

韧性电网的概念与关键特征

阮前途¹, 谢伟¹, 许寅², 华斌¹, 宋平¹, 和敬涵², 张琪祁¹

(1. 国网上海市电力公司, 上海市 浦东新区 200122;

2. 北京交通大学电气工程学院, 北京市 海淀区 100044)

Concept and Key Features of Resilient Power Grids

RUAN Qiantu¹, XIE Wei¹, XU Yin², HUA Bin¹, SONG Ping¹, HE Jinghan², ZHANG Qiqi¹

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Pudong New District, Shanghai 200122, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: In recent years, power systems present several new features, including high penetration of renewables, power electronic equipment integration, load diversity, and cyber-physical interdependency. In addition, the security threats are increasing, and the security situation of power grids becomes severe. Based on the current development of the power grid in China, this paper proposed a definition of “resilient power grid.” A resilient power grid can comprehensively, quickly and accurately sense the operation status, cooperate with the internal and external resources of the power grid, proactively anticipate and prepare for various disturbances, defend and quickly restore critical loads, and learn to continuously improve itself. This paper first introduced the meaning and application of the term “resilience” and briefly summarized concepts related to power system resilience. Then, resilient power grid was defined and explained. Further, the meaning and key features of resilient power grid and its relationship to energy internet were clarified. Finally, research needs on resilient power grids were discussed.

KEY WORDS: resilient power grid; energy internet; resilient city

摘要: 近年来, 电力系统呈现高比例可再生能源和电力电子设备接入、负荷多元化、信息-物理高度融合等特点, 且来自内外部的安全威胁增多, 电网安全形势严峻。该文立足于我国电网发展现状和面临的挑战, 结合我国传统文化和国内外相关领域研究现状, 提出了“韧性电网”定义, 即“能够全面、快速、准确感知电网运行态势, 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, 快速恢复重要电力负荷, 并能自我学习和持续提升的电网”。首先介绍“韧性”一词的释义和应用, 简要总结国内外电力系统韧性相关概念; 进而提出韧性电网的定义, 并阐述其内涵和关键特征; 进一步分析韧性电网的概念范畴, 并阐明韧性电网与能源互联网的关系; 最后探讨韧性电网领域的研究需求。

关键词: 韧性电网; 能源互联网; 韧性城市

0 引言

21 世纪以来, 我国电网发展迅速, 呈现出高比例可再生能源和高比例电力电子设备接入、负荷多元化以及信息与物理系统高度融合等特点。1) 在我国能源转型的背景下, 可再生能源发电, 如风电、光伏等, 以集中或分散的形式广泛接入电网, 其出力的波动性、间歇性和随机性给电网安全运行带来了挑战^[1-2]。2) 直流输电发展迅猛, 超/特高压直流输电、柔性直流输电和直流电网等陆续投运, 我国已形成大规模交直流混联电网格局, 在提升资源大范围调控能力的同时也增加了安全风险^[3-4]。3) 在荷侧, 分布式发电分散接入、区域综合能源系统兴起、电气化交通负荷大量接入以及各类基础设施电气化程度加深, 负荷多元化特点日益凸显, 负荷参与电网调节的能力有所提升, 但多元化负荷也给电网运行带来了诸多不确定性^[5-6]。4) 随着能源互联网的建设和发展, 电网信息-物理系统高度融合, 电网安全运行与信息系统息息相关, 电网信息安全不容忽视^[7]。可见, 电网的形态和运行方式日趋复杂, 对电力系统安全运行提出了新要求。

与此同时, 电网比以往面临更复杂的自然灾害、恶意攻击、连锁故障等内外部威胁。首先, 由于全球气候变化, 极端自然灾害发生频次逐年增多, 且强度增大, 应加强电网防灾应急能力建设^[8]。其次, 当前国际形势严峻, 对于我国信息-物理高度融合的电网, 需要重视并提升电网应对恐怖袭击和网络攻击的能力^[9]。再次, 我国大规模交直流混联电网面临着连锁故障、宽频带振荡等威胁, 发生

大面积停电事故的风险提升^[4]。最后,电网日趋复杂,因人为误操作、设备故障、保护误判等问题引发停电事故的概率增加^[10],亦增加了电网安全风险。可见,我国电网面临的内外部风险源增多,对电力系统安全运行提出了新挑战。

综上,在电网日益复杂、安全威胁不断增多的新形势下,建设攻不破、打不烂、摧不垮、毁不掉的韧性电网势在必行^[11]。对此,国内外提出了 power grid resilience^[12]、弹性电网^[13]等概念,并针对电力系统韧性相关理论、方法和关键技术开展了初步研究^[14-15]。本文在对国内外提出的相关概念进行分析的基础上,立足于我国电网的发展现状及趋势,提出具有中国特色的“韧性电网”概念,详述韧性电网的定义、内涵、关键特征和概念范畴,并探讨韧性电网领域的研究需求。

1 韧性电网的定义及内涵

本节首先介绍“韧性”的释义和应用,综述国内外提出的电力系统韧性相关概念,进而提出“韧性电网”定义,并对其内涵进行阐释。

1.1 “韧性”的释义和应用

根据大辞海释义,“韧”的含义是柔软而坚固,最早出于《宋史·苏云卿传》:“夜织屨,坚韧过革,人争贸之以馈远”。“韧性”表示物体受外力作用时产生变形但不折断的性质,也用于比喻顽强持久的精神^[16]。

韧性一词在物理学、生态学、心理学、社会学等领域均有应用。在物理学中,韧性表示材料在塑性变形和破裂过程中吸收能量的能力,或材料受到使其发生形变的力时对折断的抵抗能力^[17]。在生态学中,韧性被定义为生态系统吸收变化和干扰并保持种群间关系稳定的能力,表现为生态系统可动态维持稳健状态的特质^[18]。在心理学中,韧性是指个人面对生活逆境、创伤、悲剧、威胁及其他生活重大压力的良好适应^[19]。在社会学中,韧性是指群体或社区应对社会、政治和环境变化所带来的外部压力和干扰的能力^[20]。在组织学中,韧性是指企业组织承受内外部灾难或打击、在风险中存活和从失败中重新振作的能力^[21-22]。在经济学中,韧性意味着经济系统在遭受灾害后可以维持基本功能,并在经济偏离既定发展路径后迅速恢复到均衡状态^[23]。近年,有学者提出国家韧性的概念,用于描述一个国家适应国内外形势变化和应对各种危机与挑战的能力,其内涵包括适

