

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.01.026

界限估计方法在高压配电系统地震易损性分析中的应用研究

刘 威¹, 李 浩², 王 建¹, 董新胜¹

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 配电系统中某一单体设备的抗震性能评估结果难以表征配电系统整体的抗震能力, 高压配电系统的抗震安全性评估研究亟需开展。目前, 用于结构系统可靠性评估的界限估计方法在土木工程结构领域得到应用和推广, 此方法在电力系统抗震性能概率性评估中的应用较少。基于此, 文中以某实际工程高压配电系统为例, 采用一阶界限估计方法和二阶界限估计方法对配电系统的易损性进行研究。研究结果表明: 该配电系统的超限概率大于系统中任一单体设备的超限概率; 基于一阶界限估计方法求解的配电系统易损性曲线界限区间较宽, 不利于工程的实际应用; 基于二阶界限估计方法求解的易损性曲线界限区间窄, 但下界对系统中单体设备的超限排列顺序较为敏感, 在应用此方法时应特别注意。

关键词: 配电系统; 界限估计; 地震易损性; 瓷套管根部应力; 侧移比; 排列顺序

Research on Application of Boundary Estimation Method in Seismic Vulnerability Analysis of High Voltage Distribution System

LIU Wei¹, LI Hao², WANG Jian¹, DONG Xinsheng¹

(1. State Grid XinJiang Company Limited Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The seismic performance assessment result of a single device in the power distribution system is difficult to characterize the overall seismic performance of the power distribution system and research on seismic safety assessment of high-voltage power distribution systems urgently needs to be developed. At present, the boundary estimation method for structural system reliability assessment has been applied and promoted in the field of civil engineering structures, but the application of this method in the probabilistic assessment of seismic performance of power system is less. Based on this, one high-voltage power distribution system of a certain actual project is taken as an example, the vulnerability of the distribution system by using the first-order boundary estimation method and the second-order boundary estimation method is studied. The study results show that the overrun probability of the distribution system is greater than that of any single device in the system; The boundary range of distribution system vulnerability curve solved by the first-order boundary estimation method is wide, which is not conducive to practical application of engineering; The boundary range of the vulnerability curve solved by the second-order boundary estimation method is narrow, but the lower bound is sensitive to the over-limit arrangement order of single devices in the system, so special attention should be paid when applying this method.

Key words: power distribution system; boundary estimation; seismic vulnerability; ceramic insulator root stress; lateral displacement ratio; arrangement order

0 引言

电力设备一般具有“头重脚轻”的特点, 并且设

备瓷套管由瓷质性材料组成, 具有高度的脆弱性^[1], 所以配电系统中的设备在以往的地震中遭受了严重的破坏^[2-4], 严重威胁了人们的用电安全, 因此电

力设备在地震作用下的易损性引起了学者们的重点关注^[5]。Zareei^[6]使用易损性曲线对400 kV电力变压器的抗震能力进行概率性评估,并基于多元易损性方法对420 kV断路器进行地震易损性评估^[7]。Mohammadpour^[8]对63 kV变电站支柱绝缘子进行地震易损性分析。Takhirov^[9]、Günay^[10]、Paolacci^[11]以及Wen B^[12]对隔离开关的地震易损性进行研究。Haiyang^[13]对输电塔的抗震性能进行地震易损性分析,并考虑了几何尺寸和材料不确定性对地震易损性曲线的影响。综上所述,对电力设备的地震易损性研究多集中于单体设备的研究,对于配电系统的地震易损性研究较少。并且实际工程中,配电系统往往由多种类型的单体设备组成,仅计算某单体设备的抗震性能,不能准确评估配电系统的整体抗震性能,因此对于配电系统抗震性能的概率性评估亟待开展研究^[14]。

在20世纪,有学者提出了用于结构系统可靠性评估的界限估计方法^[15-16],此方法具有直观性好、操作性强、易于工程人员接受的特点,因此在土木工程结构领域得到迅速的推广和应用^[17-20],并取得了良好的效果。但目前此方法在电力系统抗震安全性评估的应用较少,界限估计方法在电力系统地震易损性评估的应用仍需进一步研究。

针对上述问题,文中以某实际工程220 kV配电系统为例,运用界限估计方法将各单体设备损伤概率率联系在一起,并充分考虑地震动不确定性的影响,对高压配电系统的抗震性能进行概率性评估,为界限估计方法在高压配电系统地震易损性分析中的应用提供合理建议。

1 220 kV 配电系统简介及建模

文中以某实际工程220 kV配电系统为研究对象,见图1,该220 kV配电系统由支柱绝缘子、断路器、互感器、隔离开关以及铝制软导线共同组成。支柱绝缘子总高为5 m,上部为两节相同的瓷套管组成,每节瓷套管长为1.2 m,截面直径为145 mm,支架是高为2.6 m的空心圆管,截面外径为300 mm、壁厚8 mm;断路器总高为7.2 m,上部为两节长2.3 m的瓷套管组成,顶节截面直径为300 mm,第二节瓷套管截面直径为200 mm,支架的构造与绝缘子支架一致;互感器总高为7.3 m,上部是高为2.7 m、截面直径为245 mm的瓷套管,支架是高为4.6 m、截面尺寸与绝缘子支架一致的空心圆管;隔离开关总高为4.9 m,上部由6节相同的瓷套管组成,每节瓷套管长为1.15 m,截面直径为160 mm,支架由两个相同

