力、防御力和恢复力5个角度,概述某典型城市进行韧性配电网建设的典型措施;从网架、电源、负荷与应急手段4个方面评估电网韧性水平现状,从供应安全、系统安全和非常规性安全问题3个方面明确城市电网未来发展面临的制约和挑战。最后,讨论电网韧性建设的基本路径和关键技术,基于电网特性明确提升韧性水平的关键科技布局。

关键词:电网安全治理;电网韧性建设;受端城市电网;韧性城市

Resilient Distribution Network Practice of Cities Under the Demand for Safe and Reliable Power Supply

ZHENG Kaiyuan¹, YU Xijuan¹, YANG Yuxi², GAO Yang², WANG Liyong¹,
LIU Qingshi², CHEN Ping¹, LIU Chongru³

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: With the increasing complexity of grid configuration and operation modes as well as the modernization of the international security system and security governance capacity, grid resilience construction has become an important means of improving power security. This study first expounds on the basic concept and characteristics of grid resilience and then reviews the main achievements and lessons drawn from domestic and foreign resilience research, as well as resilience enhancement measures and key technologies. Considering a typical receiving urban distribution network in Beijing as an example, the measures for building a resilient distribution network are outlined based on five perspectives: improving the perception, coordination, adaptability, defense, and resilience. The current resilience level of urban power grids is evaluated based on four aspects: grid, power supply, load, and emergency type. The constraints and challenges facing the future development of urban power grids are clarified based on the following three aspects: supply security, system security, and non-conventional security issues. Finally, the basic technical paths and key technologies for grid resilience construction are discussed, and the key technology layout for improving the resilience level is clarified based on grid characteristics.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5100-202311424A-3-2-ZN).

KEYWORDS: grid security governance; grid resilience construction; load-end city grid; resilient cities

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2025)02-0035-14

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.02.004

0 引言

推进国家安全体系和能力现代化建设是全面建设社会主义现代化国家的必然要求^[1],是基于国情实际、维护国家利益的必然选择^[2]。城市安全运行保障与韧性增强关键技术作为推进安全治理能力现代化重要技术之一^[3],旨在通过韧性建设以确保城市在极端冲击或慢性压力下保持特征、结构和功能^[4]稳定。城市电力系统作为城市最核心的公共基础设施之一^[5],电网韧性建设的水平直接影响到城市的韧性水平^[6];而随着新型电力系统的建设,经济社会对电力系统韧性的要求显著提高^[7]。

受地缘政治恶化或极端气候灾害等因素的影响,近年来全球范围内电网大规模停电事故频发^[8],导致大量经济损失和恶劣的社会影响^[9]。小概率但高影响力的事故具有难以预测、易引发连锁故障和易永久性损伤电力设备等特征,给电网安全稳定运行带来严峻挑战^[10];考虑到能源转型所推动的电能消费终端比例提升^[11]、新能源大量并网所导致的电网转动惯量降低和电压支撑能力弱化^[7]等因素,当前电网尤其是城市电网的非常规安全风险集聚^[12],在极端灾害和人为攻击下的运行风险剧增^[13]。可见为提高新型电力系统安全治理水平,电网的现状韧性分析及韧性建设^[14]等工作不可或缺。

随着韧性概念的提出^[15]并扩展应用至电力系统^[16],世界各国持续提升含电力系统在内的基础设施韧性乃至提高到国家根本战略的高度^[11,13]。在电力系统安全治理能力现代化背景下考虑电网韧性水平提升,是为了应对新型电力系统建设伴生的电网复杂程度提高^[17]和电网外部威胁多元化^[18]等情况,正确评估电网遭受极端事故时减少过程故障损失及尽快恢复正常供电的能力^[19],进而针对性提出韧性补强措施^[20]。

近年来诸多学者对韧性配电网从多元化灵活性资源^[21]、电网故障恢复特点^[22]和韧性提升关键技术^[23-24]及其模型建立^[25]等方面开展深入分析^[26]。极端天气是电网韧性承压的典型场景,如极端高温导致的负荷激增^[27]、电缆线路等元器件故障^[28]以及极端冰灾导致线路覆冰和负荷降低^[29]对电网综合韧性评估及通过配微协同^[30]等手段提升电网韧性提出挑战。为应对台风灾害,文献[31]从准稳态潮流角度提出系统韧性评估方法;文献[32]通过电动汽车灾前避难/灾后参与恢复供电引导、调动分布式资源^[21]参与配网韧性提升;文献[33]考虑一级负荷最大存活,提出韧性提升的主动配电网分级减载策略。

针对电力信息物理系统,文献[34]分析了物理攻击/虚假数据注入对电力信息系统的韧性挑战;文献[35]考虑无人机对电力通信系统与电动车对电力系统的协同恢复作用。当前研究重点围绕灾前防御、灾中响应和灾后恢复三方面提升电网韧性特征,如灾前优化规划^[36]、灾中优化表现^[37]和灾后快速恢复^[38],其中灵活性资源的利用^[32,39]、输配协同^[40]和配微协同^[30]等方法在供电恢复阶段提升电网韧性是较为有效的手段之一。

本文立足于新型电力系统电力安全体系对大型城市电网韧性建设要求,首先阐明韧性基本内涵及其特征,从学术研究及工程实践的角度综述国内外电网韧性建设的经验与教训;然后,回顾某典型城市电网配电网韧性建设所采取的措施,评估城市电网现状韧性水平并明确城市电网韧性建设所面临的形势和挑战;最后从关键科技布局的角度,针对典型城市受端电网韧性水平建设与提升提出相应的建议。

1 电力安全治理体系下的韧性建设综述

1.1 电网韧性的基本概念及其建设经验

韧性电网是指能够全面、快速、准确实现电网运行态势感知,协同电网内外部资源,对各类扰动做出主动预判与积极预备,主动防御,保证重要电力用户快速恢复,并能自我学习和提升的电网^[19]。电网韧性与可靠性、鲁棒性及灵活性等概念既有区别又有联系,文献[19]对其进行了详细阐述。电网韧性水平通常采用韧性曲线^[41]和加权综合量化评价^[42]等方法进行评估。

韧性电网的关键特征^[6,19]包含感知力、协同力、应变力、防御力、恢复力和学习力。其中,感知力是对电网运行状态快速精准感知、并对电网未来运行态势进行预测以及对潜在风险做出预警^[43]的能力,其关键技术包含电网安全态势察觉^[44]、安全态势理解^[45]和安全态势预测^[46]等;协同力是指电网协同内外部资源共同应对扰动的能力^[47],涵盖输配协同^[48]、网源荷储协同^[49]和政企协同^[50]等方向;应变力是指电网在事故前主动预判及预案制定,及采取预备措施应对突发扰动的能力^[51],涉及稳定控制^[52]、智能运维^[53]和优化规划^[54]等方向;防御力是指在扰动发展过程中所采取主动防御措施以降低事件影响的能力^[55],关键技术包含电网强化和协调增强稳定^[56]等;恢复力是指电网遭遇破坏后及时启动应急恢复和修复机制,保障重要用户持续供电及快速恢复供电的能力^[57],依赖故障自愈^[58]和电网黑启动^[59]等技术;学习力指电网从停电故障中获取经验、并逐步融合新

兴技术以实现自我提升的能力^[9]。

电网韧性的研究大概经历了概念的提出与界定、评估方法与指标体系建立^[60]、提升策略与关键技术研究^[61]3个发展阶段:

1)概念的提出与界定阶段:20世纪初受到“9·11事件”等极端灾难的影响、电力系统在极端情况下的运行特性受到广泛关注;

2)评估方法与指标体系建立阶段:2015年,随着电力系统复杂性的增加以及新技术的发展,国内外开始探讨如何量化和评价电力系统韧性,建立从灾害建模到系统响应的评估框架以及静态评估和动态评估两类韧性指标;

3)提升策略与关键技术研究阶段:2020年,针对不同类型和规模的灾害场景,国内外开始研究如何提升电力系统的韧性能力,并从故障预防、故障响应、故障恢复3个方面提出包含风险管理等系列关键技术。

从不同国家研究的角度看,美国^[62-64]、英国^[65]、日

本^[66]在内的发达国家,以及亚太经济合作组织(Asia-Pacific Economic Cooperation, APEC)和国际能源署(International Energy Agency, IEA)等国际组织,从制定法律、出台法规、开展科技研究、进行韧性电网试验区建设等多个方面进行了有益的尝试,典型探索举措如图1所示。

