DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191025

面向弹性配电网防灾减灾的组件重要度评估方法

赵晓龙[1]，方恒福[1]，王 罡[2]，杨红磊[1]，孙辰军[3]，王 越[4]

(1. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；2. 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司，河北 保定 071800；
3. 国网河北省电力有限公司，河北 石家庄 050022；4. 中国农业大学，北京 100083)

摘要：极端灾害事件日益频发，电力系统在小概率、大影响灾害事件下的弹性指标受到学术界、工业界的广泛关注。无论在灾害前的组件加固策略或者灾害期间的组件抢修策略中，若能够考虑灾害特性、系统运行等因素，动态辨识对配电网弹性提升更为有效的关键组件，将大大提高配电网防灾减灾的能力。面向弹性配电网防灾减灾，提出组件重要度评价指标与评估方法。首先，基于比例风险模型建立考虑天气、老化等因素影响的故障率模型，基于逆变换采样法生成灾害故障场景。其次，在每个场景中，假设组件 i 始终在线、始终离线两种情形，分别计算配电网弹性恢复最优方案。然后，对比两种恢复方案下系统弹性变化，评估组件 i 重要度指标。最后，建立收敛条件以保证评估精度。算例验证了评估指标与评估方法的有效性。

关键词：弹性配电网；组件重要度；比例风险模型；蒙特卡罗

Component importance indices evaluation considering disaster prevention and mitigation in resilient distribution systems

ZHAO Xiaolong[1], FANG Hengfu[1], WANG Gang[2], YANG Honglei[1], SUN Chenjun[3], WANG Yue[4]

(1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China; 2. Xiong'an New Area Power Supply Co., State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Baoding 071800, China; 3. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050022, China; 4. China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Since extreme disasters become more frequent with climate change, resilience indices of power systems having low probability but large impact events gains increasing attention in both academia and industry. Either in the component hardening strategy before disaster or the rush repair strategy during disaster, disaster prevention and mitigation of distribution systems will be greatly improved if critical components can be identified dynamically especially for disaster characteristics and operational condition. This paper proposes component importance indices and evaluation methods for disaster prevention and mitigation in distribution systems. First, the proportional hazard model is introduced to model failure rate where influencing factors, such as aging condition and external weather condition, are considered. The inverse sampling method is introduced to generate outage scenarios. Then the paper assumes the status of component *i* online and offline in each scenario to calculate corresponding resilience restoration decisions. The importance indices of *i* based on the resilience difference between the two restoration decisions are evaluated. Finally, the convergence criterion is established to ensure accuracy. The rationality and effectiveness of the proposed indices and method are verified in case studies.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. PDB17201800056).

Key words: resilient distribution systems; component importance; proportional hazard model; Monte Carlo

0 引言

极端灾害事件日益频发，电力系统结构日趋复杂，小概率、大影响的灾害事件给电力系统带来极大经济损失，电力系统愈发重视配电网的防灾减灾能力。为了研究电网在小概率、大影响事件下的安全性能，弹性(Resilience)在近些年来引入到电力系统领域。弹性最早由 Holling 教授在 1972 年提出[1]，用以描述生态系统应对冲击事件的适应能力与恢复

基金项目：国家电网公司总部科技项目资助(PDB17201800056)“雄安新区高可靠配电网关键技术研究”

能力，随后受到生物学、医学、工程等领域的广泛关注。在电力系统领域尚未形成关于弹性的统一定义，相关研究中电力系统弹性一般是指系统应对外部冲击时能够尽快返回到冲击前的状态并能够更好抵御未来灾害事件的能力[2-6]。

在配电网防灾减灾工作中，如何在短时间内有限的人力物资下，综合考虑灾害特性、运行状态、恢复操作等因素，动态辨识对配电网弹性提升更加重要的关键组件，具有重要研究价值与实际意义。通过配电网组件重要度的动态辨识，可以帮助电网管理者在灾害前组件加固、灾害中组件抢修、灾害后组件恢复等阶段中科学分配资源，改善配电网灾害预防与应对能力。

一些现有研究中讨论分析了系统组件的重要度指标。现有成果从图论、可靠性理论、连锁故障理论、配网运行状态等不同方面做了研究。文献[7-8]图论相关理论为基础，如多值决策图，贝叶斯网络，高风险模式树等，对系统中组件的重要度进行分析。文献[9]从可靠性数学理论出发，采用了马尔科夫链模拟场景，量化评估了组件对系统可靠性的增益。文献[10]基于电力系统连锁故障模型，提出了考虑连锁故障时序行为的重要线路辨识方法。文献[11-19]考虑了配电网运行状态对组件重要度进行评估，配电网中常见的运行异常被考虑在内，如负荷冲击、故障断线、变压器故障模式、$N-k$ 故障等，在不同配电网运行状态下进行组件重要度分析。

然而，上述配电网组件重要度评估的研究中，尚存在一定不足。首先，现有研究较少考虑弹性配电网的灵活恢复策略。弹性配电网网架可以根据实际情况进行拓扑重建和负荷转供等恢复策略，网络拓扑的改变会影响组件在系统中的重要性。其次，灾害影响范围、严重程度随时间变化，现有组件重要度研究中对灾害变化特性考虑较少，尚需根据灾害情况对组件重要度进行动态辨识。最后，配电网组件对系统弹性的影响有待深入探索，考虑电网弹性指标的组件重要度评价研究较少。

