

极端自然灾害下配电网韧性研究进展

沈宇同¹, 王国庆^{1*}, 于雷²

1. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049;

2. 齐齐哈尔北车辆段, 齐齐哈尔 161099

摘要:近年来,地震、台风等低概率高破坏性的极端灾害的发生对电网造成严重损坏,电网安全运行遭受巨大威胁,建立具有安全性和稳定性的配电网备受关注。因此,国内外学者纷纷提出建设“韧性电网”的概念。本文从电网“韧性”的含义入手,介绍国内外机构或学者对“韧性”的定义与解释及其量化度量指标及评价方法,并总结了部分提升配电网韧性的措施。同时,围绕不同阶段下配电网韧性优化建模,总结模型的约束条件等内容。简介了考虑风电出力不确定性的电网日常调度模型,总结处理和构建风电不确定集的方法。最后,着重介绍了用于求解考虑不确定性问题的两种算法,并对提升电网韧性的方法提出思考和展望。

关键词:配电网韧性;鲁棒优化;多目标优化;随机规划

中图分类号: F426.61; TM73

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2022)02-0093-11

1 引言

近年来,世界电力电子技术飞速发展,从传统电力能源逐渐转型为可再生能源发电,风电、光伏等形式以或集中或分散的方式接入电网,它们的波动性、随机性对已有电网安全运行带来挑战^[1]。超、特高压直流输电、柔性直流输电和直流电网等陆续投入运用,我国构建的大规模交直流混联的智慧电网格局在对能源高效使用的同时也增加

了安全风险^[2]。各类基础设施电气化程度加深,可再生资源和比例电力电子设备被使用和接入,呈现出负荷多元化的特点,另外,现今信息与物理系统高度融合,能源互联网的建设和发展将信息系统和电网运行紧密联系在一起,2012年7月30、31日印度连续发生大停电事故,多条线路停运,使得网络结构薄弱,超负荷用电等原因,致使印度北部电网基本崩溃,超30%的印度人民受到影响^[3]。2015年底乌克兰电网遭受网络攻击导致大

收稿日期: 2022-02-13; 修回日期: 2022-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(7207041080)

作者简介: 沈宇同(1997—),女,硕士研究生,研究方向为运筹优化。E-mail: shenyutong21@mails.ucas.ac.cn

*王国庆(1975—),男,博士,副教授,研究方向为应急管理和运筹与组合优化。E-mail: wgq94@ucas.ac.cn (通讯作者)

于雷(1975—),男,硕士,高级工程师,研究方向为应急管理,铁道车辆。E-mail: yulei98-04@126.com

引用格式: 沈宇同,王国庆,于雷. 极端自然灾害下配电网韧性研究进展[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2022, 14(2): 93-103. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.22092701

Shen Y T, Wang G Q, Yu L. Research progress about power grid resilience improvement models under extreme natural disasters[J]. Journal of Engineering Studies, 2022, 14(2): 93-103. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.22092701

量用户家庭停电^[4]。这些变化都迫使电网需在硬件和软件方面都拥有更强的承压和自我调节能力。

不仅如此, 全球气候变化导致的极端自然灾害发生频率逐年增多, 2008年初, 我国长江中下游某些地区出现大面积、大强度的低温雨雪冰冻灾害性天气, 大范围输电线路覆冰, 输电线路杆塔倒塌, 电力中断导致公路交通等城市基础设施受到严重影响, 经济损失巨大^[5]。2011年发生于日本宫城县海域的9.0级大地震及其引发的海啸重创日本电力系统, 福岛第一核电站发生严重核泄漏事故^[6]。2016年第14号台风“莫兰蒂”登陆我国福建地区, 对多条500千伏的高压电线路造成破坏^[7]。2019年第9号台风“利奇马”导致华东及华北地区30多座110千伏以上的变电站停电, 给近800万用户的生活带来不便^[8]。电网面临来自自然灾害、连锁故障等更为严峻的考验。

社会运转与发展离不开电网、交通网等基础保障设施, 而各项基础设施也需要依靠电力才能保证正常运行。在社会对电力供应的需求愈盛的今天, 电网自身连锁故障、网络攻击、极端自然灾害等事件导致的大规模停电事故不仅会导致电力设备损坏等直接经济损失, 更会影响工业生产、商业活动^[5]。综上所述, 在电网环境日益复杂、安全威胁不断增多的形势下, 建设具有安全性、稳定性的电网刻不容缓。为应对电力系统对低概率、高风险的极端事件准备不足的弱点, 提升电网抗打击能力, 国内外相继提出韧性电网、弹性电网等概念, 并对电力系统韧性的相关概念理论、提升电网抵御能力的方法和技术展开讨论。本文将从电网“韧性”的含义入手, 介绍国内外机构或学者对电网韧性的量化度量指标、评价方法、优化建模等相关研究, 并对提升电网韧性的方法提出思考和展望。

