基于地震灾害场景的主动配电网多维韧性评估方法

符 杨1,顾吉平1,田书欣1,米 阳1,刘 舒2

(1. 上海电力大学 电气工程学院,上海 200090;2. 国网上海市电力公司电力科学研究院,上海 200437)

摘要:为了分析主动配电网承受破坏性扰动事件以及快速恢复重要负荷的韧性支撑能力,融合相量测量单元 (PMU)高精度动态感知能力提出了一种新的以地震灾害场景为背景的主动配电网多维韧性评估方法。阐述 了配电网韧性的基本概念及特征,并将地震作为极端事件代表,构建了反映配电线路故障率与地震动峰值加 速度加权均值的模型,继而采用非序贯蒙特卡罗抽样和K-means++聚类算法筛选出代表性的地震场景;基于 系统配置的PMU的强感知力建立反映韧性电网应变力、防御力、恢复力和协同力的评估指标,形成韧性多维 特征空间,进而利用事件集点簇中心与最优韧性点的加权欧氏距离评估系统多维综合韧性;分析增强电力线 路强度、提高联合系统中分布式电源可供容量这2种措施对系统韧性提升的影响,挖掘韧性电网对抗震防灾 的学习力。最后,通过改进的PC&E69系统验证所提方法的有效性和准确性。

关键词:主动配电网;地震灾害;韧性评估;K-means++聚类;韧性多维特征空间

中图分类号:TM727;TM712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202208024

0 引言

随着超高渗透率分布式电源(distributed generation, DG)、电力电子技术、可控负荷等可控资源的 接入,配电网逐步由被动形态转变为主动配电网 (active distribution network, ADN)形态。ADN位于 电网末端,与用户密切相关,与输电网相比,其抵御 能力更脆弱,抗震性能更差,在地震灾害下的故障建 模分析也较少。2008年在汶川发生的8.0级大地 震,全域范围导致停运的电力线路共计35900多条、 变电站1700多座,直接经济损失超过120亿元。在 此背景下,对ADN遭受地震影响的韧性研究已经越 来越受到国内外学者的关注。

对于极端事件下电力系统性能仿真,现有研究 较多采用信息熵、模拟采样等方法。文献[1]采用信 息熵的理论对极端灾害场景进行选取,确定灾害可 能导致的故障规模;文献[2]利用切片采样的场景生 成方法形成灾后的新能源和负荷的典型场景。然 而,地震灾害下电网韧性评估方法的相关研究还处 于起步阶段,其中输电网的韧性主要体现在电力公 司角度的摧不垮、毁不烂,而配电网的韧性更多体现 在供电用户角度的安全可靠不停电。现有的配电网

收稿日期:2022-01-24;修回日期:2022-05-10 在线出版日期:2022-08-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902800);国家 自然科学基金资助项目(52007112);国家电网有限公司科技 项目(52094019006X)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902800), the National Natural Science Foundation of China(52007112) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52094019006X)

韧性评估方法主要有模拟法[34]和理论推演分析法[5] 这2类。基于模拟法的韧性评估方法可以与各类极 端事件场景相匹配,且能简便地得出系统受灾后的 韧性水平,如潮流计算模拟^[3]、网络模型模拟^[4]等; 理论推演分析法常利用特定场景下配电网元件的故 障率进行韧性分析,如文献[5]将韧性定义为电力系 统在台风灾害导致基础设施故障的情况下完成故障 设备恢复的期望概率。在以地震为代表的极端灾害 背景下的电网韧性评估、提升方面,文献[6]利用杆 塔结构的可靠度来量化线路故障率,并计及地震的 传播性评估了各个地震强度下电力系统的韧性,但 建模较为简单,结果误差较大;文献[7]从鲁棒性、快 速性和冗余性3个方面提出地震灾害场景下海岛能 源系统的韧性评估指标,根据评估结果明确存在的 薄弱环节并进行优化提升,但仿真场景单一,没有考 虑震级、震源的不确定性。以上方法虽然可以从单 一侧重点出发对电网的韧性水平进行评估,但没有 对韧性电网的多维核心特征展开全面的分析。

因此,本文首先引入配电网韧性的概念,阐述韧性的核心特征及其与可靠性、运行韧性的区别,并将地震作为极端事件的代表,建立ADN的线路故障率与峰值加速度(peak ground acceleration,PGA)加权均值间的联系;其次,采用非序贯蒙特卡罗方法模拟抽样生成极端事件场景,并使用*K*-means++聚类算法对场景进行针对性筛选,平衡评估效率和计算精度;然后,基于ADN已配置的相量测量单元(phasor measurement unit,PMU)所代表的高精度动态感知能力,提出ADN抵御率 R_{DR} 、孤岛支撑力 R_{IS} 、重要负荷电量缺供率 R_{ESRCL} 和联络线转供覆盖率 R_{TTC} 这4个维度的指标,同时覆盖韧性电网的感知力、应变力、防御力、恢复力和协同力5个维度的关键特征,以此

在所构建的韧性多维特征空间(multidimensional feature space, MFS)中通过衡量各场景点簇中心与最优韧性点的G1-云理论加权欧氏距离进行系统多维综合韧性评估,进而提出增强电力线路强度、提升联合系统中DG可供容量这2种提升ADN韧性的措施;最后,通过改进的PG&E69系统验证了所提韧性评估方法的有效性,并对比分析了采取措施前后系统韧性水平的变化。

1 韧性概念及地震灾害场景生成

1.1 韧性的基本概念

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。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。在配电网中,其韧性是指能够全面、快速、 准确感知配电网运行态势,协同配电网内外部资源, 对各类扰动进行主动预判与积极预备,主动防御并 快速恢复重要电力负荷的一种能力。一般具备应变 力、防御力、恢复力、感知力、协同力和学习力六大关 键特征^[8]。现有研究展示的电网韧性通常涵盖运行 韧性和恢复韧性,配电网韧性框架如图1所示。



图1 配电网韧性分类

Fig.1 Classification of distribution network resilience

运行韧性^[9]侧重于高频率低扰动下电网经济性 能的损失,常使用电压暂降、频率波动等指标描述其 特征;而恢复韧性侧重于强调极端灾害下电网对关 键负荷的支撑、恢复能力。因为本文研究的是极端 灾害事件下 ADN 负荷失电和恢复过程中系统性能 的变化,所以恢复韧性这一概念能契合本文的研究 内容。为方便后续叙述,下文将提及的恢复韧性简 称为韧性。

配电网可靠性主要是指满足用户长时间尺度下的供电需求能力。可靠性不能代替韧性,一个可靠 性很高的配电网,其韧性水平未必高。例如可靠性 很高的系统往往自动化程度很高,可以在很短的时 间内移除故障元件,但极端灾害群发性故障下系统 可能无法完成有效的远程调控,系统负荷在短时间 内大量失电,此时韧性较差。

可靠性、运行韧性、韧性三者从不同角度描述了 配电网的故障状态特点,本文将从概念、时间尺度、 特征指标、故障特点和评价指标这5处特征入手,对 这3个重要指标进行对比分析,明确它们的联系与 区别,以便加深对配电网韧性的理解,具体关系见附 录A表A1。

1.2 地震灾害下元件故障率建模

本文将地震作为极端灾害的代表,分析地震灾 害对配电网元件故障率的影响。若某地区或某系统 元件的脆弱性越大,则其受到极端事件不利影响的 程度就越大。而配电网元件的脆弱性在地震灾害场 景中的量化,主要是线路故障率。配电网线路故障 率建模的目的是为了得到线路在给定地震动强度下 故障率大于或等于某一极限损坏程度的概率。

