

9-23-2022

## Optimization of distribution network resilience enhancement considering demand response

Xiuqing Yi

*College of Intelligence and Information Engineering, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, China*

Jie Gu

*School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

Shuqi Liu

*School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

---

### Recommended Citation

Yi, Xiuqing; Gu, Jie; and Liu, Shuqi (2022) "Optimization of distribution network resilience enhancement considering demand response," *Journal of Electric Power Science and Technology*: Vol. 37: Iss. 4, Article 4.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.004

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol37/iss4/4>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

# 考虑需求响应的配电网弹性提升优化

衣秀清<sup>1</sup>, 顾洁<sup>2</sup>, 刘书琪<sup>2</sup>

(1. 山东中医药大学智能与信息工程学院, 山东 济南 250355; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:**自然灾害的频发为配电网的供电可靠性、安全性带来严重威胁,在此背景下,为增强中低压配电网故障恢复能力,研究自然灾害场景下考虑用户需求响应的中低压配电网弹性提升技术。首先,综合考虑用户差异化供电可靠性需求以及需求响应的运行特性,建立衡量配电网弹性的指标——停电损失;其次,提出基于供电优先级的需求响应控制策略,并建立计及需求响应的配电网弹性提升优化模型;最后,以 IEEE 33 节点为例,对所述指标和模型进行验证。仿真结果表明:所提弹性提升优化模型可显著降低中低压配电网弹性恢复全过程的停电损失,提升灾害场景下配电网的运行弹性。

**关键词:**配电网;弹性;停电损失;供电优先级;需求响应

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.004 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2022)04-0029-09

## Optimization of distribution network resilience enhancement considering demand response

YI Xiuqing<sup>1</sup>, GU Jie<sup>2</sup>, LIU Shuqi<sup>2</sup>

(1. College of Intelligence and Information Engineering, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, China;  
2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The frequent occurrence of natural disasters make a serious threat to the reliability and safety of power supply in distribution network. Under the background, the distribution network elasticity improvement technology for the medium and low voltage power system considering user demand response is studied to enhance its fault recovery capability. Firstly, the demand of reliability for user's differentiated power supply and the operation characteristics of demand response is considered, and then an index to measure the resilience of distribution network is established-outage loss. Secondly, a demand response control strategy is proposed on the basis of the power supply priority. In the end, an optimization model of distribution network resilience enhancement considering demand response is developed. The IEEE 33-bus system is simulated to verify the index and the model. It is shown that the optimization model of resilience enhancement can significantly reduce the outage loss in the whole process of resilience restoration in distribution network and improve its resilience under disaster scenarios.

**Key words:** distribution network; resilience; outage loss; power supply priority; demand response

收稿日期:2021-02-10;修回日期:2021-07-05

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(SGSDLY00FCJS1900697)

通信作者:顾洁(1971-),女,博士,副教授,主要从事电力系统优化运行与规划研究;E-mail: gujie@sjtu.edu.cn

随着智能电网的建设,配电网加速向互动、自愈、高安全性与高可靠性发展。而近年来极端自然灾害频发并对电力系统安全造成了极大的威胁。构建能有效抵御各类自然灾害与多元设备扰动,并能在灾害及扰动后实现快速恢复的弹性配电网成为配电网建设的迫切需要。

目前,极端灾害事件对能源和电力系统的影响、考虑智能新技术的系统弹性增强与提升策略,已经成为国内外机构与学者的研究热点之一<sup>[1-4]</sup>。在运行层面上,现有研究主要从孤岛控制、故障管理、网络重构、供电恢复等角度分析不同技术对电网弹性的影响以及改善电网弹性的有效措施<sup>[5-6]</sup>;有学者从利用用户资源的角度,探讨了具有高度灵活性的微电网对系统网络重构的潜在优势<sup>[7]</sup>;一些学者针对配网供电恢复开展研究,提出了不同供电恢复策略,重点探讨了微电网技术在关键负荷供电恢复过程中的方式与效益<sup>[8]</sup>。

以上针对电力系统弹性影响的研究主要关注于系统设备管理、运行方式调整等因素,对用户侧资源如需求响应的应用较少涉及。本文围绕考虑需求响应的配电网弹性提升优化开展研究,提出评价配电网弹性的指标,在分析用户差异化供电可靠性和用户需求响应对中低压配电网影响的基础上,研究基于供电优先级的需求响应控制策略,建立考虑需求响应的配电网弹性提升的优化模型。

## 1 配电网弹性评价

### 1.1 配电网弹性的定义

弹性(resilience)的概念最早来自生态学领域,表示系统受到干扰后恢复原有状态的能力,此后弹性的概念被扩展到环境、工程等领域<sup>[9]</sup>。在电力系统中,配电网不仅要保证正常条件下的可靠运行,更需要能在极端灾害发生时维持必要的功能。目前国内外还没有对配电网弹性有明确统一的定义。本文将结合配电网特点,在小概率—高损失灾害下,将配电网弹性定义为配电网被破坏后快速恢复稳态的能力。