在考虑配电网弹性指标的设备重要度评价方面，文献[20]考虑了极端天气的影响，提出了若干配电网弹性评价指标与计算方法，并给出了提升配电网防灾弹性的提升措施。文献[21]提出了弹性的广义定义式，并结合配电网参数条件，给出了弹性因素的量化计算方法。文献[22-23]通过综合考虑多方因素，提出了配电网弹性指标评价体系，并给出了指标融合的综合评价方法。文献[24]从系统弹性指标出发，从组件故障对系统弹性影响、性能恢复时间两个方面定义了组件重要度，文献[25]考虑了设备故障对系统弹性影响、设备正常对系统弹性提升两个方面，建立系统组件重要度指标。然而文献[24-25]基于通用化的图论模型，对配电网运行特性考虑不足。文献[26]从配电网弹性指标出发，评估风暴灾害影响的系统组件重要度，从系统弹性的角度评估辨识系统重要组件。文献[27]从系统修复时间、弹性递减价值两个方面，定义了输电网络设备重要度指标。文献[26-27]考虑电网运行特性，没有考虑配电网的重构恢复策略对组件重要度的影响。

现有关于弹性配电网相关研究中较少涉及组件重要度评估问题，已有的重要度评估研究对配电网弹性恢复策略考虑较少，无法有效辨识对防灾减灾更为有效的关键组件。如何考虑外部灾害特性与系统运行状态，从配网弹性的角度，评价配电网不同组件的重要性，动态辨识对防灾减灾影响较大的关键元件，相关研究尚有待深入探索。

本文提出面向防灾减灾的弹性配电网组件重要度评估方法，主要贡献总结如下：

1) 提出了面向防灾减灾的弹性配电网组件重要度的综合评估框架。该框架可以考虑了灾害特性、恢复策略、设备老化等多方面影响，动态评估组件重要度。

2) 提出了三种基于系统弹性的组件重要程度度量指标和评估方法，分别是失负荷支撑重要度、潮流支撑重要度和电压支撑重要度。

1　组件重要度评估的整体框架

本文所建立组件动态重要度评估体系基于以下思想：当恶劣灾害作用于电网时，所有设备都有可能发生随机故障，如果组件 l 通过加固、维护等措施，能够抵抗恶劣灾害影响，将有助于电网防灾减灾安全性的提升。然而，不同设备对系统安全性的提升是不同的，对防灾减灾的重要性不尽相同。重要度指标应能够考虑灾害预测情况、设备老化情况、电网运行情况等多方面因素，动态反应在本次防灾减灾工作中的重要设备。

因此，基于上述思想，本文首先建立元件故障率模型与场景采样方法，在每个场景中假设组件 l 始终正常、始终故障两种极端情况，分别计算弹性配网灾害恢复方案，得到两种情况下系统弹性指标的变化，进而得出组件 l 对系统防灾减灾性能的影响，影响程度越大则重要度越高。

配电网典型弹性曲线如图 1 所示，图中用颜色区分出灾害作用前、作用中、作用后的不同发展阶段。图 1 中，红色虚线与黑色实线表示这两种情况下的弹性曲线。值得指出的是，考虑系统不同物理

特性可以得到不同的弹性曲线，也就有不同的弹性重要度指标。

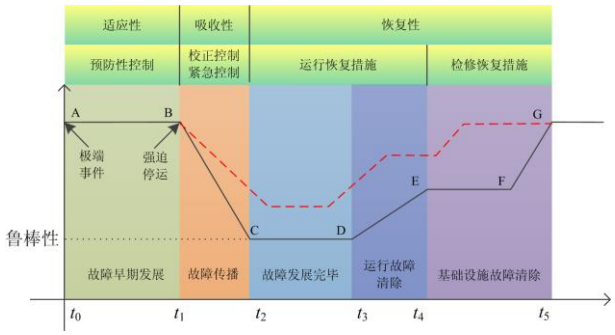

图 1 配电网典型弹性曲线

Fig. 1 Typical resilience curve in distribution systems

图 2 给出了弹性配电网组件重要度评估的整体框架，可分为数据获取、灾害故障场景生成、弹性配电网灾害恢复、组件重要度评估、指标收敛判定五个部分。

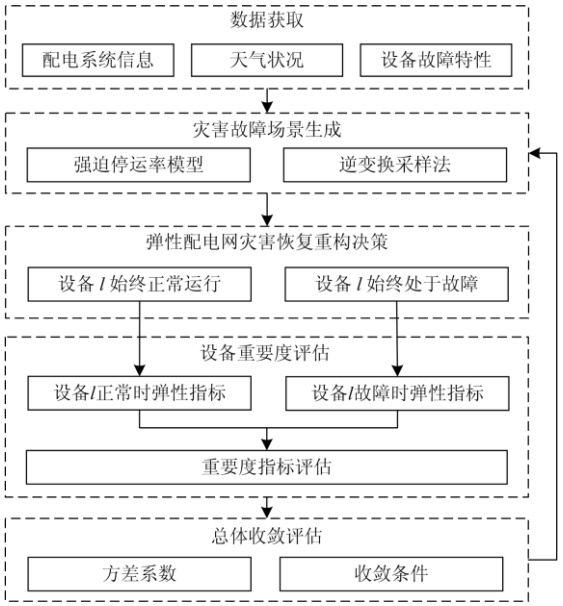

图 2 弹性配电网组件重要度评估框架

Fig. 2 Framework of component importance identification

1) 数据初始化阶段，确定系统参数、负荷信息、灾害影响范围、恶劣程度等信息。

2) 弹性配电网故障场景生成阶段，考虑到在灾害事件影响下，即使短期时间内也可能发生多元件随机故障，引入比例风险模型构建组件时变停运率。为考察组件 l 对弹性配电网灾害抵抗及恢复能力的影响，假设元件 l 始终故障、始终运行两种情况，剩余元件处于随机故障过程中，模拟灾害影响过程，生成系统故障场景。