美国通过《智能电网报告》《韧性电力系统的转型》《增强美国电力系统的韧性》《迈向2050年净零排放长期战略》和PPD-21号总统令等政策性、行业性文件强调并明确电网韧性建设在能源转型中的重要性,在2019年《韧性分布式能源资源路线图》中阐述分布式资源对提升配网系统韧性的重要作用;英国通过RESENT项目对系统模型建立和政策指导分析展开研究;日本通过《第四版战略能源计划书》和《国土韧性基本法》等法规将电网韧性建设提高至国家战略的高度,所建成的东松岛智慧防灾生态城已在极端灾害下实现重要用户不间断供电。

国内的学者对电网韧性概念进行了不同程度的

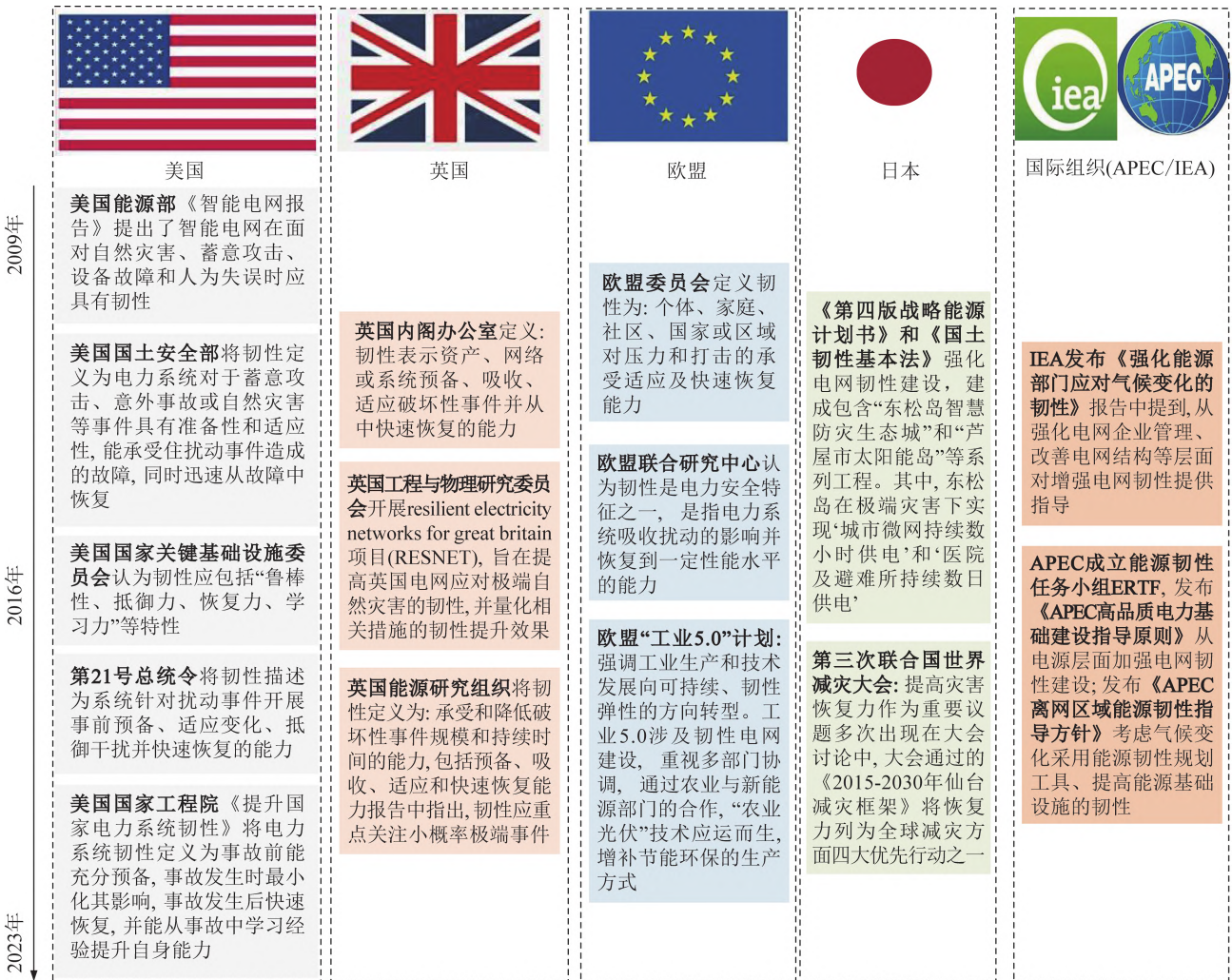


图1 一般国家及地区关于电网韧性研究时间序列

Fig. 1 Time series of research on power grid resilience of some countries and regions

<http://www.cepc.com.cn>

发展和扩充:电力系统领域中的韧性概念最早是由华中科技大学欧阳敏在2014年引入^[67],并定义韧性的鲁棒性、冗余性、机敏性和快速性4个维度;2015年西安交通大学邱爱慈团队提出电网弹性与恢复力^[68]的概念,清华大学陈颖将研究扩展至配网韧性领域^[69]并关注重要负荷的供电维持与恢复能力;2019年河海大学鞠平在综述韧性研究时指出要关注持续性随机扰动下的电网韧性水平^[70]。工程实践层面,国网上海市电力公司打造的海绵城市电网^[71]、国网浙江省电力有限公司构建的多元融合高弹性^[72]电网以及国网北京市电力公司的数字化低碳城市电网^[73]均为电网韧性建设的有益实践,为电网韧性提升积累了宝贵经验。

1.2 电网韧性不足的教训及韧性增强措施

近年来世界范围内由于电网韧性不足导致的停电事故时有发生,给人民生活和社会经济带来了巨大损失。韧性缺失导致的电网事故大致可以分为5类,分别为:

1) 抵御战争破坏的韧性不足。由于电力设施是战争双方攻击的首要目标,叙利亚“3·3”大停电和俄罗斯无人机空袭乌克兰电力设施导致大停电均是由于电网抵御战争的韧性不足所致。

2) 抵御网络攻击的韧性不足。网络攻击的隐蔽性和穿透性更强,伊朗2010年核电厂数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)受震网病毒攻击导致瘫痪、委内瑞拉2019年“2·7”大停电、乌克兰2015年调控系统受网络攻击导致停电属于电网抵御网络攻击的韧性不足所致。

3) 抵御极端自然灾害的韧性不足。极端天气和自然灾害可能直接破坏基础设施或影响供需平衡,中国2008年湖南冰灾、2021年郑州特大暴雨导致的停电,以及日本2011年“3·11”地震所致大停电说明电网抵御极端自然灾害的韧性不足。

4) 广域电网调度的韧性不足。缺乏统一调度能力会导致故障范围扩大,2006年欧洲“11·02”大停电和2020年美国加州“8·14”大停电均是由广域电网调度韧性不足所致。

5) 电力系统结构韧性不足。电力系统结构韧性不足又可分为4个层面:(a)负荷中心电源支撑能力不足,2003年美加“8·14”大停电是由系统振荡时缺乏备用调节能力所致电压崩溃而诱发;(b)受端电网输电通道配置不合理,如2011年美墨“9·8”停电事故是由受端电网输电通道配置不合理导致;(c)电力设备老化,2005年俄罗斯“5·24”大停电的起因是老化变压器爆炸导致的连锁故障;(d)电网网架结构薄弱,

2003年意大利“9·28”大停电的诱因是重载互联线路在风摆时引起保护动作、进而诱发连锁重载和切断动作。可见韧性缺乏而导致故障的原因是多维度的。

电网韧性增强措施的研究主要包括韧性评估方法、韧性优化策略与韧性支撑技术3个方面:1)韧性评估方法是基础,需建立从灾害建模到系统响应的评估框架,涵盖静态和动态评估2类指标以量化电力系统的韧性水平。目前已经形成了一些国际标准和国内规范,如IEEE 1366、GB/T 33976等,并在一些典型案例中进行了应用和验证。2)韧性优化策略是核心,旨在利用数学规划、人工智能^[74]、多目标决策等方法,优化电力系统的结构、运行、控制和规划等方面,提高电力系统的韧性表现。已经提出了一系列优化模型和算法并在实际问题中进行求解和分析。3)韧性支撑技术是保障,旨在利用微电网、储能及电动汽车、需求响应、智能配电网等技术,提高分布式能源与可移动资源的利用率和协调能力,提高电力系统灵活性和自愈能力。当前已经开展了大量关于微电网、储能、需求响应、智能配电网等技术在提高电力系统韧性方面的理论研究和工程示范。