配电网弹性过程是配电网在受到灾害后恢复稳态的过程,如图1所示,弹性过程可分为5个状态:配电网最初处于稳定状态;受到灾害后配电网的性

能下降状态;稳定于故障状态;配电网对扰动作出响应并处于恢复状态;配电网恢复稳态。

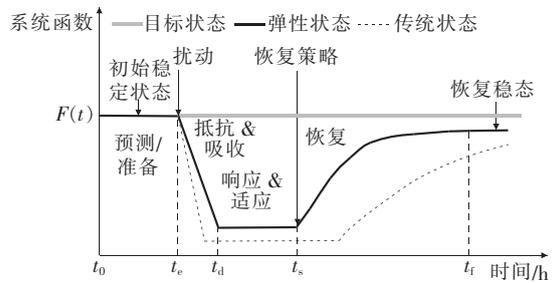


图1 配电网弹性过程

Figure 1 The process of a resilient distribution network through disruptions

### 1.2 配电网弹性评价的量化

为充分反应配电网在遭受灾害后供电的恢复能力,首先,本文将配电网的供电能力  $F(t)$  定义为配电网的总供电负荷;然后,将配电网的弹性量化为弹性过程中实际弹性曲线  $F_R(t)$  积分与期望性能曲线  $F_T(t)$  积分的比值,其定义<sup>[10]</sup>如下:

$$F(t) = \sum_{i \in N_{in}} P_i \quad (1)$$

$$R = \frac{\int_{t_e}^{t_f} F_R(t) dt}{\int_{t_e}^{t_f} F_T(t) dt} = 1 -$$

$$\frac{\int_{t_e}^{t_f} (F_T(t) - F_R(t)) dt}{\int_{t_e}^{t_f} F_T(t) dt} = 1 - \frac{H_{SI}}{\int_{t_e}^{t_f} F_T(t) dt} \quad (2)$$

式(1)、(2)中  $P_i$  为节点  $i$  的负荷;  $N_{in}$  为配电网供电节点集;  $t_e$  到  $t_f$  分别为配电网受到灾害开始扰动和配电网恢复稳定的时刻;为直观的从时间和空间上展示配电网的弹性性能,定义系统影响值  $H_{SI}$  为期望性能曲线  $F_T(t)$  与实际弹性曲线  $F_R(t)$  在  $t_e$  到  $t_f$  间所积分的差值。

当配电网遭受小概率—高损失灾害攻击时,将可能面临大规模负荷中断供电的情况,弹性配电网的恢复过程以尽量减少供电量缺额为主要目标,可靠性需求不同的用户负荷的供电恢复优先次序将会决定整个弹性恢复过程的社会总体效益损失。因此,对于中低压配电网抵御小概率—高损失灾害的弹性提升技术研究,仅仅依靠系统性能指标  $F(t)$  难以体现总体效益损失。为此,本文引入停电损失作为衡量用户差异化供电可靠性需求与配电网弹性

的指标。

## 2 用户侧资源对配电网弹性的影响

随着电力市场改革的推进,用户侧在电网的规划运行中将发挥重要作用。本文主要从用户差异化的供电可靠性需求及需求响应 2 个维度探讨用户侧资源对配电网弹性的影响。

### 2.1 用户差异化供电可靠性需求

停电损失的差异化决定了不同类型负荷的可靠性需求差异化,可以采用停电损失衡量负荷重要性。而用户的停电损失差异主要受用户的用电方式以及电能的使用特点的影响。

#### 1) 负荷类型。

根据 GB 50052/95《供配电系统设计规范》以及停电损失程度和用电特性的不同,可以将用户分为住宅、政府机关、商业类、小工业类、重要工业类、医

药卫生类和公共事业类共 7 种类型,不同类型的用户中断供电的影响如表 1 所示。

#### 2) 停电损失函数。

文献[11-12]采用用户调查法获取用户停电损失情况,并通过调查数据构造了不同类型用户的停电损失函数(sector customer damager function, SCDF),结果如表 2 所示。

表 1 不同类型用户中断供电影响

Table 1 Impact of power outage to different types of customers

供电影响	用户类别						
	住宅	政府机关	商业	小工业	重要工业	医药卫生	公共事业
人身伤亡	—	—	—	—	※	※	—
社会政治影响	—	※	—	—	—	※	※
环境污染	—	—	—	※	※	—	—
经济损失	※	※	※	※	※	※	※

注:※表示用户中断供电有该项影响

表 2 不同类型用户的停电损失函数

Table 2 SCDF of different types of customers 元/kW

停电时间/h	停电损失						
	住宅	政府机关	商业	小工业	重要工业	医药卫生	公共事业
1/60	0.028	12.073	9.995	45.500	10.360	63.401	537.30
1/2	1.470	21.774	38.119	75.600	20.150	139.836	1 243.29
1	5.292	51.045	104.360	159.980	42.660	247.530	1 625.59
2	11.023	65.118	203.730	431.930	98.120	409.071	2 018.14
4	36.453	84.872	382.570	826.370	166.840	707.705	2 119.14
8	78.002	116.270	770.720	1 300.750	275.220	1 176.990	2 304.16
24	244.200	241.810	979.730	1 800.750	375.220	1 473.620	3 044.26

