

耿风慧, 张国斌, 耿秋钰. 电力系统的抗震脆弱性评估模型设计与实现[J]. 华南地震, 2018, 38 (2): 40–46. [GENG Fenghui, ZHANG Guobin, GENG Qiuyu. Design and Implementation of Seismic Vulnerability Assessment Model for Power System[J]. South China journal of seismology, 2018, 38 (2): 40–46]

电力系统的抗震脆弱性评估模型设计与实现

耿风慧¹, 张国斌¹, 耿秋钰²

(1. 国网滨州供电公司 经济技术研究所, 山东 滨州 256610;

2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 传统基于多 Agent 的电力系统抗震脆弱性评估模型, 对电力系统抗震脆弱性实施分析时, 未考虑节点权重的分配情况, 评估效果不理想。因此, 设计基于层次分析法的电力系统抗震脆弱性评估模型, 基于电力系统节点服务类型和拓扑位置, 构建抗震脆弱性评价指标的层次分析模型, 基于该模型设置节点权值分配方案, 依据该方案采用层次分析法获取风险综合指标, 对节点脆弱性指标实施运算, 采集不同状态下的各节点脆弱性权值并进行平均运算, 获节点脆弱性指标值。基于节点脆弱性指标值, 通过层次分析法实现电力系统抗震脆弱性评估。实验结果说明, 所设计模型的抗震脆弱性评估结果精度和效率高。

关键词: 电力系统; 抗震脆弱性; 评估模型; 层次分析法; 节点权重; 节点脆弱性指标

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)02-0040-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.02.007

Design and Implementation of Seismic Vulnerability Assessment Model for Power System

GENG Fenghui¹, ZHANG Guobin¹, GENG Qiuyu²

(1. *Economic and Technical Research Institute, Binzhou Power Supply Company of the State Grid, Binzhou 256610, China;*

2. *Department of Electric Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China*)

Abstract: Traditional multi Agent based seismic vulnerability assessment model of power system does not consider the distribution of node weight when analyzing the seismic vulnerability of power system, and the evaluation result is not ideal. Therefore, the seismic design of power system based on AHP model of vulnerability assessment, service node type and location based on power system topology, construct the vulnerability evaluation index AHP model for seismic, node weight distribution scheme set based on the model, according to the scheme, using the analytic hierarchy process to obtain comprehensive risk index, vulnerability index of node

收稿日期: 2017-10-02

作者简介: 耿风慧(1970–), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向是电网供配电系统检修、运行、规划、设计等技术工作。

E-mail: gengfh@sohu.com.

implementation operation, acquisition of each node under different conditions of vulnerability and average weight, won the node vulnerability index value. Based on the index value of node vulnerability, the seismic vulnerability assessment of power system is realized by analytic hierarchy process (AHP). The experimental results show that the seismic vulnerability assessment results of the designed model are of high accuracy and efficiency.

Keywords: Power system; Seismic vulnerability; Evaluation model; Analytic hierarchy process; Node weight; Node vulnerability index

0 引言

随着社会的进步,电力系统朝着大型、高压以及新型的方向不断优化更新^[1]。电力系统的强大功能极大地改善了人类生活质量、提高了生活效率,但这也意味着电力系统一旦受到破坏,则会引发多领域的连锁故障,导致社会生活的正常运转陷入瘫痪状态^[2]。近年来,世界各地地震灾害频发,人类的各项生活设施的建设都会考虑到抗震性能。地震极易对电力系统造成破坏,造成难以避免的生命财产损失,没有了电力的供应,提高了抗震救灾的难度,因此,对于电力系统抗震脆弱性的研究成为时下热议的课题。传统基于多Agent的电力系统抗震脆弱性评估模型,对电力系统抗震脆弱性实施分析时,未考虑节点权重的分配情况,评估效率和精度都较低。因此,设计基于层次分析法的电力系统抗震脆弱性评估模型^[3],最终获取有效的电力系统抗震脆弱性评估方法。为电力系统的故障应对以及稳定发展提供了可靠的分析依据。