3) 弹性配电网灾害恢复阶段，在故障场景 s 中，在组件 l 始终故障、始终运行两种情况下，建立弹性配电网灾害恢复重构模型，在进行物理抢修之前可通过负荷转供实现部分用户的恢复供电。

4) 弹性配电网组件重要度评估阶段，依据在组件 l 始终故障、始终运行两种情况下的灾害恢复方案，并评估两种方案下的系统弹性曲线的变化，该变化量可作为组件 l 对系统防灾减灾性能影响的度量，即为组件 l 的弹性重要度。

5) 总体收敛评估阶段，根据弹性重要度指标的方差系数判断当前样本能否代表整体信息。方差系数常用于约束蒙特卡罗过程的不确定性，若方差系数过大，则说明现有样本无法代表整体特征。方差系数如式(1)所示，本文 ε 取为 0.05。当满足收敛条件时，终止计算；否则继续生成新的故障场景并进行弹性重要度指标评估。

$$cv_l=\frac{\sqrt{\dfrac{1}{ns(ns-1)}\sum_{s=1}^{ns}\left(x_l^s-\dfrac{1}{ns}\sum_{s=1}^{ns}x_l^s\right)^2}}{\dfrac{1}{ns}\sum_{s=1}^{ns}x_l^s} \tag{1}$$

式中：ns 为场景数量；x_l^s 代表重要度指标。

2 灾害故障场景生成

基于比例风险模型与逆变换采样法生成灾害故障场景。本文只考虑线路故障，用以模拟线路跳闸、断线等随机失效，而其他配网设备的故障也可加入本文所提出的框架中。

2.1 线路故障率模型

本文采用比例风险模型(Proportional Hazard Model)对配网线路故障率进行建模。比例风险模型是 1972 年英国数学家 D. R. Cox 研究存活问题时提出的统计模型[28]，该模型可以很好地量化不同影响因素对个体存活率的影响，随后该模型广泛用于工程、生物、医学等领域。比例风险模型由基准函数(Baseline function)、连接函数(Link function)两部分构成，其表达式为

$$\lambda(t,\boldsymbol{Z}(t))=\lambda_0(t)\cdot\psi(\boldsymbol{Z}(t))=\frac{\beta t^{\beta-1}}{\alpha^{\beta}}\cdot\mathrm{e}^{\gamma\boldsymbol{Z}(t)} \tag{2}$$

式中：$\lambda_0(t)$ 是基准函数(Baseline Function)，用来描述基本老化过程；$\psi(\boldsymbol{Z}(t))$ 是连接函数(Link Function)用来量化协变量 $\boldsymbol{Z}(t)$ 对故障率的改变。协变量可以是影响元件故障过程的不同因素[29]，可以是外部因素，比如天气状态、温度湿度等，也可以是内部因素，比如运行工况、零件状态等。本文使用威布尔型基准函数，使用指数型连接函数，只考虑天气状态协变量 $\boldsymbol{Z}(t)\in\{0,1,2\}$，其中 0 为正常天

气，1 为不利天气，2 代表恶劣灾害。

2.2 灾害故障场景生成

给定故障率函数 $\lambda(t,\boldsymbol{Z}(t))$，元件故障概率累积分布函数 $F(t)$计算公式为

$$F(t)=P(T\le t)=1-P(T>t)=1-\exp\left\{-\int_0^t\lambda(s,Z(s))\mathrm{d}s\right\} \tag{3}$$

基于式(3)利用逆变换采样法即可生成故障样本：

1) 采样区间[0,1]均匀随机变量 u；

2) 计算使故障概率 $F(t)\leqslant u$ 的最大的 t。

得到元件的故障时刻后，利用指数分布对抢修时间进行采样，即可得到一个完整的故障−修复周期。重复此过程可得到所有元件在仿真区间内的状态。

3　弹性配电网灾害恢复策略

随着配电网自动化的发展，配电网重构恢复措施应用于越来越多的智能配电网中，大大提升了配电网安全性与灵活性。在所提出的重要度评估框架中，也考虑了灾害影响下的弹性配电网恢复策略。基于所生成的灾害故障场景，在每个场景下假设组件 l 始终正常、始终故障两种极端情况，分别计算最优重构恢复策略，进而得到两种情况下的系统失负荷量、电压偏移、潮流分布等安全指标。

本文采用的配电网重构恢复模型基于二阶锥规划方法。由于原始交流潮流方程是一组非凸非线性的等式方程，加入到优化问题中难以找到全局最优解，因此建立交流潮流的二阶锥松弛变换，并据此建立配电网重构的二阶锥规划模型。

3.1 交流潮流的二阶锥松弛变换

传统的交流潮流模型为

$$p_{mn}=V_m^2G_l-V_mV_n\left(G_l\cos\theta_{mn}+\beta_l\sin\theta_{mn}\right) \tag{4}$$

$$q_{mn}=-V_m^2\left(B_l+B_l^{\mathrm{sh}}/2\right)+V_mV_n\left(B_l\cos\theta_{mn}-G_l\sin\theta_{mn}\right) \tag{5}$$