此外,美国科学院《增强美国电力系统的韧性》报告^[61]中较为系统地提出涵盖安全治理制度建设、电力新技术等多个方面的、韧性增强的12条具体措施。

2 城市电网韧性建设

城市电网是城市的生命线,为城市的经济发展和社会稳定提供了基础保障;提高城市电网的韧性,即在遭受外部冲击时能够保持正常运行或快速恢复的能力,是城市电网建设的重要目标。配电网是电网的最后一级,直接面对终端用户,其运行状态直接影响到用户的用电质量和满意度。配电网也是电网中最复杂、最脆弱、最容易受到干扰的部分,其故障率和损失率远高于输电网和变电网。因此,配电网韧性建设是城市电网韧性建设的核心^[69],是保障城市电力供应和社会稳定的关键。

大型城市电网的建设与发展,其韧性水平提升经历可大致归纳为完善供电能力、提高供电质量和全面品质提升3个阶段^[75],通过不断提升配电网韧性水平保障了城市供电万无一失。在传统电力系统向新型电力系统转型的大背景下,系统面临的形势深刻变化和非常规安全等问题考验着城市电网的安全稳定运行,也对配网韧性建设^[7]提出新的挑战。本节聚焦某典型城市配网韧性建设,首先介绍如何通过配网韧性建设保障城市电网安全可靠运行,而后分析未来形势变化对配网韧性带来的挑战。

2.1 以配电网韧性建设支撑城市电网安全可靠运行的典型经验

本节试图从某典型城市配网运行面临的挑战、现有配网韧性建设的措施、配网韧性特征的体现场景等几个角度,以阐明如何通过配电网的韧性建设支撑其电力系统的安全稳定运行。城市配电网韧性建设实践的6个维度如图2所示。

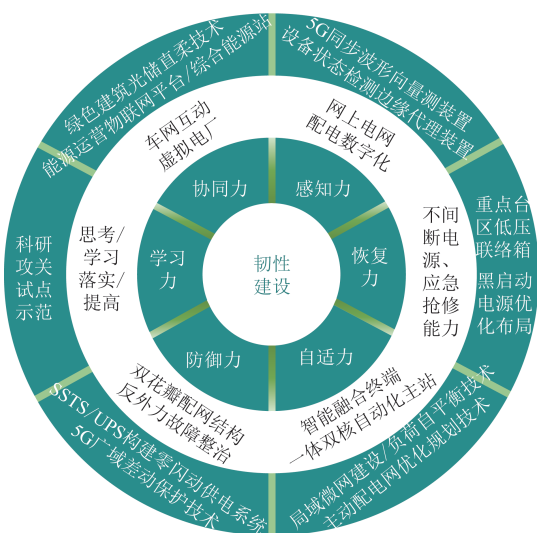


图2 城市配电网韧性建设实践的6个维度

Fig. 2 Six dimensions of resilience building in power distribution network practice

韧性不足的配电网在遭受自然灾害、人为破坏或其他突发事件的影响时无法保持正常运行或快速恢复,可能给城市的电力供应和社会稳定带来严重的损失和影响^[57]:包括如强降雨浸泡环网柜等电力设施诱发闪络/短路故障,台风等外力破坏配网结构的完整性,严寒冰雪增加负荷负担迫使配网逼近运行极限,尖峰负荷导致配网过载并损害电力设备,网络攻击通过干扰配网关键节点/信息系统造成配网失控等潜在严重后果。

因此需要从解决实际工程难题的角度出发,通过系列配电网韧性建设举措,切实增强在电网日常运行及各个关键应用场景下的电网安全水平,通过提升韧性特征水平以建设韧性配电网。

2.1.1 从感知力的角度进行配网韧性建设

从感知力的角度,对配电网的感知能力较主网而言是相对薄弱的,该城市电网采取了平台建设与新技术应用等手段提升配网感知力:通过设备数据库建设(2005年)、设备状态监测(2007年)、建立电缆网运行监控中心(2008年)、设备状态检修辅助决策系统建设(2010年)、调控大运行体系建设(2012年)、配网设备质量“两排查一整治”专项举措以及大数据

自动识别配网故障线路(2017年)、拓展智能机器人巡检应用功能实现设备缺陷快速诊断(2019年)、“一图四态”的配网设备状态透明化系统(2020年)、在试点电网应用新一代数字技术实现“四维感知”(2022年)等措施增强对设备和配网感知,结合以“数字电网”和“网上电网”建设^[76],通过投入5G同步测量终端等测量设备^[77]全面增强感知力。

例如,网上电网建设是通过业务数字化、可视化、智能化持续推进企业级的数据贯通。不断巩固“电网一张图成果”,依靠网上电网建设推进电缆管网和小区资源等图上纳管,通过设备在线和智能诊断等成熟场景规模化应用,实现电网薄弱点和设备风险点信息总览。通过打造高效配电数字化运营体系、提升配电设备数字化精益管理水平、推进配电数字化班组建设等措施,全面提升对配电网的感知能力水平。

2.1.2 从协同力的角度进行配网韧性建设

从协同力的角度,通过建立三位一体的技术监督体系(2005年)、建立多部门协调联动的电网风险控制体系(2007年)、参与政府协调联动体系建设(2014年)等制度建设,结合以输配协同手段^[78]、“车网互动、虚拟电厂、绿色建筑光储直柔项目”等网源荷储协同技术^[79]、电网与其他关键基础设施协同^[80]的策略、“城市大脑智慧能源板块”等能源大脑与城市运营大脑协同^[81]方案主动对接城市管理平台,通过实现装备协同管理、政企联合联动以提升城市配电网韧性的协同力。

例如通过车网互动项目打造新型储能资源池,深度挖掘其在平抑峰谷差、消纳绿电、化解局部重载、支撑电动汽车发展和解决充电桩安装困难的五大价值,充分利用现有可移动资源对电网韧性的提升作用;通过虚拟电厂建设打造绿电消纳资源池,持续提升电网灵活调节能力及弹性恢复能力。推进气光协同调度运行机制应用、搭建新型电力系统能源运营中心(能源运营物联网平台)、建设低碳园区综合能源站、推进政企合作长效化机制化,聚合电网内外部资源提升协同力。

2.1.3 从应变力的角度进行配网韧性建设

从应变力的角度,通过建立电力安全预警和应急预案制度(2004年)、完善应急预案体系建设(2007年)、建成应急业务管理系统(2009年)、建成三级预案管理系统(2017年)等预案编制创新工作切实提升城市配电网的应变水平;通过建成“一体双核”配电自动化主站系统(2017年),配合以投运安全稳定分析系统等配网智能运维和稳定控制手段、主动配电网优化规划^[82]的技术,建成110 kV以双方向链式接线为主

的坚强配电网网架,全方位提高配电网应变能力。

例如,该城市电网率先投运“一体双核”配电自动化主站系统,领衔实现省级配网配电自动化有效全覆盖与功能全投入,推行架空配网级差式馈线自动化全覆盖和配电自动化终端运维式管控,基于融合终端打造智能化台区,通过全力提升配网自动化运维水平以完善电网的应变力。

2.1.4 从防御力的角度进行配网韧性建设

从防御力的角度,由于该城市配电网绝大多数故障是由外力破坏引起,通过“反外力工作办法”和“配电线路防雷标准化整治”(2007年)、配电线路绝缘化改造(2008年)、配网故障智能自愈隔离能力建设(2009年)、配网建设标准化改造(2014年)、全面提升配网自动化覆盖率(2016年)、视频监控和用户分界断路器的推广应用(2017年)、建成电力监控系统安全防护管控体系(2017年)、城市核心区架空线入地以及重点地区低压线路改造工程(2018年)提升电网故障抵御水平。

例如,通过建设钻石形/花瓣形配网强化配电网结构,大幅提升自动化设备在线率和保护故障正确动作率以限制故障影响范围。同时,结合架空线入地、线路绝缘化改造和反外力视频监测系统全面应用等工程举措,利用固态转换开关(solid-state transfer switch, SSTS)等设备构建零闪动供电系统,全面增强城市配电网的防御能力。

2.1.5 从恢复力的角度进行配网韧性建设

从恢复力的角度,通过强化三级应急抢修队伍建设(2005年)、加强应急组织体系建设(2006年)、投

入1 000 kW燃气轮机电源车(2007年)、组织应急演练常态化并购置飞轮储能发电车(2009年)、构建含800M集群通信终端系统在内的应急通信体系(2011年)、成立公司应急指挥系统并制定应急响应工作细则(2012年)、重点台区推广应用低压联络箱保障停电故障快速恢复(2018年)、高标准供电区域应用SSTS+不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)确保重要用户供电零故障(2018年)、故障自愈投入全覆盖及应用干粉灭火等装置提升电缆网的主动消防和快速检修能力(2019年),实现快速恢复供电能力的提升并保障重要用户持续供电。