应性、持续性、抗压性与生命力^[24]。

1.2 国内外电力系统韧性相关概念

1) 美国。

2009年,美国能源部发布《智能电网报告》^[25],首次明确提出智能电网在面对自然灾害、蓄意攻击、设备故障和人为失误时应该具有韧性(注:此处韧性是指英文 resilience,为方便描述,统一采用韧性一词)。2013年发布的第21号美国总统政策令(PPD-21)将韧性定义为系统针对扰动事件开展事前预备、适应变化、抵御干扰并从中快速恢复的能力^[26]。美国国家工程院于2017年发布的《提升国家电力系统韧性》报告中将电力系统韧性定义为能够认识到长时间、大面积停电事故发生的可能性,事故前充分预备,事故发生时最小化其影响,事故发生后快速恢复,并且能从事故中获取经验从而自我提升的能力^[27]。美国国家关键基础设施委员会认为,韧性系统应包括如下特性^[28]:鲁棒性,即系统吸收扰动持续运行的能力;机敏性,即事件发展过程中控制损失的能力;恢复力,即快速恢复电网功能尤其是持续为重要负荷供电的能力;适应力,即从灾害中吸取经验并提升韧性的能力。

2) 英国。

根据英国内阁办公室的定义,韧性表示资产、网络或系统预备、吸收、适应破坏性事件并从中快速恢复的能力^[29]。2011至2015年间,英国工程与物理研究委员会开展了(resilient electricity networks for Great Britain, RESNET)项目,旨在提高英国电网应对极端自然灾害的韧性,并量化分析韧性提升措施的效果^[30]。2018年,英国能源研究组织发布的报告^[31]中采用了美国联邦能源管理委员会提出的韧性定义^[32]:承受和降低破坏性事件规模和持续时间的能力,包括预备、吸收、适应和快速恢复能力。

3) 欧盟。

根据欧盟委员会2012年发布的报告,韧性是指个体、家庭、社区、国家或区域对压力和打击的承受、适应和快速恢复能力^[33]。欧盟联合研究中心认为韧性是一个动态概念,通常与小概率、高影响事件相关,且主要表征系统应对中长期累积性变化或危害(如气候变化)的能力。这种中长期变化或危害通常通过累积效应发挥作用,逐步对系统施加压力,直至达到使系统正常运行、控制、保护策略失效的阈值^[34]。

4) 日本。

由于日本自然灾害多发,防灾减灾一直是其国

家政策关注的重点。日本传统政策侧重灾害预防,近年研究重点转移至增强电网灾害抵御力、灾后响应能力和恢复力^[35]。2011 年福岛大地震使东京及东北电力公司的发电厂、变电站及输配电线路遭受严重损害,发生大面积停电事故。而在这次灾害中,日本仙台微网示范工程实现了 9.0 级强震后的快速恢复供电,不但有力保障了微电网内医疗护理设备、实验室服务器等关键设备的正常运行,而且给灾民带来了希望和内心的平静^[36-37]。该事件坚定了日本向韧性电网方向发展的信念。在此背景下,日本提出了构筑“强大而有韧性的国家和社会”总体目标,并将其分解为 4 个基本目标:最大限度地保护人民生命;保障国家及社会重要功能不受致命破坏并能继续运作;保证国民财产与公共设施受灾最小化;具备迅速恢复的能力^[38]。

5) 中国。

2014 年,华中科技大学欧阳敏教授将美国多学科地震工程研究中心针对地震灾害管理提出的韧性定义引入电力系统领域,提出韧性包含鲁棒性、冗余性、机敏性和快速性 4 个属性(简称“4R”属性)^[39]。2015 年,西安交通大学邱爱慈院士、别朝红教授提出了“弹性电网”与恢复力的概念^[13],并于近期进一步完善了相关定义,提出“弹性电力系统”概念^[40]。根据邱院士团队的定义,恢复力指“电力系统针对小概率-高损失极端事件的预防、抵御以及快速恢复负荷的能力”,而弹性电力系统指“具有恢复力的电力系统”。2015 年,清华大学陈颖教授提出“配电网韧性”的概念,指出“(配电网)韧性主要衡量配电网在自然灾害中对关键负荷的支撑和恢复能力,配电网韧性也由此定义为配电网是否可以采取主动措施保证灾害中的关键负荷供电,并迅速恢复断电负荷的能力”^[41]。2019 年,河海大学鞠平教授综述了电力系统柔性、弹性的研究进展,并提出电力系统韧性的一种定义方法,即“电力系统在持续的随机扰动之下不发生崩溃、解列而保持正常运行的能力”^[17]。

1.3 韧性电网的定义

本文针对我国电力系统的特点和需求,结合上海电网建设运行经验,提出“韧性电网”定义如下。

韧性电网是指能够全面、快速、准确感知电网运行态势,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,快速恢复重要电力负荷,并能自我学习和持续提升的电网。

上述定义给出了韧性电网应具备的 6 个关键特

征,即感知力、协同力、应变力、防御力、恢复力和学习力。感知力是指全面、快速、准确感知电网运行状态,预测电网未来运行态势并针对潜在风险作出预警的能力。协同力是指电网协同内外部资源共同应对扰动的能力,包括输配协同、源网荷储协同、电网与其他关键基础设施协同、能源大脑与城市运营大脑协同等。应变力是指电网在事故前主动预判事件影响,制定预案,并采取预备措施以应对突发扰动的能力。防御力是指在扰动事件动态发展过程中,采取主动防御措施以降低事件影响的能力。恢复力是指电网正常功能遭到破坏后,及时启动应急恢复和修复机制,保障重要负荷持续供电,并快速恢复电网功能至正常状态的能力。学习力是指电网从历史事件或其他电网经历的严重停电事故中获取经验,并不断融合新兴技术实现自我提升的能力。