### 2.2 需求响应对配电网弹性恢复的影响

针对配电网遭遇灾害后的大规模停电恢复问题,需求响应参与弹性恢复的方式以紧急需求响应(emergency demand response,EDR)为主。由于基于价格信号的需求响应具有计划性,且响应程度较弱,不具备迅速性,难以应对突发的、高风险的灾害攻击;而基于激励的直接负荷控制和可中断负荷的可控性强,响应迅速,且可响应容量大。因此,当面对中低压配电网遭受小概率—高损失灾害攻击的情况下,应着重考虑利用直接负荷控制和可中断负荷 2 种需求响应手段提高系统的弹性恢复能力。

随着电力市场的改革深化,为了适应供给侧和

需求侧的双重不确定性,需求响应(demand response, DR)被引入电力市场。广义的需求响应是指电力用户根据价格信号或者政策,改变原有用电模式的行为<sup>[13]</sup>。在配电网弹性恢复过程中,需求响应主要解决的是容量不足情况下的运行调度问题。容量不足问题从源—网—荷角度可分为源型和网型容量不足。源型容量不足是指电源容量不足,包括配电网、分布式电源容量以及上级电网可提供电能容量不足;网型容量不足是指配电网中的设备,包括变压器和线路等容量不足。2 种容量不足均会影响电网的安全稳定运行,尤其在配电网遭遇灾害后的故障修复过程中,更需要考虑故障引起的电网容量

不足问题,2种场景下需求响应技术都能够提高配电网弹性。

### 2.2.1 源型容量不足

1)含分布式电源的源型容量不足。

以图2所示的配电网为分析对象,节点33处接入分布式电源,假定该配网遭受灾害攻击后受灾害影响的故障线路包括1、7、12、13、22和25,线路25故障未修复前用户[26-33]与分布式电源DG形成孤岛。若DG出力无法满足孤岛内全部用户[26-33]总负荷需求,考虑差异化用户停电损失,并基于最小化弹性恢复过程的停电损失最小原则,应对可靠性要求较低即停电损失较少的用户负荷[26-30]采取需求响应措施。实施补偿费用较低的直接负荷控制措施,满足停电损失较大的工业用户[31-33]的用电需求,必要情况下按照可靠性要求由低到高的顺序依次采取中断负荷措施,从而尽最大可能恢复高可靠性需求用户供电,降低总停电损失。

2)上级电网可提供电能容量不足。

该容量不足情况与含分布式电源的源型容量不足相类似,将图2中节点33的DG改为接入上级配电网,当上级配电网可供电能容量不足时,需求响应提高弹性恢复的作用机理与上述类似,不再赘述。

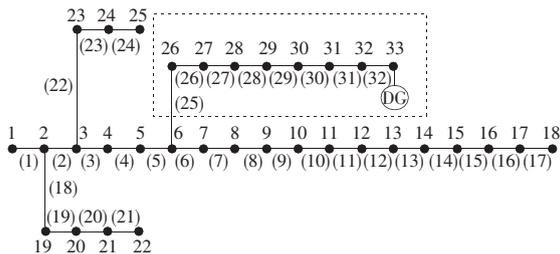


图2 含分布式电源的IEEE 33节点配网

Figure 2 IEEE 33 node distribution network with distributed generation

### 2.2.2 网型容量不足

在配电网多条线路发生故障的影响下,配网结构和网络潮流都会发生很大变化,配网中基于正常状态规划配置的设备容量可能会不足,在有限的设备容量下尽可能降低弹性恢复过程的停电损失则成为了提高电网弹性的关键所在。有文献采用配电网重构方法提高系统故障后弹性,假定重构结果如图3所示,配电网重构后线路[18-21]新增负载包括节点[10-15]负荷,若线路[18-21]容量不足,则不能满

足节点[10-15]负荷需求。在该种场景下,为了尽可能降低配电网停电损失,对于用户[19-22]可采取紧急需求响应措施,降低可靠性需求较低用户负荷量,将电能转供给可靠性需求高的用户,如用户[12]。

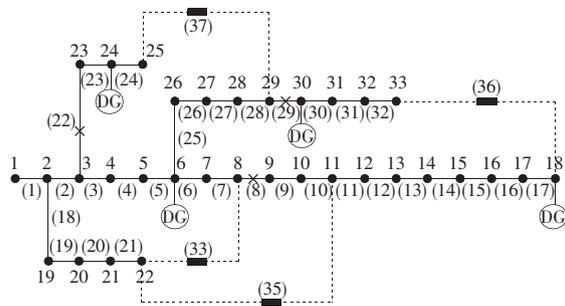


图3 配电网重构结果

Figure 2 Results of distribution network reconfiguration

综上所述,在考虑用户差异化供电可靠性需求的条件下,紧急需求响应措施能够应对配网容量不足风险,通过充分利用负荷的需求响应能力,有效降低系统在灾害攻击下的停电损失,提高配电网弹性。

## 3 考虑用户侧资源的配电网弹性提升

### 3.1 基于供电优先级的需求响应控制策略

配电网的弹性恢复可以采用简单的故障修复及其他主动恢复措施,然而在主动恢复措施中,配电网容易出现有功功率不足情况,如:分布式电源孤岛中的有功不足以及配电网重构中网络约束导致的有功不足,可以考虑采用有效的需求响应控制策略,从而以有限的有功供给能力保障可靠性需求较高的用户供电,降低停电损失。

