

地震条件下计及杆塔结构可靠度的电网可靠性评估研究

郝文斌¹, 张亚刚², 牟淼¹

(1. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

摘要: 地震会对电网造成破坏性影响, 目前对于地震条件下电网可靠性评估主要进行抗震性能的分析, 所得近似分析结果满足不了实际需要。在对地震条件下电网可靠性评估中考虑了输电杆塔结构可靠度与地震的传播性, 采用有限元仿真手段直接分析了输电杆塔的结构问题; 利用杆塔结构可靠度来计算输电线路故障率, 在得到输电线路可靠性数据后评估了各个地震烈度下电力系统的可靠性; 最后计及地震的传播性评估了电网的综合可靠性。地震条件下计及杆塔结构可靠度的电网可靠性评估模型可用于地震条件下电网薄弱环节的预警, 为改善电力系统抗震性能提供参考。

关键词: 地震; 有限元分析; 杆塔结构可靠度; 蒙特卡洛; 电力系统可靠性

中图分类号: TM507 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)04-0017-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.04.004

Research on Reliability Evaluation of Power Grid Considering Structural Reliability of Tower under Seismic Conditions

Hao Wenbin¹, Zhang Yagang², Mou Miao¹

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shanxi, China)

Abstract: Earthquakes can have devastating effects on power grid. At present, the approximate analysis of seismic performance is the main method to evaluate the reliability of power grid under seismic condition, but the approximate analysis results can not meet the actual needs. So, the reliability of transmission towers and the propagation of earthquakes are considered in the reliability evaluation of power grids under seismic condition. The finite element simulation method is used to directly analyze the structural problems of the tower. The reliability of transmission line is calculated by using the tower reliability. After obtaining the reliability data, the reliability of power system under each seismic strength is evaluated. Finally, the propagation of earthquake is considered. The overall reliability of power system is evaluated. The reliability evaluation results of grid reliability under seismic condition can be used to identify the vulnerable links of power system and provide a reference for improving the seismic performance of power system.

Key words: earthquake; finite element analysis; structural reliability of tower; Monte Carlo; power system reliability

0 引言

地震灾害会对电力系统造成破坏性影响, 严重时会造成输电杆塔倒塌、输电线路断线、输电网络解列等严重后果, 会使得电网大面积瘫痪, 严重影响到国家经济与人民的正常生活。在近代的多次地震灾害中, 如1976年中国唐山大地震、1989年美国 Loma Prieta 地震、1995年日本阪神地震、1999年中国台湾

大地震和2008年中国汶川大地震等都使得电力系统遭到严重破坏。2008年5月12日中国汶川8.0级大地震, 造成直接经济损失超过106亿元, 由于地震造成246万用户停电^[1], 因此对地震条件下电网可靠性评估进行研究成为一个至关重要的问题。

国外关于电力系统抗震可靠性研究主要从电气设备层次、变电站层次和电力网络层次进行抗震可靠性研究。其中电气设备层次及变电站层次的抗震可靠性研究相对成熟, 电力网络层次的抗震可靠性

研究处于初步阶段,还未达到工程应用^[2-4]。国内对于这方面研究起步较晚,其研究工作主要是进行电力网络抗震性能的近似分析。

目前地震条件下输电线路故障率的求取主要有3种常见思路:1)根据历史统计数据来模糊估计各个地震烈度下输电线路的停运率^[5];2)直接通过输电线路与地震荷载的数学模型来计算输电线路的停运率^[6];3)通过有限元仿真等手段直接分析各个地震烈度下输电杆塔和输电线路的结构问题^[7-9]。首先各个地区地理环境差异较大,地震烈度分布不同,因此收集不到足够的历史数据来反应地震烈度与线路停运率的关系;其次利用数学模型进行近似分析得到的线路停运率不是十分精确。为此,下面基于有限元法利用 ANSYS 软件来计算各个地震烈度下杆塔构件与电缆的地震荷载,使用 JC 法与窄界限法构建的模型来求杆塔构件与电缆的可靠度;利用所得到的结构可靠度数据来求取输电线路的故障率;最后利用得到的输电线路可靠性数据进行电力系统可靠性评估。评估结果可以用于对地震条件下电网薄弱环节的预警,为改善电力网络抗震性能提供参考。