此外重要用户自备应急电源建设^[83]、电厂黑启动能力建设^[84]、微电网建设探索^[85]、电动汽车和移动储能等可移动资源、新能源支撑黑启动技术等均有方保障了配网恢复力提升。

得益于前述增强配网韧性举措的落地见效,该城市电网各方面运行指标得到显著优化提升,经过对近40年的电网发展历程梳理,可归纳为图3中3个发展阶段,从韧性建设的角度看、该电网总体发展历程是一个电压等级不断提升、网架结构逐步优化、供电可靠性持续提升的过程^[86]。受城市电力系统投资规模和转型发展压力的影响,接入大量民生负荷的受端城市电网韧性具有“现状韧性较完备、未来提升急迫”的特点。由于配网线路比例高和故障率高,受端电网的感知力和故障抵御力是持续建设的重点,而受制于城市发展规划等因素的影响,电网韧性特征的提升更依赖于科技创新主导下新技术的产出和工程应用。

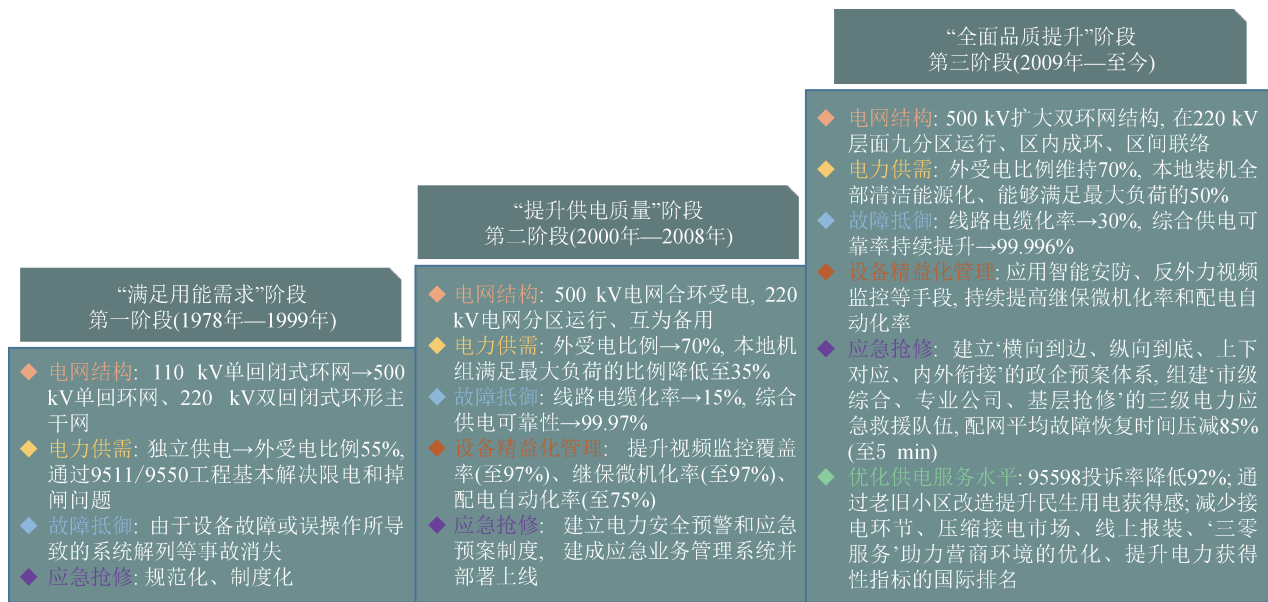


图3 某城市配电网韧性建设实践的发展历程

Fig. 3 The development process of the resilience construction practice of a city's distribution network

<http://www.cepc.com.cn>

2.2 配电网韧性现状韧性水平的评估

前述提升配电网韧性的措施有效地提升了该城市电网的韧性水平,本节从常规情况和极端情况2个角度,考虑含政治保电、极限压力和自然灾害在内的明确场景,衡量城市电网的现状韧性水平。常规情况下,可以参照各类实际运行指标进行韧性水平衡量,通过近15年来的增容改造等工程,当前该城市电网供电可靠性位于全国前列、城市核心区供电可靠率达到世界领先水平,户均停电时间逐年降低,可见常规情况下电网韧性充足。

极端情况下电网韧性可从如下角度进行衡量:

1)电网是否坚强:该典型城市电网采用主网/配网协同规划、主/配/农网协调发展的电网发展模式,形成了主配网的坚强网架结构,主网分区运行互为备用的方式保证了充足的互济能力,配网可靠合环等技术能够有效缓解局部结构不合理、设备重过载等问题给电网安全稳定带来的风险。

2)电源是否充足:外受电比例过高是大型城市电网的普遍性客观问题,大型城市电网清洁能源发电比例不断提高可能会在客观上导致本地主网主力电源能源结构单一的弊病。通过扩宽多源多向气源通道、提升应急储备能力、区域输气管网互联互通建设^[66],能够满足城市天然气全年总量和高峰用气需求,辅以大力本地分布式光伏等新能源机组的大量接入,该城市电网当前的电源韧性总体充足。

3)负荷是否灵活:随着经济社会快速发展,城市电网尖峰负荷逐年攀升,而凭借于新能源大幅增加导致的本地装机容量快速增长,该城市电网本地装机容量所能够满足当年最大负荷的比重逐年提升并远大于外受电比例的增长值。此外,结合配电市场竞争新模式的探索实践以及车网互动和虚拟电厂建设等需求侧联动项目的落地推广,源荷关系逐渐向着双向互动转化,该城市电网的负荷韧性得到有力的支撑。

4)应急韧性是否满足要求:城市电网现有电力应急体系不仅能够应对单一设备或局部区域故障,且基本能够满足全域故障的应急响应需求;通过逐步深度融合至城市韧性建设体系和政府应急指挥体系,该电网的应急能力将得到进一步加强。

可见以配电网韧性建设为抓手,能够实现大型城市(配)电网韧性水平的全面提升,使其能够满足政治保电场景、包含燃气供应切断在内的极限压力场景、极端自然灾害场景等多维度场景的韧性需要,也为满足新型电力系统建设过程中的电力安全更高要求铺垫良好的基础。近期提出的数智化坚强电

网、数字化低碳城市电网等设计,明确了城市配电网以数字化、低碳化和高韧性为支点,以全网规划、全自动控制、全速度感应、全智能管理、全能态服务^[87]和全维度感知为特色的发展方向,侧重输电网络安全性、城市供电可靠性、多能互补协同性、网源荷储灵活性、低碳环境友好性和发展模式经济性为六大基本属性。

2.3 城市韧性电网发展面临的问题与挑战

加强能源产供储销体系建设,确保能源安全,电力安全作为能源安全的重要组成,关系着经济社会可持续发展和“双碳”目标的实现。近年来新能源快速发展、国际形势错综复杂以及国内经济发展的新态势,均给电力安全带来新挑战。随着经济社会发展、能源转型提速以及国际形势环境日趋复杂,电力安全将面临更多潜在风险和困难挑战,对电力安全生产也提出了更高要求。本节基于“双碳”目标的大背景和城市新型电力系统建设发展的角度,对照电力发展规划^[88]等文件,阐述未来发展形势可能对城市电网韧性建设带来的挑战。配电网韧性发展所面临的风险和挑战主要包括如下方面^[7,88]。

1)电力系统安全供应问题。

由于大型城市的经济增长速率较快和环保要求严格等客观原因,通常面临终端电气化加快实施、城市电力需求持续增长、最大电力负荷逐年提升、郊区及山区采暖无煤化、餐饮商户“以电代气”改造等诸多情景,电能预计在未来终端能源消费中的占比将快速提升。转型过程中的电力供应安全问题渐渐成为电力系统安全保障的难题,威胁着大型城市电网的韧性水平发展。

2)电力系统安全稳定问题。

随着新型电力系统建设和大量电力电子设备接入,大型城市电网中本地装机容量的可再生能源装机容量逐年上升,社会用电量中绿电比重渐次提高,一方面高新能源占比将进一步导致系统的脆弱性增加和抗扰能力降低;另一方面新能源和电动汽车等新型负荷接入带来的主配网潮流双向交互、系统非线性程度提高,加剧系统安稳运行的复杂程度。