1)目标函数。

供电优先级的确定可以根据负荷重要程度进行划分,如采用GB 50052/95《供配电系统设计规范》所规定的一、二、三级负荷进行划分。基于前文分析,停电损失可用于衡量配电网弹性,因此以停电损失为优化标准,提出已知供电缺额量的需求响应措施决策方法,从而在出现供电缺额情况下得到基于供电优先级(停电损失)的最优需求响应控制策略。

决策模型目标函数为

$$\min f = \sum_{j \in S} P_j^{\text{loss}} f_{\text{SCDF}}^{k_j}(t_j) + \sum_{j \in S} E_j^{\text{DR}} \delta^{\text{DR}} \quad (3)$$

式中  $S$  为供电缺额区域(孤岛)用户集;  $P_j^{\text{loss}}$  为节点  $j$  的负荷供电缺口, MW;  $f_{\text{SCDF}}^{k_j}(t)$  为负荷类型  $k_j$

的停电损失函数,元/MW,可根据表 1 中各类型负荷停电损失数据拟合得到; $t_j$  为用户  $j$  的需求响应停电时长; $E_j^{\text{DR}}$  为用户  $j$  的需求响应电量,即  $E_j^{\text{DR}} = [E_j^{\text{DLC}} E_j^{\text{IL}}]$ , MW · h;  $\delta^{\text{DR}}$  为直接和可中断负荷控制的补偿成本,即  $\delta^{\text{DR}} = [\delta^{\text{DLC}} \delta^{\text{IL}}]^T$ , 元/(MW · h)。

决策变量包括用户各时段的需求响应方式、需求响应量以及需求响应容量不足情况下的断电容量,时间尺度为小时。

## 2) 约束条件。

约束条件包括:供电区域电网潮流约束、电压水平约束、支路电流约束、响应功率约束、用户需求响应方式约束、最小响应时间约束、最大响应时间约束以及最小间隔时间约束,分别为

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + \\ B_{ij} \sin \theta_{ij}), i \in N_s \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - \\ B_{ij} \cos \theta_{ij}), i \in N_s \end{cases} \quad (4)$$

$$V_i^{\min} < V_i < V_i^{\max}, i \in N_s \quad (5)$$

$$I_l^2 < (I_l^{\max})^2, l \in L_s \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_i P_i^{\text{DLC}} \leq P_i^{\text{DLC}, \max} \\ v_i P_i^{\text{IL}} \leq P_i^{\text{IL}, \max} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_{i,t} + v_{i,t} \leq 1 \\ u_{i,t} + v_{i,t+1} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} (u_{i,t} - u_{i,t-1})(T_{D,i}^{\text{DLC}}(t-1) - T_{D,i}^{\text{DLC}, \min}) \leq 0 \\ (h_{i,t} - h_{i,t-1})(T_{D,i}^{\text{IL}}(t-1) - T_{D,i}^{\text{IL}, \min}) \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} (u_{i,t} - u_{i,t-1})(T_{D,i}^{\text{DLC}, \max} - T_{D,i}^{\text{DLC}}(t-1)) \leq 0 \\ (h_{i,t} - h_{i,t-1})(T_{D,i}^{\text{IL}, \max} - T_{D,i}^{\text{IL}}(t-1)) \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} (u_{i,t-1} - u_{i,t})(T_{U,i}^{\text{DLC}}(t-1) - T_{U,i}^{\text{DLC}, \min}) \leq 0 \\ (h_{i,t-1} - h_{i,t})(T_{U,i}^{\text{IL}}(t-1) - T_{U,i}^{\text{IL}, \min}) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

式(4)~(11)中  $N_s$  为供电缺额区域的节点集; $P_i$ 、 $Q_i$  分别为节点  $i$  的有功、无功注入; $V_i$  为节点  $i$  电压向量的幅值; $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别为导纳矩阵的实部、虚部,分别表示电导和电纳; $\theta_{ij}$  为  $i$ 、 $j$  节点电压间的相角差; $V_i^{\max}$ 、 $V_i^{\min}$  分别为节点电压的上限和下限; $I_l$ 、 $I_l^{\max}$  分别为支路  $l$  的电流大小、幅值上限; $L_s$  为供电缺额区域支路集; $u_i$  表示用户  $i$  是否参与直接负荷控制, $v_i$  表示用户  $i$  是否参与可中断负荷

响应,1 表示参与,0 表示不参与; $P_i^{\text{DLC}}$ 、 $P_i^{\text{IL}}$  分别为  $i$  节点的直接负荷控制、可中断负荷响应功率; $P_i^{\text{DLC}, \max}$ 、 $P_i^{\text{IL}, \max}$  为  $i$  节点的直接负荷控制、可中断负荷响应允许功率;式(8)第 1 式表示用户同一时段只能以一种方式参与需求响应,第 2 式表示用户不能交替响应 DLC 和 IL,仍需要考虑需求影响间隔时间; $T_{D,i}^{\text{DLC}}(t)$  和  $T_{D,i}^{\text{IL}}(t)$  分别表示用户  $i$  在  $t$  时段的累计参与直接负荷控制、可中断负荷响应时间; $T_{D,i}^{\text{DLC}, \min}$ 、 $T_{D,i}^{\text{IL}, \min}$  分别为 DLC 和 IL 的最小响应时间,即用户响应 DLC 和 IL 的最小持续时间; $T_{D,i}^{\text{DLC}, \max}$ 、 $T_{D,i}^{\text{IL}, \max}$  分别为 DLC 和 IL 的最大响应时间,即用户响应 DLC 和 IL 的最大持续时间; $T_{U,i}^{\text{DLC}}(t)$ 、 $T_{U,i}^{\text{IL}}(t)$  分别为用户  $i$  在  $t$  时段的累计不响应时间; $T_{U,i}^{\text{DLC}, \min}$ 、 $T_{U,i}^{\text{IL}, \min}$  为用户  $i$  的需求响应最小间隔时间,即用户 2 次响应 DLC 或 IL 之间的最小间隔时间;上述时间约束均由电网公司或负荷聚集商与用户签订的合同确定。