2 配电网韧性的概念及评价方法

2.1 配电网韧性的含义

目前为止, 电网韧性任未有世界学术界公认的明确的定义。2009年, 在美国能源部发布的《智

能电网系统报告》^[9]中首次明确提出智能电网在面对不同程度的扰动和攻击时应具备韧性(resilience)。2013年时任美国总统奥巴马发布的第21号美国总统政策令^[10]中将韧性一词加以定义, 即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回复的能力。2017年美国国家工程院发布《提升国家电力系统韧性》报告中再次将其定义为能够认识到长时间、大面积停电事故发生的可能性, 做到事故发生前充分预测准备, 发生时最小化其不良影响, 发生后快速恢复并自主学习提升抗扰动能力。2011—2015年, 英国工程与物理科学研究委员会(Engineering and Physical Sciences Research Council, EPSRC)开展旨在提高英国电网应对极端自然灾害的韧性, 并量化分析措施效果的项目。作为自然灾害多发的国家, 近年来日本政府也从注重自然灾害预防逐渐转移到研究电网抵御灾害的能力及灾后恢复力。2011年福岛大地震的冲击让日本坚定向韧性电网发展的决心。

与此同时, 中国的许多学者也对电网韧性做出过解释和定义。2014年欧阳敏等^[11]结合美国对地震灾害提出的韧性定义, 提出包含鲁棒性、冗余性、机敏性和快速性的电力系统韧性定义。2015年邱爱慈等^[12]整理总结了各国、各地区学者对“弹性电网”与恢复力的定义, 将其总结为三个方面的特征, 同时明确了其研究方向, 包括气候与地震灾害、信息与物理安全、人为因素及电网自身因素等。陈颖等^[13]提出“配电网韧性”的概念, 通过对韧性与可靠性的对比阐述韧性的重要性, 给出量化配电网韧性的评估方法, 提出了提升配电网韧性的规划和调度措施。2019年鞠平等^[14]综述了电力系统的柔性弹性研究进展, 提出“电力系统韧性”的概念、研究内容和技术路线等。2020年阮前途等^[15]用“应变力、防御力、恢复力、感知力、协同力和学习力”六个词概括了韧性电网的特征。

尽管各个学者对“韧性”的说法不尽相同, 但其定义与内涵基本一致, 都涵盖了系统应对大型扰动事件时的抵御能力和恢复能力。系统在扰动事件发生前后过程中的功能曲线如图1^[16]。

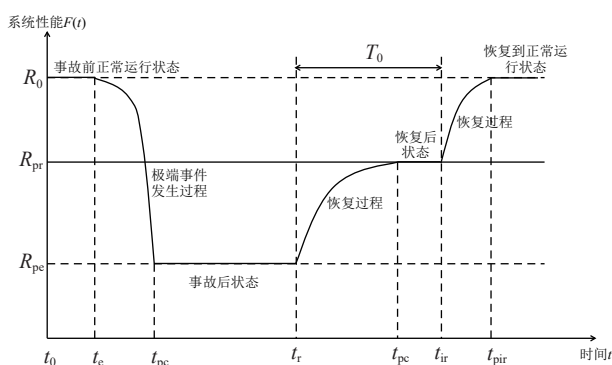


图1 系统在扰动事件发生过程中的功能曲线

Figure 1 Function curve of power systems in an extreme event

对电网而言, 图1中的 $F(t)$ 通常为电网中关键负荷的供电功率或收益函数。在事故发生前(t_e 前), 电力系统可以保证所有负荷都正常供电, 系统功能维持正常水平 R_0 。极端事件或其他原因导致系统故障发生后(t_e 后), 系统功能急速下降, 并在某一时刻(t_{pe} 时刻)达到最低点(R_{pe})。直到 t_r 时刻采取紧急恢复措施, 由于电网相关设施被破坏无法在短时间内完好如初, 紧急恢复措施只能将系统功能提升至一定水平(R_{pr}), 并在 t_{pr} 至 t_{ir} 期间保持此水平运行, 从 t_{ir} 开始, 系统需要经过一段时间的修复, 相关功能重新启动, 最后在 t_{pir} 时刻达到事故前的正常运行水平。

综合来看, 学术界对电网韧性的研究主要按照阶段分为三个方向: 一是灾情发生前, 电网自身对于极端和突发情况的主动预判和积极预备能力, 避免灾后电网因遭受冲击无法工作; 二是灾情发生时, 电网自身的鲁棒性, 即遭受剧烈扰动时的稳定性和防御力; 三是灾情发生后电网能够快速自我恢复正常运作, 并且能够通过自我学习进一步提升韧性。

2.2 配电网韧性的评价指标及方法

仅定义配电网韧性的概念是远远不够的, 还需要一套方法体系来度量配电网韧性强弱, 需要设定某些量化指标去评判在极端自然灾害情况下配电网能够维持稳定的能力, 能够抵抗因灾害导致电力输送中断的能力, 能够在灾后迅速调整恢复

性能的能力。对此国内外有许多学者都提出了合理的模型来评价电网在各个阶段的应急性能表现。Nan等^[17]提出了一种评估电力系统韧性的定量方法。该方法由两个部分组成: 用于系统韧性量化的集成度量和用于表示基础设施系统故障行为的多层混合建模方法。并提出了多层混合建模方法的系统程序, 将该方法的应用到多个基础设施上, 扩展韧性度量以考虑系统功能以及系统拓扑。另外还研究和讨论了系统之间的相互依赖性对韧性的影响, 最后比较和讨论了韧性和性能指标。肖智文等^[18]在借鉴Nan等^[17]工作的基础上, 提出了针对电网韧性能力的量化指数, 从配电网在灾前预防和准备阶段的吸收力, 受到灾害影响后响应阶段的适应力, 和灾后迅速恢复阶段的恢复力三个角度定义了韧性评价指数, 并给出计算公式。许寅等^[19]提出了一个包含系统定义、韧性目标设定、脆弱性分析、利益相关者参与等因素的韧性分析框架和测量韧性标准。根据系统功能曲线定义的韧性因子、在不同类型事件下的系统脆弱性函数、考虑专家或利益相关者对事件发生的可能性持有不同意见的程度参数, 结合极端事件发生的概率, 建立权重熵的韧性标准。Poudel等^[20]提出了一种概率指标来量化配电网系统对高影响-低概率事件的韧性, 然后定义两种基于风险的度量, 对于超出预先指定的风险阈值的事件, 分别将韧性测量作为最大能量损失和能量损失的条件期望。Negnevitsky等^[21]提出了用于分析风力发电高渗透下的电力系统安全运行的风险评估方法, 包括对电压过载和频率响应充分性的评估等。Xu等^[22]建立了一个在线进行针对可预见干扰的动态安全评估体系, 并在足够短的时间内提供安全监控结果, 以保证电力系统的动态安全性。