式中：V_m、V_n 分别表示节点 m 和 n 的电压幅值；G_l、B_l 和 B_l^{sh} 分别表示线路 l 的串联电导、串联电纳和并联电纳；θ_{mn} 表示节点 m 和 n 之间的相角差；p_{mn} 与 q_{mn} 分别表示节点 m 到节点 n 的有功、无功潮流。

文献[30]提出了交流潮流的二阶锥松弛变换方法，文献[31]进一步证明了在辐射状配电网中，满足一些温和的充分条件下，二阶锥松弛可以取到原问题全局最优解。为进行二阶锥松弛变换，引入了辅助变量 $u_m^l=V_m^2/\sqrt{2}$，$r_l=V_mV_n\cos\theta_{mn}$ 和 $t_l=V_mV_n\sin\theta_{mn}$，则式(4)与式(5)可分别表示为

$$p_{mn}=\sqrt{2}G_lu_m^l-G_lr_l-B_lt_l \tag{6}$$

$$q_{mn}=-\sqrt{2}\left(B_l+B_l^{sh}/2\right)u_m^l+B_lr_l-G_lt_l \tag{7}$$

几个辅助变量的应满足等式关系 $r_l^2+t_l^2=2u_m^lu_n^l$。对该等式约束进行放缩，建立二阶锥松弛约束：

$$r_l^2+t_l^2\le 2u_m^lu_n^l \tag{8}$$

3.2 弹性配电网灾害恢复模型

弹性配电网可以通过网络重构进行运行层面的供电恢复，而物理故障则需要进行故障后检修才能消除[32-34]。恢复目标是最小化灾害故障下的系统电力短缺(ENS)。配电网大多环网建设，开环运行，假设所有主干线路都参与网络重构，建立基于网络重构的灾害恢复模型如下：

$$\min\sum\nolimits_{m\in N}ENS_m \tag{9}$$

s.t.　式(6)—式(8)

$$\alpha_l=\beta_{mn}+\beta_{nm},\forall l\in L \tag{10}$$

$$\sum\nolimits_{n\in N(m)}\beta_{mn}\le 1,\ \forall m\in N/N_{\mathrm{s}} \tag{11}$$

$$\sum\nolimits_{n\in N(m)}\beta_{mn}=0,\ \forall m\in N_{\mathrm{s}} \tag{12}$$

$$\beta_{mn}\in\{0,1\},\ 0\le\alpha\le 1,\ \forall l\in L \tag{13}$$

$$ENS_m-PD_m=\sum\nolimits_{n\in N(m)}p_{mn},\ \forall m\in N \tag{14}$$

$$QR_m\cdot ENS_m-QD_m=\sum\nolimits_{n\in N(m)}q_{mn},\ \forall m\in N \tag{15}$$

$$0\le u_m^l\le\frac{V_{m,\max}^2}{\sqrt{2}}\alpha_l,\ \forall m\in N \tag{16}$$

$$0\le u_m-u_m^l\le\frac{V_{m,\max}^2}{\sqrt{2}}\left(1-\alpha_l\right),\ \forall m\in N \tag{17}$$

$$\sqrt{2}A_lu_m^l-\sqrt{2}B_lu_n^l-2C_lr_l+2D_lt_l\le I_{(l,\max)}^2,\ \forall l\in L \tag{18}$$

$$0\le r_l\le V_{m,\max}V_{n,\max},\ \forall l\in L \tag{19}$$

$$-V_{m,\max}V_{n,\max}\le t_l\le V_{m,\max}V_{n,\max},\ \forall l\in L \tag{20}$$

$$\frac{V_{m,\min}^2}{\sqrt{2}}\le u_m\le\frac{V_{m,\max}^2}{\sqrt{2}},\ \forall m\in N \tag{21}$$

$$u_m^l\ge 0,\ \forall m\in N \tag{22}$$

$$\alpha_l\le y_l,\ \forall l\in L \tag{23}$$

式中，约束式(10)—式(13)限制了配网保持树状结构，不能出现环网，其中 α_l 是表示线路连接状态的二元变量，如果线路 l 连接则为 1，否则为 0；β_{mn} 是二元变量，若节点 n 是节点 m 的母节点，则为 1，否则为 0。L 表示所有线路构成的集合，N 表示所有节点的构成集合，N_{s} 表示变电站节点构成集合，N/N_{s} 表示非变电站节点所构成的集合。约束式(14)、式(15)为节点有功功率和无功功率的平衡约束，其中 ENS_m

表示节点 m 的有功失负荷，系统的无功负荷减少与有功负荷削减成固定比例，其中 QR_m 是节点 m 的无功切除比例。约束式(16)—式(18)将网络结构变量 α_l 与电压辅助变量 u_m^l 联系起来，电压辅助变量 u_m^l、u_n^l 表示线路始端电压、末端电压，线路在网连接时，该辅助电压等于相连节点的电压，线路出现故障或者重构操作断开时，该辅助变量为 0。约束式(18)限制了线路容量。约束式(19)—式(22)给出了辅助变量 r_l、t_l 和 u_m 的上下限。约束式(23)中，y_l 表示采样故障场景中线路l的故障状态，若线路 l 发生故障，则为 0，否则为 1。该约束表明，若线路 l 在当前场景中处于故障状态，则连接状态一定为 0。