韧性电网的概念包括狭义和广义两个层面。狭义韧性电网与弹性电网或 power grid resilience 具有共同特征,主要关注电网的应变力、防御力和恢复力,这 3 个特征也是韧性电网的核心特征。广义韧性电网则在此基础上增加了感知力、协同力和学习力。广义韧性电网概念一方面考虑了全球气候变化、国际形势变化和电网复杂化给电网安全运行带来的新挑战,另一方面体现了高精度传感、5G 通信、物联网、人工智能等新技术给电网发展带来的新机遇,是新形势下对弹性电网和 power grid resilience 概念的拓展延伸。

在我国电网规模逐渐扩大、电压等级不断升高、高比例可再生能源与电力电子设备接入的形势下,通过建设韧性电网,能够帮助电网调度人员准确掌握电网运行态势;能够充分发挥电网内部、电网与其他能源之间、电网与城市之间的调节能力,减小可再生能源、多元化负荷带来的影响;能够在事故前预先做好应对多种扰动的准备,事故中主动降低事故造成的影响,事故后减少负荷断电时间;能够根据事故经验主动学习,提升电网应对扰动和灾害的能力。

1.4 韧性电网定义的阐释

下面,本文从 4 个方面对韧性电网的定义进行阐释:

1) 韧性电网应能够有效应对电网内外部的各类威胁和扰动,既包括大概率、低影响的常规扰动事件,也包括小概率、中高影响的极端事件,具体包括:持续的随机扰动、电气设备故障、自然灾害、

人为破坏、网络攻击、黑天鹅事件等。其中,常规扰动事件发生的频次较高,可以从统计学角度对其进行量化分析,如利用可靠性指标进行评估。极端

事件发生概率小,如何衡量电力系统应对极端事件的韧性是近年的研究热点,其中韧性曲线是认可度较高的一种描述方法^[42],如图1所示。

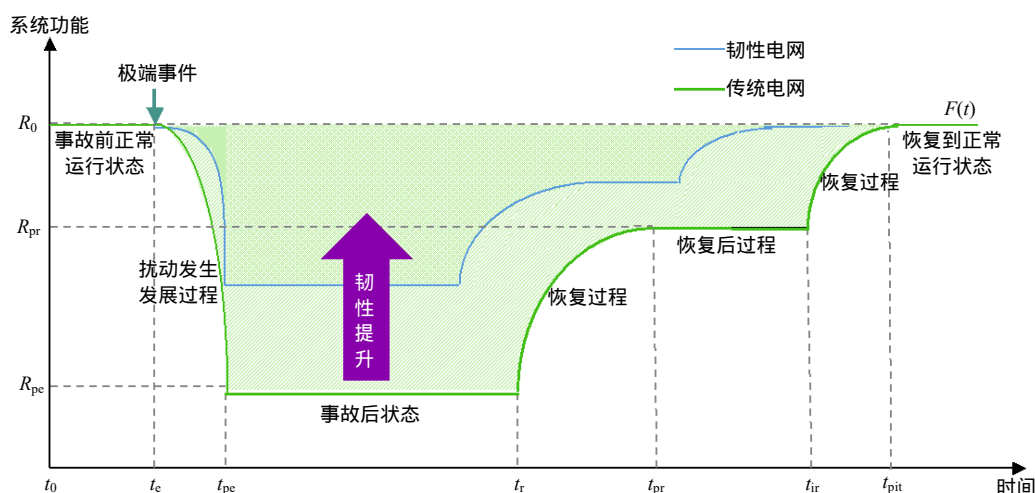


图1 电网在极端事件下的韧性曲线

Fig. 1 Resilience curve of power grid under extreme events

韧性曲线的纵坐标为电力系统功能函数,代表电力系统的运行水平。在事故发生前,系统功能维持在正常水平。极端事件发生后,系统功能迅速下降,并维持事故后水平。实施恢复措施可在一定程度上提升系统功能,但可能无法达到事故前的正常水平,这是由于相关基础设施可能损坏。随后,受损设施逐步修复,系统逐渐恢复至正常运行状态。图1中阴影部分面积表示电力系统应对该事件的韧性水平,提升电网韧性即减小阴影部分的面积。

2) 电网韧性评估应针对特定事件集开展。如前所述,电网扰动事件类型包括自然灾害、信息安全、物理摧毁、人为破坏、设备故障等。其中,设备故障、信息安全、人为破坏等扰动事件是各地电网共同面对的;而自然灾害则具有明显地域特征。例如,位于地震带的电网应具备应对地震灾害的能力,位于沿海地带的电网应重视台风/飓风的影响,高纬度地区的电网应具有应对冰雪灾害的能力,森林密集地区的电网则需具备防范山火的能力。因此,在评价电网韧性时,明确相应的扰动事件集十分必要。

3) 韧性电网不仅关注自身状况(如损失负荷的功率、停电时长等),还关注停电事件导致的经济和社会影响。随着能源系统、交通系统、通信系统等关键基础设施互联互通,彼此间相互依赖性加强,电网停电事故对社会和经济造成的影响增大。停电事故不仅会影响其他关键基础设施的正常运行,如造成交通瘫痪等问题,也会对社会生产和人民生活

造成重大影响。因此,提高电力系统韧性是关系到社会和经济稳定的重大需求。

4) 不同类型的韧性电网侧重点不同。大规模互联电网的主要任务是远距离输送电能,需要确保电网面临扰动时足够坚强,应更加侧重电网应变力和防御力的建设。大规模互联电网应能在事故发生前和事故发展过程中均能迅速采取控制措施防止大面积停电,最大程度地降低事件影响、减小损失。相反,配电网分布广泛且地域差异大,全面提升其应变和防御能力经济代价高且没有必要,应主要关注重要电力负荷,并重点提升恢复力。在停电事故发生后,韧性配电网应能协调“源网荷储”及政府和社会资源为重要电力负荷持续稳定供电。

2 韧性电网的关键特征

如前所述,韧性电网具备6个关键特征,即应变力、防御力、恢复力、感知力、协同力和学习力,如图2所示。其中,应变力、防御力和恢复力是韧性电网的核心特征,分别描述电网在扰动事件前、



图2 韧性电网6个关键特征的关系

Fig. 2 Relationship among six key characteristics of resilient power grid

中、后的应对能力；感知力和协同力贯穿扰动事件全过程，为提升电网应变力、防御力和恢复力提供支撑，同时也适用于电网正常运行状态；学习力是电网从事故中学习和提升的能力，是韧性电网在长时间尺度中自我完善和提升的机制。