3 配电网韧性优化模型

到目前为止, 韧性提升措施一般被分为两种: 一是通过一些手段增强配电网在灾害来临时的抵

抗力,使得电网系统一直能保持正常运行。Wang等^[23]从加固和增强韧性两个角度,按照不同灾害种类和时间顺序,列举了现有提升配电网韧性的措施(图2),其中预设应急发电机组、升级和将现有线路埋到地下、部署传感器和控制系统及植被管理等措施比较常见。近年来,分布式发电^[24, 25]、微电网集成^[26, 27]等技术也被越来越多地运用。二是对灾害进行预测,获取灾害来临的时间、地点和强度等最新信息,提前部署人力和应急物资,尽可能降低灾害对人们正常生活产生的不利影响^[28]。

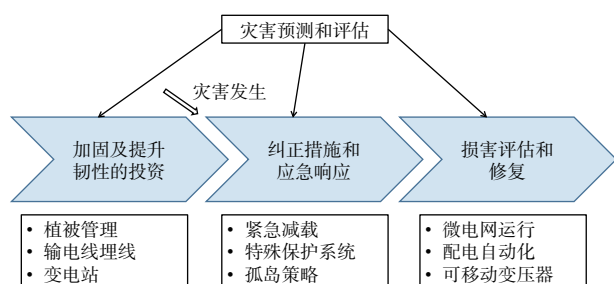


图2 自然灾害下配电网韧性提升措施

Figure 2 Timeline of the response in electric grid under natural disasters

3.1 配电网加固模型

此类模型一般都是寻求最为经济,且减负荷最小的加固策略。决策变量一般为是否加固特定线路、是否在特殊节点配备分布式发电机等,除此之外还包括各台机组功率以及各条线路开关状态等。模型的约束条件则包括以下几点:

(1) 运行约束。主要分为系统的运行约束和关键元器件的运行约束以保证整个系统能够正常运行。以肖智文等^[18]的工作为例,他们提出的微电网日前优化调度数学模型中的约束条件包括维持系统功率实时平衡、可控机组功率的上下限及其最小运行和停运时间、可控机组运行状态指示变量、储能电池充放电状态及功率、微电网与大电网联络线的交换功率等。

(2) 拓扑约束。在恢复电网运行过程中,需要保证电网的拓扑保持辐射状。

(3) 能量约束。灾害发生后,各类电源能够提供的剩余能量有限,对于储能类电源来说,需

要将其荷电状态维持在一定范围内。比如考虑储能电池的容量约束需要控制其在荷电状态最值区间内。

(4) 暂态约束。在恢复过程中,每个微电网内部必须保持频率和电压稳定性,且发电机机端的暂态电压、暂态电流、系统暂态频率在开关操作过程中均需要维持在设定范围内。

Ma等^[29]从灾前预防措施的角度提出将配电网元件强度提升、植被管理综合韧性提升策略,模型先识别易受损线路进行强化,根据负荷优先级及故障线路设置减少成本和极端天气造成的损失。Parast等^[30]为提高系统韧性,考虑上游电网中断导致应急持续时间不确定性,提出了一个考虑直流混合微电网的基于场景的线性两阶段模型。Yuan等^[31]考虑飓风不确定性,建立了防御-攻击-防御的三阶段模型来给出分布式发电机调度方案。Wang等^[32]则从长期经济和环境成本出发,建立了两阶段模型调度分布式发电机。Wang等^[33]建立了以线路硬化和多岛临时微电网为目标的三级优化模型,以提高配电网的韧性。

3.2 灾害预测模型

为了进一步减小灾害对配电网带来的损失,灾害预测也是必不可少的环节。根据灾害的不同类型,探究灾害来临的原因、时间周期、规模程度和对配电网可能造成的威胁。使电厂、调度中心能够提前做出规划,尽量降低灾害导致的停电事件带来的损失。

Wang等^[23]介绍了多种极端自然灾害的发生频率和对电网的造成的威胁。吴勇军等^[34]探究了台风与电网故障之间的时空分布特性,并对此进行分析和建模。何俊等^[35]应用态势感知技术,对环境状态和电网运行状态等信息进行收集,据此进行电网受灾模拟,利用分布式电源出力预测、台风风险预测等,进行电网安全风险评估与预警,提出重点区域电网内分布式电源、储能等参与的负荷供电保障策略。另有杨祺铭等^[36]和杜诗嘉等^[37]研究台风灾害背景下的配电网韧性增强策略。马天男^[38]考虑覆冰对配电网的不利影响,采用大数据分析