4 弹性配电网组件重要度评估

本文从灾害影响下的电力系统负荷供给、电压偏移、潮流分布三个方面的弹性指标出发，构建相应的是失负荷支撑重要度、电压支撑重要度和潮流支撑重要度。

1) 失负荷支撑重要度

设备 l 失负荷支撑重要度θ_l 定义为在线路 l 始终可靠、始终故障两种情况下，负荷供给弹性指标的变化量。该指标越大，说明线路 l 对系统失负荷恢复影响越大，对系统弹性的重要度也就越高，其数学表达为

$$\theta_l = \frac{1}{ns}\sum_{s=1}^{ns}\theta_l^s \tag{24}$$

式中：ns 为场景数量；θ_l^s 是场景 s 下线路 l 失负荷支撑重要度指标。

$$\theta_l^s = \frac{\sum_{t=1}^{nt}\left(ENS_{l,t,0}^s - ENS_{l,t,1}^s\right)}{\sum_{l\in L}\left(\sum_{t=1}^{nt}ENS_{l,t,0}^s - ENS_{l,t,1}^s\right)} \tag{25}$$

式中：$ENS_{l,t,0}^s\left(ENS_{l,t,1}^s\right)$为假设设备 l 始终离线(在线)时场景 s 中 t 时刻的系统缺失电量；ns 为随机场景的总数量；nt 为仿真总时长。式(25)中，分子表示设备 l 始终在线、始终故障两种情况下系统失负荷弹性曲线所围面积的变化量，分母表示遍历所有线路后弹性曲线面积变化的总和，该比例可以表示考虑灾害影响情况下，线路 l 在系统所有线路中面向失负荷支撑的相对重要程度。

2) 电压支撑重要度

设备 l 电压支撑重要度 ω_l 定义为设备 l 始终可靠、始终故障两种情况下节点电压绝对偏移量的变化量。该指标越大，说明设备 l 对系统电压偏移的影响越大，对系统电压支撑与恢复的重要度也就越高，其数学表达为

$$\omega_l = \frac{1}{ns}\sum_{s=1}^{ns}\omega_l^s \tag{26}$$

式中，ω_l^s 为场景 s 下设备 l 电压支撑重要度指标。

$$\omega_l^s = \frac{v_{l,0}^s - v_{l,1}^s}{\sum_{i\in L}\left(v_{l,0}^s - v_{l,1}^s\right)} \tag{27}$$

式中，$v_{l,0}^s(v_{l,1}^s)$为场景 s 设备 l 始终离线(在线)时系统所有节点在所有时段的平均电压偏移。

$$v_{l,0}^s = \frac{1}{nt}\frac{1}{nb}\sum_{t=1}^{nt}\sum_{n=1}^{nb}\left|V_{n,t}^{s,l,0} - 1\right| \tag{28}$$

$$v_{l,1}^s = \frac{1}{nt}\frac{1}{nb}\sum_{t=1}^{nt}\sum_{n=1}^{nb}\left|V_{n,t}^{s,l,1} - 1\right| \tag{29}$$

式中，$V_{n,t}^{s,l,0}(V_{n,t}^{s,l,1})$为场景 s 中假设设备 l 离线(在线)时 t 时刻节点 n 的标幺制电压。类似于式(25)、式(27)中分子表示设备 l 始终在线、始终故障两种情况下系统电压偏移弹性曲线所围面积的变化量，分母表示遍历所有线路后面积变化量的总和，该比例可以表示考虑灾害影响情况下，线路 l 在系统所有线路中面向电压支撑的相对重要程度。

3) 潮流支撑重要度

通常认为配电网负荷在多个馈线之间分布越均匀则更加合理，因为当大多数负荷集中于一条馈线时，在灾害影响下一旦该线路发生故障，会造成大量失负荷，将负荷平均分配于多条馈线更有利于配电网防灾减灾。设备 l 潮流支撑重要度η_l 定义为在线路 l 始终可靠、始终故障两种情况下，系统线路潮流均方差的改变量。该指标反映了线路负荷与潮流分布均匀情况。该指标越大，说明线路对潮流与负载分布均匀性的影响越大，其数学表达式为

$$\eta_l = \frac{1}{ns}\sum_{s=1}^{ns}\eta_l^s \tag{30}$$

式中，η_l^s 为场景 s 下设备 l 潮流支撑重要度指标。

$$\eta_l^s = \frac{\tau_{l,0}^s - \tau_{l,1}^s}{\sum_{i\in \mathbf{L}}\left(\tau_{l,0}^s - \tau_{l,1}^s\right)} \tag{31}$$

式中，$\tau_{l,0}^s,(\tau_{l,1}^s)$ 为场景 s 设备 l 始终离线(在线)时运行线路的平均负载率。

$$\tau_{l,0}^s = \frac{1}{nt}\frac{1}{nl_0}\sum_{t=1}^{nt}\sum_{i\in L_0}\frac{PL_{i,t,0}^s}{PL_i^{\max}} \tag{32}$$

$$\tau_{l,1}^s = \frac{1}{nt}\frac{1}{nl_1}\sum_{t=1}^{nt}\sum_{i\in L_1}\frac{PL_{i,t,1}^s}{PL_i^{\max}} \tag{33}$$

式中：$PL_{i,t,0}^s(PL_{i,t,1}^s)$ 为场景 s 时刻 t 时，设备 l 离线(在线)下运行线路的有功功率；$PL_i^{\max}$ 为线路 i 的传输有功上限；$L_0(L_1)$为设备 l 始终离线(在线)时场景 s