的空心圆管支柱组成,空心圆管支柱尺寸与绝缘子支架一致。并且,瓷套管之间均采用法兰连接,各单体设备之间通过软导线连接,见表1。表1中: h 为软导线两端点高差; l 为软导线的水平投影长度。

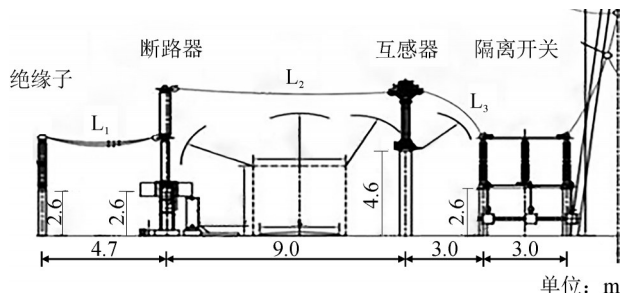


图1 220 kV 配电系统工程简图

Fig. 1 220 kV distribution system engineering diagram

表1 软导线计算参数

Table 1 Calculation parameters of soft conductor

参数	L_1	L_2	L_3
h/m	0.1	0.1	2.4
l/m	4.7	9.0	3.0

对该配电系统进行数值模拟时,采用三段梁单元模拟瓷套管与法兰的连接,其连接刚度的折减参考文[21]给出的计算公式。对于实际结构中存在的内部元件不进行结构建模,将其转化为均布质量附加于结构相应位置即可。结构系统的边界进行固结处理。此外,软导线的合理建模是获得正确模拟结果的关键,文中依据该配电系统中软导线的参数(表1),并参考文[22-23]计算软导线的等效弹性模量,合理考虑软导线悬垂效应对该配电系统地震响应的影响。

软导线等效弹性模量的计算:软导线计算简图见图2,设软导线均布荷载为 q ,则:

$$\begin{cases} qds = q_z dx \\ q_z = q \frac{ds}{dx} = q \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$z = \frac{F_h}{q} \left[\cosh \alpha - \cosh \left(\frac{2\beta x}{l} - \alpha \right) \right] \quad (2)$$

$$\text{式(1)、(2)中: } \alpha = \operatorname{arsinh} \left[\frac{\beta(h/l)}{\sinh \beta} \right] + \beta; \quad \beta = \frac{ql}{2F_h};$$

F_h 为软导线张力的水平分量; h 为高差; l 为软导线的水平投影长度。

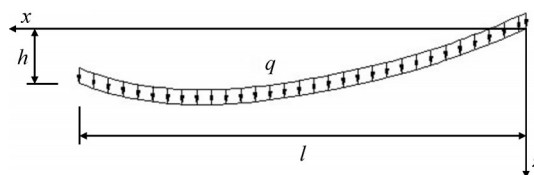


图2 软导线计算简图

Fig. 2 Soft conductor calculation diagram

$$E_{dx} = \frac{E_{rdx}}{1 + \frac{(\rho gl)^2}{12\sigma^3} E_{rdx}} \quad (3)$$

式(3)中: E_{dx} 为等效弹性模量; E_{rdx} 为软导线弹性模量; ρ 为软导线材料密度; g 为重力加速度;

σ 为软导线的拉应力,通过 F_h 求得。
基于上述数值模拟方法建立该配电系统有限元模型,计算结构模态,结果见图3。给出支柱绝缘子、断路器、互感器以及隔离开关首次发生振动的周期,为建立结构的概率地震需求模型做准备。

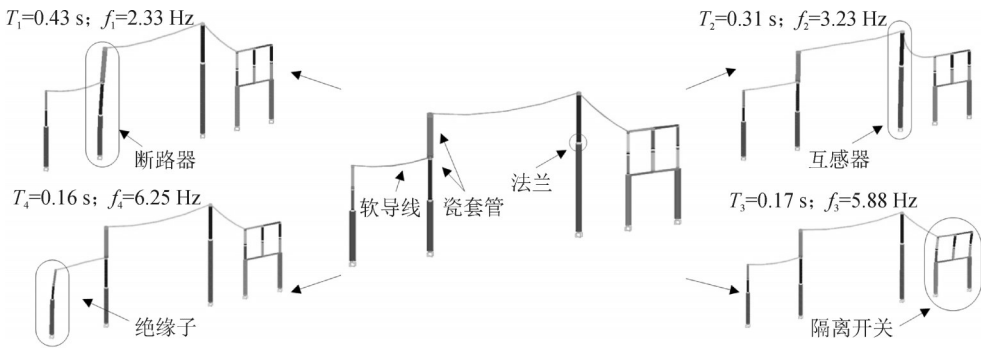


图3 220 kV 配电系统有限元模型及模态图

Fig. 3 Finite element model and modal diagram of 220 kV distribution system

2 单体设备的地震易损性研究

2.1 易损性分析理论

易损性分析是描述在给定地震动强度下,结构系统或构件地震需求超越结构能力限值的条件概率,其求解公式表示为:

$$P(EDP > d | IM = im) = 1 - T_{n-2} \left[\frac{\ln(d) - (a + bx_0)}{\beta} \right] \quad (4)$$

$$\beta = \hat{\sigma}^* \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{l_{xx}} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$\begin{cases} l_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \\ \hat{\sigma}^* = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式(4)–(6)中: EDP 为结构地震需求; d 为结构能力限值; IM 为地震动强度参数,文中选用谱加速度 Sa 作为衡量地震动强度的指标^[24–25]; im 为某一地震动强度; T_{n-2} 是自由度为 $n-2$ 的 T 分布累积概率函数; $a - bx_0$ 为概率需求模型预测响应值的对数值; β 为对数标准差; n 为样本数; $\hat{\sigma}^*$ 为回归方差的无偏估计; y 为实际响应值的对数值。

概率地震需求模型的建立和结构能力指标的确定是进行地震易损性计算的关键。对于结构的概率地震需求模型,参考 Shome^[26],吕大刚^[27]的研究,地震动强度参数 IM 与工程需求参数 EDP 满足指数回归关系,如式(7)所示

$$\begin{cases} EDP = c(IM)^b \\ \ln(EDP) = \ln(c) + b \ln(IM) \end{cases} \quad (7)$$

对于结构能力指标的确定,文中考虑到高压配电系统均为瓷柱性设备,瓷套管易出现脆性破坏;同时各单体设备之间采用软导线连接,设备顶部过大的位移会影响正常使用功能,故选择瓷套管根部应力 σ 和设备顶部侧移比 μ 作为结构的能力指标。参考基于 Weibull 分布的瓷套材料强度计算公式^[28]并考虑到结构所用材料的差异性,同时结合电力设备的抗震设计要求,确定该配电系统的能力指标见表2。

表2 220 kV 配电系统能力指标量化

Table 2 Capacity index quantification of 220 kV distribution system

性能水准	失效状态	侧移比	应力/MPa
1	轻度超限	1.0/100	35
2	重度超限	1.5/100	45

侧移比计算

$$\mu = \frac{D}{L} \quad (8)$$

式(8)中: D 为设备顶部位移; L 为设备总高度。

应力计算

$$\sigma = \frac{My_c}{I} \quad (9)$$

式(9)中: M 为瓷套管最大弯矩; y_c 为截面形心到最外缘的距离; I 为截面惯性矩。

2.2 建立概率地震需求模型

基于上述分析理论,对结构进行计算以获取概率地震需求模型。计算时,文中以矩震级 ($M_w = 6.5$) 作为区分大震和小震的界限,以距断层距离 ($Rjb = 30$ km)

作为区分远场地震动和近场地震动的界限,从PEER数据库选取100条地震波见图4,并生成对应的加速度反应谱见图5,以充分考虑地震波不确定性对结构易损性分析结果的影响。对选取的100条地震波加速度峰值进行调幅,将调幅后的地震波输入结构中进行动力时程计算。依据概率地震需求模型建立流程图见图6,得到概率地震需求模型见图7。