地震灾害下的配电网破坏包括杆塔倒塌、导线 断线等,为了便于研究,选择可以体现地震动衰减特 性的模型,常用的地震动参数有地震动PGA、地震动 峰值速度(peak ground velocity,PGV)、地震动峰值 位移(peak ground displacement,PGD)、反应谱等。 参考文献[10]进一步研究地震动变化规律,可得到 影响地震动强度的几个基本因素构建的地震动效应 模型,如式(1)所示。

$$Y(f) = F(f)G(f)S(f)$$
(1)

式中:f为震动频率;Y(f)为地震动参数;F(f)、 G(f)、S(f)分别为震级效应函数、震中距效应函数、 场地效应函数。

本文选取PGA作为地震动参数,考虑地震动与 震源能量、震中距路径和场地类型间的关系,对式 (1)各因素进行统筹分析并取对数得到在基岩场地 和土层场地中关于不同震级、震中距的地震动衰减 模型^[10],分别如式(2)和式(3)所示。

 $\lg f_{\rm PGA} = 0.643 + 0.7M - 1.905 \lg (R + 0.327 e^{0.614M}) + 0.19$ (2)

 $\lg f_{\rm PGA} = 1.428 + 0.477M - 1.491 \lg (R + 0.327 e^{0.614M}) + 0.21$ (3)

式中:*M*为地震震级;*R*为震中距;*f*_{PGA}为PGA大小。 式(2)为基岩场地的衰减方程,式(3)为土层场地的 衰减方程。

配电网覆盖区域通常比较小,所处位置的地质 结构基本相同,地质结构差异不作为影响线路故障 率的主要因素。在基于同一系统内线路元件采用相 同型号的前提下,邻近线路在灾中的故障率十分接 近。为了能同时兼顾地震动PGA的准确性和普适 性,并计及配电系统在不同地震灾害强度下的负荷 空间分布,本文提出对应某受灾区域地震动PGA加 权均值的概念,具体定义如下:

$$f_{\overline{\text{PGA}}g} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} f_{\text{PGA}g,i} w_i P_i}{\sum_{i=1}^{N_s} w_i P_i}$$
(4)

式中:f_{PGAg}为受灾区域g地震动PGA的加权均值; f_{PGAg};为受灾区域g内节点i所在位置的PGA;P_i为节 点i处负荷的有功功率;w_i为节点i处负荷的权重系 数;N_g为受灾区域内的负荷节点数。

按照距离震源的远近将受灾的配电系统划分成 多个区域,一般而言在同一灾害下,不计地质结构差 异和复杂因素时,距离震源越远的区域地震动PGA 加权均值越低,线路段被破坏的概率越小,线路故障 率越小,反之则故障率越大。此外按照式(2)和式 (3)所示的地震动强度传播的衰减方程,区域划分是 非均匀的,即越靠近震源的区域划分越密集。基于 负荷加权 free 的配电网分区如图2所示。



图 2 基于负荷加权 f_{PCA} 的配电网分区 Fig.2 Distribution network zoning based on

load weighted $f_{\overline{PCA}}$

目前在地震灾害下构建线路的故障率模型方 面,主要有专家系统打分统计法、实验分析法和理论 分析法这3种方法。其中,理论分析法能通过有限 元方法建模元件结构的力学响应分析得到元件的故 障率,分析结果能与实际灾害结果相近,为本文采用 的方法。

理论分析法常用累计对数正态分布函数^[10],表 达式如下:

$$P_i(D \ge d_i | I = x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi_i s} \exp\left[-\frac{(\ln s - \varepsilon_i)^2}{2\xi_i^2}\right] ds \quad (5)$$

式中:d_i(i=1,2,3,4)表示4种极限损坏状态,分别对 应轻微损坏、中度损坏、重度损坏和完全损坏;s为当 前线路的损坏状态强度;D为线路关于故障状态的 随机变量;I=x表示线路所处位置的地震动强度为x; ε_i、ξ_i分别为极限损坏状态*i*下线路故障率曲线的对 数期望和对数标准差。

因为本文选取的地震动参数 x 为 f_{PEAs},所以式 (5)可以改写为式(6)所示的形式。

$$P_{i}\left(D \ge d_{i} \middle| I = f_{\overline{\text{PGA}}g}\right) = \int_{0}^{f_{\overline{\text{PGA}}g}} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \xi_{i}s} \exp\left[-\frac{(\ln s - \varepsilon_{i})^{2}}{2\xi_{i}^{2}}\right] ds$$
(6)

地震发生时,配电网不同区域线路段受地震影响遭受的损失和故障率不同。首先需计算不同区域 电力线路的 f_{PCA},然后可计算该区域在当前 f_{PCA}下线 路的故障率。假设配电线路是由若干导线和杆塔组成的串联系统,因为导线的低频震动对输入的地震动强度存在解耦作用,所以设定架空导线在灾害中不受地震的影响,配电线路的故障率由支撑的杆塔所决定,线路故障率的推导计算过程见附录B。

1.3 地震灾害场景建模

地震的小概率、高破坏性特点决定了难以全面 获取灾害数据,且其特殊性也决定了不同地震灾害 下线路的故障情况不同,普适性有限。因此ADN的 故障分析情况可以从典型的故障灾害场景中选取, 通过改变震中震级和震源位置构建地震灾害场景 集,在此基础上分析不同场景下配电网线路的故障 情况。由于构造的地震场景具有随机性,导致ADN 线路故障场景的生成也是随机、无序、不确定的,而 以非序贯蒙特卡罗为代表的模拟法使用随机数来模 拟物理和数学问题,以解决不确定性问题与带有随 机性的问题,且相比序贯模式,不需要考虑ADN的 实际运行历史,是一种常用的量化不确定性的方法。 1.3.1 场景生成

对于 ADN 线路故障的不确定性,本文假设线路 的故障率和修复率分别为 $p_{\chi}\mu$,极端灾害下元件故 障后一般需要人工修复,元件的正常工作时间 t_f 和 维修时间 t_r 分别服从参数为p和 μ 的指数分布。在 非序贯蒙特卡罗模拟中,故障率p和修复率 μ 可以 通过指数反变换得到,具体如下:

$$\begin{cases} p = \ln r_1 / t_{\rm f} \\ \mu = \ln r_2 / t_{\rm r} \end{cases}$$
(7)

式中:r₁、r₂为区间[0,1]内服从均匀分布的随机数。 1.3.2 场景缩减

本文采用*K*-means++聚类算法对极端事件场景 集进行聚类划分,*K*-means++聚类算法优化了随机初 始质心,实质就是初始化距离较远的聚类中心点。 *K*-means基础算法详见文献[11],具体优化策略见附 录C。

对聚类之后的各聚类簇数采用"肘方法"结合轮 廓系数(silhouette coefficient,SC)的方法来确定最佳 聚类簇数 K_{\circ} "肘方法"用于初步判断K所在的大致 区间。计算误差平方和 $S_{\rm E}(k), S_{\rm E}(k)$ 是关于聚类簇 数k的递减函数,其图像一开始呈现快速递减态势, 当超过某个拐点后递减速度大幅放缓,该拐点位置 即为肘部,肘部所在的区域就是最佳聚类簇数K所 在范围。

对于肘部拐点不突出、肉眼无法判断的案例,可 以通过计算 SC 来进一步确定最佳聚类簇数 K,其计 算公式如式(8)所示。

$$\lambda_{\rm sc}(x) = \frac{b(x) - a(x)}{\max\{a(x), b(x)\}} \tag{8}$$

式中: $\lambda_{sc}(x) \in [-1, 1]$,值最接近1的 $\lambda_{sc}(x)$ 所对应的 聚类数即为最佳聚类簇数K; a(x)为簇内不相似度, 体现凝聚度;b(x)为簇间不相似度,体现分离度。

1.3.3 场景选择建模

假设受灾的 ADN 中线路数为N,则 ADN 的运行 状态由N维向量表示为 $X=[x_1, x_2, \dots, x_N]$ 。其中, ADN 中任一线路的运行状态 $x_i(i=1, 2, \dots, N)$ 可以 表示为:

$$x_i = \begin{cases} 1 & 0 \le r \le p \\ 0 & r > p \end{cases}$$
(9)