2.1 应变力

“应变”在大辞海中的释义是“应付事态的突然变化”，如随机应变，应变自如。《荀子·王制》：“举措应变而不穷。”《新唐书·李勣传》：“其用兵多筹算，料敌应变，皆契事机。”

应变力是指电网在事故前主动预判事件影响，制定预案，并采取预备措施以应对突发扰动的能力。电力系统事故分为可预知和不可预知两类。可预知事故包括常规 $N-1$ 和 $N-2$ 预想事故、台风暴雪等可提前足够长时间预报的自然灾害以及机理相对明确的连锁故障事故等。针对这类事故，韧性电网应有针对性地做好预案，结合事故预测模型，对电力系统面临的风险进行预判和评估，积极开展事故前部署(如应急资源预布置等)^[40]，并做出预警。不可预知事故包括地震和超级台风等罕见的极端灾害、精心策划的网络攻击以及不在常规预想事故集中的 $N-k$ 事故等。这类事故难以有针对性地预防，韧性电网应具备以不变应万变的能力，识别电网薄弱环节并采取改善措施，部署校正控制、紧急控制、主动解列和孤岛运行等先进运行控制系统，提升电网的整体应变力。

2.2 防御力

“防御”在大辞海中的释义是“防守；抵御”。《吕氏春秋·论人》：“贤不肖异，皆巧言辩词，以自防御，此不肖主之所以乱也。”

防御力是指在扰动事件动态发展过程中，电网采取主动防御措施以降低事件影响的能力。防御力体现在硬件和运行两个层面。在硬件层面，通过制定韧性规划方案，增强电网元件抗打击能力，增加电网冗余度，使电网结构坚强，从而能够抵御极端事件对一、二次系统的破坏。在运行层面，在面对扰动事件时，协调多种可控资源(如直流、抽蓄、可控负荷、储能、微电网、分布式电源、移动应急资源及无功电压源等)快速弥补功率缺额，提升系统稳定性，减小扰动事件的影响范围^[40]。

2.3 恢复力

“恢复”在大辞海中的释义是“收复，指收复失地亦用为回复原状之意”，如恢复健康。班固《东都赋》：“茂育群生，恢复疆宇。”

恢复力是指电网正常功能遭到破坏后，及时启动应急恢复和修复机制，保障重要负荷持续供电，并快速恢复电网功能至正常状态的能力。在常规扰动场景下，韧性电网应能够利用先进的保护和自动化手段快速清除、定位、隔离故障并恢复断电负荷。在极端事件导致的大面积停电场景下，韧性电网能够快速修复受损设备，有完备的黑启动方案，并能够有效调动分布式电源和储能、微电网(群)、移动发电车等资源保障对重要电力负荷的持续供电。2019年10月，国家应急管理部和能源局联合发布《关于进一步加强大面积停电事件应急能力建设的通知》，提出“各电力企业要加强系统恢复能力建设，完善电力系统黑启动方案”，推进“源网荷储协同恢复等技术的应用”，强调了提升电网恢复力的重要性。

2.4 感知力

“感知”在大辞海中的释义是“客观事物通过感觉器官在人脑中的直接反映”。

感知力是指全面、快速、准确感知电网运行状态，预测电网未来运行态势并针对潜在风险作出预警的能力。电网态势感知技术通过对广域时空范围内涉及电网运行变化的各类因素的采集、理解与预测^[43]，从而准确有效地掌握电网的安全态势，为应变、防御和恢复措施的制定和实施提供支撑。其中的关键技术包括先进传感、实时通信、数据融合、状态估计、数据挖掘、态势预测、信息物理融合分析等。此外，还需要融合气象、地震、交通、政府应急中心等外部数据，综合判断电网面临的潜在风险，并做出预警。

2.5 协同力

“协同”在大辞海中的释义是“同心合力；互相配合”，如协同办理、协同作战。《后汉书·吕布传》：“将军宜与协同策谋，共存大计。”

协同力是指电网协同内外部资源共同应对扰动的能力，包括输配协同、源网荷储协同、电网与其他关键基础设施协同、能源大脑与城市运营大脑协同等。高效协同措施可在电网应对扰动事件的各个阶段发挥积极作用：在事件发生前，可协调电网各部门联动调配应急资源和实施灾前部署；在事件发生过程中，协同输电网中的大型发电机组、直流输电等几种控制资源和配电网中的分布式电源、柔性负荷等灵活分散资源，共同抵御扰动；在事件发生后，开展输电网“自上而下”和配电网“自下而上”协同恢复，协调网内电源与电动汽车、岸电系统等

社会资源共同支撑重要电力负荷供电。随着能源互联网的建设与发展,电力网、天然气网、交通网、通信网等关键基础设施耦合愈发紧密,有必要联合电网及其他相关部门共同应对大面积停电事件,并与城市应急管理部门配合,实现灾害联防联控。

2.6 学习力

“学习”在大辞海中的释义是“通过经验而导致的相对持久的行为改变和知识获得的过程。以人们与环境互动结果的形式出现。”《史记·秦始皇本纪》:“士则学习法令辟禁。”

学习力是指电网从历史事件或其他电网经历的严重停电事故中获取经验,并不断融合新兴技术实现自我提升的能力。我国电网在处理单一设备故障等常规扰动事件方面已经积累了丰富的经验,但应对小概率、中高影响事件的能力还有待提升,其中一个重要的原因是这类事件发生频次相对较低。因此,我国电网在自身积累经验基础上,应能够从国外具有类似结构和特征的电网所遭遇的停电事故中学习,挖掘潜在风险并采取相应措施以实现自我提升。此外,在电网中应用“大云物移智链”(即大数据、云计算、物联网、移动互联网、人工智能和区块链)等新技术,亦可为电网应对扰动事件提供新思路和新手段,实现韧性提升。

3 韧性电网的概念范畴

3.1 “韧性”与“可靠性”

《中国电力百科全书》对电力系统可靠性的定义为“电力系统按可接受的质量标准和所需数量不间断地向电力用户供电的能力的度量,包括充裕度和安全性两个方面^[44]”。充裕度描述系统在静态条件下的可靠性,即电力系统计及元件负载、母线电压和系统频率等限制条件,考虑元件计划和非计划停运,供给用户要求的总电力和电量的能力。安全性描述系统在动态条件下的可靠性,即电力系统经受住突然扰动并不间断向用户提供电力和电量的能力^[45]。