1 基于层次分析法的电力系统抗震脆弱性评估模型设计与实现

1.1 构建抗震脆弱性评价指标的层次分析模型

电力系统脆弱性会受到拓扑结构的干扰,将其作为评估电力系统脆弱性的依据。各个节点能够对电力系统脆弱性产生不同程度上的干扰^[4]。根据节点的度数与供电级数能够判断节点的系统拓扑位置。节点的服务类型也应作为分析电力系统脆弱性的重要依据,因为同一个拓扑位置上的节点产生的电力系统脆弱性干扰也存在差异^[5]。文章对服务类型的判断依据主要是不同节点处于地震发生状况下与源点的不连通概率,获取的抗震脆弱性评价指标层次分析模型,用图1描述。

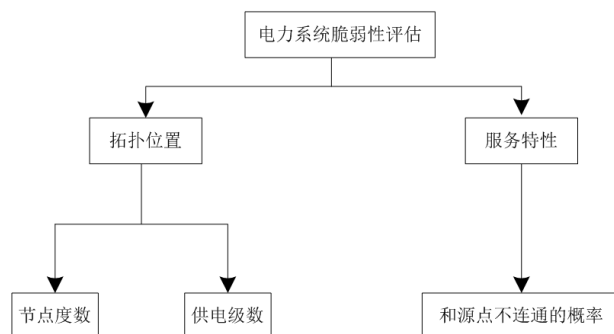


图1 抗震脆弱性评价指标的层次分析模型

Fig.1 The analytic hierarchy model of seismic vulnerability evaluation index

1.2 节点权值分配方案

基于抗震脆弱性评估的层次分析模型,定义合理的节点全权分配标准尤为重要,才能实现不同判断因素加权值的分配^[6]。基于对不同节点位于电力系统中拓扑位置与服务特性的分析,获取下列公式(1)、(2)所示的分配方案:

$$\sigma = \alpha + \beta \quad (1)$$

$$\alpha = d + l \quad (2)$$

其中,度数权值用 d 表示,级数权值用 l 表示。

地震损坏产生的节点和源点不连通的概率能够表达出节点的服务特性权值,通过公式(3)来表述:

$$\beta = P \quad (3)$$

其中,连通失效概率的权值用 P 描述。

设置公式(1)与(2)中 d 、 l 、 P 的表达式分别是:

$$d = d_0 d_1 \quad (4)$$

$$l = l_0 l_1 \quad (5)$$

$$P = P_0 P_1 \quad (6)$$

其中, d_0 、 l_0 、 P_0 属于常数,且均大于0,属于1的某种专属配置,其最优值应通过节点脆弱性受到来自拓扑位置与服务能力的干扰大小进行

获取。文章临时设置： $d_0=0.4$ 、 $l_0=0.4$ 、 $P_0=0.2$ ；且 d_i 、 l_i 、 P_i 满足大于 0 的常数的条件，基于对干扰电力系统抗震脆弱性的节点度数、供电级数、节点连通失效概率三种判断标准的分析，对它们实施量化，使得加权运算更加灵活、便捷^[7]。基于对电力系统的拓扑结构与服务性能的分析能够获取详细的量化标准计划，通过对本质上的电力系统规模、项目特性、相关研究人员建议的研究实现该计划的优化与整合^[8]。定义 m 表示节点的度数， n 表示级数， P_j 表示节点和源点连通失效概率。表 1 对文章使用的节点脆弱性指标标度分配方案进行描述。

表 1 节点脆弱性指标标度分配方案

Table 1 Node vulnerability index scale allocation scheme

标度	d_i	l_i	P_i
5	$m=1$	$n \geq 5$	$0.8 \leq P_f \leq 1.0$
4	$m=2$	$n=4$	$0.6 \leq P_f \leq 0.8$
3	$m=3$	$n=3$	$0.4 \leq P_f \leq 0.6$
2	$m=4$	$n=2$	$0.2 \leq P_f \leq 0.4$
1	$m \geq 5$	$n \leq 1$	$0 \leq P_f \leq 0.2$

1.3 节点脆弱性指标计算

基于节点权重分配方案，对节点脆弱性指标实施运算，为后续电力系统的抗震脆弱性评估提供可靠分析依据。

1.3.1 风险综合指标

评价电力系统综合风险水平的指标叫做风险综合指标，可以通过层次分析法进行获取^[9]。风险综合指标的分析与计算为节点脆弱性指标的研究提供数据依据^[10]。文章以电力系统大面积停电指标与快速恢复电力的指标进行分析与计算。