式中:r为区间[0,1]内服从均匀分布的随机数;x_i=1 表示线路i处于正常运行或修复状态,x_i=0表示线路 i处于故障状态。

设置非序贯蒙特卡罗模拟采样次数为 β ,则可以获得一组包含 β 个 ADN 系统运行状态样本的集合为:

$$S' = \left\{ \boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{X}_2, \cdots, \boldsymbol{X}_{\beta} \right\}$$
(10)

考虑到计算量,全体事件场景经*K*-means++聚 类后,极端事件导致的故障场景数缩减至*K*个,则有:

$$S = \{\boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{X}_2, \cdots, \boldsymbol{X}_k\}$$
(11)

集合S即为地震灾害下某一时刻ADN经历的故障场景集。

1.4 基于PMU的负荷、分布式能源出力同步感知

现有文献大多设定负荷和分布式能源(distributed energy resource, DER)出力预测误差均服从正 态分布^[12],以预测值为均值,标准差取预测值的一定 比例。然而,极端灾害场景下,配电网拓扑结构随时 都有可能发生突变;且随着高比例清洁能源和电力 电子设备的接入,配电网源荷态势变化更加快速复 杂。显然,即便不计及功率预测本身所带来的误差, 上述对负荷、DER 正态分布的粗糙处理方式在源荷 复杂多变的极端灾害场景中也难以适应。

PMU能克服常规配电量测装置(如数据采集与 监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)、高级量测体系(advance measurement infrastructure, AMI)等)存在的采集周期长、量测不 同步和动态性弱的缺点,实时快速、准确地捕捉 ADN 在高频率和高扰动的极端灾害场景下系统动 态态势变化^[13]。区别于台风、冰灾等其他自然灾害 从发生到对电力设施损害具有一定的时延性,地震 灾害由于其本身的随机性、难以预测性和快速破坏 性,短时间内会对电力系统造成巨大的破坏和难以 估量的经济损失。目前国内外地震灾前预警往往是 提前几秒至几十秒发出告警,使得现有量测因其自 身的采样时间间隔较长而难以在宝贵的秒级地震预 警时间内做出及时准确的反应。然而,毫秒级 PMU 量测是可以在秒级预警阶段时间间隔内获取大量同 步高精度数据,快速精准感知DER、多元负荷的高动态变化态势,进而可充分调用多种控制型分布式资源进行高动态紧急控制,实现主动防御。鉴于地震多发区ADN受灾后往往发生群发性故障,如果故障区受灾严重,则必须依托非故障区的支撑电源尽快恢复重要负荷的供电。此时,非故障区的PMU一方面可以为数百毫秒响应时间的逆变器型源储荷设备控制策略提供高频数据支撑;另一方面,可以协助孤岛模式快速同步并网,扩大供电恢复范围。因此,在地震灾前预防和灾后修复都具有高成本的背景下,一套能实时感知、高同步、高动态的电网数据量测装置对于系统韧性评估及提升显得十分重要。

基于此,本文假定在ADN中PMU已经优化配置 的前提下,达到全网拓扑可观以及态势可观,若发生 地震灾害,则各故障场景各时段系统的高频高动态 安全态势信息都可以通过节点配置的PMU或分区 内所属PMU监测感知到。故本文采用PMU对负荷、 DER出力进行实时动态感知。

对于本文后续的评估指标构建计算方面,场景 生成过程中采用的非序贯蒙特卡罗抽样无法提供指 标的时序信息,而因为PMU通过使用北斗/全球定 位系统(global positioning system,GPS)提供带有精 准同步时标的三相电压、三相电流、相角、频率等,内 部配置的时间同步模块可使授时精度不大于50 µs^[14], 可通过PMU实时感知读取模拟灾害场景下各韧性 指标对应的时序信息。同时相比序贯蒙特卡罗采 样,求解效率大幅提高。

2 ADN 多维韧性评估与影响措施分析

2.1 ADN 韧性评估指标构建

韧性电网能够全面、快速、准确感知电网运行态势,能够有效应对大概率、低影响的小扰动和小概率、中高影响的极端事件。其中,极端事件发生概率小、破坏范围大,一般难以预测且会对社会和人民造成巨大损失,如何衡量电力系统应对极端事件的韧性是近年来的研究热点,而韧性指标可以量化 ADN 在遭受极端事件前后的供电能力和恢复情况。

附录 D 图 D1 为极端事件下 ADN 故障恢复全过 程及韧性提升曲线。极端事件发生前,系统功能维 持在正常水平,此时处于灾前预警状态,极端事件发 生时间为 t_e ;极端事件结束时间为 t_{pe} ,此时受极端事 件影响系统已呈现大面积失电状态,系统对应的整 体负荷水平为 S_{pe} ; t_{pe} — t_r 对应 ADN 在极端事件发生 后和采取恢复措施前的准备状态,在该状态下,系统 依靠自身强度能维持部分负荷供电; t_r — t_pr 对应系统 协调各类资源(如采取联络线转供、孤岛供电等),实 施恢复措施在一定程度上提升系统功能的过程,但 无法达到事故前的正常水平;开始故障抢修恢复供 电的时间为t_{ir},逐步修复故障设备,至t_{pir}抢修完成后系统功能恢复初始状态。

考虑 ADN 在面对极端事件时经历的上述几个 变化阶段,国内外已有多位学者提出 ADN 在极端事 件下的韧性评估指标。在单次灾害韧性评估指标的 基础上进行系统整体韧性水平的评估,传统的韧性 评估往往是通过构建单个场景的"韧性梯形图"特性 及每个场景生成的概率计算系统的韧性。如构建吸 收率、适应率和修复速率3个评估指标并确定任意 场景的发生概率,即可求取配电网在事件场景集下 的韧性水平^[15]。

现有的最为常见的韧性评估指标是采用梯形缺 失面积或概率方式^[16]来表示。其中,梯形缺失面积 将指标定义为系统功能损失部分与时间的积分,即:

$$R_{\rm s} = \frac{1}{s(\gamma)} \sum_{k \in \gamma} \int_{t_{\rm s}}^{t_{\rm pir}} \left(S_0 - S_k(t) \right) \mathrm{d}t \tag{12}$$

式中: R_s 为采用梯形缺失面积法时系统的韧性值; S_0 为系统在正常情况下的性能; $S_k(t)$ 为t时刻系统在 灾害场景k下的性能; $s(\gamma)$ 为灾害场景数; γ 为极端 事件的集合。

在简化处理时,将系统性能曲线简化为一个三 角形,此时韧性值为系统性能降低最大幅度和系统 恢复时间乘积的一半,即:

$$R_{\rm s} = \frac{1}{s(\gamma)} \sum_{k \in \gamma} \frac{(S_0 - \min S_k(t))(t_{\rm pir} - t_{\rm e})}{2}$$
(13)

式中:min $S_k(t)$ 表示系统在灾害场景k下的性能最差值。

此外,还有利用各等级负荷在极端事件下经加 权处理后的综合负荷损失来量化ADN的韧性值,如 附录E式(E1)所示。

由式(12)和式(13)可知,梯形面积指标同时考虑了系统的鲁棒性和迅速性,而利用乘积聚合2个较为重要的低维特征量会导致整体特征信息丢失这种严重的后果,且梯形面积无法直接反映关于韧性的其他属性,如冗余性、有源性。由式(E1)可知,加权负荷损失聚焦对整个故障发生和恢复期间各失电负荷的考量,缺少对故障发生和恢复期间各阶段的不同变化特征的区分剖析,最终得到的韧性指标往往比较单一和平均,不能很好地反映整个恢复期韧性变化的全貌。