韧性和可靠性作为电力系统安全领域的两个重要概念,在概念范畴上既一脉相承又有所区别的。可靠性着重关注由常规单点故障、新能源间歇性出力、用户随机行为等导致的大概率、小影响扰动事件,主要以统计方式进行评估。近年来由于气候变化、国际环境动荡等原因,极端气象灾害发生的频次和强度增大,网络攻击发生风险增加,因此考虑小概率、中高影响事件越发重要。韧性弥补了

可靠性对这类事故考虑的不足,二者相辅相成。

3.2 “韧性”与“鲁棒性”

鲁棒性的概念源于统计学,在控制领域中得到发展,是指“控制系统对特性或参数摄动的不敏感性^[46]”。目前,鲁棒性的概念已被推广应用到其他系统和网络,用于表征其容错能力。对于电力系统,鲁棒性是指电力系统在部分元件故障的情况下持续为大部分用户供电的能力^[47]。

韧性和鲁棒性均描述了电网应对扰动事件的能力,但二者侧重点不同。鲁棒性强调系统在内外扰动下保持功能完整的能力。鲁棒性达到一定水平后,进一步提升鲁棒性需要付出高经济代价,且提升措施可能不具备工程可行性。韧性则允许电网主动适应变化,在扰动事件发生过程中适当降低功能水平,并在时间后快速恢复。韧性可以从多个维度提升(对应韧性的6个关键特征),因此提升韧性相比于提升鲁棒性具有更好的成本经济效益和工程可实践性。

3.3 “韧性”与“灵活性/柔性”

电力系统灵活性/柔性是指“在一定时间尺度下,电力系统通过优化调配各类可用资源,以一定的成本适应发电、电网及负荷随机变化的能力^[48]”。灵活性/柔性具有3个特点。第一,灵活性/柔性是电力系统的固有特征^[49],即电力系统运行点在一定范围内偏离预设值时而不需要采取干预措施即可保持功率平衡的能力。第二,灵活性/柔性具有方向性⁰,即电力系统面对多种不确定因素时备向上和向下调节功率的能力。第三,灵活性/柔性具有时空局限性^[2],即电力系统中不同灵活调节资源适用的时间尺度不同,且受资源分布和传输条件影响不能在整个系统中自由流动。

韧性和灵活性/柔性都是电力系统的内在属性,二者从不同的角度描述了系统应对变化的能力,且相互支撑。灵活性/柔性关注电网面对源荷随机扰动的实时供需平衡能力,通过协同利用源网荷储等灵活可调资源,保证充足的电力供应。韧性关注电网安全事件(尤其是极端灾害事件),描述电网感知、应变、抵御、恢复、协同和学习的能力。具有较强灵活性/柔性的电网在面对危及电网安全的扰动事件时可以提供更多的可调控资源,因此,提高灵活性/柔性可以有效促进电网韧性提升。

3.4 “韧性电网”与“能源互联网”

能源互联网是“以可再生能源为优先,以电力能源为基础,多种能源协同、供给与消费协同、

集中式与分布式协同，大众广泛参与的新型生态化能源系统^[50]”。能源互联网包括“能源系统的类互联网化”和“互联网+”两层含义。前者是物理层面的互联，是基于互联网思维对现有能源系统的改造，使得能源系统具有类似于互联网的开放、共享等优点。后者是信息层面的互联，是信息互联网与能源系统的融合，实现能源系统多个主体的信息共享^[51]。

韧性电网与能源互联网是两个相容的概念。一方面，韧性是能源互联网的核心安全属性。一个具有全面感知、灵活应变、强大恢复能力的韧性电网是能源互联网安全特征在物理层面的体现，表征了能源互联网应对多类型扰动和灾害的能力。另一方面，能源互联网为电网韧性提升创造了更大的空间。能源互联网中多种能源和信息网络高度融合，以及人工智能、大数据等先进技术的应用，可有效促进韧性电网应变力、防御力、恢复力、感知力、协同力和学习力的全面提升。

3.5 “韧性电网”与“韧性城市”

韧性城市是指“能够凭自身的能力抵御灾害，减轻灾害损失，并合理的调配资源以从灾害中快速

恢复过来”的城市^[52]。随着我国城镇化进程的深入推进，城市中电力、通信、交通、供水、燃气等系统之间的耦合日益密切，灾害可能会同时导致多个关键基础设施系统出现故障。为了增强我国城市应对各种扰动的能力，我国政府对韧性城市的关注日益增加。北京市把“加强城市防灾减灾能力，提高城市韧性”列入《北京城市总体规划(2016年—2035年)》^[53]；上海市在2019年《上海市城市安全发展的工作措施》中提出了建设韧性城市目标^[54]。

韧性电网建设是推进韧性城市建设的重要环节，起着支撑作用。电网是城市发展的生命线，为其他关键基础设施正常运转提供电能支持。长时间大面积停电事故不仅造成巨大的经济损失，还会影响城市功能正常运转，造成不良的政治、社会影响。韧性电网建设有助于提高城市面对不确定因素的能力，推进城市管理迈向更高水平。同时，韧性城市的发展也丰富了电网应对扰动的手段，例如通过政府、社会、电网以及其他部门协作可有效提升电网应急能力。

