

台风灾害下的弹性配电网研究综述与展望

杜诗嘉¹, 郭创新¹, 俞啸玲², 赵福林¹, 邢海青², 方赞朋²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国家电网杭州供电公司, 浙江 杭州 310009)

摘要:近年来, 由于全球气候变暖、生态系统破坏等影响, 世界范围内极端气象灾害频发, 对配电网造成的影响和带来的损失已不容忽视, 亟需建立能够预防、抵御极端灾害并快速恢复关键负荷的配电网, 即弹性配电网。首先介绍弹性配电网的定义与特征, 而后聚焦台风这一极端天气灾害, 综述现有的弹性配电网在配电网规划、灾前预警、灾后恢复、弹性评估与弹性提升等方面的研究成果, 并以此为基础展望未来弹性配电网发展方向。

关键词:弹性配电网; 台风灾害; 配电网规划; 灾前预警; 灾后恢复; 弹性评估

中图分类号: TM 715

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202110028

0 引言

近年来, 自然灾害的频发对电力系统的正常运行造成了不可忽略的影响, 尤其是台风、冰雪灾、持续高温及雷电对电网的影响最为严重。以我国常见的台风灾害为例, 位于台风移动路径及其影响范围内的地区, 往往会出现大规模倒塔和导线断线等事故, 甚至导致区域内大面积停电, 带来巨大的损失, 这与国家电网保障能源安全、服务人民美好生活的愿景相违背。配电网作为电力系统的重要组成部分和直接面向用户的关键一环, 为满足用户日益增长的高供电可靠性和高电能质量的需求, 依据国家能源局《关于电力系统防范应对台风灾害的指导意见》, 要求避免电力设施大规模因灾损毁事件, 最大限度地减少台风灾害损失, 并在台风影响结束后, 尽快恢复电力供应。

台风作为常见的自然灾害, 其对各国沿海地区电网的影响不容小觑, 本文所研究的台风灾害具体指登陆时蒲福风级大于12级且中心最大持续风力大于 32.7 m/s 的台风、强台风和超强台风。基于中国气象台的热带气旋资料, 我国的台风登陆地点主要集中于我国东部沿海地带的省市, 近四年来登陆我国的大型台风平均每年3个^[1], 虽然台风灾害属于小概率事件, 但其带来的损失是巨大的, 如: 2019年台风“利奇马”造成国家电网共计35 kV以上变电站72座、105 kV及以上线路4000余条停电, 直接经济损失高达157亿; 2018年台风“山竹”影响了南方电网供电区域用户150余万户, 造成广州电网中291条

次的10 kV线路受到影响, 受到暴雨冲刷和积水浸泡影响的线路紧急停运120条次, 造成直接经济损失52亿元。在国外, 2017年在佛罗里达礁群岛登陆的飓风“艾尔玛”, 造成佛州700余万户用户停电, 礁岛群被严重破坏。由此说明, 对于电网而言, 台风灾害具有小概率-高损失的特点。

虽然依照国家标准技术规程, 我国在设计配电线路时已充分考虑到气象因素, 要求将水平高度10 m处, 10 a中持续10 min内的平均风速最大值设为最大设计风速值^[2], 但由于传统配电网应对高风险灾害事件的能力较弱^[3], 不能完全抵抗强台风或是超强台风的来袭, 极端灾害依然会破坏电力设施, 造成停电事故和重大经济损失等严重后果。因而, 为提高配电网抵御极端灾害的能力并降低极端事件带来的影响与损失, 弹性配电网的概念应运而生, 其核心在于当发生极端灾害事件时, 配电网能够预防、抵御极端灾害并快速恢复关键负荷。

本文结合当前气候变暖导致的极端灾害频发的现象, 探究极端灾害下弹性配电网的内涵与定义, 并聚焦台风这一极端灾害, 综述现有的弹性配电网在配电网规划、灾前预警、灾后恢复、弹性评估与弹性提升等方面的研究成果, 并以此为基础展望未来弹性配电网的发展方向。

1 台风灾害对配电网设备的影响

在研究台风灾害对配电网的影响时, 主要关注台风模型(风场模型与边界层模型)构建及其致灾因子(极值风速、风暴潮和暴雨等)对配电网承灾体(杆塔、导线等)的影响机理^[4], 台风极端灾害与配电网承灾体的关系可用图1表示。极端灾害尤其是气象灾害对配电网的破坏是随机且不可控的, 因此发生故障的位置以及故障程度与设备的状态参数和连接状况无明显耦合关系, 故不能通过电气机理分析构建模型, 需要通过构建体现台风风速、风向等关键信

收稿日期: 2021-02-25; 修回日期: 2021-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877190); 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211HZ190150)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877190) and the Science and Technology Program of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd.(5211HZ190150)

息的台风风场模型来分析其对配电网的影响。

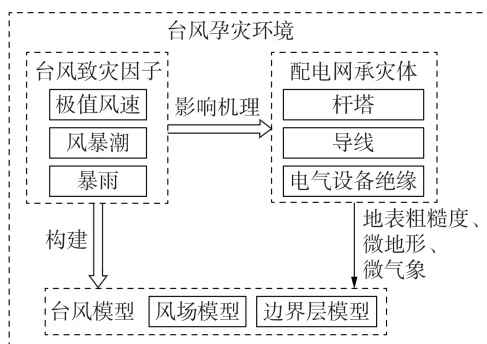


图1 台风极端灾害与配电网承灾体的关系

Fig.1 Relationship between typhoon extreme disaster and disaster-bearing body of distribution network

国内外学者已经进行了许多有关构建台风风场模型的研究,如 Batts^[5-7]、Shapiro、Vickery、Thompson 和 Cardone 模型等^[4],而目前针对台风灾害对电网的危害研究中常见的台风模型有2类:一类是使用极值 I 型概率分布模型预测台风风速^[8-9],该模型计算简洁,但只能体现台风风速而忽略了风向影响^[10];另一类是使用 Batts 台风模型模拟台风风速^[5-6,11],该模型同时考虑了台风的风速与风向,但部分参数依赖于历史数据与经验,精度较差,不同地区的参数可能出现较大区别。

台风灾害常伴随着大暴雨,甚至是山洪、滑坡、泥石流等衍生灾害^[12]。因而在分析台风灾害对配电网设备的影响时,一般主要同时考虑强风和暴雨的危害,下面具体阐述两者对电网的危害。