本文在上述研究的基础上,为全面、快速、准确 地感知 AND 的运行状态,预测未来运行态势并对以 后 ADN 运行的潜在风险进行指导,在配电网的某些 关键节点配置 PMU,从而准确有效地感知 ADN 的动 态安全态势,为应变、防御和恢复措施的制定以及高 效协同配电网各类资源提供数据支撑。

为深入挖掘 ADN 在极端灾害下韧性的多维特 征变化,基于 PMU 的高精度动态感知力和 ADN 韧性 的多维度关键指标,本文立足于韧性电网的多维核 心特征,在韧性MFS使用一套崭新的韧性评价指 标,对地震灾害下ADN面临的各类故障场景进行多 维综合韧性评估。进而分析影响ADN韧性的重要 因素,并计算对比不同影响措施作用下的ADN韧性 水平变化情况。

韧性电网的应变力、防御力、恢复力和协同力4 个维度的特征,对应于 MFS 内部指标的具体定义 如下。

1)应变力:ADN抵御率。

ADN 抵御率定义为极端灾害开始发生至系统 性能降为最低点的过程中,单位时间的性能变化幅 度。该指标表明系统应对灾害的能力,主要与灾害 的类型和强度、导线的抗拉强度、电杆的抗弯强度、 线路种类和绝缘水平等因素相关。ADN 抵御率*R*_{DR} 的定义如下:

$$R_{\rm DR} = \frac{\int_{t_{\rm e}}^{t_{\rm pe}} \left(S_0 - S(t)\right) dt}{t_{\rm pe} - t_{\rm e}}$$
(14)

式中:S(t)为t时刻灾害事件发生后系统性能。

2)防御力:孤岛支撑力。

大规模故障发生后,对于没有配置联络开关或 流经联络开关的功率不满足约束条件的非故障停电 区域,可在灾害场景下通过就地风光、储能、微电网、 应急发电车等 DER 实现区域自维持的持续供电。 孤岛是否合理划分、孤岛能否长时间成功稳定运行 都会直接影响该区域用户。故本文提出孤岛支撑力 这一指标来衡量孤岛区域 ADN 的韧性水平,孤岛支 撑力 *R*₁₅定义如下:

$$R_{\rm IS} = 1 - \sum_{i=1}^{N_{\rm IS}} \lambda_i R_{{\rm IS},i}$$
(15)

式中: N_{is} 为当前场景孤岛划分个数; λ_i 为孤岛i的权重系数; R_{is} ;为孤岛i的支撑力。

为突显重要负荷在孤岛区域内的较高地位,将 λ_i定义为孤岛*i*内重要负荷加权有功功率占全体失 电负荷加权有功功率的比值,可使得孤岛支撑力更 能体现出 ADN 在极端灾害发生后的针对性防御力 和对重要负荷的供电水平。

$$\lambda_{i} = \frac{\sum_{j \in N_{i}^{cr}} w_{j} P_{j}}{\sum_{j \in N_{i}} w_{j} P_{j}}$$
(16)

式中: w_i 为节点j处负荷的权重系数; P_i 为节点j处 负荷的有功功率; N_i 、 N_i^{cr} 分别为孤岛i内的负荷集 和重要负荷集。

本文考虑孤岛区域自维持的持续供电能力与其 快速并网的时间,定义孤岛*i*的支撑力*R*_{IS,i}如下:

$$R_{\text{IS},i} = \frac{T_{\text{sus},i}}{T_{\text{rec},i}} \tag{17}$$

式中: T_{sus,i}为孤岛 i 的自维持持续供电时间; T_{rec,i}为 孤岛 i 内负荷从失电到再次并网经历的时间。

3)恢复力:重要负荷电量缺供率。

重要负荷电量缺供率表示在恢复期间重要负荷 根据应急预案逐段恢复供电,重要负荷随时间恢复 正常供电的电量缺额对重要负荷正常运行时总供电 量的比值。重要负荷电量缺供率表征了ADN采取 应急措施后电能供应的中断程度。重要负荷电量缺 供率 *R*_{ESRCL} 的定义如下:

$$R_{\text{ESRCL}} = 1 - \frac{\int_{t_{\text{pr}}}^{t_{\text{pr}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{rr}}} P_{i,t}^{\text{er}} dt}{\sum_{i=1}^{n_{\text{rr}}} P_{i,t}^{\text{er}} (t_{\text{ir}} - t_{\text{pr}})}$$
(18)

式中:P^{er}_{i,t}为t时刻节点i处重要负荷正常运行的功率,是由PMU量测感知得到,根据需要,重要负荷可选择一级负荷或一、二级负荷;n_{er}为电量缺供的重要负荷节点数。

4)协同力:联络线转供覆盖率。

当极端灾害发生后,配电网可以通过联络线的 闭合快速恢复非故障停电区域的负荷,联络线成功 转供恢复的负荷功率占原区域失电负荷功率的比例 能直接反映配电网灵活供电的能力。故本文提出联 络线转供覆盖率来评估配电网的韧性水平,联络线 转供覆盖率 R_{rrr}定义如下:

$$R_{\text{TTC}} = 1 - \sum_{i=1}^{N_{\text{t}}} \lambda_i R_{\text{TTC},i}$$
(19)

式中:N₁为联络线转供的区域个数;R_{TTC,i}为转供区域 i的转供覆盖率。

本文考虑转供区域内负荷的重要性不同,故采 用等效平均负荷比例,该方法可以突出重要负荷占 比高的转供区域的权重系数,使得联络线转供覆盖 率更能发挥其对重要负荷恢复连接主网的能力。

 $R_{\text{TTC},i} = P_{i,t} / P_{i,f} \tag{20}$

$$\lambda_{i} = \frac{\kappa_{i,1} P_{i,11} + \kappa_{i,2} P_{i,21} + \kappa_{i,3} P_{i,31}}{\kappa_{i,1} P_{i,11} + \kappa_{i,2} P_{i,21} + \kappa_{i,3} P_{i,31}}$$
(21)

式中:P_{i,1}、P_{i,i}分别为区域i转供后恢复的负荷功率和 转供前区域i内失电的负荷功率; κ_{i,1} — κ_{i,3}分别为 区域i内一级、二级、三级负荷的权重系数; P_{i,11}、P_{i,11} 分别为区域i转供后恢复的一级负荷功率和转供前 区域i内失电的一级负荷,其他变量类似。

根据上述 ADN 的4个特征指标并结合 PMU 的 感知能力,由此完成韧性 MFS 评估指标的构建,将 其定义为 ADN 在极端事件集下以应变力、防御力、 恢复力、协同力和感知力为关键特征的集合,其内部 特征关系如图3所示。

MFS中任意一个点对应于整个仿真事件集中某 个极端事件场景,其坐标分别是利用整个故障事件 集归一化后的4种指标,而最优韧性点则处于4维空



图 3 韧性 MFS 内部特征关系 Fig.3 Internal characteristic relationship of resilience MFS

间的原点。计算某一极端事件场景下,系统韧性水 平所在的空间位置与最优韧性点的加权欧氏距离, 并利用整个仿真事件集的平均距离即可得到系统性 能点簇中心与最优韧性点的加权欧氏距离,最后扩 大100倍映射在[0,100]区间内,系统韧性计算公式 如下:

$$R_{\rm MFS} = \frac{100}{s(\gamma)} \sum_{k \in \gamma} \left[1 - \frac{\sqrt{(\sigma_1 \bar{R}_{\rm DR,k})^2 + (\sigma_2 \bar{R}_{\rm IS,k})^2 + (\sigma_3 \bar{R}_{\rm ESRCL,k})^2 + (\sigma_4 \bar{R}_{\rm TTC,k})^2}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}} \right]$$
(22)