韧性/韧性电网与相关概念的对比可总结如表 1 所示。

表 1 韧性电网相关概念汇总
Tab. 1 Concepts related to resilience

概念	定义	与韧性/韧性电网联系
韧性电网	韧性电网是指能够全面、快速、准确感知电网运行态势，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，快速恢复重要电力负荷，并能自我学习和持续提升的电网。	—
可靠性	电力系统按可接受的质量标准和所需数量不间断地向电力用户供电的能力的度量，包括充裕度和安全性两个方面 ^[44] 。	可靠性关注大概率、小影响事件； 韧性着重关注小概率、中高影响事件。
鲁棒性	鲁棒性是指电力系统在部分元件故障的情况下持续为大部分用户供电的能力 ^[47] 。	鲁棒性强调系统在内外扰动下保持功能完整的能力； 韧性允许电网主动适应变化，在扰动事件发生过程中适当降低功能水平，并在时间后快速恢复。
灵活性/柔性	在一定时间尺度下，电力系统通过优化调配各类可用资源，以一定的成本适应发电、电网及负荷随机变化的能力 ^[48] 。	灵活性/柔性关注电网的实时供需平衡能力，韧性关注电网安全事件；提高灵活性/柔性可以有效促进电网韧性提升。
能源互联网	以可再生能源为优先，以电力能源为基础，多种能源协同、供给与消费协同、集中式与分布式协同，大众广泛参与的新型生态化能源系统 ^[50] 。	韧性是能源互联网的核心安全属性； 能源互联网为电网韧性提升创造了更大的空间。
韧性城市	能够凭自身的能力抵御灾害，减轻灾害损失，并合理的调配资源以从灾害中快速恢复过来的城市 ^[52] 。	韧性电网建设是推进韧性城市建设的重要环节，起支撑作用； 韧性城市的发展丰富了电网应对扰动的手段。

4 韧性电网领域的研究需求

尽管国内外学者已经围绕电网韧性开展了一系列研究，但目前仍缺乏公认的能够量化衡量韧性的指标体系。另外，在我国大力建设能源互联网背景下，韧性电网的发展规律仍有待进一步明确。由于扰动事件不仅会破坏电力基础设施，还可能影响

其他关键基础设施，如天然气、通信、水力和交通等系统，因此韧性分析需要考虑不同类型基础设施之间的耦合性。然而，基础设施耦合性的建模、仿真、分析均属于难点问题。此外，人工智能、物联网等新技术亦有助于提升电网韧性。

本节结合我国韧性电网建设现状和发展目标，

从基础理论、关键技术、示范落地3个层面阐述韧性电网领域的研究需求。鉴于韧性电网是一个新兴的前沿领域,其研究需求亦处于不断变化中。本节基于作者对韧性电网的理解,提出一些潜在的重要研究方向,与同行专家学者共同探讨。

4.1 基础理论层面

韧性电网基础理论是指能够解释韧性电网运行原理、网络形态、发展规律,能够指导电网韧性提升的理论,具体包括但不限于:

- 1) 韧性电网形态和演化规律分析理论;
- 2) 电网及能源互联网韧性评估理论与方法;
- 3) 韧性电网与其他韧性关键基础设施的耦合性分析理论;
- 4) 面向韧性提升的电网信息—物理系统理论;
- 5) 能源互联网背景下的韧性电网发展规律。

4.2 关键技术层面

韧性电网关键技术是指能够提升电网感知力、协同力、应变力、防御力、恢复力和学习力的相关技术,具体包括但不限于:

- 1) 电网态势感知与事故预警技术;
- 2) 韧性电网规划设计技术;
- 3) 电网灾害抵御技术;
- 4) 电网预防、校正和紧急控制技术;
- 5) 电网孤岛运行技术;
- 6) 多资源协同的快速供电恢复技术;
- 7) 电网信息安全技术;
- 8) “大云物移智链”新兴技术在韧性电网中的应用。

4.3 示范落地及推广应用层面

在实际应用层面,韧性电网建设应循序渐进,按照示范—深化—引领提升的思路开展。首先,在对电力安全高要求的特大城市,选取部分关键技术(如源网荷储协同恢复技术等)开展示范验证和试点应用,打造韧性电网标杆工程。在此基础上,基于因地制宜原则,推进韧性电网关键技术应用。最后,形成具有中国特色国际领先的韧性电网核心技术及标准体系,并对外输出,力争引领全球韧性电网发展。

5 结论

在当前我国电网形态和运行方式日趋复杂,面临的内外部风险源日益增多的形势下,建设能够主动应对多种扰动的“韧性电网”势在必行。本文首先综述了“韧性”一词的含义与应用,总结了国内

外电力系统韧性的相关概念,在此基础上提出了“韧性电网”的定义并阐释了其内涵;然后,详细阐述了韧性电网应具备的6个关键特征,即应变力、防御力、恢复力、感知力、协同力和学习力;接着,分析了韧性电网与可靠性、鲁棒性、灵活性/柔性、能源互联网和韧性城市等相关概念的联系;最后,从基础理论、关键技术、示范落地3个层面探讨了韧性电网领域的研究需求。

参考文献

- [1] 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(in Chinese).
- [2] 鲁宗相,李海波,乔颖.高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J].中国电机工程学报,2017,37(1):9-19.
Lu Zongxiang, Li Haibo, Qiao Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-19(in Chinese).
- [3] 李明节.大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J].电网技术,2016,40(4):985-991.
Li Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991(in Chinese).
- [4] 董新洲,汤涌,卜广全,等.大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J].中国电机工程学报,2019,39(11):3107-3118.
Dong Xinzhou, Tang Yong, Bu Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3118(in Chinese).
- [5] 胡泽春,宋永华,徐智威,等.电动汽车接入电网的影响与利用[J].中国电机工程学报,2012,32(4):1-10.
Hu Zechun, Song Yonghua, Xu Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10(in Chinese).
- [6] Walling R A, Saint R, Dugan R C, et al. Summary of distributed resources impact on power delivery systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1636-1644.
- [7] 杨挺,翟峰,赵英杰,等.泛在电力物联网释义与研究展望[J].电力系统自动化,2019,43(13):9-20,53.
Yang Ting, Zhai Feng, Zhao Yingjie, et al. Explanation