与正常运行调度相比,在紧急需求响应情况下,该策略假设:①不考虑直接负荷控制用户的负荷反弹;②用户同一时段只能参与一种需求响应方式。

## 3.2 小概率—高损失灾害事件的数学模型

对电网造成危害的小概率—高损失灾害事件有恐怖袭击、操作失误等人为灾害及地震、飓风等自然灾害,并且均具有不确定性高、建模难的特点。针对灾害事件建模,现有文献主要有建立灾害随机仿真模型和基于灾害历史数据进行灾害预测<sup>[14]</sup>。本文在飓风灾害时空特性模型的基础上,结合配电网中各小概率—高损失灾害事件的特点,推广建立小概率—高损失灾害事件的多阶段时空模型。

### 1) 飓风灾害的时空特性。

根据美国国家飓风中心的飓风前进路径可知,飓风的行进路径具有地理空间和时间特征。登陆后飓风受能量损失的影响,对电网设施的破坏能力逐步减弱。因此,本文假设飓风沿海登陆时首先对海岸线附近的电气元件造成破坏,对其他区域不造成影响。随着飓风行进,逐步对其他区域内的电气元件造成破坏。

### 2) IEEE 33 节点系统灾害事件时空模型。

为模拟飓风等灾害事件对配电网的影响,本文基于 IEEE 33 节点系统构建灾害事件时空模型。如图 4 所示,根据飓风的强度及行进路线将配电网划分为多个区域,从右往左表示飓风对配电网的破

坏能力越强。其中区域1离飓风登陆地最近,受到飓风破坏的时间最早、强度最高。随着飓风的前进,飓风对区域2、3的破坏能力逐渐减弱。

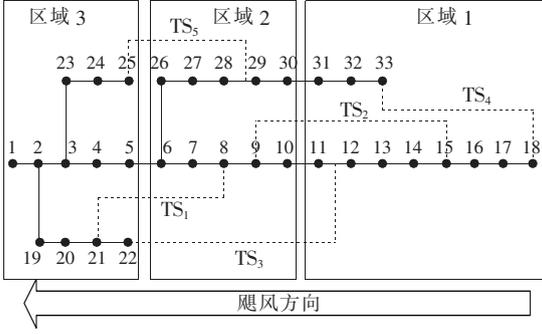


图4 基于IEEE 33节点系统的飓风模型

Figure 4 A hurricane occurrence model on the IEEE 33-node distribution system

根据飓风的时空特性,本文设置飓风在时段 $k$ 到达 $k$ 区域, $k$ 既表示时段也表示区域,总时段和总区域数为 $K$ 。配电网多阶段飓风灾害事件数学模型的定义如下:

$$\sum_{l \in Z_k} (1 - w_l(k)) \leq B_k \quad (12)$$

$$w_l(k) = w_l(k-1), \forall l \in \{L - Z_k\} \quad (13)$$

$$k \leq K \quad (14)$$

式(12)、(13)中 $Z_k$ 为第 $k$ 个区域的支路集; $L$ 为配电网总支路集; $w_l(k) = 1$ 、 $w_l(k) = 0$ 分别表示第 $k$ 个区域内支路 $l$ 在 $k$ 时段受到破坏和未受破坏; $B_k$ 为飓风的破坏强度,即在第 $k$ 个区域内的 $k$ 时段最多有 $B_k$ 条支路故障。式(13)表示区域 $k$ 外在时段 $k$ 的线路与上一时段的状态一致。

配电网弹性评价的目标是分析配电网在最劣灾害事件下的供电恢复能力,考虑到网络攻击、地震等其他类型灾害的发生不具有时间序列特征,并且可能在不同区域同时发生,对配电网的破坏强度也更大。本文假设配电网多区域同时遭到破坏,建立配电网在各区域同时遭受破坏的小概率—高损失灾害模型:

$$\sum_{l \in Z_k} (1 - w_l) \leq B_k \quad (15)$$

$$B_a = \sum_{k=1}^K B_k \quad (16)$$

其中, $B_a$ 为灾害事件的总攻击强度, $B_k$ 和 $w_l$ 定义同前文。

### 3.3 最劣灾害生成模型

灾害事件具有高度不确定性,为了兼顾配电网

由于灾害造成的各种故障情况,通常以最劣灾害事件对配电网进行弹性分析。为了得到配电网最严重的故障情况,本文假设灾害事件只会导致配电网支路故障,通过调整灾害事件的破坏强度和破坏的支路,最大限度地破坏配电网。