中运行线路集合。注意到L_1与L_0可能是不同的。$nl_0(nl_1)$为集合$L_0(L_1)$中的线路条数。

5　算例

基于 IEEE 16-bus 配电网验证所提出评估框架与重要度指标的有效性，拓扑结构如图 3 所示，其中线路 7、8 和 13 是联络线。负荷曲线随时间变化，且每天峰荷是不同的，周末负荷低于工作日负荷。配电网供电恢复方案中，重要度评估仿真时长为 7 天(168 h)，最大开关动作数为 3，不考虑开关开/合成本。线路故障率相关参数如表 1 所示，检修率μ为 2.5，时变的天气状态 $Z(t)$如图 4 所示。

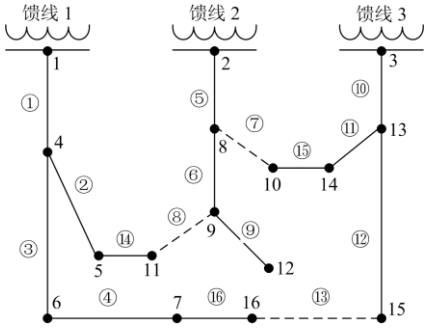

图 3 IEEE 16-bus 配电网

Fig. 3 IEEE 16-bus distribution system

表 1 设备故障率与修复率参数

Table 1 Forced outage rate and repair rate parameters

α	β	γ_1	γ_2	μ
10 950	1.8	1.2	1.8	2.5

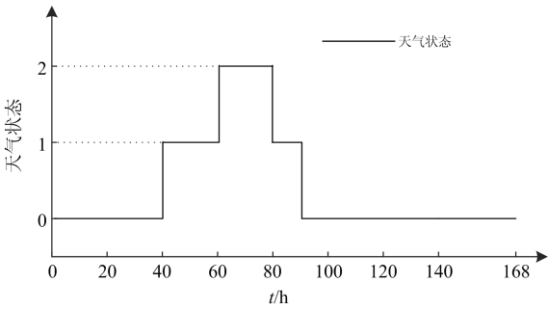

图 4 168 个小时中天气状态的变化

Fig. 4 Changes in weather conditions during 168 hours

考虑如下两个算例。

算例 1：不考虑弹性配电网灾害恢复决策，评估原始拓扑下组件重要度指标；

算例 2：基于算例 1，加入灾害恢复决策。

算例 1 评估不考虑弹性配电网灾害恢复策略时的组件重要度。图 5 给出了算例 1 的计算结果。失负荷支撑重要度最高的线路是线路 5，为 0.218，而线路 1 和线路 6 的失负荷支撑重要度仅次于线路 5，分别为 0.180、0.149。观察系统原始拓扑与节点负荷，可以发现，线路 5 下游线路所带负荷最多，线路 1 次之，线路 6 相对较少，但仍然高于其他线路。所以，不考虑重构恢复策略时，线路 5、1、6 是失负荷重要度最高的几条线路。潮流支撑重要度与电压支撑重要度最高的都是线路 1，因为线路 1 位于馈线出口位置，线路 1 故障会造成较多的节点失压。

综合来看，即使在考虑天气状况、设备故障等因素的情况下，初始网络拓扑、电网运行状态在设备重要度指标中依然起主要作用。由于 IEEE 16-bus 系统拓扑较为简单，不同线路对系统负荷、潮流分布、电压偏移等影响可以直观的凭经验判断，然而随着城市配电网的发展，拓扑结构愈发复杂，自动化程度越来越高，运行环境随机多变，已经无法通过简单观察来辨识重要线路。

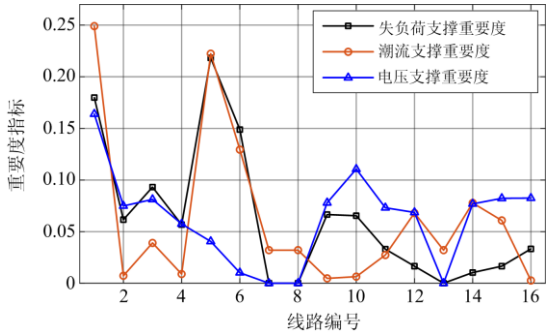

图 5 算例 1 中组件重要度指标

Fig. 5 Importance indices in 16-bus system in Case 1

算例 2 中，考虑了弹性配电网灾害恢复策略，对组件重要度做出动态评估。图 6 给出了算例 2 的仿真结果。可以看出，失负荷支撑重要度最高的线路是线路 9，为 0.492，而线路 6、2、5 的失负荷支撑重要度远低于线路 9，分别为 0.077、0.049、0.048。因为当线路 9 发生故障时，节点 12 的负荷无法通过