- and prospect of ubiquitous electric power internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 9-20, 53(in Chinese).
- [8] 高海翔. 利用微电网提升配电网极端灾害应对能力的优化决策方法[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- Gao Haixiang. Optimization decision-making methods to enhance the ability to cope with extreme disasters in distribution systems using microgrids[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [9] 童晓阳, 王晓茹. 乌克兰停电事件引起的网络攻击与电网信息安全防范思考[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 144-148.
- Tong Xiaoyang, Wang Xiaoru. Inference and countermeasure presupposition of network attack in incident on ukrainian power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 144-148(in Chinese).
- [10] Xie Le, Carvalho P M S, Ferreira L A F M, et al. Wind integration in power systems: operational challenges and possible solutions[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 214-232.
- [11] 阮前途. 构建韧性城市电网, 守住安全生产“生命线”[N]. 国家电网报, 2020-06-04(3).
- [12] Wang Jianhui, Gharavi H. Power grid resilience [scanning the issue][J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1199-1201.
- [13] 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 Zhaozhong, Lin Yanling, Qiu Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9(in Chinese).
- [14] Wang Yezhou, Chen Chen, Wang Jianhui, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters—a review[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1604-1613.
- [15] 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.
- [16] 大辞海[EB/OL]. <http://www.dacihai.com.cn/>.
- [17] 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(in Chinese).
- [18] Bhamra R, Dani S, Burnard K. Resilience: the concept, a literature review and future directions[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(18): 5375-5393.
- [19] American Psychology Association. The road to resilience: what is resilience?[EB/OL]. 2011. <http://www.apa.org/helpcen-ter/road-resilience.spx>.
- [20] Adger W N. Social and ecological resilience: are they related?[J]. Progress in Human Geography, 2000, 24(3): 347-364.
- [21] Hamel G, Välikangas L. The quest for resilience[J]. Harvard Business Review, 2003, 81(9): 52-63, 131.
- [22] Lengnick-Hall C A, Beck T E. Adaptive fit versus robust transformation: how organizations respond to environmental change[J]. Journal of Management, 2005, 31(5): 738-757.
- [23] 李强. 新冠肺炎疫情下的经济发展与应对——基于韧性经济理论的分析[J]. 财经科学, 2020(4): 70-79.
- Li Qiang. Economic development and reaction under the background of COVID-19 epidemic situation: based on the theory of economic resilience[J]. Finance & Economics, 2020(4): 70-79(in Chinese).
- [24] 周嘉豪, 徐红. 构建国家韧性: 新中国治水史的政治现象学分析[J]. 天府新论, 2020(2): 85-96.
- Zhou Jiahao, Xu Hong. Building national resilience: a political phenomenological analysis of the history of water control in New China[J]. Tianfu New Idea, 2020(2): 85-96(in Chinese).
- [25] Smart Grid System Report[R]. U.S.: U.S. Department of Energy, 2009.
- [26] Presidential policy directive—critical infrastructure security and resilience[R/OL]. White House Press Release, 2013. <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/02/12/presidential-policy-directive-criticalinfrastructure-security-and-resil>.
- [27] National Academies of Sciences, Engineering, Medicine. Enhancing the resilience of the nation's electricity system[R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2017.
- [28] National Infrastructure Advisory Council. A framework for establishing critical infrastructure resilience goals[R]. U.S.: Department of Homeland Security(DHS), 2010.
- [29] Cabinet Office. Keeping the country running: natural hazards and infrastructure[R]. Environment, 2011: 100.
- [30] RESNET: resilient electricity networks for great Britain[R/OL]. <https://tyndall.ac.uk/projects/resnet-resilient-electricity-networks-great-britain>.
- [31] The ERP Working Group Members. Future resilience of the UK electricity system[R]. Energy Research Partnership(ERP), 2018.
- [32] FERC(2018) grid reliability and resilience pricing (Document No. RM18-1-000), and grid resilience in regional transmission organizations and independent

- system operations(Document No.AD18-7-000)[R/OL] .
<https://www.ferc.gov/CalendarFiles/20180108161614-RM18-1-000.pdf> .
- [33] European Commission . The EU approach to resilience : learning from food security crises[R] . 2012 .
- [34] Fulli G . Electricity security : models and methods for supporting the policy decision making in the European union[D] . Turin : Polytechnic University of Turin , 2016 .
- [35] Kobayashi Y . Enhancing energy resilience : challenging tasks for Japan's energy policy[R] . Washington DC : Center for Strategic & International Studies , 2014 .
- [36] Marnay C , Aki H , Hirose K , et al . Japan's pivot to resilience : how two microgrids fared after the 2011 earthquake[J] . IEEE Power and Energy Magazine , 2015 , 13(3) : 44-57 .
- [37] Abbey C , Cornforth D , Hatziaargyriou N , et al , Powering through the storm : microgrids operation for more efficient disaster recovery[J] . IEEE Power and Energy Magazine , 2014 , 12(3) : 67-76 .
- [38] 国土強靱化政策大綱[R] . 日本 : 国土強靱化推進本部 , 2015 .
- [39] Ouyang Min , Dueñas-Osorio L . Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems [J] . Structural Safety , 2014 , 48 : 15-24 .
- [40] 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):2735-2744 .
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) : 2735-2744(in Chinese) .
- [41] 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(in Chinese) .
- [42] 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 .
- [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):9-23,51 .
Liu Quanying , Li Jun'e , 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) : 9-23 , 51(in Chinese) .
- [44] 《中国电力百科全书》编委会.中国电力百科全书(火力发电卷)[M].3版.北京:中国电力出版社,2014 .
Editorial Board of China Electric Power Encyclopedia . China electric power encyclopedia [M] . 3rd ed . Beijing : China Electric Power Press , 2014(in Chinese) .
- [45] 郭永基.电力系统及电力设备的可靠性[J].电力系统自动化,2001,25(17):53-56 .
Guo Yongji . Reliability of power systems and power equipment[J] . Automation of Electric Power Systems , 2001 , 25(17) : 53-56(in Chinese) .
- [46] 中国大百科全书出版社编辑部.中国大百科全书(简明版)[M].北京:中国大百科全书出版社,1998:3072 .
Editorial Department of Encyclopedia of China Publishing House . Encyclopedia of China(condensed version)[M] . Beijing : Encyclopedia of China Publishing House , 1998 : 3072(in Chinese) .
- [47] Zhang Xi , Tse C K . Assessment of robustness of power systems from a network perspective[J] . IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems , 2015 , 5(3) : 456-464 .
- [48] 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) .
- [49] 肖定垚,王承民,曾平良,等.电力系统灵活性及其评价综述[J].电网技术,2014,38(6):1569-1576 .
Xiao Dingyao , Wang Chengmin , Zeng Pingliang , et al . A survey on power system flexibility and its evaluations [J] . Power System Technology , 2014 , 38(6) : 1569-1576(in Chinese) .
- [50] 周孝信,曾嵘,高峰,等.能源互联网的发展现状与展望[J].中国科学:信息科学,2017,47(2):149-170 .
Zhou Xiaoxin , Zeng Rong , Gao Feng , et al . Development status and prospects of the energy internet[J] . SCIENTIA SINICA Informationis , 2017 , 47(2) : 149-170(in Chinese) .
- [51] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光.能源互联网:理念、架构与前沿展望[J].电力系统自动化,2015,39(19):1-8 .
Sun Hongbin , Guo Qinglai , Pan Zhaoguang . Energy internet : concept , architecture and frontier outlook[J] . Automation of Electric Power Systems , 2015 , 39(19) : 1-8(in Chinese) .
- [52] 韧性城市理论框架[EB/OL] . <http://www.rencity.zju.edu.cn/28931/listm.htm> .
Resilient urban theory framework[EB/OL] . <http://www.rencity.zju.edu.cn/28931/listm.htm>(in Chinese) .
- [53] 北京市人民政府.北京城市总体规划(2016年-2035年)[R].2017 .
The People's Government of Beijing Municipality . Beijing urban master plan(2016-2035)[R] . 2017(in Chinese) .