工具与处理平台对大规模异构性覆冰数据进行了分析, 研究了输电线路的覆冰增长规律, 构建了覆冰预测模型。

然而, 由于极端自然灾害发生的不确定性, 传统的、确定参数的凸优化模型无法精确地给出预测信息。不确定性使得传统优化模型的最优解在不确定环境中不再是最优, 甚至有可能成为非可行解。对此, Dantzig^[39]提出随机规划的概念, 根据不同的决策规则, 将随机规划分为期望模型、机会约束规划模型和相关机会约束规划模型。赵天阳等^[40]针对飓风来临前路径的不确定性, 使用蒙特卡洛模拟离散故障集合。但随机规划模型都假定随机参数的概率分布是已知的, 在实际工程运用中, 要得到随机参数的真实分布情况十分困难, 因为一是需要大量的历史数据来分析推测出参数的分布, 这些数据常常难以获得和整理, 二是灾害的形成和发展受到气候、地形等多个条件的影响, 仅用概率理论或数学模型很难精确刻画不确定性。因此Boyd等^[41]提出用鲁棒优化的思想来解决线性规划问题中的不确定性, 为不确定优化问题开辟了新的方向。Mulvey等^[42]在1995年提出鲁棒优化的概念, 通过将目标函数拆分为聚合函数与罚函数来消除不确定参数对结果的影响。鲁棒优化在建模过程中充分考虑了不确定性, 并以集合的形式对变量进行描述, 无需考虑不确定参数的分布模型, 只要不确定参数在集合内, 所求出的解就都能满足约束条件。在此之后, Ben-Tal等^[43]和El Ghaoui等^[44]为鲁棒优化进一步奠定基础, 这种方法避免了有关数据处理的大量工作, 同时也使得解相对保守。邓鹏华等^[45]对以上提出的鲁棒优化模型做了总结归纳。

3.3 考虑风电出力不确定性的配电网韧性模型

目前可再生能源利用逐步广泛, 正在快速从补充能源转变到主要能源。与传统的发电系统相比, 可再生能源电力系统中的电池等储能系统可以储存一定能量, 在紧急情况下使用可以确保重要节点正常工作。可再生能源和电池存储设备可以进行合理的空间分布, 从而在极端事件到来,

配电网瘫痪的情况下提供电能。而在所有可再生能源中, 风力作为取之不尽用之不竭的能源, 其应用范围广, 并且现今风力发电技术较为成熟, 正在逐步成为主要的可再生清洁能源。然而风电出力不同于火电机组出力的稳定性和连续可调性, 它受到风速、风向等因素波动性和间歇性的影响, 频繁的波动变化给系统的电力电量平衡造成很大困扰。针对风电运行的特性, 保证电力系统的可靠性并有效利用可再生能源, 最有效直接的方法就是在电源侧加入储能系统来平抑风电功率的波动, 补偿风力、风速的变化带来的负面影响。Sun等^[46]总结了目前现有的储能系统, 例如电池储能、超级电容器、抽水储能、压缩空气储能及电转器等方式, 将风力发电转换为其他形式, 促进风电消纳, 减少弃风。赵燃等^[47]引入先进绝热压缩空气储能电站(AA-CAES)来将空气压缩热储存起来, 减少弃风。

然而仅引入储能装置还不足以完全提高预测精确度, 各国学者投入研究, 利用各类数学工具提出建模方法、以求解出更为精确的风电出力预测值, 确保电力部门的日前调度计划更为可靠。在刻画风电不确定性模型的方法上, 主要有模糊隶属度函数、场景集分析、鲁棒不确定集、分布鲁棒不确定集(DRO)以及人工智能算法等方法^[48]。

(1) 模糊优化方法利用隶属度函数可以直观地表征风电功率不确定性。高斯型、升半梯形、降半梯形等梯形隶属度函数均已被用来描述风电功率的不确定性。马瑞等^[49]总结了风电场实测风速, 利用极大似然法挖掘形状参数 k 和尺度参数 c 的模糊隶属函数特征, 并在一定置信区间内定义其边界; 依据不确定理论, 定义风速为随机模糊变量且获取其机会测度分布函数, 从而建立了日风速不确定模型。张治等^[50]在数据采样得到具有代表性的风速场景和其风电出力值后, 选用模糊 c 均值聚类算法将获得的大量风电出力值缩减, 得到更小的风电出力区间。

(2) 目前国内外学者利用场景集处理风电不确定性的方法主要分为三类: 一是利用风电功率历史数据, 拟合生成风电功率概率分布模型, 目

前常被用来描述其概率分布的函数主要有高斯分布、柯西分布、Laplace分布等。在概率分布模型的基础上直接抽样生成不同场景,再集合多个典型场景,形成场景集。不过该类场景法依赖于风电功率概率分布函数的选取,而风电功率波动的规律性因地制宜且难以捕获,目前无法用一个已知的分布函数表征所有的风电概率分布。二是利用已采集的风速历史数据生成风速概率分布模型或累计概率分布模型,再依据风速与风电功率的关系构造风电功率概率分布函数。常见的风速概率分布函数主要有beta分布、Weibull分布。由于风速并非是影响风电出力的唯一决定性因素,因此该类场景生成法精度不足,适用于新建风电场初期,风电功率历史数据不足情况下的优化调度问题。三是基于风电功率概率区间预测结果,利用不同分位数下的预测区间或不同概率置信区间下的均方根预测误差来表征风电功率的不确定性;该类场景生成法需事先假定风电功率预测误差的概率分布函数,一般情况下,风电功率预测误差的概率分布与风电功率概率分布具有相同的分布函数集。需要提到的是,利用场景集需要大量的数据支持,并且大量场景会导致目标求解更为复杂、时间更长。因此有必要对场景集进行降维处理。张俊涛等^[51]为表征新能源出力不确定性,提出一种耦合分位点回归理论和降维聚类技术的新能源组合出力场景集生成方法,利用历史统计信息将新能源出力由确定性预测序列转化为出力场景集。张治等^[50]在蒙特卡洛采样的基础上,利用拉丁超立方采样技术,获得大量具有代表性的风速场景样本,得到风电出力之后再对数据做进一步处理。简约场景的方法虽然能降低计算复杂度、加快求解时间,但由于它删除了一些场景集,就会降低优化模型的求解精度。