强风对配电网的影响主要包括以下方面^[13-16]。

1)杆塔折断线路断线。当杆塔及线路遭受超过其最大设计风速的强风时,会有倒杆、铁塔折断以及导线断线的风险。

2)导线因风偏放电。当受到垂直风压作用时,档距或是弧垂较大的导线会产生一定距离的风偏,导致其与距离较近的物体因电气距离不足而产生放电现象。

3)强风间接导致导线短路或倒杆。例如电力线路附近的树木或是路灯等物体因强风而倾倒,导致线路或杆塔被压垮。

4)强风导致通信光纤断线或是通信基站受损,使得电网态势感知能力下降,影响配电网调度运行。

暴雨对配电网的影响主要包括以下方面^[14-15]。

1)侵害变电站电气设备绝缘,防雨密封水平较差的电气设备有渗漏雨的风险,进而可能导致短路、接地等故障。

2)侵害杆塔基础导致倒杆,暴雨冲刷杆塔,长时间暴雨甚至会造成地面积水严重,尤其是低洼地区,从而影响杆塔基础导致其倾倒^[13]。

为定量体现极端灾害对配电网的影响,学者分析研究了台风灾害自身特性及其对配电网承灾体的影响机理。文献[17]采用灰色关联分析方法对电网线路受台风影响的如台风登陆等级、风向夹角等17个影响因子进行灾损关联度分析,以此得到台风破坏电网的关键参考因素。文献[18]构建了基于台风历史数据与台风对配电网影响机理的数据-机理联合驱动的配电网故障率模型,其中数据模型可得到台风持续时间,机理模型综合考虑台风风速对断线、倒杆的影响以及暴雨对绝缘子、变压器的影响。文献[19]中通过构建台风风圈模型,以台风风速与台风路径关联台风灾害与电网设备,并以导线、杆塔与悬垂绝缘子串的最大可承受风速模型作为参考,分析电力设备综合故障率并识别电力系统关键节点。进一步地,针对不同配电网区域的微地形特征差异,一些学者改进基础台风风场模型,使得模型更贴合实际配电网情况。文献[20]基于配电网的历史台风数据,采用指数型曲线拟合杆塔故障率与台风风速,并构建了综合考虑台风风速风向与配电网微地形的风场模型,在此基础上与架空配电线路地理位置进行匹配后得到台风下配电线路的灾损情况。文献[21]考虑线路及杆塔所处地形(山坡、盆地等)对风速的影响,引入修正系数对台风模型进行修正。此外,目前电网运行信息仍未与电力设备所处的微地形、微气象信息融合,因而在调配电网运行信息、恢复资源(抢险队伍、物资等)时需要综合考虑受灾区域的气象、地形、地质的差异化信息^[22]。

由于配电网通常呈现辐射状网络结构,进一步考虑到强风及暴雨对配电网的影响覆盖范围较广、持续时间较长,会使电网故障不能得到及时有效的控制,导致故障蔓延造成电网设备连锁故障,因而需要考虑电网连锁故障情况^[23]。文献[24]具体分析了台风下线路的连锁故障情况,为体现台风的持续影响引入天气指标 P ,表征台风影响下的同一地区不同时段内的线路实时故障概率,并与负载率指标、耦合指标以及潮流波动指标共同构成线路的关联性指标,采用加权模糊C均值聚类算法求解出关联性指标最大时对应的下级开断线路。

在台风对配电网设备影响机理的研究基础上,结合配电网的地理信息,可以构建配电网设备故障概率模型,有助于进一步开展灾前评估与预警工作。

2 弹性配电网及其特征

2.1 配电网现状

配电网是电力系统的重要组成部分和直接面向用户的关键一环,为满足用户日益增长的高供电可靠性和高电能质量的需求,要求配电网在各类突发事件中能保证可靠供电与灵活调度。一方面,相较

于输电网,传统配电网及其调度对台风灾害风险的应对能力较弱^[3,25],体现在:①配电网终端设备覆盖率不足,且采用光纤或无线数据传输,台风灾害可能导致电网信息系统失效,无法支撑灾害中的调度运行监视控制;②由于台风灾害影响范围较大,会引起配电网多设备故障甚至连锁故障,而配电网冗余性较低,较难满足 $N-k$ 检验;③部分区域网架相对薄弱,源、荷分布不均,存在设备重过载现象,制约台风等极端灾害影响下的配电网负荷转供能力;④考虑到台风对分布式电源设备的不良影响,现有利用风电、光伏等分布式电源实现配电网的故障恢复手段不完全适用于极端灾害。另一方面,为响应建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系,电力系统需要消纳大规模可再生能源,而配电网中高比例分布式可再生能源及储能设施的接入在一定程度上影响了系统的安全稳定运行^[26],在配电网常态运行下,需要考虑分布式电源和储能装置的经济性和可靠性;而在台风灾害下,需要发挥其在灾害应急响应中的作用以提升配电网弹性。

2.2 弹性配电网概念

在电力系统领域,目前对电网弹性没有统一明确的定义,学术界、各国政府、电力企业等都提出了各自对能源和电网“弹性”的定义^[27-30],虽然在概念上有不同的表述,但其表达内涵基本一致,即具有“resilience”的电网是指具有预防、抵御小概率-高损失极端事件(如自然灾害、人为袭击事件等)的能力并能够实现灾后快速恢复的电网,其涵盖了电网鲁棒性、冗余性、快速性、智能性、灵活性等多个维度。结合中文表述习惯,国内部分学者将“resilience”翻译为“弹性”^[31]或“韧性”^[32-33]。从词义上区分,“弹性”强调形变后的恢复程度,“韧性”强调事物遭受冲击时抵御冲击的能力,因而有学者指出翻译为“弹性”更合适,而“韧性”则更适合描述持续的随机扰动事件^[34]。笔者认同“弹性”这一表述更能全面体现电网在极端灾害事件中时从受灾到恢复的全过程,因而本文采用“弹性”这一表述方法。

综合国内外学者对弹性概念的理解(如附录A表A1所示)^[31,33,35-38],为更好地体现配电网在灾害发展全过程弹性水平,本文将弹性配电网定义为:在当前经济约束与运行约束下,针对小概率-高损失极端事件,配电网具有实现精确事故预警、坚韧抵御吸收、快速恢复关键负荷的能力。

2.3 弹性配电网特点

弹性配电网具有智能性、鲁棒性、冗余性、灵活性、快速性这5个主要特点,分别在极端事件发展的不同阶段得以体现,图2表征了配电网系统在极端灾害下的实时弹性水平。图中, $F_s(t)$ 为单一灾害下的系统实时弹性水平; $F_0(t)$ 为系统正常运行时的弹性

水平。国内外的部分学者常用系统性能的实时曲线来表征单一灾害下的弹性水平^[37-40],其中根据不同的研究侧重点,系统性能可用维持供电的负荷容量、系统基础设施水平等进行描述。

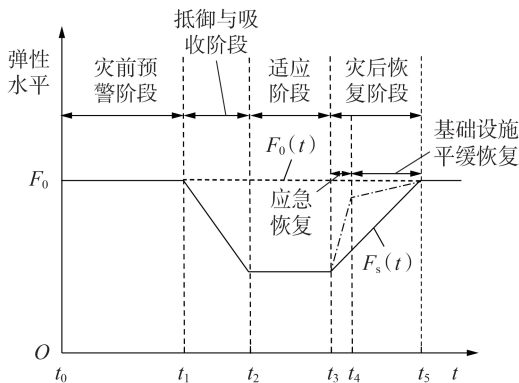


图2 台风灾害下配电网系统弹性曲线

Fig.2 Resilience curve of distribution network system under typhoon disaster

将配电网对台风灾害的动态响应功能曲线按照灾害的进程进行时间尺度上的划分,总体可分为四部分^[23,29]。

1)灾前预警阶段($[t_0, t_1]$)。该阶段主要体现配电网的智能性,电网需要根据气象台预报信息计算台风的行进路径及影响范围,进行台风灾害的预测模型构建及风险评估,并结合地区配电网设备历史、环境、当前状态信息,制定应急响应措施,以保证区域内经济损失及失负荷量最小。

2)抵御与吸收阶段($[t_1, t_2]$)。该阶段主要体现配电网的鲁棒性,即在极端事件下配电网系统的生存能力。在该阶段需要充分利用分布式能源(分布式电源、电动汽车、储能、可控负荷等)保证灾中重要负荷的供电并降低负荷损失。

3)适应阶段($[t_2, t_3]$)。该阶段电网适应并响应灾害,体现了配电网的冗余性。在该阶段需要通过获取配电网的实际负荷损失情况和当前设备状态信息,制定灾后配电网恢复响应措施,如重要负荷抢修方法、负荷恢复和网架重构策略、维修人员安排计划等。