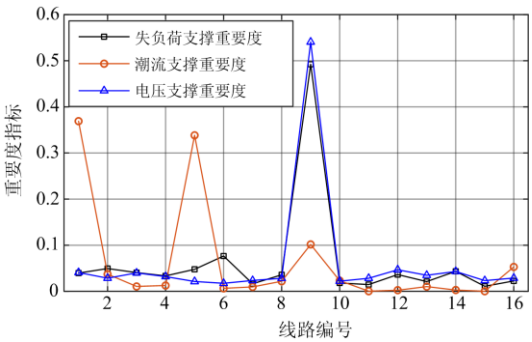

图 6 算例 2 中组件重要度指标

Fig. 6 Importance indices in 16-bus system in Case 2

拓扑重构进行恢复，而其他线路发生故障时，都有可能通过重构措施使其下游负荷恢复供电。

潮流支撑重要度最高的是线路 1，为 0.369，其次是线路 5 与线路 9，分别为 0.338、0.102。观察系统拓扑可以直观地看出，线路 1 下游线路较长，当线路 1 发生故障时，下游线路需要通过联络线转移到馈线 2 或馈线 3，使馈线 2 或 3 的供电距离大大增加，负荷在一条馈线上过于集中导致风险增加，所以线路 1 的潮流支撑重要度较高。

线路 9 的电压支撑重要度最高，为 0.541，因为当线路 9 发生故障，会造成节点 12 成为孤岛，无法通过其他拓扑重构连接其他节点，导致节点完全失压，因此线路 9 具有较高的电压支撑重要度。除节点 9 之外剩余节点的电压支撑重要度相对接近，这是由于 16-bus 系统规模相对较小，没有出现重构之后供电线路过长导致末端电压过低的情况，整体电压偏移在合理范围之内。

对比算例 1 和算例 2，算例 1 中失负荷支撑重要度和电压支撑重要度最高的是与馈线源节点相连的线路，而在算例 2 中，由于考虑了灾害恢复策略，即使某条馈线出口线路故障，负荷也可通过其他馈线供电，降低了馈线出口线路故障时的失负荷风险和失压风险，提高了系统的安全性和可靠性。算例 2 中线路 9 的失负荷支撑重要度和电压支撑重要度明显增大，这是由于节点 12 供电只与线路 9 连接，加重了线路 9 的故障后果。

值得指出的是，采用不同指标评价线路的重要度，评价的结果也有所不同。例如在算例 1 中，若从失负荷支撑度和潮流支撑度这两个指标来评价线路的重要度，线路 5 均具有最高的重要度，而若从电压支撑度的角度来看，线路 5 具有较低的重要度。这意味着运行人员需要选取适当的评价指标，根据系统运行状态，动态辨识系统重要组件，才能有效改善系统安全性。

算例在 CPU 2.3-GHz 台式机上实现。一般情况下，16-bus 配电网计算小时重构恢复方案的时间为 0.3 s，仿真区间 168 h，一个随机场景下配网灾害恢复重构计算时间约为 50 s。通常，需要采样 20~30 个左右随机场景即可满足最终收敛条件。因此，总评估时间在 16-bus 系统中约为 1 000 s。

6　结论

本文提出了一种面向防灾减灾的弹性配电网组件重要度评估框架，从组件对系统防灾减灾性能影响的角度，提出了三种重要度指标及其评估方法。可以得出以下结论：

1) 弹性配电网灾害恢复方案对设备重要度的影响较大，需要根据系统灾害防御与恢复方案动态辨识重要组件。

2) 当系统应对恶劣天气或重大保电活动时，可根据重要度指标进行相应的人力物力配置，安排预防性加固或故障后抢修工作。

3) 同一组件对灾害影响下不同安全指标的影响是不同的，对某一个指标更加重要的组件，可能对其他指标影响较小。运行人员需根据系统特点选取防灾减灾指标，动态筛选重要组件。

参考文献

[1] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1): 1-23.

[2] 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 Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.

[3] NAIR D V, MURTY M S R. Reconfigurable control as actuator fault-tolerant control design for power oscillation damping[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 70-81. DOI: 10.1186/s41601-020-0151-3.

[4] AMROUNE M, BOUKTIR T, MUSIRIN I. Power system voltage instability risk mitigation via emergency demand response-based whale optimization algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 269-282. DOI: 10.1186/s41601-019-0142-4.

[5] 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.

[6] 李昌超，康忠健，于洪国，等. 考虑电力业务重要性的电力通信网关键节点识别[J]. 电工技术学报，2019, 34(11): 2384-2394.
LI Changchao, KANG Zhongjian, YU Hongguo, et al. Identification of key nodes in power communication network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2384-2394.

[7] 古莹奎，李晶. 基于多值决策图的多状态系统重要度分析[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(6): 44-50.

GU Yingkui, LI Jing. Importance analysis of multi-state system based on multiple-valued decision diagram[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(6): 44-50.

[8] 吴润泽, 陈文伟, 唐良瑞, 等. 基于高风险模式树挖掘方法的电力系统风险设备集分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 137-145.
WU Runze, CHEN Wenwei, TANG Liangrui, et al. Analysis of power system risk equipment set based on high risk pattern tree mining method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 137-145.

[9] 朱晓荣, 王羽凝, 金绘民, 等. 基于马尔科夫链蒙特卡洛方法的光伏电站可靠性评估[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 1034-1042.
ZHU Xiaorong, WANG Yuning, JIN Huimin, et al. Reliability evaluation of photovoltaic power plant based on markov chain Monte Carlo method[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 1034-1042.

[10] 王涛, 刘雨濛, 顾雪平, 等. 基于连锁故障时空图的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5962-5972, 6176.
WANG Tao, LIU Yumeng, GU Xueping, et al. Vulnerable lines identification of power grid based on cascading fault space-time graph[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5962-5972, 6176.

[11] 李炅菊, 黄宏光, 舒勤. 相依网络理论下电力通信网节点重要度评价[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 143-150.
LI Guiju, HUANG Hongguang, SHU Qin. Evaluation method for node importance in power telecommunication network based on interdependent network theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 143-150.