(3) 鲁棒不确定集将风电出力的预测值描述为一个有界的闭区间,依据不确定集的构造可分为盒式、多面体、椭球不确定集,为了更直观地表征风电波动情况,基数不确定集也经常被应用。刘一欣等^[52-54]从所研究区域各时段的长期统计数据得到风电出力的基准值和边界值,构建出可

再生能源出力的盒式不确定集。赵燃等^[47]基于极限场景法,引入风电极限场景下的实际发电与预测值的比例系数 β ,构建风电预测的盒式不确定集。盒式不确定集的优化结果较为保守,并且没有考虑不确定参数之间的相关关系,而椭球不确定集可以较好地解决风电功率不确定参数的时空特性。税月等^[55]通过获取关于不确定性参数的历史数据,结合1-范数和无穷范数作为约束条件构建了不确定性分布置信范围来给出电气能源系统优化调度决策方案。周浩洁等^[56]先将多风电场的预测误差进行聚类,根据聚类结果推导出为由多个椭球不确定集的并集组成的风电预测误差不确定集。刘明等^[57]引入一个基于矩信息的椭球式模糊集,但这种方法会大大增加原优化模型的求解难度,难以直接求取预测值。

(4) 分布鲁棒不确定集(DRO)用来构造含有全部风电功率概率分布信息的模糊集。DRO的概率分布模糊集主要依据概率分布信息和矩信息进行分类。其中,基于概率分布信息的DRO不确定集可分为基于多离散场景、分布函数距离两类。常见的分布函数距离为KL散度和Wasserstein距离。基于矩信息的DRO不确定集可以分为基于确定矩和不确定矩两类;这种不确定集不需事先假设风电功率概率分布函数,而是依据一阶矩和二阶矩信息构造不确定集,可以避免因风电功率概率分布函数选取不当所产生的偏差。杨立滨等^[58]根据历史数据构造风电出力的经验分布函数,为考虑风电出力的不确定性,以KL散度作为分布函数距离测度建立了风电出力的概率分布函数集合。然而这种不确定集构造复杂,求解起来十分困难。施云辉等^[59]基于狄利克雷过程高斯混合模型对风电预测误差进行聚类,建立了数据驱动的风电预测误差模糊集,并进一步建立了考虑风电场间风电预测误差相关性的不确定集。李运龙等^[60]使用主元分析方法构建基于矩的分布鲁棒多区域电网经济调度模型的降维模糊集。该类DRO不确定集的矩信息需依据风电功率历史数据获取,历史数据的样本数量和完整性对矩信息有重要影响,因此矩信息亦存在不确定性,虽然可以进一步考虑矩信

息不确定性, 但计及风电功率不确定性优化调度周期一般日前的24 h, 甚至于更短的4 h或实时运行, 而短期内的风电功率概率分布情景可能与利用长期历史数据矩信息所生成的概率分布情况相差甚远, 所以此类方法更适合长期预测工作。

(5) 随着人工智能算法在电力系统中的应用, 利用卷积神经网络、生成对抗网络等深度学习技术, 在处理大样本量和非线性数据时具有更好的表现。Sun等^[46]针对风电预测中的不确定性, 提出了自适应置信区间的概念, 利用支持向量机, 开发了基于确定性风电预测和ACCI的概率风电区间预测模型来解决这个问题。王永生等^[61]提出基于时间滑动窗口数据集构建LSTM深度学习模型, 对融合风电历史功率数据和历史气象数据等多元数据进行一系列清洗、降维及离散化等处理, 用时间滑动窗口构建风电时序数据集, 提取风电输出功率的时间周期特性, 使用LSTM网络结构构建深度网络模型, 进行风电短期输出功率预测。朱尤成等^[62]收集了来自四个风电场的特征数据, 使用关联结构函数构造了一种提取气象特征的方法, 使模型可以在一定程度上量化气象因素和风力发电之间的相关性; 他们基于神经网络模型提出一种特征表示与融合方法, 以有效表达风电场气象因素、地理位置等特征; 最后提出了一种基于LSTM网络的中长期发电量预测模型。

4 配电网韧性优化模型求解方法

由于基于电网韧性的数学模型中包含大量0-1变量, 如各个负荷恢复与否、元器件运行与否、线路开合等变量, 因此此类问题都属于NP组合问题, 另外, 实际的配电网一般需要考虑三相不对称潮流等式约束, 这是非线性等式约束, 属于非凸优化, 较难求解。因此在故障恢复问题求解方法上, 国内外学者提出了多种启发式算法、多代理系统、元启发式算法(包括遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等)和数学规划方法等。针对这种情况, 一般分为两种处理方法: 一是基于启发式思想将问题解耦, 简化模型只考虑简单易解出