4)灾后恢复阶段($[t_3, t_5]$)。该阶段主要体现配电网的快速性与灵活性,即系统利用灵活性资源快速恢复关键功能、减小停电损失的能力。考虑到灵活性资源的响应速度,该阶段具体可细分为应急恢复阶段($[t_3, t_4]$)以及基础设施平缓恢复阶段($[t_4, t_5]$)2个小阶段,如图2中的点划线所示。在应急恢复阶段,需要唤醒区域内灵活负荷资源及应急资源,抢先恢复重要线路及负荷;在平缓恢复阶段,可通过需求侧管理、合理安排维修人员等措施恢复正常供电。

单次极端事件对配电网的影响可通过图2所示

的实时弹性曲线较为直观简单地展现,然而,由于不同地区受到极端灾害,尤其是极端天气影响的强度和频率有较大的区别,因此对于不同区域的配电网还需进一步考虑极端灾害下的整体弹性。

3 弹性配电网研究内容

分布式可再生能源的渗透、信息通信技术的发展、电力电子技术的应用以及需求响应的优化^[35]等因素的影响推动了配电网向主动配电网新形态过渡,同时也使得配电网弹性研究取得了新的进展。

3.1 弹性配电网规划

能源转型背景下,要求配电网提高消纳可再生能源的能力,加速能源结构的调整优化;充分利用海量分布式能源提高配电网的灵活性和弹性,在规划设计层面充分挖掘系统弹性的提升潜力。在进行弹性配电网规划前,首先要进行资源整合以及模型构建:

1)基于现有的主动配电网^[37]的配置,将海量分布式电源、储能、需求响应等资源进行整合并依照响应时长进行分类^[41],构建区域配电网灾害应急资源储备库;

2)利用互联网信息通信技术,通过对线路以及自动化终端设备的智能感知和管控,并格式化整理配电网的多源异构数据,构建精细化配电网仿真和调度模型。

在此基础上进行配电网优化规划,依据配电网资源类型进行分类,可将台风灾害下弹性配电网规划分为基础设施规划与灵活性资源规划2类。基础设施规划方面:文献[42]研究了基于荷载可靠性的配电系统电杆选型与档距选择规划,为充分考虑台风造成的配电网倒杆、断线等故障,在进行配电线路荷载可靠性计算时引入了台风频率、最大风速等变量;文献[43]通过构建两阶段混合整数线性规划模型,将总成本最小与台风灾害期间配电系统韧性指标最小作为两阶段的优化目标,以自动开关配置方案与配电网供电状况作为决策变量,针对配电网的自动开关进行配置规划以提升配电网在台风灾害下的弹性。灵活性资源规划方面:文献[44]通过构建台风灾害下配电网多区域线路故障的不确定集,量化配电网在台风灾害下的损失,并在此基础上建立计及储能的应急响应规划模型;文献[18]研究了移动储能在台风灾害下减小停电损失、提高弹性以及在配电网常态运行时削峰填谷提高经济性的配置策略,以最大限度地减少台风灾害中负荷停电损失为优化目标,将投入移动储能装置容量作为决策变量,采用纳什谈判模型进行经济性与恢复力的博弈。

此外,在电网规划阶段,考虑到大量分布式能源设备及储能装置的接入增加了电网调度的复杂和困难程度,调度模式需要从少量集中调节转变为海量

分散响应。为更好地应对台风等灾害事故,亟需研究智能电网分散调度和协调控制技术以及灾害防御及快速恢复辅助决策系统。

电力市场作为优化配电网资源配置的手段,在规划阶段需要制定面向灾害应急响应的市场规则,明确台风等灾害影响下能参与市场的电源主体、储能服务、可控负荷等资源类型特征,确定现货市场和辅助服务市场规则。台风灾害下,微电网、虚拟电厂等多类型电源可实现配电网紧急电力支撑,其运行模式与市场规则也需要进行区别研究制定^[45-47]。有很多学者在进行灾害下配电网规划研究时将“源-荷-储”三侧的灵活性资源作为研究变量,构建了贴合能源转型特征的规划优化模型,但仍有以下不完善之处。

1)相关文献中构造的模型较少考虑到配电网基础设施的鲁棒性以及信息系统的可靠性。当配电网遭受台风灾害时,配电网线路和自动化终端设备以及数据传输通道和数据枢纽站的鲁棒性会影响到配电网的弹性水平,特别是对于能源互联网^[48]形态下的多元融合电网,互联网技术作为重要支撑手段,电网信息系统的重要程度不言而喻。

2)分布式可再生能源的高渗透使得配电网系统能源供给更为多元化,现有文献对合理规划新能源发电装置的投资成本、选址定容,使其满足配电网的常态运行需求及灾害应急响应研究仍较少。

3.2 灾前评估与预警

在台风灾害预防阶段,根据气象台预测的台风登陆地点及其移动路径,位于台风移动路径上及在其影响范围内的地区需要结合当地配电网的实际情况,进行灾害风险评估并完成灾前预警工作。研究表明,极端灾害下的事故预警是配电网制定应急调度措施与辅助决策的基础^[49]。

要实现台风灾害预警,首先需要获取台风预报信息与预计灾害时刻下的配电网设备信息。其中台风信息包括台风中心信息(位置、气压)、路径(方向、移动速度)、强度(最大风力、风圈半径)、雨量(降水、区域);配电网设备信息包括线路(位置、电压、工作时间)、杆塔(型号、位置)、变电站(位置、等级)、设计参数(最大设计速度、安全系数)等^[14]。对台风灾害进行合理评估的关键在于将配电网设备故障率与台风预报信息相关联,进而评定风险等级以进行风险预警。

国内外部分学者通过量化台风风险因子,并将其与配电网设备原有故障率相结合得到时变的灾害相关的设备故障率。文献[38]根据故障停运设备的空间分布特征,将台风受灾场景分为集中型、分散型和集中分散型,并对原有设备故障率和台风概率进行加权综合,生成综合停运率函数;文献[50]提出了

一种可以实时更新的台风灾害预警方法,通过将预测的台风路径内的区域进行网格划分,基于有效决策界的思想分析含有线路的网格集合,进而确定线路的故障率,得到相应的事故预警等级;文献[51]通过综合考虑台风影响区域内线路断线、倒塔、异物挂线和风偏闪络这4种故障情况并分别定量计算其故障率,评估台风单一灾害下输电线路的故障率,从而生成风险集进行台风灾害停电预警;文献[7]提出了同时考虑电杆荷载和抗弯强度的电杆故障率修正模型,并结合台风风速模型,评估配电网在台风影响下的风险指标;文献[40]将电网元件故障率建模为台风天气下雷暴次数和最大风速相关的指数函数,从而将台风风险因子考虑在设备故障率内;文献[8]将台风过境时10 min风速平均值计算框定的区域划分为网格,通过概率干涉计算区域网格内配电网的风载荷与设计承载力,得出配电网各类杆塔在台风下的断杆概率,并给出网格区域的预警等级以直观呈现灾损情况。除此之外,也有部分学者应用机器学习与数据挖掘的方法寻找气象信息与配电网设备故障之间的关系,如文献[52]利用关联规则分析寻找环境场景与设备故障之间的关联关系,将当前气象环境与场景模式库进行匹配识别,得到高风险设备信息并确定风险等级。

对于台风灾害下设备故障率建模,现有的多数研究考虑与台风有关的参数,如风速、雷暴次数、降雨量,但是在灾害因子的量化函数生成上仍依赖专家经验或统计数据^[49],对于模型的可靠性、准确性以及在不同程度台风影响下的普适性并未进行有效证明或对比优化,因此后续可以在如何提高模型的准确性及适应性方面进行进一步研究。其次,目前针对台风灾害相关的数据获取与识别相关内容的研究较少,如何充分利用大数据、云计算和物联网技术获取、识别和分析气象状况、线路与电力设备状态以及分布式能源容量等信息可作为灾前预警未来的研究方向。