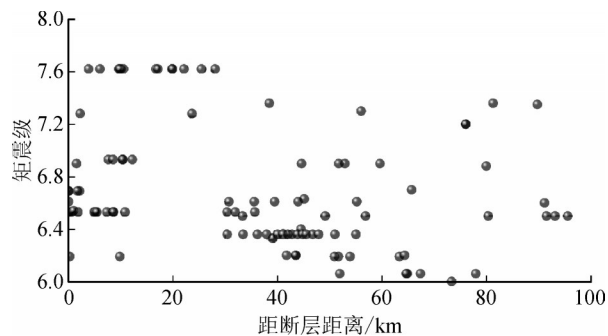


图4 选取的地震动

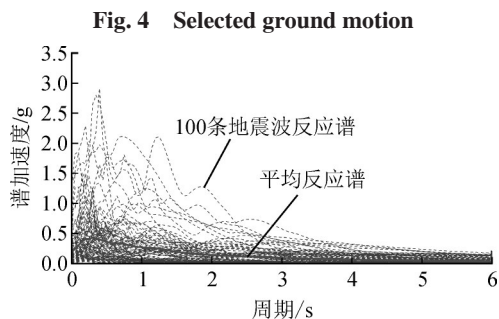


图5 地震波加速度反应谱

Fig. 5 Acceleration response spectra of seismic wave

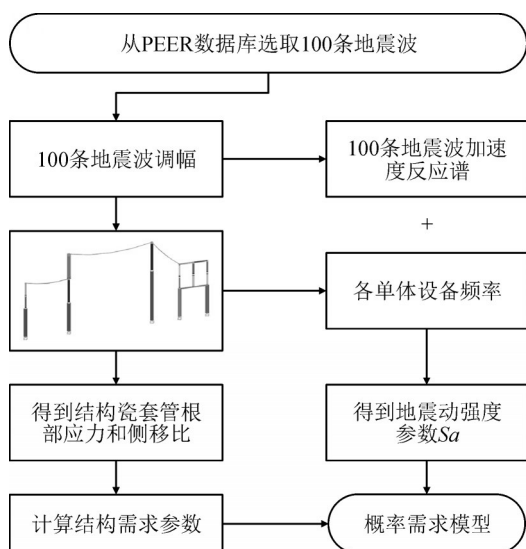
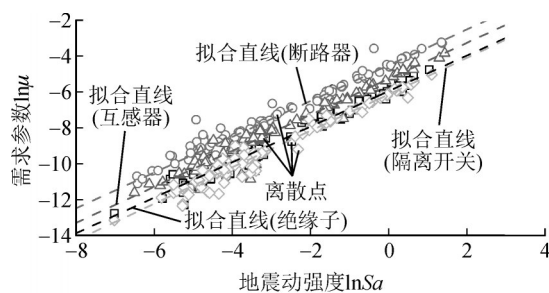


图6 概率地震需求模型建立流程图

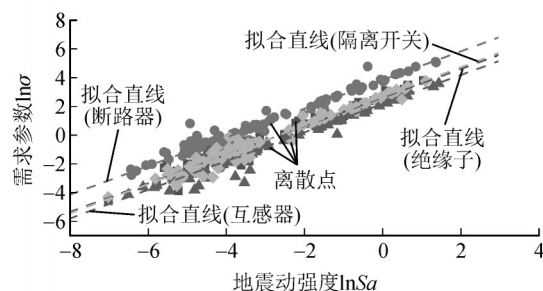
Fig. 6 Flowchart of establishing probabilistic seismic demand model

图7为地震动强度与绝缘子、断路器、互感器以及隔离开关的需求参数的数据拟合,拟合函数、拟合决定系数以及对数标准差见表3。从结果可以看出,概率需求模型拟合决定系数 R^2 均大于0.9,拟合

效果均较好,建立的概率地震需求模型可靠。



(a) 单体设备侧移比超限概率需求模型



(b) 单体设备瓷套管根部应力超限概率需求模型

图7 数据拟合

Fig. 7 Data fitting

2.3 单体设备地震易损性分析

依据式(4)建立该配电系统中各单体设备的易损性曲线,结果见图8。轻超代表轻度超限;重超代表重度超限。

图8给出了各单体设备侧移比和瓷套管根部应力超限易损性曲线。通过对比研究可知,同一谱加速度 S_a 下,断路器瓷套管根部应力超限概率>断路器侧移比超限概率>互感器侧移比超限概率>隔离开关瓷套管根部应力超限概率>绝缘子瓷套管根部应力超限概率>绝缘子侧移比超限概率>互感器瓷套管根部应力超限概率>隔离开关侧移比超限概率,随着谱加速度的增大,此现象体现的更加明显。例如在 $S_a=1.0g$ 时,断路器侧移比轻度超限概率为56.8%,侧移比重度超限概率为24.4%,瓷套管根部应力轻度超限概率为71.4%,瓷套管根部应力重度超限概率为50.9%,其它单体设备超限概率均低于断路器超限概率。综上所述,在地震作用下该配电系统中断路器较易出现损伤。

3 配电系统的地震易损性研究

3.1 基于一阶界限估计方法的配电系统地震易损性研究

一阶界限估计方法^[15]的界限估计区间表示为

$$\max_i^n (P_{fi}) \leq P_{sys} \leq 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{fi}) \quad (10)$$

表3 概率地震需求模型

Table 3 Probability seismic demand model

类型	单体设备名称	拟合函数	R^2	β
侧移比	绝缘子	$\ln(\mu_1)=0.990\ 65\ln(Sa)-5.965\ 60$	0.96	0.40
	断路器	$\ln(\mu_2)=0.997\ 66\ln(Sa)-4.524\ 56$	0.95	0.47
	互感器	$\ln(\mu_3)=1.003\ 86\ln(Sa)-5.282\ 60$	0.96	0.43
	隔离开关	$\ln(\mu_4)=1.016\ 68\ln(Sa)-6.146\ 50$	0.97	0.37
瓷套管根部应力	绝缘子	$\ln(\sigma_1)=0.996\ 47\ln(Sa)+2.597\ 67$	0.96	0.41
	断路器	$\ln(\sigma_2)=0.998\ 45\ln(Sa)+3.817\ 31$	0.95	0.46
	互感器	$\ln(\sigma_3)=0.999\ 00\ln(Sa)+2.167\ 14$	0.96	0.41
	隔离开关	$\ln(\sigma_4)=1.017\ 29\ln(Sa)+2.674\ 15$	0.96	0.38