式中: R_{MFS} 为采用MFS法时系统的韧性值,且 R_{MFS} 越接近100,系统的韧性越好,反之则越差; $\bar{R}_{\text{DR},k}$ 、 $\bar{R}_{\text{IS,k}}$ 、 $\bar{R}_{\text{ESRCL},k}$ 和 $\bar{R}_{\text{TTC},k}$ 为系统在极端事件场景k下采用MFS 归一化后对应的坐标, $\sigma_1 - \sigma_4$ 分别对应上述4个坐标的复合权重。本文的权重计算采用G1-云理论方法^[17],是一种主客观相结合的组合赋权法,先使用G1法确定指标的初始权重,然后利用逆向云发生器计算云的数字特征,即期望、熵和超熵,最后根据云正向发生器可确定指标的最终权重值。

2.2 ADN 韧性提升措施分析

关于提升 ADN 韧性的措施从原理上出发主要 包含以下 2 个方面:增强系统元件坚强程度、提高电 网多种可调度可控资源的灵活调节能力。增强系统 元件坚强程度,即传统配电网韧性提升方法,包括加 固导线与电杆、在地震多发地区增设配电线路数等, 其实质是通过提升电力基础设施的韧性水平,使系 统元件在极端灾害下仍能保持零故障率或极低故障 率。提高电网多种可调度可控资源的灵活调节能 力,利用包括抽蓄、储能、可控负荷、微电网、DG、移 动应急资源、电动汽车等灵活性资源,快速弥补停电 区域功率缺额,降低断开主网导致的经济损失,减小 扰动事件的影响范围。

ADN 在地震等极端事件下,上述所有影响因素

和提升系统韧性的措施,目的都是为尽可能地降低 ADN多故障下引起的经济损失。故本文以供电负 荷恢复量最大为优化目标,目标函数如下:

$$\max \int_{0}^{T} \sum_{i \in N_{\text{loss}}} w_i \rho_{i,t} P_{i,t} \,\mathrm{d}t \tag{23}$$

式中:T为从故障发生开始到系统恢复正常运行的 总时间; N_{loss} 为故障发生后失电负荷集; $\rho_{i,t}$ 为t时刻 节点i处负荷的连通状态,若连通则取1,否则取0; $P_{i,t}$ 为t时刻节点i处负荷的有功功率值。

系统需要满足的约束条件包括节点功率平衡约 束、支路传输功率约束、节点电压约束、储能充放电 功率约束,具体如附录E式(E2)所示。

从地震灾害下电网韧性提升的措施效果中获取 经验,挖掘韧性电网对抗震防灾的学习力。

3 ADN 韧性评估流程

基于上述构建的 ADN 的韧性评估指标体系,形成面向 ADN 的 MFS 评估流程图如附录 F图 F1 所示,具体步骤如下。

1)获取地震灾害参数信息、配电网网络结构、 PMU配置情况以及负荷时变需求、DG等可调度资源的时变出力情况等,并计算各元件的故障率。

2)场景生成。首先采用非序贯蒙特卡罗模拟采 样生成β个故障场景,在此基础上使用*K*-means++聚 类算法将场景缩减至*K*个,首先选择初始场景并令 *k*=1。

3)掌握场景 k 下的故障各阶段持续时间间隔, 通过每个分区内配置的 PMU 量测感知全网的负荷 及 DER 出力的时变情况以及各级负荷的通断电变 化情况,采用 2.2 节提出的优化目标进行故障恢复。 并求取故障场景 k 下系统的各个韧性指标,即抵御 率 $\bar{R}_{\text{DR,k}}$ 、孤岛支撑力 $\bar{R}_{\text{IS,k}}$ 、重要负荷电量缺供率 $\bar{R}_{\text{ESRCL,k}}$ 和联络线转供覆盖率 $\bar{R}_{\text{TTC,k}}$ 。

4)检验聚类后的地震场景是否已全部完成仿 真,若没有,则令*k*=*k*+1并返回步骤3);若仿真已全 部完成,则根据式(22)计算 ADN 经历地震灾害集下 的韧性值。

5)分析提升 ADN 韧性的各种措施。分别增强 电力线路强度、提高联合系统中 DG 可供容量,计算 采取各种措施前后系统的韧性值变化并进行对比 分析。

4 算例分析

本文采用改进的PG&E69网络对所提出的地震 灾害性能分析、地震灾害场景生成、韧性评估以及电 力线路强度、联合系统中DG可供容量对ADN 韧性 的影响进行验证。

改进的PG&E69网络拓扑如附录F图F2所示,

在节点35、56、67处接入风储联合系统,风电的额定 功率为200 kW,储能额定容量为200 kW・h,最大充 放电功率为100 kW;在节点23、39、50处接入光储联 合系统,光伏的额定功率为300 kW,储能额定容量 为200 kW・h,最大充放电功率为100 kW。风光的出 力时序模型见文献[18]。

配电网结构参数见文献[13],并根据文献[19] 对PG&E69系统的分区结果,在系统的7个关键节点 处配置PMU装置。此外,本文设置一级、二级、三级 负荷的权重系数分别为100、10和1,各负荷的等级 和可控类型如附录F表F1所示。在节点11和节点 66、节点13和节点20、节点15和节点69、节点27和 节点54、节点39和节点48之间装设联络开关,正常 运行时开关处于打开状态。

4.1 特定地震灾害性能分析

根据附录F图F2中线路走向,各支路阻抗已由 文献[13]给出,查阅电工手册可知线路单位长度的 阻抗值,则可掌握任意线路的长度。设架空线路平 均档距为50m,导线采用LGJ-240/30钢芯铝绞线, 杆塔采用12mG级电杆,设导线上下层间高度差为 0.8m,杆塔间距为300m。本次地震震源选取为离 PG&E69系统最近的节点,即节点19距离10km远 的东偏北30°方向,配电网所处场地类型为基岩,选 取震级为7级,地震动开始时刻为当天08:00。本文 以地震动开始时刻为仿真起始时刻。

地震灾害下配电线路故障率与该线路所处位置的地震动 PGA 加权均值 f_{PEA} 有关。结合式(2)和式(4),得到 f_{PEA} 随震级 M 和震中距 R 的变化曲面,如 图 4 所示。从图中可以看出:在总体趋势上,震级 M 越大,震中距 R 越小,则地震动强度越大, f_{PEA} 越大; 而 f_{PEA} 因为是对同一区域内相近位置的线路所带负荷的加权均值,即同一震级下,2个震中距相近的受灾位置,拥有相同的 f_{PEA} 。





由于我国的潜在震源区地理分布复杂,其位置 难以准确获取。为便于计算分析,基于震源和配电 网的相对位置以及配电网内部节点间实际距离,本 文将附录F图F2所示的拓扑搭建在一个地震分区 图中来作为算例背景,具体分区如图5所示。

根据图5中线路的分区分布,附录F表F2给出



图 5 改进的 PG&E69 分区图 Fig.5 Improved PG&E69 zoning diagram

了各线路段具体的PGA加权均值区域。

根据文献[20],给出配电线路在4种极限损坏 状态下的对数期望和对数标准差,结合式(6),得到 不同状态下的线路故障率曲线,如图6所示。



图 6 线路故障率与PGA加权均值关系曲线 Fig.6 Relationship curves between line fault rate and PGA weighted mean

4.2 地震灾害场景建模分析

通过改变地震震级和震源中心位置的方式构建 地震场景集,评估不同地震场景下 ADN 的韧性水 平。本文采用非序贯蒙特卡罗模拟设置初始采样 β =1000,即本文算例系统在地震灾害下,抽样生成 了1000个极端场景。在 MFS 中能够将所有事件场 景集合利用加权欧氏距离的方法形象地展示在4维 空间中,可视化后如附录F图F3所示,图中4个维度 的坐标的物理意义分别是归一化后的 ADN 抵御率 \bar{R}_{DR} 、孤岛支撑力 \bar{R}_{IS} 、重要负荷电量缺供率 \bar{R}_{ESRCL} 和联 络线转供覆盖率 \bar{R}_{TTC} 。