的约束, 找出优化方案的集合, 然后再利用潮流检验的方式选出可行解, 再设计算法求出最优解。二是使用数学建立模型规划, 基于凸优化理论综合考虑目标函数以及约束条件, 将非线性的约束条件线性化, 使之具有可解性, 再使用优化求解器直接给出问题的全局最优解。以上两种处理方法都是将复杂的模型抽象简化成计算机或求解器可解的形式, 虽然可以得到最优解, 但由于舍弃了一些具有逻辑意义的约束条件, 所得到的最优解可能就不再满足原问题的所有约束和要求。传统单一的方法已经无法满足现实需求。随着计算机技术的更新与飞速发展, 以及对此类问题更为深入的研究与探索, 对于增强电网韧性的研究逐渐向传统数学建模与机器学习等结合的方向发展。

Ma等^[29]在传统微电网优化调度模型的基础上, 分析了模型驱动的建模求解方法的难点和局限性, 接着提出了基于深度学习双向长短期记忆网络的模型和方法。丁浩等^[63]采用有效集算法, 又使用NSGA-II多目标算法与他们的研究方法进行了性能等方面的比较。Sun等^[46]采用基于混沌正弦映射多目标优化蝙蝠算法(CSMOBA)和模糊理论集的两步求解方法实现多目标优化调度问题求解。姜萌萌等^[64]从孤岛划分和剩余网络重构两个角度对故障后的网络进行优化重构。为保证配电网的辐射结构, 首先采用基于生成树的蚁群算法得到可行的网络集, 再利用帕累托最优遗传算法对可行网络中的DG出力进行优化。闫冬等^[65]在设计配电网拓扑状态表征和决策动作规则支撑组合优化后, 利用改进指针网络结构配合深度强化学习算法实现了适用于多类故障恢复策略的模型自学习和端到端计算。郁琛等^[66]在建立考虑交通网影响的配电网抢修模型后采用分层智能算法求解。上层模拟退火算法主要解决车辆路径搜索问题和人员物资调度策略, 下层解决配电网网架重构和孤岛划分问题。

本文将着重介绍Benders分解算法和列约束生成算法这两种求解考虑不确定性的鲁棒优化问题模型的算法。

4.1 Benders分解算法

Benders分解算法^[67]是由Benders于1962年提出的, 他将线性规划问题分解为小规模子问题, 通过迭代求解主问题和子问题, 逐步逼近原问题的最优解, 可以理解为一种行生成技巧。Bertsimas等^[68]将此算法应用在求解其所提出的模型中, 第一阶段找到一个最优的承诺决策, 第二阶段在固定承诺解决方案下寻找最坏情况下的调度成本。

4.2 列约束生成算法

列约束生成算法是Zeng等^[69]在2013年提出的解决两阶段鲁棒优化问题的一种有效的算法。是将min-max-min问题转化为包含主问题和子问题的双层优化问题, 利用主子问题交替迭代求解出最优解。与现有的Benders切割平面方法相比, 列约束生成算法在求解主问题的过程中不断引入与子问题相关的变量和约束, 可以获得更加紧凑的原目标函数值下界, 是一种更为通用过程, 具有统一的方法来处理最优性和可行性, 它的算法原理能够有效降低迭代次数, 对两阶段鲁棒位置传输问题的计算执行速度要比Benders分解算法快一个数量级, 因此得到广泛使用。

刘一欣等^[52]在搭建完两阶段鲁棒优化模型后, 运用上述方法进行求解。求解出微电网能够在“最恶劣”场景下系统运行成本最小的调度方案。税月等^[55]将两阶段模型分为主问题和子问题进行反复迭代求解。其中主问题在已知的恶劣概率分布下求解满足约束条件的最优解, 进行综合系统的日前调度, 子问题在主问题给定的变量下, 寻找实时运行下的最恶劣概率分布, 并返回给主问题以供下一次迭代使用。

5 结论

本文针对现有的关于极端自然灾害下配电网韧性的研究进行了总结和分析。目前对“电网韧性”的定义和评价体系已经逐步建立起来了。国内外各个学者根据灾害来临的不同阶段, 提出加固线

路、调配可移动式应急发电设备、形成孤岛微电网等策略来确保配电网快速恢复供电。以最小化经济损失、最小化减负荷损失、最小化装备运输路径与时间等为目标, 使用随机规划、鲁棒优化等方法建立模型。与此同时, 对于此类混合整数规划问题, 机器学习等技术与传统数学方法相结合, 使得问题求解更加快速、精确。但是关于提升配电网韧性的研究工作还有待进一步开展。

(1) 配电网韧性水平的评价指标与评估方法还不够完善。现有的研究在构建评价指标体系时忽略了韧性动态、多阶段的特征, 不能全面有效地表征配电网应对自然灾害时的抵御、响应和恢复能力。使得提升配电网韧性措施的有效性和合理性难以被量化评判。可以针对灾害发生的时段(灾前、灾中、灾后)、灾害发生的区域(如台风发生的内外圈), 以及灾害对不同类型的电力设备造成的影响等建立多角度的配电网韧性评价体系。

(2) 常见的极端自然灾害有地震、台风、冰冻雨雪灾害等, 每种灾害所对应的配电网保护措施也不尽相同, 今后的研究可以更加具有针对性, 在进行灾害场景模拟时分类论之, 而非等量齐观。