3.3 灾中抵御与吸收

在台风灾害持续期间,随着台风的移动,配电网会有新的故障产生,而台风的巨大破坏力也使得发生连锁故障的概率大幅提升,所以配电网故障发生的时间及地点难以准确预测,导致实现灾中配电网拓扑重构及重要负荷转供变得更为复杂和困难。

部分学者通过预测台风灾害下一阶段的线路和杆塔停运概率,结合实时拓扑结构来实现灾中的网络重构及重要负荷转供。文献[25]基于电网在台风灾害下的历史统计数据得出的配电网线路停运与杆塔停运的经验公式,得到实时线路受损情况与电网拓扑结构,进一步考虑配电终端侧开关次数与通信系统断电可持续工作时间等功能的可用性,从而实

现台风灾害前期、中后期不同阶段下的拓扑重构。文献[53]同时考虑了台风灾害下风灾对配电网线路的影响以及强降雨对变电站和开关站的影响建立了配电网设备的停运模型,并结合改进的Batts台风风场模型,采用时序蒙特卡洛仿真生成台风灾害下配电网的动态场景集,基于仿真场景集制定重要负荷的最优转供策略。文献[54]利用多周期分解的时空变化台风风压下的线路故障率来描述台风对线路的动态影响,提出了台风灾害下考虑各时段配电网运行情况的线性化多时段配电网重构模型,该模型将受影响线路的故障率作为权重,根据已触发线路和下一时段故障概率高的线路,对每一时段(持续时间为15 min)进行静态故障重构。在实际操作中,为保证重要负荷的灾中供电,常利用分布式电源(如风电、小水电等)和应急电源(如移动发电车)作为灾中紧急支撑电源。文献[55]考虑台风对风电场和小水电出力影响以及区域负荷水平,研究台风环境下的多电源协调调度策略;文献[56]重点研究了城市移动应急电源的调配方案,构建了以总停电经济损失最小为主目标函数、移动应急电源富余容量和最小为次目标函数的双目标函数优化调度模型;文献[57]综合考虑应急电源容量及行驶时间,以重要负荷的停电损失最低为目标函数,研究了灾害中应急电源的优化调度方案。

台风灾害持续期间,配电网故障难以准确预测,进一步考虑到台风对配电网智能终端设备及信息系统的破坏导致配电网实时态势感知能力下降的现象,因而配电网在台风灾害期间的故障恢复成为弹性配电网研究的难点之一。

3.4 灾后重构与恢复

与高概率-低损失干扰事件相比,台风灾害的影响范围更大,地区配电网抵御及吸收灾害的时间更久,电力设备和通信系统损害程度更严重,这为配电网在灾害后的网架重构和故障恢复带来了严峻的考验。在极端灾害发生后,大电网抢修工作完成之前,利用本地分布式电源设计主动配电网负荷恢复及孤岛动态运行方案,对保障医疗、交通枢纽、抢修设施等重要基础负荷的持续供电、提升电网弹性,具有十分重要的现实意义。

目前已有部分针对配电网灾后复电模型和求解算法的研究。在模型构建层面,主要考虑配电网线路、杆塔和自动开关等基础设施的恢复以及分布式电源、储能、电动汽车等灵活性资源的配置与应急调度。文献[38]提出了同时考虑优化开关状态的网架重构模型和优化设备恢复顺序的灾后复电模型。文献[58]提出了一种基于CPN(Colored Petri Net)的推理专家系统,构建了配电网系统的CPN模型用于确定故障位置和设备隔离情况,从而得到配电网恢

复方案。文献[59]构建了含分布式电源的配电网抢修与恢复两阶段双层优化模型,将灾后恢复等效为紧急抢修与网架恢复2个阶段,充分利用分布式电源、可控负荷、联络开关等设备实现确定抢修顺序、减少停电损失的目标。文献[60]考虑了需求响应对配电网故障恢复的影响,通过将需求响应等效量化为成本,引入模型的综合经济成本最优目标函数中,利用混沌搜索改进粒子群算法求解模型得到最优恢复策略。在求解算法方面,由于配电网的灾后恢复优化模型的目标函数本质是混合整数非线性优化问题^[61],通常采用启发式算法和元启发式算法对模型进行求解^[59-60, 62-64]。

上述对配电网灾后复电的研究着重考虑了对灾后电力设施的抢修,未计及对配电网中信息通信设备故障的恢复。在实际的运行调度中,配电网依赖信息通信系统来实现对线路拓扑与电力设备的智能感控。为协调恢复电力故障与信息通信系统故障,文献[65]对配电网进行电力-通信的网格化划分实现两者的解耦,以抢修时长最短和停电损失最小为目标,构建电力-通信协调恢复双层优化模型。

随着近年来风电、光伏、储能等分布式能源相关研究的迅速开展,配电网由被动单向供电转变为双向多电源供电^[66],同时大数据技术与物联网技术的发展提高了分析处理海量量测数据和对电力设施智能感知与实时监测的能力^[67],为配电网灾后重构复电的进一步研究提供了更多的可能性和创造性。

1)配电网的电源供应呈现多元化和分布式的特点,其运行调度呈现数字化、可视化、智慧化的特征,因而构建配电网的网架重构和灾后复电模型时需要融合分布式电源、可控负荷、电动汽车、储能和需求响应等能源转型特征与能源互联网形态下“大云物移智链”等新兴技术,综合考虑“能源流”与“信息流”的灾后协调恢复策略。

2)当前对配电网灾后复电的算例研究仍以简单小规模配电网为主,其分布式电源、储能的数量远低于实际配电网,同时由于能源互联网实现了不同能源类型的互联互通,这使得不同系统(如电力系统、交通系统、天然气系统等)间的耦合更为紧密,所以在后续的研究中需要进一步对复杂大规模的配电网及相耦合的交通、天然气等系统进行联合建模与算法研究。

3.5 弹性配电网弹性评估

为合理量化弹性配电网抵御灾害事故的能力,从配电网对抗动事件的吸收、适应与恢复3个阶段出发,以配电网供电能力为指标,评估电网的弹性。通常是利用配电网在灾难前后的动态响应曲线,选取曲线中的一些特征值来表征配电网的弹性指标。

针对单一气象灾害对配电网的影响,已有较多

国内外学者提出利用定性描述或定量计算评估指标来衡量电网弹性。文献[68]分别针对系统遭到极端灾害破坏的不同阶段,从运行调度和基础设施2个维度评估系统弹性。文献[38]从配电网系统对灾害的响应曲线出发,分别定义了灾害发生过程的3个阶段的弹性评估指标,即灾中抵御阶段的吸收率和适应率以及灾后恢复阶段的修复速率,较全面地体现了弹性的定义核心。文献[33]中定义了配电网弹性的评估矩阵,该矩阵从理论层面上包括了技术、组织、社会和经济4个不同的维度;结合实际规划调度需求,配电网的弹性指标可用系统功能曲线弹性三角形的面积统一衡量或是用概率方式分别衡量配电网的鲁棒性和迅速性。文献[69]从配电网防灾与减灾2个角度提出了弹性评估的指标体系,主要包括配电网防御时间指标、弹性恢复系数指标、孤岛可持续时间覆盖率指标以及重要负荷平均中断时间指标,从时空的物理属性和负荷重要性的社会属性多层次评估配电网弹性。文献[70]对功能曲线中的弹性三角形做进一步改进,提出了弹性梯形的概念,将弹性曲线中抵御阶段的曲线斜率 Φ 、适应阶段的弹性水平 Λ 及时长 E 、恢复阶段的曲线斜率 Π 作为弹性指标,定义了 $\Phi\Lambda E\Pi$ 评估方法,并将梯形面积作为额外度量标准评估系统在单次灾害下的弹性水平,即:

$$\gamma_{\text{resilience}} = \int_{t_1}^{t_5} [F_s(t) - F_0(t)] dt \quad (1)$$

式中: $\gamma_{\text{resilience}}$ 为系统在单一灾害下的弹性水平。

基于上述单一灾害下的配电网弹性评估指标的研究,台风灾害下的配电网可通过对灾前-灾中-灾后配电网功能曲线特征值的计算实现弹性指标的定量评估。上述有关弹性评估的研究侧重于弹性的定性描述以及指标式评估,其在实际配电网的运行调度中的价值仍待商榷,因而部分学者构建了基于台风风险因子和配电网设备及其参数的弹性指标体系。文献[71]从风险管理角度出发针对台风风险的复杂性与随机性,提出定性定量相结合分析的层次分析法:以台风特征参数危害性、承载体抗力与应急救援及资源保障能力作为层次分析中的一级指标,以台风影响因素与电网基础设施与应急设备作为层次分析中的二级指标,并利用一致性检验确定二级指标相对于一级指标的权重,进而提出完整的台风弹性评估指标体系。文献[72]基于层次分析方法,构建了多层次多维度的城市配电网弹性评估体系,一级指标按时间尺度划分为预防阶段、渗透阶段和恢复阶段,二级指标按空间维度划分为电源防灾能力、电网防灾能力、网架恢复能力等。

在单一灾害弹性评估指标的基础上进行系统整体弹性水平的评估,首先要生成极端事件集,文献研

究中常利用蒙特卡洛模拟方法来生成预想极端事件集^[7,73-74],文献[75]中将极端事件集合 ϕ (历史极端事件、预想极端事件集等)的概念引入弹性计算公式,通过极端事件集的平均累积量来评价系统的弹性水平,结合图2,具体公式如(2)所示。

$$\gamma_{\text{resilience}}(s) = \frac{1}{\beta_{\text{size}}(\phi)} \sum_{s \in \phi} \int_{t_1}^{t_2} [F_s(t) - F_0(t)] dt \quad (2)$$

式中: $\gamma_{\text{resilience}}(s)$ 为系统的整体弹性水平; $\beta_{\text{size}}(\phi)$ 为参考事件集的规模。

加入极端事件集的评估方法只能体现电网整体平均弹性水平,不能体现某几类频发灾害对配电网的影响程度,如东部沿海地区电网更关注台风、暴雨等极端天气,而位于地震带的西南、西北地区电网会更关注地震灾害的影响,不同地区配电网可以先按发生频率高低对极端灾害进行排序,然后对单次极端事件按灾害发生频率和影响程度赋予不同的权重系数,得到系统性能损失的加权累加值,如式(3)所示。

$$\gamma_{\text{resilience}}(s) = \frac{1}{\lambda_{\text{count}}(\phi)} \sum_{s \in \phi, i \in \phi} w_i \int_{t_1}^{t_2} [F_s(t) - F_0(t)] dt \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\text{count}}(\phi)$ 为参考事件集的个数; w_i 为事件集 ϕ 中单次灾害的重要程度加权因子; $F_s(t)$ 为事件集 ϕ 中单次灾害的系统实时弹性曲线。

现有的针对弹性评估指标的研究,通常将灾害中电网仍能维持正常运行能力和灾后快速恢复供电能力作为主要评估指标,总体围绕供电能力评估其弹性。目前对于配电网灾害下实时弹性评估的研究较少,无法将弹性指标应用于配电网灾害实时响应措施中,导致当前配电网弹性指标的时效性较差。因而需要建立多时段多维度的弹性指标和体系,以满足长期配电网规划与短期灾害响应的需求。

3.6 弹性配电网弹性提升

基于对配电网在台风灾害下的弹性评估结果,部分文献按照时间顺序将弹性提升措施划分为规划阶段提升措施、灾前预警阶段提升措施、灾中抵御阶段提升措施、灾后恢复阶段提升措施^[64,76]。另外,国内外部分学者按照资源属性将弹性提升措施划分为基础设施提升与智能/灵活资源提升措施^[37,68,77]。其中基础设施提升指在规划阶段或灾前预警阶段,预加固配电网的关键基础设施(如变电站、杆塔、线路等)^[78],提高配电网抵御灾害能力;智能/灵活资源提升措施指通过智能调度配电网分布式电源、储能、电动汽车等灵活性资源,实现对台风灾害的抵御和快速恢复。弹性配电网弹性提升问题的本质是多目标优化问题,主要考虑的优化目标有投资-运行综合成本最优、灾害下配电网生存能力最大、灾后响应恢复速度最快等^[79-80],研究从基础设施、分布式能

源、通信系统、微电网、市场规则、需求响应等维度提升配电网弹性。

随着能源互联网的兴起,已有学者研究依靠不同系统间的联合优化提升电网的弹性,文献[81]设想以电力系统为核心的11个系统(包括电信、运输、建筑、商业等)的基础设施联合优化模型,并以配电网-通信系统的联合优化为例,证实了耦合多系统间的协调优化提升配电网弹性的有效性。

上述弹性规划、灾前评估与预警、灾后恢复与重构、弹性评估、弹性提升这5个主要研究内容的框架如图3所示。

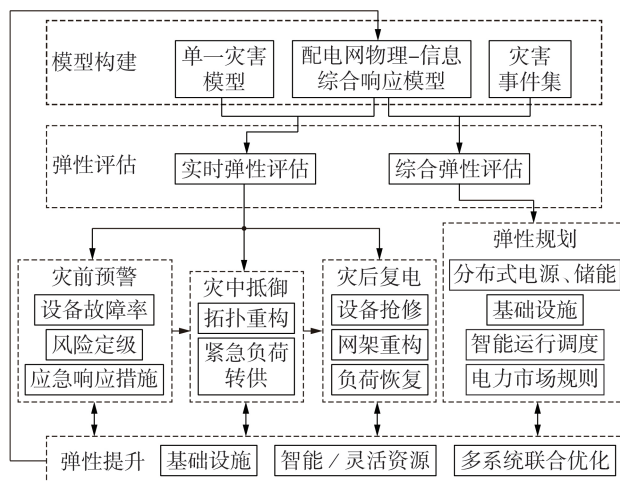


图3 弹性配电网的研究内容框架

Fig.3 Research framework of resilient distribution network

4 弹性配电网的研究展望

弹性配电网的研究是一个复杂的系统工程,还有大量的基础性研究工作有待进一步开展,在台风灾害的影响下,配电网的灵活性资源、信息系统也遭受了不同程度的损害,因而考虑信息系统完整性与考虑灵活性资源的市场因素优化调度理论与方法具有广阔的发展前景和研究空间。

1) 台风影响-配电网响应联合模型研究。

台风极端灾害发生的时间、地点、风级具有复杂性与随机性,导致难以准确预测配电网故障位置以及故障程度,因而需要选择合适的台风风场模型并分析台风影响因子与配电网电力设备的关联度,对台风影响-配电网响应联合模型的研究是实现台风下配电网灾前预警的关键技术。

2) 多维度弹性评估指标体系研究。

结合台风致灾因子对配电网承灾体的影响,针对台风灾害发展过程中对配电网的不同损害状况,需要设计多维度评估指标,研究分时段(台风灾前-灾中-灾后时段)、分类别(基础设施、灵活性资源、电力市场规则等)、分区域(配电网受台风内圈、中圈、