(1) 系统大面积停电综合风险水平。对电力系统地震损坏状况下的停电风险进行描述，通过评估其他的指标表达相应规模的电网。通过公式(7)计算系统大面积停电的综合风险水平：

$$\text{系统大面积停电综合风险水平} = \sum_{i=1}^3 (\text{一级指标得分}_i \times \text{一级指标权重}_i) \quad (7)$$

公式中，一级指标 $= \sum_{i=1}^{\text{二级指标}} (\text{二级指标得分}_i \times \text{二级指标权重}_i)$ ，二级指标 $= \sum_{i=1}^{\text{三级指标}} (\text{三级指标得分}_i \times \text{三级指标权重}_i)$ ，三级指标 $= \sum_{i=1}^{\text{四级指标}} (\text{四级指标得分}_i \times \text{四级指标权重}_i)$ 。

指标权重 $_i$ ，二级指标 $= \sum_{i=1}^{\text{三级指标}} (\text{三级指标得分}_i \times \text{三级指标权重}_i)$ ，三级指标 $= \sum_{i=1}^{\text{四级指标}} (\text{四级指标得分}_i \times \text{四级指标权重}_i)$ 。

(2) 停电后系统快速恢复能力。根据系统大面积停电快速恢复能力的相关因素，采用加权计算法获取该指标，从系统结构方面表达大面积停电快速恢复能力。通过公式(8)计算停电后系统快速恢复能力：

$$\text{停电后系统快速恢复能力} = \sum_{i=1}^{\text{快速恢复能力指标数}} (\text{快速恢复能力指标得分}_i \times \text{快速恢复能力权重}_i) \quad (8)$$

采用层次分析法根据节点权值分配方案获取综合指标权重 w_i ，与自身风险指数 R_i 的乘积就是风险综合指标，如公式(9)所示：

$$R = \sum_{i=1}^{\text{四级指标数}} P_i \times w_i \quad (9)$$

1.3.2 节点脆弱性指标计算

不同节点的抗震脆弱性指标可以通过上述得到的不同节点的权值以及风险综合指标进行获取。若要实现地震损坏之下的电力系统中不同节点的模拟，应对待研究的不同节点实施主动进攻操作^[11]。接着对各个状态下的不同节点脆弱性权值进行获取，将得到的数据值实施平均运算获取的结果就是节点脆弱性指标值。

定义图 2 中的有向图为电力系统网络图，对其进行分析。采用文章构建的权值分配方案与方法，对节点 2 受到地震损坏的状态进行模拟，并对该状态下不同节点的权值实施运算^[12]。若不同节点和源点 1 的不连通概率是已知的，获取的节点权值用表 2 描述。

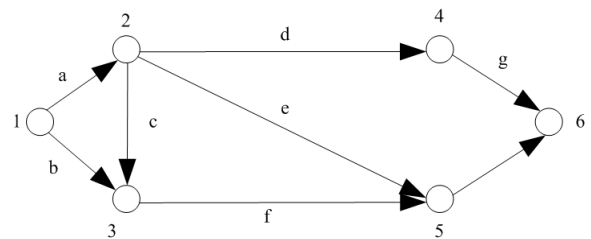


图 2 有向图

Fig.2 Digraph

采用上述方法对 6 个节点被地震损坏的状态进行模拟，分别得到不同状态下相应的权值，对权值结果实施平均运算获取的结果用表 3 描述，即不同节点的抗震脆弱性指标。

1.4 基于层次分析法的电力系统抗震脆弱性评估

基于上小节获取的节点脆弱性指标值，通过层次分析发评估电力系统抗震脆弱性情况。绝对

量化与相对量化法都属于量化方法的范畴^[13]。文章采用相对量化方法对构建的评价指标层次分析模型的脆弱性程度实施量化^[14]，基于量化结果采用层次分析发实现电力系统抗震脆弱性的准确评估。采用无实在意义的数对电力系统的抗震脆弱程度进行描述，是相对量化方法的主要过程。该数