(3) 现有对于配电网韧性提升的研究还是集中在以火力发电为主的角度, 对于考虑风电等可再生能源的不确定性的配电网优化研究也是建立在日常配电网正常运转的基础上, 很少有结合其不确定性和配电网韧性提升的研究。在“双碳”的实际背景下, 考虑风电不确定性的配电网韧性提升具有现实意义。

(4) 对于灾害的提前预警的方法上, 尽管国内外学者都对此做出努力, 积极探索更为精确的预测方法, 但是在预测精度上还是有很大的提升空间。准确预测灾害将会造成的不利影响, 有利于机组有效系统扩容规划及优化调度, 降低电力系统的运行成本。也能更好的保证城市基础设施设备正常运转, 居民正常生活不受影响。传统的单一数学模型已经难以满足预测需求, 随着计算机技术的发展, 人工智能算法在处理大量且非线性数据上具有更好的表现, 今后的研究可以结合此类算法进行更深入的研究。

参考文献

- [1] 苏才普. 智能电网研究现状[J]. 电气开关, 2015, 53(1): 1-4.
- [2] 胡天羽. 浅析智能电网现状及发展趋势[J]. 集成电路应用, 2018, 35(4): 82-84.
- [3] 梁志峰, 葛睿, 董昱, 等. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及对我国电网调度运行工作的启示[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1841-1848.
- [4] 李保杰, 刘岩, 李洪杰, 等. 从乌克兰停电事故看电力信息系统安全问题[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 71-77.
- [5] 陈鹏云, 王羽, 文习山, 等. 低温雨雪冰冻灾害对我国电网损毁性影响概述[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 135-139.
- [6] 薛禹胜, 肖世杰. 综合防御高风险的小概率事件: 对日本相继天灾引发大停电及核泄漏事件的思考[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 1-11.
- [7] 陈小伟. 台风引起的500 kV输电线路杆塔倒塔分析[J]. 福建建筑, 2017(8): 99-102.
- [8] 谷炜, 朱炳铨, 沈绍斐, 等. 超强台风“利奇马”调度应急处置经验及启示[J]. 浙江电力, 2020, 39(8): 35-41.
- [9] U. S. Department of Energy. 2009 Smart Grid System Report[R]. Washington D. C.: U. S. Department of Energy, 2009.
- [10] The White House. Presidential Policy Directive (PDD)-21: Critical Infrastructure Security and Resilience[R]. Washington, D.C.: The White House, 2013.
- [11] Ouyang M, Dueñas-Osorio L. Multi-dimensional hurricane resilience assessment of electric power systems[J]. *Structural Safety*, 2014, 48: 15-24.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Nan C, Sansavini G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 157: 35-53.
- [18] 肖智文, 王国庆, 朱建明, 等. 面向突发事件的电网韧性能力评价及构建方法[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(10): 2637-2645.
- [19] 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.
- [20] Poudel S, Dubey A, Bose A. Risk-based probabilistic quantification of power distribution system operational resilience[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(3): 3506-3517.
- [21] Negnevitsky M, Nguyen D H, Piekutowski M. Risk assessment for power system operation planning with high wind power penetration[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(3): 1359-1368.
- [22] Xu Y, Dong Z Y, Xu Z, et al. An intelligent dynamic security assessment framework for power systems with wind power[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(4): 995-1003.
- [23] Wang Y, Chen C, Wang J, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters—A review[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(2): 1604-1613.
- [24] Hang Y, Youbo L, Qiang L, et al. Resilience operation strategy for AC/DC distribution network by coordinating distributed energy storage and VSC[C]//The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2020). Online Conference. IET : 467-474.
- [25] 王丽, 刘斌. 氢能源汽车的关键技术分析对策探讨[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2017, 9(5): 439-445.
- [26] Li Z, Shahidehpour M, Aminifar F, et al. Networked microgrids for enhancing the power system resilience[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(7): 1289-1310.
- [27] Hussain A, Bui V H, Kim H M. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience[J]. *Applied Energy*, 2019, 240: 56-72.
- [28] 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.
- [29] Ma S, Chen B, Wang Z. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 1442-1451.
- [30] Parast M E, Nazari M H, Hosseini S H. Enhancing the resilience of hybrid microgrids by minimizing the maximum relative regret in two-stage stochastic scheduling[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 66198-66212.
- [31] Yuan W, Wang J, Qiu F, et al. Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(6): 2817-2826.