3)非常规安全性问题。

此外,极端环境、极限压力、大量网络攻击等因素对电力应急体系建设和韧性城市电网建设提出更高的标准,社会和人民对供电品质的要求进一步提高,对配网供电保障能力和城市供电可靠率有明确的更高要求(如北京电网供电可靠率在2025年应达到99.996%)。

3 电网韧性水平提升

3.1 韧性建设关键技术路径

提高电网韧性是应对未来气候变化和能源转型的重要任务,需要从技术、制度和社会等多个层面进行综合考虑和协调推进。综述现有研究成果,电网韧性建设与提升的核心思路如图 4 所示,为:1)建立韧性评估框架和指标体系,量化电力系统的韧性水平和改进效果以及评估电力系统在遭受各种扰动时的运行表现;2)采用不确定性建模和优化方法,优化电力系统的结构、运行、控制和规划等方面,提高电力系统的韧性表现;3)利用微电网、储能、需求响应、智能配电网等技术,提高分布式能源资源的利用率和协调能力,重点通过电动汽车和可移动储能等城市丰富的可移动资源、提高电力系统的灵活性和自愈能力;4)加强电网防灾应急能力建设,提高电网应对极端自然灾害、恶意攻击、连锁故障等内外部威胁的能力。

为构建新型电力系统安全防御体系,电网韧性建设和提升的关键技术主要包括以下几类:1)韧性评估技术,包括灾害建模、系统响应分析、静态评估指标和动态评估指标等,例如 IEEE 1366 国际标准;2)韧性优化技术,包括概率规划、机会约束、稳健优化等不确定性建模方法,以及数学规划、人工智能、多目标决策等优化模型和算法;3)韧性支撑技术,包括微电网、储能、需求响应、智能配电网等技术,以及相关的控制策略、协调机制、保护方案等。此外还可考虑发展基于用户舒适度的灵活性管理系列技术以进一步提高供电系统的经济性和用户满意度。

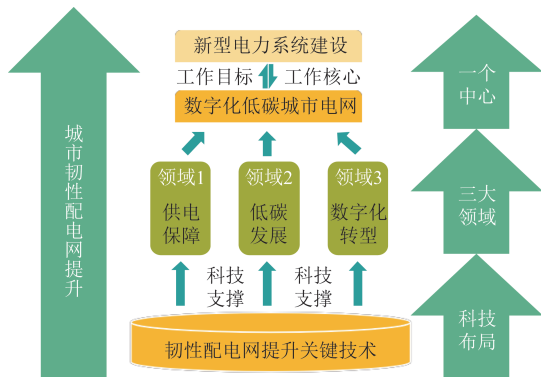


图 4 典型城市电网韧性提升的思路

Fig. 4 Typical power grid resilience enhancement strategy

3.2 面向城市电网韧性提高的关键科技布局

为适应新型电力系统电力安全防御体系建设的要求,针对电力安全供应问题、系统安全稳定问题和非常规安全问题,应当从如下关键科技布局入手,着力提升城市电网韧性水平的六力特征,如图 5 所示。

3.2.1 系统精细化建模及宽时间尺度仿真技术

新能源机组和电动汽车等新型负荷为代表的大量电力电子设备接入城市配电网后,为适应系统复杂多元的特点并满足多场景分析需要,需着力开展主动配电网、含分布式发电和新型负荷的负荷侧电磁暂态精细化建模技术,研究相应的机电-电磁混合仿真、全电磁暂态仿真技术在电网韧性分析和提升过程中的应用。

3.2.2 系统协同规划技术

着力研究考虑分布式能源、新型负荷与储能大量接入的配网灵活规划技术,在规划设计阶段实现未来主动配电网对分散资源的聚合利用,助力无功

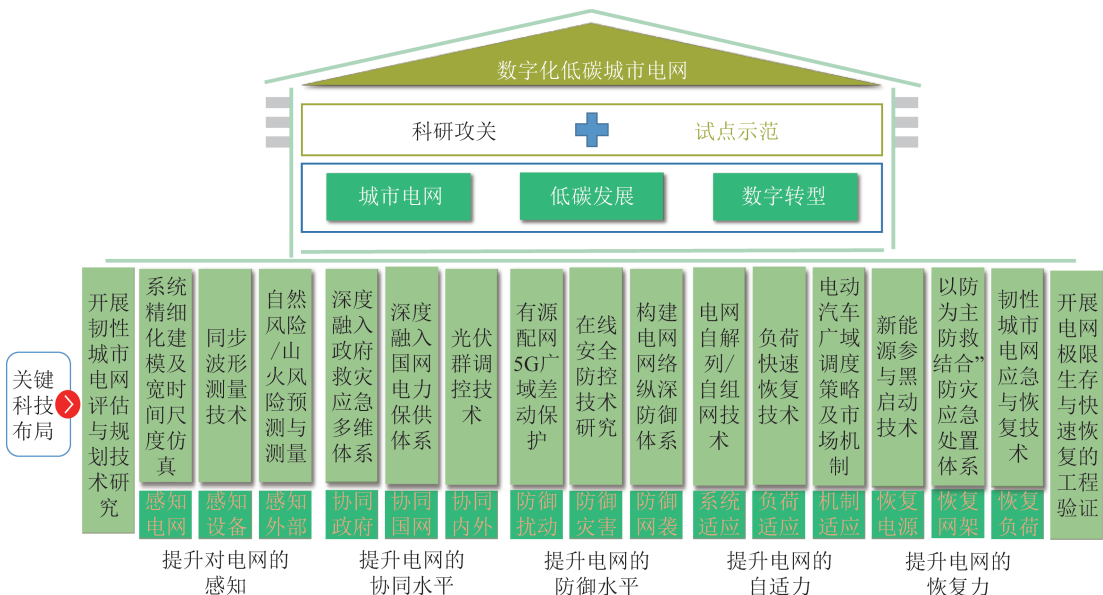


图 5 城市配电网韧性建设与提升的关键科技布局

Fig. 5 Key technological layout for resilience building and enhancement of power distribution network

就地平衡和有功跨区互济,切实提高配电网承载力和自愈能力。在输配协同、配微协同、源网荷储协同规划中革新现有平衡理论及安全评估方法,以求主网配网之间、配网与微网之间、网源荷储之间具备更高可靠性和更多灵活性的合理结构。布局考虑极端场景下满足韧性要求的局部电网坚强规划技术,确保重点区域网架坚强、电源配置合理,在保障重要用户持续供电前提下最大限度降低极端事件影响范围。全面提升对电动汽车等城市可移动资源的协同调用水平,从韧性角度提升电网的资源协同能力。

3.2.3 适用于韧性配网建设的感知力提升技术

推进极端天气和极端灾害预测预警技术并将其与仿真技术相结合,能够从外部环境与配电网系统相耦合的视角、精准分析极端灾害对电网的影响。研究运行量化指标在线监测评估、全电压等级配网状态估计、系统运行风险在线监视分析技术,以构建安全态势察觉、理解及预测的韧性感知技术体系。

3.2.4 电网韧性防御相关技术

开展以强不确定性下的预防控制技术为代表的在线安全防控技术研究;开展应对非预想故障的紧急控制技术、利用多元资源协同的紧急控制技术等手段主动防御技术的研究和应用,以实现配网严重冲击下的资源紧急协调和连锁故障迅速阻断。此外,利用电网数字化建设的机遇、积极构建电网网络纵深防御^[89]体系,探索应用数据水印/同态加密/联邦学习等数据安全技术,提高电网的网络安全水平。

3.2.5 适用于韧性配网建设的应变力提升技术

进行电网自解列、自愈网技术在配电网中的应用研究^[90-91];研究应对极端情况的电动汽车广域调度策略及其配套市场机制建立。同时,积极探索极端场景下系统迅速恢复供电技术,如考虑研究传统机组与新能源机组、电动汽车协同的系统重构及负荷恢复技术安排^[92-94],充分挖掘可移动资源对韧性电网应变力的提升作用;研究微电网、用户自备电源、储能参与系统恢复的技术。

4 结束语

当前我国电网形态和运行方式日趋复杂,国家安全体系和安全治理能力的现代化对电力安全提出新的更高要求。韧性电网建设内生于韧性城市建设,是推动电力系统安全治理和电力安全的必由工作之一。

本文从电网韧性的基本概念和特征出发,综述了当前国内外韧性研究的成果,总结了韧性电网建设的经验及教训及相应的电网韧性增强措施与关键

技术;进而以典型受端城市电网的配电网韧性建设工作为例,从配网韧性建设历程回顾、梳理韧性提升面临的挑战、现状韧性水平评估的角度呈现典型城市电网韧性分析和建设的一种范式;最后从韧性水平提升的技术路径和关键技术,为电网韧性建设乃至电力安全治理提出切实建议。