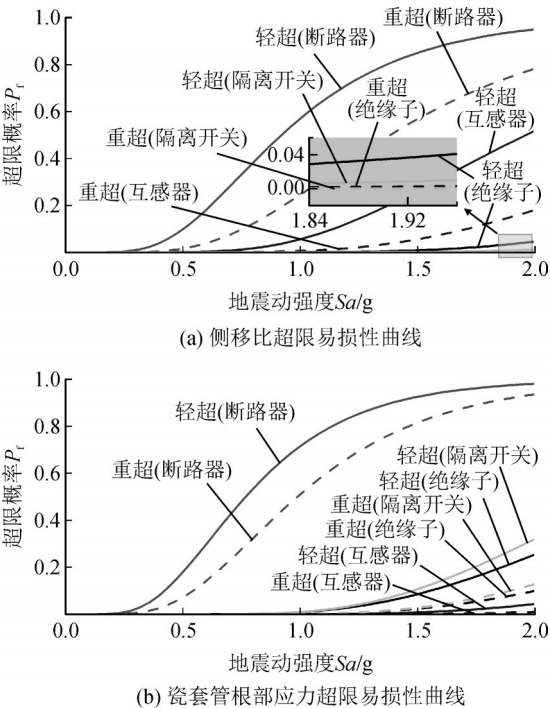


图8 单体设备易损性曲线

Fig. 8 Vulnerability curve of single device

式(10)中： P_{sys} 表示配电系统超限的概率； P_i 表示配电系统第*i*种单体设备超限的概率；*n*表示可能失效的单体设备数目。式(10)中的上界将各单体设备看成是并联结构系统，是对配电系统超限的一种保守估计；下界将各单体设备看成是串联结构系统，结构系统中的任意一个单体设备超限，系统即超限。

图9给出了配电系统侧移比超限易损性曲线界限区间(任一单体设备侧移比超限即配电系统侧移比超限)与瓷套管根部应力超限易损性曲线界限区间(任一单体设备瓷套管根部应力超限即配电系统瓷套管根部应力超限)。CY代表设备顶部侧移比超限；YL代表设备瓷套管根部应力超限。通过对比研究可以发现，系统瓷套管根部应力界限区间小于系

统侧移比的界限区间；该配电系统发生瓷套管根部应力超限的概率大于侧移比超限的概率，可见，设备瓷套管的强度是决定配电系统抗震性能的关键。

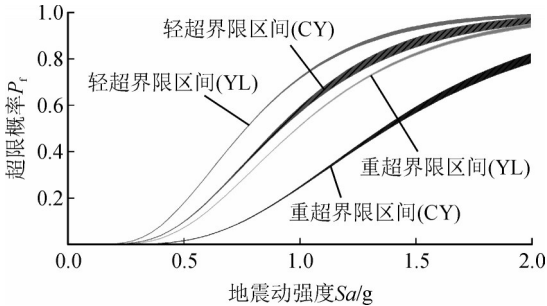


图9 配电系统瓷套管根部应力和侧移比超限易损性曲线

Fig. 9 Over-limit vulnerability curve of root stress and lateral displacement ratio of porcelain insulator in distribution system

图10给出了该配电系统的综合易损性曲线界限区间(配电系统中的任一设备出现侧移比超限或瓷套管根部应力超限，即配电系统超限)。研究分析可知，配电系统超限概率大于系统中任一单体设备的超限概率；基于一阶界限估计方法的系统综合性易损性曲线可以从概率角度对配电系统在不同强度地震动作用下的抗震性能进行量化评估，但由于界限区间较大，增加了工程实际应用的难度。

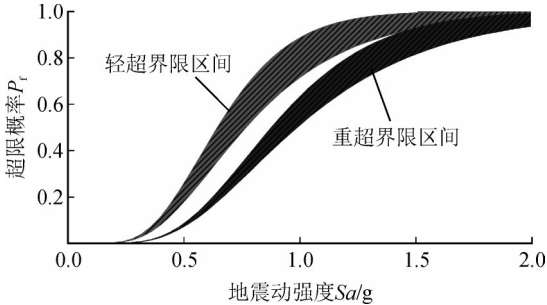


图10 基于一阶界限估计方法的系统综合易损性曲线

Fig. 10 Comprehensive vulnerability curve of system based on first order boundary estimation method

3.2 基于二阶界限估计方法的配电系统地震易损性研究

二阶界限估计方法^[16]考虑了不同单体设备超限概率之间的相关性,即相关系数 $0 < \rho < 1$,可表示为:

$$P_1 + \sum_{i=2}^m \max \left(P_i - \sum_{j=1}^{i-1} P_{ij}, 0 \right) \leq P_{\text{sys}} \leq \sum_{i=1}^m P_i - \sum_{i=2}^m \max_{j < i} P_{ij} \quad (11)$$

$$P_{ij} = P(F_i \cap F_j) = P \left(\frac{EDP_i}{d_i} \geq 1, \frac{EDP_j}{d_j} \geq 1 \right) = P \left[\ln \left(\frac{EDP_i}{d_i} \right) \geq 0, \ln \left(\frac{EDP_j}{d_j} \right) \geq 0 \right] \quad (12)$$

$$\rho = \frac{\text{COV}(X_i, X_j)}{\sigma_i \sigma_j} = \frac{E[(X_i - \mu_i)(X_j - \mu_j)]}{\sigma_i \sigma_j} \quad (13)$$