图 F3 详细展示了地震灾害下基于非序贯蒙特 卡罗抽样模拟的所有场景及对应的韧性指标坐标 值,若在其中选取具有代表性的极端场景,则可方便 后续特定场景韧性评估分析。本文基于*K*-means++ 算法对上述场景进行聚类划分后,根据"肘方法"即 可初步判断最佳聚类簇数*K*值大小,如附录F图F4 所示。

根据图 F4 中曲线的变化趋势,可初步判定最佳 聚类簇数应在 K=8 附近取得。接着采用 SC 法进行 聚类评估,计算得到:当聚类簇数分别取7、8和9时, 对应的 SC 分别为0.851、0.914 和0.902。经过比较, 可以得到地震灾害场景集的最佳聚类规模数为8的 结果,为后续灾害场景下电网韧性评估奠定模型 基础。

4.3 ADN 韧性评估结果分析

4.3.1 聚类场景韧性评估对比分析

对*K*-means++聚类后筛选出的8个具有代表性的地震灾害场景进行韧性评估,选择传统梯形面积和综合负荷损失作为本文MFS的对比评估方法,3种方法的评估结果最终都映射在[0,100]区间内,结果如表1所示。其中,经过G1-云理论计算赋权后,可以得到MFS内部4个维度特征指标的复合权重分别为 σ_1 =0.2354, σ_2 =0.2187, σ_3 =0.3514, σ_4 =0.1945。

表1 聚类后地震场景的韧性评估结果对比

 Table 1
 Comparison of resilience evaluation results of earthquake scenes after clustering

						韧性值	
场景	$\bar{R}_{\mathrm{DR},k}$	$\bar{R}_{\mathrm{IS},k}$	$\bar{R}_{\mathrm{ESRCL},k}$	$\bar{R}_{\mathrm{TTC},k}$	梯形	综合负	MES
					面积	荷损失	MITS
1	0.224	0.372	0.284	0.463	95.6	93.5	86.5
2	0.293	0.458	0.348	0.587	91.1	79.2	77.1
3	0.347	0.566	0.432	0.710	84.2	65.2	57.8
4	0.320	0.531	0.405	0.662	89.2	70.5	62.4
5	0.091	0.349	0.273	0.287	95.3	93.2	95.3
6	0.377	0.622	0.479	0.750	81.4	55.7	42.1
7	0.256	0.403	0.301	0.517	95.1	82.6	76.5
8	0.221	0.384	0.287	0.480	94.7	81.1	78.2

由表1可知:对于不同的地震场景,3种韧性评估方法在大体趋势上保持一致性,如场景5的4个韧性指标优势明显,该场景下采用3种韧性评估方法都能给出最优的韧性评估值;而场景6的4个韧性指标劣势明显,该场景下采用3种韧性评估方法都能给出最差的韧性评估值。

此外,以场景1和场景5为例,采用梯形面积和 综合负荷损失进行评估,评估结果十分接近,难以区 分不同场景;而根据MFS的评估结果,能够充分区 分2个场景的不同。这是因为不同于其他2种评估 方式,MFS考虑了强感知力的因素,在配电网关键节 点上配置了PMU,使用PMU快速准确地获取高频、 高动态扰动下负荷和DER的态势信息变化,感知相 似场景中常规量测装置难以第一时间捕捉的电压、 电流的高动态变化。且当考虑韧性电网的4维特征 指标时会发现:场景5的ADN抵御率明显强于场景 1,场景5的联络线转供覆盖率明显高于场景1,即场 景5下韧性电网的应变力和协同力优势明显,应变 力和协同力在这2个场景中的差别是最后区分韧性 高低的主要特征来源。

对比韧性 MFS 内部不同特征的差别是帮助决 策者区分相似灾害场景的一种有效切入角度,而梯

影响

形面积和综合负荷损失这2种评估方法往往缺乏对 系统状态迅速变化的灵敏性感知以及对韧性电网内 部多维核心特征的细分挖掘。

4.3.2 全场景韧性评估分析

对模拟生成的1000个地震场景下3种韧性评估方法的结果从小到大依次排列,各离散点拟合成曲线后如图7所示。明显可知,综合负荷损失和MFS在各灾害场景评估区间方面要比梯形面积方法更宽阔。此外,在场景460之后,梯形面积和综合负荷损失的韧性评估结果已经缓慢变化了,而MFS的评估结果显示还有一定的上升空间。这是因为MFS配置了PMU,能强力感知系统实时态势要素的变化,对于ADN受灾后经历的抵御期和暂稳期、暂稳期和恢复期、恢复期和修复期的过渡阶段能非常灵敏地迅速感知,在相似场景评估的分界上相比另外2种评估方法更加清晰,所以对于后续的场景能够在区分度上更优于另外2种韧性评估方法。



图 7 灾害模拟场景下 3 种韧性评估方法的结果对比 Fig.7 Comparison of results among three resilience assessment methods under disaster simulation scenario

4.4 不同措施对 ADN 韧性提升效果的评价分析

分别在增强电力线路强度、提高联合系统中DG 可供容量这2种情形下,对ADN进行韧性评估,以此 分析这2种措施对ADN整体韧性的影响。

4.4.1 增强电力线路强度对ADN韧性的影响

增强电力线路强度会改变线路在灾害场景中的 故障率,附录F表F3给出了3种等级电杆及相应的 抗弯力矩值^[21]。G级、I级和K级表示电杆载荷水 平,其中:G级电杆抗弯力矩最小,最容易故障;K级 电杆抗弯力矩最大,具有最高的稳定性。选取线路 3和线路14,改变这2条线路中电杆的等级,用于验 证不同强度电杆对地震灾害下 ADN 韧性水平的影 响,结果如表2所示,表中G3表示线路3中电杆的等 级为G级,其他类似。

表2 不同强度电杆对 ADN 韧性的影响

Table 2 Effect of poles with different strengths on ADN resilience

	-				
电杆等级	${ar R}_{ m DR}$	\bar{R}_{IS}	$ar{R}_{ m ESRCL}$	${ar R}_{ m TTC}$	$R_{\rm MFS}$
G3 G14	0.201	0.324	0.268	0.434	89.1
I3 I14	0.189	0.323	0.265	0.432	89.8
K3 K14	0.164	0.315	0.254	0.428	91.2

由表2可知,已知 \bar{R}_{DR} 、 \bar{R}_{IS} 、 \bar{R}_{ESRCL} 和 \bar{R}_{TTC} 是所有灾 害模拟场景下的平均指标,加强电杆的抗弯强度能 够提升 ADN 抵御率,略微降低重要负荷电量缺供 率,提高联络线转供覆盖率和孤岛支撑覆盖率,韧性 水平也得到了提高。比较4个特征指标在电杆抗弯 力矩增加下的提升幅度可以发现, \bar{R}_{DR} 变化幅度是最 大的,即 ADN 抵御率提升最明显,说明 ADN 在地震 灾害中加强线路强度的措施,对应于增强韧性电网 的应变力是致使韧性提升的主要特征。从物理背景 上而言,这是因为高抗弯强度的电杆在相同灾害下 有着更低的故障率。同理,在经济允许的范围内,可 以选择抗拉强度大的导线、增设备用线路等方式来 提升 ADN 在灾害发生时的抗震能力和韧性水平。 4.4.2 提高联合系统中DG 可供容量对 ADN 韧性的

对于 ADN 故障后没有联络线路进行重构的停 电区域,可用就近的风储、光储联合系统形成孤岛为 离网负荷供电。多次提高联合系统中DG 的容量,探 究其对系统韧性水平的影响,分别设置如下3种情 形:情形1,风电额定容量均为100 kW,光伏额定容 量均为200 kW;情形2,风电额定容量均为200 kW, 光伏额定容量均为300 kW;情形3,风电额定容量均 为300 kW,光伏额定容量均为400 kW。