将受影响的支路作为决策变量,建立配电网最劣灾害事件生成模型(最大化SI):

$$\max_{x \in X} H_{SI_x} \quad (17)$$

式中 $X$ 为由攻击强度序列 $\{B_1, B_2, \dots, B_K\}$ 决定的所有可能灾害事件构成的集合; $H_{SI_x}$ 为灾害事件 $x$ 下系统影响值。式(17)受式(4)~(6)、(15)的约束。

配电网最劣灾害事件生成模型为一个混合整数非线性模型,采用整数编码遗传算法求解。

### 3.4 计及需求响应的配电网弹性提升优化模型

本文以停电损失作为弹性指标,构建计及需求响应的配电网弹性提升优化模型,充分考虑用户侧资源在弹性恢复中所起到的作用,并在出现区域供电缺额情况下,采用基于供电优先级的需求响应控制策略决策模型,给出区域内以关键负荷为优先次序的用户供电优化方案。模型目标函数为

$$\max R_{SCD} = \frac{C_{loss}^{\max} - C_{loss} - C^{DR}}{C_{loss}^{\max}} = 1 - \frac{\sum_{j \in S} P_j^{\text{loss}} f_{SCDF}^{kj}(t_j) + \sum_{j \in S} E_j^{DR} \delta^{DR}}{\sum_{j \in S} P_j^{\text{loss}} f_{SCDF}^{kj}(t_{\text{sum}})} \quad (18)$$

式中 $R_{SCD}$ 为配电网在小概率—高损失灾害事件下的弹性,无量纲; $C_{loss}^{\max}$ 、 $C_{loss}$ 分别为最劣灾害事件下系统弹性恢复过程中不计需求响应的最大停电损失、计及需求响应的停电损失; $C^{DR}$ 为需求响应补偿成本; $t_{\text{sum}}$ 为所有节点停电总时间;其余符号定义与式(3)相同。

在模型目标函数式(18)中,对基于停电损失的弹性评价指标作出修正,将需求响应补偿成本作为社会总停电损失的一部分。约束条件包括供电区域电网潮流约束式(4)、电压水平约束式(5)、支路电流约束式(6)。

## 4 算例分析

### 4.1 参数设置

本文采用IEEE 33节点系统模拟飓风灾害对

配电网的影响,并验证配电网弹性提升优化模型对配电网弹性提升的效果。IEEE 33 节点系统的参数设置:基准功率为  $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,基准电压为  $12.66 \text{ kV}$ ,节点电压约束分别为  $0.93, 1.07 \text{ p.u.}$ ,线路功率约束为  $5 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,拓扑结构见图 2。

### 4.2 模型建立

首先,采用文献[15]提出的基于配电网弹性提升的用户侧资源鲁棒优化配置模型,对容量为  $500 \text{ kW}$  的燃气轮机进行接入点优化配置(攻击强度  $B_1, B_2, B_3$  均为 2),结果表明,燃气轮机最佳接入点为节点 29,配置后的配电网弹性为  $0.4356$ ,鲁棒模型中针对该配置方案下的最劣灾害场景为  $[1, 12, 16, 19, 22, 25]$ ,如图 5 所示;各节点用户类型假定如表 3 所示;各节点负荷如表 4 所示。

然后,应用计及需求响应的配电网弹性提升优化模型,对灾后故障修复顺序进行优化,并在孤岛中源型容量不足情况下调用本文提出的需求响应控制策略,从而验证计及需求响应的配电网弹性提升效果。与不计及需求响应的弹性结果进行对比,并且考虑到小概率一高损失灾害攻击下的需求响应特点,可将考虑和不考虑需求响应约束这 2 种情况进行对比。

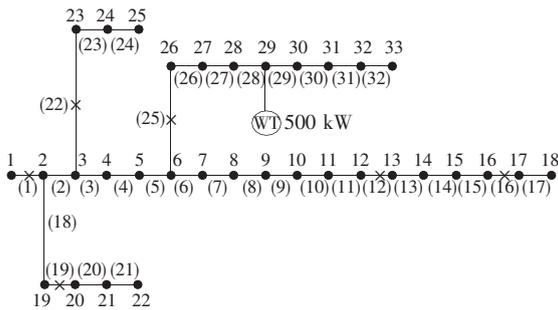


图 5 算例配网结构和故障线路

Figure 5 The IEEE 33-bus system with six fault lines

表 3 各节点用户类型

Table 3 User type of each node

用户类别	节点
住宅	2,3,6,7,8,17,18,19,20,21,27,28
政府机关	13,14
商业类	5,10,16,30
医药类	4,12
公共事业类	9,11,15,22,26,29
小工业类	23,25,31
重要工业类	24,32,33