外圈影响区域)的多维度配电网弹性电网评价指标体系。

3) 灾害紧急需求响应技术研究。

高比例分布式能源接入是弹性配电网的重要特征之一,通过研究紧急需求响应策略与制定合理补偿费用充分调动用户响应台风灾害紧急需求,制定台风灾害下的紧急需求响应预案,以保证区域配电网重要负荷的供电。

4) 灾害下配电网物理-信息-社会系统协调恢复研究。

通过对配电网运行环境、线路、终端等数据的智能感知以及分析仿真,研究在线评估配电网弹性水平的方法并实现对灾前-灾中-灾后应急资源的智能快速调配。进一步地,基于受灾区域内新型商业主体和产消者用户的社会属性,以及电网中信息通信系统、物理系统与社会系统三者紧密结合的特征^[82],综合研究物理-信息-社会系统在台风灾害下的连锁故障和联合优化问题。

5 结论

为应对小概率-高损失的极端灾害,弹性配电网的研究与发展势在必行。本文以台风灾害为例,通过构建台风模型,揭示其致灾因子对配电网承灾体的影响机理,可得到配电网在台风影响下的实时弹性曲线,从而进一步开展配电网规划、灾前预警、灾后恢复、弹性评估与弹性提升等方面的研究。在能源转型的需求下,利用分布式电源、储能、可控负荷等灵活性资源实现配电网弹性提升是当前的研究重点。

与此同时,能源互联网技术的发展为弹性配电网的进一步研究提供了更多的可能性和创造性,尤其是新兴互联网技术与配电网运行调度的深度融合以及配电网与多耦合能源系统的联合优化将成为弹性配电网的重要发展方向。

但是,目前对弹性配电网的研究依然停留在理论阶段,无论是灾害事件模型和配电网物理-信息综合响应模型的构建,还是弹性指标和体系的建立,仍未形成一套较完整的可应用于实际系统的方案。如何利用现有的理论研究基础,构建弹性配电网可落地系统将是未来长时间研究的方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [2] 电力行业电力规划设计标委会. 10 kV 及以下架空配电线路设计技术规程: DL/T 5220—2005[S]. 北京: 中国电力出版社,

2005.

- [3] 董旭柱, 黄邵远, 陈柔伊, 等. 智能配电网自愈控制技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 17-21.
DONG Xuzhu, HUANG Shaoyuan, CHEN Rouyi, et al. Self-healing control technology for smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 17-21.
- [4] 肖玉凤, 段忠东, 肖仪清, 等. 基于数值模拟的台风危险性分析综述(I): 台风风场模型[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 82-89.
XIAO Yufeng, DUAN Zhongdong, XIAO Yiqing, et al. Review of numerical simulation-based typhoon hazard analysis: typhoon wind-field model[J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(2): 82-89.
- [5] 尹超雄, 唐武勤, 温灵锋, 等. 台风天气下配电网可靠性的新型评估算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 138-143.
YIN Chaoxiong, TANG Wuqin, WEN Lingfeng, et al. A new method for reliability evaluation of distribution network considering the influence of typhoon[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 138-143.
- [6] 李琳, 穆云飞, 殷自力, 等. 基于台风场景模拟的配电网架空线路薄弱环节辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 150-157.
LI Lin, MU Yunfei, YIN Zili, et al. Identification method of weak links of overhead lines in distribution network based on typhoon scenario simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 150-157.
- [7] 王永明, 殷自力, 李琳, 等. 台风灾害场景下考虑运行状态的配电网风险评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 60-65.
WANG Yongming, YIN Zili, LI Lin, et al. Risk assessment method for distribution network considering operation state in the scene of typhoon disaster[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(12): 60-65.
- [8] 陈彬, 于继来. 强台风环境下配电网断杆概率的网格化评估[J]. 电气应用, 2018, 37(16): 42-47.
- [9] 侯慧, 于士文, 李显强, 等. 基于随机风场概率加权的台风灾害下输电线路损毁预警[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 140-147.
HOU Hui, YU Shiwen, LI Xianqiang, et al. Early warning for transmission line damage under typhoon disaster based on random wind field probability weighting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 140-147.
- [10] 陈朝晖, Erik Van Marcke, 孙毅, 等. 常规风与飓风的极值风速预测模型评述[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(5): 158-163.
CHEN Zhaohui, VAN MARCKE E, SUN Yi, et al. A review of model predicting extreme wind speed of normal wind and hurricane[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(5): 158-163.
- [11] 陈玫丽. 考虑台风天气影响的风电可靠性建模研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
CHEN Meili. The wind power reliability modeling research considering the effects of typhoon[D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [12] WU Y J, XUE Y S, WANG H H, et al. Extension of power system early-warning defense schemes by integrating typhoon information[C]//International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012). Hangzhou, China: IET, 2012: 1-7.
- [13] 林建勤. 建立科学高效的电网防台风暴雨应急机制[J]. 供用电, 2007, 24(4): 9-11, 14.
LIN Jianqin. Establishing scientific and highly efficient mechanism for power network to cope with typhoon and rainstorm[J]. Distribution & Utilization, 2007, 24(4): 9-11, 14.