式(11)~(13)中: P_i 表示单体设备超限概率; m 表示可能失效的单体设备数目; P_i 表示第 i 个单体设备的超限概率; P_{ij} 表示第 i 个和第 j 个单体设备同时超限的概率; $X_i = \ln(EDP_i/d_i)$; $X_j = \ln(EDP_j/d_j)$; μ_i 是 $\ln(EDP_i/d_i)$ 关于 Sa 的回归方程的平均值; μ_j 是 $\ln(EDP_j/d_j)$ 关于 Sa 的回归方程的平均值; σ_i 是 X_i 的标准差; σ_j 是 X_j 的标准差。

文中高压配电系统中共有绝缘子、断路器、互感器以及隔离开关4种类型的单体设备,并关注各

单体设备侧移比与瓷套管根部应力超限两种情况,故 $m=8$ 。据此,推导可得:

$$P^x = P_1 + [P_2 - P_{21}]^+ + [P_3 - P_{31} - P_{32}]^+ + [P_4 - P_{41} - P_{42} - P_{43}]^+ + [P_5 - P_{51} - P_{52} - P_{53} - P_{54}]^+ + [P_6 - P_{61} - P_{62} - P_{63} - P_{64} - P_{65}]^+ + [P_7 - P_{71} - P_{72} - P_{73} - P_{74} - P_{75} - P_{76}]^+ + [P_8 - P_{81} - P_{82} - P_{83} - P_{84} - P_{85} - P_{86} - P_{87}]^+ \quad (14)$$

$$P^s = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 - [P_{21}]^{++} - [P_{31}, P_{32}]^{++} - [P_{41}, P_{42}, P_{43}]^{++} - [P_{51}, P_{52}, P_{53}, P_{54}]^{++} - [P_{61}, P_{62}, P_{63}, P_{64}, P_{65}]^{++} - [P_{71}, P_{72}, P_{73}, P_{74}, P_{75}, P_{76}]^{++} - [P_{81}, P_{82}, P_{83}, P_{84}, P_{85}, P_{86}, P_{87}]^{++} \quad (15)$$

式(14)、(15)中: P^x 代表界限区间下界; P^s 代表界限区间上界; $[]^+ = \max(, 0)$; $[]^{++} = \max(,)$ 。

由式(14)、(15)可知,超限模式的排列方式对计算结果有直接影响,为研究超限模式的排列方式对基于二阶界限估计方法计算结果的影响规律,文中给出SX(顺序,超限概率从大到小)、LX(随机,超限概率随机排列)、DX(倒序,超限概率从小到大)3种排列方式见表4,CY代表设备顶部侧移比超限;YL代表设备瓷套管根部应力超限。基于3种排列方式的配电系统易损性计算结果见图11。

表4 超限模式的排列方式

Table 4 Arrangement of over-limit mode

排列顺序	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
SX	断路器 YL	断路器 CY	互感器 CY	隔离开关 YL	绝缘子 YL	绝缘子 CY	互感器 YL	隔离开关 CY
LX	断路器 CY	绝缘子 CY	绝缘子 YL	隔离开关 YL	隔离开关 CY	互感器 YL	断路器 YL	互感器 CY
DX	隔离开关 CY	互感器 YL	绝缘子 CY	绝缘子 YL	隔离开关 YL	互感器 CY	断路器 CY	断路器 YL

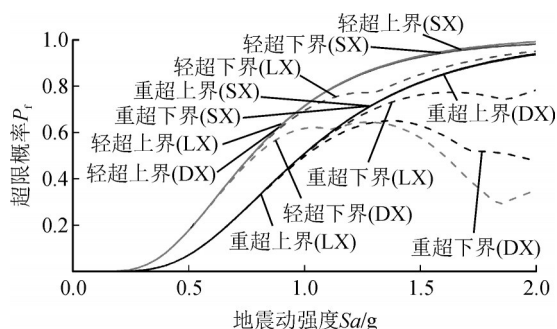


图11 基于二阶界限估计方法的系统综合易损性曲线

Fig. 11 Comprehensive vulnerability curve of system based on second order boundary estimation method