[54] 上海市人民政府 .上海市城市安全发展的工作措施[R] .
2019 .
Shanghai Municipality People’s Government . The
working measures of urban safety development in

Shanghai[R] . 2019(in Chinese) .
附录 A
本文 1.2 节中提到的国外韧性电网相关定义原文参见
附表 A1。

表 A1 国外韧性电网相关定义
Tab. A1 Foreign definitions of resilient power grid

机构	定义
美国政府	The term "resilience" means the ability to prepare for and adapt to changing conditions and withstand and recover rapidly from disruptions. Resilience includes the ability to withstand and recover from deliberate attacks, accidents, or naturally occurring threats or incidents ^[26] .
美国国家工程院	A resilient system is one that acknowledges that large outages can occur, prepares to deal with them, minimizes their impact when they do occur, is able to restore service quickly, and draws lessons from the experience to improve performance in the future ^[27] .
英国内阁办公室	The ability of assets, networks, and systems to anticipate, absorb, adapt to and/or rapidly recover from a disruptive event ^[29] .
美国联邦能源管理 委员会	The ability to withstand and reduce the magnitude and/or duration of disruptive events, which include the capacity to anticipate, absorb, adapt to, and/or rapidly recover from such an event ^[32] .
欧盟委员会	Resilience is the ability of an individual, a household, a community, a country or a region to withstand, to adapt, and to quickly recover from stresses and shocks ^[33] .



阮前途

在线出版日期：2020-09-14。
收稿日期：2020-07-24。
作者简介：
阮前途(1965)，男，博士，教授级高工，从事电网规划、电网调度、安全运行、科技创新、国际业务等研究和管理工
作，Ruanqt@sh.sgcc.com.cn；
谢伟(1968)，男，高级工程师，硕士，从事电网运行、科技创新、智能电网、配
用电技术等研究和管理工
作；
许寅(1986)，男，教授，博士生导师，从事韧性电网、城市电力交通融合、电力
系统高性能计算等研究工作，xuyin@bjtu.edu.cn；
华斌(1968)，男，高级工程师，从事电
网运行、科技创新、数字化等研究和管理
工
作；
宋平(1974)，男，高级工程师，硕士，从事科技创新、智能电网等研究和管理
工
作；
和敬涵(1964)，女，教授，博士生导师，从事电力系统保护与控制、直流输电系统
等研究工作；
张琪祁(1985)，女，高级工程师，硕士，从事电力系统安全稳定仿真、科技创新等
研究和管理工
作。

(责任编辑 乔宝榆)

Concept and Key Features of Resilient Power Grids

RUAN Qiantu¹, XIE Wei¹, XU Yin², HUA Bin¹, SONG Ping¹, HE Jinghan², ZHANG Qiqi¹

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company; 2. Beijing Jiaotong University)

KEY WORDS: resilient power grid; energy internet; resilient city

In recent years, power systems present several new features, including high penetration of renewables, power electronic equipment integration, load diversity, and cyber-physical interdependency. In addition, the security threats are increasing, and the security situation of power grids becomes severe. Based on the current development of the power grid in China, this paper proposes the definition of “resilient power grid”.

A resilient power grid is the one that can be comprehensively, quickly and accurately aware its operational situation, coordinate internal and external resources, proactively anticipate and prepare for various disturbances, defend against disturbances, restore critical loads promptly, and continuously improve itself.

The above definition gives the six key features of a resilient power grid, including (1) situation awareness, (2) coordination, (3) preparation, (4) defense and resourcefulness, (5) fast restoration and (6) self-learning. The relationship among the six key features is shown in Fig. 1.

Situation awareness refers to the ability to sense the operation status of the power grid comprehensively, quickly and accurately, predict the future operation

situation of the power grid, and give early warning of potential risks. Coordination refers to the ability of the power grid to coordinate internal and external resources to cope with disturbances, including coordination of transmission and distribution grid, coordination of source-network-load-storage, coordination of power grids and other critical infrastructures, and coordination of energy brains and urban operation brains. Preparation refers to the ability of the power grid to proactively predict the impact of an event before an accident, formulate a plan, and take preparatory measures to deal with disturbances. Defense and Resourcefulness refers to the ability to take active defense measures to reduce the impact of the event during the dynamic development of a disturbance. Fast Restoration refers to the ability to promptly activate emergency recovery and repair mechanisms after the normal function of the power grid destroyed, to ensure the continuous power supply of critical loads, and to quickly restore the power grid to a normal state. Self-learning refers to the ability to gain experience from historical events or serious power outages experienced by self and other power grids, and to continuously integrate emerging technologies to achieve self-improvement.

This paper also clarifies the relationship between resilient power grid and energy internet. Finally, the needs of researches on resilient power grids are discussed.

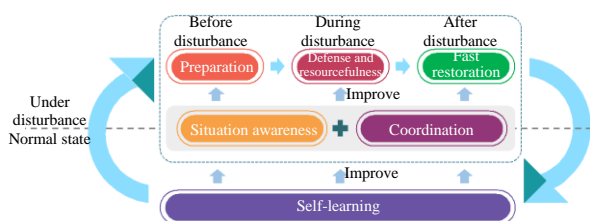


Fig. 1 Relationship among six key characteristics of resilient power grid