- [14] 张勇,赵勇,王景亮,等. 台风对电网运行影响及应对措施[J]. 南方电网技术,2012,6(1):42-45.
ZHANG Yong,ZHAO Yong,WANG Jingliang,et al. The influence of typhoon on the operation of power grid and countermeasures[J]. Southern Power System Technology,2012,6(1):42-45.
- [15] 彭向阳,黄志伟,戴志伟. 配电线路台风受损原因及风灾防御措施分析[J]. 南方电网技术,2010,4(1):99-102.
PENG Xiangyang,HUANG Zhiwei,DAI Zhiwei. Analysis on the cause of distribution line's damage during typhoon and counteract measures[J]. Southern Power System Technology,2010,4(1):99-102.
- [16] 李奇周. 台风对配网调度运行工作的影响和应对策略[J]. 通信电源技术,2020,37(6):271-272.
LI Qizhou. Impact of typhoon on dispatching operation of distribution network and countermeasures[J]. Telecom Power Technology,2020,37(6):271-272.
- [17] 彭伟松. 台风登陆后对沿途电网线路破坏量预测研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.
PENG Weisong. Research on the prediction of damage to the power line along the route after typhoon landing[D]. Beijing:North China Electric Power University,2019.
- [18] 张璐,黄睿,王照琪,等. 考虑恢复力与经济性均衡的配电网移动储能优化配置策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(21):23-31.
ZHANG Lu,HUANG Rui,WANG Zhaoqi,et al. Optimal configuration strategy of mobile energy storage in distribution network considering balance between resilience and economy[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(21):23-31.
- [19] 王志奎. 灾害天气下电力系统应急规划的优化方法[D]. 杭州:浙江大学,2018.
WANG Zhikui. Optimization methods of power system emergency planning under disaster weather[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2018.
- [20] 陈彬,于继来. 强台风环境下配电线路故障概率评估方法[J]. 中国电力,2019,52(5):89-95.
CHEN Bin,YU Jilai. Outage probability evaluation of the distribution corridors under strong typhoon environment[J]. Electric Power,2019,52(5):89-95.
- [21] 周晨. 考虑台风影响的架空输电线路运行风险评估[D]. 广州:华南理工大学,2019.
ZHOU Chen. Operational risk assessment of overhead transmission lines considering typhoon influence[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2019.
- [22] 薛禹胜,吴勇军,谢云云,等. 停电防御框架向自然灾害预警的拓展[J]. 电力系统自动化,2013,37(16):18-26.
XUE Yusheng,WU Yongjun,XIE Yunyun,et al. Extension of blackout defense scheme to natural disasters early-warning[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(16):18-26.
- [23] 尉静慧. 考虑台风和信息因素的电力系统连锁故障建模分析[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.
YU Jinghui. Modeling analysis of power system cascading failure considering typhoon and communication factors[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2020.
- [24] 张晶晶,尉静慧,李小燕. 台风对电力系统连锁故障的影响分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):157-162.
ZHANG Jingjing,WEI Jinghui,LI Xiaoyan. Impact analysis of typhoon on cascading failure for electric power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(10):157-162.
- [25] 李博达,熊宇峰,任正伟,等. 台风期间考虑配电终端功能可用性的配电网重构方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(4):38-44.
LI Boda,XIONG Yufeng,REN Zhengwei,et al. Distribution network reconfiguration method considering availability of distribution terminal functions during typhoon disaster[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(4):38-44.
- [26] LEZHNYUK P,KOMAR V,BUSLAVETS O. Impact of renewable sources of energy on the level of active power losses in distribution networks[C]//2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems(IEPS). Kyiv,Ukraine: IEEE,2016:1-6.
- [27] UNISDR. Disaster risk and resilience[R]. [S.l.]: UN System Task Team on the Post-2015 UN Development Agenda,2012.
- [28] 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.
- [29] US Department of Homeland Security. National infrastructure protection plan 2009:partnering to enhance protection and resiliency[EB/OL]. [2021-08-31]. <https://www.cisa.gov/publication/nipp-2009-partnering-enhance-protection-resiliency>.
- [30] 国网浙江省电力有限公司. 能源互联网形态下多元融合的高弹性电网专项工作方案[R]. 杭州:国网浙江省电力有限公司,2020.
- [31] 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.
- [32] 王红斌,方健,何嘉兴,等. 极端灾害下配电网韧性研究综述[J]. 供用电,2019,36(7):20-29.
WANG Hongbin,FANG Jian,HE Jiaxing,et al. A review of resilient distribution network under extreme disasters[J]. Distribution & Utilization,2019,36(7):20-29.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] BIE Zhaozhong,LIN Yanling,LI Gengfeng,et al. Battling the extreme:a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE,2017,105(7):1253-1266.
- [36] 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.
- [37] 周晓敏,葛少云,李腾,等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(2):505-513,681.
ZHOU Xiaomin,GE Shaoyun,LI Teng,et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(2):505-513,681.
- [38] 陈碧云,李翠珍,覃鸿,等. 考虑网架重构和灾区复电过程的配电网抗台风韧性评估[J]. 电力系统自动化,2018,42(6):47-52.
CHEN Biyun,LI Cuizhen,QIN Hong,et al. Evaluation of typhoon resilience of distribution network considering grid reconstruction and disaster recovery[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(6):47-52.
- [39] FRANCIS R,BEKERA B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems[J].

- Reliability Engineering & System Safety, 2014, 121: 90-103.
- [40] BESSANI M, MASSIGNAN J A D, FANUCCHI R Z, et al. Probabilistic assessment of power distribution systems resilience under extreme weather[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(2): 1747-1756.
- [41] 肖定焱, 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.
- [42] 兰颖. 考虑台风影响的配电网可靠性评估和规划[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- LAN Ying. Distribution system reliability evaluation and design considering influence of typhoon[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [43] 陈碧云, 陈灏颖, 李滨. 应对极端灾害的韧性配电网自动开关优化配置[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 71-77.
- CHEN Biyun, CHEN Haoying, LI Bin. Optimal planning of automatic switches in resilient distribution network against extreme disasters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 71-77.
- [44] 张海波, 马仲铜, 程鑫, 等. 保证重要负荷不间断供电的配电网储能规划方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 259-268.
- ZHANG Haibo, MA Shentong, CHENG Xin, et al. Distribution network energy storage planning ensuring uninterrupted power supply for critical loads[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 259-268.
- [45] 陈鹏, 周晖. 微电网电力市场交易模型研究[J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(4): 23-29.
- CHEN Peng, ZHOU Hui. Research on trading model of micro-grid under market conditions[J]. Power Demand Side Management, 2011, 13(4): 23-29.
- [46] 杨甲甲, 赵俊华, 文福拴, 等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 92-102.
- YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 92-102.
- [47] 周亦洲, 孙国强, 黄文进, 等. 计及电动汽车和需求响应的多类电力市场下虚拟电厂竞标模型[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1759-1767.
- ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Strategic bidding model for virtual power plant in different electricity markets considering electric vehicles and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1759-1767.
- [48] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
- DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy Internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [49] 郭晓鸣. 考虑灾害环境的电力系统事故预警[J]. 华东电力, 2013, 41(3): 508-513.
- GUO Xiaoming. Power system accident warning considering the disaster environment[J]. East China Electric Power, 2013, 41(3): 508-513.
- [50] 方嵩, 方丽华, 熊小伏, 等. 基于有效决策界的电网台风灾害预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 83-88.
- FANG Song, FANG Lihua, XIONG Xiaofu, et al. A typhoon disaster early warning method for power grid based on effective decision boundary[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 83-88.
- [51] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 20-29, 83.
- WU Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 20-29, 83.
- [52] 徐特威, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于典型故障与环境场景关联识别的城市配电网运行风险预警方法[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2577-2584.
- XU Tewe, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. A risk warning method for urban distribution network based on associated recognition of typical fault and environment scenario[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2577-2584.
- [53] 何嘉兴, 张行, 王红斌, 等. 极端灾害下考虑应急转供的配网停电过程仿真方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 104-111.
- HE Jiaxing, ZHANG Hang, WANG Hongbin, et al. Simulation method of distribution network outages process considering emergency transfer under extreme disaster[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 104-111.
- [54] GAN Lei, LI Yuting, CHEN Xingying, et al. A multi-period reconfiguration method of distribution networks considering spatial and temporal variation of typhoon[C]//2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Nanjing, China: IEEE, 2020: 1-5.
- [55] 汪寅乔. 台风环境下电力系统多源协调调度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WANG Yinqiao. Research on multi-source coordinated dispatching of power system under typhoon environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [56] 王宏, 林振智, 文福拴, 等. 城市移动应急电源的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 123-129.
- WANG Hong, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. Optimal scheduling of urban mobile emergency power sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 123-129.
- [57] 韩畅, 梁博森, 林振智, 等. 防灾应急电源优化调度的机会约束规划方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 147-154.
- HAN Chang, LIANG Bomiao, LIN Zhenzhi, et al. Chance-constrained programming method for optimal scheduling of emergency power source[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 147-154.
- [58] CHEN C S, LIN C H, TSAI H Y. A rule-based expert system with colored Petri net models for distribution system service restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 1073-1080.
- [59] 杨丽君, 吕雪姣, 李丹, 等. 含分布式电源的配电网多故障抢修与恢复协调优化策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 13-19.
- YANG Lijun, LÜ Xuejiao, LI Dan, et al. Coordinated optimization strategy of multi-fault repair and recovery for distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 13-19.
- [60] 王科, 项恩新, 聂鼎, 等. 考虑需求响应的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(10): 70-76.
- WANG Ke, XIANG Enxin, NIE Ding, et al. Fault recovery strategy for distribution network considering demand response[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(10): 70-76.
- [61] 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.
- [62] 高纯,于艾清,丁雨. 基于改进布谷鸟算法的三相不平衡有源配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(9):143-150. GAO Chun, YU Aiqing, DING Yu. Reconfiguration of three-phase unbalanced active distribution network based on improved cuckoo search algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2020, 32(9): 143-150.
- [63] KHEDERZADEH M, ZANDI S M. Enhancement of distribution system restoration capability in single/multiple faults by using microgrids as a resiliency resource[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(2): 1796-1803.
- [64] 孙伟卿,张婕,叶磊,等. 考虑广义储能的电力系统运行弹性优化[J]. 系统仿真学报,2021,33(4):962-972. SUN Weiqing, ZHANG Jie, YE Lei, et al. Operation resilience optimization of power system considering generalized energy storage[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 962-972.
- [65] 陈彬,于继来,周霞,等. 基于网格化的极端灾后配电网电力-通信协调恢复策略[J]. 电网技术,2021,45(5):2009-2017. CHEN Bin, YU Jilai, ZHOU Xia, et al. Power-communication coordination recovery strategy based on gridding method after disasters[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 2009-2017.
- [66] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):10-16. YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [67] 李向阳,喇果彦,向英,等. 大云物移智等新技术在电网应用的研究[J]. 电力信息与通信技术,2019,17(1):89-93. LI Xiangyang, LA Guoyan, XIANG Ying, et al. Analysis of new technologies including big data, cloud computing, Internet of Things, mobile Internet, artificial intelligence in power grid applications[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(1): 89-93.
- [68] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3747-3757.
- [69] 王法顺. 考虑多利益主体的主动配电网规划与弹性评估[D]. 上海:上海电力大学,2020. WANG Fashun. Considering the active distribution network planning of multi-stakeholder and resilience evaluation[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2020.
- [70] OUYANG MIN, DUEÑAS-OSORIO L, MIN XING. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. Structural Safety, 2012, 36 / 37: 23-31.
- [71] 张诗雪. 区域电网的台风风灾及抗灾韧性[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020. ZHANG Shixue. Typhoon disaster and resilience of regional power grid[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [72] 顾明宏,孙为兵,李培培,等. 面对极端扰动事件的城市弹性配电网评估指标体系[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(7):103-109. GU Minghong, SUN Weibing, LI Peipei, et al. Evaluation index system for urban elastic distribution network in the face of extreme disturbance events[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2018, 30(7): 103-109.
- [73] 郭云霞,侯一筠,齐鹏. Monte-Carlo模拟与经验路径模型预测台风极值风速的对比[J]. 海洋学报,2020,42(7):64-77. GUO Yunxia, HOU Yiyun, QI Peng. Comparison of extreme wind speeds predicted by Monte-Carlo simulation and empirical track model[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 42(7): 64-77.
- [74] 唐文虎,杨毅豪,李雅晶,等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(7):2244-2254, 2403. TANG Wenhui, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2244-2254, 2403.
- [75] 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.
- [76] OMOGOYE O S, FOLLY K A, AWODELE K O. Review of sequential steps to realize power system resilience[C]//2020 International SAUPEC / RobMech / PRASA Conference. Cape Town, South Africa: IEEE, 2020: 1-6.
- [77] PANTELI M, MANCARELLA P. Modeling and evaluating the resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(3): 1733-1742.
- [78] 高鑫,唐飞,张童彦,等. 配电网防风抗灾加固措施优化决策方法[J]. 发电技术,2021,42(1):78-85. GAO Xin, TANG Fei, ZHANG Tongyan, et al. Optimal decision-making method of wind-proof and disaster-resistant reinforcement measures for distribution network[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 78-85.
- [79] REN Fuchun, ZHAO Tingdi, JIAO Jian, et al. Resilience optimization for complex engineered systems based on the multi-dimensional resilience concept[J]. IEEE Access, 2017, 5: 19352-19362.
- [80] 邹波,孙可,胡成鹏,等. 台风天气下配电系统韧性提升策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(7):135-142. ZOU Bo, SUN Ke, HU Chengpeng, et al. Resilience enhancement strategy for power distribution system under typhoon weather[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2021, 33(7): 135-142.
- [81] REED D A, KAPUR K C, CHRISTIE R D. Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure[J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(2): 174-180.
- [82] 刘念,余星火,王剑辉,等. 泛在物联的配用电优化运行:信息物理社会系统的视角[J]. 电力系统自动化,2020,44(1):1-12. LIU Nian, YU Xinghuo, WANG Jianhui, et al. Optimal operation of power distribution and consumption system based on Ubiquitous Internet of Things: a cyber-physical-social system perspective[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 1-12.