图11给出了基于3种排列方式计算得到的系统易损性曲线,采用SX的系统易损性曲线轻超上下界几乎重合,并与采用LX、DX的系统易损性曲线轻

超上界重合,基于SX的系统易损性曲线重超计算结果呈现相同的规律。进一步研究分析可知:采用SX的系统易损性曲线不仅实现了对配电系统抗震性能的概率性评估,而且概率区间极小,便于工程的实际应用;采用LX的系统易损性曲线界限区间较大,并且易损性曲线的下界出现了波动,随着 Sa 的增加,波动程度加大;采用DX的系统易损性曲线界限区间更大,界限区间下界波动更加明显,并且,当 Sa 较大时,出现配电系统轻度超限下界的超限概率小于重度超限下界的情况。综上所述,基于二阶界限估计方法建立的配电系统易损性曲线的下界对超限模式的排列顺序较为敏感,当采用DX计算时,甚至出现了不合理的结论,所以在使用此方法时应予以重视。

3.3 对比分析

为进一步研究基于一阶界限估计方法和二阶界限估计方法高压配电系统地震易损性评估结果的特点,将二者计算结果绘于同一图中,进行对比分析,见图12。YJ代表一阶界限估计方法;EJSX代表二阶界限估计方法(顺序排列)。

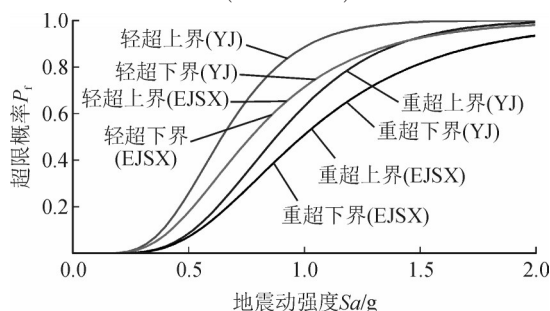


图12 比较两种界限估计方法的计算结果

Fig. 12 The results of the two boundary estimation methods are compared

图12给出了基于一阶界限估计方法和基于二阶界限估计方法的高压配电系统易损性分析结果,EJSX轻超上下界几乎重合,并与YJ轻超下界重合,EJSX重超计算结果呈现相同的规律。进一步研究分析可知,基于一阶界限估计方法建立的配电系统易损性曲线界限区间较宽,随着 S_a 增大,此现象体现的更加明显;基于二阶界限估计方法建立的系统易损性曲线界限区间极窄,对配电系统的抗震性能评估准确。

4 结论

目前,对于电力设备的地震易损性分析多针对于某一单体设备,单体设备的计算结果难以表征配电系统的实际抗震能力,有必要对配电系统整体的抗震安全性进行评估。文中以某实际工程的220 kV配电系统为例,采用界限估计方法对配电系统的易损性进行研究,得到的主要结论如下:

1)在地震动作用下,该高压配电系统整体超限概率大于任一单体设备的超限概率。

2)基于一阶界限估计方法求得的高压配电系统易损性曲线界限区间较宽,并且随着 S_a 增大,此现象体现的更加明显,给工程的实际应用增加了困难。

3)基于二阶界限估计方法采用顺序排列方式计算的系统易损性界限区间小,对配电系统的抗震性能评估准确,便于工程的实际应用;采用随机排列方式计算的系统易损性界限区间下界波动程度大且不稳定;采用倒序排列方式计算的系统易损性界限区间下界波动程度更大且出现不合理情况。可见,界限区间的下界对配电系统中单体设备的超限

排列方式较为敏感,在实际应用时,应予以注意。

参考文献:

- [1] COLOMBO E, SALVETTI M, VALLINO M. Report on in progress experimental/analytical activities intended for seismic qualification of ENEL HV electrical substations[R]. Italy: ISMES Conference Centre-Seriate (BG), 1995.
- [2] KNIGHT B, KEMPNER L. Seismic vulnerabilities and retrofit of high-voltage electrical substation facilities[R]. USA: Proceedings of TCLEE, 2009.
- [3] MASSIE A, WATSON N R. Impact of the christchurch earthquakes on the electrical power system infrastructure[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2011, 44(4): 425-430.
- [4] DUEÑAS-OSORIO L, KWASINSKI A. Quantification of lifeline system interdependencies after the 27 February 2010 Mw 8.8 offshore maule, Chile, earthquake[J]. Earthquake Spectra, 2012(28): 581-603.
- [5] 严屹然, 唐诗洋, 于振, 等. 基于蒙特卡洛模拟的配电网地震灾损预测研究[J]. 供用电, 2022, 39(5): 76-80. YAN Yiran, TANG Shiyang, YU Zhen, et al. Research on earthquake damage prediction of distribution network based on Monte Carlo simulation[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 76-80.
- [6] ZAREEI S A, HOSSEINI M, GHAFORY-ASHTIANY M. Seismic failure probability of a 400 kV power transformer using analytical fragility curves[J]. Engineering Failure Analysis, 2016(70): 273-289.
- [7] ZAREEI S A, HOSSEINI M, GHAFORY-ASHTIANY M. Evaluation of power substation equipment seismic vulnerability by multivariate fragility analysis: A case study on a 420 kV circuit breaker[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017(92): 79-94.
- [8] MOHAMMADPOUR S, HOSSEINI M. Experimental system identification of a 63 kV substation post insulator and the development of its fragility curves by dynamic finite element analyses[J]. Earthquake Spectra, 2017, 33(3): 1149-1172.
- [9] TAKHIROV S M, FENVES G L, FUJISAKI E. Seismic qualification and fragility testing of line break 550 kV disconnect switches[R]. California: PEER, 2004.
- [10] GÜNAY S, MOSALAM K M. Seismic performance evaluation of high voltage disconnect switches using real-time hybrid simulation: II. Parametric study[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2014, 43(8): 1223-1237.
- [11] PAOLACCI F, GIANNINI R, ALESSANDRI S, et al. Seismic vulnerability assessment of a high voltage disconnect switch[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014 (67): 198-207.
- [12] BAI W, MOUSTAFA M A, DAI J. Seismic fragilities of high-