5 参考文献

- [1] 推进国家安全体系和能力现代化,坚决维护国家安全和社会稳定[N]. 青海日报, 2022-10-17(2).
- [2] 张雪嫣. 中国特色国家安全道路研究[D]. 北京:中共中央党校, 2018.
- [3] 钟开斌, 薛澜. 以理念现代化引领体系和能力现代化: 对党的十八大以来中国应急管理事业发展的一个理论阐释[J]. 管理世界, 2022, 38(8): 11-25.
ZHONG Kaibin, XUE Lan. Vision-led modernization of system and capacity: a theoretical explanation of China's emergency management development since the 18th CPC national congress [J]. Journal of Management World, 2022, 38(8): 11-25.
- [4] 陈志端, 仇保兴, 陈鸿. 韧性城市系统韧健水平提升与强健模型研究: 基于复杂适应系统理论(CAS)[J]. 城市发展研究, 2021, 28(8): 1-9.
CHEN Zhiduan, QIU Baoxing, CHEN Hong. Research on resiliency level promotion and robustness strategy of resilient city system: from complex adaptive systems (CAS) perspective [J]. Urban Development Studies, 2021, 28(8): 1-9.
- [5] 住房和城乡建设部, 国家发展改革委. “十四五”全国城市基础设施建设规划[EB/OL]. (2022-07-07)[2024-05-04]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/31/5703690/files/d4ebd608827e41138701d06fe6133cdb.pdf>.
- [6] 陈磊, 邓欣怡, 陈红坤, 等. 电力系统韧性评估与提升研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 11-22.
CHEN Lei, DENG Xinyi, CHEN Hongkun, et al. Review of the assessment and improvement of power system resilience [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 11-22.
- [7] 辛保安, 李明节, 贺静波, 等. 新型电力系统安全防护体系探究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5723-5732.
XIN Baoan, LI Mingjie, HE Jingbo, et al. Research on security defense system of new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5723-5732.
- [8] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6191.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis of “8·9” blackout accident in Britain and its enlightenment to China power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191.
- [9] 侯祖锋, 王超, 徐春华, 等. 考虑负荷重要程度的配电网韧性提升策略及评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(3): 78-85.
HOU Zufeng, WANG Chao, XU Chunhua, et al. Promotion strategy and evaluation method of distribution network resilience considering load importance [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 78-85.

- [10] 王伟胜, 林伟芳, 何国庆, 等. 美国得州2021年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4033-4043.
- WANG Weisheng, LIN Weifang, HE Guoqing, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4033-4043.
- [11] 孙为民, 孙华东, 何剑, 等. 面向严重自然灾害的电力系统韧性评估技术综述[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 129-139.
- SUN Weimin, SUN Huadong, HE Jian, et al. Review of power system resilience assessment techniques for severe natural disasters[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 129-139.
- [12] 阮前途, 梅生伟, 黄兴德, 等. 低碳城市电网韧性提升挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2819-2830.
- RUAN Qiantu, MEI Shengwei, HUANG Xingde, et al. Challenges and research prospects of resilience enhancement of low-carbon power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2819-2830.
- [13] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735-2745.
- BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [14] 李更丰, 邱爱慈, 黄格超, 等. 电力系统应对极端事件的新挑战与未来研究展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 1-11.
- LI Gengfeng, QIU Aici, HUANG Gechao, et al. New challenges and future research prospects in power system against to extreme events[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 1-11.
- [15] 林林馨妍, 朱俊澎, 袁越. 体系架构下的多微电网分布式韧性增强策略[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 87-99.
- LIN Linxinyan, ZHU Junpeng, YUAN Yue. A distributed resilience enhancement strategy for multi-microgrids based on system of systems architecture[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 87-99.
- [16] 梁海平, 石皓岩, 王铁强, 等. 考虑韧性提升的输电网灾前预防检修多目标多阶段优化[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 130-137.
- LIANG Haiping, SHI Haoyan, WANG Tieqiang, et al. Multi-objective and multi-stage optimization of pre-disaster preventive maintenance of transmission network considering resilience improvement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 130-137.
- [17] 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): 2806-2819.
- 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): 2806-2819.
- [18] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7796-7809.
- SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Research on definition and classification of power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7809.
- [19] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6784.
- RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key features of resilient power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6784.
- [20] 赵辰. 城市关联基础设施系统网络建模及韧性优化[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- ZHAO Chen. Network modeling and resilience optimization of urban associated infrastructure system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [21] 李明昊, 杨祺铭, 李更丰, 等. 台风场景下基于多种分布式资源协同的弹性配电网两阶段供电恢复策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 93-104.
- LI Minghao, YANG Qiming, LI Gengfeng, et al. Two-stage power supply restoration strategy of resilient distribution network based on coordination of multiple distributed resources in typhoon scenario[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 93-104.
- [22] 许寅, 和敬涵, 王颖, 等. 韧性背景下的配网故障恢复研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3416-3429.
- XU Yin, HE Jinghan, WANG Ying, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3416-3429.
- [23] 周启航, 管霖, 冼玮宏, 等. 考虑调度措施的地区电网多风险场景柔性水平评价模型[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 43-52.
- ZHOU Qihang, GUAN Lin, XIAN Weihong, et al. Multi-risk-scenarios flexibility evaluation model of regional power grid considering economic efficiency of dispatching measures[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 43-52.
- [24] 杜诗嘉, 郭创新, 俞啸玲, 等. 台风灾害下的弹性配电网研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 176-186, 209.
- DU Shijia, GUO Chuangxin, YU Xiaoling, et al. Review and prospect of resilient distribution network under typhoon disaster[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 176-186, 209.
- [25] 张亚超, 丁志龙, 谢仕炜, 等. 面向能源互联网的配电网韧性提升研究综述及展望[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 2054-2069.
- ZHANG Yachao, DING Zhilong, XIE Shiwei, et al. Review and prospect of power distribution network resilience enhancement for energy Internet[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 2054-2069.
- [26] 李伟, 周天, 董绍光, 等. 考虑多运行场景的城市电网用户侧储能需求评估方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(2): 96-104.
- LI Wei, ZHOU Tian, DONG Shaoguang, et al. An assessment method for energy storage demand on user side in urban grids considering multiple operational scenarios[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(2): 96-104.
- [27] 顾靖达, 李伟, 赵宇鑫, 等. 高温天气下配电网综合韧性评估方法[J]. 电力建设, 2024, 45(9): 123-132.
- GU Jingda, LI Wei, ZHAO Yuxin, et al. Research on comprehensive resilience assessment method of distribution network under high temperature weather[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 123-132.
- [28] 田书欣, 肖文渊, 符杨, 等. 极端高温灾害下电缆型配电网韧性