作者简介:



杜诗嘉

杜诗嘉(1997—),女,浙江绍兴人,硕士研究生,研究方向为智能电网风险调度、弹性电力系统(E-mail:21910059@zju.edu.cn);

郭创新(1969—),男,湖北黄冈人,教授,博士研究生导师,通信作者,研究方向为智能电网风险调度、综合能源系统等(E-mail:guochuangxin@zju.edu.cn);

俞啸玲(1989—),女,浙江金华人,工程师,研究方向为电力系统及其自动化(E-mail:zjjhyxl@163.com)。

(编辑 任思思)

(下转第209页 continued on page 209)

Power quality gradation and power purchase and sale strategy considering sensitive users' demand

DONG Haiyan, CHEN Jie, JIA Qingquan, ZHAO Bingwen, WANG Yuntao, TIAN Yu

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Under the environment of deregulated power retail market, in order to meet the differentiated high-quality power demand of highly permeable and decentralized sensitive users of distribution network, a power quality gradation and power purchase and sale decision making method for differentiated power quality is proposed. A load clustering and power quality gradation method considering sensitive users' demand is given. A master-slave game framework for power purchase and sale decision making between power selling enterprise and cluster users is established, a game model of cluster users is established considering power quality sensitivity, and a revenue model of power selling enterprise is established considering management cost and recovery rate. Simulative results show that the proposed method is beneficial to improve the pertinence and applicability of power quality management and improve the economic benefit of market entities, and provides solution for sensitive users' differentiated power demand.

Key words: differentiated power quality; power purchase and sale strategy; gradation; master-slave game; sensitive device

(上接第186页 continued from page 186)

Review and prospect of resilient distribution network under typhoon disaster

DU Shijia¹, GUO Chuangxin¹, YU Xiaoling², ZHAO Fulin¹, XING Haiqing², FANG Yunpeng²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310009, China)

Abstract: In recent years, due to the impact of global warming and ecosystem destruction, extreme meteorological disasters occur frequently all over the world, and the impact and losses on distribution networks cannot be ignored. In this context, the concept of resilient distribution network is proposed to prevent and withstand extreme disasters and recover critical loads quickly. Firstly, the definition and characteristics of resilient distribution network are introduced. Then, focusing on typhoon, an extreme weather disaster, the existing research achievements of resilient distribution network are summarized in five key contents, which are distribution network planning, pre-disaster warning, post-disaster recovery, resilience assessment and resilience enhancement. On this basis, the future development directions of resilient distribution network is prospected at last.

Key words: resilient distribution network; typhoon disaster; distribution network planning; pre-disaster warning; post-disaster recovery; resilience assessment

表 A1 弹性电网及弹性配电网的定义比较

Table A1 Definition comparison of resilient power system and resilient distribution network

类型	文献	定义
弹性电网	[31]	弹性电网的系统抵御能力增强，更强调在面临无法避免的故障时，系统能有效利用各种资源灵活应对风险，适应变化的环境，维持尽可能高的运行功能，并能迅速、高效恢复系统性能。
	[35]	弹性电网具有预测、抵抗、吸收、响应、适应和从干扰中恢复的能力
	[36]	弹性电网具有从高冲击-低概率的外部冲击中预测、吸收并迅速恢复的能力
弹性配电网	[33]	弹性配电网具有是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
	[37]	配电网韧性考虑的是极端天气条件下，尽量减小负荷损失的能力
	[38]	弹性配电网具有遭受自然灾害后能保证持续供电，并尽可能减少负荷停电的时间和范围，快速恢复到正常运行状态的能力