据的取值根据脆弱程度实施正比例的赋值操作^[15]。赋值的大小是相对而言的，分级方法尚未形成统一体系，需通过对实际问题的分析进行调整与赋值^[16-17]。文章使用的节点脆弱性等级划分方法用表 4 描述，其中， V_i 表示不同节点的脆弱性指标， \bar{V} 表示脆弱性指标的平均值。

表 2 节点值计算
Table 2 Node value calculation

节点编号	节点 度数(n)	度数 标度(d)	节点 级数(m)	级数 标度(l)	位置 权值(α)	不连通 概率(P_i)	连通概 率标度(P)	特性 权值(β)	节点 权值(σ)	节点 度数(n)
1	1	1	1	5	2.4	0.788	4	0.8	3.2	1
2	0	1	2	4	2	0.967	5	1	3	0
3	2	2	2	4	2.4	0.976	5	1	3.4	2
4	1	1	3	3	1.6	0.132	1	0.2	1.8	1
5	2	2	3	3	2	0.967	5	1	3	2
6	2	2	4	2	1.6	0.439	3	0.6	2	2

表 3 节点脆弱性指标计算
Table 3 Calculation of node vulnerability index

节点标号	模拟管段编号						节点脆弱性指标
	1	2	3	4	5	6	
1	3.1	3.1	3.5	3.5	3.5	3.5	3.7
2	3.7	3.1	3.7	3.7	3.7	4.1	3.7
3	3.3	3.3	3.1	3.7	3.3	3.7	3.4
4	2.1	1.7	2.1	1.7	2.1	1.7	1.9
5	3.3	3.1	3.3	3.3	2.5	3.1	3.1
6	2.1	2.1	2.1	1.7	1.7	1.3	1.8

表 4 节点脆弱性等级
Table 4 Node vulnerability level

等级	严重程度标识	定义
5	脆弱性程度很高	$20\% \leq (V - \bar{V}) / \bar{V}$
4	脆弱性程度较高	$50\% \leq (V - \bar{V}) / \bar{V} < 20\%$
3	脆弱性程度一般	$-15\% \leq (V - \bar{V}) / \bar{V} < 5\%$
2	脆弱性程度较低	$-30\% \leq (V - \bar{V}) / \bar{V} < -15\%$
1	脆弱性程度很低	$(V - \bar{V}) / \bar{V} < 30\%$

文章基于层次分析法的电力系统抗震脆弱性研究，考虑到电力系统脆弱性来自节点的拓扑位置与服务特性的影响，最终获取图 3 描述的基于层次分析法的电力系统抗震脆弱性评估流程。

2 实验分析

实验为验证本文基于层次分析法的电力系统抗震脆弱性评估模型是否可以有效对电力系统的抗震脆弱性进行准确评估，以某地区的电力系统

为实例，对该电力系统进行抗震脆弱性评估，为突出显示本文模型对电力系统的抗震脆弱性评估结果，以传统基于相继故障的电力系统抗震脆弱性评估模型对电力系统的评估结果为实验参照，表 5 和表 6 分别为两种模型对该电力系统中不同节点进行抗震脆弱性的评估结果。

从表 5 和表 6 数据可以看出，本文模型和传统基于相继故障的电力系统抗震脆弱性评估模型对同一电力系统的抗震脆弱性评估结果不同，将两种模型对电力系统中不同节点的抗震脆弱性评估结果与该电力系统实际的抗震脆弱性评估等级进行比较，结果如图 4 所示。

从图 4 可以清楚看出，采用本文模型对电力系统的抗震脆弱性评估结果与该电力系统实际的抗震脆弱性评估结果的偏差程度较小，偏差程度在-5%至 5%之内且波动变化不明显，说明本文模型的抗震脆弱性评估结果精度较高，结果较准确；而传统基于相继故障的电力系统的抗震脆弱性评

估模型与实际电力系统的抗震脆弱性评估结果偏差程度较大，偏差程度在 15%左右且不同节点的误差波动偏大；综合说明，本文模型对电力系统的抗震脆弱性评估结果较准确，可信度较高。