3种不同情形下的韧性分析结果如表3所示。

表3 联合系统中DG容量对ADN韧性的影响

Table 3 Effect of DG capacity on ADN resilience in joint system

情形	${ar R}_{ m DR}$	\bar{R}_{IS}	$ar{R}_{ m ESRCL}$	$ar{R}_{ ext{ttc}}$	$R_{\rm MFS}$
1	0.201	0.378	0.284	0.434	81.8
2	0.201	0.324	0.268	0.434	89.1
3	0.201	0.324	0.268	0.434	89.1

由表3可知,对比情形1和情形2发现随着联合 系统中DG容量的增加,ADN抵御率和联络线转供 覆盖率保持不变,在更充沛的容量供应下更高比率 的重要失电负荷得到优先满足,孤岛支撑力得到提 高,综合韧性值MFS也得到了增大。这说明ADN在 地震灾害下提升联合系统中DG可供容量的措施, 能帮助韧性电网孤岛支撑力提升和重要负荷电量缺 供率减少,对应于增强韧性电网的防御力和恢复力 是致使韧性提升的特征。而ADN抵御率和联络线 转供覆盖率保持不变,这说明提升联合系统中DG 可供容量的措施与韧性电网的应变力和协同力变化 没有直接关联。

对比情形 2 和情形 3 的 \bar{R}_{IS} 和 \bar{R}_{ESRCL} 大小发现其 值并没有变化,这是因为情形 2 提供的 DG 容量及储 能系统已经能够保证孤岛内所有负荷类型暂时满足 供电需求,该背景下韧性电网的防御力和恢复力在 此韧性提升措施下已经达到最大值,此时若再仅提 升DG可供容量已经很难继续提高系统的韧性。

5 结论

本文提出了地震灾害下ADN多维特征指标的 构建及韧性评估与提升的方法,得出如下结论。

1)本文构建了地震灾害场景,采用非序贯蒙特 卡罗模拟结合*K*-means++聚类算法,筛选出合适的 灾害代表场景,使得构建的线路故障率模型更加贴 近实际地震灾害。

2)基于 PMU 高精度的动态感知能力,分别从抵 御率 R_{DR}、孤岛支撑力 R_{IS}、重要负荷电量缺供率 R_{ESRCL} 和联络线转供覆盖率 R_{TTC} 这4个指标出发,系统地构 建了 ADN 加权韧性 MFS 的综合韧性评估方法。对 比梯形面积和综合负荷损失发现,当 ADN 处于多种 高频、高动态扰动下的不同灾害场景时,采用 MFS 能够准确有效地进行多维度评估和区分各场景的韧 性水平。

3) 探讨了影响 ADN 韧性的因素,并分别从增强 电力线路强度、提高联合系统中DG 可供容量这2种 措施入手,通过对比分析发现:加固线路强度和在一 定范围内提高联合系统中DG 可供容量可以有效提 升 ADN 的韧性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 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].中国电机工程报,2018,38(2):505-513,681.

ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme wea-ther[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2):505-513, 681.

[2] 刘菲,林超凡,陈晨,等.考虑分布式新能源动态不确定性的配 电网灾后时序负荷恢复方法[J].电力自动化设备,2022,42 (7):159-167.

LIU Fei, LIN Chaofan, CHEN Chen, et al. Post-disaster timeseries load restoration method for distribution network considering dynamic uncertainty of distributed renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7):159-167.

- [3] WATSON J P, GUTTROMSON R, SILVA-MONROY C, et al. Conceptual framework for developing resilience metrics for the electricity, oil, and gas sectors in the United States [R]. Albuquerque, NM, USA: Sandia National Lab, 2014.
- [4] CHANDA S, SRIVASTAVA A K. Defining and enabling resiliency of electric distribution systems with multiple microgrids
 [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6):2859-2868.
- [5]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. [6] 郝文斌,张亚刚,牟森. 地震条件下计及杆塔结构可靠度的电 网可靠性评估研究[J]. 四川电力技术,2019,42(4):17-20. HAO Wenbin,ZHANG Yagang,MOU Miao. Research on reliability evaluation of power grid considering structural reliability of tower under seismic conditions[J]. Sichuan Electric Power Technology,2019,42(4):17-20.

- [7] 李雪,孙霆锴,侯恺,等. 地震灾害下海岛综合能源系统韧性评 估方法研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(17):5476-5493.
 LI Xue, SUN Tingkai, HOU Kai, et al. Evaluating resilience of island integrated energy systems with earthquake[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(17):5476-5493.
- [8] 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.
- [9] 徐悦,李博,孙建军,等.基于运行韧性评价的配电网电压暂降 治理评估[J].电力系统自动化,2021,45(5):104-110.
 XU Yue,LI Bo,SUN Jianjun, et al. Evaluation of voltage sag management in distribution network based on operation resilience assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45(5):104-110.
- [10] 王林. 地震灾害下配电网弹性恢复力评估及提升方法[D]. 天 津:天津大学,2019.
 WANG Lin. The method of resilience evaluation and improvement for distribution network under earthquake disasters[D]. Tianjin:Tianjin University,2019.
- [11] 靳康萌,张沛,邓晓洋,等. 基于K-means聚类技术改进的多线 性蒙特卡洛概率能流算法[J]. 电网技术,2019,43(1):65-74.
 JIN Kangmeng, ZHANG Pei, DENG Xiaoyang, et al. Improved multi-linear Monte Carlo probabilistic energy flow calculation method based on K-means clustering technique[J]. Power System Technology,2019,43(1):65-74.
- [12] 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.
- [13] 王雨婷,张筱慧,唐巍,等.考虑光伏及负荷时变性的配电网故障恢复[J].电网技术,2016,40(9):2706-2716.
 WANG Yuting, ZHANG Xiaohui, TANG Wei, et al. Fault recovery of distribution network considering time variation of photovoltaic and load[J]. Power System Technology, 2016, 40 (9):2706-2716.
- [14]何西,涂春鸣,李培强.智能配电网多源数据融合研究[J].南 方电网技术,2019,13(4):42-47.
 HE Xi,TU Chunming,LI Peiqiang. Research on multi-source data fusion for smart distribution network[J]. Southern Power System Technology,2019,13(4):42-47.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 熊卫红,张宏志,谢志成,等. 基于云理论及熵权法的变压器 潜在故障风险评估方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(8): 125-130,146.

XIONG Weihong, ZHANG Hongzhi, XIE Zhicheng, et al. Risk assessment of power transformer potential fault based on cloud theory and entropy weight method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 125-130, 146.

[18] 要金铭,赵书强,韦子瑜,等.基于场景分析的电力系统日前调 度及其快速求解方法[J/OL].电力自动化设备.[2022-05-10].https://doi.org/10.16081/j.epae.202204022.

[19] 田书欣,李昆鹏,魏书荣,等.基于同步相量测量装置的配电
 网安全态势感知方法[J].中国电机工程学报,2021,41(2):
 617-632.

TIAN Shuxin,LI Kunpeng,WEI Shurong, et al. Security situation awareness approach for distribution network based on synchronous phasor measurement unit[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(2):617-632.

 [20] 孙江玉,刘创,欧阳敏,等. 地震灾害下电网性能研究综述:以 弹性视角为主[J]. 自然灾害学报,2018,27(2):14-23.
 SUN Jiangyu, LIU Chuang, OUYANG Min, et al. Review of performance studies on electric power grids under seismic

performance studies on electric power grids under seismic hazards-with a focus on resilience perspective [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(2):14-23.

[21] 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.