- 提升策略研究[J/OL]. 中国电机工程学报. (2024-05-29) [2024-06-25]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20240528.1647.011>.
- TAIN Shuxin, XIAO Wenyuan, FU Yang, et al. Boosting resilience of cable distribution networks under extreme high-temperature disaster[J/OL]. Proceedings of the CSEE. (2024-05-29) [2024-06-25]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20240528.1647.011>.
- [29] 李雪, 张涵帅, 姜涛, 等. 应对极端冰灾的电力系统多阶段韧性提升策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 69-77.
- LI Xue, ZHANG Hanshuai, JIANG Tao, et al. Multi-stage resilience enhancement strategy for power system against extreme ice disaster[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 69-77.
- [30] 方子闻, 周永智, 但扬清, 等. 考虑微电网协同的线路冰灾下配电网韧性提升策略[J/OL]. 上海交通大学学报. (2024-06-25) [2024-06-27]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.117>.
- FANG Ziwen, ZHOU Yongzhi, DAN Yangqing, et al. Resilience improvement strategy of distribution network during ice disaster considering microgrids coordination[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University. (2024-06-25) [2024-06-27]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.117>.
- [31] 荣俊杰, 周明, 元博, 等. 台风天气考虑故障演化的电力系统韧性评估方法[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1114-1131.
- RONG Junjie, ZHOU Ming, YUAN Bo, et al. Resilience assessment method on power systems under typhoon disaster considering failure evolution process[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1114-1131.
- [32] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 台风灾害下基于V2G的城市配电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 130-139.
- YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Vehicle-to-grid based resilience promotion strategy for urban distribution network under typhoon disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 130-139.
- [33] 王振浩, 罗剑潇, 成龙, 等. 面向台风天气下主动配电网韧性提升的改进分级减载策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 34-48.
- WANG Zhenhao, LUO Jianxiao, CHENG Long, et al. Improved graded load reduction strategy for resilience enhancement of an active distribution network in a typhoon[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 34-48.
- [34] 郭逸豪. 蓄意攻击威胁下电力信息物理系统韧性提升方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- GUO Yihao. Study on the method of improving the toughness of electric power cyber-physical systems under the threat of deliberate attack[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [35] 刘达夫, 钟剑, 杨祺铭, 等. 基于V2G与应急通信的配电网信息物理协同快速恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 147-158.
- LIU Dafu, ZHONG Jian, YANG Qiming, et al. Fast recovery method for distribution network through cyber-physical collaboration based on vehicle to grid and emergency communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 147-158.
- [36] 时珊珊, 张琪祁, 魏新迟, 等. 面向极限生存能力提升的城市配电网反脆弱规划方法[J]. 电力建设, 2024, 45(1): 56-67.
- SHI Shanshan, ZHANG Qiqi, WEI Xinchu, et al. Anti-fragile planning of urban distribution network for survivability improvement[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 56-67.
- [37] 逄宝中. 提升电力信息物理系统韧性的蓄意攻击防御及故障恢复策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- TI Baozhong. Research on deliberate attack defense and fault recovery strategy to improve the toughness of power cyber-physical systems[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [38] 孙科, 陈文钢, 陈佳佳, 等. 基于电动汽车的极端场景多微电网韧性提升策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 53-65.
- SUN Ke, CHEN Wengang, CHEN Jiajia, et al. A resilience enhancement strategy for multi-microgrid in extreme scenarios based on electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 53-65.
- [39] 赖业宁, 孙仲卿, 陆志平, 等. 考虑储能资源聚合参与的电网优化运行与韧性提升策略[J/OL]. 中国电力. (2024-06-05) [2024-06-27]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3265.TM.20240604.1730.004>.
- LAI Yening, SUN Zhongqing, LU Zhiping, et al. Considering the power grid optimization operation and resilience improvement strategy of energy storage resource aggregation[J/OL]. Electric Power. (2024-06-05) [2024-06-27]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3265.TM.20240604.1730.004>.
- [40] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 计及间歇性新能源的弹性城市电网输配电协同供电恢复方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2764-2774.
- YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Coordinated power supply restoration method of resilient urban transmission and distribution networks considering intermittent new energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2764-2774.
- [41] PANTELI M, MANCARELLA P. The grid: stronger, bigger, smarter: presenting a conceptual framework of power system resilience[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3): 58-66.
- [42] 郭江雁, 臧必鹏, 梁晖, 等. 基于模糊综合评判的电网应灾能力量化评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(3): 117-123.
- GUO Jiangyan, ZANG Bipeng, LIANG Hui, et al. Quantitative assessment on disaster response capability of power grid based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(3): 117-123.
- [43] 刘权莹, 李俊娥, 倪明, 等. 电网信息物理系统态势感知: 现状与研究构想[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 9-21, 51.
- LIU Quanying, LI June, NI Ming, et al. Situation awareness of grid cyber-physical system: current status and research ideas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 9-21, 51.
- [44] 张尚. 电力系统运行安全的态势感知及优化控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- ZHANG Shang. Situation awareness and optimal control of power

- system operation safety[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [45] 祖国强. 智能配电系统安全域的原理[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- ZU Guoqiang. Principle of security region of intelligent distribution system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [46] 田鹏飞, 刘崇茹, 负飞龙, 等. 一种动态扩维的IRA算法及其在电力系统关键特征值计算中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4318-4325.
- TIAN Pengfei, LIU Chongru, YUN Feilong, et al. An improved IRA algorithm and its application in computation of critical eigenvalues in small signal stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4318-4325.
- [47] 王彬, 孙勇, 吴文传, 等. 协同电网安全性与经济性的新能源优先实时调度方法及应用[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 105-113.
- WANG Bin, SUN Yong, WU Wenchuan, et al. Real-time prior dispatch method for renewable energy with safety and economy coordination of power grid and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 105-113.
- [48] 黄铭浩, 陈一丰, 董树锋. 基于安德森加速的输配协同低碳最优潮流[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3132-3144.
- HUANG Minghao, CHEN Yifeng, DONG Shufeng. Low-carbon optimal power flow of transmission-distribution-coupled networks based on Anderson acceleration[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3132-3144.
- [49] 闫大威, 张天宇, 李天翔, 等. 考虑静态电压稳定性的城市电网储能优化配置研究[J]. 浙江电力, 2024, 43(7): 76-85.
- YAN Dawei, ZHANG Tianyu, LI Tianxiang, et al. Research on optimal allocation of energy storage in urban power grids considering static voltage stability[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7): 76-85.
- [50] 陈乐. 基于政企关系视角的贵阳电网应急机制研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- CHEN Le. Research on emergency mechanism of Guiyang power grid from the perspective of government-enterprise relationship[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [51] 葛少云, 李俊锴, 刘洪, 等. 计及弹性响应的需求侧资源与软开关联联合规划[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2022, 55(5): 462-470.
- GE Shaoyun, LI Junkai, LIU Hong, et al. Coordinated planning of soft open points and demand-side resources considering an elastic response[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(5): 462-470.
- [52] 郑凯元, 杜文娟, 王海风. 混联多微电网系统动态交互作用及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5552-5569.
- ZHENG Kaiyuan, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Analysis on dynamic interactions and stability of hybrid multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5552-5569.
- [53] 蒲天骄, 乔骥, 韩笑, 等. 人工智能技术在电力设备运维检修中的研究及应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 369-383.
- PU Tianjiao, QIAO Ji, HAN Xiao, et al. Research and application of artificial intelligence in operation and maintenance for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 369-383.
- [54] 崔全胜, 白晓民, 董伟杰, 等. 用户侧综合能源系统规划运行联合优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 4967-4981, 5279.
- CUI Quansheng, BAI Xiaomin, DONG Weijie, et al. Joint optimization of planning and operation in user-side multi-energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 4967-4981, 5279.
- [55] 邓祥力, 王伟, 刘世明. 基于博弈强化学习的电网故障序列搜索及防御策略研究[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4856-4868.
- DENG Xiangli, WANG Wei, LIU Shiming. Research on searching of fault sequence and defense strategy in power grid based on game reinforcement learning[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4856-4868.
- [56] HE C J, HE X Q, GENG H, et al. Transient stability of low-inertia power systems with inverter-based generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2903-2912.
- [57] 何维国, 王赛一, 许唐云, 等. 城市韧性配电网建设与发展路径[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 680-690.
- HE Weiguo, WANG Saiyi, XU Tangyun, et al. Construction and development path of the urban resilient distribution network[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 680-690.
- [58] 李振坤, 赵向阳, 朱兰, 等. 智能配电网故障后自愈能力评估[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 789-796.
- LI Zhenkun, ZHAO Xiangyang, ZHU Lan, et al. Evaluation of self-healing ability for smart distribution network after failure[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 789-796.
- [59] 顾雪平, 白岩松, 李少岩, 等. 电力系统黑启动恢复问题的研究评述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3183-3200.
- GU Xueping, BAI Yansong, LI Shaoyan, et al. Research review of power system black-start restoration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3183-3200.
- [60] 颜文婷, 杨隆, 李长城, 等. 考虑地震攻击交通网影响的配电网韧性评估及提升策略[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(9): 1165-1175.
- YAN Wenting, YANG Long, LI Changcheng, et al. Resilience evaluation and enhancement strategy of distribution network considering impact of seismic attack on transportation networks[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(9): 1165-1175.
- [61] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Enhancing the resilience of the nation's electricity system[R]. The National Academies Press, 2017.
- [62] 黄刚. 面向系统韧性提升的智能电网调度优化方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- HUANG Gang. Research on smart grid scheduling optimization method for system toughness improvement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [63] 黄丽平. 面向电网韧性提升的电力调度优化模型及其评估方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- HUANG Liping. Research on power dispatching optimization model and its evaluation method for power grid toughness improvement[D]. Guangzhou: Guangdong University of