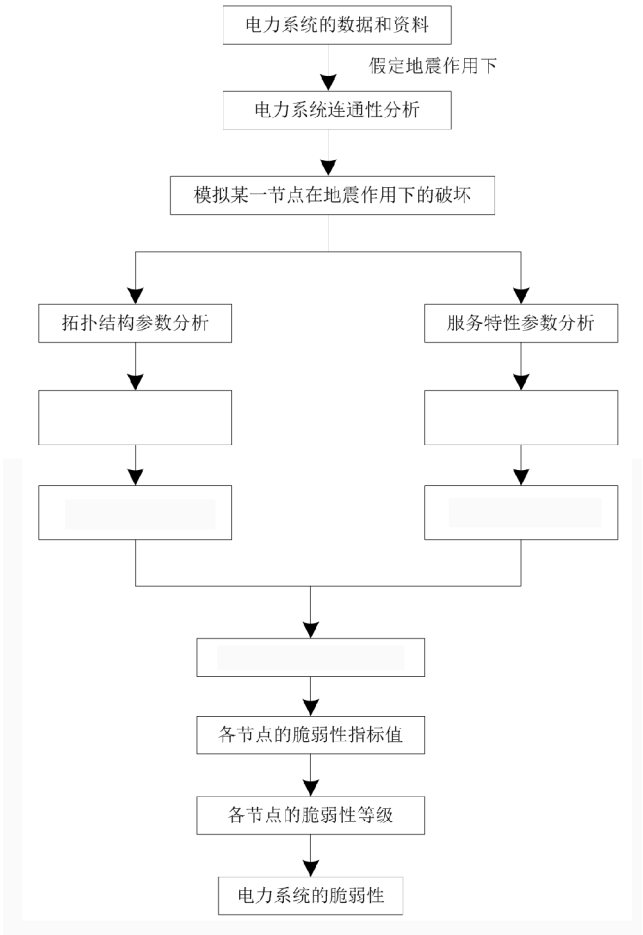


图 3 基于层次分析法的电力系统抗震脆弱性评估流程

Fig.3 The seismic vulnerability assessment process of power system based on AHP

表 5 本文模型对电力系统中节点的脆弱性评估等级
Table 5 The vulnerability assessment level of this model to the nodes in the power system

节点编号	节点脆弱指标 V	$(V-\bar{V})/\bar{V}(\%)$	抗地震损伤级别
1	3.01	7.36	3
2	3.13	11.59	4
3	3.35	29.41	5
4	2.41	-13.19	2
5	3.16	12.41	4
6	2.01	-26.86	1
7	1.71	-38.11	1
8	3.88	37.21	5
9	2.01	-26.86	1
10	2.01	-26.86	1
11	3.18	23.44	4
12	2.81	-0.23	3
13	3.61	28.03	5
14	2.64	-5.28	2
15	2.44	-12.17	2

表 6 基于相继故障的电力系统抗震脆弱性评估模型对节点的脆弱性评估等级
Table 6 Vulnerability assessment level of power system seismic vulnerability assessment model based on successive failures

节点编号	节点脆弱指标 V	$(V-\bar{V})/\bar{V}(\%)$	抗地震损伤级别
1	1.315	93.431	4
2	1.308	94.367	4
3	1.374	99.141	6
4	1.258	90.788	3
5	1.251	91.126	3
6	1.221	89.31	2
7	1.274	92.081	4
8	1.421	98.813	6
9	1.214	89.772	2
10	1.214	89.772	2
11	1.434	100	6
12	1.301	95.182	5
13	1.322	95.422	5
14	1.249	91.114	3
15	1.247	90.026	3