1 输电杆塔与电缆的地震荷载

1.1 荷载效应

荷载效应^[10]包括恒载效应 S_G 和活载效应 S_Q 。就输电杆塔而言,其承受的恒载效应 S_G 主要包括输电导线、接地线、绝缘子、各种固定设备、杆塔本体结构以及土石方等的重力荷载。活载效应 S_Q 包括风、冰雪、地震烈度、元件张力等。

1.2 地震荷载

基于有限元法利用 ANSYS 软件来计算各个地震烈度下杆塔构件与电缆的地震荷载 S_Q (单位: N, 下同)。ANSYS 建模的杆塔模型选用《国家电网公司输变电工程通用设计 220 kV 输电线路分册》中 2C3-J2-1 塔型。选用 beam 188 和 link 180 作为基本单元,弹性模量取 2.06×10^{11} , ν 泊松比取 0.3, 密度取 $7.85 \times 10^3 \text{ g/cm}^3$, g 取 9.80665 m/s^2 。4 个塔腿与地面接触点约束类型为全约束,经过 ANSYS 模态分析和谱分析可得到各个地震烈度下杆塔构件的地震荷载 S_Q 。高压输电电缆主要敷设在电力隧道中。由于电缆隧道为地下结构,且电缆固定接于支架上,由此可以取一段两个接头之间的电缆作为研究对象。选用 YJLW02 64/110 1×630 电缆,最大侧

压力为 5000 N/m。由 GB 50011-2010《建筑抗震设计规范》,取设计基本地震加速度如表 1 所示^[11]。

表 1 设计基本地震加速度

抗震设防烈度	设计基本地震加速度值
6	0.05g
7	0.15g
8	0.20g

根据电缆自重以及支架夹具作用面积,可求得不同地震烈度下电缆段的等效地震荷载 S_Q 。

2 杆塔与电缆的结构可靠度

2.1 构件功能函数

为保证输电杆塔及输电线路在使用过程中的可靠性和安全性,采用基于概率理论的极限状态法来设计输电杆塔结构^[12],输电杆塔结构构件用可靠度指标来进行评价和设计。输电杆塔构件的极限状态^[13]是指杆塔构件在规定的各种载荷作用下,可以保持输电线路安全可靠运行的临界状态。可得到输电杆塔构件的功能函数为

$$Z = G(R, S_G, S_Q) = R - S_G - S_Q \quad (1)$$

式中: $Z=0$ 表示杆塔结构为极限状态, $Z>0$ 表示杆塔结构为可靠状态, $Z<0$ 表示杆塔结构为失效状态; R 为结构抗力,服从对数正态分布; S_G 为恒载效应,服从正态分布; S_Q 为活载效应,服从极值 I 型分布。

2.2 杆塔构件与电缆段的结构可靠度

结构的可靠度^[14],是指结构在给定的时间内和给定的条件下,完成预定功能的能力。结构可靠度是将可靠性量化后得到的概念,也即结构在给定的时间内和给定的条件下,完成预定功能的概率。杆塔构件的结构可靠度为

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_{S_G} - \mu_{S_Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_{S_G}^2 + \sigma_{S_Q}^2}} \quad (2)$$

式中: β 为杆塔构件的结构可靠度; $\mu_Z, \mu_R, \mu_{S_G}, \mu_{S_Q}$ 分别为 Z, R, S_G, S_Q 的期望值; $\sigma_Z, \sigma_R, \sigma_{S_G}, \sigma_{S_Q}$ 分别为 Z, R, S_G, S_Q 的标准差。

杆塔构件的失效概率为

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; p_f 为杆塔构件的失效概率; β 为杆塔构件的可靠度。

由上述可以求得杆塔构件与电缆段的故障率如表2、表3所示。

表2 各个地震烈度下杆塔构件的故障率

杆塔构件	$p_f(6)$	$p_f(7)$	$p_f(8)$
3916	2.38×10^{-10}	4.54×10^{-10}	1.21×10^{-9}
3895	2.17×10^{-5}	3.34×10^{-5}	6.41×10^{-5}
3413	8.47×10^{-11}	1.27×10^{-10}	2.34×10^{-10}
3958	1.02×10^{-7}	1.79×10^{-7}	4.20×10^{-7}
3850	1.75×10^{-8}	3.21×10^{-8}	8.07×10^{-8}
3826	5.73×10^{-5}	8.65×10^{-5}	1.61×10^{-4}