- voltage substation disconnect switches[J]. Earthquake Spectra, 2019, 35(4): 1559-1582.
- [13] PAN Haiyang, TIAN Li, FU Xing, et al. Sensitivities of the seismic response and fragility estimate of a transmission tower to structural and ground motion uncertainties[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020(167): 105941.
- [14] 孙珂珂, 姚灿江, 段晓辉, 等. 816 kV 直流旁路开关支柱复合套管抗震性能研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(4): 236-244.
- SUN Keke, YAO Canjiang, DUAN Xiaohui, et al. Seismic performance of composite bushing of 816 kV DC bypass switch pillar[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(4): 236-244.
- [15] CORNELL C A. Bounds on the reliability of structural systems[J]. Journal of the Structural Division, 1967, 93(1): 171-200.
- [16] DITLEVSEN O. Narrow reliability bounds for structural systems[J]. Journal of Structural Mechanics, 1979, 7(4): 453-472.
- [17] PAN Y, AGRAWAL A K, GHOSH M. Seismic fragility of continuous steel highway bridges in New York state[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6): 689-699.
- [18] 李立峰, 吴文朋, 黄佳梅, 等. 地震作用下中等跨径 RC 连续梁桥系统易损性研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 152-160.
- LI Lifeng, WU Wenpeng, HUANG Jiamei, et al. Study on system vulnerability of medium span reinforced concrete continuous girder bridge under earthquake excitation[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 152-160.
- [19] 吴文朋. 考虑不确定性的钢筋混凝土桥梁地震易损性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- WU Wenpeng. Seismic fragility of reinforced concrete bridges with consideration of various sources of uncertainty [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [20] WU Wenpeng, SHAO Xudong. Seismic assessment of medium-span concrete cable-stayed bridges using the component and system fragility functions[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(6): 1943-5592.
- [21] LI S, TSANG H H, CHENG Y, et al. Effects of sheds and cemented joints on seismic modelling of cylindrical porcelain electrical equipment in substations[J]. Earthquakes and Structures, 2017, 12(1): 55-65.
- [22] 沈世钊. 悬索结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- SHEN Shizhao. Design of suspension cable structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [23] KAROUMI R. Some modeling aspects in the nonlinear finite element analysis of cable supported bridges[J]. Computers & Structures, 1999, 71(4): 397-412.
- [24] CORNELL C A, JALAYER F, HAMBURGER R O, et al. Probabilistic basis for 2 000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526-533.
- [25] 李圣, 卢智成, 朱祝兵, 等. 变电站复合材料绝缘子的动力特性与地震易损性研究[J]. 工程力学, 2016, 33(4): 91-97.
- LI Sheng, LU Zhicheng, ZHU Zhubing, et al. Dynamic properties and seismic fragility of substation composite insulators[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 91-97.
- [26] SHOME N. Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures[D]. Ann Arbor: Stanford University, 1999.
- [27] 吕大刚, 刘洋, 于晓辉. 第二代基于性能地震工程中的地震易损性模型及正逆概率风险分析[J]. 工程力学, 2019, 36(9): 1-11.
- LYU Dagang, LIU Yang, YU Xiaohui. Seismic fragility models and forward-backward probabilistic risk analysis in second-generation performance-based earthquake engineering [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(9): 1-11.
- [28] 刘振林, 代泽兵, 卢智成. 基于 Weibull 分布的电瓷型电气设备地震易损性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1076-1081.
- LIU Zhenlin, DAI Zebing, LU Zhicheng. Weibull distribution based seismic vulnerability analysis of porcelain power equipment[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1076-1081.
- 刘威(1988—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电网电力设施抗震安全风险监测与评估技术等方面的研究(E-mail: 964563936@qq.com)。
- 李浩(1995—), 男, 硕士研究生, 结构工程师, 主要从事结构减隔震及防灾减灾技术研究(E-mail: 1715188945@qq.com)。
- 王建(1986—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为输变电设备故障诊断与防灾减灾技术(E-mail: yaowang360@163.com)
- 董新胜(1972—), 男, 硕士研究生, 正高级工程师, 主要从事电力防灾减灾技术研究工作(E-mail: dongxinsheng@foxmail.com)。