作者简介:



符杨

符 杨(1968—),男,教授,博士,主要 研究方向为电力系统分析、风力发电并网技 术及海上风电优化设计等(E-mail:mfudong@ 126.com);

顾吉平(1996—),男,硕士研究生,主 要研究方向为主动配电网故障恢复策略 (E-mail:986179938@qq.com);

田书欣(1985—),男,讲师,博士,通信 作者,主要研究方向为电力系统规划、智能

配电网运行等(E-mail:tsx396@shiep.edu.cn)。 (编辑 李玮)

Multidimensional resilience evaluation method of active distribution network based on earthquake disaster scene

FU Yang¹, GU Jiping¹, TIAN Shuxin¹, MI Yang¹, LIU Shu²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China)

Abstract: In order to analyze the resilience support ability of active distribution network to withstand destructive disturbance events and quickly recover important loads, a new multidimensional resilience evaluation method of active distribution network that integrated with the high-precision dynamic perception ability of phasor measurement unit (PMU) on the background of earthquake disaster scenario is proposed. The basic concepts and characteristics of distribution network resilience are described. And taking earthquake as the representative of extreme events, the model reflecting the weighted mean of distribution line failure rate and ground vibration peak acceleration is constructed, and then the representative earthquake scenes are selected by non sequential Monte Carlo sampling and K-means++ clustering algorithm. Based on the strong perception of PMU configured by the system, the evaluation indexes reflecting the abilities of strain, defense, recovery and synergy of the resilient power grid are established to form a resilience multidimensional feature space, and then the weighted Euclidean distance between the center of the event clusters and the optimal resilience point is used to evaluate the multidimensional comprehensive resilience of system. Furthermore, the impacts of two measures to enhance the strength of power lines and improve the distribution generation available capacity in the joint system on the improvement of system resilience are analyzed, and the learning ability about earthquake resistance and disaster prevention of resilient power grid is excavated. Finally, the effectiveness and accuracy of the proposed method are verified by the improved PG&E69 system. Key words: active distribution network; earthquake disaster; resilience evaluation; K-means++ clustering; resilience multidimensional feature space

	Table A1 Comparison	of resilience and related co	ncepts
特征	可靠性	运行韧性	(恢复)韧性
概念	长时间尺度稳定向 用户供电的能力	敏感负荷持续供电能力	对关键负荷的支撑、 恢复能力
时间尺度	年	毫秒、秒	小时、天
特征指标	停电时间、频率	电压降低、 频率波动等	重要负荷损失量、 重要负荷恢复率等
故障特点	主要为单重故障, 影响范围小	高概率、小扰动	低概率、大扰动
评价指标	平均停电频率、 平均停电时间	电压暂降影 响系数等	韧性恢复 系数等指标

表 A1 韧性及相关概念对比

附录 B

假设杆塔的间距均为 d, 一条长度为 L 的配电线路上的杆塔数量为:

$$n = L/d$$

(B1)

若上述配电线路横跨了 f 个基于负荷加权 f_{PGA} 的配电网分区,同一个分区内杆塔的故障率相同。即可得到配电线路的故障率为:

$$\begin{cases} P = 1 - \prod_{i=1}^{f} (1 - p_{ii})^{n_i} \\ \sum_{i=1}^{f} n_i = n \end{cases}$$
(B2)

式中: p_{fi} 为杆塔在分区 i 内的故障率; n_i 为位于分区 i 内的杆塔数量。 **附录** C

(1)初始设定聚类簇数 k,并从每个类簇中选择一点作为该簇的初始聚类中心点。

(2)计算空间中每个样本点 x_i与已有聚类中心点的最短距离,即与最近一个聚类中心点的欧式距离,用 d(x)表示。

(3)计算距离平方的累加和 $\sum d(x)^2$,根据式(C1)可计算出空间中任一样本点被选为下一个聚类中心点的概率。

$$P(x) = \frac{d(x)^2}{\sum_{x \in X} d(x)^2}$$
(C1)

(4)轮盘赌算法选出下一个聚类中心点:将 *P*(*x*)概率依次计算累加和,生成每个样本对应的概率区间,生成一个位于区间[0,1]的随机数,判断它属于哪个区间,那么该区间对应的序号就是被选择出来的第二个聚类中心。

(5)重复步骤(2)-(4),直到聚类中心点不再发生变化或达到迭代次数,即可选出 K 个聚类中心。 附录 D



Fig.D1 The whole process of ADN fault recovery under extreme events

附录 E

$$\begin{cases} R(y) = \frac{1}{P_{\text{LOSS}}} \\ P_{\text{LOSS}} = \int_{t_e}^{t_{\text{pir}}} \frac{1}{s(\gamma)} \sum_{k \in \gamma} \frac{\Delta p(X_k)}{P_0} dt \\ \Delta p(X_k) = \sum_{i=1}^{3} \omega_i \Delta p_i(X_k) \end{cases}$$
(E1)

式中: $\Delta p(X_k)$ 、 $\Delta p_i(X_k)$ 分别为某场景某时刻下综合负荷损失、各级负荷损失; X_k 为某故障场景; P_0 为故障发生前加权总负荷。

$$S_{i,t} = S_{\text{DG},i,t} + S_{\text{ESS},i,t}^{d} - S_{\text{Load},i,t} - S_{\text{ESS},i,t}^{c}$$
$$-\rho_{ij,t}S_{ij}^{\max} \leq S_{ij,t} \leq \rho_{ij,t}S_{ij}^{\max}$$
$$V_{i}^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i}^{\max}$$
$$0 \leq P_{i,t}^{d} \leq x_{i,t}^{d}P_{i}^{d,\max}$$
$$0 \leq P_{i,t}^{c} \leq x_{i,t}^{c}P_{i}^{c,\max}$$
$$x_{i,t}^{d} + x_{i,t}^{c} \leq 1$$
$$\forall i \in N, \forall ij \in L$$

式中: S_{ij}^{max} 为支路 *ij* 的最大功率; $\rho_{ij,t}$ 为 *t* 时刻支路 *ij* 运行状态标志,正常运行取 1,故障状态 取 0; $P_i^{\text{c.max}}$ 、 $P_i^{\text{d.max}}$ 分别为负荷 *i* 储能的充、放电上限; $V_{i,t}$ 为 *t* 时刻节点 *i* 的电压值,由节点 配置的 PMU 直接量测感知或由所在分区内其他节点的 PMU 量测值经过潮流迭代得到; $x_{i,t}^{\text{c}}$ 、 $x_{i,t}^{\text{d}}$ 分别为 *t* 时段节点 *i* 储能充放电的 0-1 型标志位; *N*、*L* 分别为配电网所有节点和支路的集合。 **附录 F**





R F3 改进的 PG&E69 系统在地震模拟场景下的韧性 MFS 评估体系下坐标分布

Fig.F3 Improved PG&E69 system spatial coordinate distribution of resilience multidimensional feature evaluation system in seismic simulation scenario



表 F1 负荷等级及可控类型

		Table F1	Load level and	controllable type
贠	负荷类型	负荷等级		负荷节点号
		1	6,9,12,18,24,34,3	88,41,43,51,53,56,58,62,66,69
	不可控	2	7,10,11,13	,16,22,23,25,26,28,33,
	负荷	2	44-47,4	9,52,59,60,63,65,67
		3		其余节点
П	可控负荷	3	2	7,37,50,57,68
			表 F2 线路段	分区
		Tab	le F2 Line sec	tion zoning
	区间		线路段	PGA 加权均值区域
	1		18-21	\overline{PGA}_1
	2	12-18,22	-27,33-35,55-58	\overline{PGA}_2
	3	2-12,28-	33,36-54,60-69	\overline{PGA}_3
	4		1,59	\overline{PGA}_4

表 F3 不同等级电杆及抗弯力矩

Table F3	Different grades	of poles and	bending moment
----------	------------------	--------------	----------------

电杆等级	抗弯力矩/(KN m)
G 级	48.76
I 级	58.5
K 级	78