表3 各个地震烈度下电缆段的故障率 p_f

$p_f(6)$	$p_f(7)$	$p_f(8)$
5.93×10^{-5}	1.86×10^{-4}	1.50×10^{-3}

2.3 杆塔体系的可靠度

输电杆塔体系是由大量的构件组成,当某一个杆塔构件失效时,杆塔整体不一定会失效。因此利用“窄界限法”来计算输电杆塔整体可靠度^[15-16],可以得到杆塔整体失效概率 p_{fs} 取值的上下限。根据窄界限法的原理,杆塔整体失效概率的范围为

$$\begin{cases} \max(p_{fi} - \sum_{j=1}^{i-1} p_{fij}, 0) \leq p_{fs} \\ p_{fs} \leq \sum_{i=1}^m p_{fi} - \sum_{i=2}^m \max_{j < i} p_{fij} \end{cases} \quad (4)$$

式中: p_{fs} 为结构体系整体失效概率; i, j 为失效模式; m 为失效模式数量; p_{fij} 为 i, j 两个失效模式同时失效的概率。

由此可以得到杆塔体系在各个地震烈度下的失效概率 P_s 为如表4所示。

表4 各个地震烈度下杆塔体系的失效概率

$P_s(6)$	$P_s(7)$	$P_s(8)$
7.90×10^{-5}	1.20×10^{-4}	2.25×10^{-4}

3 地震条件下计及杆塔结构可靠度的电网可靠性评估模型

所建立的地震条件下计及杆塔结构可靠度的电网可靠性评估模型,主要关注地震对输电杆塔体系结构可靠度和电缆结构可靠度的影响,计算杆塔体系与电缆失效的条件下输电线路故障的概率,然后分析各个地震烈度下输电杆塔体系与电缆结构可靠度变化对电网可靠性的影响。模型的基本步骤如下。

步骤1: 确定待评估电力系统所在区域的地震烈度分布。

步骤2: 基于有限元法利用 ANSYS 软件对输电杆塔与电缆进行建模,建模完成之后对输电杆塔与电缆进行模态分析与谱分析,计算求得各个地震烈度下输电杆塔构件与电缆的地震荷载 S_Q 。

步骤3: 在得到地震荷载 S_Q 之后,利用杆塔构件的功能函数里各个影响因素的统计参数得到输电杆塔构件与电缆的可靠度 β 与失效概率 p_f 。

步骤4: 这里主要关注杆塔与电缆的结构可靠度,因此做了简化处理,假设输电线路是由若干输电杆塔或电缆段组成的串联系统,即可得到输电线路故障率为 $P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \bar{p}_{fi})$ 。式中: \bar{p}_{fi} 为第 i 个杆塔或者电缆段的失效概率; n 为该输电线路杆塔或者电缆段的数量。

步骤5: 根据得到的系统可靠性数据,利用蒙特卡洛抽样法对系统进行可靠性评估,计算各个地震烈度下的可靠性指标,可靠性指标采用电量不足期望 EENS(expected energy not supplied) 与电力不足概率 LOLP(loss of load probability)。分析地震条件下系统的薄弱环节。

步骤6: 考虑系统所在区域的地震烈度不是均匀分布的,对系统所在区域的地震烈度分布进行划分,重新计算不同震源位置时输电线路的故障率,分析震源位置对系统可靠性的影响。

4 算例分析

采用 IEEE - RTS79 系统作为可靠性评估的测试系统,IEEE - RTS79 系统包含 33 条线路(31 条架空线路、2 条电缆)、5 台变压器、1 台电抗器、32 台发电机和 24 条母线。

4.1 各个地震烈度下电网的可靠性评估

根据上述模型,可以得到地震条件下电网的可靠性评估结果,表5给出了各个地震烈度下的电力系统可靠性指标。

表5给出了正常、六级地震烈度、七级地震烈度与八级地震烈度下电力系统的可靠性指标,可以发现随着地震烈度的增大,系统的可靠性指标 LOLP 与 EENS 在增大,这表明地震烈度越大对于电力系统的危害越大,说明所提出的评估模型可以用于评估各个地震烈度下电力系统的可靠性。

表5 各个地震烈度下电力系统可靠性指标

地震烈度	LOLP	EENS/(MWh·a ⁻¹)
正常	0.007 6	582.173 7
六级	0.067 5	7 737.497 1
七级	0.151 3	16 847.061 0
八级	0.318 4	36 222.612 5

参考文献

[1] 王茜. 供电系统抗震可靠性分析及脆弱性评估[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

[2] 贺海磊, 郭剑波, 谢强. 电气设备的地震灾害易损性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 25-28.