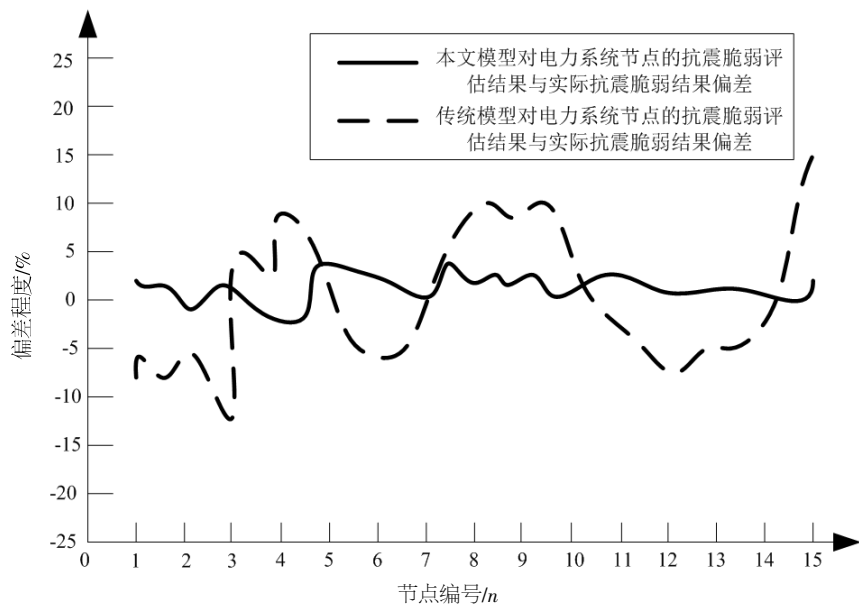


图 4 两种模型对电力系统节点的抗震脆弱性评估结果与实际偏差

Fig.4 Seismic vulnerability assessment results and actual deviations of two models for power system nodes

将本文模型应用于实际时，不仅要考虑模型对电力系统抗震脆弱评估结果的准确性，还需将模型得到准确评估结果的用时考虑在内，因此实验还需要对本文模型和传统基于相继故障电力系统的抗震脆弱性评估模型得到准确的评估结果用时进行比较。两种模型抗震脆弱性评估结果用时的评判标准以该电力系统的标准评估用时为基准。表 7 为两种模型的抗震脆弱性评估结果和电力系统的标准评估用时。为突出表明两种模型对电力系统的抗震脆弱性评估结果用时，实验将表 7 中的数据用折线的形式进行描绘，结果用图 5 表示。

从图 5 可以清晰的看出，采用本文模型对电力系统进行抗震脆弱性分析用时与标准用时结果相差不多，与标准用时结果的最大差距为 0.5 s，且对电力系统中不同节点的抗震脆弱性结果的用时在 3.2~3.6 s 之间，差距较小，说明本文模型在评估电力系统的抗震脆弱性时具有较高的稳定性；传统基于相继故障电力系统的抗震脆弱性评估模型评估电力系统的抗震脆弱性用时普遍在 4 s 以上，与标准用时差距都在 1 秒以上，抗震脆弱性评估效率较低；综合分析结果得出，本文模型可提高对电力系统抗震脆弱性评估效率。

表 7 电力系统的抗震脆弱性评估用时
Table 7 Seismic vulnerability assessment time for power systems

节点编号	本文模型评估用时/s	标准评估用时/s	差值/s	传统模型评估用时/s	标准评估用时/s	差值/s
1	3.2	3.0	0.2	4.2	3.0	1.2
2	3.4	3.1	0.3	4.3	3.1	1.2
3	3.5	3.2	0.3	4.4	3.2	1.2
4	3.1	3	0.1	4.1	3	1.1
5	3.5	3.1	0.4	4.2	3.1	1.1
6	3.2	3.2	0	5.1	3.2	1.9
7	3.5	3.2	0.3	4.6	3.2	1.4
8	3.4	3	0.4	4.8	3	1.8
9	3.6	3.1	0.5	4.1	3.1	1
10	3.4	3.2	0.2	4.3	3.2	1.1
11	3.2	3.3	-0.1	4.7	3.3	1.4
12	3.3	3.4	-0.1	5.2	3.4	1.8
13	3.4	3.5	-0.1	5	3.5	1.5
14	3.2	3.2	0	4.6	3.2	1.4
15	3.3	3.2	0.1	4.2	3.2	1