- Technology, 2022.
- [64] 刘晓楠. 台风灾害影响下面向规划的输电网韧性评估方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- LIU Xiaonan. Study on transmission network toughness evaluation method of downward planning affected by typhoon disaster[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [65] 陶然. 考虑多能融合的城市配电网韧性评估与提升方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- TAO Ran. Research on resilience assessment and enhancement methods for urban distribution systems considering multi-energy integration[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [66] 李廷钧. 电-气区域配网韧性评估及提升方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- LI Tingjun. Research on resilience assessment and enhancement of the electricity-gas regional distribution network[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [67] OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L. Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems [J]. Structural Safety, 2014, 48: 15-24.
- [68] 别朝红, 林雁翎, 邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 1-9.
- BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.
- [69] 高海翔, 陈颖, 黄少伟, 等. 配电网韧性及其相关研究进展[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 1-8.
- GAO Haixiang, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Distribution systems resilience: an overview of research progress [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 1-8.
- [70] 鞠平, 王冲, 辛焕海, 等. 电力系统的柔性、弹性与韧性研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 1-7.
- JU Ping, WANG Chong, XIN Huanhai, et al. Flexibility, resilience and toughness of power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 1-7.
- [71] 赵建立, 周雯娟, 奚培锋, 等. 电力海绵城市系统研究与应用[J]. 现代建筑电气, 2018, 9(12): 1-6.
- ZHAO Jianli, ZHOU Wenjuan, XI Peifeng, et al. Research and application of electric sponge city system [J]. Modern Architecture Electric, 2018, 9(12): 1-6.
- [72] 刘成骏, 吴英俊. 含海量资源的高弹性配电网形态演化与关键技术研究[J]. 浙江电力, 2020, 39(12): 20-27.
- LIU Chengjun, WU Yingjun. Study on evolution and key technologies of highly-resilient distribution network with massive resources [J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(12): 20-27.
- [73] 刘晓军, 聂凡杰, 杨冬锋, 等. 碳捕集电厂-电转气联合运行模式下考虑绿证-碳交易机制的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2207-2222.
- LIU Xiaojun, NIE Fanjie, YANG Dongfeng, et al. Low carbon economic dispatch of integrated energy systems considering green certificates-carbon trading mechanism under CCPP-P2G joint operation model [J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2207-2222.
- [74] 梁旭. 韧性电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [75] 中共北京市委办公厅, 北京市人民政府办公厅. 关于加快推进韧性城市建设的指导意见[EB/OL]. (2021-10-27) [2024-06-27]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/jjyxtj/yjgl/202111/t20211117_1304217.html.
- [76] 李炳辉, 张泽浩, 张泽宇, 等. 以建设“网上电网”应用为抓手推动企业高质量发展[J]. 农电管理, 2022(4): 48-50.
- LI Binghui, ZHANG Zehao, ZHANG Zeyu, et al. Promoting the high-quality development of enterprises with the application of building “online power grid” [J]. Rural Power Management, 2022(4): 48-50.
- [77] 靳宗帅, 张恒旭, 石访, 等. 宽频带同步测量技术与应用[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2497-2508.
- JIN Zongshuai, ZHANG Hengxu, SHI Fang, et al. Synchronized wideband measurement technology and its applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2497-2508.
- [78] 曹述栋, 史大桢, 胡兆光, 等. 做好电力发展规划 促进产业结构调整 实现资源优化配置[N]. 中国电力报, 2009-04-01(002).
- [79] 李香龙, 刘秀兰, 郭晨, 等. 基于数字能量交换系统的动力电池无损梯次利用储能技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 5848-5857, 6161.
- LI Xianglong, LIU Xiulan, GUO Chen, et al. Energy and economic efficiency of Li-ion battery packs re-used in stationary energy storage application [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 5848-5857, 6161.
- [80] 孙华平, 杨木易. 电力结构转型中的治理协同机制与路径[EB/OL]. (2022-07-21) [2024-06-27]. <https://m.gmw.cn/baijia/2022-07/21/35898861.html>.
- [81] 杜敏. 全面服务首都绿色低碳发展——国网北京电力构建新型电力系统助力首都实现“双碳”目标[N/OL]. (2021-07-14) [2024-06-27]. <http://www.chinapower.com.cn/dww/jscx/20210714/87955.html>.
- [82] 王健, 谢桦, 孙健. 基于机会约束规划的主动配电网能量优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 45-52.
- WANG Jian, XIE Hua, SUN Jian. Study on energy dispatch strategy of active distribution network using chance-constrained programming [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 45-52.
- [83] 孙锴. 重要电力用户自备式应急电源系统设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- SUN Kai. Design of self-contained emergency power supply system for important power users [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [84] 许浩波. 新能源参与黑启动可行性分析与方案评估优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- XU Haobo. Feasibility analysis and scheme evaluation optimization of new energy participating in black start [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [85] 郑凯元, 杜文娟, 王海风. 聚合恒功率负荷对直流微电网稳定性影响的阻抗法分析[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 134-148.
- ZHENG Kaiyuan, DU Wenjuan, WANG Haifeng. DC microgrid stability affected by aggregated constant power loads based on impedance method [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 134-148.

- [86] 郑凯元, 周运斌, 高阳, 等. 城市配电网合环电流计算及主动控制研究综述[J/OL]. 电网技术. (2024-06-03) [2024-06-27]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0559>.
ZHENG Kaiyuan, ZHOU Yunbin, GAO Yang, et al. A review of the research on closing loop current calculation and active control of urban distribution network [J/OL]. Power System Technology. (2024-06-03) [2024-06-27]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0559>.
- [87] 张浩鹏, 李泽宁, 薛屹洵, 等. 基于共享储能服务的智能楼宇双层优化配置[J/OL]. 中国电机工程学报. (2024-04-03) [2024-06-27]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20240402.1440.024>.
ZHANG Haopeng, LI Zening, XUE Yixun, et al. Bi-level optimal configuration of intelligent buildings based on shared energy storage services[J/OL]. Proceedings of the CSEE. (2024-04-03) [2024-06-27]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20240402.1440.024>.
- [88] 北京市人民政府. 北京市“十四五”时期能源发展规划[EB/OL]. (2022-04-01) [2024-06-27]. <http://csglw.bei-jing.gov.cn/zwxx/zcwj/qtwj/202206/P020220722412877450630.doc>.
- [89] 余芸. 构筑新型电力系统安全防线势所必然(数字电网)[N]. 中国能源报, 2021-12-06(04).
- [90] 傅守强, 陈翔宇, 张立斌, 等. 面向韧性提升的交直流混合配电网协同恢复方法[J]. 中国电力, 2023, 56(7): 95-106.
FU Shouqiang, CHEN Xiangyu, ZHANG Libin, et al. Coordinated restoration method of hybrid AC/DC distribution networks for resilience enhancement[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 95-106.
- [91] 吴岩, 王光政. 基于CiteSpace的配电网韧性评估与提升研究综述与展望[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 100-112, 137.
WU Yan, WANG Guangzheng. Review and prospect of distribution network resilience assessment and improvement based on CiteSpace[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 100-112, 137.
- [92] 顾延勋, 杨昆, 李大荃, 等. 基于电池换电的海岛配电网负荷恢复优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 187-197.
GU Yanxun, YANG Kun, LI Daquan, et al. Optimized scheduling strategy for load restoration in island distribution networks based on battery exchange model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 187-197.
- [93] 谭畅舒, 李艳, 田杰, 等. 计及分布式能源的主动配电网恢复力综合评估[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(1): 108-113.
TAN Changshu, LI Yan, TIAN Jie, et al. An evaluation method of active distribution network resilience considering the distributed energy resources[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 108-113.
- [94] 许剑川, 杨定光, 喻澍霖, 等. 考虑极端自然灾害影响下的输电线路风险评估方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 84-90.
XU Jianchuan, YANG Dingguang, YU Shulin, et al. Risk assessment method for transmission lines considering the influence of extreme natural disasters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 84-90.

收稿日期: 2024-05-27 修回日期: 2024-07-01

作者简介:

郑凯元(1994),男,博士,工程师,研究方向为新能源电力系统小干扰稳定分析与控制,E-mail:zhengkaiyuan_sgcc@163.com;

于希娟(1976),女,硕士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化,E-mail:50162576@qq.com;

杨禹锡(1991),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统及其自动化,E-mail:yangyuxi@bj.sgcc.com.cn;

高阳(1980),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化,E-mail:gaoyang@bj.sgcc.com.cn;

王立永(1973),男,博士,教授级高级工程师,通信作者,主要研究方向为电力系统及其自动化、电能计量等,E-mail:wangliyongb@bj.sgcc.com.cn;

刘庆时(1973),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向为智能电网技术管理,E-mail:liuqingshi@sina.com;

陈平(1966),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统及其自动化,E-mail:chenping@bj.sgcc.com.cn;

刘崇茹(1977),女,博士,教授,主要从事新能源及交直流混合系统分析、仿真、运行与控制的科研和教学工作,E-mail:chongru.liu@ncepu.edu.cn.

(编辑 景贺峰)