[12] 刘沛清, 李华强, 赵阳, 等. 考虑元件综合重要度的电网安全性风险评估方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 132-138, 144.
LIU Peiqing, LI Huaqiang, ZHAO Yang, et al. Power grid security risk assessment considering comprehensive element importance index[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 132-138, 144.

[13] 孙顺祥, 李晓明, 张繁碧, 等. 基于网络结构重要度和安全隐患脆弱度的配电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 107-113.
SUN Shunxiang, LI Xiaoming, ZHANG Fanbi, et al. Identification of vulnerable lines in the distribution network based on network structure importance and potential hazard vulnerability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 107-113.

[14] 吴润泽, 陈文伟, 邹英杰, 等. 基于多因素融合的电网高风险设备评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 1-7.
WU Runze, CHEN Wenwei, ZOU Yingjie, et al. Evaluation method of high risk equipment in power grid based on multiple factor fusion[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 1-7.

[15] WANG Yifei, LIU Cong, SHAHIDEHPOUR M, et al. Critical components for maintenance outage scheduling considering weather conditions and common mode outages in reconfigurable distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2807-2816.

[16] 邓彬, 郭创新, 王越, 等. 基于 well-being 分析的电网设备重要度评估与排序方法[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3489-3496.
DENG Bin, GUO Chuangxin, WANG Yue, et al. An assessment and ranking method for component importance based on well-being analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3489-3496.

[17] 郭嘉, 何宇斌, 韩宇奇, 等. 考虑有效距离接近中心性的信息设备重要度评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 42-48.
GUO Jia, HE Yubin, HAN Yuqi, et al. Importance assessment of cyber devices considering effective distance based closeness centrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 42-48.

[18] 兑红炎, 陈立伟, 周毫, 等. 基于系统可靠性的组件综合重要度变化机理分析[J]. 运筹与管理, 2018, 27(2): 79-84.
DUI Hongyan, CHEN Liwei, ZHOU Hao, et al. Evolution mechanism of component integrated importance measure based on the system reliability[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(2): 79-84.

[19] 李利娟, 吴军, 刘红良, 等. 计及新能源影响静动态结合的电网脆弱节点辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 64-72.
LI Lijuan, WU Jun, LIU Hongliang, et al. Static and dynamic integration method on identifying vulnerability nodes considering new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 64-72.

[20] 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.

[21] 田沛川, 李毓, 王森, 等. 针对小概率高损事件的配电网弹性评价问题研究[J]. 供用电, 2019, 36(5): 14-20.

TIAN Peichuan, LI Yu, WANG Sen, et al. Research on resilience evaluation for distribution network under small-probability-high-loss events[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5): 14-20.

[22] 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-EPSA, 2018, 30(7): 103-109.

[23] 施萱轩, 孟军, 梁浩, 等. 配电网故障抢修质量与效率评价体系研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 143-147, 154.
SHI Xuanxuan, MENG Jun, LIANG Hao, et al. Quality and efficiency evaluation system of distribution network fault repair[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 143-147, 154.

[24] 潘星, 蒋卓, 杨艳京. 基于弹性的体系组件重要度及恢复策略[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(9): 1713-1720.
PAN Xing, JIANG Zhuo, YANG Yanjing. Resilience-based component importance and recovery strategy for system-of-systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(9): 1713-1720.

[25] BARKER K, RAMIREZ-MARQUEZ J, CLAUDIO R. Resilience-based network component importance measures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 117: 89-97.

[26] LI Gengfeng, HUANG Gechao, BIE Zhaohong, et al., Component importance assessment of power systems for improving resilience under wind storms[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(4): 676-687.

[27] FANG Y P, NICOLA P, ENRICO Z. Resilience-based component importance measures for critical infrastructure network systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2016, 65(2): 502-512.

[28] COX D R. Regression models and life tables[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 1972, 34(2): 187-202.

[29] WANG Yifei, SHAHIDEHPOUR M, GUO Chuangxin. Applications of survival functions to continuous semi-Markov processes for measuring reliability of power transformers[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(6): 959-969.

[30] JABR R A. Radial distribution load flow using conic programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1458-1459.

[31] LOW S. Convex relaxation of optimal power flow—part II: exactness[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2014, 1(2): 177-189.

[32] 杨烁, 杨卫红, 刘艳茹, 等. 考虑电能替代负荷接入的配电网鲁棒重构优化[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 48-55.
YANG Shuo, YANG Weihong, LIU Yanru, et al. Robust network reconfiguration optimization in distribution network with power energy alternatives integration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 48-55.

[33] 程杉, 苏高参. 基于 CAPSO 的含分布式电源的配电网动态重构[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 27-33, 40.
CHENG Shan, SU Gaocan. Dynamic reconfiguration of distribution network with distributed generations based on CAPSO algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 27-33, 40.

[34] 吴锋, 胡剑琛, 莫若慧. 基于负荷重构策略的电网调峰方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(7): 38-44.
WU Feng, HU Jianchen, MO Ruohui. Research on power grid peak-shaving method based on load reconfiguration strategy[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(7): 38-44.

收稿日期：2019-08-25； 修回日期：2020-03-09

作者简介：

赵晓龙(1988—)，男，通信作者，硕士，工程师，研究方向为配电网智能化运维等。E-mail: 274006349@qq.com

(编辑 姜新丽)