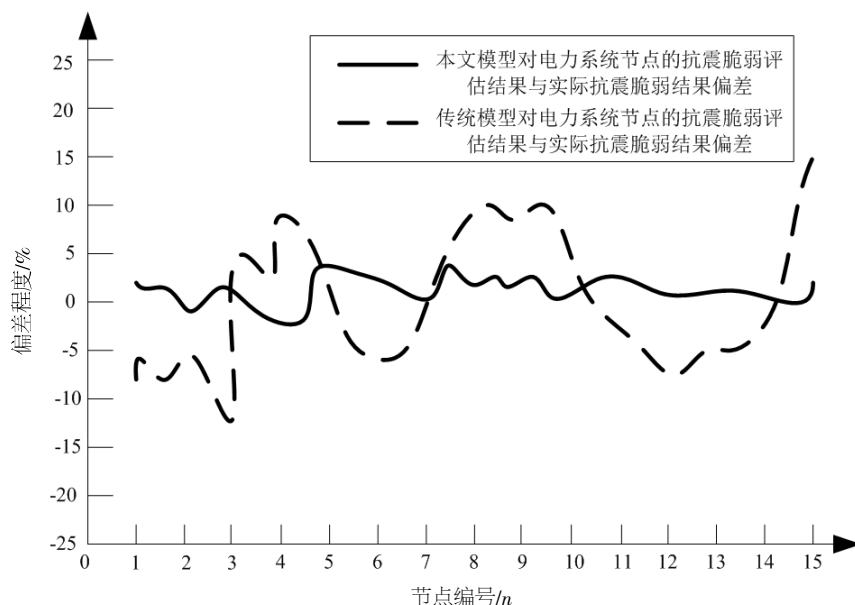


图5 两种模型估计电力系统抗震脆弱性用时与标准用时偏差

Fig.5 Time and time deviation for seismic vulnerability assessment of power systems by two models

4 结论

本文设计的基于层次分析法的电力系统抗震脆弱性评估模型, 可以提高对电力系统的抗震脆弱性估计精度, 缩短电力系统抗震脆弱性估计用时, 提高模型估计结果的效率。

参考文献:

- [1] 石立宝, 简洲. 基于动态攻防博弈的电力信息物理融合系统脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 99-105.
- [2] 丁少倩, 林涛, 徐退龄, 等. 基于改进的 AHP-熵权法的电网综合脆弱性评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(4): 28-33.
- [3] 雷成, 刘俊勇, 魏震波, 等. 计及网络传导能力与抗干扰能力的节点综合脆弱评估模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 144-149.
- [4] 陈卓, 李华强, 周柯宇, 等. 考虑风电场影响的电力系统支路脆弱性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 37-43.
- [5] 周兰, 岳耀杰, 栗健, 等. 冰雹灾害承灾个体脆弱性评估研究进展[J]. 中国农业气象, 2014, 35(3): 330-337.
- [6] 程光权, 陆永中, 张明星, 等. 复杂网络节点重要度评估及网络脆弱性分析[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(1): 120-127.
- [7] 郑乔, 邱晓燕, 刘念, 等. 基于输电线路脆弱性评估的连锁故障预防控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 32-36.
- [8] 王志强, 李欣, 李岩, 等. 基于复杂网络与风险的电网综合脆弱性评估[J]. 现代电力, 2014, 31(3): 49-55.
- [9] 佟瑞鹏, 李丹, 翟存利. 社区安全脆弱性评估模型的构建与应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(3): 108-112.
- [10] 门永生, 金龙哲, 于振, 等. 基于三角图法的输电线路物理脆弱性评估及分类[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(2): 15-19.
- [11] 郑卫锋, 韩杨春, 聂兰磊. 输电线路岩石嵌固基础抗拔试验及数值模拟分析[J]. 地震工程学报, 2016, 38(5): 738-744.
- [12] 张伟, 董群锋. 云安全综合分析系统的设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(19): 89-94.
- [13] 袁海红, 牛方曲, 高晓路. 城市经济脆弱性模拟评估系统的构建及其应用[J]. 地理学报, 2015, 70(2): 271-282.
- [14] 熊世旺, 郭创新, 何宇斌, 等. 考虑线路介数和 well-being 风险贡献度的电网脆弱线路评估[J]. 电力建设, 2015, 36(12): 84-90.
- [15] 向驰, 石文娟, 于伟, 等. 新型城镇配电网形态特征及典型供电模式[J]. 电力工程技术, 2016, 35(3): 64-67.
- [16] 王文明, 易思银, 田利, 等. 跨越断层地震动对结构地震反应的研究进展[J]. 地震工程学报, 2017, 39(3): 578-586.
- [17] 马志程, 杨鹏, 张雪锋, 等. 云计算环境下的电力系统动态风险评估方法研究[J]. 现代电子技术, 2016, 39(18): 165-167.