表 4 各节点负荷

Table 4 Load of each node

节点	有功功率/kW	无功功率/kVar	节点	有功功率/kW	无功功率/kVar
1	0.000	0.000	18	0.222	0.178
2	0.266	0.178	19	0.289	0.178
3	0.200	0.133	20	0.333	0.266
4	0.244	0.178	21	0.333	0.222
5	0.222	0.155	22	0.444	0.133
6	0.266	0.200	23	0.444	0.222
7	0.155	0.111	24	0.333	0.266
8	0.333	0.222	25	0.266	0.222
9	0.289	0.178	26	0.178	0.133
10	0.222	0.155	27	0.222	0.111
11	0.222	0.155	28	0.222	0.155
12	0.211	0.155	29	0.266	0.155
13	0.444	0.333	30	0.289	0.155
14	0.400	0.333	31	0.155	0.089
15	0.289	0.222	32	0.155	0.089
16	0.333	0.266	33	0.133	0.089
17	0.333	0.222			

### 4.3 结果分析

1) 计及与不计及需求响应的弹性恢复结果。

算例中参考文献[16]与美国最大区域电力市场运营商(pennsylvania-newjersey-maryland, PJM)的紧急需求响应补偿机制,取直接负荷控制补偿为  $900 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h})$ ,用户的直接负荷控制上限为负荷量的  $10\%$ ,可中断负荷补偿为  $3150 \text{ 元}/(\text{MW} \cdot \text{h})$ ,假定二、三级负荷可中断全部负荷,一级负荷可中断  $50\%$  的负荷,但具体需要依据需求响应合同确定,最小、最大响应时间分别为  $2, 4 \text{ h}$ ,最小间隔时间为  $2 \text{ h}$ ,优化结果如表 5 所示,所得到的修复顺序均为  $1 \rightarrow 22 \rightarrow 25 \rightarrow 12 \rightarrow 19 \rightarrow 16$ 。

表 5 不同场景下的弹性恢复结果( $C_{WT} = 500 \text{ kW}$ )

Table 5 Resilience restoration results under different scene ( $C_{WT} = 500 \text{ kW}$ )

场景	R	R <sub>SCD</sub>
计及需求响应(不考虑约束)	0.4356	0.1767
计及需求响应(考虑约束)	0.4356	0.1602
不计及需求响应	0.4356	0.1523

由优化结果可知,在不考虑需求响应约束情况下,线路 25 未修复前用户 26~33 以燃气轮机为电源形成孤岛,但用户 26~33 总负荷值达 920 kW, 500 kW 的燃气轮机不能满足孤岛内全部负荷的用电需求。针对该孤岛可考虑采用基于供电优先级的需求响应控制策略,具体需求响应控制策略:住宅用户 27 和 28、公共事业类用户 26 和 29 中断全部负荷,合计约 300 kW,商业类用户 30 中断 78 kW 的负荷,用户 31、32 和 33 通过直接控制负荷需求响应减少了 42 kW 供电需求,从而满足孤岛内剩余用电需求,总需求响应补偿数额约为 23 984.8 元,降低停电损失 124 861.2 元,并使配电网基于停电损失的弹性指标提升约 16%。

同时,算例结果表明,无论是否计及需求响应,基于系统影响值的弹性指标不变,这是由于修复顺序相同且配电网供电能力相同,需求响应本质上只改变了供电对象,但配电网总的供电容量不变。

当计及需求响应约束后,在线路 25 未修复前约 20 h 内,孤岛内所有用户以需求响应的响应时间约束为周期,采用基于供电优先级的需求响应控制策略进行需求响应控制,从而导致部分时段只能对用户做停电处理,停电损失有所升高,基于停电损失的弹性指标降低。但相对于不考虑需求响应,系统基于停电损失的弹性指标仍有 5.18% 的提高。

## 2) 不同场景下的弹性恢复结果对比。

将接入的燃气轮机容量增大为 800 kW,并重新进行弹性提升优化计算,得到计算结果如表 6 所示。

表 6 不同场景下的弹性恢复结果( $C_{WT}=800$  kW)

Table 1 Resilience restoration results under different scene ( $C_{WT}=800$  kW)

场景	$R$	$R_{SCD}$
计及需求响应(不考虑约束)	0.442 6	0.187 2
计及需求响应(考虑约束)	0.442 6	0.183 6
不计及需求响应	0.442 6	0.178 2

对比表 5、6 结果,得出:

1) 当不考虑需求响应约束时,在接入 800 kW 的燃气轮机情况下(场景 2),修复顺序与接入 500 kW 的燃气轮机时(场景 1)相同;

2) 与场景 1 相比,场景 2 下基于系统影响值和停电损失的弹性指标均有所提高,说明燃气轮机接

入容量增大,有助于系统弹性的提升。

场景 2 下由于接入的燃气轮机容量增大,在线路 25 未修复前,用户 26~33 所形成的孤岛供电缺额少于场景 1,2 种场景在调用需求响应的方案上存在明显差异,即场景 2 下除住宅用户 27 外,其他用户均响应负荷值 10% 的直接负荷控制量,用户 27 响应可中断负荷,从而满足孤岛内剩余用电需求,需求响应补偿成本为 3 669.4 元,可减少停电损失 38 425 元。场景 1 则为了保障供电安全,弥补供电缺额,对部分用户实施了按上限进行直接负荷控制外,还对多个用户实施了中断全部负荷的策略,与 2 种响应行为的成本及响应能力的约束相符。