[3] Vanzi I. Seismic Reliability of Electric Power Networks: Methodology and Application[J]. Structural Safety, 1996, 18(4): 311-327.

[4] Liu G Y, Liu C W, Wang Y J. A Study on Seismic Response and Vulnerability of Electric Power System[C]// Second Proceeding of Japan-Taiwan Workshop on Life-line Performance and Disaster Mitigation, Kobe, Japan: Japan-Taiwan Workshop, 2002: 176-183.

[5] 韩卫恒, 刘俊勇, 张建明, 等. 冰冻灾害下计入地形及冰厚影响的分时段电网可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 81-86.

[6] 孙荣富, 程林, 孙元章. 基于恶劣气候条件的停运率建模及电网充裕度评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 7-12.

[7] John B Bowles. Commentary - Caution: Constant Failure-rate Models May Be Hazardous to Yours Design[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2002, 51(3): 375-377.

[8] 陈蓉. 输电线路的整体可靠度研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

[9] 姚陈果, 李宇, 周泽宏, 等. 基于极限承载力分析的覆冰输电塔可靠性评估[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2609-2614.

[10] 白海峰. 输电塔线体系环境荷载致振响应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

[11] 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010[S]. 2016.

[12] Robert E. Melchers. Structural Reliability Analysis and Prediction[M]. John Wiley & Son Ltd, 1999.

[13] 冯云芬. 可靠度理论在结构设计中的若干应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.

[14] 瞿文举. 基于承载能力极限状态的混凝土结构耐久性概率设计[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.

[15] 郑道钦. 极值I型-正态模式结构可靠性当量正态设计法[J]. 福建: 福建师范大学学报(自然科学版), 1987, 3(2): 1-9.

[16] 余鹏. 计及不同灾害条件下杆塔可靠度的电网可靠性评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

作者简介:

郝文斌(1976), 博士, 教授级高级工程师, 从事电力系统规划及调度运行研究;

张亚刚(1995), 硕士, 研究方向为重大灾害下电网可靠性评估。

(收稿日期: 2019-05-21)

4.2 计及地震传播性的电网综合可靠性评估

前面假设系统区域的地震烈度是均匀分布的, 统一为一个等级, 而在实际情况中却不是这样的, 基于这些考虑, 利用汶川地震的烈度分布对 IEEE-RTS79 系统进行了划分, 假设震源分别在系统区域的中心、西北方向、东北方向、西南方向、东南方向, 将系统区域分别划分为 6、7、8 三个震烈强度区域。重新计算了不同震源位置时系统输电线路的故障率, 随后对系统的可靠性进行了综合评估, 见表 6。相比于表 5 中不考虑地震传播性的电力系统可靠性评估结果, 表 6 中的可靠性评估结果可以更综合地反映地震对于电力系统可靠性的影响。

表6 不同震源位置时电力系统的可靠性指标

震源位置	LOLP	EENS/(MWh·a ⁻¹)
中心	0.079 4	7 719.032
西北	0.086 8	8 123.037
东北	0.067 1	7 218.386
西南	0.188 1	17 324.421
东南	0.295 9	35 413.312

5 结 语

提出了一种地震条件下计及杆塔结构可靠度的电网可靠性评估模型, 并在 IEEE-RTS79 系统上进行了验证, 所取得的研究成果如下:

1) 利用 ANSYS 对于杆塔和电缆进行有限元分析, 分析得到杆塔构件和电缆在各个震烈强度下的地震荷载; 根据所得到的荷载数据, 利用 JC 法与窄界限法求得了杆塔体系与电缆的故障率; 随后将输电线路简化为由架空线杆塔与电缆组成的串联系系统, 计算得到了各条输电线路的故障率。

2) 根据得到的可靠性数据利用蒙特卡洛抽样模拟法对系统进行可靠性评估, 得到各个震烈强度(6、7、8)下系统的可靠性指标, 同时考虑地震从震源中心的传播性, 计算了计及地震传播性的电网可靠性综合评估指标。

3) 算例分析结果表明所提出的模型能够对地震条件下电网薄弱环节进行预警, 为改善电力网络抗震性能提供参考。