- [32] Wang Z, Chen B, Wang J, et al. Robust optimization based optimal DG placement in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(5): 2173-2182.
- [33] Wang X, Li Z, Shahidehpour M, et al. Robust line hardening strategies for improving the resilience of distribution systems with variable renewable resources[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(1): 386-395.
- [34] 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.
- [35] 何俊, 于华, 邓长虹, 等. 极端天气下基于态势感知的重点区域电网负荷供电保障策略[J]. *高电压技术*, 2022, 48(4): 1277-1285.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 马天男. 基于大数据的电网覆冰灾害预测与风险管理研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- [39] Dantzig G B. Linear programming under uncertainty[J]. *Management Science*, 1955, 1(3-4): 197-206.
- [40] 赵天阳, 张华君, 徐岩, 等. 不确定环境下含云计算数据中心的电网韧性增强调度[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(3): 49-57.
- [41] Boyd S, Vandenberghe L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [42] Mulvey J M, Vanderbei R J, Zenios S A. Robust optimization of large-scale systems[J]. *Operations Research*, 1995, 43(2): 264-281.
- [43] Ben-Tal A, Nemirovski A. Robust convex optimization[J]. *Mathematics of Operations Research*, 1998, 23(4): 769-805.
- [44] El Ghaoui L, Lebret H. Robust solutions to least-squares problems with uncertain data[J]. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, 1997, 18(4): 1035-1064.
- [45] 邓鹏华, 刘颖, 毕义明, 等. 鲁棒线性优化问题研究综述[J]. *控制与决策*, 2009, 24(8): 1121-1125, 1131.
- [46] Sun S, Wang C, Wang Y, et al. Multi-objective optimization dispatching of a micro-grid considering uncertainty in wind power forecasting[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 2859-2874.
- [47] 赵燃, 杨建, 宋冬然, 等. 考虑风电不确定性的风火储能系统鲁棒优化调度研究[C]//2021中国自动化大会论文集, 2021: 489-494.
- [48] 杜刚, 赵冬梅, 刘鑫. 计及风电不确定性优化调度研究综述[J/OL]. (2022-03-23). 中国电机工程学报: 1-21. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220322.1831.019.html>.
- [49] 马瑞, 张强, 吴瑕, 等. 日风速随机模糊不确定模型[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(24): 6351-6358.
- [50] 张治, 董润楠, 魏振华, 等. 考虑风电不确定性和旋转备用容量配置的综合能源系统鲁棒机会约束优化[J]. *热力发电*, 2022, 51(6): 25-33.
- [51] 张俊涛, 程春田, 申建建, 等. 考虑风光不确定性的按比例可再生能源电网短期联合优化调度方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(18): 5921-5932.
- [52] 刘一欣, 郭力, 王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(14): 4013-4022, 4307.
- [53] 向月, 刘俊勇, 魏震波, 等. 考虑可再生能源出力不确定性的微电网能量优化鲁棒模型[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(19): 3063-3072.
- [54] 宋靓云. 考虑风电不确定性的风储联合系统分布鲁棒优化调度[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
- [55] 税月, 刘俊勇, 高红均, 等. 考虑风电不确定性的电气能源系统两阶段分布鲁棒协同调度[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(13): 43-50, 75.
- [56] 周浩浩, 吴任博, 马云飞, 等. 考虑风电不确定性的电-气能源系统数据驱动鲁棒优化调度[J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 3752-3761.
- [57] 刘明, 曾成碧, 苗虹. 考虑风电不确定性的分布鲁棒机会约束机组组合模型[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(2): 51-57.
- [58] 杨立滨, 曹阳, 魏鞞, 等. 计及风电不确定性和弃风率约束的风电场储能容量配置方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(16): 45-52.
- [59] 施云辉, 王棣裕, 陈玮, 等. 基于风电预测误差聚类的分布鲁棒含储能机组组合[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(22): 3-12, 121.
- [60] 李运龙, 李志刚, 郑杰辉. 考虑风电不确定性和相关性的多区域电网分布鲁棒经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(8): 97-104.
- [61] 王永生. 基于深度学习的短期风电输出功率预测研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [62] 朱尤成, 王金荣, 徐坚. 基于深度学习的中长期风电发电量预测方法[J]. *广东电力*, 2021, 34(6): 72-78.
- [63] 丁浩, 高峰, 刘坤, 等. 基于鲁棒优化的含风电工业微电网经济调度模型[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(17): 160-167.
- [64] 姜萌萌, 佟永吉, 陈明丰, 等. 基于灾害条件的主动配电网快速重构策略研究[J]. *智慧电力*, 2021, 49(5): 85-92.
- [65] 闫冬, 彭国政, 高海龙, 等. 基于深度强化学习组合优化的配电网拓扑控制研究[J]. *电网技术*, 2022, 46(7): 2547-2554.
- [66] 郁琛, 李尚轩, 谢云云, 等. 考虑交通网与配电网信息融合的台风后配电网抢修策略优化[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(4): 15-24.
- [67] Benders J F. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems[J]. *Numerische Mathematik*, 1962, 4(1): 238-252.
- [68] Bertsimas D, Litvinov E, Sun X A, et al. Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(1): 52-63.
- [69] Zeng B, Zhao L. Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method[J]. *Operations Research Letters*, 2013, 41(5): 457-461.

Research Progress about Power Grid Resilience Improvement Models under Extreme Natural Disasters

Shen Yutong¹, Wang Guoqing^{1*}, Yu Lei²

1. *School of Engineering Science, University Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

2. *Qiqihar North Depot, Qiqihar 161099, China*

Abstract: In recent years, the frequency of natural disasters has considerably increased; such disasters cause serious damage to power grids and threaten their safe operation. Therefore, maintaining a safe and stable distribution network has emerged as an important research direction. In this regard, researchers have proposed the concept of “resilient power grids”. In this paper, a definition of “resilience” is introduced, and quantitative indicators and evaluation methods of resilience are presented. Furthermore, measures to improve the resilience of a distribution network are summarized, along with the constraints on the modeling of distribution network resilience. This study considers the uncertainty of wind power outputs and summarizes the methods adopted for processing and modeling the uncertainty in wind power. Finally, two algorithms for solving uncertainty problems are presented, and recommendations are provided to improve the resilience of power grids.

Keywords: distribution networks resilience; robust optimization; multi-objective optimization; stochastic programming