当计及需求响应约束时,需求响应模式与场景 1 结果类似,即孤岛内所有用户以需求响应的响应时间约束为周期,按照供电优先级的模式进行需求响应控制,进而导致在需求响应能力不足阶段只能对部分用户做停电处理,增大停电损失,但相对于不考虑需求响应场景,计及需求响应后仍有 3.03% 的提高。

## 5 结语

本文研究了计及用户侧资源影响的配电网弹性提升技术,以停电损失刻画配电网弹性恢复效果,计及用户差异化的可靠性需求及需求响应影响建立了配电网弹性提升优化模型,并针对配电网在遭遇灾害攻击下的源型和网型容量不足问题,提出基于供电优先级的需求响应控制策略,以有效提高配电网的弹性。

1) 由本文建模过程及算例验证分析可知,在配电网遭遇小概率—高损失灾害攻击后的弹性恢复过程中,本文提出的基于供电优先级的需求响应控制策略能够通过合理的需求响应计划,安排解决配电网的容量不足问题,有效地减少弹性恢复过程的停电损失。

2) 需求响应技术本质上并未改变配电网的供电能力,因此,基于系统影响值的弹性指标并不受到需求响应计划安排的影响。在考虑用户差异化供电可靠性需求的条件下,应建立完善的需求响应机制,更好地做好灾后供电恢复。

## 参考文献:

[1] 于士斌,徐兵,张玉侠,等. 智能配电网自愈控制技术综

- 述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 65-70.
- YU Shibin, XU Bing, ZHANG Yuxia, et al. Review on self-healing control technique in smart distribution grid [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5): 65-70.
- [2] 马睿, 顾洁, 彭虹桥. SNOP 优化配置的多维效用合并模型[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 75-82.
- MA Rui, GU Jie, PENG Hongqiao. Multi-attribute utility merge model of SNOP optimal allocation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 75-82.
- [3] 郑洁云, 胡梦月, 胡志坚, 等. 考虑可靠性及需求响应的配电网规划模型[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 173-182.
- ZHENU Jieyun, HU Mengyue, HU Zhijian, et al. Multi-objective planning model of distribution network considering reliability and demand response [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 173-182.
- [4] 梁海平, 石皓岩, 王岩, 等. 基于提升韧性的输电网灾后应急维修策略优化[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 142-151.
- LIANG Haiping, SHI Haoyan, WANG Yan, et al. Resilience-improving based optimization of post-disaster emergency maintenance strategy for transmission networks [J]. Electric Power, 2022, 55(3): 142-151.
- [5] 刘畅, 黄杨, 杨昕然, 等. 计及储能及负荷转供协同调度的城市电网弹性运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 56-66.
- LIU Chang, HUANG Yang, YANG Xinran, et al. Flexible operation strategy of an urban transmission network considering energy storage systems and load transfer characteristics [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 56-66.
- [6] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 台风灾害下基于 V2G 的城市配电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 130-139.
- YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Vehicle-to-grid based resilience promotion strategy for urban distribution network under typhoon disaster [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 130-139.
- [7] LI J, MA X Y, LIU C C, et al. Distribution system restoration with microgrids using spanning tree search [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 3021-3029.
- [8] MOTA A A, MOTA L T M, MORELATO A. Visualization of power system restoration plans using CPM/PERT graphs [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1322-1329.
- [9] 郭艺, 姜新丽, 王波. 基于 CDOA 算法的配电网弹性提升方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5): 56-64+78.
- GUO Yi, JIANG Xinli, WANG Bo. Method to improve the elasticity of distribution network based on CDOA algorithm [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5): 56-64+78.
- [10] BARKER K, RAMIREZ-MARQUEZ J E, ROCCO C M. Resilience-based network component importance measures [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 117: 89-97.
- [11] 周莉梅, 范明天. 城市电网用户停电损失估算及评价方法研究[J]. 中国电力, 2006, 39(7): 70-73.
- ZHOU Limei, FAN Mingtian. Research on customer outage cost assessment and its evaluation method in urban electric power network [J]. Electric Power, 2006, 39(7): 70-73.
- [12] WACKER G, BILLINTON R. Customer cost of electric service interruptions [J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(6): 919-930.
- [13] 李鑫, 杨方, 肖湘晨, 等. 智能电网中用电感知的数据分析需求响应方案研究 [J]. 电测与仪表, 2022, 59(2): 30-37.
- LI Xin, YANG Fang, XIAO Xiangchen, et al. Research on data analysis demand response scheme of power consumption perception in smart grid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2): 30-37.
- [14] 黄景光, 陈波, 林湘宁, 等. 基于乌鸦搜索算法的孤岛微网多目标优化调度 [J]. 高压电器, 2020, 56(1): 162-168.
- HUANG Jingguang, CHEN Bo, LIN Xiangning, et al. Multi-objective optimal operation of islanded microgrid based on crow search algorithm [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 162-168.
- [15] 马睿. 配电网弹性分析模型及弹性提升技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [16] 韩俊, 谢珍建, 黄河, 等. 基于停电损失计算与成本分析的配电网单元制供电网格可靠性规划 [J]. 智慧电力, 2020, 48(1): 63-68+117.
- HAN Jun, XIE Zhenjian, HUANG He, et al. Unit mesh reliability planning for distribution network based on outage cost calculation and cost analysis [J]. Smart Power, 2020, 48(1): 63-68+117.